Hans B. Kief
Helmut A. Roschiwal

CNC-Handbuch 2013/2014



HANSER

Hans B. Kief
Helmut A. Roschiwal

CNC-Handbuch

2013/14

CNC · DNC · CAD · CAM · FFS · SPS · RPD · LAN
CNC-Maschinen · CNC-Roboter · Antriebe · Energieeffizienz
Werkzeuge · Simulation · Fachwortverzeichnis

HANSER

Die Herausgeber:
Hans B. Kief, Michelstadt
Helmut A. Roschiwal, Augsburg



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Zu diesem Buch wird für Dozenten eine Power-Point-Präsentation im Internet angeboten, vorgesehen zur Unterstützung der Vorlesungen über CNC-Technik. Der Foliensatz besteht aus über 400 Folien mit erläuternden Notizen und ist abgestimmt auf das CNC-Handbuch 13/14. Um die Dateien herunterladen zu können, loggen Sie sich ein oder melden Sie sich an unter: https://dozentenportal.hanser.de/

© 2013 Carl Hanser Verlag München
Gesamtlektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg
Herstellung: Steffen Jörg
Titelillustration: Atelier Frank Wohlgemuth, Bremen
Coverconcept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München
Umschlaggestaltung: Stephan Rönigk
Gesamtherstellung: Kösel, Krugzell
Ausstattung patentrechtlich geschützt. Kösel FD 351, Patent-Nr. 0748702
Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-43537-7
E-Book ISBN: 978-3-446-43718-0

www.hanser-fachbuch.de

Lieber Leser,

die erste Ausgabe dieses Handbuches erschien 1976 und hatte einen Umfang von ca. 200 Seiten. Ihr vorliegendes Buch hat das 3-fache Volumen und widerspiegelt damit die Entwicklung der CNC-Technologie. NC und CNC haben innerhalb einer Ingenieurgeneration in Verbindung mit der Werkzeugmaschine sowohl die technische Qualität der Produkte, als auch unsere Lebensqualität wesentlich verbessert. Heute lassen sich Teile mit einer Präzision und Wirtschaftlichkeit herstellen, die noch vor 20 Jahren nicht vorstellbar war.

Wer heute in der Fertigungstechnik tätig ist, muss sich nicht nur mit CNC-Maschinen, sondern mit einer Vielzahl von CNC-unterstützenden Computersystemen befassen. Diese haben im Verlauf von wenigen Jahren eine enorme Bedeutung erreicht. Um das Verständnis des Zusammenwirkens zu erleichtern, wird z.B. über computergestützte ***Programmiersysteme*** *berichtet, wie* ***DNC-Rechner*** *Lochstreifen und Lesegeräte ersetzt haben und wie* ***Bus-Systeme*** *die Datenübertragung sicherer machen.* ***CNC und SPS*** *waren die wichtigsten Verbesserungen der Steuerungstechnik. Der größte Schritt war jedoch die Entstehung von* ***CAD-Systemen*** *mit der Möglichkeit, die erzeugten Daten in nachgeschalteten* ***CAM-Systemen*** *für die NC-Programmierung und Simulation zu nutzen.*

Aber auch die ***CNC-Maschinen*** *haben durch elektronische Systeme markante Entwicklungsschritte erlebt. Das erfolgreiche Zusammenwirken von Computern und Fertigungsideen hat zu völlig neuen Maschinen geführt: Maschinen die mit Wasserstrahl unterschiedliche Materialien schneiden oder mittels Laserlicht und Monomeren die* ***generativen Fertigungssysteme*** *ermöglichen. Die Entwicklung von Mechanik, NC, Computer, Informatik und Sensorik waren von Anfang an sehr eng miteinander verbunden, was zielgenau zur* ***digitalen Fertigung*** *geführt hat.*

Wir sehen es auch weiterhin als eine interessante Aufgabe, den Lesern sowohl einen Gesamtüberblick über das große Gebiet der digitalen Fertigungstechnik, als auch das notwendige, aktuelle Grundwissen verständlich zu vermitteln. Dazu wurden in dieser Ausgabe folgende Beiträge aktualisiert:

- *Energieeffizienz – eine Kennziffer für Werkzeugmaschinen*
- *Werkzeuge und Werkzeugsystematik für CNC-Maschinen*
- *Prozessadaptierte Auslegung von Werkzeugmaschinenantrieben*

Heute ist es nicht mehr möglich, dass ein einzelner Autor alle CNC-relevanten Fachbereiche detailliert beherrscht und diese von den Grundlagen bis zu einem technisch anspruchsvollen Level beschreiben kann. Deshalb möchten wir uns bei ***allen Autoren und Rezensenten*** *für ihre engagierte Unterstützung bedanken!*



Hans B. Kief



Helmut Roschiwal

Inhaltsverzeichnis

Teil 1 Einführung in die CNC-Technik ... 13

1 Historische Entwicklung der NC-Fertigung ... 15

1.1 Erste Nachkriegsjahre ... 15
1.2 Wiederaufbau der Werkzeugmaschinenindustrie ... 16
1.3 Weltweite Veränderungen ... 16
1.4 Neue, typische NC-Maschinen ... 17
1.5 Der japanische Einfluss ... 17
1.6 Die deutsche Krise ... 18
1.7 Ursachen und Auswirkungen ... 18
1.8 Flexible Fertigungssysteme ... 19
1.9 Weltwirtschaftskrise 2009 ... 20
1.10 Situation und Ausblick ... 21
1.11 Fazit ... 22

2 Meilensteine der NC-Entwicklung ... 24

3 Was ist NC und CNC? ... 29

3.1 Der Weg zu NC ... 29
3.2 Hardware ... 30
3.3 Software ... 32
3.4 Steuerungsarten ... 32
3.5 NC-Achsen ... 34
3.6 SPS, PLC ... 36
3.7 Anpassteil ... 39
3.8 Computer und NC ... 39
3.9 NC-Programm und Programmierung ... 42
3.10 Dateneingabe ... 43
3.11 Bedienung ... 45
3.12 Zusammenfassung ... 46

Teil 2 Funktionen der CNC-Werkzeugmaschine ... 53

1 Weginformationen ... 55

1.1 Einführung ... 55
1.2 Achsbezeichnung ... 55
1.3 Lageregelkreis ... 58
1.4 Positionsmessung ... 61
1.5 Vorschubantriebe ... 74
1.6 Zusammenfassung ... 87

2 Schaltfunktionen ... 90
2.1 Erläuterungen ... 90
2.2 Werkzeugwechsel ... 91
2.3 Werkzeugwechsel bei Drehmaschinen ... 91
2.4 Werkzeugwechsel bei Fräsmaschinen und Bearbeitungszentren ... 93
2.5 Werkzeug-Identifikation ... 95
2.6 Werkstückwechsel ... 98
2.7 Drehzahlwechsel ... 102
2.8 Vorschubgeschwindigkeit ... 103
2.9 Zusammenfassung ... 103

3 Funktionen der numerischen Steuerung ... 106
3.1 Definition ... 106
3.2 CNC-Grundfunktionen ... 106
3.3 CNC-Sonderfunktionen ... 112
3.4 Anzeigen in CNCs ... 128
3.5 Offene Steuerungen ... 128
3.6 Preisbetrachtung ... 131
3.7 Vorteile neuester CNC-Entwicklungen ... 133
3.8 Zusammenfassung ... 134

4 SPS – Speicherprogrammierbare Steuerungen ... 139
4.1 Definition ... 139
4.2 Entstehungsgeschichte der SPS ... 139
4.3 Aufbau und Wirkungsweise von SPS ... 140
4.4 Datenbus und Feldbus ... 143
4.5 Vorteile von SPS ... 150
4.6 Programmierung von SPS und Dokumentation ... 150
4.7 Programm ... 152
4.8 Programmspeicher ... 153
4.9 SPS, CNC und PC im integrierten Betrieb ... 155
4.10 SPS-Auswahlkriterien ... 155
4.11 Zusammenfassung ... 157
4.12 Tabellarischer Vergleich CNC/SPS ... 157

5 Einfluss der CNC auf Baugruppen der Maschine ... 163
5.1 Maschinenkonfiguration ... 163
5.2 Maschinengestelle ... 165
5.3 Führungen ... 166
5.4 Hauptantriebe ... 168
5.5 Maschinenverkleidung ... 174
5.6 Kühlmittelversorgung ... 175
5.7 Späneabfuhr ... 175
5.8 Zusammenfassung ... 176

Teil 3 Die Arten von numerisch gesteuerten Maschinen ... 179

1 CNC-Werkzeugmaschinen ... 181

1.1 Bearbeitungszentren, Fräsmaschinen ... 181
1.2 Drehmaschinen ... 195
1.3 Schleifmaschinen ... 202
1.4 Verzahnmaschinen ... 212
1.5 Bohrmaschinen ... 221
1.6 Parallelkinematische Maschinen ... 226
1.7 Sägemaschinen ... 228
1.8 Laser-Bearbeitungsanlagen ... 232
1.9 Stanz- und Nibbelmaschinen ... 239
1.10 Rohrbiegemaschinen ... 243
1.11 Funkenerosionsmaschinen ... 245
1.12 Elektronenstrahl-Maschinen ... 248
1.13 Wasserstrahlschneidmaschinen ... 249
1.14 Entwicklungstendenzen bei numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen ... 252
1.15 Messen und Prüfen ... 256
1.16 Zusammenfassung ... 260

2 Prozessadaptierte Auslegung von Werkzeugmaschinenantrieben ... 264

2.1 Grenzen der Betrachtung ... 264
2.2 Ausgangspunkt Bearbeitungsprozess ... 265
2.3 Energiebilanz ... 267
2.4 Aufbau von Werkzeugmaschinenantrieben ... 268
2.5 Anforderungen aus den Zerspanprozessen ... 269
2.6 Stationäre und dynamische Auslegung von Vorschubantrieben ... 270
2.7 Lineardirektantrieb in Werkzeugmaschinen ... 273
2.8 Ableitung der Antriebsauslegung aus Prozesskenngrößen ... 274
2.9 Universelle/spezifische Auslegung von Maschinen ... 277
2.10 Auslegung von Vorschubantrieben spanender Werkzeugmaschinen aus Prozessparametern ... 278
2.11 Messsysteme für Werkzeugmaschinenantriebe ... 279
2.12 Systembetrachtung einer Werkzeugmaschine ... 280
2.13 Zusammenfassung Antriebsdimensionierung ... 283

3 Energieeffizienz von CNC-Maschinen ... 284

3.1 Einführung ... 284
3.2 Effizienzsteigerung ... 286
3.3 Definition des Prüfzyklus ... 288
3.4 Ergebnis ... 289
3.5 Alternativen ... 289

4 Generative Fertigungsverfahren ... 292

4.1 Einführung ... 292
4.2 Definition ... 293

4.3 Verfahrenskette ... 295
4.4 Einteilung der generativen Fertigungsverfahren ... 297
4.5 Vorstellung der wichtigsten Schichtbauverfahren ... 299
4.6 Zusammenfassung ... 309

5 Flexible Fertigungssysteme ... 311

5.1 Definition ... 311
5.2 Flexible Fertigungsinseln ... 314
5.3 Flexible Fertigungszellen ... 314
5.4 Technische Kennzeichen flexibler Fertigungssysteme ... 317
5.5 FFS-Einsatzkriterien ... 319
5.6 Fertigungsprinzipien ... 320
5.7 Maschinenauswahl und -anordnung ... 322
5.8 Werkstück-Transportsysteme ... 323
5.9 FFS-geeignete CNCs ... 333
5.10 FFS-Leitrechner ... 334
5.11 Wirtschaftliche Vorteile von FFS ... 336
5.12 Probleme und Risiken bei der Auslegung von FFS ... 338
5.13 Flexibilität und Komplexität ... 339
5.14 Simulation von FFS ... 343
5.15 Produktionsplanungssysteme (PPS) ... 345
5.16 Zusammenfassung ... 346

6 Industrieroboter und Handhabung ... 349

Einführung ... 349
6.1 Definition: Was ist ein Industrieroboter? ... 350
6.2 Aufbau von Industrierobotern ... 351
6.3 Mechanik/Kinematik ... 352
6.4 Greifer oder Effektor ... 354
6.5 Steuerung ... 354
6.6 SafeRobot Technologie ... 357
6.7 Programmierung ... 359
6.8 Sensoren ... 362
6.9 Anwendungsbeispiele von Industrierobotern ... 363
6.10 Einsatzkriterien für Industrieroboter ... 365
6.11 Vergleich Industrie-Roboter und CNC-Maschine ... 367
6.12 Zusammenfassung und Ausblick ... 368

Teil 4 Werkzeuge in der CNC-Fertigung ... 371

1 Aufbau der Werkzeuge ... 373

1.1 Einführung ... 373
1.2 Anforderungen ... 373
1.3 Gliederung der Werkzeuge ... 376
1.4 Maschinenseitige Aufnahmen ... 380
1.5 Modulare Werkzeugsysteme ... 386

1.6 Einstellbare Werkzeuge ... 387
1.7 Gewindefräsen ... 391
1.8 Sonderwerkzeuge ... 393
1.9 Werkzeugwahl ... 398

2 Werkzeugverwaltung (Tool Management) ... 400

2.1 Motive zur Einführung ... 400
2.2 Evaluation einer Werkzeugverwaltung ... 402
2.3 Lastenheft ... 402
2.4 Beurteilung von Lösungen ... 403
2.5 Einführung einer Werkzeugverwaltung ... 403
2.6 Gliederung ... 403
2.7 Integration ... 404
2.8 Werkzeug-Identifikation ... 404
2.9 Werkzeuge suchen ... 406
2.10 Werkzeug-Klassifikation ... 407
2.11 Werkzeug-Komponenten ... 407
2.12 Komplett-Werkzeuge ... 409
2.13 Werkzeuglisten ... 411
2.14 Arbeitsgänge ... 411
2.15 Werkzeug-Voreinstellung ... 412
2.16 Werkzeug-Logistik ... 414

3 Elektronische Werkzeug-Identifikation ... 418

3.1 Einführung ... 418
3.2 Funktionsweise/Prinzip ... 419
3.3 Komponenten eines WZ-Ident-Systems ... 421
3.4 Organisatorische Vorteile elektronischer Werkzeug-Ident-Systeme ... 421
3.5 Werkzeugerkennung und -datenverwaltung mit RFID ... 422
3.6 Werkzeugüberwachung ... 425
3.7 Zusammenfassung ... 428

4 Prozessnahe Fertigungsmesstechnik ... 430

4.1 Einführung ... 430
4.2 Parallele Messtechniken ... 430
4.3 Prozessnahes Messen in Nebenzeiten ... 430
4.4 Mit Bohrungsmessköpfen nah am Prozess ... 431
4.5 Aktorische Werkzeugsysteme schließen den Regelkreis ... 432
4.6 Mechatronische Werkzeugsysteme ... 435
4.7 Geschlossene Prozesskette ... 435
4.8 Ausblick ... 435
4.9 Zusammenfassung ... 438

Teil 5 NC-Programm und Programmierung 441

1 NC-Programm 443

1.1 Definition 443
1.2 Struktur der NC-Programme 444
1.3 Programmaufbau, Syntax und Semantik 446
1.4 Schaltbefehle (M-Funktionen) 447
1.5 Weginformationen 449
1.6 Wegbedingungen (G-Funktionen) 451
1.7 Zyklen 454
1.8 Nullpunkte und Bezugspunkte 458
1.9 Transformation 461
1.10 Werkzeugkorrekturen 461
1.11 Zusammenfassung 466

2 Programmierung von CNC-Maschinen 468

2.1 Definition der NC-Programmierung 468
2.2 Programmiermethoden 468
2.3 NC-Programmierer 477
2.4 Arbeitserleichternde Grafik 478
2.5 Verteilte Intelligenz 480
2.6 Auswahl des geeigneten Programmiersystems 481
2.7 Zusammenfassung 483

3 NC-Programmiersysteme 486

3.1 Einleitung 486
3.2 Bearbeitungsverfahren im Wandel 487
3.3 Der Einsatzbereich setzt die Prioritäten 488
3.4 Eingabedaten aus unterschiedlichen Quellen 492
3.5 Leistungsumfang eines modernen NC-Programmiersystems (CAM) 492
3.6 Datenmodelle auf hohem Niveau 493
3.7 CAM-orientierte Geometrie-Manipulation 493
3.8 Nur leistungsfähige Bearbeitungsstrategien zählen 494
3.9 3D-Modelle bieten mehr 495
3.10 Innovativ mit Feature-Technik 496
3.11 Automatische Objekterkennung 499
3.12 Bearbeitungsdatenbank 499
3.13 Werkzeuge 501
3.14 Aufspannplanung und Definition der Reihenfolge 501
3.15 Die Simulation bringt es auf den Punkt 501
3.16 Postprozessor 503
3.17 Erzeugte Daten und Schnittstellen zu den Werkzeugmaschinen 503
3.18 Zusammenfassung 503

4 Fertigungs-Simulation ... 506
4.1 Einleitung ... 506
4.2 Qualitative Abgrenzung der Systeme ... 507
4.3 Komponenten eines Simulationsszenarios ... 510
4.4 Ablauf der NC-Simulation ... 513
4.5 Einsatzfelder ... 516
4.6 Zusammenfassung ... 520

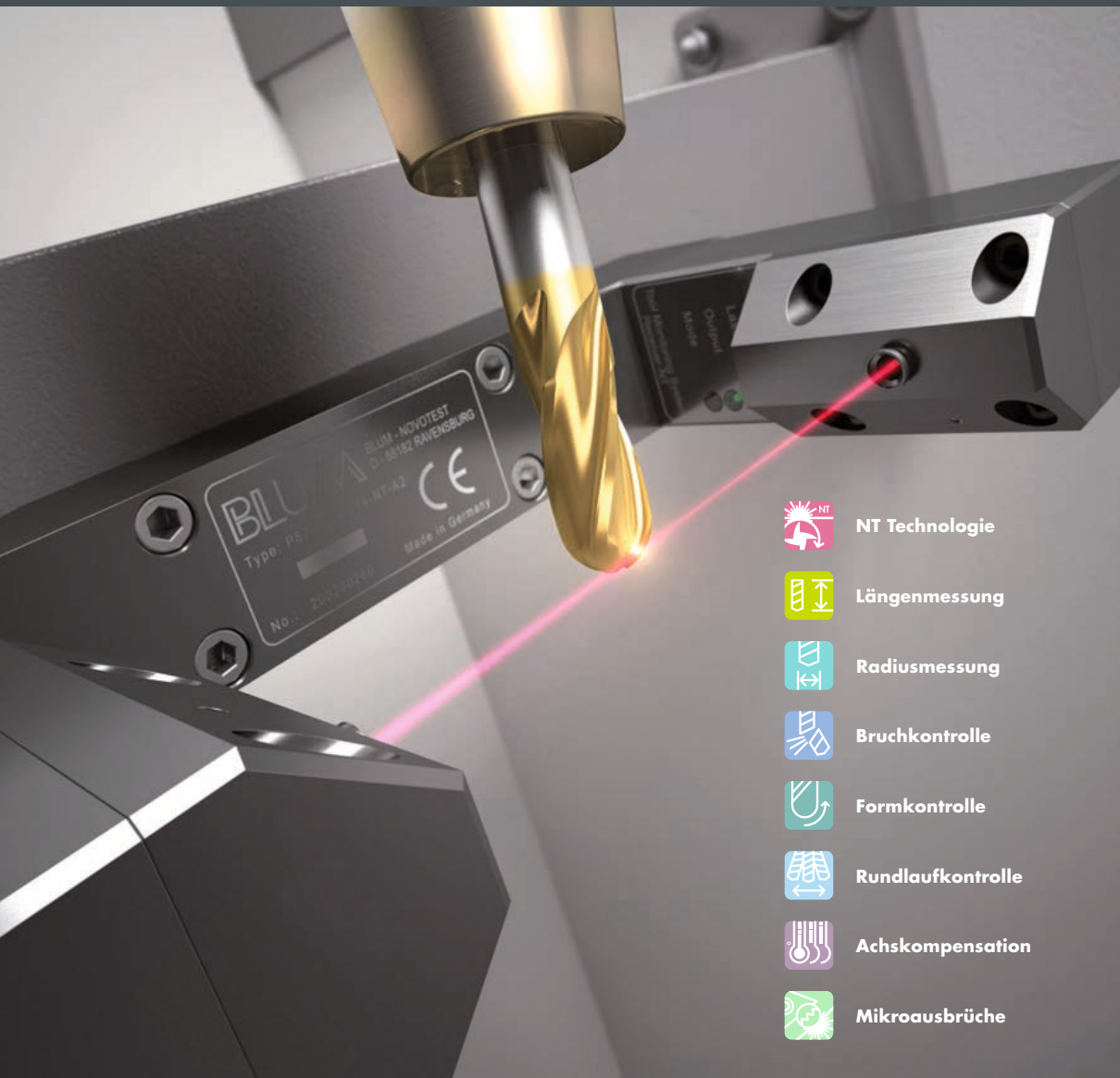
Teil 6 Einbindung der CNC-Technik in die betriebliche Informationsverarbeitung ... 523

1 DNC – Direct Numerical Control oder Distributed Numerical Control ... 525
1.1 Definition ... 525
1.2 Aufgaben von DNC ... 525
1.3 Einsatzkriterien für DNC-Systeme ... 526
1.4 Datenkommunikation mit CNC-Steuerungen ... 527
1.5 Technik des Programmanforderns ... 528
1.6 Heute angebotene DNC-Systeme ... 529
1.7 Netzwerktechnik für DNC ... 531
1.8 Vorteile beim Einsatz von Netzwerken ... 533
1.9 NC-Programmverwaltung ... 533
1.10 Vorteile des DNC-Betriebes ... 534
1.11 Kosten und Wirtschaftlichkeit von DNC ... 538
1.12 Stand und Tendenzen ... 538
1.13 Zusammenfassung ... 539

2 LAN – Local Area Networks ... 542
2.1 Einleitung ... 542
2.2 Local Area Network (LAN) ... 542
2.3 Was sind Informationen? ... 543
2.4 Kennzeichen und Merkmale von LAN ... 544
2.5 Gateway und Bridge ... 553
2.6 Auswahlkriterien eines geeigneten LANs ... 554
2.7 Schnittstellen ... 554
2.8 Zusammenfassung ... 559

3 Digitale Produktentwicklung und Fertigung: Von CAD und CAM zu PLM ... 562
3.1 Einleitung ... 562
3.2 Begriffe und Geschichte ... 563
3.3 Digitale Produktentwicklung ... 568
3.4 Digitale Fertigung ... 573
3.5 Zusammenfassung ... 577

LaserControl NT



Weltweit die Nr. 1 High Performance. Blum.

BLUM
focus on productivity

www.blum-novotest.com

Fertigungsmesstechnik Made in Germany

Teil 7 Anhang ... 581

Richtlinien, Normen, Empfehlungen ... 583

VDI-Richtlinien ... 583
DIN-Normen ... 585
NCG-Empfehlungen ... 587

NC-Fachwortverzeichnis ... 589

Stichwortverzeichnis ... 633

Empfohlene NC-Literatur ... 641

Inserentenverzeichnis ... 643

Tabellen und Übersichtstafeln ... 644

Bezugsquellenverzeichnis ... 645

TEIL 1

Einführung in die CNC-Technik

1 Historische Entwicklung der NC-Fertigung

Ein Rückblick auf die Einführung und Entwicklung der NC-Technik soll zeigen, dass nicht nur technische Gesichtspunkte eine wichtige Rolle spielten. Richtige und falsche Management-Entscheidungen, der Beginn der Globalisierung und insbesondere die japanische Herausforderung waren wesentlich an der Gesamtveränderung des Marktes und der Fertigungslandschaften beteiligt.

1.1 Erste Nachkriegsjahre

1945 – 48: Alle Fertigungsstätten in Deutschland waren zerstört oder unbrauchbar, teilweise demontiert und als Reparationsleistungen ins Ausland transportiert. Die Produktion lag am Boden.

Die Industriestädte waren zerstört und größtenteils unbewohnbar, Millionen Tonnen Trümmerschutt blockierten die Straßen und Verkehrswege. Die Versorgung mit Strom, Gas und Wasser war notdürftig, eine industrielle Fertigung bis auf wenige, unbedeutende Ausnahmen unmöglich.

1948 (Währungsreform) bis 1955: Wiederaufbau der Werkzeugmaschinen- und Fertigungsindustrie, vorwiegend auf Basis noch vorhandener Konzepte. Die Entwicklung neuer Maschinenkonzepte war während des Krieges und kurz danach nicht möglich.

Die meisten Maschinen waren für die manuelle Bedienung ausgelegt, aber es fehlten die erfahrenen Facharbeiter. Die wenigen noch verfügbaren Maschinen fertigten dringend benötigte Massenprodukte.

Der Bedarf war fast unbegrenzt. Die vorhandenen Maschinen arbeiteten in zwei und drei Schichten.

Neue Arbeitsplätze entstanden, aber es fehlten die Arbeitskräfte. Über zwei Millionen deutsche Männer waren gefallen, über sechs Millionen verwundet, krank oder noch in Gefangenschaft.

Die Lösung waren die Gastarbeiter. Sie kamen aus allen westeuropäischen Ländern. Arbeit gab es genügend.

Das Ziel hieß: Wiederaufbau der zerstörten Städte, Fabriken, Brücken, Häuser, Straßen, der Infrastruktur und Bereitstellung der dringend benötigten Transportkapazitäten.

Dazu benötigte man jede Art von Maschinen, insbesondere Baumaschinen, Kräne, Bagger und Lkw.

Im Vordergrund der industriellen Produktion stand die **Massenfertigung** auf manuellen Produktionsmaschinen, Transferstraßen und mechanischen Automaten. Die Lebensdauer der hergestellten Produkte lag bei mindestens 10 Jahren, schnelle Produktionswechsel waren nicht gefragt.

Das Ergebnis dieses riesigen Bedarfs, einer klugen Politik und tatkräftiger Bürger war das deutsche „**Wirtschaftswunder**“.

1.2 Wiederaufbau der Werkzeugmaschinenindustrie

Deutschland verfügte aufgrund der geschilderten Ausgangslage innerhalb weniger Jahre (**ca. 1960 – 70**) über den jüngsten Werkzeugmaschinenbestand aller Industrienationen: das Durchschnittsalter betrug 5 – 6 Jahre. Aber es waren zu wenige, die Statistik „hinkte". Einige neue Maschinen waren zudem technisch noch auf dem Vorkriegsstand!

Amerika lag zu dieser Zeit **(ca. 1960 – 75)** bei ca. 15 bis 17 Jahre alten Maschinen. Eine Verjüngung entstand durch den Einsatz von NC-Maschinen (Drehen, Fräsen, Bearbeitungszentren) in der Fahrzeug- und Luftfahrt-Industrie. Die in den USA entwickelte NC-Technik setzte sich in der dortigen Industrie viel schneller durch als in Europa. Viele Projekte wurden staatlich unterstützt, wie z. B. zur Herstellung militärischer Produkte.

Die amerikanischen Hersteller von NC-Maschinen verkauften sehr gut und weltweit, vernachlässigten jedoch die konsequente Weiterentwicklung der Maschinen. Dies führte zu ständig steigenden Importen preiswerter japanischer Maschinen.

Die rasch aufeinanderfolgenden Verbesserungen der Numerischen Steuerungen hatten einen gravierenden Einfluss auf alle Maschinen-Typen und verlangten nach neuen, angepassten Konstruktionen. Dies wurde nicht rechtzeitig realisiert und führte sehr schnell zum Konkurs mehrerer amerikanischer Hersteller.

Japan förderte mit **Beginn der 70er Jahre** mit großen Investitionen die Werkzeugmaschinen-Produktion. Es waren einfache, preiswerte, aber nach neuesten Gesichtspunkten konstruierte NC-Maschinen. Bald konnte man ab Lager und zu bis dahin unglaublich niedrigen Preisen liefern. Die Maschinen waren nach anderen Vorgaben konstruiert: Serienmäßige Standard-Maschinen ohne größere Modifikationen, zuverlässig, mit Serien-NC ohne Möglichkeit der Steuerungswahl, preiswert.

Während die deutschen Hersteller traditionell den europäischen Raum belieferten, hatten sich die Japaner von Anfang an strategisch auf den Weltmarkt ausgerichtet, mit dem Schwerpunkt USA, später auch Europa. Kundenspezifische Modifikationen wurden konsequent abgelehnt.

Mitte der 80er Jahre hatte Japan hinsichtlich der Weltmarktanteile zu Deutschland aufgeschlossen!

Ein Zeichen der nachlassenden Wettbewerbsfähigkeit deutscher Hersteller war die stetig steigende Importquote: Von 1973 bis 81 stieg sie um 11,9% auf 33,3%, und bis 1991 auf 41,2%.

1.3 Weltweite Veränderungen

In vielen **Industrienationen** wurde noch 10 bis 15 Jahre nach dem 2. Weltkrieg vorwiegend auf veralteten Maschinen produziert. Zuerst waren diese völlig ausreichend, aber mit zunehmendem Wettbewerb, dem Kostendruck und verändertem Käuferverhalten war eine Modernisierung des Maschinenparks in vielen Fertigungsbetrieben dringend erforderlich.

Zudem begann in den **70er Jahren** weltweit die Entwicklung zum **Käufermarkt**, d. h. schnellere Produktänderungen und kürzere Lebensdauer setzten sich bei fast allen Produkten durch.

Folge: Verlagerung von der Massenproduktion hin zu **kleineren Losgrößen**. Anstelle der starren Massenfertigung auf Automa-

ten und Transferlinien kamen zunehmend flexiblere NC-Maschinen zum Einsatz. Aber auch die höhere Komplexität der Produkte infolge verstärkter Nutzung von CAD-Systemen erforderte den Einsatz moderner Werkzeugmaschinen mit durchgängiger Datennutzung zur schnelleren NC-Programmierung.

Neue, potenzielle NC-Maschinen-Anwender kamen hinzu, wie z. B.:

Rüstungsindustrie für Panzer, gepanzerte Fahrzeuge, Transporter etc.

Flugzeugindustrie mit den Lizenzfertigungen von Starfighter, Phantom, Helikopter und Waffen, später mit den Programmen Airbus, MRCA-Tornado, Alpha-Jet, Dornier DO 27.

Aber auch die Flugzeugindustrie in Frankreich (Dassault, Aerospatiale, Snecma), England (Hawker, British Aerospace) und in den USA (Boeing, McDonnell, Fairchild, Lockheed, Sikorsky u. a.) suchte neue Maschinenkonzepte. Gefragt waren schnell umrüstbare Maschinen mit hoher Präzision, neue Maschinengrößen (Flächenfräsmaschinen, Großbohrwerke) und Bearbeitungszentren.

Ein großes unerschlossenes Potenzial waren alle kleinen und mittleren Zulieferbetriebe.

1.4 Neue, typische NC-Maschinen

Die wiederentstehende deutsche Luftfahrtindustrie und die Automobilindustrie brachten ab **1968** wesentliche Impulse für die einheimische Werkzeugmaschinen-Industrie:

- Großflächenfräsmaschinen und Bearbeitungszentren mit hohem Automatisierungsgrad,
- Drei- und Fünfachs-Fräsmaschinen mit Simultaninterpolation in allen Achsen,
- Gantry-Type-Fräsmaschinen für große Fräsbreiten mit bis zu acht parallelen Hauptspindeln,
- Elektronenstrahl-Schweißmaschinen, flexible Fertigungszellen und ein sehr hoher Automatisierungsgrad beim Werkstück- und Werkzeughandling sowie bei der Bearbeitung,
- High-Speed-Cutting-Maschinen für den Formen- und Werkzeugbau,
- sowie neue Programmier- und Bearbeitungsstrategien (APT, CAD, CAD/CAM) brachten große Aufträge für viele europäische Hersteller.

Innerhalb weniger Jahre (1970 – 80) wurde Deutschland zum größten Werkzeugmaschinen-Exporteur.

Zunächst wurden den alten, „bewährten“ Maschinenkonzepten viele Ausbaustufen einfach hinzugefügt, ohne das Grundkonzept zu modernisieren.

Folge: Zu viele Bauteile,
zu schwere Maschinen,
zu lange Bauzeit,
zu aufwändige Konzeptionen,
zu teuer.

Sowie: zu lange Inbetriebnahmezeiten,
zu häufige Ausfälle,
zu lange Ausfallzeiten.

Ergebnis: Diese Maschinen waren für die „normale“ Industrie zu unwirtschaftlich! Erst die überarbeiteten, preiswerteren Konzepte brachten den dringend notwendigen Durchbruch im allgemeinen Maschinenbau.

1.5 Der japanische Einfluss

Die inzwischen fortlaufend verbesserten japanischen Standard-NC-Maschinen drängten immer stärker auf den deutschen Markt. Anfängliche „innere“ Widerstände der Käufer gegen japanische Produkte wur-

den durch die niedrigen Preise, die ständig verbesserte Qualität und allgemein positive Erfahrungsberichte immer geringer.

Die Maschinen wurden in Großserien gebaut, hatten ungewohnt kurze Lieferzeiten und verfügten über sehr zuverlässige Numerische Steuerungen (FANUC, Mitsubishi, Okuma, Mazak etc.). Zudem boten die japanischen Firmen einen großzügigen Service. Bald bauten auch immer mehr deutsche Maschinenhersteller japanische Steuerungen an ihre Maschinen an und nutzten den international vorhandenen Service, z. B. von FANUC, um Maschinen weltweit zu verkaufen.

1.6 Die deutsche Krise

Nach der Boomphase von 1985 bis 90 kämpfte der deutsche Werkzeugmaschinenbau **ab 1992** gegen die schwerste Krise der Nachkriegszeit. Bis 1994 sackte die Produktion real um fast 50% ab, die Beschäftigten um 30%. Nun traten die strukturellen und finanziellen Schwierigkeiten der Maschinenhersteller besonders hervor.

Verursacht wurde dieser Einbruch durch das Zusammentreffen mehrerer Probleme.

Die deutsche Werkzeugmaschinen-Industrie kam wegen vergleichbarer Ursachen in die Krise wie in den 80er Jahren die amerikanische. Anstatt die Kräfte zu bündeln und sich gegen den japanischen Wettbewerb zu formieren, versuchte man mit Preisnachlässen den Wettbewerb fernzuhalten, was auf Dauer nicht gutgehen konnte. Zudem arbeiteten die deutschen Hersteller gegeneinander, anstatt sich miteinander und mit neuen Ideen gegen die schnell stärker werdende japanische Konkurrenz zu wehren. Gute Ansätze wären z. B. gewesen: einheitliche Werkzeugaufnahmen und -wechselsysteme, einheitliche Palettenwechsler und aufeinander abgestimmte Tischhöhen. Dies hätte z. B. die Einführung von Flexiblen Fertigungssystemen durch Kombination von Maschinen unterschiedlicher Hersteller wesentlich vereinfacht, verbilligt und damit gefördert. Es fehlte aber auch das Geld, um neue, preiswertere Maschinen zu entwickeln.

Das Wettbewerbsdenken verhinderte gemeinsame, aufeinander abgestimmte, sich ergänzende, strategische Lösungen, wie sie von mehreren Großanwendern gewünscht wurden.

Folge: Die unter 5% geschrumpften Deckungsbeiträge ließen keine größeren zukunftsorientierten Entwicklungen zu. Viele deutsche Maschinenhersteller hatten entweder kein strategisches Konzept oder kein Geld, es zu realisieren. Stattdessen versuchten fast alle, „nach oben“ in den Sonder- und Spezialmaschinenbereich auszuweichen. Doch diese Nischenpolitik konnte nicht funktionieren, die (Sonder-) Maschinen wurden zu teuer, weil die Grundauslastung mit Standard-Maschinen fehlte. Zudem verlangten die potenziellen Käufer umfangreiche Detailplanungen von mehreren Herstellern, ohne die dafür entstandenen Kosten zu tragen.

Viele renommierte Hersteller steuerten in den Konkurs oder wurden in den Folgejahren von Wettbewerbern übernommen.

1.7 Ursachen und Auswirkungen

Deutsche Manager fragten ganz offen: Was machen die Japaner besser als die einst so erfolgsgewohnten deutschen Maschinenhersteller?

Waren es die niedrigeren Preise durch geringere Produktionskosten? Oder die besseren technischen Konzepte? Oder die Lieferzeiten?

Nur zum Teil! Viel gravierender waren die besseren Geschäftsideen, die höheren

Stückzahlen und die **Weltmarkt-Strategie!** Die deutschen Hersteller suchten **Käufer** für Sondermaschinen, die japanischen Hersteller suchten **Märkte** für Standardmaschinen!

Japanische Maschinen waren gut und kamen mit ca. 30% weniger mechanischen Teilen aus.

Den Käufern imponierten die Vorteile, die immer stärker zum Vorschein kamen.

Selbst ur-deutsche Käufer griffen immer mehr zu den asiatischen Produkten. Für den Preis einer deutschen „Super-Spezial-Sondermaschine" mit langer Lieferzeit konnte man zwei bis drei japanische Standardmaschinen ab Lager kaufen. Das war überzeugend!

Erst gegen **Ende der 80er/Anfang der 90er Jahre** hatten die überlebenden deutschen Maschinen-Hersteller begriffen, dass sie „andere" Maschinen bauen mussten, um wieder gefragt und erfolgreich zu werden. Die Nischen für die deutschen Spezialmaschinen-Hersteller waren zu klein geworden.

Die Lösung lag für viele Hersteller in der Fusion – oft durch die Banken erzwungen. Heute sind wieder mehrere Hersteller wettbewerbsfähig geworden und werben damit, dass sie die Anzahl der Bauteile ihrer modernisierten Maschinen um 30 – 35% reduziert haben. Diese Firmen hatten endlich begriffen, dass man sowohl mit veralteten Konzepten, als auch mit „technischem Overkill" und mit der Nischenpolitik auf dem falschen Weg war. Aber auch die Käufer akzeptierten inzwischen, dass deutsche Maschinen mit vergleichbaren Spezifikationen wie japanische Maschinen angeboten wurden, ohne die vielen kundenspezifischen Sonderspezialfunktionen.

Eine nicht zu unterschätzende Rolle entfiel auf die neuen, leistungsfähigen und dialogorientierten **NC-Programmiersysteme**, die sowohl als Programmierplatz, als auch direkt an den Maschinen zur Verfügung standen.

Zur Genesung des Werkzeugmaschinenbaus haben auch die **neuen Technologie-Verfahren** und völlig neue Maschinen beigetragen, wie High Speed Cutting, Hochleistungs-Laser zum Schweißen und Trennen, Generative Fertigungsverfahren wie z. B. Rapid Prototyping Systeme, sowie Maschinen zur Hartbearbeitung von Metallen und Keramiken. Dagegen werden Universal-Maschinen zur Komplettbearbeitung in einer Aufspannung zunehmend interessanter.

Der Einsatz neuer, hochdynamischer Antriebe machte die Maschinen zudem immer schneller.

1.8 Flexible Fertigungssysteme

Amerikanische Großfirmen wie Caterpillar, Cummings Diesel, General Electric und mehrere Maschinenhersteller (Cincinnatti Milacron, Kearney & Trecker, Sundstrand u. a.) konzipierten und installierten **seit den 70er Jahren** die ersten Flexiblen Fertigungssysteme. Diese bestehen aus mehreren **sich ersetzenden** (identischen) oder **sich ergänzenden** (unterschiedlichen) NC-Maschinen sowie einem gemeinsamen Werkstücktransport- und Steuerungssystem. Auf derartigen Anlagen lassen sich auftragsbezogen Einzelstücke, aber auch kleinere und mittlere Losgrößen wirtschaftlich fertigen. In besonderen Fällen werden FFS auch für die Großserienfertigung eingesetzt.

In Japan wurden zu dieser Zeit erste FFS-Installationen erfolgreich getestet und international propagiert. Die Besucher kamen aus der ganzen Welt und bestaunten die mannlose Fertigung in dunklen Hallen.

In Deutschland wurden FFS zuerst sehr zurückhaltend nachgefragt. Ausschlaggebend für das zögernde Kaufverhalten ist das umfangreiche Engineering, d. h. die kundenspezifische Planung und Auslegung solcher Systeme vor Ort beim Kunden, sowie die normalerweise von den Käufern geforderten und sehr aufwändigen Zeit-, Stückkosten- und Investitionsberechnungen. Dies alles führte zu hohen Kosten und Preisen. Erst als die Fantasien von „menschenleeren Fabriken" mehr zu „personalreduzierten Fertigungen" auf bezahlbaren Fertigungskonzepten tendierten, zeigten auch deutsche Anwender zunehmendes Interesse an solchen Systemen.

1974 installierte die Fa. Getriebe Bauer, Esslingen, eines der ersten FFS in Deutschland. Es bestand aus neun identischen Bearbeitungszentren (Fabrikat BURR) mit Bosch/Bendix-Steuerungen, einem Paletten-Umlaufsystem für den automatischen Werkstücktransport und Paletten-Übergabestationen an jeder Maschine. Ausschlaggebend war, dass zu diesem Zeitpunkt die ersten NC's mit Programmspeicher anstelle der Lochstreifenleser verfügbar waren. Fa. Bauer hat diese Anlage in den folgenden Jahren auf 12 Maschinen erweitert und 1988 auf leistungsfähigere CNC's umgerüstet. In mehr als 20 Jahren zwei- und dreischichtigem Betrieb hat es die technischen und wirtschaftlichen Erwartungen des Anwenders mehr als erfüllt! Man konnte endlich auftragsbezogen fertigen, Lager abbauen und trotzdem kurzfristig liefern.

Nach den ersten positiven Meldungen folgten bald weitere FFS in vielen Fertigungsbetrieben.

In **Japan, Amerika und Europa** werden ständig nach dem neuesten Stand der Technik konzipierte FFS installiert. Die positiven Erfahrungen mit diesen Systemen und deren Wirtschaftlichkeit hat zu besseren, FFS-geeigneten Maschinen geführt, die sich problemlos kombinieren und betreiben lassen. Auch die Integration von Robotern zur Werkzeug- und Werkstück-Handhabung hat zu besseren Systemkonzepten geführt. Zur frühzeitigen Erkennung von Planungsfehlern wurden leistungsfähige Simulations- und Produktionsplanungs-Systeme (PPS) entwickelt.

Inzwischen werden in **Deutschland** seit vielen Jahren FFS eingesetzt, mit zunehmender Tendenz. Durch die in kurzen Zeitabständen unvermeidlichen Aktualisierungen und Modifikationen der Werkstücke sind auch in der Massenproduktion flexible Fertigungssysteme oft wirtschaftlicher als starre, unflexible Transferlinien.

1.9 Weltwirtschaftskrise 2009

Der Auftragseinbruch im deutschen Werkzeugmaschinenbau begann sich bereits Ende 2008 abzuzeichnen und endete erst Mitte 2010. Die Ursachen dafür begannen schon sehr viel früher. Aus einer Reihe unscheinbarer Einzelereignisse und Fehlentwicklungen entstand die größte Finanz- und Wirtschaftskrise seit zwei Generationen. Inzwischen ist jedem geläufig, dass faule Kredite das Weltfinanzsystem an den Rand des Abgrunds gebracht hatten.

Auslöser waren Hypothekenbanken der USA, die unterstellt hatten, dass Häuserpreise immer weiter steigen würden und deshalb ihren Kunden aberwitzige Kreditverträge vermittelten, die sie nach Abschluss an Wall-Street-Banken weiterverkauften. Hinzu kam das wachsende Handelsdefizit der USA, die sinkende Sparquote, exzessive Schuldenquoten bei der Finanzierung von Firmenübernahmen. Anfang 2009 stand den meisten Menschen, das Schlimmste in Gestalt von Arbeitslosig-

keit aber noch bevor. Die Banken saßen auf Schulden von ca. 1 Billion Dollar, die sie noch nicht abgeschrieben hatten. Aufgrund der engen Verknüpfung der einzelnen Volkswirtschaften erfasste diese Krise synchron fast den ganzen Globus und löste eine beispiellose politische Gegenreaktion aus. Die maßgeblichen Regierungen der Welt pumpten Billionen Dollar und Euro in die Wirtschaft. Die Überschuldungsquote aufgrund der Rettung von systemischen Banken stieg auch in Deutschland enorm.

In dieser überaus kritischen Situation gelang der deutschen Politik ein Coup, um den Deutschland viele Staaten beneidet haben: Die Ausweitung der Kurzarbeiterregelung auf 24 Monate. Massenentlassungen wurden dadurch vermieden und als 2010 der Markt für Werkzeugmaschinen zunächst zögerlich und dann mit einem wachsenden Tempo sich zu erholen begann, konnten die Hersteller mit ihren Ingenieuren und Facharbeitern in kurzer Zeit wieder mit Volldampf arbeiten.

Als dieses Buch im Dezember 2012 abgeschlossen wurde, „brummte“ die Deutsche Wirtschaft wieder und auch die Werkzeugmaschinenindustrie hatte blendende Auftragszahlen. Allerdings brachten diese zwei Jahre Verwerfungen mit sich, die alles vorherige in den Schatten stellten: Erst eine global synchronisierte Liquiditätskrise in „nie dagewesener Brutalität“ und dann ebenso überraschend für Deutschland die ganz schnelle Erholung der Auftragseingänge auf Vorkrisenniveau.

Zeitweilig sprach man sogar von einem zweiten deutschen Wirtschaftswunder. Gegen Ende 2012 waren die Auftragszahlen in der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie immer noch zufriedenstellend. Auch die Zuwachszahlen in einigen asiatischen Ländern, insbesondere China, haben wieder Werte wie vor der Krise erreicht. In der Europäischen Union sind aber die Anzeichen einer Rezession für 2013 unverkennbar.

Die US-Wirtschaft allerdings hat besorgniserregende Arbeitslosenzahlen von knapp 10 % und einen historischen Schuldenstand. Und auch die Überschuldung einiger Eurostaaten wie Griechenland, Irland, Portugal und Spanien ließen eine zuverlässige Prognose für die Zukunft bei Redaktionsschluss nicht zu.

1.10 Situation und Ausblick

Die Fertigungstechnik und -automation wird weltweit mit immer neuen Ideen und Konzepten weiterentwickelt. An erster Stelle stehen heute **CNC-Maschinen und integrierte Roboter**, die in vielfältigen Ausführungen und für alle Anwendungen ausgelegt bzw. kombinierbar sind. Hochdynamische Linearantriebe, Positionsmesssysteme mit höchster Auflösung und Genauigkeit sowie grundlegend neue Maschinenkonzepte machten die NC-Maschinen zum dominierenden Fertigungssystem, nicht nur in der Zerspanung.

Heute besteht für Roboter weltweit eine große Nachfrage. Alle Industrienationen haben eigene Produktionen aufgebaut und bieten spezielle Roboter für Fertigung, Handhabung und Montage an.

So prägte man den Begriff der „**Digitalen Fertigung**“, meint damit fast das gleiche Konzept und ist wieder interessant durch die These: **Automatisieren JA, aber nicht zu jedem Preis!** Sonst bleibt die Rentabilität eine Utopie.

Flexible Fertigungssysteme sind dagegen heute mehr denn je gefragt. Die viel beschworene Flexibilität solcher Systeme wird jedoch nicht mehr durch zentral gesteuerte Maschinen mit höchstem Automa-

tisierungsgrad und einem Leitrechner dargestellt, sondern durch dezentralen Aufbau und Übersichtlichkeit der Anlageteile. Speziell angepasste Werkstück-Transportsysteme und insbesondere die durchgängige Datenvernetzung sind jedoch unverzichtbar. Zuverlässig arbeitende Überwachungssysteme zur Werkzeugbruchkontrolle, Messtaster mit automatischen Messprotokollen und Korrektureingriffen bzw. Fehlermeldungen, Drehmoment- bzw. Vorschubkraftüberwachungen, sowie eine absolut fehlerfrei arbeitende Datenübertragung ermöglichen den **vorübergehend unbemannten Betrieb** dieser Systeme. Dies wurde bald als großes Rationalisierungspotenzial erkannt und genutzt.

Nicht zu vergessen sind die sehr leistungsfähigen, industrietauglichen Rechner und inzwischen erprobte Software für (fast) alle Anforderungen.

Viele neuere **Software-Entwicklungen** haben die weitere **Reduzierung der Zeiten** zum Hauptziel.

Aus der aktuellen Fachliteratur können wir entnehmen, dass die Schnelligkeit der Fertigung eine immer größere Bedeutung erlangt. Die **Zeitverschwendung** rückt immer mehr ins Visier der Rationalisierung, insbesondere bei großen Stückzahlen. Nicht nur immer kürzere Werkzeugwechselzeiten oder schnellere Eilgänge sind gefragt, sondern die intelligentere Bearbeitung selbst. Dazu ist die Überarbeitung und Feinkorrektur bestehender NC-Programme erforderlich. Die heutigen **Simulationssysteme** sind dafür technisch und wirtschaftlich perfekt geeignet und ermöglichen Einsparungen im Bereich bis zu mehreren Mio € pro Jahr.

Hier haben insbesondere die größeren Anwender von NC-Maschinen ihren Einfluss auf die Hersteller dieser Software genutzt, damit praxisgerechte Lösungen entstanden.

Mit der Simulation lässt sich auch die Forderung erfüllen, die Zeit zur **Markteinführung** neuer Produkte z. T. um mehr als 50% zu verkürzen. Fertigungslinien für neue Produkte müssen oft geplant und bestellt werden zu einem Zeitpunkt, wo die endgültige Form, Größe und die Bearbeitungen der Teile noch nicht feststeht. Mit Unterstützung von Produktionsplanungs- (PPS) und Simulationssystemen lässt sich heute der Gesamtumfang aller erforderlichen Investitionen in der Fertigung sehr präzise feststellen und vorausplanen. Auf solchen Anlagen können auch spätere Produkt-Modifikationen problemlos einfließen.

Die Methoden des **Simultaneous Engineerings** unterstützen diesen Zeitrafferr-Effekt in perfekter Art und Weise.

Abschließend sei auch noch auf die inzwischen etablierten **generativen Fertigungsverfahren** verwiesen. Je nach Aufgabenstellung stehen unterschiedliche Methoden und Verfahren zur Auswahl, um aus CAD-Modellen mit Hilfe spezieller numerisch gesteuerter Maschinen körperliche (Test-) Werkstücke herzustellen. Insbesondere der Werkzeug- und Formenbau nutzt diese Möglichkeiten bereits sehr stark. Die meisten Maschinen für **Rapid Prototyping Manufacturing** nutzen Laserstrahlen als universelles Werkzeug mit völlig neuen Fertigungsverfahren. Auf diesem Teilgebiet sind viele deutsche und europäische Hersteller aktiv und sehr erfolgreich.

1.11 Fazit

Die NC-Technik hat innerhalb von ca. 40 Jahren nicht nur die Maschinen, sondern auch die Betriebe und die Menschen im weiten Umfeld verändert. Hersteller und Anwender haben gelernt, nicht „am grünen Tisch“ die hundertprozentige Automation

der Fertigung anzustreben, sondern alle am Prozess beteiligten Abteilungen in die Fertigungs- und Automatisierungsüberlegungen mit einzubeziehen, damit technisch und wirtschaftlich tragfähige Lösungen entstehen. Maschinen- und Steuerungshersteller haben gemeinsam technisch perfekte Fertigungskonzepte zu marktgerechten Preisen entwickelt und den japanischen Anfangserfolg in Grenzen gehalten.

In der heutigen Fertigung sind leistungsfähige Komponenten wie Rechner, neue Maschinenkonzepte, automatische Transport- und Handlingsysteme sowie zuverlässige Steuerungen und intelligente Überwachungssysteme unverzichtbar. Und man ist bestimmt noch nicht am Ende angekommen!

Um die Vorteile dieser Technik wirtschaftlich zu nutzen, ist gut ausgebildetes und geschultes Personal vom Management bis in die Werkstätten dringend erforderlich, um diese komplexen Systeme qualifiziert planen, einsetzen, bedienen und warten zu können.

Seit 2008 sind die Themen Ökologie und Energieeffizienz verstärkt in den Fokus der Öffentlichkeit gerückt. Deren Realisierung wird auch am Maschinenbau und der Fertigungstechnik nicht spurlos vorübergehen. Werkzeugmaschinen- und Steuerungshersteller überlegen bereits, wie Hilfsantriebe, Arbeitsabläufe und NC-Teileprogramme energieeffizient optimiert werden können.

2 Meilensteine der NC-Entwicklung

Die Idee zur Steuerung eines Gerätes durch gespeicherte Befehle, wie heute bei NC-Maschinen eingesetzt, lässt sich bis ins 14. Jahrhundert zurückverfolgen. Es begann mit Glockenspielen, die man durch Stachelwalzen ansteuerte.

1808 Joseph M. Jacquard benutzte gelochte Blechkarten zur automatischen Steuerung von Webmaschinen.
Der austauschbare Datenträger zur Steuerung von Maschinen war erfunden.

1863 M. Fourneaux patentierte das automatische Klavier, unter den Namen Pianola weltbekannt, bei dem ein ca. 30 cm breites Papierband durch entsprechende Lochungen die Pressluft zur Betätigung der Tastenmechanik steuerte. Diese Methode wurde weiterentwickelt, sodass später auch der Klang, die Anschlagstärke und die Ablaufgeschwindigkeit der Papierrolle gesteuert werden konnte.
Das Papier als Datenträger und die Steuerung von Hilfsfunktionen waren erfunden.

1938 Claude E. Shannon kam während seiner Doktorarbeit am M.I.T. zu dem Ergebnis, dass die schnelle Berechnung und Übertragung von Daten nur in binärer Form unter Anwendung der Boole'schen Algebra erfolgen könne und elektronische Schalter dafür die einzig realistischen Komponenten wären. Die Grundlagen zu den heutigen Rechnern incl. der numerischen Steuerungen waren erarbeitet.

1946 Dr. John W. Mauchly und Dr. J. Presper Eckert lieferten den ersten elektronischen Digitalrechner „ENIAC" an die amerikanische Armee ab.
Die Basis der elektronischen Datenverarbeitung war geschaffen.

1949 bis 1952 John Parsons und das M.I.T. (Massachusetts Institute of Technology) entwickelten im Auftrag der U.S. Air Force „ein System für Werkzeugmaschinen, um die Position von Spindeln durch den Ausgang einer Rechenmaschine direkt zu steuern und als Beweis für die Funktion ein Werkstück zu fertigen".
Parsons lieferte die 4 wesentlichen Ansätze zu dieser Idee:
1. Die errechneten Positionen einer Bahn in Lochkarten zu speichern.
2. Die Lochkarten an der Maschine automatisch zu lesen.
3. Die gelesenen Positionen fortlaufend auszugeben und zusätzliche Zwischenwerte intern zu errechnen, sodass
4. Servomotoren die Bewegung der Achsen steuern können.
Mit dieser Maschine sollten die im-

mer komplizierter werdenden Integralteile für die Flugzeugindustrie hergestellt werden. Diese Werkstücke waren z. T. mit wenigen mathematischen Daten exakt zu beschreiben, jedoch sehr schwierig manuell zu fertigen. Die Verbindung Computer und NC war von Anfang der Entwicklung an vorgegeben.

1952 Im M. I. T. lief die erste numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine, eine Cincinnati Hydrotel mit vertikaler Spindel. Die Steuerung war mit Elektronenröhren aufgebaut, ermöglichte eine simultane Bewegung in 3 Achsen (3D-Linearinterpolation) und erhielt ihre Daten über binär codierte Lochstreifen.

1954 Bendix hatte die Parsons-Patentrechte gekauft und baute die erste industriell gefertigte NC, ebenfalls unter Verwendung von Elektronenröhren.

1957 Die U. S. Air Force installierte die ersten NC-Fräsmaschinen in ihren Werkstätten.

1958 Die erste symbolische Programmiersprache – APT – wurde in Verbindung mit dem IBM 704-Rechner vorgestellt.

1960 NC's in Transistortechnik ersetzen Relais- und Röhren-Steuerungen.

1965 Automatische Werkzeugwechsel erhöhen den Automatisierungsgrad.

1968 Die IC-Technik (integrated circuits) macht die Steuerungen kleiner und zuverlässiger.

1969 Erste DNC-Installationen in den USA durch Sundstrand „Omnicontrol" und IBM-Rechner.

1970 Automatischer Palettenwechsel.

1972 Die ersten NC's mit einem eingebauten, serienmäßigen Minicomputer eröffnen die neue Generation leistungsfähiger Computerized NC's (CNC), die sehr schnell durch Microprocessor-CNC's abgelöst wurden.

1976 Microprozessoren revolutionieren die CNC-Technik.

1978 Flexible Fertigungssysteme werden realisiert.

1979 Erste CAD/CAM-Kopplungen entstehen.

1980 In die CNC integrierte Programmierhilfen entfachen einen „Glaubenskrieg" für und wider Handeingabesteuerungen.

1984 Leistungsfähige CNC's mit grafisch unterstützter Programmierhilfe setzen neue Maßstäbe bezüglich „Programmieren in der Werkstatt".

1986/1987 Standardisierte Schnittstellen eröffnen den Weg zur automatischen Fabrik aufgrund eines durchgängigen Informationsaustausches: CIM.

1990 Digitale Schnittstellen zwischen NC und Antrieben verbessern Genauigkeit und Regelverhalten der NC-Achsen und der Hauptspindel.

1992 „Offene" CNC-Systeme ermöglichen kundenspezifische Modifikationen, Bedienungen und Funktionen.

1993 Erster standardmäßiger Einsatz linearer Antriebe bei Bearbeitungszentren.

1994 Schließen der CAD/CAM/CNC-Prozesskette durch Verwendung von NURBS als Interpolationsverfahren in CNC's.

1996 Digitale Antriebsregelung und Feininterpolation mit Auflösungen im

Submikronbereich (< 0,001 µm) und Vorschüben bis 100 m/min.

1998 Hexapoden und Multifunktionsmaschinen erreichen Industriereife.

2000 CNC's und SPS mit Internet-Schnittstellen erlauben den weltweiten Datenaustausch und intelligente Fehlerdiagnose/-behebung.

2002 Erste hochintegrierte, universell konfigurierbare IPC-CNC's incl. Datenspeicher, SPS, digitalen SERCOS-Antriebsschnittstellen und PROFIBUS-Schnittstellen auf einer PC-Steckkarte.

2003 Elektronische Kompensationen mechanischer, thermischer und messtechnischer Fehlerquellen.

2004 Die externe dynamische Prozess-Simulation der NC-Programme am PC zwecks Fehlererkennung und Programmoptimierung wird zunehmend wichtiger. Dazu werden Maschine, Spannvorrichtung und Werkstück virtuell und realitätsnah grafisch-dynamisch dargestellt.

2005 CNC's mit Nano- und Pico-Interpolation verbessern die Werkstück-Oberflächen und die Genauigkeit.

2007 Teleservice: Unterstützung des Personals per Telefon oder Datenleitung bei der Inbetriebnahme, zur Fehlerdiagnose, Wartung und Reparatur von Maschinen und Anlagen.

2008 Um die gestiegenen Ansprüche bezüglich Sicherheit für Mensch, Maschine und Werkzeug zu erfüllen, werden spezielle Sicherheitssysteme entwickelt. Anforderungen wie „Sichere Bewegung", „Sichere Peripherie-Signalverarbeitung" und „Sichere Kommunikation" werden von der CNC und den Antriebsystemen realisiert. Zusätzliche, aufwändige Softwareentwicklungen und Verdrahtungen sind nicht erforderlich.

2009 Die Komplettbearbeitung auf einer Werkzeugmaschine, insbesondere Drehen/Fräsen/Schleifen setzt sich immer mehr durch.
Die Bezeichnung „Green Production" für umweltfreundliche und energieeffiziente Werkzeugmaschinen hat sich etabliert.

2010 Die Einführung von Mehrkernprozessoren in CNC's bringt einen weiteren Leistungsschub. Funktionen, die bisher vorberechnet werden mussten, können nun in die Steuerung integriert werden (z. B. bei der Spline-Interpolation).

2011 Die CNC erfasst mit der Funktion „Energy Analysis" den Energieverbrauch der gesamten Maschine. Durch eine Zeitanalyse der einzelnen Verbraucher und deren bedarfsgerechte Steuerung lässt sich die Enegieeffizienz der Maschine verbessern.

2012 Hybridmaschinen entstehen, die in einer Aufspannung zwei bis fünf unterschiedliche Bearbeitungen an Werkstücken ausführen können (z. B. drehen, fräsen, schleifen, verzahnen, härten).



MTS

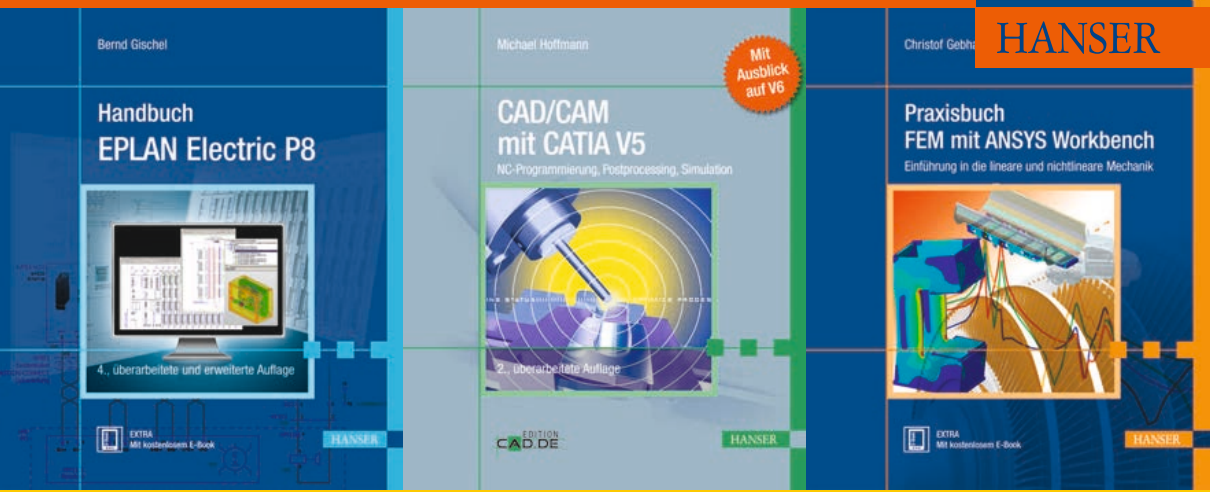
Das Werkstück-Palettiersystem für wirtschaftliches Produzieren.
Für Einzel- oder Mehrfachpalettierung, überwachte Zustandskontrolle.

www.erowa.com

EROWA®
system solutions

FACHZEITSCHRIFTEN | FACHBÜCHER | ONLINE-SERVICES | SEMINARE

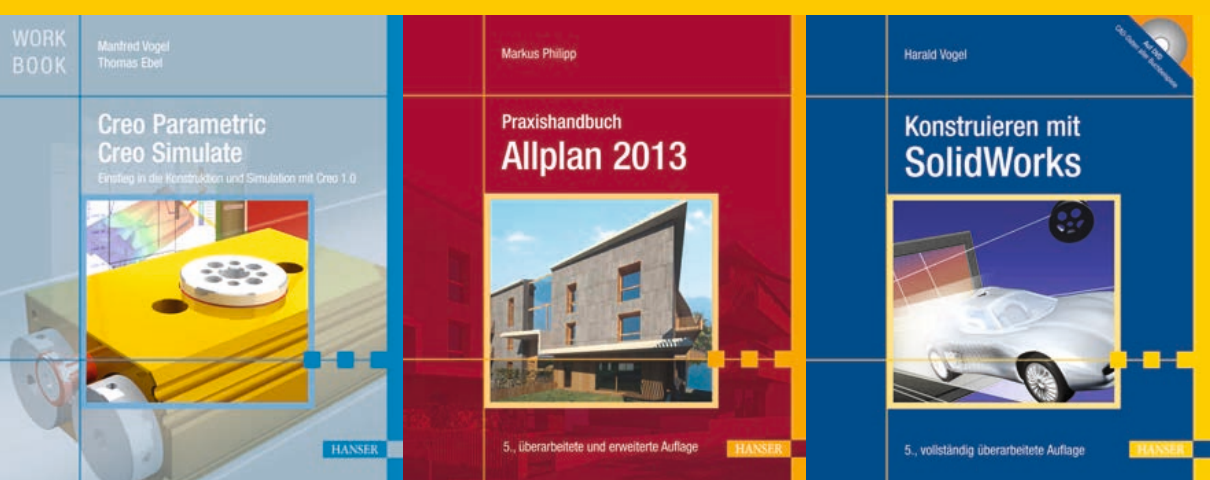
HANSER



Alle Themen. Alle Level.



Nur bei Hanser.



Carl Hanser Verlag · Kolbergerstr. 22 · 81679 München · Tel.: +49 89 99830-0 · Fax: +49 89 99830-157 · direkt@hanser.de · www.hanser-fachbuch.de

3 Was ist NC und CNC?

Der Begriff NC wurde aus der amerikanischen Fachsprache übernommen und steht als Abkürzung für „Numerical Control“, auf deutsch „Numerische Steuerung“, d. h. Steuerung durch Eingabe von Zahlen. CNCs sind Numerische Steuerungen auf Computerbasis zur Steuerung und Regelung von Werkzeugmaschinen. Hier werden die wesentlichen Grundbegriffe erklärt.

3.1 Der Weg zu NC

Bei Produktionsmaschinen ist die vorwiegende Aufgabe einer Steuerung, gleichbleibende Bewegungsabläufe schnell und präzise zu wiederholen, sodass Massenprodukte mit einheitlicher Qualität ohne menschliche Eingriffe entstehen. Je nach den verwendeten **Steuerungskomponenten** spricht man von **mechanischen, elektrischen, elektronischen, pneumatischen oder hydraulischen Steuerungen.**

Zur Bearbeitung eines Werkstückes braucht eine Werkzeugmaschine „Informationen“.

Vor Einführung der NC-Technik wurden die „Weginformationen“ entweder manuell durch den Maschinenbediener oder durch mechanische Hilfsmittel wie Schablonen oder Kurvenscheiben vorgegeben. Ablaufänderungen oder Umstellungen auf ein anderes Produkt waren deshalb mit längeren Stillstandszeiten zur **Umrüstung der Maschinen und Steuerungen** verbunden. Dazu wurden justierbare Nocken und Nockenleisten verwendet, um Bewegungen an genau definierten Positionen über Endschalter abzuschalten. Das exakte Justieren dieser Begrenzungsnocken war sehr zeitaufwändig. Hinzu kamen noch die Zeiten für den manuellen Wechsel der Werkzeuge, für die Vorgabe der Spindeldrehzahlen und Vorschübe, für die Werkstückspannung, für das genaue Einrichten der Maschine und für den Programmaustausch. Insgesamt hatten diese Programm-Steuerungen einen sehr begrenzten Steuerungsumfang, bedingt auch durch die geringe Anzahl der möglichen Schaltschritte.

Eine flexible, d. h. häufige Umstellung und die Bearbeitung komplexer Formen war mit diesen Maschinen nicht wirtschaftlich möglich.

Ein neues **Steuerungskonzept** wurde gesucht, das folgende Forderungen erfüllt:

- Einen möglichst unbegrenzten Steuerungsumfang bezüglich Programmlänge und Bewegungen,
- Keine manuellen Hilfen durch Eingriffe in den Bearbeitungsablauf,
- Gespeicherte, schnell austauschbare und korrigierbare Ablaufprogramme,
- Keine Nocken und Endschalter für unterschiedlich lange Verstellwege,
- Exakt definierbare und simultane, dreidimensionale Bewegungen mehrerer

Achsen zur Bearbeitung komplexer Formen und Oberflächen,
- Ein schneller Wechsel der Werkzeuge incl. Vorschubgeschwindigkeiten und Drehzahlen,
- Bei Bedarf ein automatischer Wechsel der zu bearbeitenden Werkstücke.

Es sollten **Steuerungen** sein**,** die schnell und fehlerfrei auf wechselnde Bearbeitungsaufgaben umstellbar sind. Zur Steuerung der Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück sollte man die Maßangaben aus der Werkstückzeichnung nutzen können. Hoch auflösende Positionsmesssysteme mit elektronisch auswertbaren Messdaten sollten die präzise Relativbewegung zwischen Maschine und Werkzeug gewährleisten.

Solche Steuerungen funktionieren demnach durch Eingabe von Zahlen, also numerisch. Damit war die Grundidee der **Numerischen Steuerungen** definiert.

Mit weiteren Zahlen sollte man die Vorschubgeschwindigkeit, die Spindeldrehzahl und die Werkzeugnummer programmieren können. Zusätzliche **Schaltbefehle** (M-Funktionen) sollten den automatischen Werkzeugwechsel aktivieren und das Kühlmittel Ein/Aus-schalten

Alle Zahlenwerte entsprechend der Bearbeitungsfolge Schritt für Schritt aneinandergereiht, ergeben das **NC-Programm** zur Steuerung der Maschine.

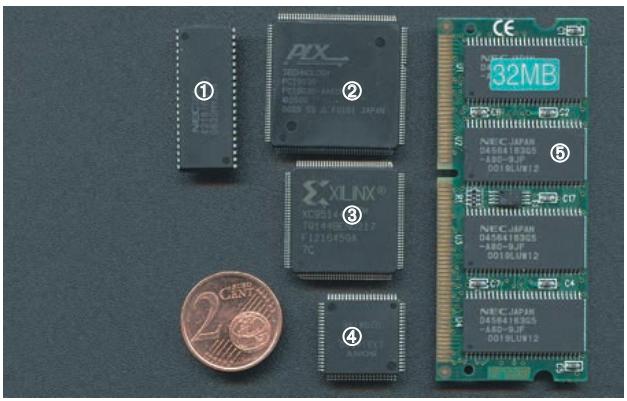
Von der NC zur CNC

Die ersten Numerischen Steuerungen waren mit Relais aufgebaut und „verbindungsprogrammiert“ oder auch „fest verdrahtet“. Kurz nacheinander folgten erste elektronische Funktionsbausteine, wie Elektronenröhren, Transistoren und Integrierte Schaltkreise. Aber erst mit dem Einsatz der Mikroelektronik und der Mikroprozessoren wurden die Steuerungen preiswerter, zuverlässiger und leistungsfähiger.

CNCs müssen zur Bearbeitung der Werkstücke außer den Weg- und Schaltinformationen ständig weitere Zahlenwerte verarbeiten, beispielsweise zur Kompensation unterschiedlicher Fräserdurchmesser und Werkzeuglängen oder von Aufspanntoleranzen. Aufgrund ihrer hohen Verarbeitungsgeschwindigkeit sind sie in der Lage, sämtliche Verwaltungs-, Anzeige- und Steuerungsfunktionen zeitgerecht auszuführen. Unabhängig davon kann während der Bearbeitung auch noch an der Maschine mit grafisch-dynamischer Unterstützung das nächste Teileprogramm eingegeben werden.

3.2 Hardware *(Bild 3.1 und 3.2)*

Die Elektronik heutiger CNCs ist unter Verwendung von **Mikroprozessoren**, **integrierten Schaltkreisen** (ICs) und evtl. speziellen Bausteinen für die Servo-Regelkreise aufgebaut. Hinzu kommen elektronische **Datenspeicher** für mehrere Programme, Unterprogramme und für viele Korrekturwerte:
- in **ROMs** und **EPROMs** sind vorwiegend die unveränderlichen Teile des CNC-Betriebssystems gespeichert, sowie feste, oft benutzte Bearbeitungszyklen und Routinen,
- in **FEPROMs** speichert man Daten, die man erst bei der Inbetriebnahme ermitteln kann und die unverlierbar und gelegentlich modifizierbar sein müssen, wie z. B. Maschinenparameter, Sonderzyklen oder Unterprogramme,
- in **RAM-Speichern** mit ausbaufähigen Kapazitäten sind vorwiegend Teileprogramme und Korrekturwerte gespeichert.



① = DRAM-Baustein

② = PCI-Bus Controller

③ = EPLD-Baustein – Erasable Programmable Logic Device

④ = Gigabit receiver/transmitter – Einsatz bei der Ansteuerung von LCD-Displays

⑤ = DRAM Bank, max. 1 GB

Bild 3.1: Beispiele hoch integrierter Bausteine der Mikroelektronik

Die grafischen Anzeigen und dynamischen Simulationen erfordern ebenfalls viel Rechen- und Speicherkapazität. In den meisten Steuerungen kommen deshalb zusätzliche, spezielle **Customer-Designed VLSIs** zum Einsatz. Dies sind hoch integrierte Bausteine der Mikroelektronik, die speziell nach Kundenforderungen ausgelegt und in großen Mengen hergestellt werden. Dadurch erreicht man wiederum ein geringes Bauvolumen, hohe Zuverlässigkeit und Schnelligkeit der Steuerung, sowie später einen minimalen Wartungsaufwand.

Alle Baugruppen der elektronischen Ausrüstung befinden sich auf einer oder mehreren gedruckten Leiterplatten, die in einem Baugruppenträger stecken und durch eine interne Busverbindung untereinander verbunden sind *(Bild 3.2)*. Zur Vermeidung von Fehlreaktionen der CNC ist die Elektronik in ein elektrostatisch und elektromagnetisch **abschirmendes Blechgehäuse** eingebaut. Dieses sollte auch öl- und staubdicht sein, weil Ablagerungen feinster Metallpartikel auf den Leiterplatten die Betriebssicherheit der Anlage gefährden.

Deshalb kann auch keine Umluft zur **Kühlung** des Schrankinneren verwendet werden, auch nicht mit **Filtern,** die sich zusetzen und damit den Ausfall der Kühlung zur Folge haben. Wenn die Wärmeabfuhr über die Schrankoberfläche nicht ausreicht, ist ein aktives **Kühlaggregat** die einzig akzeptable Lösung. Damit erweitert sich der Bereich zulässiger Umgebungstemperaturen auf +10 bis +45 Grad Celsius. Die Luftfeuchtigkeit sollte 95 % nicht überschreiten. Oft muss der Anwender auch schon bei niedrigeren Werten auf Kondenswasserbildung achten, was ebenfalls zu Störungen und Beschädigungen führt.

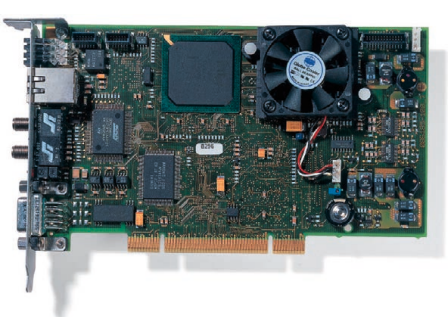


Bild 3.2: Steckbare Elektronik-Baugruppe für einen Industrie-PC (IPC). Auf einer Karte sind Antriebs-, CNC- und SPS-Funktionen zusammengefasst. An der Frontseite befinden sich TCP/IP-, Profibus DP- und Sercos-Schnittstellen.

3.3 Software

CNCs benötigen ein **Betriebssystem,** das auch als **Steuerungs- oder Systemsoftware** bezeichnet wird. Es besteht prinzipiell aus zwei Teilen:

- der Standard-Software und
- der maschinenspezifischen Software.

Die **Standard-Software**, beispielsweise für die Dateneingabe, Anzeigen, Schnittstellen oder zur Tabellenverwaltung, kann zum Teil von handelsüblichen Rechnern übernommen werden. Die **maschinenspezifische Software** muss speziell für den zu steuernden Maschinentyp ausgelegt sein, da z. T. gravierende Unterschiede in der Kinematik und dem Betriebsverhalten der Maschinen bestehen. Ein Vorteil von CNCs ist, dass Modifikationen oder Anpassungen ohne Eingriffe in die CNC-Hardware realisierbar sind.

Das Betriebssystem bestimmt insgesamt die Leistungsfähigkeit der Maschine. Die im Hintergrund ständig mitlaufende Überwachungs- und Fehlerdiagnose, die Erfassung der Maschinendaten und die Datenschnittstellen werden ebenfalls von der Software verwaltet. Ebenso das CNC-integrierte Programmiersystem mit grafischer Simulation des Bearbeitungsvorganges und die Verarbeitung der Korrekturwerte. Maschinenspezifische Varianten können per Software berücksichtigt werden, wie bspw. die Anzahl der Achsen, Parameterwerte für die Servoantriebe, unterschiedliche Werkzeugmagazine und -wechsler, Software-Endschalter oder der Anschluss von Werkzeugüberwachungseinrichtungen. Diese **Maschinen-Parameterwerte** werden einmalig bei der Inbetriebnahme eingegeben und fest gespeichert.

(Siehe Kapitel CNC – Computerized Numerical Control)

CNCs verfügen darüber hinaus noch über eine BASIC-, PASCAL- oder C^{++}-ähnliche **integrierte Programmiersprache**. Mit deren Hilfe sind Sonderlösungen und spezielle Funktionen realisierbar, ohne das CNC-Basisprogramm zu verändern. Hier hat der Maschinenhersteller die Möglichkeit, eigenes Know-how in die Steuerung einzubringen und Lösungen für spezielle Fertigungsprobleme anzubieten. Selbst auf die Bildschirm-Grafik kann er dabei zugreifen und Bedienerhilfen selbst erstellen.

3.4 Steuerungsarten

Von der anfänglichen Entwicklung her unterscheidet man zwischen vier unterschiedlich leistungsfähigen Steuerungsarten:

Punktsteuerungen *(Bild 3.3)* arbeiten nur im Positionierbetrieb. Alle programmierten Achsen starten immer gleichzeitig mit Eilganggeschwindigkeit, bis jede Achse ihre Zielposition erreicht hat. Während der Positionierung ist kein Werkzeug im Eingriff. Die Bearbeitung beginnt erst, wenn alle NC-Achsen ihre programmierte Position erreicht haben.

Beispiele: Bohrmaschinen, Stanzmaschinen, Zustellbewegungen bei Ablängmaschinen.

Streckensteuerungen können in den einzelnen Achsen nacheinander im programmierbaren Vorschub verfahren, wobei das Werkzeug im Eingriff sein kann. Die Fahrbewegung ist immer achsparallel und die Vorschubgeschwindigkeiten müssen programmierbar sein. Aufgrund der dadurch gegebenen starken technischen Einschränkungen und des geringen Preisunterschiedes zu Bahnsteuerungen sind Streckensteuerungen nur in Ausnahmefällen interessant.

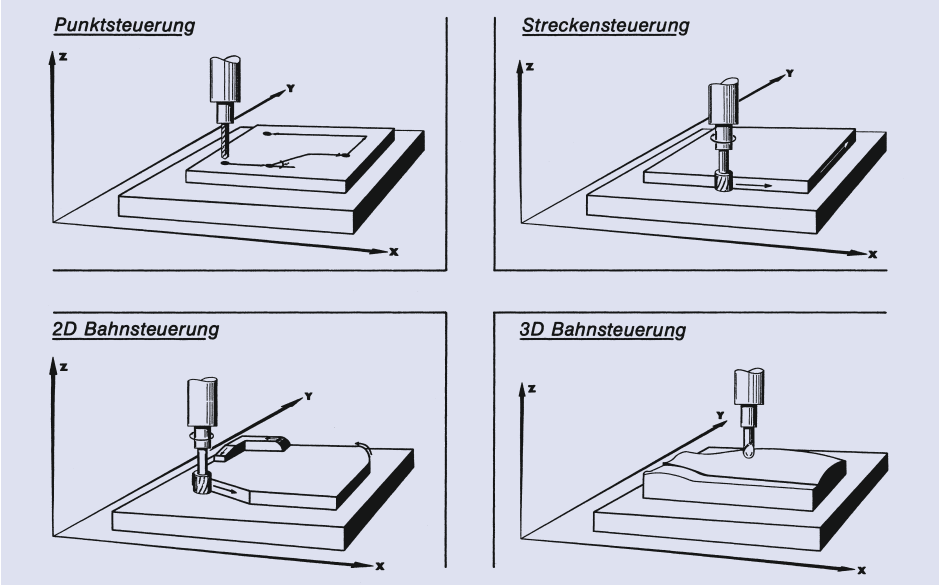


Bild 3.3: Entwicklung der NC-Technik von der Punkt- zur 3D-Bahnsteuerung.

Beispiele: Vorschubsteuerung für Bohrmaschinen, Werkstückhandhabung.

Bahnsteuerungen können zwei oder mehr NC-Achsen „interpolierend" d. h. in exaktem Verhältnis zueinander verfahren. Die Koordination übernimmt der **Interpolator,** der satzweise die zwischen Start- und Endpunkt liegenden Bahnpunkte berechnet. Am programmierten Endpunkt stoppen die NC-Achsen jedoch nicht, sondern fahren ohne Unterbrechung den anschließenden Bahnabschnitt weiter bis zu dessen Endpunkt. Die Vorschubgeschwindigkeiten der Achsen werden fortlaufend so geregelt, dass die vorgegebene Schnittgeschwindigkeit eingehalten wird.

Dies bezeichnet man als **Dreidimensionale Bahnsteuerung,** oder kurz **3D-Steuerung.** Mit ihr können Werkzeugbewegungen in der Ebene und im Raum ausgeführt werden.

Beispiele: Fräsmaschinen, Drehmaschinen, Erodiermaschinen, Bearbeitungszentren, eigentlich alle Maschinentypen.

Linear- oder Geradeninterpolation
(Bild 3.4 und 3.5)
Dabei bewegt sich das Werkzeug geradlinig, d. h. linear vom Start- zum Zielpunkt. Die Linearinterpolation lässt sich theoretisch für beliebig viele Achsen programmieren. Für Werkzeugmaschinen sind bis zu fünf **simultane Achsen** sinnvoll, und zwar für XYZ zur Bestimmung des anzufahrenden räumlichen Zielpunktes und zwei zusätzliche Schwenkbewegungen, z. B. A und B, zur Lagebestimmung der Fräserachse im Raum oder für Bearbeitungen auf schrägen Flächen. Damit sind alle Profil- und Raumkurven erzeugbar, indem man diese durch lineare **Polygonzüge** annähert. Je dichter die einzelnen Stützpunkte beieinanderliegen, d. h. je enger die Toleranzbreite, desto

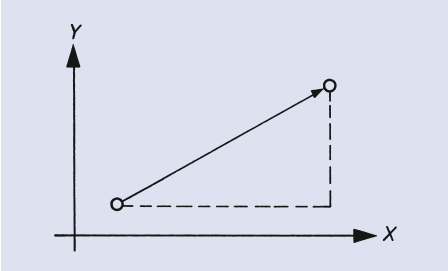


Bild 3.4: Linear- oder Geradeninterpolation.

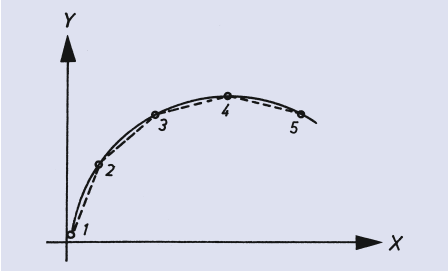


Bild 3.5: Annäherung einer Kurve durch einen Polygonzug.

genauer ist die Annäherung an das gegebene Profil. Mit der Anzahl der Punkte erhöht sich aber auch die zu verarbeitende Datenmenge pro Zeiteinheit, d. h. die Steuerung muss eine dementsprechend hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit haben.

Zirkular- oder Kreisinterpolation *(Bild 3.6)* Theoretisch lassen sich alle Bahnen durch die Geradeninterpolation als Polygonzüge annähern. Die Kreis- und Parabelinterpolation reduzieren die Menge der Eingabedaten, erleichtern damit die Programmierung für diese Bahnen und erhöhen deren Genauigkeit.

Die **Kreisinterpolation** ist auf die Hauptebenen XY, XZ und YZ begrenzt.

Je nach Steuerung wird die Kreisinterpolation unterschiedlich programmiert: in Viertelkreisen, als Vollkreis, mit Hilfe der Kreismittelpunktsangabe oder Kreisendpunkt- und Radiusprogrammierung (siehe Kapitel Programmierung).

Parabel-, Spline- und Nano/Pico-Interpolation → Teil 2: Funktionen der numerischen Steuerung.

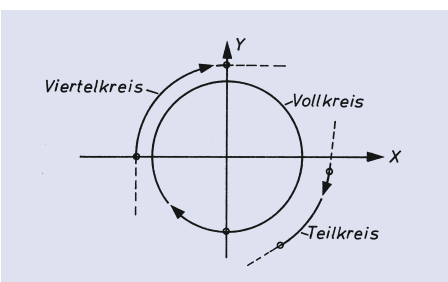


Bild 3.6: Zirkular- oder Kreisinterpolation.

3.5 NC-Achsen *(Bild 3.7)*

Die **Koordinatenachsen** können, je nach Maschine, als translatorische oder rotatorische Achsen ausgeführt sein. Die translatorischen Achsen stehen meist rechtwinklig zueinander, sodass mit drei Achsen jeder Punkt im Arbeitsraum erreicht werden kann. Zwei zusätzliche Dreh- und Schwenkachsen ermöglichen die Bearbeitung schräger Flächen des Werkstücks oder die Nachführung der Fräserachse.

Um NC-Achsen numerisch steuern zu können, benötigt jede NC-Achse

- **ein elektronisch auswertbares Wegmesssystem und**
- **einen regelbaren Servoantrieb.**

Aufgabe der CNC ist es, die vom NC-Programm über die CNC vorgegebenen **Positions-Sollwerte** mit den vom Wegmesssystem zurückgemeldeten **Positions-Istwerten** zu vergleichen und bei Abweichung ein Stellsignal an die Achsantriebe

auszugeben, welches diese Abweichung ausgleicht *(Bild 3.7)*. Man bezeichnet dies als **geschlossene Regelkreise**. Bahnsteuerungen geben fortlaufend neue Positionswerte aus, denen die zu steuernden Achsen nachlaufen müssen. So werden kontinuierliche Bahnbewegungen erreicht.

Bei Drehmaschinen ist auch die **Hauptspindel als NC-Achse** ausgelegt, wenn angetriebene Werkzeuge zum Bohren und Fräsen zum Einsatz kommen sollen. Auch bei Bohr- und Fräsmaschinen können die Spindeln als NC-Achse ausgelegt werden, wenn die Funktionen „Spindelorientierung“ und „Schraubenlinien-Interpolation“ programmierbar sein sollen.

Bearbeitungszentren sind meistens mit **numerisch gesteuerten Drehtischen** ausgerüstet.

Zunehmend werden auch die einzelnen **Positionen im Werkzeugmagazin** wie NC-Achsen angefahren. Der Einsatz von Positionsmesssystemen erspart andere, aufwändige Codiereinrichtungen zur Erkennung der Magazinplatz-Nummern oder der Werkzeuge. Der gesamte Vorgang zum Suchen und Wechseln der Werkzeuge wird wesentlich schneller.

Die **Achsbezeichnung der Maschine** erfolgt nach den Regeln des Kartesischen Koordinatensystems:

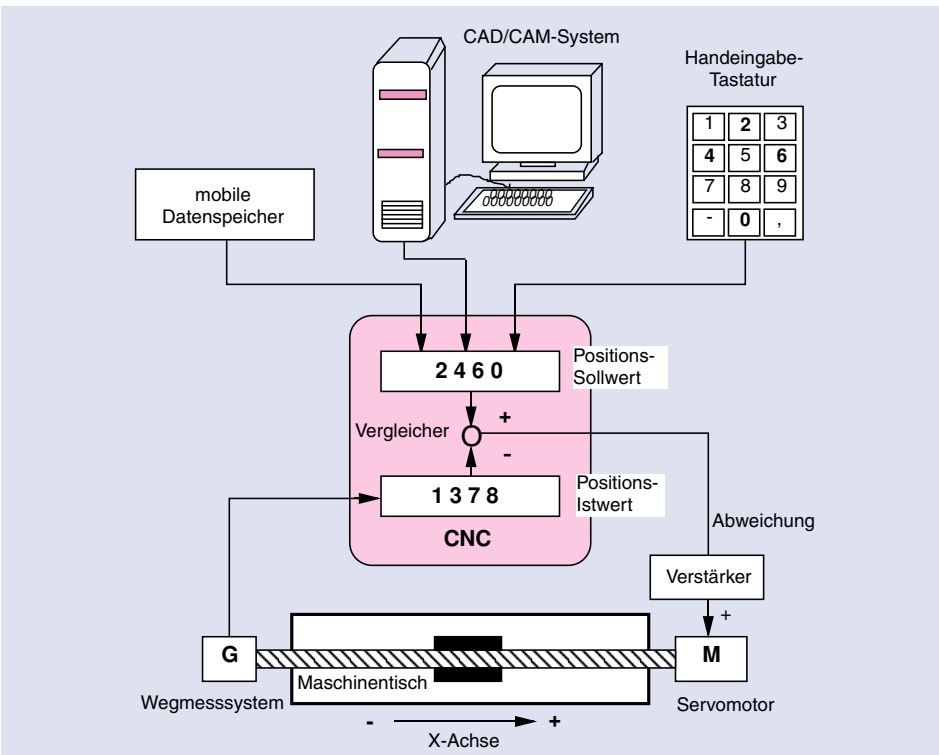


Bild 3.7: Prinzip der Eingabe und Verarbeitung geometrischer Informationen im geschlossenen Regelkreis.

- Translatorische Achsen mit den Adressbuchstaben **X, Y, Z**,
- parallele Achsen dazu mit **U, V, W**
- Dreh- oder schwenkbare Achsen **A, B und C.**

→ Kapitel „Numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen“.

3.6 SPS, PLC *(Bild 3.8)*

„Speicher-Programmierbare Steuerungen“ ***(Programmable Logic Controller)*** sind sozusagen der „elektronische Nachfolger“ der früher für den gleichen Zweck eingesetzten Relaissteuerungen, jedoch mit den zusätzlichen Vorteilen einer reduzierten Baugröße und Störanfälligkeit, sowie schnelleren Reaktionszeiten.

Die SPS hat im Wesentlichen die Aufgabe, alle Verknüpfungs- und Verriegelungsaufgaben zu steuern und zu überwachen. Einige Funktionen, die immer in gleichbleibender Reihenfolge ablaufen, wie z. B. Werkzeugwechsel und Werkstückwechsel, werden von der CNC durch einen Schaltbefehl nur „angestoßen“. Der weitere Ablauf erfolgt automatisch, schrittweise gesteuert und überwacht durch die SPS. Ist dieser Zyklus fehlerfrei beendet, dann gibt die SPS ein Signal an die CNC, die den Ablauf des NC-Programmes fortsetzt.

Alle Steuerungsaufgaben sind als Soft-

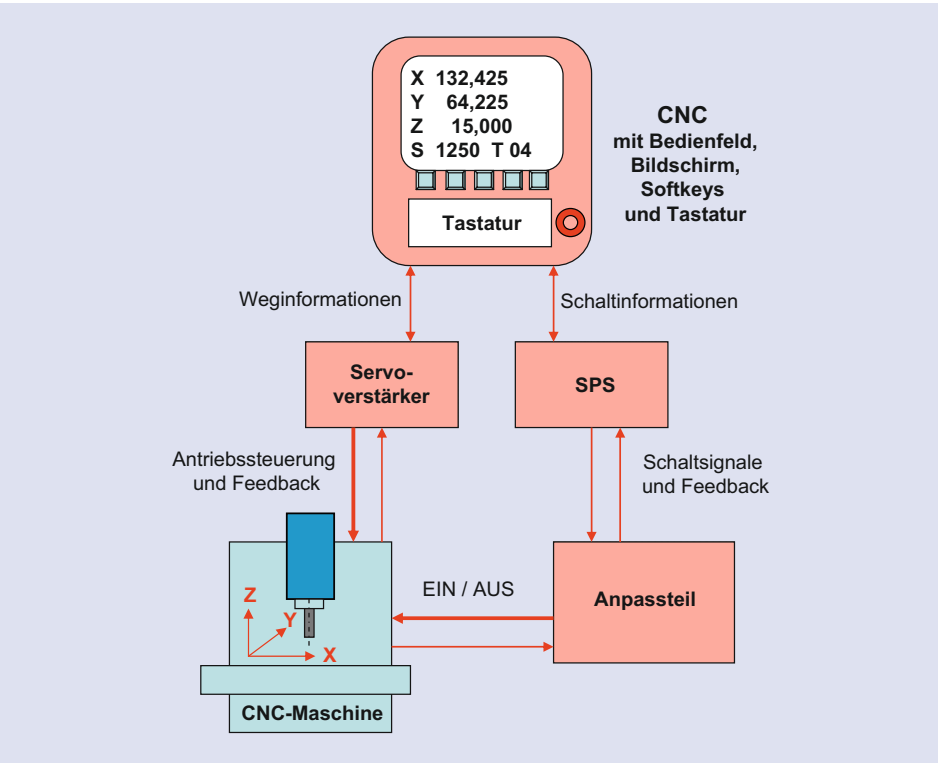


Bild 3.8: Prinzip einer CNC mit Antriebsverstärkern für die Servoantriebe und der externen SPS mit Anpassteil

FANUC

Alles für Ihre Produktivität:
Mit 55 Jahren Erfahrung, 2,4 Millionen installierten CNC-Systemen und 65% weltweitem Marktanteil sind wir die Nr. 1. Unsere neue Hochleistungs-CNC 30*i*-B steuert komplexe 5-Achs-Bearbeitungsmaschinen – mit höchster Präzision und der höchsten Zuverlässigkeit der Branche, unterstützt durch engagierten FANUC-Service und -Support.

5-Achs-Bearbeitung

Fordern Sie uns heraus!



SMART · STRONG · YELLOW

WWW.FANUC.EU

HANSER

Lernen Sie aus den Fehlern anderer.

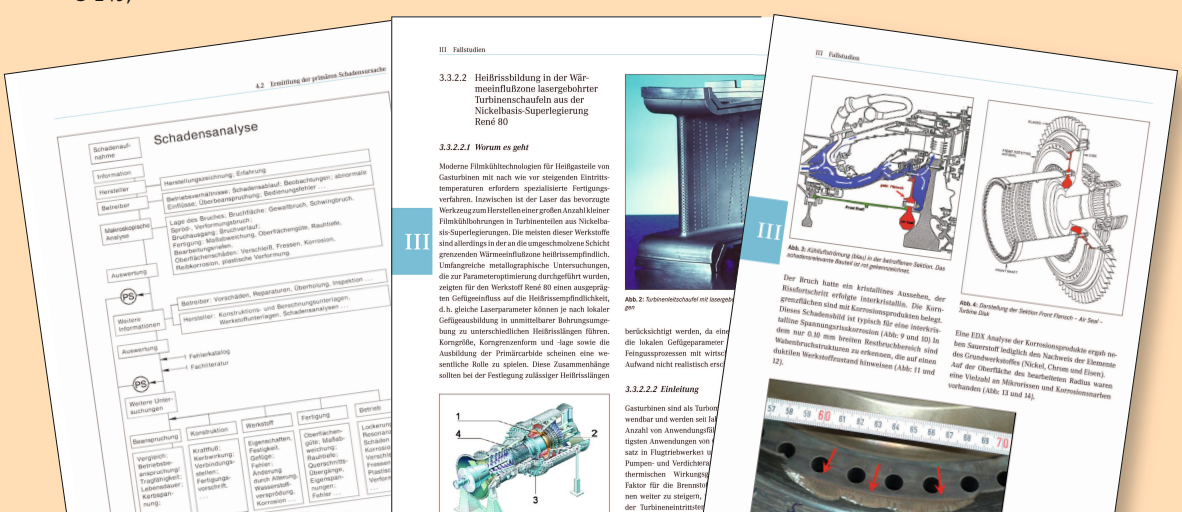


370 rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von typischen Metallschäden!

- Einmaliger REM-Bildatlas und Beispielsammlung mit klaren und verständlichen Erläuterungen
- Zusammenstellung von über 50 Schadensfällen, geordnet nach Schadenskategorie
- Ermöglicht Ihnen die schnelle und sichere Einordnung von Schadensbildern
- Die unverzichtbare Referenz bei der Schadensanalyse

Gewinnen Sie wertvolle Anregungen für Ihre tägliche Arbeit! Nutzen Sie diese bewährten Lösungen!

A. Neidel u.a.
Handbuch Metallschäden
REM-Atlas und Fallbeispiele zur Ursachenanalyse und Vermeidung
2., überarbeitete Auflage. 828 Seiten
ISBN 978-3-446-42775-4
€ 249,-



ware in der SPS abgespeichert. Dies bietet insbesondere bei Änderungen, Modifikationen, Erweiterungen und bei der elektrischen Ausrüstung von Serienmaschinen bedeutende Vorteile.

Die SPS-Hardware kann komplett in die CNC integriert sein, d. h. die beschriebenen Logik-Funktionen werden vom CNC-Prozessor übernommen und die Steuersignale an das Anpassteil ausgegeben.

Bei komplexeren Maschinen bevorzugt der Hersteller meistens eine separate SPS. Dies hat den Vorteil, dass der Maschinenhersteller das SPS-Programm unabhängig von der CNC erstellen und testen kann. Viele Funktionen der Maschinen lassen sich somit bereits vor Anlieferung der CNC in Betrieb nehmen.

(siehe Teil 2, 3. SPS – Speicherprogrammierbare Steuerungen)

In modernen Werkzeugmaschinen wird die SPS auch dazu eingesetzt, den Prozess selbst zu überwachen. In Programmteilen mit hoher Priorität werden verschiedene Daten der CNC überwacht, um bspw. einen Werkzeugbruch in Bruchteilen von Sekunden festzustellen und rechtzeitig in der richtigen Richtung vom Werkstück wegzufahren, bevor weitere Schäden entstehen können.

3.7 Anpassteil *(Bild 3.8)*

Der Sprachgebrauch unterscheidet zwischen ***Anpassteil*** und ***Anpasssteuerung***.

Unter **Anpassteil** versteht man den Schaltschrank, der alle Sicherungen, Motorschutzschalter, Trafos, Schaltschütze für Hilfsantriebe, Verstärker für Hochleistungsantriebe und Anschlußklemmen enthält.

Über das Anpassteil werden die Hilfsantriebe geschaltet, die z. B. die Mechanik von Werkzeug- und Werkstückwechsel bewegen, oder die Kühlmittelversorgung und die Späneabfuhr einschalten.

Bei CNC-Maschinen mit *separater* SPS ist diese ebenfalls im Anpassteil eingebaut.

Aufgabe der **Anpasssteuerung** ist es, Steuerungssignale zu entschlüsseln, zu interpretieren, logische Verknüpfungen durchzuführen und maschinenspezifische Funktionsabläufe zu steuern. In heutigen CNCs ist dies die Hauptaufgabe der SPS. Die erforderliche Hardware ist meistens auf der CNC-Platine mit integriert.

3.8 Computer und NC

Die Entwicklung und Nutzung von Computern und CNCs erfolgte von Anfang an fast zeitgleich. Die Einsatzbereiche wurden sehr schnell größer.

Computer in der CNC

Heute sind Mikrocomputer das zentrale Bauteil jeder CNC. Da die Hardware von Industrie-Computern (IPC's) ein standardisiertes Massenprodukt ist, verlagern sich die Entwicklungsaufgaben des Computeranwenders in die Software.

Dadurch ergeben sich auch die **wesentlichen Vorteile der CNCs:**

- Software lässt sich preiswert, schnell und fehlerfrei kopieren und für Folgemaschinen verwenden,
- Software verschleißt nicht, ist nicht reparaturanfällig, also wartungsarm
- Software lässt sich relativ einfach pflegen, d. h. verbessern, modifizieren und bei Bedarf austauschen, ohne die Hardware oder die „Verdrahtung" ändern zu müssen,
- Software lässt sich in Funktionsbausteine unterteilen und nach Bedarf kombinieren, woraus sich verschiedene Vorteile ergeben,

- Die serienmäßige Hardware der IPC's und das Rechner-Betriebssystem bieten alle erforderlichen, standardisierten Schnittstellen zum Anschluss von Peripheriegeräten,
- Schnelle Fehleranalyse mit Anzeige,
- Anlage aus der Ferne veränderbar (Teleservice),
- Geringerer Stromverbrauch.

Durch die Rechnertechnik konnte man immer mehr CNC-Funktionen in immer kleineren Volumen unterbringen. Die integrierte Systemüberwachung und Fehlerdiagnose der Steuerungen ließ sich auf Softwarebasis so verbessern, dass Fehlfunktionen eliminiert werden konnten.

Der wichtigste Effekt war aber die Steigerung des Leistungsumfangs bei gleichzeitiger Kosten- und Preisreduzierung.

Die Miniaturisierung der Steuerung führte auch zu äußerlich sichtbaren Vorteilen: Aus früheren voluminösen Schaltschränken wurden kleinere, teilweise an den Maschinen angebaute „Schaltkästen".

Computer für die NC-Programmierung

Computer wurden bereits sehr früh zur Programmierung von NC-Maschinen eingesetzt. So ließ sich der Programmieraufwand und die erforderliche Zeit bei geometrisch komplizierten Werkstücken und dreidimensionalen Oberflächen wesentlich reduzieren. Schwierige und deshalb zeitaufwändige geometrische Berechnungen von Schnittpunkten, Übergängen, Konturzügen, Phasen, Rundungen und Formen übernimmt der Rechner. Der NC-Programmierer muss heute nur die dafür notwendigen Daten aus der Zeichnung eingeben oder direkt vom CAD-System übernehmen. Nebenrechnungen können entfallen.

Da die erforderlichen Rechner immer kleiner, leistungsfähiger, schneller und preiswerter wurden, konnte man maschinenspezifische NC-Programmiersysteme auch direkt in die CNC integrieren. So entstanden CNCs mit dialoggeführter, grafisch unterstützter Programmierung an der Maschine. Diese Handeingabe-Steuerungen für die **Werkstattorientierte Programmierung (WOP)** bieten perfekte Programmierhilfen und grafische Anzeigen. Als beste Programmierhilfen gelten heute die Farbgrafik und die Dialogführung. Voraussetzung dafür ist eine NC-Programmiersoftware mit einer werkstattgerechten, logischen und verständlichen Bedienerführung.

Hierzu hat auch die **Simulationssoftware** sehr wesentlich beigetragen. Damit wird jede CNC-Maschine samt Werkstück, Spannvorrichtung und Werkzeugen und allen programmierten Bewegungen auf dem Bildschirm eines Rechners dreidimensional dargestellt. Der Bearbeitungsprozess lässt sich aus beliebigen Blickwinkeln beobachten, wobei die durchsichtige Darstellung des Werkstücks auch die Beobachtung des Bearbeitungsablaufs innerhalb des Werkstückes ermöglicht. Treten Kollisionen zwischen Werkstück, Werkzeug, Maschinenkörper oder Spannvorrichtung auf, ist dies durch Alarmsignal und entsprechende Farbgebung gut erkennbar. Der Programmfehler kann sofort korrigiert und das Ergebnis kontrolliert werden.

Computer für die Automatisierung *(Bild 3.9)*

Die Rechnertechnik hatte auch einen gravierenden **Einfluss auf die Konstruktion von CNC-Maschinen.** CNC-gesteuerte Be- und Entladestationen für Werkstücke erhöhen den **Automatisierungsgrad und die**

Flexibilität der Maschinen. Austauschbare Werkzeugkassetten ermöglichen die externe Vorbereitung und den schnellen Austausch kompletter Werkzeugsätze. Integrierte Roboter machen den Werkzeugwechsel schneller und flexibler. Durch die konsequente Nutzung der neuen Steuerungs- und Antriebstechnik ließen sich die Anzahl der Bauteile und die Preise der Maschinen um 25% bis 30% reduzieren, bei gleichzeitig verbesserter Leistung.

Immer mehr spezifische Einzelaufgaben in der Fertigung werden vernetzten Rechnersystemen übertragen mit dem Ziel, kostenoptimal zu produzieren. Diese **Computerintegrierten Fertigungssysteme** sind bereits in sehr vielfältigen Ausführungen und wirtschaftlich im Einsatz.

Die Zusammenfassung mehrerer CNC-Maschinen in **flexiblen Fertigungssystemen (FFS)** ließ sich erst zufriedenstellend realisieren, als man die gesamte Fertigungssteuerung für ein solches System einem oder mehreren Rechnern übertragen konnte. Dazu gehört nicht nur ein **DNC-System** für die automatische Übertragung der gespeicherten NC-Programme in die CNCs, es müssen auch Werkstücke und Werkzeuge mit allen Daten zum richtigen Zeitpunkt an der richtigen Maschine zur Verfügung stehen. Zusätzlich ist der Transport aller beweglichen Teile durch das Fertigungssystem zu steuern, zu überwachen und der gesamte Ablauf zu dokumentieren. Bei kleineren Störungen im System sollte der Betrieb über Notstrategien weiterlaufen, damit wertvolle Fertigungszeiten nicht verloren gehen.

CAD-Konstruktion, NC-Programmierung und die CNC-Fertigung bilden die **Digitalisierte Fertigung.** Die Forderung nach schnellerer Umsetzung der CAD-Daten in

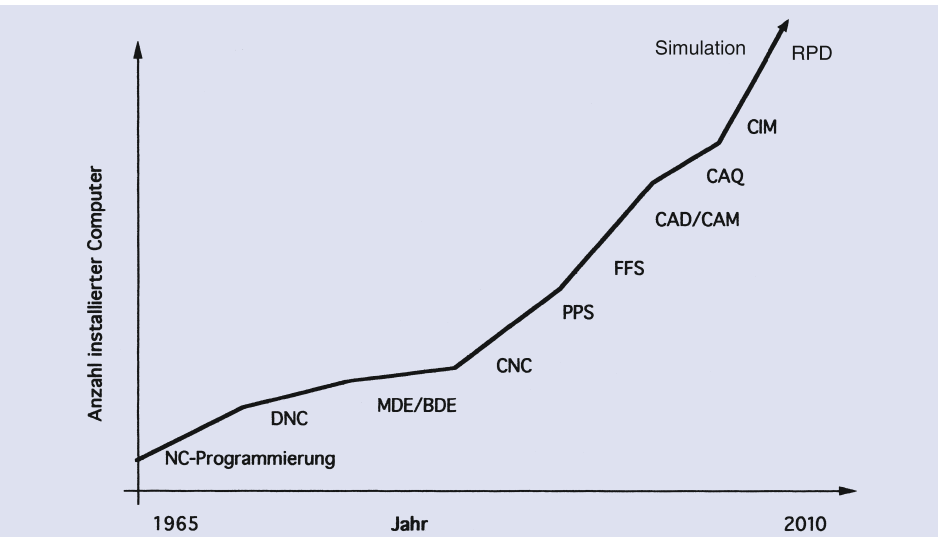


Bild 3.9: Durch die NC-Fertigung und die Automatisierung der Datenverarbeitung kamen immer mehr Computersysteme mit unterschiedlichen Aufgaben in den Fertigungsbereich. Tendenz weiterhin zunehmend.

Musterteile und nach kürzeren Produkt-Einführungszeiten lassen keine anderen Alternativen erkennen. Computer werden auch immer häufiger zum Planen, Vorbereiten, Transportieren, Messen, Prüfen, Überwachen, Montieren und Justieren eingesetzt.

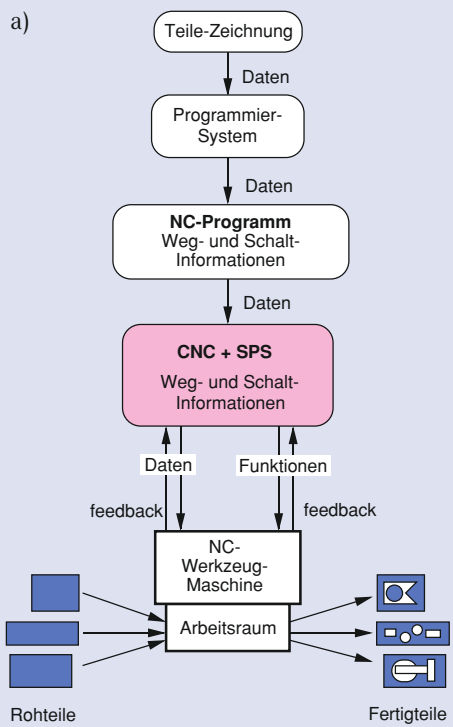
3.9 NC-Programm und Programmierung

(Bild 3.10 a und b)

Um Werkstücke mit CNC-Maschinen bearbeiten zu können erstellt der Anwender werkstückspezifische **NC-Programme**. Dies kann – je nach Organisation oder Komplexität der Werkstücke – in der Arbeitsvorbereitung oder direkt an der Maschine erfolgen.

Ein NC-Programm enthält alle Informationen zur Bewegung der Achsen (**Weginformationen**) und zur Aktivierung der **Schaltfunktionen**. Sie sind in der richtigen Reihenfolge für die Bearbeitung schrittweise aneinandergereiht. Zur Eingabe in die CNC werden sie auf einem automatisch lesbaren Datenträger gespeichert. Besteht eine direkte Datenverbindung zum Rechner (DNC), dann wird das NC-Programm direkt in die CNCs übertragen.

a)



b)

```
N1000
N5 G90 F600 S3600 T08 M06
N10 M3
N15 G00 X-20 Y-20 M8
N20 G00 Z-5
N25 G41
N30 G01 X0 Y0
N35 G01 X0 Y30
N40 G02 X14.374 Y33 I7.5 J0
N45 G03 X18.965 Y30 I4.581 J2
N50 G01 X33.860
N55 G01 X44.5 Y40
N60 G01 X50
N65 G02 X65 Y25 I7.5 J-7.5
N70 G03 X49 Y5.932 I9.226 J-23.989
N75 G01 X0 Y0
N80 G40
N85 G00 X-25 Y-25
N90 G0 Z100 M9
N95 M5
N100 M30
```

Bild 3.10 a: Umsetzung der Werkstück- und Bearbeitungsdaten in Weg- und Schaltinformationen für die NC-Maschine.

Bild 3.10 b: NC-Programm (Musterbeispiel)

Wesentliche Voraussetzung für die Einführung von NC-Maschinen war der **genormte Programmaufbau**. Man einigte sich sehr früh auf einen international genormten Code nach ISO-Empfehlung, der dann auch in die **DIN 66 025** einfloss. Damit war der Programmaufbau für alle NC-Maschinen weitestgehend vereinheitlicht und die Programmierung konnte extern und maschinenunabhängig mit jedem Programmiersystem erfolgen. Die spezielle Anpassung an eine bestimmte CNC-Maschine ist Aufgabe des **Postprozessors**. Dieses Umsetzer-Programm kann entweder im CAD-Rechner oder in einem nachgeschalteten Programmiersystem (CAM) implementiert sein.

Der genormte **Programmaufbau** wird im → Teil 5, Kapitel *„NC-Programm“* beschrieben.

Programmiersysteme (CAD/CAM) *(Bild 3.11 a und b)* erleichtern die Programmierung und vermeiden langwierige und zeitintensive Nebenrechnungen. Die abschließende grafisch-dynamische Simulation des Bearbeitungsablaufs am Bildschirm gibt dem Programmierer die Sicherheit, dass keine Programmierfehler gemacht wurden. Erfolgt die Werkstück-Konstruktion auf CAD-Systemen, dann besteht die Möglichkeit, die erzeugten Werkstückdaten vom CAD-Rechner auf ein CAM-System zu übertragen und direkt zur NC-Programmierung zu nutzen.

3.10 Dateneingabe

Zur Eingabe der NC-Programme in die CNC werden Geräte und Datenträger benutzt, die uns vom Umgang mit PC’s bekannt sind:

- **eine ASCII-Tastatur** für die manuelle Dateneingabe und zur Eingabe von Korrekturen (Editing)
- **elektronische Datenspeicher** und entsprechende Schnittstellen (USB 2)
- **direkt** von einem Rechner (DNC) über Kabel oder Funk und geeignete Datenschnittstellen.

Tastatur

Fast alle CNCs verfügen heute über die Möglichkeit zur raschen, computerunterstützten Teileprogrammierung oder zur Programmkorrektur an der Maschine. Die ASCII-Tastatur ist weltweit die am häufigsten verwendete Tastatur bei interaktiven CNC-Systemen und PCs.

Elektronische Datenspeicher

Diese dienen in erster Linie zum schnellen Speichern, Transportieren und automatischen Einlesen der NC-Programme und sämtlicher Korrekturwerte in die CNC. An zweiter Stelle steht auch die Forderung, alle Daten mit den vorgenommenen Programm-Korrekturen wieder auslesen und speichern zu können.

An Stelle von PC-Cards haben sich **USB-Sticks und USB-Festplatten** durchgesetzt *(Bild 3.12).* Fast alle heutigen CNCs und PCs verfügen über USB 2.0- oder USB 3.0-Steckeranschlüsse und die erforderliche Treibersoftware.

USB-Sticks zählen zu den Flash-ROM-Speichern, die ihre gespeicherten Daten beim Abschalten der Stromversorgung nicht verlieren, aber gezielt gelöscht werden können.

Bezüglich der **Speicherkapazität** gab es eine stürmische Entwicklung: Geräte mit weniger als 2 GB sind kaum noch auf dem Markt, 128 GB sind bereits verfügbar.

Für **Archivierungszwecke** sind USB-Sticks zu teuer. Aber ihre mechanische Sta-

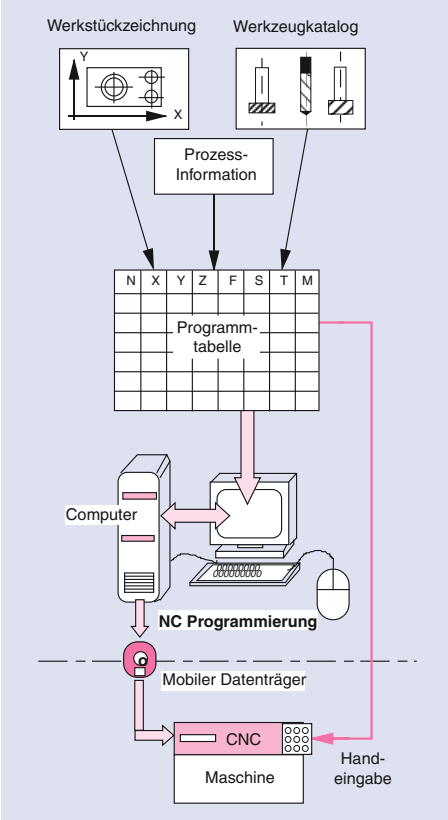


Bild 3.11 a: Prinzip der manuellen NC-Programmierung: Schrittweise Eingabe der Maschinenbewegungen.
Im NC-Programm werden Weg- und Schaltinformationen schrittweise zusammengestellt und auf einen mobilen, automatisch lesbaren Datenträger übertragen. Oder die einzelnen Datensätze werden manuell in die CNC eingetippt.

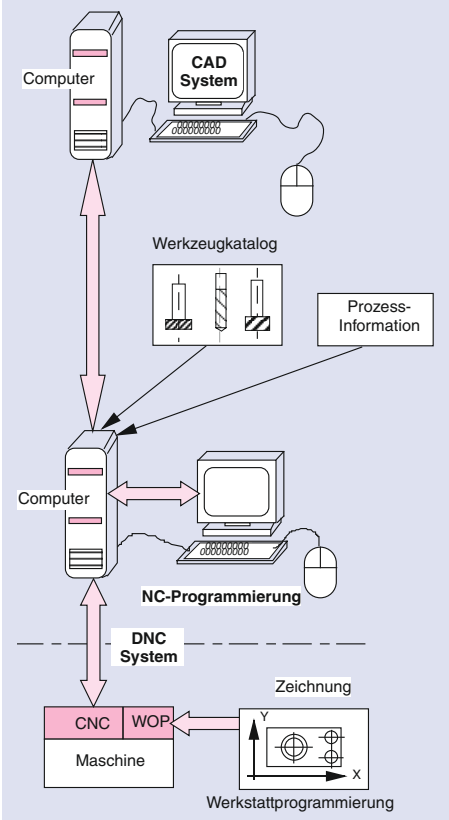


Bild 3.11 b: CAD/CAM-Prinzip: Eingabe der Rohteil- und Werkstückgeometrie und daraus automatische Erzeugung der Maschinenbewegungen.
Am CAD-System werden die Werkstücke konstruiert und im NC-Programmiersystem aus den CAD-Daten die erforderlichen Maschinenbewegungen für die Zerspanung der Teile erzeugt.

bilität macht sie ideal für den Datentransport. USB-Sticks speichern ihre Daten über mehrere Jahre. Sie enthalten keinerlei bewegliche Teile und sind sehr leicht, selbst beim Runterfallen kann meistens nichts passieren.

Die Lebensdauer ist nicht zeitlich begrenzt, sondern eher durch die Handhabung. Gefährlicher ist sicher in manchen Fällen, dass man die Daten überall problemlos lesen, ändern und löschen kann.

DNC – Distributed Numerical Control

DNC bezeichnet die Rechneranbindung der CNCs über Datenleitung (Datenbus) zur direkten Übertragung der NC-Programme.

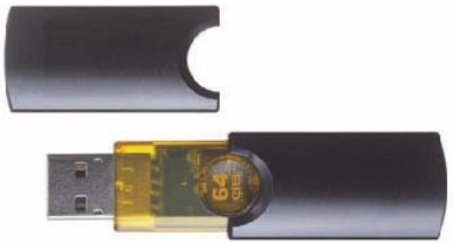


Bild 3.12: USB-Stick, 64 GB

Diese Art der Dateneingabe zählt nicht direkt zu den „Dateneingabegeräten“, hat sich aber aufgrund der Vorteile zum meistbenutzten Eingabeprinzip entwickelt. Ein oder mehrere Rechner übernehmen für alle angeschlossenen CNC-Maschinen die Speicherung und Verwaltung sämtlicher NC-Programme und übertragen diese unter Beachtung vorgegebener Sicherheitskontrollen auf Abruf in die CNC. Zusätzlich werden auch die erforderlichen Werkzeugdaten, Standzeiten und Korrekturwerte übertragen (→ *Kapitel DNC)*. Das Abrufen der Daten erfolgt entweder manuell oder automatisch von der CNC.

Nach der Übertragung arbeitet die CNC-Maschine das gespeicherte NC-Programm beliebig oft ab. Die Verbindung zum DNC-Rechner wird nicht mehr benötigt, es sei denn, das NC-Programm hat Überlänge, d. h. wenn die Speicherkapazität der CNC nicht für das gesamte Programm ausreicht. In diesen Fällen wird das Programm abschnittsweise „nachgeladen“.

3.11 Bedienung *(Bild 3.13 und 3.14)*

Eine gut durchdachte und sinnvoll ausgelegte Bedienung trägt wesentlich zur Wirtschaftlichkeit von CNC-Maschinen bei. Bedienerhilfen und Dialoge, die den Bediener unterstützen und Bedienfehler vermeiden, verbessern die **Sicherheit im Umgang** mit der Maschine. Moderne CNCs bieten gerade in dieser Hinsicht sehr gute Unterstützung.

Mittels einer integrierten Programmiersprache kann der Maschinenhersteller spezielle und typische **Bedienerhilfen** selbst programmieren und hinzufügen. Er hat auch Zugriff zur Grafik, um mit Zeichnun-



Bild 3.13: Siemens 840 D mit Bedienfeld für Maschine und CNC, Servoverstärker und SPS



Bild 3.14: Beispiel: Bedientafel einer Standard-CNC (Heidenhain)

gen, Skizzen und farbiger Unterlegung leicht verständliche Hinweise an den Bediener zu geben.

Die gesamte Bedienung muss weitgehend den **Gewohnheiten des Bedieners** entsprechen und darf nicht zu kompliziert sein. Eine einfache und logische Bedienung entscheidet nicht unwesentlich über die spätere Produktivität und Wirtschaftlichkeit der Maschine. Gut durchdachte MMI (*Man-Machine-Interfaces* = *Mensch-Maschine-Schnittstellen*) erfahren inzwischen einen sehr hohen Stellenwert.

Der **Dialogbetrieb** macht die Dateneingabe sicherer und schneller. Selbst hoch automatisierte Maschinen erfordern gelegentlich manuelle Eingriffe. Nicht selten müssen Vorschübe, Drehzahlen oder Hilfsfunktionen korrigiert oder unterbrochene Programme wieder fortgesetzt werden. Manchmal lassen sich auch Daten erst beim ersten Testwerkstück ermitteln oder optimieren, beispielsweise Aufspannfehler, Schwingungsverhalten, Spanbildung oder Oberflächenqualität des Werkstücks. Dann ist der Einrichter dankbar, wenn ihm die entsprechende Korrektur-Möglichkeit und die Handhabung am CNC-Bildschirm erläutert wird.

Bei **Werkzeugbruch** oder anderen Störungen reicht es nicht, einfach die Maschine abzuschalten. Der Bediener muss schnell und sicher eingreifen können:

- die Maschine anhalten
- das Werkzeug sicher vom Werkstück wegfahren
- ein neues Werkzeug einsetzen
- einige Sätze zurückfahren
- die neuen Korrekturwerte eingeben und
- wieder so an die Bruchstelle heranfahren, dass es sachte in den unterbrochenen Schnitt geht.

Die CNC muss sofort die neuen Korrekturwerte berücksichtigen. Ohne eine gute Bedienerführung wären die Stillstandszeiten viel länger als notwendig.

3.12 Zusammenfassung

CNCs haben innerhalb weniger Jahre den Aufbau und die Handhabung der Maschinen so wesentlich verändert, dass eine manuelle Maschinenführung oft nicht mehr möglich ist. Der Bediener muss erfahrungsgemäß nur bei Störungen korrigierend eingreifen. Um Mensch und Maschine vor Schäden durch Fehlbedienungen und Fehlfunktionen zu schützen, sind in modernen CNC-Maschinen mehrere Sicherheits- und Überwachungseinrichtungen vorhanden.

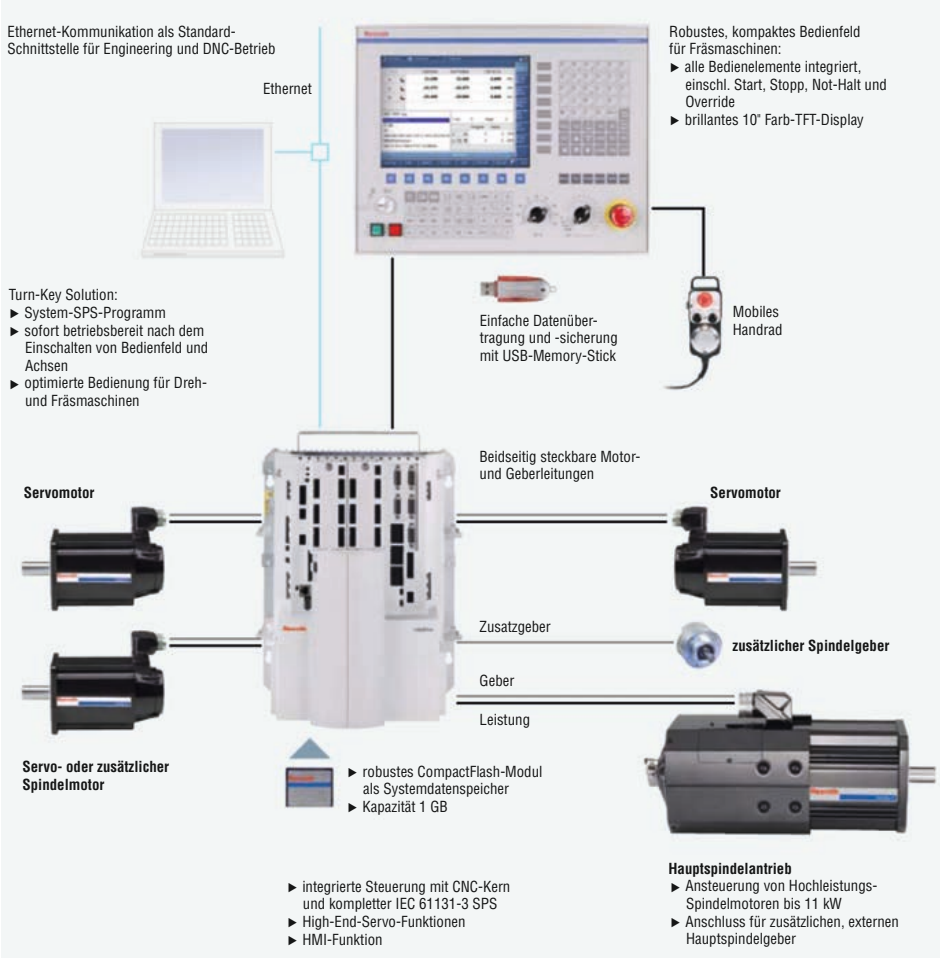


Bild 3.15: 4-Achs-CNC für Dreh- und Fräsmaschinen (Werkbild Bosch Rexroth)

Obwohl alle CNCs nach dem gleichen Prinzip arbeiten, erfordern unterschiedliche Maschinentypen speziell angepasste Steuerungen mit zahlreichen Sonderfunktionen. Dies wird bei identischer CNC-Hardware durch die CNC-Betriebssoftware erreicht. Darauf wird in den Kapiteln „CNC – Computerized Numerical Control" und „Numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen" näher eingegangen.

CNC-Werkzeugmaschinen sind heute mit mehreren numerisch gesteuerten Hauptachsen, einfachen Hilfsachsen und vielen Schaltfunktionen ausgerüstet. Verschiedene Bearbeitungsarten, wie z. B. Laserschneiden oder Hochgeschwindigkeitsfräsen, erfordern darüber hinaus sehr präzise und schnelle Maschinenbewegungen. Diese lassen sich nur mit entsprechend hochdynamischen Servoantrieben erreichen.

Aufgrund der hohen Leistungsfähigkeit wurden den CNCs viele Aufgaben übertragen, die zum vollautomatischen und technisch perfekten Betrieb von Einzelmaschinen und FFS-Systemen beitragen. Dies sind z. B.

- die NC-Programmierung an der Maschine während des laufenden Betriebes,
- die Verwaltung umfangreicher Werkzeugtabellen mit bis zu 50 Datensätzen pro Werkzeug,
- die automatische Erzeugung und Ausgabe von Werkzeug-Differenzlisten bei der Eingabe eines neuen NC-Programms,
- die automatische Kommunikation mit externen Rechnern, z. B. von Messmaschinen, DNC- und Produktionsplanungssystemen (PPS),
- die Werkstückverwaltung bei Flexiblen Fertigungszellen (FFZ) und Flexiblen Fertigungssystemen (FFS), um Stückzahlen, Ausschuss, Nacharbeit und Unregelmäßigkeiten zu erfassen oder Bearbeitungsprioritäten vorzugeben,
- die Integration von Software zur Betriebsdaten- und Maschinendatenerfassung (MDE/BDE), zur Fehlerdiagnose, für Wartung, Service und Fehlersuche und für viele grafische Darstellungen zur Unterstützung des Bedieners.

Diese Funktionen werden in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

Was ist NC und CNC?

Das sollte man sich merken:

1. NC steht für „**N**umerical **C**ontrol“, auf deutsch: **Steuern mit Zahlen.** Speziell bei Werkzeugmaschinen versteht man darunter die direkte Eingabe der **Maßzahlen des zu formenden Werkstückes.**
2. Heutige numerische Steuerungen sind unter Verwendung von Mikroprozessoren aufgebaut und werden als **CNC**, d. h. **Computerized Numerical Control**, bezeichnet.
3. Mikroprozessoren verfügen über eine so **hohe Rechenfrequenz**, dass 1 Prozessor ausreicht, um mehrere Maschinenachsen simultan und mit höchster Präzision zu steuern.
4. **Bahnsteuerungen** sind die universellsten Steuerungen und werden am häufigsten eingesetzt. Die Anzahl der simultan steuerbaren Achsen ist ausbaufähig.
5. Bahnsteuerungen können selbstverständlich auch als **Punkt- und Streckensteuerung** verwendet (programmiert) werden.
6. Der Leistungsumfang einer CNC ist komplett im **CNC-Betriebsprogramm** enthalten. Dieses lässt sich einfach und fehlerfrei vervielfachen, pflegen und modifizieren.
7. Für kundenspezifische Funktionen bieten leistungsfähige CNCs eine integrierte PASCAL- oder BASIC-orientierte Programmiersprache an, mit deren Hilfe der Maschinenhersteller sein **Know-how** zur CNC-Software hinzufügen kann.
8. Zur Eingabe der NC-Programme in die CNC werden heute transportable **elektronische Datenspeicher** oder die direkte Eingabe über Datenschnittstelle (**DNC**) benutzt.
9. Als **Datenschnittstellen** werden zunehmend standardisierte Schnittstellen (z. B. Ethernet) eingesetzt.
10. CNC-Maschinen sind **frei programmierbare Maschinen,** d. h. die Bewegungsabläufe der einzelnen Achsen werden über austauschbare NC-Programme vorgegeben.
11. CNC-Maschinen bestehen meistens aus einer Kombination **translatorischer und rotatorischer Achsen.** Jede Achse ist mit einem elektronisch auswertbaren **Messsystem** und einem **regelbaren Antrieb** ausgerüstet.
12. Bei CNC-Maschinen sind auch die **technologischen Funktionen** programmierbar, wie beispielsweise Vorschubgeschwindigkeit (F), Spindeldrehzahl (S), Werkzeugnummer (T) und Hilfsfunktionen (M).
13. Geichbleibende Abläufe, wie der automatische Werkzeug- oder Werkstückwechsel, sind maschinenseitig festgelegt. Sie werden mit einer **Schaltfunktion** (M00 – M99) aufgerufen und laufen vollautomatisch ab. Die Signalausgabe erfolgt über eine SPS und entsprechende Leistungsverstärker an die Stellglieder.

SIEMENS

Produktivität steigern mit SINUMERIK

Die innovative CNC-Plattform für alle Anforderungen

siemens.de/sinumerik

Ob in der Automobilindustrie, der Luft- und Raumfahrtindustrie, der Lohnfertigung, dem Werkzeug- und Formenbau oder der Energie- und Medizintechnik – SINUMERIK® ist die ideale CNC-Ausrüstung für Werkzeugmaschinen.
Als durchgängige Systemplattform erfüllt sie die spezifischen Anforderungen Ihrer Branche mit ausgereiften und innovativen Funktionen, durchgängigen Komponenten und ergänzenden Dienstleistungen. Sie profitieren von besten Bearbeitungsergebnissen mit perfekter Oberflächengüte, Präzision, Qualität und Geschwindigkeit – bei optimaler Usability und einer durchgängigen Prozesskette. Das Ergebnis: eine höhere Produktivität in Ihrer Fertigung.



Answers for industry.

Fundgrube für jeden Konstrukteur!



Umfassende Sammlung zu wichtigen Konstruktionen aus der Umform-, Schneide-, Stanz- und Fügetechnik

DURCHGÄNGIG PRAXISORIENTIERT:

- ✦ Detaillierte Original-Zeichnungen mit schneller Erschließung der Konstruktion und der angewandten Prinzipien
- ✦ Enorme Vielfalt an wertvollen Anregungen für Ihre tägliche Arbeit
- ✦ Konstruktionsideen von Praktikern für Praktiker
- ✦ Alle Beispiele auch auf CD als CAD-Daten

Lassen Sie sich inspirieren!

Profitieren Sie von diesen bewährten Lösungen!

Krahn/Eh/Kaufmann/Vogel

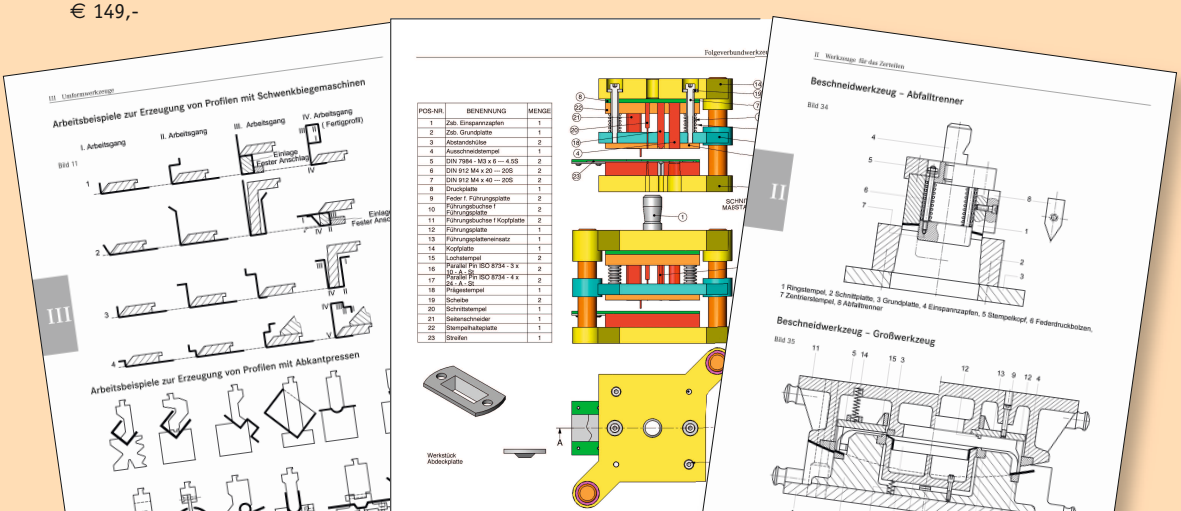
1000 Konstruktionsbeispiele Werkzeugbau

Umformtechnik, Schneidetechnik, Fügetechnik

550 Seiten, 1074 Abb.

ISBN 978-3-446-41275-0

€ 149,-



TEIL 2

Funktionen der CNC-Werkzeug-maschine

1 Weginformationen

Das grundsätzlich Neue bei der numerischen Steuerung von Maschinenbewegungen ist die Programmierung der Weginformationen. Bei Werkzeugmaschinen sind dies die direkten Positionswerte für jede NC-Achse mit einer Auflösung von beispielsweise 1/1000 mm. Die für Bahnsteuerungen erforderliche kontinuierliche Steuerung der Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück wird simultan für jede NC-Achse in der CNC fortlaufend berechnet und geregelt.

1.1 Einführung

Kennzeichnendes Funktionselement für die CNC-Maschine ist der **Lageregelkreis – die Verbindung von Vorschubantrieb und Positionsmessung.** Weitere kennzeichnende Baugruppen sind automatischer Werkzeugwechsel und Werkstückwechsel. Von der CNC beeinflusst wird die Maschinenkonfiguration wie Maschinengestell, Führungen, Hauptantriebe.

Die numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine verfügt über einen vollautomatischen Ablauf aller Funktionen, die für die Durchführung eines Bearbeitungsganges an einem Werkstück notwendig sind. Dabei sind die Informationen für diesen Ablauf in digitaler Form gespeichert, sie müssen also in die Maschinenfunktionen umgewandelt werden. Hier ist zu unterschieden zwischen **Weginformationen, die die Bewegungen der Maschine festlegen und Schaltinformationen, die feste Maschinenfunktionen auslösen.**

Soll das Werkzeug am Werkstück zudem in einer frei wählbaren Richtung angreifen, sind zusätzlich zwei rotatorische Achsen erforderlich. Bei großen Maschinen oder solchen, bei denen mehrere Werkzeuge gleichzeitig arbeiten können, sind auch noch mehr, teilweise parallele Achsen vorhanden.

Tabelle 1.1 gibt beispielhaft an, wie viele Achsen bei den verschiedenen Arten von Werkzeugmaschinen notwendig bzw. üblich sind und welche Maschinenfunktionen automatisiert sind.

1.2 Achsbezeichnung *(Bild 1.1)*

Zur Positionierung des Werkzeugs auf einer Fläche werden zwei, im Raum drei

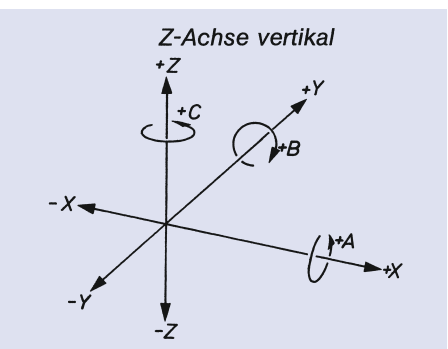


Bild 1.1: Kartesisches Koordinatensystem

Tabelle 1.1: Unterschiedliche Anforderungen verschiedener Werkzeugmaschinen an den Umfang ihrer Automatisierung (m = manuell, a = automatisch)

Maschinentyp	Achsen	Wz-Wechsel	Wst-Wechsel	Sonderfunktionen
Bohrmaschine	3	m/a	m	spez. Bohrzyklen, Leiterplatten mit HSC
Fräsmaschine	3 – 5	m/a	m/a	Gantry- und parallele Achsen, HSC, WZ-Korr.
Drehmaschine 1 Drehmaschine 2 Drehmaschine 3	2 2 x 2 bis 8	a a a	m m/a a	Grafische Programmierung, Zyklen, Spindelorientierung, angetriebene Werkzeuge, autom. Umspannen, Mehrschlitten-Masch.
Bearb.-zentrum	4 – 5	a	a	Wz-Verwaltung, -Kassetten, horiz.-/vertikal-Kopf, Palettenwechsler.
Schleifmaschine 1 Schleifmaschine 2	3 5 + 3 + n	m a	m a	Abrichtzyklen, Pendelachsen mehrere Schleifsupporte autom. Schleifscheiben- und Werkst.-wechsel.
Nibbelmaschine 1 Nibbelmaschine 2	2 5	m/a a	m/a a	Nibbelfunktionen, WZW, drehbare Wz., schachteln, Mehrfach-Wz.
Lasermaschine	3 – 5	m	m/a	Strahlleistung steuern, hohe Vorschubgeschwindigkeit.
Zahnradfräsm.	5 +	m/a	m/a	Wälzfräsmodul, Parameter-programmierung.
Drahterodierm.	2 – 5	Draht m/a	m/a	Zurückfahren auf der Bahn.
Fertigungszelle	6 synchr. 3 asynchr.	a) mit Verwaltung, Überwachung, Austausch	a) mit Werkstück-Erkennung, Prog.-aufruf	DNC-Schnittstelle, BDE/MDE-Funktionen, Sensor-Anschlüsse, graf. Fehlerdiagnose, Palettenspeicher.
Flex. Fert.-system	beliebig	a	a	Wzg-Differenzlisten, geschlossener Datenkreislauf, Palettenzubringer.

translatorische Achsen benötigt, die meistens in einem kartesischen Koordinatensystem rechtwinklig zueinander angeordnet sind.

Die Bezeichnung der Koordinatenachsen und Bewegungsrichtungen numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen ist nach DIN 66217 festgelegt. Diese Norm steht im Zusammenhang mit der internationalen Norm ISO-Recommendation R 841. Beide gehen von der 3-Finger-Regel der rechten Hand aus, um die Richtung der senkrecht

zueinander stehenden Hauptachsen, X, Y und Z zu definieren:

Der Daumen entspricht der X-Achse, der Zeigefinger der Y-Achse und der Mittelfinger der Z-Achse *(Bild 1.2)*.

Die Fingerspitzen zeigen in die positive Richtung.

Um nach dieser Regel die Achsen einer CNC-Maschine zu definieren, steckt man gedanklich den Mittelfinger in die Werkzeugaufnahme der Spindel. Dies ist die Z-Achse und der Finger zeigt vom Werkstück weg in die Spindel-Rückzugsrichtung.

Jetzt dreht man die Hand so, dass der Daumen in die Bewegungsrichtung der längsten Achse zeigt: dies ist dann die X-Achse, die meistens horizontal liegt.

Damit liegt auch die Y-Achse automatisch fest: der Zeigefinger zeigt die positive Richtung an.

Alle weiteren Achsen richten sich nach diesen drei Grund- oder Hauptachsen:

A, B und C sind Rund- oder Schwenkachsen mit X, Y oder Z als Mittelachse, d. h. A dreht um X, B dreht um Y und C dreht um Z.

Die positive Drehrichtung der Rundachsen entspricht der Rechtsdrehung bei Blickrichtung in die positive Achsrichtung, auch als „Korkenzieher-Regel“ bekannt: beim Hineindrehen sind die Richtung der Spitze und die Drehbewegung positiv.

U, V und W sind parallele Achsen zu den drei Hauptachsen X, Y und Z.

P, Q und R sind weitere Achsen, die jedoch nicht parallel zu den Hauptachsen liegen müssen. R wird vorwiegend bei den Bohrzyklen als Adresse für die Referenzebene des Werkstückes verwendet, d. h. wo die Z-Achse vom Eilgang in den Vorschub umschaltet (R = Reference Surface = Bezugsfläche).

Des Öfteren findet man auch Bezeichnungen wie X1/X2 oder Y1/Y2 *(Bild 1.3)*. Dabei handelt es sich um verfahrbare Portale oder Querbalken, sogenannte **Gantry-Achsen**, die wegen ihrer weit auseinander liegenden Führungsbahnen zwei separate Antriebe (auf jeder Seite einen) benötigen, um auch bei unterschiedlichen Belastungen exakt parallel zu fahren. Diese Achsen sind demnach keine eigenständigen Achsen mit voneinander unabhängigen Bewegungen, sondern sich gemeinsam bewegende Achsen, die auch unter der gleichen Adresse programmiert werden: X oder Y.

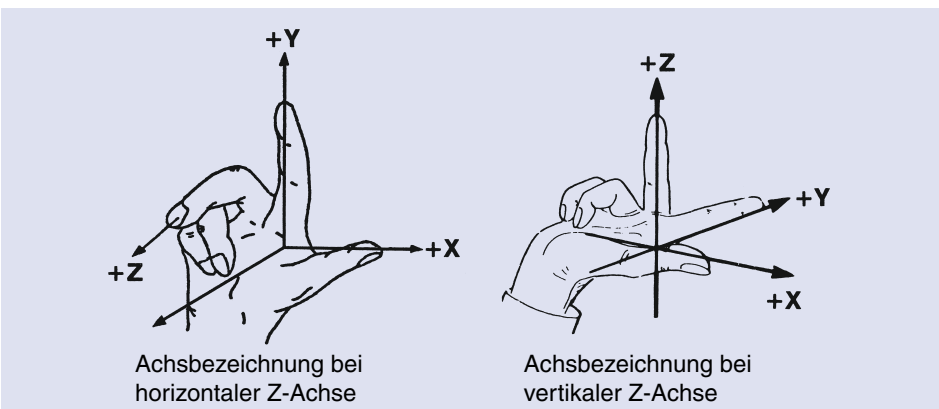


Bild 1.2: Anwendung der 3-Finger-Regel der rechten Hand

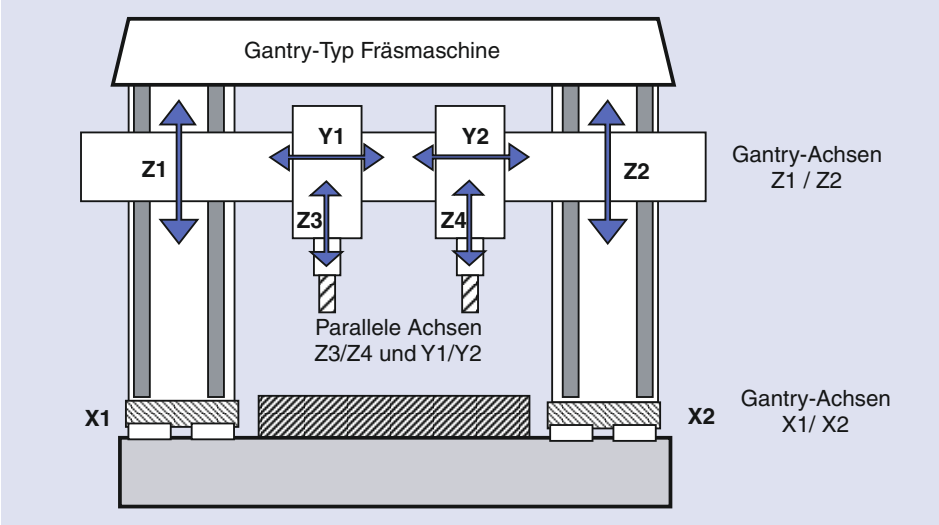


Bild 1.3: Unterschied zwischen Gantry-Achsen und Parallelachsen

Bei der Festlegung der positiven Achsrichtung geht man davon aus, dass sich immer das Werkzeug bewegt und das Werkstück stillsteht. Die positiven Achsrichtungen werden in diesem Falle wie die positiven Bewegungsrichtungen bezeichnet: +X, +Y, +Z, +A oder +C. Wird jedoch das Werkstück bewegt, wie z. B. bei Koordinatentischen und Rundtischen, so sind Bewegungsrichtung und Achsrichtung einander entgegengerichtet. Bewegt sich der Tisch nach rechts, dann führt das Werkzeug eine Relativbewegung nach links aus. In diesem Falle wird die wirkliche Achsrichtung angegeben, die Adresse aber mit einem Apostroph gekennzeichnet: +X', +Y', +Z', + A', +B' oder +C'. Diese Festlegung hat den Vorteil, dass der Programmierer seine Programme unabhängig vom konstruktiven Aufbau der Maschine erstellen kann. Die gewünschte Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück erfolgt, unabhängig von der Maschinenkonfiguration, immer in der richtigen Richtung.

1.3 Lageregelkreis

In der Zeit der Entwicklung der numerischen Steuerung von Werkzeugmaschinen wurden sehr unterschiedliche Systeme zur Steuerung der Verfahrwege der Maschinen verwendet. Von diesen hat sich der Lageregelkreis als das vielseitigste und sicherste inzwischen durchgesetzt. Früher wurde wegen Einfachheit auch häufig die sog. Steuerkette eingesetzt, die z. B. mit speziellen Antrieben, den Schrittmotoren, arbeitet und bei der kein geschlossener Wirkungskreis vorliegt, da keine Rückmeldung der Istposition erfolgt. Da diese Technik kaum noch Anwendung findet, wird hierauf nicht näher eingegangen.

Beim Lageregelkreis bietet der geschlossene Wirkungskreis mit einer ständigen Überprüfung und Rückmeldung der augenblicklichen Position der Maschinenachse eine große Sicherheit für fehlerfreie Bewegung. *Bild 1.4* zeigt das Prinzip des Wirkungskreises am Beispiel einer translato-

rischen Achse. Die zu regelnde Größe – die Lage bzw. Position des Maschinenschlittens – wird kontinuierlich erfasst und mit dem Lagesollwert der übergeordneten Steuerung verglichen. Die Differenz zwischen Lagesoll- und Lageistwert (Lageregelabweichung) wird durch den Lageregler verstärkt und als Steuersignal an den Achsantrieb ausgegeben, welcher diese Abweichung ausgleicht. Bahnsteuerungen geben fortlaufend neue Positionswerte aus, denen die zu steuernden Achsen nachlaufen müssen. Damit ist es möglich kontinuierliche Bahnbewegungen zu erreichen. **Demnach benötigt jede CNC-Achse**

a. ein elektronisch auswertbares Wegmesssystem
b. einen steuerbaren bzw. regelbaren Antrieb.

Eine wichtige Kenngröße bei der Lageregelung eines Vorschubantriebes ist der erreichbare K_V-Faktor (Proportionalverstärkung Lageregler). Der Lageregler ist als P-Regler ausgeführt. Ein wichtiges Merkmal des P-Reglers ist eine bleibende Regelabweichung. Die bleibende Regelabweichung eines Lagereglers, d. h. die Differenz zwischen Lagesoll- und Lageistwert, ist proportional zur augenblicklichen Geschwindigkeit der Bewegung und wird als

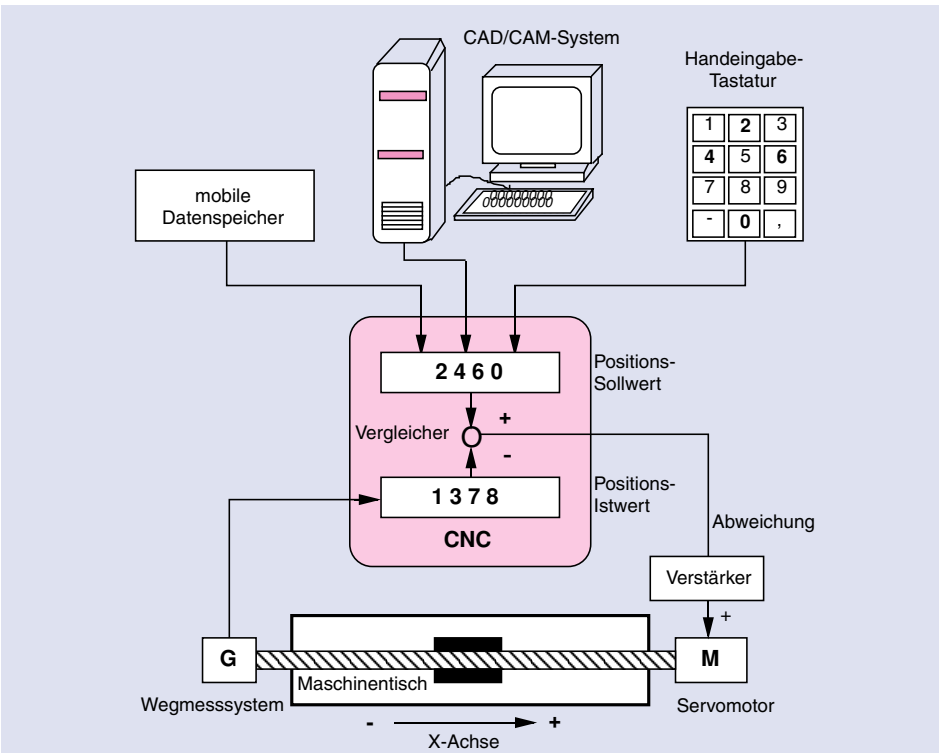


Bild 1.4: Prinzip der Eingabe und Verarbeitung geometrischer Informationen im geschlossenen Regelkreis

Schleppfehler bzw. **Schleppabstand** bezeichnet.

$$X_S = \frac{V}{K_V}$$

X_S Schleppfehler in mm
K_V K_V-Faktor in m/min/mm
V Geschwindigkeit in m/min

Die Größe des Schleppfehlers bei einer bestimmten Verfahrgeschwindigkeit wird also durch den erreichbaren K_V-Faktor bestimmt. Der K_V-Faktor ist somit ein Maß für die erreichbare Bearbeitungsgenauigkeit und Dynamik eines Vorschubantriebes.

Ein solcher Regelkreis ist jedoch ein schwingungsfähiges System, bei dem ein zu hoher Verstärkungsfaktor Regelkreisschwingungen auslöst. Da diese die Qualität des erzeugten Werkstücks sehr beeinträchtigen würden und unbedingt vermieden werden müssen, wird auch dadurch die Regelkreisverstärkung begrenzt. Um den K_V-Wert zu erhöhen und damit den Nachlauffehler zu verringern wird der einfache Lageregelkreis durch unterlagerte Regelkreise für die Motordrehzahl und den Motorstrom erweitert, wie das *Bild 1.5* zeigt. Dabei ist die Lageregelabweichung die Eingangsgröße für den unterlagerten Drehzahlregelkreis. Der Drehzahlregler stellt dem unterlagerten Stromregler als Eingangsgröße die Verstärkte Drehzahlabweichung zur Verfügung. Das PI-Verhalten von Drehzahl- und Stromregler ermöglicht das Ausregeln kleinster Regelabweichungen ohne eine bleibende Differenz zwischen Soll- und Istwert.

Der erreichbare K_V-Faktor eines Vorschubantriebs wird aber auch noch durch die Gestaltung der beteiligten mechanischen Elemente beeinflusst:

- Wie bei jedem schwingungsfähigen System sollten die bewegten Massen mög-

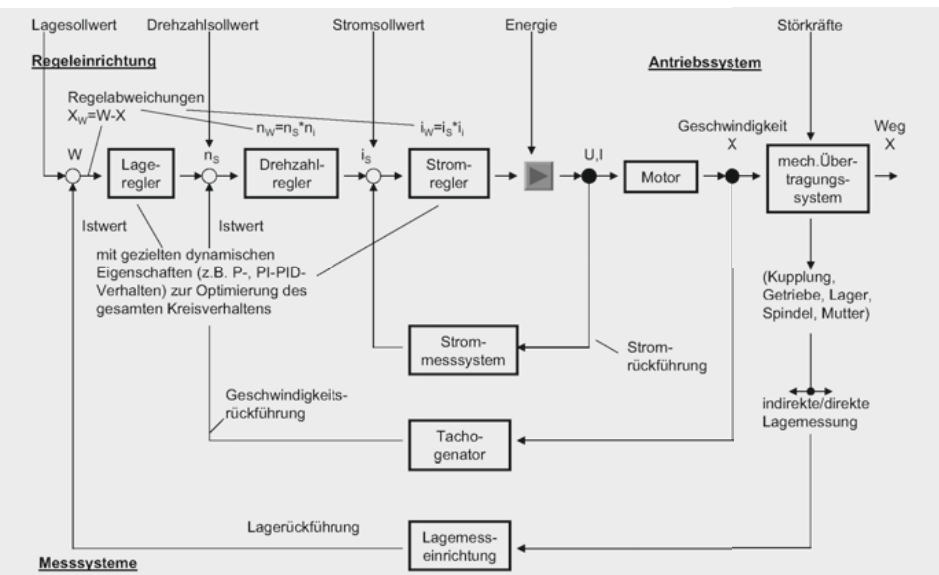


Bild 1.5: Schematische Darstellung des geschlossenen Regelkreises

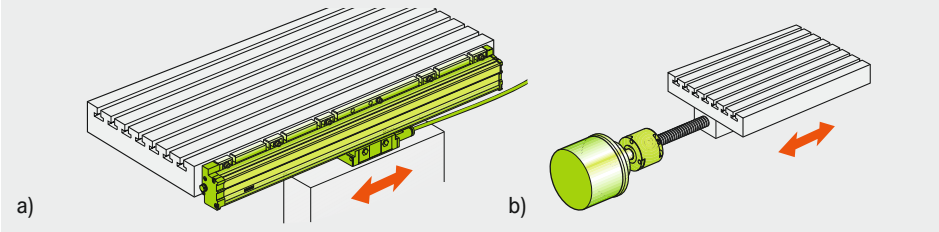


Bild 1.6: Prinzip der Wegmessung, a) mit Längenmessgerät, b) mit Spindel/Mutter/Drehgeber

lichst klein und die antreibenden Elemente möglichst steif sein.
- Nichtlinearitäten im System, wie Reibung und Spiel, sollten möglichst gering sein.

Auf die sich hier bietenden konstruktiven Möglichkeiten wird später noch eingegangen.

Reibung und Spiel im Bereich zwischen Wegmesssystem und Schlitten sind auch die Ursache für das Auftreten einer Umkehrspanne. Die Umkehrspanne ist der Abstand der beiden Istpositionen, die entstehen, wenn eine Sollposition aus entgegengesetzten Richtungen angefahren wird. Sie verursacht Positionsabweichungen und sollte daher möglichst klein sein. Durch spezielle Korrekturen, die in der CNC abgespeichert sind, kann sie weitgehend ausgeglichen werden.

Aber auch der Ort der Wegmessung, also direkte oder indirekte Wegmessung ist von großem Einfluss. *Bild 1.6* zeigt den Unterschied.

1.4 Positionsmessung

(Dipl.-Ing (FH) Helmut Huber und Dipl.-Ing Goossens)

Für die Positionsmessung an numerisch gesteuerten Maschinen stehen für die verschiedenen Genauigkeitsklassen und Maschinenkonzepte unterschiedliche Messgeräte zur Auswahl. Der Maschinenhersteller wählt für die von ihm gebauten CNC-Maschinen die geeigneten Positionsmessgeräte nach mehreren Kriterien aus: Maschinenkonzept, Antriebsart, Verfahrweg, Verfahrgeschwindigkeit, Genauigkeit bzw. Auflösung (Messschritt), einfache Anbaumöglichkeit und Kosten.

Positionsmessgeräte haben die Aufgabe, die Position bzw. die Verfahrstrecke einer CNC-Achse präzise und ohne Zeitverzögerung zuverlässig zu messen und ständig an den Lageregelkreis zurückzumelden. Bei Direktantrieben und Synchronmotoren wird der Messwert auch zur Erkennung der Rotorstellung verwendet.

Für den Drehzahl- bzw. Geschwindigkeitsregelkreis wird der Istwert durch Differenzierung des Positionswertes erzeugt. Bei hochdynamischen Antrieben kann durch doppelte Differenzierung des Positionswertes auch der Beschleunigungs-Istwert gewonnen werden. Hierbei sind Regelzykluszeiten bis zu 25 µs erreichbar (typisch sind derzeit 50 bzw. 62,5 µs) und diese müssen auch von den Positionsmessgeräten unterstützt werden.

Unter einem **Messgerät** versteht man die gesamte Messkette, die z. B. aus dem **Maßstab mit Abtastkopf,** der Interpolations-

elektronik und dem Zähler besteht. Elektronik und Zähler können in der CNC integriert sein.

Bei der Längenmessung mittels Spindel und Drehgeber zählen zum Messgerät auch Spindel und Mutter, die zum Verfahren des Maschinenelementes dienen, sowie das evtl. erforderliche Übersetzungs-Messgetriebe und Kupplungen. Zusätzliche Beeinträchtigungen der Genauigkeiten ergeben sich bei dem Spindel-Drehgeber-Konzept durch nicht kompensierbare Einflüsse der Mechanikkomponenten, wie beispielsweise Längenausdehnung von Spindeln durch Temperatureinflüsse, wofür *Bild 1.7* ein Beispiel gibt.

Alle Positionsmessgeräte für CNC-Maschinen basieren auf **Maßverkörperungen mit einer periodischen Teilung.** Die Teilungsperiode sowie die zugehörigen Systemgenauigkeiten stellen wesentliche Kennzeichen dar.

Das photoelektrische Abtastprinzip zeichnet sich dadurch aus, dass es die feinsten Teilungsperioden und somit auch die höchsten Auflösungen ermöglicht.

So betragen z. B. die Teilungsperioden der HEIDENHAIN-Messgeräte typisch 20 µm und bei erhöhten Anforderungen sind noch Versionen mit 8 µm, 4 µm oder sogar bis zu 0,512 µm verfügbar. Andere Abtastprinzipien, wie beispielsweise in magnetischen, kapazitiven oder induktiven Messgeräten verwendet, erlauben prinzipbedingt keine so feinen Teilungen und sind für höhere Genauigkeiten nicht geeignet.

Bei **Messspindeln** entspricht die Teilungsperiode einer Spindelumdrehung (z. B. 5 mm oder 10 mm), bei Zahnstange/Ritzel-Systemen dem bei einer Ritzelumdrehung zurückgelegten Weg (z. B. 100 mm). Jede Umdrehung wird durch einen **Drehgeber** in mehrere periodische Messschritte unterteilt und daraus die Position ermittelt.

Die Maßverkörperung ist entscheidend für die Genauigkeit des Messgerätes. Maßstabmessgeräte enthalten als Maßverkörperung einen elektronisch abtastbaren Maßstab mit Teilung. Bei Spindel-Drehgeber-Systemen ist die Antriebsspindel als Maßverkörperung anzusehen. Laser-Interferometer verwenden die Wellenlänge des Laserlichts als immaterielle Maßverkörperung.

Für numerisch gesteuerte Werkzeug-

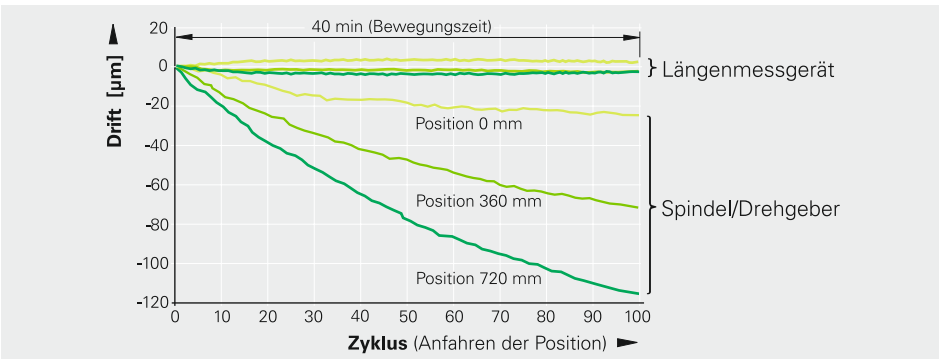


Bild 1.7: Drift dreier Positionen bei der Messung der Positioniergenauigkeit nach ISO/DIS 230-3. Die Positionserfassung über Spindel/Drehgeber zeigt eine deutliche Drift der Positionen infolge des thermischen Spindelwachstums.

maschinen ist im Allgemeinen ein **Messschritt** von 1 µm oder feiner erforderlich. Somit muss die Teilungsperiode der Maßverkörperung grundsätzlich nochmals unterteilt werden. Bei vielen Positionsmessgeräten erfolgt schon bei der Abtastung der Maßverkörperung eine „elektronische Interpolation" der einzelnen Teilungen, **sodass die Signalperiode kleiner ist als die Teilungsperiode der Maßverkörperung.**

Die erfassbaren Messschritte sind somit feiner als die Maßstabsteilung. Bei Messgeräten mit serieller Schnittstelle ist es notwendig, die Interpolation der Abtastsignale schon im Messgerät durchzuführen.

Hier ist es üblich, so hoch zu interpolieren, dass solche Messgeräte für alle Applikationen, incl. der direkten Antriebstechnik, verwendet werden können. Typische Unterteilungsfaktoren sind hier 1.024 bis zu 16.384.

Eine weitere Variante ergibt sich durch die neuen, digital geregelten Servomotoren. Die meisten dieser Motoren verfügen über einen Stellungs-Messgeber des Rotors, der in Verbindung mit der Antriebsspindel prinzipiell auch zur Wegmessung und Lageregelung verwendet werden kann *(Bild 1.8).*

Bei solchen Antrieben stellt sich die Frage, ob ein zusätzliches Wegmessgerät eingesetzt werden soll, oder ob die Messung über die ohnehin vorhandene Vorschubspindel zusammen mit dem Antriebsdrehgeber ausreicht.

Einzuschließen sind hier die zusätzlichen Fehlerquellen der mechanischen Übertragungselemente und die nicht kompensierbaren Effekte, wie beispielsweise ungleiche Längenänderungen der Spindeln durch Temperatureinflüsse.

Wegmessung über Linearmaßstäbe

Längenmessgeräte, d. h. lineare Maßstäbe zur „direkten" Messung der Relativbewegung zwischen feststehendem und beweglichem Maschinenteil, benutzen meistens ein Strichgitter bzw. Strichteilungen auf Trägerkörpern aus Glas oder Stahl. Der an dem Maßstab in geringem Abstand, aber berührungslos entlangfahrende Abtastkopf erzeugt durch opto-elektronische Effekte mit elektronischer Nachverarbeitung einzelne, deutlich voneinander unterscheid-

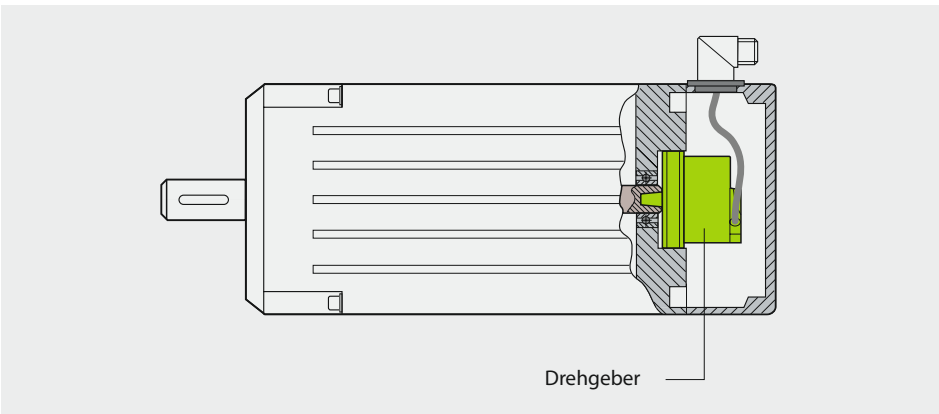


Bild 1.8: Motor für digitale Lage und Drehzahlregelung

bare elektrische Impulse, die in einem elektronischen Zähler je nach Fahrrichtung addiert oder subtrahiert werden. Je nach Ausführung des Systems lassen sich Messschritte von 0,1 µm bis zu 1 nm (= 1/1000 µm) erfassen. Die einzelnen Zählimpulse werden als Inkremente bezeichnet, das Messverfahren dementsprechend als inkrementale Wegmessung.

Wegmessung über Gewindespindel und Drehgeber *(Bild 1.8)*

Die Wegmessung über Drehgeber wird seit den Anfängen der CNC-Technik verwendet, da sie mit einem einfachen „Wandler" (= Drehgeber) auskommt. Dieser „wandelt" die Umdrehungen der Vorschubspindel in entsprechende Zählimpulse für den Verfahrweg um. Während von den Maßstabmessgeräten die relative Verfahrbewegung direkt erfasst wird, ist bei den mechanischen Maßverkörperungen Spindel/Mutter und Zahnstange/Ritzel die Ankopplung eines Drehwinkel-Messgebers erforderlich. Der Positionswert ergibt sich erst durch die Umrechnung des Verdrehwinkels in das entsprechende Längenmaß.

Zur Unterscheidung gegenüber der **„direkten" Wegmessung mittels Maßstäben** bezeichnet man dieses Messprinzip im allgemeinen Sprachgebrauch auch als **„indirekte" Wegmessung** *(siehe Bild 1.6).*

Inkrementale und absolute Messverfahren

Bei den Messverfahren wird üblicherweise in inkrementale oder absolute Prinzipien unterschieden. Zusätzlich können inkrementale Messgeräte durch Zwischenspeicherung der Messwerte und Pufferbatterien entsprechend „absolut" ausgeführt werden. Hierbei spricht man auch von **Pseudo-absoluten Messgeräten.**

Inkrementale Messgeräte

Unter der **inkrementalen Wegmessung** versteht man ein Messgerät, das bei jeder Bewegung den (positiven oder negativen) **Zuwachs** des zurückgelegten Weges misst. Dazu wird die gesamte Wegstrecke in viele, gleich große **Messschritte** (Inkremente) unterteilt und richtungsabhängig gezählt. Ein elektronischer Zähler bildet beim Verfahren der Maschinenachse die Summe der Zählimpulse, die dem Verfahrweg bzw. der jeweiligen Position der Achse entspricht. (Einen derartigen Drehgeber zeigt *Bild 1.9.*)

Dieser Zähler steht beim Einschalten immer auf „Null", unabhängig von der Position, an der sich der Maschinenschlitten gerade befindet.

Zum Reproduzieren des absoluten **Maschinen-Nullpunkts** einer Achse nach dem Einschalten verfügen fotoelektrische Maßstäbe und Drehgeber über sogenannte **„Referenzmarken",** die beim Überfahren einen Impuls erzeugen, der exakt einem definierten Positionswert zugeordnet ist *(Bild 1.10 und 1.11).* Bei den Referenzmarken lassen sich je nach Messgerät verschiedene Ausführungen realisieren. So gibt es Messgeräte mit einer Referenzmarke, zyklische aufgebrachte Referenzmarken (z. B. alle 50 mm) oder abstandscodierte Referenzmarken. Bei den zyklisch aufgebrachten Referenzmarken muss die Positions-



Bild 1.9: Drehgeber mit Statorkupplung für steife Wellenverbindung

zuordnung in der Maschine noch mittels eines zusätzlichen Kontaktes (z. B. Nocken oder Näherungsschalter) bestimmt werden. Abstandscodierte Referenzmarken sind hingegen so ausgelegt, dass jede zweite Marke in einem festen Raster liegt, die dazwischen liegenden in einem definiert variierenden Abstand. Schon nach Überfahren zweier benachbarter Referenzmarken kann über einen mathematischen Logarithmus der absolute Positionswert wieder hergestellt werden.

Mit allen diesen Verfahren lässt sich der Zähler auf den richtigen Positionswert „setzen".

Da der Nullpunkt des Zählers jederzeit frei wählbar ist, stellt eine **Nullpunktverschiebung** in der CNC kein Problem dar.

Absolute Messgeräte

Bei **absoluten Positionsmessgeräten** steht, anders als bei inkrementalen Messverfahren, nach dem Wiedereinschalten der Versorgungsspannung die **Position** der

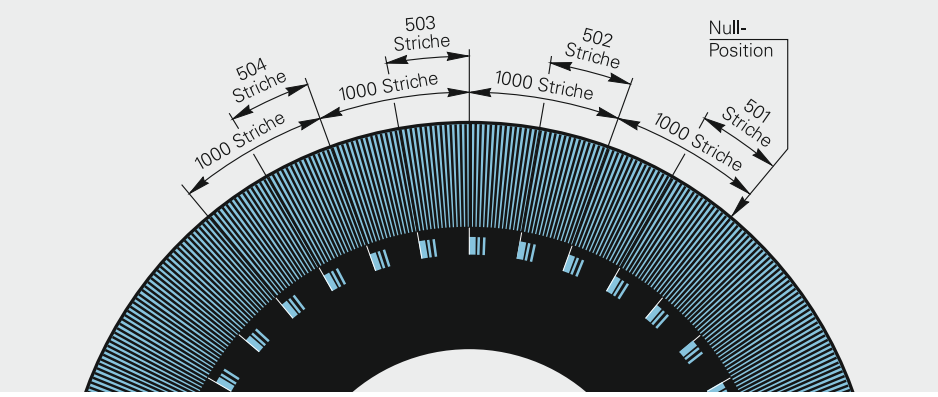


Bild 1.10: Schematische Darstellung einer inkrementalen Kreisteilung mit abstandskodierten Referenzmarken

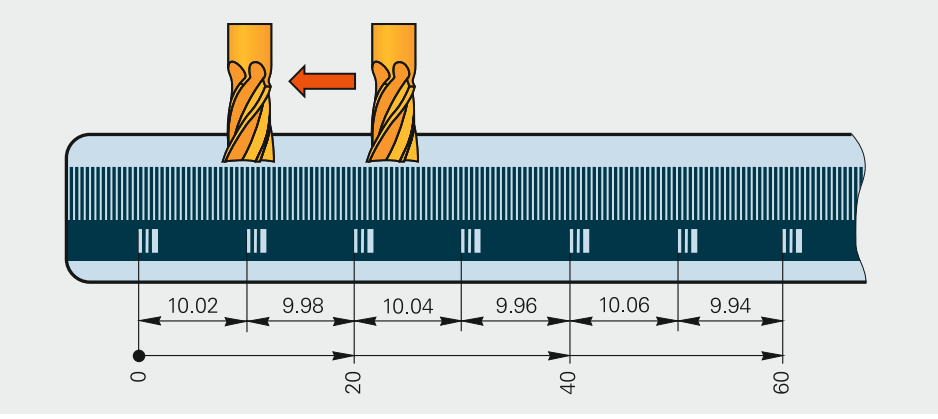


Bild 1.11: Inkrementaler Maßstab mit abstandskodierten Referenzmarken (Pseudo-absolut)

Maschinenachse unmittelbar als Absolutwert zur Verfügung, ohne vorheriges Anfahren einer Referenzmarke. Jeder Position der Verfahrstrecke ist ein definierter Messwert fest und eindeutig zugeordnet.

Anstelle eines Maßstabes mit einer einzigen Strichteilung verwendet das absolute Messverfahren einen codierten Maßstab mit mehreren Spuren unterschiedlicher Teilungsperiode oder seriell codierten Spuren und einem dazu passenden Abtastkopf. Der Maßstab besteht meist aus einem Trägerkörper aus Glas, auf dem die Teilungsstruktur aufgebracht ist.

Aus den resultierenden Messsignalen aller Spuren lässt sich so eindeutig ein Bereich (= Messschritt) innerhalb der gesamten Messlänge kennzeichnen.

Bei Längenmessgeräten mit seriell codierten Spuren ist meist noch eine zusätzliche Inkrementalspur aufgebracht. Die absolute Lageinformation wird durch eine eindeutige Zuordnung des seriellen Codes zur Inkrementalspur ermittelt. Die Inkrementalspur wiederum wird als Sinus-Cosinus-Signal erfasst und entsprechend hoch interpoliert.

Die Genauigkeit des Messgerätes ist von der Genauigkeit der feinsten Spur abhängig. So lassen sich z. B. mit dieser Methode gekapselte Längenmessgeräte mit Messlängen bis zu 3 m herstellen, die mit einer feinsten Teilung von 20 µm Absolutwerte mit 10 nm Auflösung bei Systemgenauigkeiten von ±3 µm/m oder ± 5 µm/m erreichen (HEIDENHAIN LC 182/192 bzw. LC 481/491).

Die Ausgabe des Positionswertes erfolgt zur einfachen Verrechnung in der Folgeelektronik im Dualcode. Die maximalen Verfahrgeschwindigkeiten solcher Längenmessgeräte betragen bis zu 180 m/min.

Zur **Nullpunktverschiebung** ist in der CNC eine ständige Umrechnung der absoluten Positionswerte in das verschobene Koordinatensystem notwendig.

Zur absoluten Wegmessung stehen sowohl Maßstäbe als auch Drehgeber zur Verfügung. Die sogenannten **Single-turn-Drehgeber** geben innerhalb einer Umdrehung definierte Positionswerte aus. Da der gesamte Achs-Verfahrweg aber meistens mehreren Spindelumdrehungen entspricht, sind sogenannte **Multiturn-Drehgeber** erforderlich. Diese benutzen zur Bestimmung der absoluten Position innerhalb einer Umdrehung den gleichen Aufbau wie die Single-turn-Drehgeber, verfügen aber über eine zweite codierte Scheibe, die über ein Untersetzungsgetriebe mit der ersten Scheibe verbunden ist und die Anzahl der zurückgelegten Umdrehungen registriert. Aus der Signal-Kombination beider Scheiben lässt sich der absolute Positionswert über die gesamte Verfahrstrecke eindeutig definieren. Heutige Ausführungen erlauben die Codierung bis zu 4.096 Spindelumdrehungen, sodass Endschalter oder Referenzpunkt-Schalter entbehrlich sind.

Der Wunsch nach absoluten Messgeräten entsteht im Wesentlichen aufgrund der Probleme, die nach einer Unterbrechung auftreten. Man möchte (oder muss) das Referenzpunktanfahren vermeiden.

Bei Robotern sind beispielsweise absolute Messgeräte beim Einsatz in Schweißstraßen für PKW-Karosserien notwendig. Es ist schwierig, zeitraubend und fast unmöglich, nach einer Unterbrechung alle Roboter in fünf oder sechs Achsen auf den Referenzpunkt zu fahren, ohne die Karosserie zu zerstören. Vergleichbare Verhältnisse bestehen bei Montagerobotern.

Aber auch CNC-Maschinen werden immer häufiger in verkettete Anlagen integriert oder sind in sich so komplex, dass eine Referenzpunktanfahrt nicht möglich ist. Zusätzlich ist es bei Verwendung der

Direktantriebstechnik mit Synchronmotoren notwendig, die Motorwicklungen richtig anzusteuern. Auch hierfür wird der absolute Positionswert der Rotorstellung verwendet.

„Pseudo-absolute Messgeräte“
Inkrementale Messgeräte können entweder von der CNC oder im Messgerät selbst so abgesichert werden, dass der Zählerstand aktiv beibehalten wird. Hierbei hält eine Pufferbatterie Impulsgeber und Zähler auch bei Spannungsausfall für eine begrenzte Zeit funktionsfähig, sodass jede Bewegung erfasst wird und somit der Absolutwert der Achsposition erhalten bleibt.

Nach Wiederzuschaltung der Netzspannung überträgt der gepufferte Zähler den aktuellen Wert in die CNC und die unterbrochene Bearbeitung kann ohne Anfahren des Referenzpunktes fortgesetzt werden.

Zyklisch absolute Messgeräte
Ähnlich zu den batteriegepufferten Systemen werden auch hierzu Kombinationen der verschiedenen Messverfahren verwendet.

Bei **Single-turn-Drehgebern** oder einspurigen Resolvern *(Bild 1.9)*, steht eine absolute Positionsinformation nur innerhalb einer Umdrehung und somit auch innerhalb einer Spindelumdrehung zur Verfügung. Darüber hinaus zählt ein zusätzlicher elektronischer Zähler die Anzahl der Geberumdrehungen ab dem Referenzpunkt. Dadurch lässt sich die absolute Position eindeutig feststellen. Wird dieser Zähler bei Spannungsausfall gelöscht, so besteht keine eindeutige Zuordnung mehr und der Maschinen-Nullpunkt muss erneut angefahren werden. Dieser Nachteil würde bei Verwendung eines zweiten Absolutgebers vermieden **(Multiturn-Systeme)**.

Ausführungen von CNC-Messgeräten

Zur Wegmessung an Werkzeugmaschinen stehen Messgeräte in verschiedenen Ausführungen zur Verfügung, die den harten Betriebsanforderungen entsprechen müssen.

Hier sollen die wesentlichen Ausführungen kurz beschrieben werden.

Inkrementale Drehgeber und Winkelmessgeräte *(Bild 1.12)*
Inkrementale Drehgeber werden am häufigsten eingesetzt. Sie werden entweder über Wellenkupplungen an die zu messenden Rotationsachsen angebaut oder im Antriebsmotor integriert. Dazu stehen unterschiedliche Ausführungen in verschiedenen standardisierten Baugrößen von 36 bis 100 mm Gehäuse-Durchmesser zur Verfügung.

Die Strichzahlen liegen bei minimal 5 bis 10.000 pro Umdrehung. Als Ausgangssignale stehen Rechtecksignale im HTL- oder TTL-Pegel oder Sinussignale mit 1 VSS zur Verfügung.

Für genaue Rund- oder Schwenkachsen steht noch die Gerätegruppe der **inkrementalen Winkelmessgeräte** zur Verfügung. Hierbei handelt es sich um eine wesentlich höhere Geräte-Genauigkeitsklasse, die nur durch Verwendung von hochgenauen Lagerungen und der dazu passenden photoelektrischen Abtastprinzipien die Genauigkeitsklasse besser ± 10 Winkelsekunden (entspricht 0,003°) erreichen. Diese Geräte sind mit Strichzahlen bis 180.000 ausgeführt und die zur Verfügung gestellten Sinussignale können in der CNC noch hoch interpoliert werden. Bei Genauigkeitsklassen bis zu ± 0,2 Winkelsekunden werden auch Applikationen in Präzisionsmaschinen abgedeckt.

Wichtig ist bei inkrementalen Messsystemen die Richtungserkennung, damit Bewe-

gungen in positiver und negativer Richtung unterschieden werden können. Dazu wird das Strichgitter des Maßstabes durch zwei um ein Viertel der Gitterteilung zueinander versetzte Gitter abgetastet. Dadurch entstehen zwei um 90° zueinander versetzte Pulsfolgen, aus denen eine Auswertelogik die Bewegungsrichtung erkennt. Werden noch mehr Abtastgitter eingesetzt, ermöglicht das eine noch genauere elektronische Interpolation. In *Bild 1.12* ist diese Abtastweise gut zu erkennen.

Absolute Drehgeber und Winkelmessgeräte

Mit diesen Geräten wird die Winkelposition direkt aus dem Teilungsmuster der Teilscheibe abgeleitet und in ein von der CNC verwertbares serielles Datenwort umgesetzt. Nach dem Einschalten wird aus dem Muster der Codespuren *(Bild 1.13)* oder aus einer Spur mit serieller Codierung der absolute Positionswert generiert und steht sofort zur Verfügung.

Absolute Drehgeber stehen in den gleichen mechanischen Ausführungen wie inkrementale Drehgeber zur Verfügung. Ein Haupteinsatzgebiet liegt in den Einbauversionen für Motoren für Vorschubachsen, die typischerweise als Synchronmotoren ausgeführt sind. *(Siehe hierzu auch Bild 1.8)*

Zur Motoransteuerung wird der absolute Positionswert innerhalb einer Umdrehung benötigt. In den Ausführungen als Multiturn hat man über eine mechanische Maßverkörperung Spindel/Drehgeber auch eine absolute Position für die Länge. Typische Auflösungen solcher Systeme reichen von 8.192 Messschritten pro Umdrehung (= 13 Bit) bis zu mehreren Millionen Messschritten pro Umdrehung (z. B. 2^{25} = 25 Bit).

Absolute Winkelmessgeräte werden wie die inkrementalen Winkelmessgeräte in genauen Rund- und Schwenkachsen verwendet. Speziell bei der Verwendung von

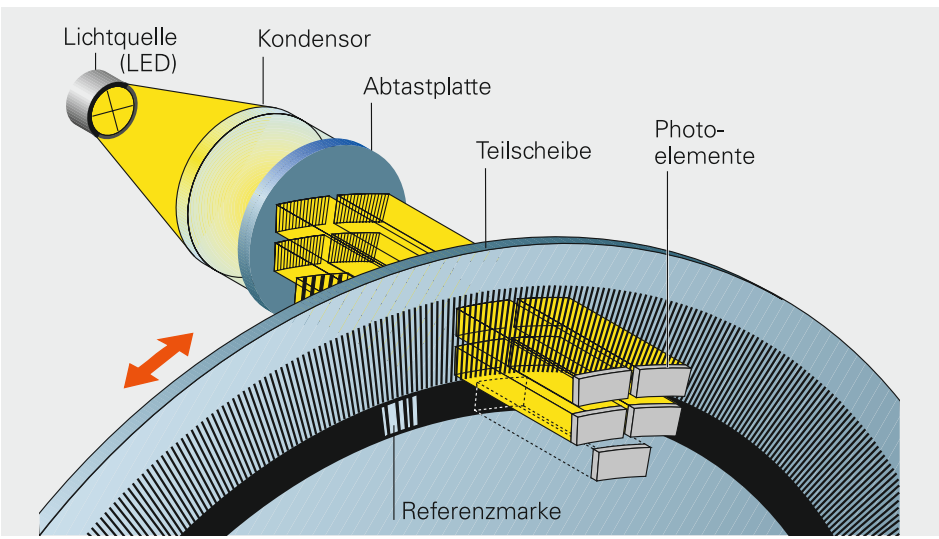


Bild 1.12: Prinzip der photoelektrischen Abtastung einer Drehgeberscheibe mit Teilkreis und Referenzspur im Durchlichtverfahren

Torquemotoren wird sowohl die hohe Genauigkeit als auch die hohe Auflösung zur Regelung benötigt. Solche Messgeräte stehen in Auflösungen bis zu mehr als 500 Millionen Messschritten pro Umdrehung zur Verfügung (2^{29} = 29 Bit = 536.870.912 unterscheidbare Positionswerte pro 360 Grad).

Die mechanischen Ausführungen ermöglichen durch die integrierten Hohlwellen bis 100 mm nahezu jeden Einsatzfall.

Inkrementale Längenmessgeräte

Auch diese Messgeräte stehen in mehreren Messlängen, Genauigkeitsklassen und Ausführungen zur Verfügung, wie z. B.:

Gekapselt, als Glasmaßstab bis zu 3 m Messlänge zum Einsatz an Standard-CNC-Maschinen, mit Messschritten von 0,1 µm bis 10 µm und max. Verfahrgeschwindigkeiten von 60 bis 120 m/min. Für Messlängen über 3 m wird ein einteiliges Stahlmaßband verwendet, das in einem speziellen Metallprofil gespannt ist.

Offen, für erhöhte Genauigkeiten, mit Messschritten von 1 nm (= 0,001 µm) bis 0,1 µm und Verfahrgeschwindigkeiten bis 240 m/min *(Bild 1.14 + 1.15)*.

Diese Systeme arbeiten ähnlich dem Prinzip der inkrementalen Drehgeber, d. h. mit fotoelektrischer Abtastung eines Strichgitters, bestehend aus lichtundurchlässigen Strichen und lichtdurchlässigen Lücken gleicher Breite. Dieses Strichgitter ist entweder auf einem Glasmaßstab oder einem reflektierenden Stahlband aufgebracht *(Bild 1.16 + Bild 1.17)*.

Größere Maßstablängen werden, je nach Fabrikat, aus mehreren Einzelstücken zusammengesetzt oder als Bausatz mit einteiligem Metall-Maßband geliefert. Das durch das Strichgitter fallende (bzw. reflektierte) Licht wird nach einem Abtastgitter mit gleicher Strichteilung von vier oder mehr Fotoelementen aufgenommen. Durch die Relativbewegung zwischen Maßstab und Abtasteinheit kommen die Striche und die

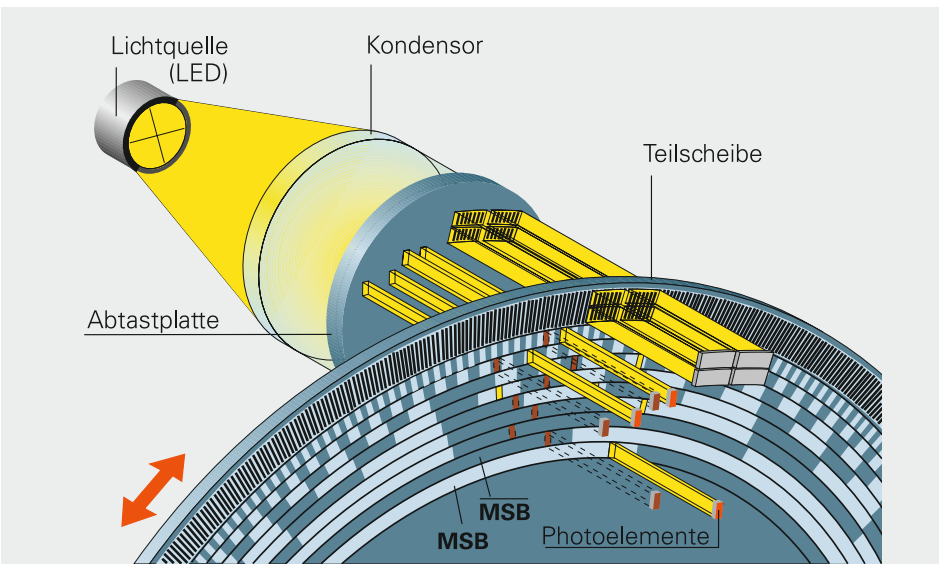


Bild 1.13: Prinzip der photoelektrischen Abtastung bei absoluten Drehgebern

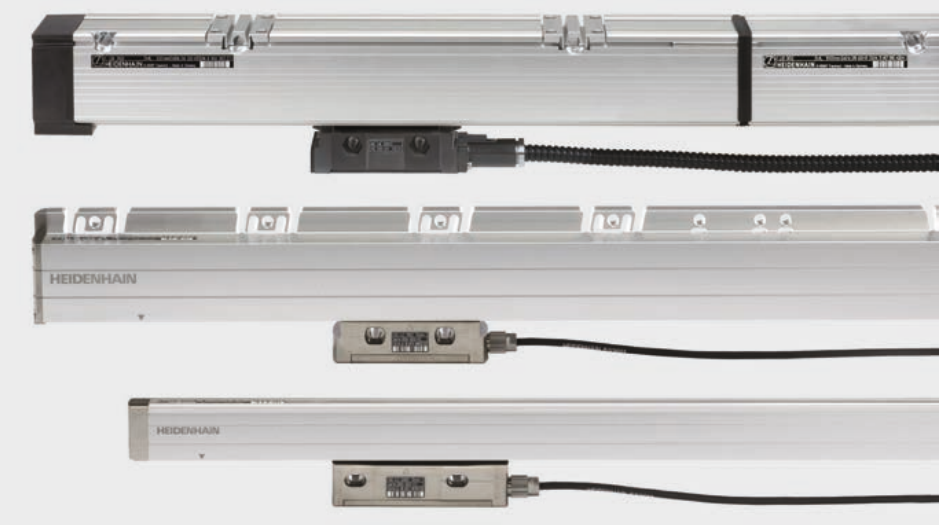


Bild 1.14: Gekapselte photoelektrische Längenmessgeräte zum Anbau an Werkzeugmaschinen

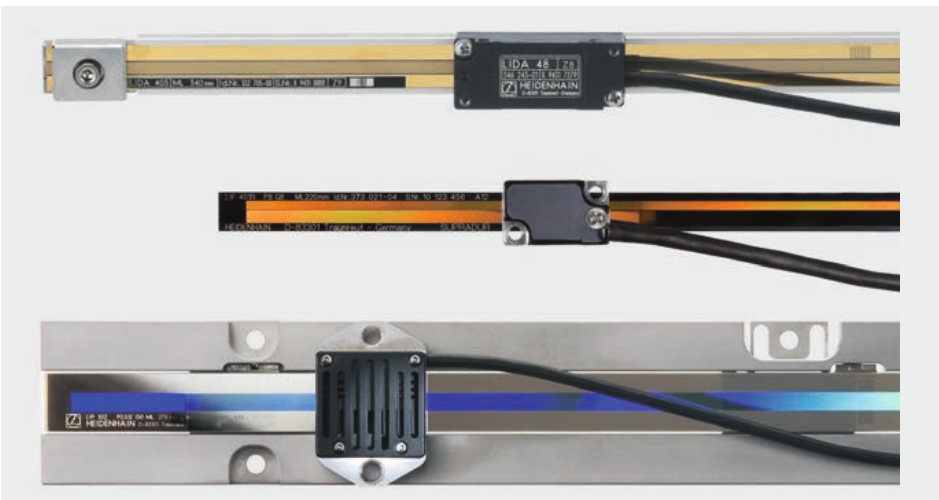


Bild 1.15: Offene inkrementale Längenmessgeräte

Lücken des Maßstabes abwechselnd mit denen der Abtastgitter zur Deckung. Die Fotoelemente setzen den sich periodisch ändernden Lichtstrom in elektrische Sinus-Signale um. Die nachgeschaltete Elektronik erzeugt daraus richtungsabhängige Zählimpulse.

Für den Einsatz an Werkzeugmaschinen sind gegen Verschmutzung gesicherte, gekapselte Wegmessgeräte zu empfehlen.

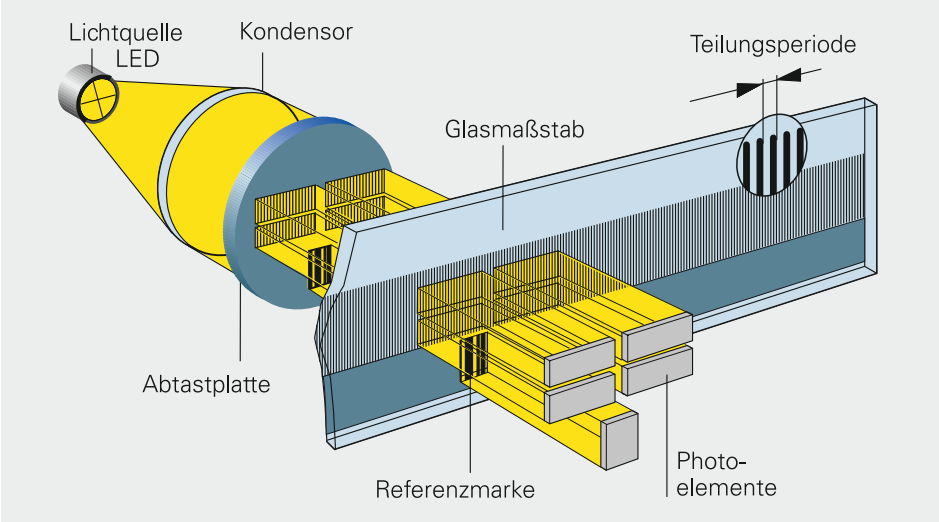


Bild 1.16: Prinzip der photoelektrischen Abtastung eines Glasmaßstabes im Durchlichtverfahren

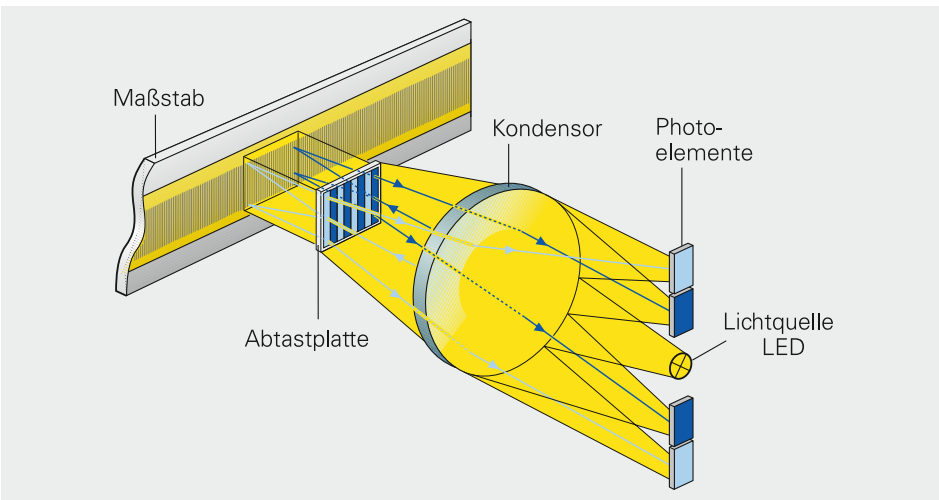


Bild 1.17: Prinzip der photoelektrischen Abtastung eines Stahlmaßstabes im Auflichtverfahren

Eine zu starke Maßstabverschmutzung wird durch eine Signalüberwachung rechtzeitig gemeldet, sodass die Maschine abgeschaltet werden kann, bevor es zu Falschmessungen kommt.

Absolute Längenmessgeräte

Rein äußerlich lassen sich gekapselte absolute Längenmessgeräte nicht von inkrementalen Systemen unterscheiden. Im Gegensatz dazu ist die Typenvielfalt begrenzt.

Die Maßstablängen werden ab 140 mm bis ca. 3 m in Stufen von 100 bzw. 200 mm angeboten. Bei absoluten Längenmessgeräten ergibt sich die größte Herausforderung in der Abtastung solcher Systeme. Der einfachste Code ist der **Dual-Code** *(Bild 1.19a)*. Liest man diesen jedoch mit Fotoelementen, die in einer Reihe angeordnet sind, die Informationen an einer bestimmten Position ab, so erhält man direkt den entsprechenden Codewert. Geht man von einer Periode von 20 µm in der feinsten Spur aus, so braucht man für 1 m Messlänge 17 Spuren. Neben der hohen Anzahl an Spuren würde die Abtastung große Probleme bereiten, da sich bei einem Positionswechsel mehrere Spuren gleichzeitig ändern. Zur Abtastung von Codespuren eignet sich der Gray-Code *(Bild 1.19b)* besser, da dies ein einschrittiger Code ist, bei dem sich in jedem Positionswechsel nur eine Spur ändert. Durch eine einfache Logik kann der Gray-Code in den Dual-Code umgewandelt werden. Aber auch hierbei werden zu viele Spuren für die Messlänge benötigt.

Ein weiteres Messverfahren ergibt die Position mit nur zwei Teilungsspuren. Hierbei wird neben der inkrementalen Spur mit der feinen Teilung, beispielsweise 20 µm, eine zweite Spur mit einem seriellen Code verwendet.

Der serielle Code – auch Pseudo-Random-Code (PRC) genannt *(Bild 1.19c)* – wird mit einem Zeilensensor bzw. Abtast-ASIC mehrfach abgetastet *(Bild 1.18)* und die absolute Position kann eindeutig einer Signalperiode der feinen Spur zugeordnet werden.

Mit diesem Abtastprinzip lassen sich Längenmessgeräte in den gleichen Abmessungen wie inkrementale Längenmessgeräte herstellen.

Auch diese Messgeräte stehen in mehreren Messlängen, Genauigkeiten und Ausführungen zur Verfügung: Gekapselt, als Glasmaßstab bis zu 3 m Messlänge zum Einsatz an Standard-CNC, mit Messschritten bis zu 10 nm, mit den zur Steuerung passenden seriellen Schnittstellen.

Diese Längenmessgeräte können je nach

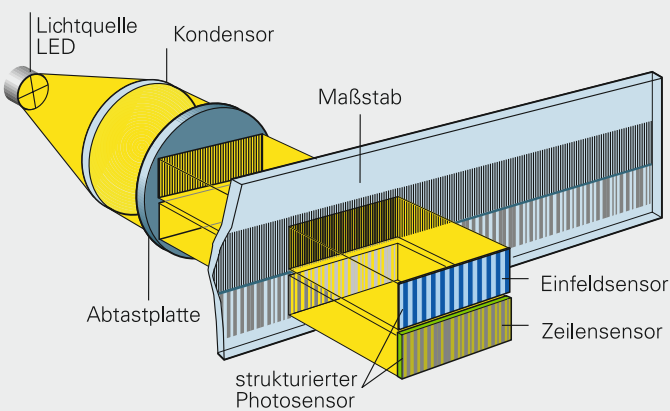


Bild 1.18: Prinzip der photoelektrischen Abtastung eines absoluten Längenmaßstabes mit 2 Spuren

Ausführung für Verfahrgeschwindigkeiten bis zu 180 m/min eingesetzt werden.

Integrierte Wegmessung in Linearführungen

Das Messprinzip beruht auf dem AMR-Effekt (Anisotropic Magnetic Resistance). Also auf der Tatsache, dass ferromagnetische dünne Schichten ihren Ohm'schen Widerstand durch externe magnetische Felder ändern.

Die Maßverkörperung ist in die Führungsschiene eingeklebt und mit einem Deckel verschlossen. Die Signalperiode beträgt 200 µm.

Der Lesekopf kann inkremental (AMS) oder absolut (AMSABS) sein mit Schutzart bis IP68. Weiterhin gibt es noch ein inkrementales System für lange Fahrwege (AMSA 3L), das theoretisch unendlich lang sein kann.

Das Ausgangssignal ist digital (SSI, Hyperface, TTL, RS) oder analog (1Vpp) möglich.

Integrierte Wegmessung
Durch das Zusammenführen von hochpräzisem Maßstab mit der Führungsschiene ergibt sich ein integriertes Messsystem, das direkt ohne Montage oder Justagearbeiten einbaubar ist. Es werden dadurch Kosteneinsparungen in der Konstruktion, Herstellung und Wartung der Produkte erzielt.

Magnetoresistives Messprinzip
Der Sensor basiert auf einem speziell angepassten magnetoresistiven Messverfahren. Bei einer Relativbewegung zwischen Sensor und Maßverkörperung führt die Änderung der Feldstärke zu einer gut messbaren elektrischen Widerstandsänderung. Durch die elektrische Schaltung als Brücke sind die Störeinflüsse durch Temperatur, überlagerte magnetische Felder, Deplatzierung und Alterung minimal. Der Abtast-

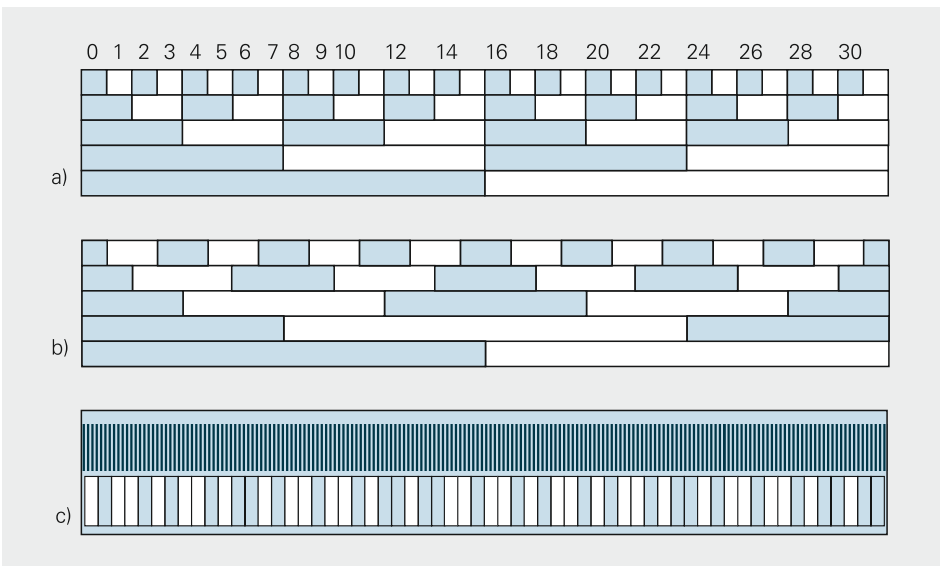


Bild 1.19: Codearten: a) Dualcode, b) Graycode, c) serieller Code

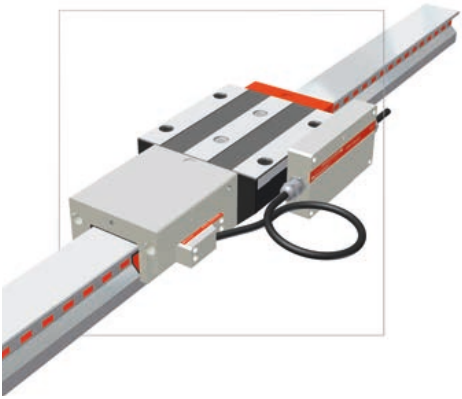


Bild 1.20: Rollenumlaufführung mit angebauten Messwagen, Lesekopf und Auswertelektronik (Werkbild Schneeberger)

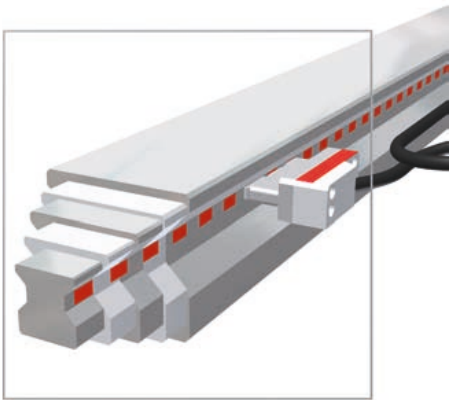


Bild 1.21: Integriertes Wegmesssystem mit der Darstellung verschiedener Führungsgrößen (Werkbild Schneeberger)

kopf arbeitet dabei berührend, wodurch sichergestellt ist, dass keine Partikel die Funktion des Sensors stören können.

Prozessnahe Messung der Position
Eine gute thermische Kopplung des Maßstabes zum Maschinenbett ist durch die großflächige Verbindung der Führungsschiene mit dem integrierten Maßband einerseits und die starre Verschraubung der Führungsschiene mit dem Maschinenbett andererseits gegeben. Dies hat den Vorteil, dass Temperaturänderungen im Maschinenbett unmittelbar an den Maßstab weitergeleitet werden. Durch die gute thermische Kopplung der Maßverkörperung an die Führungsschiene und somit auch an das Maschinenbett werden keine Nullpunkte und keine Temperaturfühler bei diesen Anlagen benötigt, um eine sehr gute Prozessstabilität zu erreichen.

Thermische Ausdehnung wie Stahl
Die magnetische Maßverkörperung wird in eine Nut in der Profilschienenführung eingesetzt. Durch die Verwendung eines speziell angepassten ferromagnetischen Werkstoffes wird sichergestellt, dass die Längenausdehnung des Maßstabes aufgrund von thermischen Einflüssen identisch mit der Ausdehnung der Schienen aus Stahl ist.

Die Maßverkörperung ist an beiden Enden fest mit der Führungsschiene verbunden und folgt der thermischen Ausdehnung der Führungsschiene exakt. Bei der Bearbeitung von Stahlteilen ist deshalb keine Temperaturkompensation notwendig.

1.5 Vorschubantriebe

Die Vorschubantriebe liefern die für die Bewegung der CNC-Achsen erforderliche mechanische Energie. Damit sind sie ein wichtiges Element in dem diese Achse steuernden Lageregelkreis. Darüber hinaus erfüllen sie vielfältige Transport- und Verstellaufgaben in diesen Maschinen.

Die wesentlichen Komponenten eines Vorschubantriebes sind

- der Motor
- der Antriebsregler, bestehend aus Leistungsteil und Regler, und
- die Achsmechanik mit dem Wegmesssystem.

Der **Motor** als Energiewandler stellt die zur Bewegung und zum Halten der Position erforderliche mechanische Energie zur Verfügung. Zum Motor gehören neben dem elektrisch aktiven Teil noch zusätzliche Baugruppen, wie z. B. die Haltebremse und der Positionsgeber für die Lageerfassung. Hinzu kommt meistens noch eine mechanische Kupplung zur Antriebswelle, wahlweise mit integriertem Überlastschutz.

Die Ansteuerung des Motors erfolgt über einen **Antriebsregler** *(Bild 1.22)*. In diesem Gerät sind Regelung und Leistungsteil zu einer Baugruppe zusammengefasst. Die Regelung für Strom, Drehzahl und Lage (Position) erfolgt bei modernen Antriebsreglern **digital,** d. h. mittels Mikroprozessoren. Dadurch lassen sich höhere Genauigkeiten und Reaktionsgeschwindigkeiten als bei analogen Reglern erreichen.

Digitale Regler verfügen zudem über eine Vielzahl von zusätzlichen anwendungsspezifischen Funktionen, Überwachungs- und Diagnosemöglichkeiten, sowie Kommunikationsschnittstellen.

Vorschubantriebe in Werkzeugmaschinen werden im Allgemeinen mit modularen Antriebsreglern betrieben. Diese bestehen aus einem **Versorgungsmodul**, welches die dreiphasige Netzspannung gleichrichtet und über den nachgeschalteten **Gleichspannungs-Zwischenkreis** die **Antriebsregler** der einzelnen Antriebe versorgt.

Beim **Leistungsstellglied** eines modularen Antriebsreglers handelt es sich um

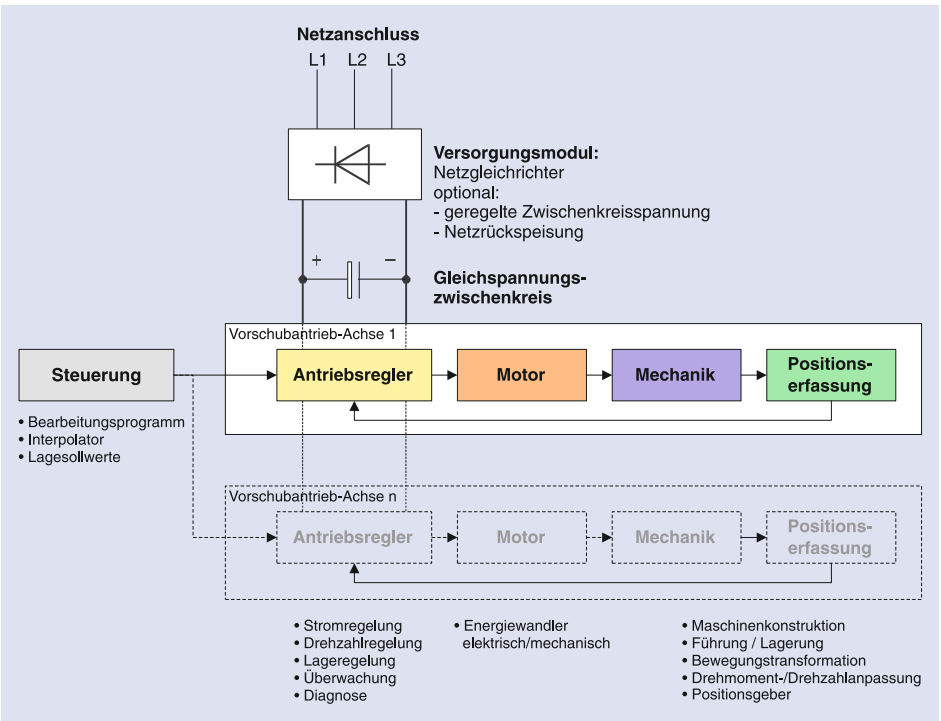


Bild 1.22: Hauptkomponenten eines Vorschubantriebes

einen Wechselrichter, der aus dem Gleichspannungs-Zwischenkreis dreiphasigen Drehstrom mit stufenlos regelbarer Frequenz liefert.

Die **Achsmechanik** besteht im Wesentlichen aus der jeweiligen Schlitten- bzw. Achskonstruktion mit dem Führungssystem und den mechanischen Übertragungselementen.

Je nach Maschinentyp und Bearbeitungsaufgabe sind eine oder mehrere Achsen an der Erzeugung der Bewegungsabläufe beteiligt. Die übergeordnete CNC sorgt hierbei für die Steuerung der Achsbewegungen durch Vorgabe der Lagesollwerte für jede einzelne Achse. Die Vorschubantriebe müssen möglichst präzise und verzögerungsfrei diesen Lagesollwerten folgen. Gleichzeitig soll der Einfluss von Störkräften so gering wie möglich sein.

Daraus ergeben sich an Vorschubantriebe folgende **Hauptforderungen**:

- Hohe Leistungsdichte (hohes Drehmoment bei kompakter Baugröße)
- Großer Drehzahlregelbereich (> 1 : 10.000)
- Hohe Überlastfähigkeit
- Hohe Positionier- und Wiederholgenauigkeit
- Geringes Massenträgheitsmoment

Maschinen-Hersteller und -Anwender erwarten heute zudem eine Reihe von zusätzlichen Eigenschaften:

- Anwendungsspezifische Funktionen
- Einfache Inbetriebnahme und Fehlerdiagnose
- Überwachungs- und Sicherheitsfunktionen
- Offene, genormte Schnittstellen
- Wartungsfreiheit und hohe Schutzart
- Geringe Erwärmung und hoher Wirkungsgrad
- Niedriges Betriebsgeräusch
- Geringer Platzbedarf
- Niedrige Kosten

Arten von Vorschubantrieben

Vorschubantriebe stellen alle Achsbewegungen für den Fertigungsprozess zur Verfügung. *Bild 1.23* zeigt die verschiedenen Realisierungsmöglichkeiten einer translatorischen Vorschubbewegung.

Elektromechanische Vorschubantriebe

Die meisten Vorschubantriebe in Werkzeugmaschinen bestehen heute aus einem rotativen Servomotor in Verbindung mit einer mechanischen Übersetzung, z. B. einem Kugelgewindetrieb. Dieser wandelt die rotative Bewegung des Motors über Spindel und Mutter in eine translatorische Schlittenbewegung *(Bild 1.24)*. Um eine möglichst optimale Beschleunigung oder Geschwindigkeit der linear bewegten Masse zu erreichen, wird häufig ein Getriebe zwischen Motor und Gewindespindel angeordnet.

Die Erfassung der Schlittenposition erfolgt über ein direktes Längenmesssystem. Die Winkellage des Rotors wird zusätzlich durch einen rotativen **Motorgeber** ermittelt. Bei reduzierten Anforderungen an die Positionier- bzw. Wiederholgenauigkeit kann die Schlittenposition allein über den Motorgeber bestimmt werden.

Die erreichbaren Vorschubkräfte bei Kugelgewindetrieben sind durch die Möglichkeit der Kraftübersetzung über Spindel und Mutter sowie durch weitere vorgeschaltete Übertragungselemente, z. B. Zahnriemen oder Getriebe, relativ hoch.

Das Beschleunigungsvermögen eines Kugelgewindetriebes ist nahezu unabhängig von der linear bewegten Masse und wird hauptsächlich von der Spindelsteigung und dem Trägheitsmoment von Motor

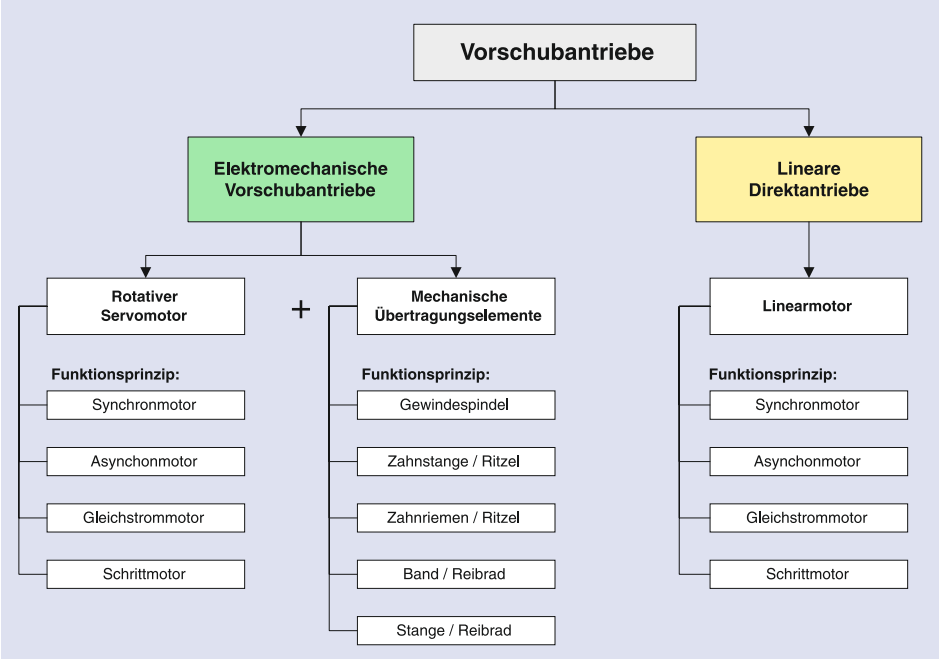


Bild 1.23: Arten von Vorschubantrieben

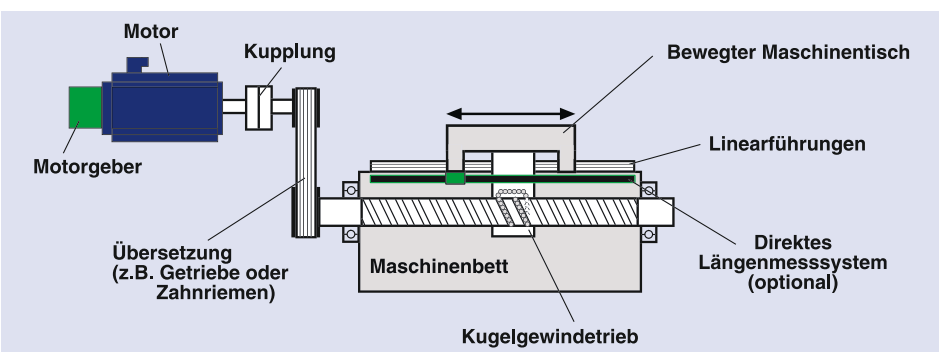


Bild 1.24: Aufbau eines elektromechanischen Vorschubantriebes mit Kugelgewindetrieb

und Spindel bestimmt. Heute werden von hochdynamischen Kugelgewindetrieben Verfahrgeschwindigkeiten von bis zu 90 m/min erreicht.

Die regelungstechnische Bandbreite von Vorschubantrieben mit Kugelgewindetrieb wird durch die Eigenfrequenz des mechanischen Systems bestimmt. Die Elastizitäten im Antriebsstrang, in Verbindung mit den bewegten Massen, führen zu mechanischen Eigenfrequenzen welche in der Praxis **K_V-Faktoren** von maximal

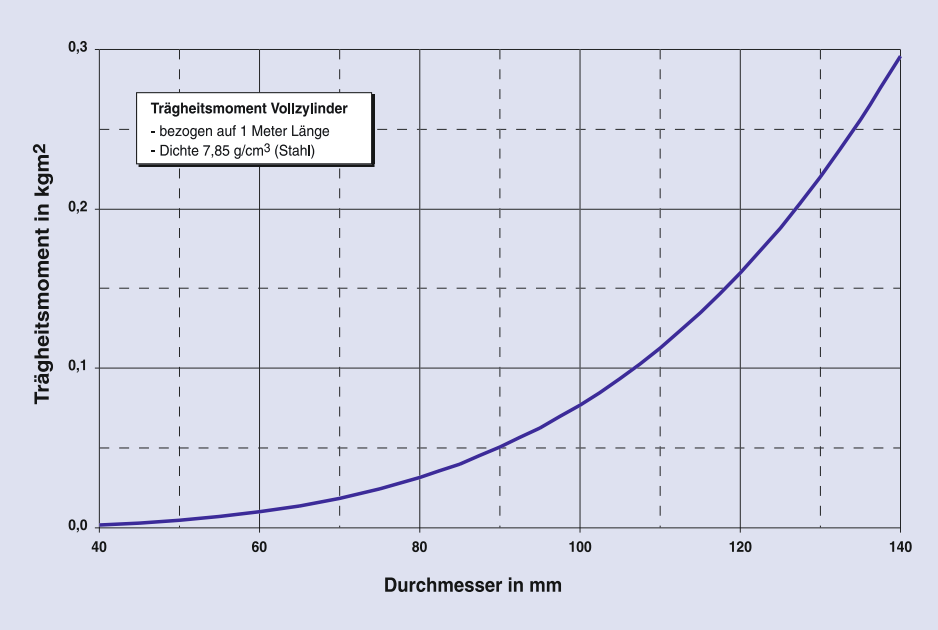


Bild 1.25: Trägheitsmoment eines Kugelgewindetriebes in Abhängigkeit vom Durchmesser

5 m/min/mm zulassen (siehe Regelung von Vorschubantrieben). Eine Erhöhung der mechanischen Eigenfrequenzen lässt sich durch größere Spindeldurchmesser erzielen. Das Trägheitsmoment der Spindel steigt allerdings mit der vierten Potenz zum Spindeldurchmesser und wirkt somit begrenzend auf die erreichbare Dynamik.

Bei der Projektierung von Kugelgewindetrieben als Vorschubachse in hochdynamischen Werkzeugmaschinen wird das Optimum aus maximaler Geschwindigkeit, Beschleunigung, Genauigkeit und Lebensdauer von verschiedenen Parametern bestimmt. Bestimmend sind u. a. die Spindelsteigung, das Übersetzungsverhältnis zwischen Motor und Gewindespindel sowie die Einsatzmöglichkeit verschiedener Motoren. Als begrenzende Parameter wirken außerdem die kritische Drehzahl, die Biegefestigkeit, das Massenträgheitsmoment sowie die positionsabhängige Steifigkeit des Kugelgewindetriebes.

Die Integration eines Kugelgewindetriebs in die Maschinenkonstruktion bereitet dem Konstrukteur keinerlei Schwierigkeiten – das System hat sich über viele Jahre hinweg bewährt und sich als Standard durchgesetzt.

Die mechanischen Übertragungselemente im Antriebsstrang eines Kugelgewindetriebes sind verschleißbehaftete Komponenten, bei Achskollisionen besteht in der Regel Beschädigungsgefahr. Daraus ergeben sich in der Praxis entsprechende wartungs- und reparaturbedingte Stillstandszeiten.

Bei hochdynamischen Kugelgewindetrieben oder sehr langen Verfahrwegen sind meist zusätzliche Kühlungsmaßnahmen erforderlich um thermisch bedingte Ausdehnung beherrschen zu können.

Motoren für elektromechanische Vorschubantriebe

Bei Vorschubantrieben von CNC-Maschinen bzw. im allgemeinen Maschinenbau hat sich der Begriff „Servomotor“ durchgesetzt.

Nach dem Funktionsprinzip unterscheidet man rotierende Servomotoren in

- Gleichstrommotoren
- Wechsel- bzw. Drehstrommotoren (Synchron/Asynchron)
- Schrittmotoren

Gleichstrommotoren waren in der Vergangenheit aufgrund einer Reihe von Vorteilen gegenüber anderen Motorprinzipien führend. Zu diesen Vorteilen zählten unter anderem die vergleichsweise geringen Kosten für Motor und Leistungselektronik.

Im Laufe der Jahre haben sich jedoch die Kosten für vergleichbare geregelte Drehstromantriebe drastisch reduziert. Gleichzeitig bieten **Drehstrommotoren** entscheidende Vorteile, wie z. B. höheres Drehmoment, Wartungsfreiheit, höheres Beschleunigungsvermögen und bessere Kühlungsmöglichkeiten. Aufgrund dieser Vorteile hat sich der Drehstrommotor als Standardantriebsmotor im Werkzeugmaschinenbau durchgesetzt.

Schrittmotoren werden in Werkzeugmaschinen kaum eingesetzt – deshalb wird nachfolgend nicht auf diese Antriebsart eingegangen.

Drehstrommotoren

Bei elektromechanischen Vorschubantrieben von CNC-Maschinen kommen als Antriebsmotoren seit vielen Jahren nahezu ausschließlich Drehstrommotoren zum Einsatz. Der permanenterregte **Synchronmotor** (häufig auch elektronisch kommutierter oder bürstenloser DC-Motor genannt) erfüllt die Anforderungen an einen Servomotor am besten. Das Funktionsprinzip des **Asynchronmotors** wurde bei Servomotoren aufgrund der geringeren Kraftdichte, des geringeren Wirkungsgrades, der einfacheren Regelbarkeit der Synchronmotoren sowie gesunkener Magnetkosten sehr schnell verdrängt.

Der Stator des permanenterregten Synchronmotors trägt eine Drehstromwicklung, der Rotor Permanentmagnete *(Bild 1.26)*. Moderne Magnetwerkstoffe ermöglichen eine hohe Leistungsdichte und somit ein hohes Beschleunigungsvermögen.

Hauptmerkmal des Synchronmotors ist die gleiche Umlauffrequenz bzw. Drehzahl von Rotor und Stator-Drehfeld (Synchronismus). Für die Abgabe eines konstanten Drehmomentes ist ein stetiger Synchronismus zwischen Drehfeldfrequenz und Rotordrehzahl erforderlich. Hierzu wird die Rotorlage vom **Motorgeber** erfasst. Entsprechend der Rotorlage werden vom Regler die elektrischen Winkel der Statorströme berechnet und vorgegeben. Abgeleitet vom Gleichstrommotor wird dies als „elektronische Kommutierung“ bezeichnet. Die Höhe des Stromes wird durch die Drehmomentanforderung bestimmt. Die Drehzahländerung erfolgt über die Änderung der Drehfrequenz des Statorfeldes.

Die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien eines permanenterregten Synchronmotors werden als Grenzkennlinien angegeben. Man unterscheidet hierbei thermische und spannungsabhängige Grenzkennlinien *(Bild 1.27)*.

Der Verlauf der spannungsabhängigen Grenzkennlinien wird durch die Höhe der Zwischenkreisspannung sowie durch die entsprechenden motorspezifischen Daten, wie z. B. Induktivität, Widerstand und Motorkonstante, bestimmt. Durch Variation der Zwischenkreisspannung (unterschied-

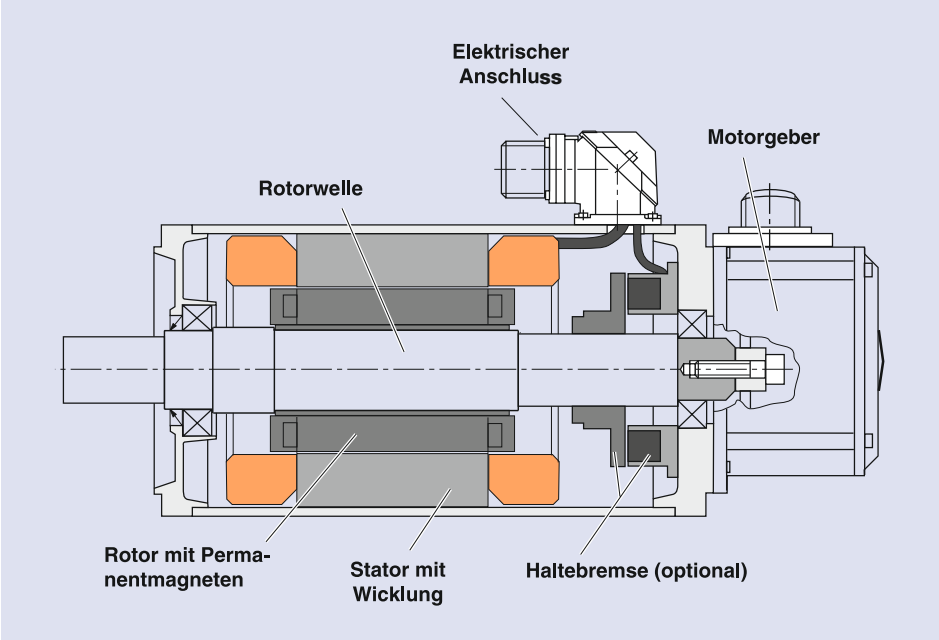


Bild 1.26: Aufbau eines permanenterregten Drehstrom-Servomotors (Synchron-Motor)

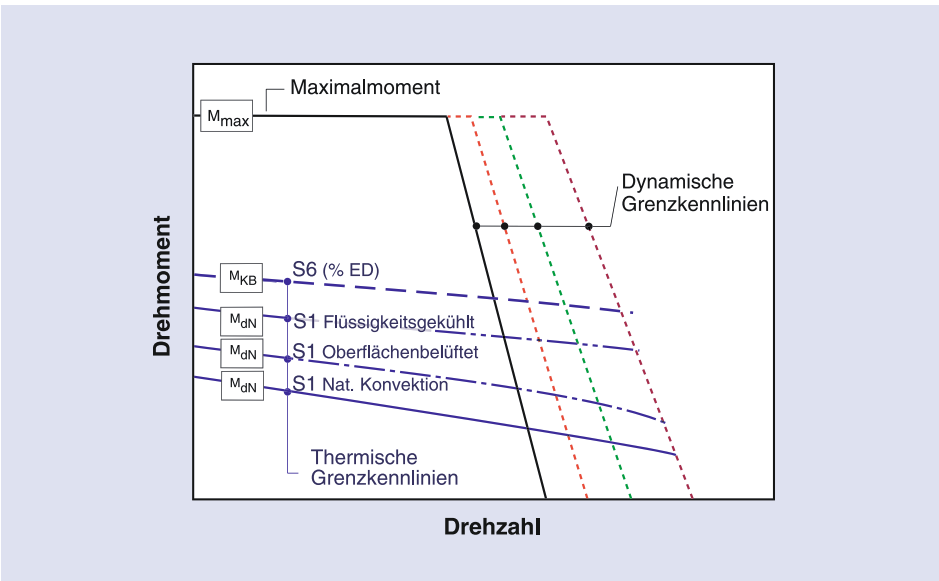


Bild 1.27: Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien eines Drehstrom-Servomotors

liche Antriebsregelgeräte bzw. Versorgungsmodule und Anschlussspannungen) sowie unterschiedliche Motorwicklungen ergeben sich unterschiedliche Kennlinien. Mit steigender Drehzahl wird die verfügbare Zwischenkreisspannung durch die drehzahlabhängige Gegenspannung des Motors geschwächt. Dies führt zu einer Reduzierung des maximalen Drehmoments bei steigender Drehzahl.

Der Verlauf der thermischen Grenzkennlinien wird durch die drehzahlabhängigen Verluste (z. B. Ummagnetisierungsverluste) und durch die Kühlart bestimmt. Bei unterschiedlichen Kühlarten erhält man unterschiedliche Kennlinien. Die Angabe der thermischen Grenzkennlinien erfolgt meist für das Bemessungsdrehmoment M_n (Betriebsart S1, Dauerbetrieb) und für das sogenannte Kurzzeitmoment M_{kb} (Betriebsart S6, Aussetzbetrieb).

Bei modernen Synchron-Servomotoren sind Bemessungsdrehmomente bis 200 Nm und Maximaldrehmomente über 400 Nm verfügbar. Die Drehzahlbereiche erstrecken sich bis 10.000 min^{-1}. Durch Motorbaureihen mit unterschiedlichen Baugrößen und -längen ist eine optimale Anpassung an die jeweilige Anwendung möglich. Die Motorparameter moderner Servomotoren sind im Motorgeber gespeichert und werden bei der Erstinbetriebnahme automatisch zum Antriebsregler geladen. Dadurch erleichtert sich die Inbetriebnahme erheblich.

Zusätzliche Optionen erweitern das Anwendungsspektrum der Servomotoren:

- unterschiedliche Motorgeber (z. B. Resolver, hochauflösende optische Inkrementalgeber, Absolutwertgeber)
- Haltebremse
- unterschiedliche Kühlarten (natürliche Konvektion, oberflächenbelüftet, Flüssigkeitskühlung)
- erhöhte Schutzarten (bis IP67/68)
- explosionsgeschützte Ausführungen

Lineare Direktantriebe

Der Einsatz von Direktantrieben mit Linearmotoren bietet neue Dimensionen der Produktivität durch gesteigerte Dynamik und Genauigkeit. Beim Linearmotor entfallen sämtliche mechanischen Übertragungselemente – die Krafterzeugung erfolgt translatorisch und direkt. Der beim Kugelgewindetrieb zusätzlich notwendige Motorgeber entfällt *(Bild 1.28)*.

Der Linearmotor wird bei Werkzeugmaschinen in der Regel als Bausatzmotor eingesetzt. Die Komponenten Primär- und Sekundärteil werden einzeln geliefert und durch den Maschinenhersteller – komplet-

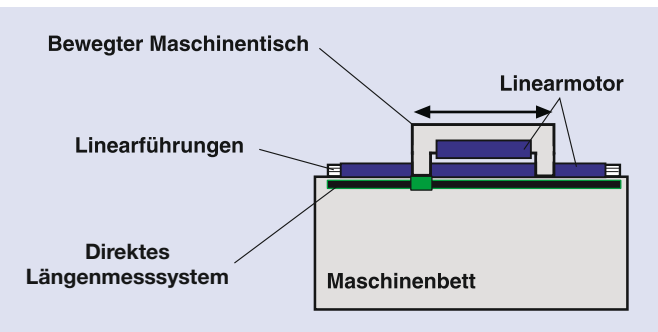


Bild 1.28: Aufbau eines linearen Direktantriebes mit Linearmotor

tiert durch Linearführungen und Längenmesssystem – in die Maschine eingebaut. Der Aufbau einer mit Linearmotor ausgerüsteten Achse besteht üblicherweise aus:

- Primärteil mit Drehstromwicklung
- einem bzw. mehreren Sekundärteilsegmenten
- Längenmesssystem
- Linearführungen
- Energiezuführungen sowie der
- Schlitten- bzw. Maschinenkonstruktion

Die Vorschubkräfte bei Linearmotoren sind durch die fehlende Übersetzungsmöglichkeit begrenzt. Die maximalen Vorschubkräfte moderner Synchron-Linearmotoren liegen heute bei 22.000 N pro Motor bzw. Primärteil. Zur Kraftvervielfachung lassen sich in einer Achse zwei oder mehrere Linearmotoren mechanisch gekoppelt betreiben. Die Beschleunigungsfähigkeit des Linearmotors ist – anders als beim Kugelgewindetrieb – umgekehrt proportional zur linear bewegten Masse. Die bewegte Masse kann beim linearen Direktantrieb ohne regelungstechnische Schwierigkeiten mehrere Tonnen betragen. Allerdings verliert dann der Linearmotor seine dynamischen Vorteile gegenüber einem elektromechanischen Antrieb mit Kugelgewindetrieb *(Bild 1.29)*.

Die Regelgüte von linearen Direktantrieben wird in erster Linie durch die digitale Regelung bestimmt und nur von Eigenfrequenzen des mechanischen Achsaufbaus begrenzt. Die heute mit linearen Direktantrieben erreichten K_V-Faktoren betragen bei Werkzeugmaschinen typischerweise 20 ... 30 m/min/mm.

An die Maschinenkonstruktion wird – abgeleitet aus dem Aufbau und den Eigenschaften linearer Direktantriebe – eine Reihe von Anforderungen gestellt. So ist eine Minimierung der bewegten Massen bei gleichzeitig hoher Steifigkeit anzustreben. Durch die erhöhte Regelbandbreite linearer Direktantriebe ergibt sich die Notwendigkeit höherer mechanischer Eigenfrequenzen der Maschinenstruktur, um

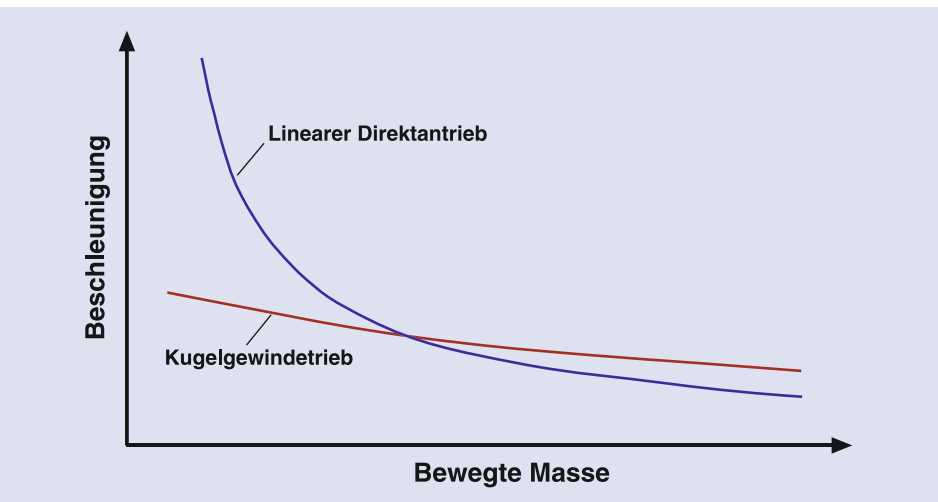


Bild 1.29: Beschleunigungsverhalten von Linearmotor und Kugelgewindetrieb

Schwingungsanregung zu vermeiden. Anziehungskräfte zwischen Primär- und Sekundärteil sowie auf ferromagnetische Späne, sind zu berücksichtigen.

Ohne mechanische Übertragungselemente erhält man mit dem Linearantrieb einen verschleiß- und wartungsfreien Antrieb, dessen hohe Genauigkeit über der gesamten Maschinenlebensdauer erhalten bleibt.

Die Forderung nach höchsten Vorschubkräften bei kleinstem Bauvolumen und Massen sowie ausreichende thermische Entkopplung der Motorkomponenten macht in der Regel eine Flüssigkeitskühlung des Primärteils erforderlich.

Die Arten von Linearmotoren

Bei Linearmotoren lassen sich prinzipiell alle Funktionsprinzipien realisieren wie auch bei rotativen Motoren *(Bild 1.30)*. Innerhalb der Werkzeugmaschine kommen jedoch heute in Analogie zu den rotativen Motoren ausschließlich Synchronmotoren zum Einsatz. Deshalb wird hier nur noch auf dieses Prinzip eingegangen.

Synchron-Linearmotoren

Die Krafterzeugung beim Synchron-Linearmotor erfolgt in der gleichen Weise wie die Drehmomenterzeugung bei rotativen Synchronmotoren. Das Primärteil (aktives Teil) trägt eine Drehstromwicklung, das Sekundärteil (passives Teil) trägt Permanentmagnete *(Bild 1.30)*.

Es kann sowohl das Primärteil als auch das Sekundärteil bewegt werden. Die Realisierung beliebiger Verfahrweglängen erfolgt durch das Aneinanderreihen von mehreren Sekundärteilsegmenten.

Bei langen Verfahrwegen entstehen beim Linearmotor – aufgrund hoher Magnetpreise – deutlich höhere Kosten gegenüber elektromechanischen Vorschubantrieben. Bei Verfahrwegen bis zu einem Meter – wie sie für die meisten Werkzeugmaschinen (z. B. Bearbeitungszentren) typisch sind – ist der Kostenunterschied zwischen Linearantrieb und Kugelgewin-

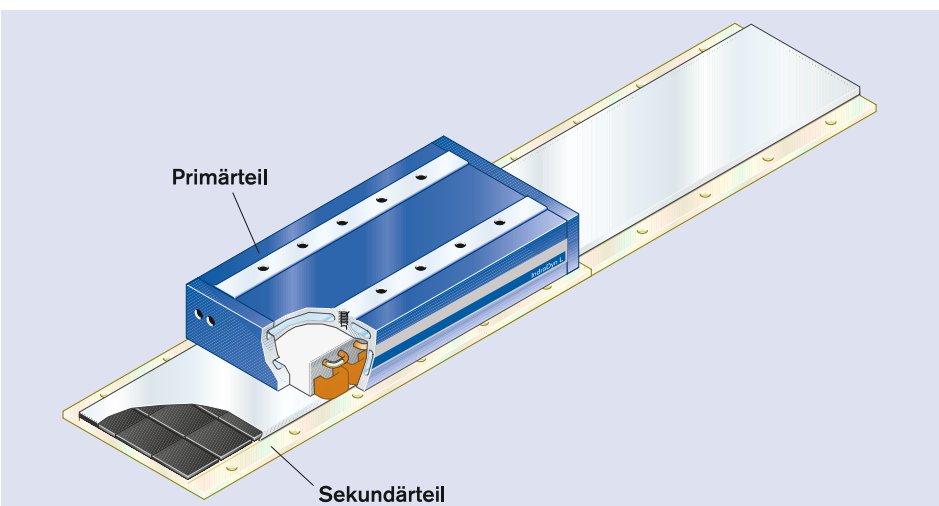


Bild 1.30: Aufbau eines Synchron-Linearmotors

detrieb mit rotativem Servomotor nur noch gering.

Bei sehr kurzen Verfahrwegen, wie z. B. bei der Planachse von vielen Drehmaschinen, kann es sinnvoll sein, das Primärteil ortsfest und das Sekundärteil am Schlitten anzuordnen. Dadurch kann man die Energie- und ggf. auch die Kühlungszufuhr zum bewegten Verbraucher sparen.

In Analogie zur Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie beim rotativen Motor wird beim Linearmotor aufgrund der translatorischen Einheiten eine Kraft-Geschwindigkeits-Kennlinie angegeben. Der Verlauf sowie die Eckdaten dieser Grenzkennlinien wird ebenfalls durch die Höhe der Zwischenkreisspannung sowie durch die entsprechenden motorspezifischen Daten, wie z. B. Induktivität, Widerstand und Motorkonstante bestimmt. Durch unterschiedliche Zwischenkreisspannungen oder Motorwicklungen lässt sich eine Geschwindigkeitsanpassung vornehmen *(Bild 1.31)*.

Die Maximalkraft F_{max} ist bis zur Geschwindigkeit v_{Fmax} verfügbar. Mit steigender Geschwindigkeit wird die verfügbare Zwischenkreisspannung durch die geschwindigkeitsabhängige Gegenspannung des Motors reduziert. Dies führt zu einer Reduzierung der maximalen Vorschubkraft mit steigender Geschwindigkeit. Die Bemessungskraft F_n ist ohne geschwindigkeitsabhängige Reduzierung bis zur Maximalgeschwindigkeit des Motors verfügbar.

Die Baukastensysteme moderner Synchron-Linearmotoren bieten mit unterschiedlichen Primärteilbaugrößen und -längen sowie unterschiedlichen Sekundärteilsegmentlängen eine große Konstruktionsfreiheit.

Die mit Linearmotorantrieben bei Werkzeugmaschinen realisierten Vorschubgeschwindigkeiten betragen heute üblicherweise 120 m/min, die Beschleunigungen

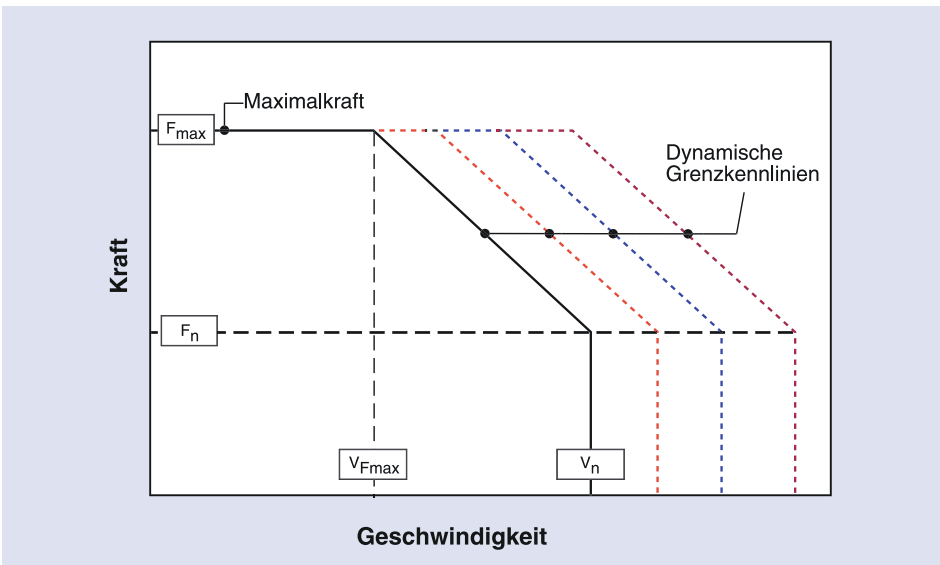


Bild 1.31: Betriebskennlinien eines Linearmotors

10 bis 20 m/s². Die erreichbare Dynamik wird hierbei durch mechanische Maschinenelemente begrenzt. Bei Handlinganwendungen mit Linearmotoren werden heute Geschwindigkeiten über 300 m/min und Beschleunigungen bis 80 m/s² erreicht.

Entsprechende Kühlungs- und Kapselungsmaßnahmen garantieren thermisch neutrales Motorverhalten, hohe Schutzart und Betriebssicherheit auch bei widrigen Umgebungsbedingungen.

Vorteile und Nachteile von Linearantrieben

Aus dem Wegfall zusätzlicher Übertragungselemente resultiert eine Reihe von Vorteilen:

- Verschleißfreiheit und damit lange Lebensdauer
- Kein Umkehrspiel, keine Elastizitäten des Antriebsstranges, große dynamische und statische Steifigkeit
- Geringe Gesamtmasse und geringe Anzahl von Komponenten
- In Verbindung mit digitalen Steuerungen sind hohe Regelgüten mit großem K_v-Faktor möglich. Damit lassen sich ein geringer Schleppabstand und eine gute Positioniergenauigkeit auch bei hohen Fahrgeschwindigkeiten erreichen.
- Großes Beschleunigungsvermögen.

Als **wesentliche Nachteile** sind der geringe Wirkungsgrad bzw. eine hohe Verlustleistung zu nennen. Dies führt zu einer starken Erwärmung des Linearmotors und macht zusätzliche Aufwendungen für die Kühlung erforderlich.

Anbindung der Antriebe an die CNC

Die numerische Steuerung von Maschinenachsen erfolgt meist in Lageregelung. Von einem Interpolator werden in der CNC zyklisch – d. h. in gleichen, kurzen Zeitabständen – Lagesollwerte für jede Maschinenachse errechnet. Diesen Sollwerten folgt jede CNC-Achse. Auf diese Weise erfolgt sowohl die präzise Steuerung von Einzelachsen als auch die exakte 2D- oder 3D-Bahnsteuerung von mehreren Achsen. Für die präzise Koordination der Achsen ist die Genauigkeit der interpolierten Lagesollwerte und die Messgenauigkeit ebenso bedeutend wie die Zeitpunkte der Istwerterfassung und -verarbeitung.

Bei analogen Antrieben erfolgt die Lageregelung in der CNC. Die CNC übergibt an den Antrieb lediglich Geschwindigkeitssollwerte über eine ±10 V-Schnittstelle. Damit werden an die Rechenleistung der CNC schon alleine für die Lageregelung der Achsen sehr hohe Anforderungen gestellt. Dadurch ist auch die Anzahl der möglichen interpolierenden Achsen limitiert.

Bei digitalen Antrieben erfolgt die gesamte Lageregelung mit unterlagertem Geschwindigkeits- und Stromregelkreis sowie viele Grundfunktionen, als auch die Feininterpolation mit extrem kurzen Zykluszeiten direkt im Antrieb. Im Vergleich zur Lageregelung in der CNC werden dabei deutlich höhere Genauigkeiten bei höheren Geschwindigkeiten erzielt. Gleichzeitig wird die CNC entlastet, da nur noch Lagesollwerte an den Antrieb übergeben werden. Die Synchronisation von nahezu beliebig vielen Antrieben wird damit möglich. Die Nutzung dieser Vorteile ist nur über eine geeignete digitale Schnittstelle (z. B. **SERCOS interface**) zur CNC möglich.

Digitale Antriebe arbeiten zyklisch, d. h. alle Soll- und Istwerte müssen in jedem Interpolationszyklus der CNC mit allen Antrieben aktualisiert werden *(Bild 1.32)*.

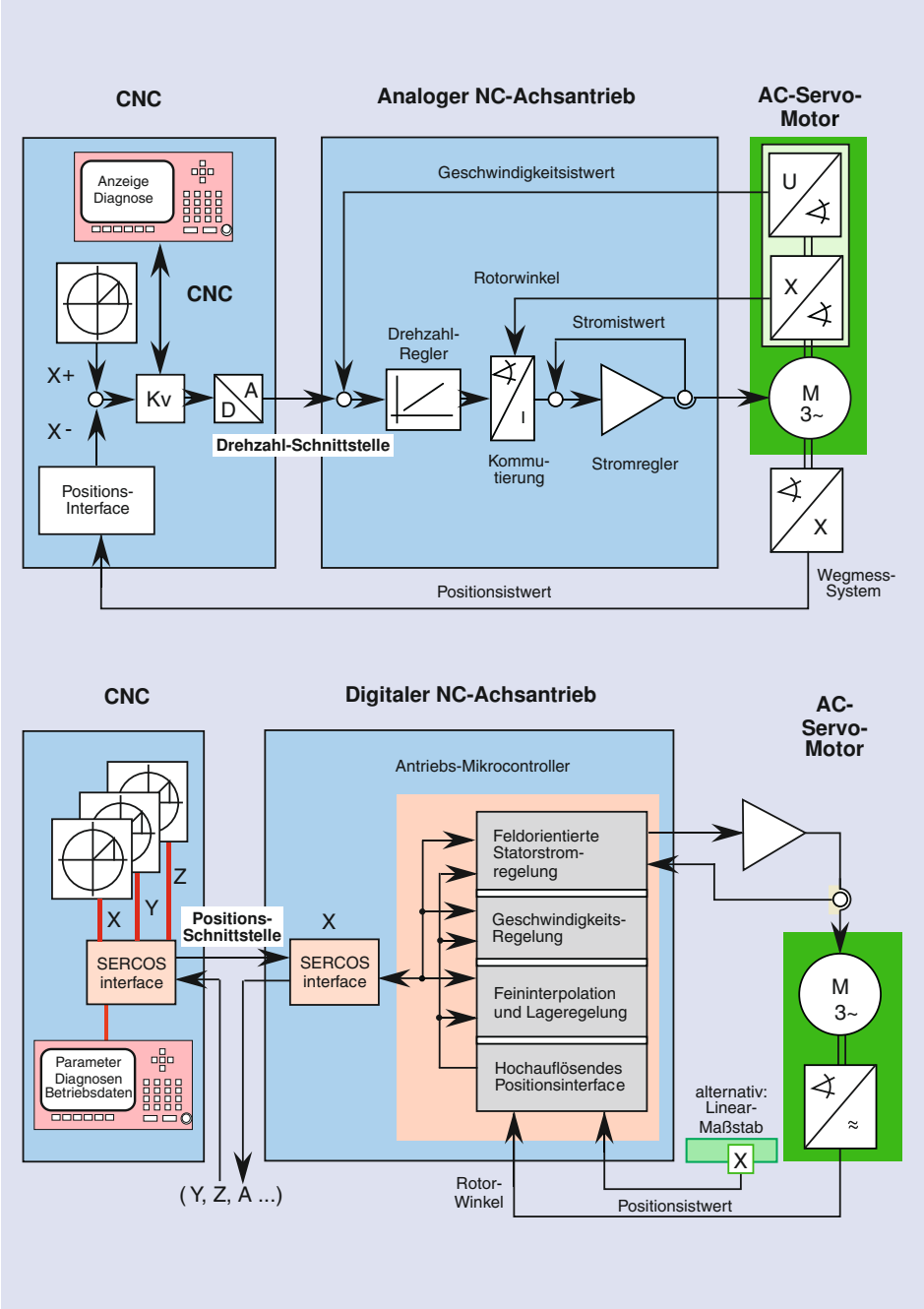


Bild 1.32: Prinzip-Vergleich analoger/digitaler CNC-Achsantrieb

Die Anpassung digitaler Antriebe an unterschiedliche Maschinen und Steuerungen erfolgt durch Eingabe von Parameterwerten über das CNC-Bedienfeld oder einen externen Inbetriebnahme-PC. Moderne digitale Antriebe bieten heute noch weitere Funktionen zur Entlastung der CNC. So werden Standardprozeduren, wie z. B. Referenzieren, nur von der CNC als Kommando an den Antrieb gegeben. Der Antrieb führt die Funktion selbsttätig aus und meldet seinen Status an die CNC zurück. Zudem sind umfangreiche Diagnosefunktionen, wie z. B. die so genannte Oszilloskopfunktion, unter Nutzung beliebiger Ist- und Sollwerte bei bis zu 4 Kanälen, eine vorhandene Standardfunktion. Kosten für externe Messeinrichtungen können somit eingespart werden.

1.6 Zusammenfassung

Bei numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen müssen die Arbeitsbewegungen – wie auch bei vielen anderen Maschinen – von digitalen Informationen ausgehend mit großer Genauigkeit gesteuert werden. Dies erfolgt mit Hilfe von Lageregelkreisen, die über ein Positionsmessgerät und einen regelbaren Antrieb verfügen. Dabei messen die Positionsmessgeräte ständig die Position des zu bewegenden Elementes. Diese wird mit dem vorgegebenen Sollwert für die Position verglichen und daraus der Vorschubantrieb zu entsprechenden Korrekturbewegungen veranlasst.

Hohe Anforderungen werden dabei an die Positionsmessgeräte und die Vorschubantriebe gestellt.

So müssen Positionsmessgeräte gegen Erschütterungen, Schwingungen, Beschleunigungen und elektrische Einflüsse, möglichst unempfindlich sein. Sie müssen für den Lageregelkreis im Bereich von 0,001 mm bis zu einigen Nanometern genau messen.

Sie müssen Drehbewegungen mit einer Auflösung 0,001 Grad mit einer Genauigkeit von wenigen Winkelsekunden messen. Sie müssen selbst bei Geschwindigkeiten bis zu 200 m/min und einigen tausend Umdrehungen genau messen. Sie müssen Beschleunigungen bis zu einem Vielfachen der Erdbeschleunigung widerstehen.

Die heute vorwiegend eingesetzten **Vorschubantriebe** bestehen aus einem permanenterregten Drehstrommotor mit Kugelgewindetrieb. Dabei wird das Optimum aus maximaler Geschwindigkeit, Beschleunigung, Genauigkeit und Lebensdauer durch folgende Parameter bestimmt:

- Spindelsteigung
- Übersetzungsverhältnis Motor/Spindel
- kritische Drehzahl
- Massenträgheitsmoment
- positionsabhängige Steifigkeit und Biegefestigkeit des Kugelgewindetriebes.

Die regelungstechnische Bandbreite von **Vorschubantrieben mit Kugelgewindetrieb** wird durch die Eigenfrequenz des mechanischen Systems bestimmt. Der erreichbare K_V-Faktor beträgt max. ca. 5 m/min/mm.

Der **K_V-Faktor** ist ein Maß für die erreichbare Bearbeitungsgenauigkeit und Dynamik eines Vorschubantriebes und gibt an, mit welcher Geschwindigkeit in m/min eine CNC-Achse fahren kann, bis ein Schleppabstand (auch als Nachlauf bezeichnet) von 1 mm erreicht ist.

Der K_V-Faktor wird durch unterschiedliche Einflussgrößen und Systemeigenschaften bestimmt, wie z. B.:

- Steifigkeit der mechanischen Komponenten (Lagerung, Getriebe)
- Regeldynamik (Motordaten, Massen, Trägheitsmomente)

- Nichtlinearitäten des Systems (Reibung, Umkehrspiel)
- Direkte oder indirekte Wegmessung.

Höhere Dynamik und Genauigkeit wird mit **Linearantrieben** erreicht. Beim Einsatz dieser Antriebe muss die Maschinenkonstruktion folgende Voraussetzungen erfüllen:

- Minimierung der bewegten Massen
- hohe Steifigkeit und hohe mechanische Eigenfrequenz der Maschinenstruktur
- Berücksichtigung der Anziehungskräfte zwischen Primär- und Sekundärteil, sowie auf ferromagnetische Späne.

Die regelungstechnische Bandbreite von **linearen Direktantrieben** wird nur durch die digitale Regelung bestimmt. Der erreichbare K_V-Faktor beträgt hierbei bis zu 30 m/min/mm.

Weginformationen

Das sollte man sich merken:

1. Die Vorgabe von Weginformationen in digitaler (numerischer) Form und ihre automatische Ausführung in der Maschine ist das **wesentliche Merkmal numerisch gesteuerter Maschinen.**
2. Jede NC-Achse wird von einem **Lageregelkreis** gesteuert. Ein Positionsmessgerät misst ständig die Ist-Position, vergleicht diese mit dem Sollwert und regelt den Differenzwert auf „Null“.
3. Zur **Positionsmessung** werden vorwiegend digitale Strichmaßstäbe mit optischer Abtastung eingesetzt, entweder als Drehgeber oder als Längen- bzw. Winkelmessgeräte für höhere Genauigkeiten.
4. **Absolute** Positionsmessgeräte sind nullspannungssicher und erkennen nach einer Spannungsunterbrechung sofort die absolute Position.
5. Bei jeder Bewegung der Achse entsteht ein **Schleppabstand** (Nachlauf), der proportional zur Geschwindigkeit der Bewegung ist.
6. Die Größe des Nachlaufs wird durch den **K_v-Faktor** bestimmt. Dieser gibt an, mit welcher Geschwindigkeit in m/min die Achse fahren kann, bis ein Schleppabstand von 1 mm entsteht.
7. Bei zu hoher Regelkreisverstärkung entstehen im Lageregelkreis Schwingungen, die die Qualität des bearbeiteten Werkstücks beeinträchtigen.
8. Bei modernen Antriebsreglern erfolgt die Regelung von Stromstärke, Drehzahl und Lage (Position) **digital**, d. h. mittels Mikroprozessoren. Dadurch werden höhere Genauigkeiten und Reaktionsgeschwindigkeiten erreicht als mit analogen Reglern.
9. Unter **Steifigkeit** versteht man das Drehmoment, mit dem der Antrieb eine erreichte Position trotz einwirkender Gegenkräfte hält.
10. Unter **Dynamik** versteht man das Verhalten eines Antriebes bei Geschwindigkeitsänderungen, die der Antrieb möglichst schnell ausführen muss.
11. **Vorschubantriebe** sollen folgende Forderungen erfüllen:
    - Großer Drehzahlregelbereich (1 : 10.000)
    - Gutes dynamisches Verhalten
    - Stabiles Drehzahlverhalten
    - Wartungsfreiheit
    - Hoher K_v-Faktor
    - Kleines Bauvolumen
12. Drehstrom-Synchronmotoren und lineare Direktantriebe mit digitaler Regelung erfüllen diese Anforderungen am besten.

2 Schaltfunktionen

Für einen vollautomatischen Ablauf der Bearbeitung auf CNC-Maschinen sind zusätzlich zu den Weginformationen die Schaltfunktionen M und die technologischen Daten T, S und F zu programmieren. Durch die unterschiedlichen Arten und Bauformen der Maschinen ist die Vielfalt zu schaltender Funktionen immer größer geworden. Deshalb sollen hier beispielhaft nur die vier wichtigsten Funktionen für Zerspanungsmaschinen erklärt werden.

2.1 Erläuterungen

Die Begriffe Schaltfunktionen, Schaltbefehle, Zusatzfunktionen und Hilfsfunktionen sind identisch und beziehen sich alle auf die Befehle, die im NC-Programm nach der M-Adresse programmiert werden.

- **Schaltfunktionen** sind alle Funktionen für die CNC-Maschinen, die während der Bearbeitung programmierbar ein-/ausgeschaltet werden sollen, beispielsweise das Kühlmittel, Klemmungen und der Werkstückwechsel.
- Zu den **technologischen Daten** zählen die Werkzeugnummer (T) mit den zugehörigen Werkzeugkorrekturwerten (D), die Spindeldrehzahl (S) und die Vorschubgeschwindigkeit (F).

Unter der **M-Adresse** sind maximal 99 Funktionen zusammengefasst und nach DIN 66026, Teil 2, genormt. Die Verarbeitung dieser Signale erfolgt in der Anpass-Steuerung der CNC.

Weitere Hinweise und Tabelle der M-Funktionen siehe Teil 5, Kapitel „NC-Programm“, 1.4 Schaltbefehle.

Aufgrund der sehr frühen Normung wurden unter Schaltfunktionen zunächst nur zerspanende Werkzeugmaschinen berücksichtigt. Deshalb mussten die ursprünglich nur zweistelligen Befehle (M00 – M99) auf drei- bis vierstellige Befehle (bis M9999) erweitert werden, um auch für die später entwickelten neuen Arten von CNC-Maschinen ausreichend Befehle zur Verfügung zu haben, ohne die bestehende Normung ändern zu müssen.

Die automatische Auslösung fester Maschinenfunktionen war auch schon bei konventionell automatisierten Werkzeugmaschinen gebräuchlich. Erst die Perfektionierung der zu schaltenden Maschinenfunktionen und deren Einbeziehung in den automatischen Arbeitsablauf bei den CNC-Maschinen ermöglichten eine vollständige Bearbeitung eines Werkstückes in nur einem Arbeitsgang. So war zumindest die Zielsetzung bei der Entwicklung der Bearbeitungszentren.

Entsprechend der unterschiedlichen Arten von Werkzeugmaschinen und vielen modifizierten Ausführungen hat sich eine große Vielfalt bezüglich Bauformen und

Funktionsweisen von Maschinenfunktionen ergeben. Beispielhaft werden hier der automatische Werkzeug- und Werkstückwechsel, sowie der Drehzahl- und Vorschubwechsel beschrieben.

2.2 Werkzeugwechsel

Die meisten CNC-Maschinen erfordern für die Bearbeitung eines Werkstückes den Einsatz mehrerer Werkzeuge in einer vom Arbeitsplan vorgegebenen Reihenfolge. Um den automatischen Arbeitsablauf auf die gesamte Bearbeitung ausdehnen zu können ist ein Werkzeugmagazin mit automatisiertem Werkzeugwechsel unverzichtbar.

Bereits bei konventionellen Werkzeugmaschinen, insbesondere bei Bohr- und Drehmaschinen, wurden **Werkzeugrevolver** eingesetzt. Hier hat jedes Werkzeug einen festen Platz. Nach jedem Arbeitsgang schaltet der Revolver automatisch um eine Stellung weiter und bringt damit das nächste Werkzeug in Arbeitsstellung.

Bei den ersten CNC-Maschinen wurde für die Automatisierung des Werkzeugwechsels zunächst diese bewährte Technik beibehalten. Doch zeigte sich bald, dass wegen der limitierten Zahl von Werkzeugen, die in einem Revolver unterzubringen ist, andere Lösungen nötig sind. So hatte bereits der 1960 erstmals ausgestellte Urtyp aller Bearbeitungszentren, die „Milwaukee-Matik“ von Kearney & Trecker, ein Werkzeugmagazin mit Doppelgreifer und kodierten Werkzeugen und einen automatischen Werkstückwechsel mit Paletten. Da sich der Hersteller alle diese Neuheiten hatte patentrechtlich schützen lassen, wurde diese Lösung viele Jahre blockiert, hat aber auch die Entwicklung neuer Lösungen angeregt.

Entscheidende **Kriterien zur Beurteilung** einer Werkzeugwechseleinrichtung sind:

- die Anzahl der verfügbaren Werkzeuge,
- Einschränkungen bezüglich Abmessungen und Gewicht der einsetzbaren Werkzeuge,
- die Werkzeugwechselzeit, meistens angegeben als „Span-zu-Span-Zeit“
- die Kosten evtl. zusätzlich benötigter Werkzeugaufnahmen oder Werkzeugkassetten.

2.3 Werkzeugwechsel bei Drehmaschinen

Da bei Drehmaschinen viele Werkzeuge nicht form- oder maßgebunden sind, ist im Allgemeinen die Zahl der erforderlichen Werkzeuge auch geringer. Deshalb ist der **Werkzeugrevolver** heute noch vorherrschend. Heutige Drehmaschinen können mit zwei oder drei Revolvern ausgerüstet und die Anzahl der Werkzeuge pro Revolver bis auf 18 Werkzeuge erhöht werden *(Bild 2.1)*.

Für den Werkzeugwechsel mit Revolverkopf wird nicht die Werkzeugnummer programmiert, sondern die Nummer der Schaltstellung des Revolvers, z. B. T1 – T8. Deshalb ist im NC-Programm darauf zu achten, dass beim Umrüsten zur Bearbeitung unterschiedlicher Werkstücke auf den Plätzen T1 bis T8 völlig andere Werkzeuge eingesetzt werden.

Das Weiterschalten erfolgt bei neuzeitlichen Revolvern automatisch links- oder rechtsdrehend, um das nächste Werkzeug auf kürzestem Weg in Arbeitsposition zu bringen. Durch Neigung der Revolverachse um 45° oder 90° entstehen unterschiedliche **Revolvertypen**, wie Stern-, Kronen- oder Scheibenrevolver. Neben den Drehstählen und zentral angeordneten Bohrwerkzeugen lassen sich heute auch alle Arten angetriebener Werkzeuge im

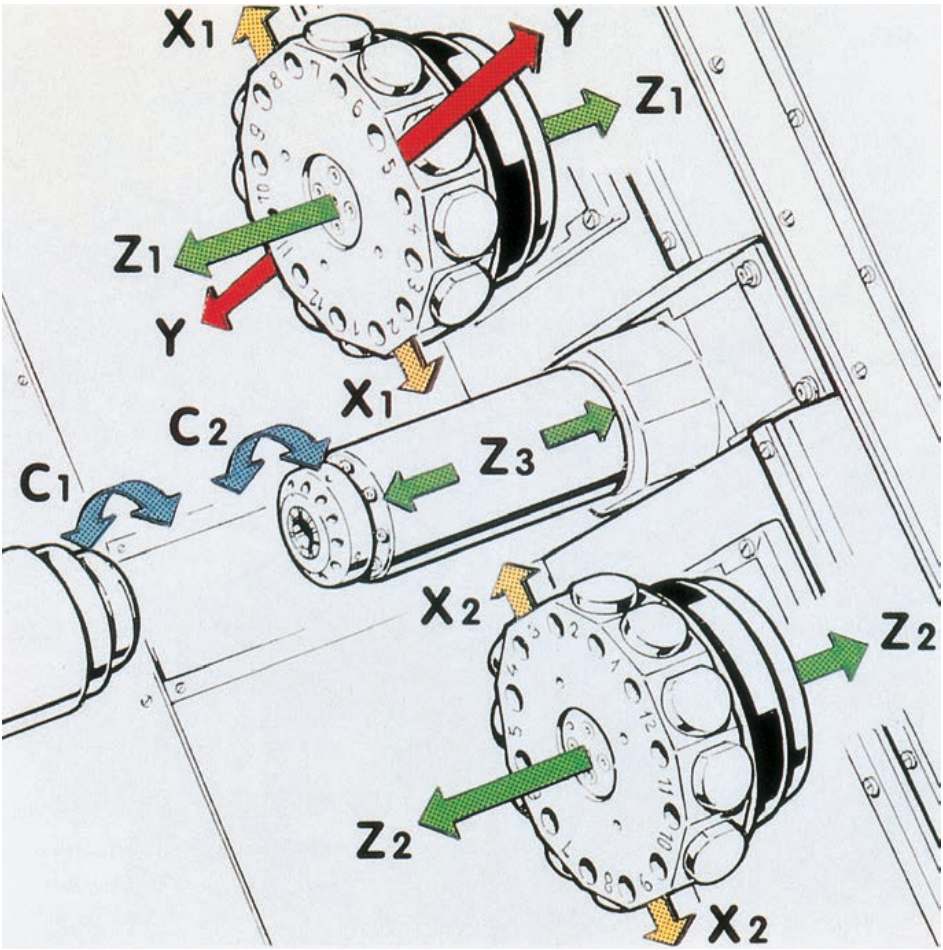


Bild 2.1: Drehmaschine mit Hauptspindel, Gegenspindel und 2 Revolverköpfen, davon einer mit Y-Achse zur Zylindermantelflächenbearbeitung

Revolver einer Drehmaschine unterbringen.

Werkzeugrevolver sind zwar in ihrer Aufnahmekapazität begrenzt, dafür aber preiswerter, da sie keine zusätzlichen Werkzeugwechselgreifer benötigen. Da die Werkzeuge immer in der gleichen Aufnahme bleiben, werden Maßabweichungen am Werkstück infolge des Auswechselns der Werkzeuge vermieden. Außerdem erfolgt der Wechsel schneller, da jeder Revolver meist nach kurzem Freifahren geschwenkt werden kann und das Zurückfahren zur vorgeschriebenen Wechselposition entfällt.

Der **wesentliche Vorteil** von Werkzeugrevolvern ist die geringere Kollisionsgefahr.

Einen neuen Impuls erhielt das Magazin-Prinzip durch die Entwicklung von Werk-

zeugsystemen, bei denen nicht die gesamten Kassetten, sondern nur der Kopf des Werkzeuges mit der Schneide gewechselt wird. Durch derartige Konstruktionen lässt sich eine größere Anzahl von Werkzeugschneiden auf kleinem Raum unterbringen und für einen längeren Zeitraum bereithalten.

2.4 Werkzeugwechsel bei Fräsmaschinen und Bearbeitungszentren

Bei diesen Maschinen ist die Anzahl der erforderlichen Werkzeuge meist wesentlich höher als bei Drehmaschinen, da viele Werkzeuge, wie Bohrer, Senker, Reibahlen und Gewindewerkzeuge form- oder maßgebunden sind. Deshalb haben sich bei diesen Maschinen **Werkzeugmagazine** in den verschiedensten Bauformen weitgehend durchgesetzt. Dabei bilden Maschine, Werkzeugmagazin und Wechselvorrichtung eine konstruktive Einheit. Je nach Ausführung unterscheidet man **Ketten-, Teller-, Scheiben- oder Kassettenmagazine** *(Bild 2.2 und 2.3)*.

Für diese Magazine erfolgt die Programmierung eines Werkzeugwechsels in 2 Stufen:

- Zunächst wird unter der T-Adresse das nächstfolgende Werkzeug zur Bereitstellung aufgerufen.
- Ist dies ausgeführt, dann wird der Wechselvorgang zu einem späteren Zeitpunkt im NC-Programm mit M06 gestartet.

Die zugehörigen Werkzeug-Korrekturwerte werden entweder zusammen mit dem Werkzeug oder separat mit der D-Adresse aktiviert.

Es gibt Lösungen, bei denen sich mehr als 100 Werkzeuge im Magazin einer Maschine befinden. So große Werkzeugmengen lassen sich aber nicht in Magazinen mit einfacher – eindimensionaler – Aufreihung ausführen, wie es Ketten- oder ringförmig bestückte Scheibenmagazine sind. Ein Grund ist, dass bei diesen die Laufzeit bis zum Auffinden eines neuen Werkzeuges zu lang wird. Bei Scheibenmagazinen ergibt sich die Grenze allein schon durch die Baugröße. Solche Magazine wurden mit bis zu 32 Werkzeugen ausgeführt. Bei Kettenmagazinen ist die Grenze gesetzt durch



Bild 2.2: Scheibenmagazin als Anbaueinheit (Werkbild Miksch)



Bild 2.3: Kettenmagazin (Werkbild Miksch)

das Gesamtgewicht von Kette und Werkzeugen und die dadurch bedingte hohe Antriebsleistung für die Kette. Deshalb wurden Kettenmagazine auch mit zwei separaten, kürzeren Ketten ausgeführt. Zudem entstehen durch den Lauf der Kette mechanische Schwingungen, die sich nachteilig auf die Genauigkeit der gleichzeitig stattfindenden Bearbeitung auswirken.

Zur Vergrößerung der Werkzeugspeicher wurden auch Maschinen mit **zwei Magazinen** ausgerüstet, die links und rechts vom Maschinenständer montiert waren. Es wurden sogar Wechseleinrichtungen konzipiert, die vier auf einem Drehtisch um 90° versetzte Magazinteller nacheinander in Arbeitsposition bringen konnten. Ein anderer Weg war, Magazine mit der Anordnung der Werkzeuge in einem zweidimensionalen System zu schaffen, indem beispielsweise die Werkzeuge in zwei oder drei konzentrischen Ringen oder auf mehreren koaxial übereinander stehenden Scheiben angeordnet wurden. Dabei wird jedoch der Zugriff des Greifers durch die beiden äußeren Ringe auf den inneren Ring problematisch.

Die heute bevorzugte Lösung sind **Linearmagazine**, bei denen die Werkzeuge in mehreren Reihen nebeneinander oder übereinander stehen oder hängen.

In allen diesen Fällen muss eine Bewegungsmöglichkeit für die Bewegung in der *zweiten Dimension* geschaffen werden.

Als bevorzugte Lösung zum Speichern vieler Werkzeuge erwies sich jedoch das Prinzip der **auswechselbaren Kassettenmagazine.** In einer Maschine lassen sich vier bis sechs solcher Kassetten unterbringen, von denen jede 20 bis 30 Werkzeuge in einem Rechteckfeld aufnimmt. Zum Umrüsten werden die Kassetten außerhalb der Maschine bestückt und während des Arbeitens der Maschine ausgetauscht. Auf diese Weise lassen sich neue Werkzeuge schnell bereitstellen und verbrauchte oder nicht mehr benötigte entfernen. Das **Umsortieren der Werkzeuge** und den Transport innerhalb der Maschine übernimmt ein Flächenroboter, der die gesamte Magazinfläche überstreicht. Er entnimmt die aufgerufenen Werkzeuge aus den Kassetten, stellt sie an der Wechselposition für den Wechsler bzw. für die Spindel bereit und holt sie dort auch wieder ab.

Auch für den Werkzeugwechsel zwischen Magazin und Spindel wurden verschiedene Lösungen entwickelt.

Sie müssen grundsätzlich folgende Funktionen durchführen, je nach System evtl. in anderer Reihenfolge:

- Spindel und Magazin in die Wechselposition fahren
- das neue Werkzeug bereitstellen,
- das alte Werkzeug aus der Arbeitsspindel nehmen,
- das alte Werkzeug im Magazin abliefern,
- das neue Werkzeug aus dem Magazin entnehmen,
- das neue Werkzeug in die Arbeitsspindel einsetzen,
- Arbeitsspindel und Magazin wieder in die Arbeitsposition fahren.

Der maschinenspezifische Ablauf dieses **Wechselvorgangs** ist in der Steuerung festgelegt. Die dafür notwendige Zeit ist ein wichtiges Kriterium für die Wirtschaftlichkeit der Maschine. Sie wird auch als „Span-zu-Span-Zeit“ angegeben.

Wenn beim Anwender abzusehen ist, dass er mit einer begrenzten Anzahl von Werkzeugen auskommt, ist eine Pick-up-Maschine eine preiswerte Lösung.

Wie im *Bild 2.4* dargestellt, befindet sich dabei das Werkzeugmagazin mit dem für das Wechseln bereitgestellte Werkzeug im Eingriffsbereich der X-/Y-Achse der Haupt-

spindel. Dadurch, dass die Hauptspindel mit der Werkzeugaufnahme das gebrauchte Werkzeug mit der Z-Achse in einen freien Magazinplatz ablegt, das Magazin weitertaktet und die Spindel das neue Werkzeug abholt, dauert die Wechselzeit naturgemäß etwas länger als mit einem Wechsler wie im *Bild 2.5* dargestellt.

Schneller sind Systeme, die mit einem ein- oder **doppelarmigen Greifer** arbeiten. Hierbei ist der Doppelgreifer am schnellsten, weil altes und neues Werkzeug in einem Vorgang getauscht werden. Das nachfolgende Werkzeug wird während der Hauptzeit, d. h. während die Maschine wieder arbeitet, gesucht und für den nächsten Wechsel bereit gestellt.

Alle genannten Magazine haben **Grenzen** bezüglich der Abmessungen und des Gewichtes der speicherbaren und handhabbaren Werkzeuge. Das bedeutet, dass besonders große oder schwere Werkzeuge auch manuell gewechselt werden müssen. In Ausnahmefällen sind auch Bearbeitungszentren zusätzlich zum Magazin mit Wechslern für solche Sonderwerkzeuge ausgerüstet, wie z. B. große Plandrehköpfe oder Bohrköpfe.

2.5 Werkzeug-Identifikation

Zur **Identifizierung der Werkzeuge** im Magazin stehen verschiedene **Codierungsmethoden** zur Verfügung, von denen jede ihre speziellen Vor- und Nachteile hat.

Man unterscheidet:

1. Die **Platzcodierung**, bei der die Magazinplätze nummeriert sind und im Teileprogramm unter T nicht die Werkzeugnummer, sondern die Platznummer programmiert wird. Nach Gebrauch muss deshalb jedes Werkzeug wieder auf seinen festen Platz im Magazin zurückgewechselt werden.

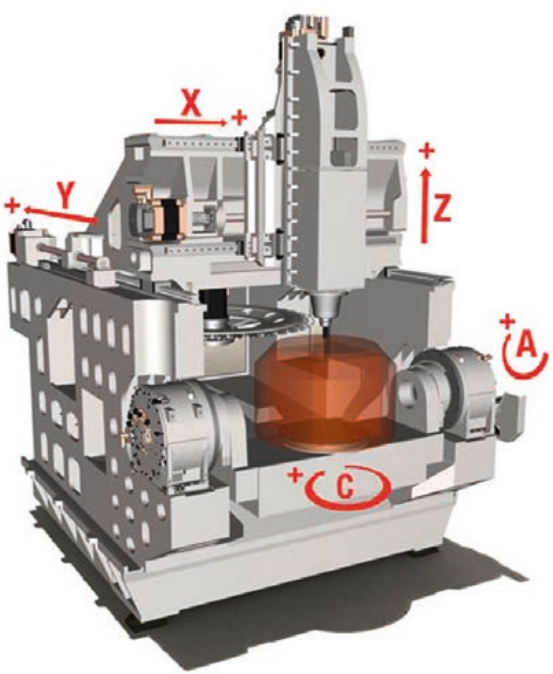
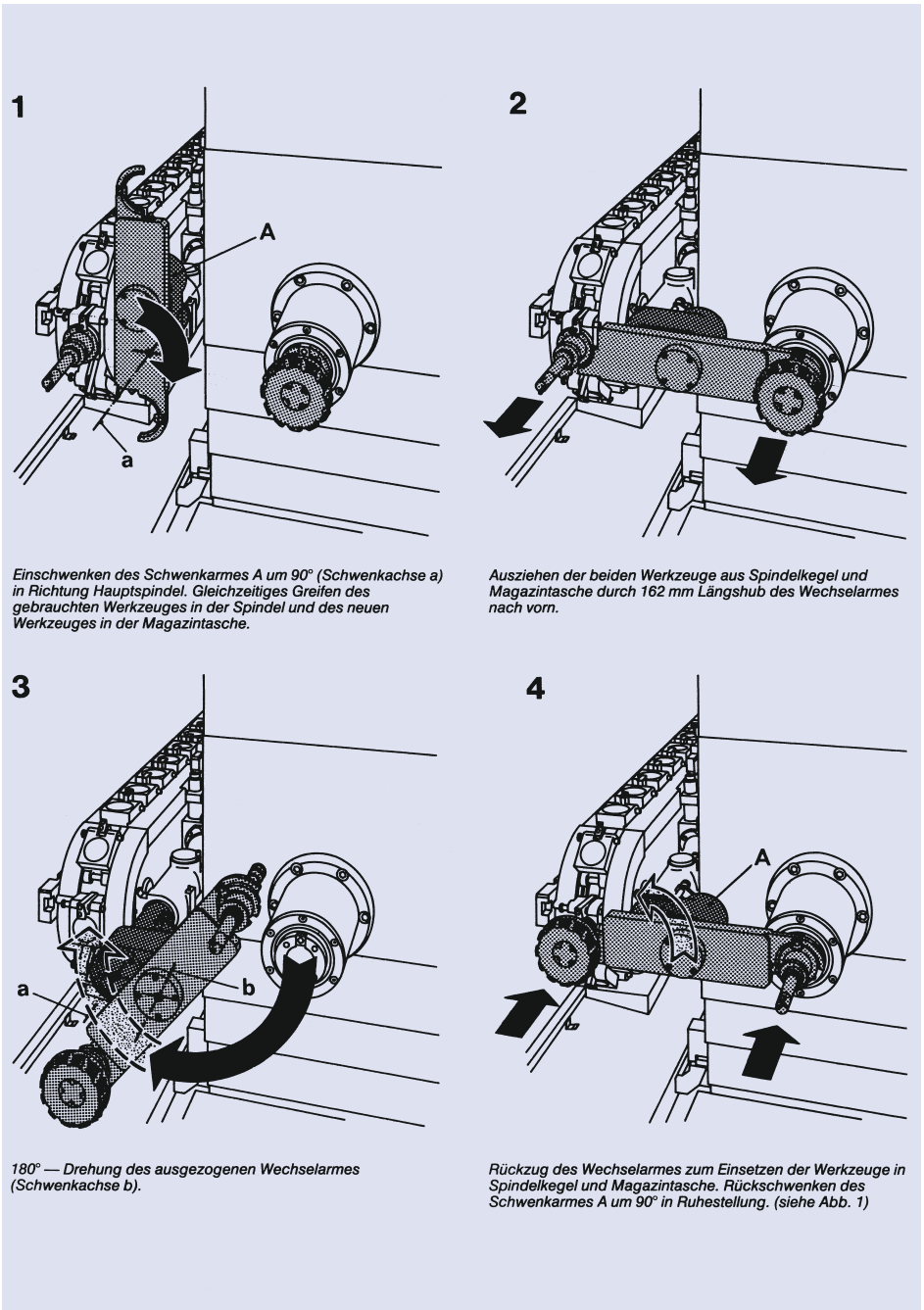


Bild 2.4: Pick-up-Werkzeugwechsler in einem Bearbeitungszentrum (Werkbild MAG IAS GmbH)



Einschwenken des Schwenkarmes A um 90° (Schwenkachse a) in Richtung Hauptspindel. Gleichzeitiges Greifen des gebrauchten Werkzeuges in der Spindel und des neuen Werkzeuges in der Magazintasche.

Ausziehen der beiden Werkzeuge aus Spindelkegel und Magazintasche durch 162 mm Längshub des Wechselarmes nach vorn.

180° — Drehung des ausgezogenen Wechselarmes (Schwenkachse b).

Rückzug des Wechselarmes zum Einsetzen der Werkzeuge in Spindelkegel und Magazintasche. Rückschwenken des Schwenkarmes A um 90° in Ruhestellung. (siehe Abb. 1)

Bild 2.5: Werkzeugwechsel mit Doppelgreifer aus dem Kettenmagazin

Vorteile:
- Verwendung handelsüblicher Werkzeuge oder Werkzeughalter,
- Platzsuchlauf auf kürzestem Wege,
- dynamisch unproblematische Platz-Erkennung durch entsprechend lange Codiernocken oder ein elektronisches Platzerkennungssystem. Deshalb sind hohe Suchlaufgeschwindigkeiten möglich,
- übergroße Werkzeuge können beliebig platziert werden, indem die benachbarten Plätze unbenutzt bleiben, um Kollisionen zu vermeiden.

Nachteile:
- Beim Einrichten auf ein neues Programm müssen alle Werkzeuge im Magazin so platziert werden, wie sie der Programmierer im Programm festgelegt hat,
- bei der Fertigung der zu bearbeitenden Teile im Produktmix können Probleme entstehen, wenn in den NC-Programmen der verschiedenen Werkstücke unterschiedliche Werkzeuge die gleichen Plätze belegen,
- die Bestückung des Magazins mit Schwesterwerkzeugen ist problematisch und evtl. nur durch „Tricks“ in der CNC möglich.

2. Die **Werkzeugcodierung.** Sie wurde früher mechanisch, d. h. durch Anbringen von Nocken oder Ringen realisiert, heute mit Hilfe elektronischer Speicherchips am Werkzeug bzw. an der Werkzeugaufnahme.

Auf die zur Codierung verfügbaren RFID-Systeme wird in Teil 4, Kapitel 3 näher eingegangen.

Vorteile:
- beliebige Einordnung der Werkzeuge im Magazin,
- programmiert wird die Werkzeugnummer,
- die Platzierung der Werkzeuge im Magazin ist beliebig,
- die Werkzeuge können beim Wechselvorgang ihre Plätze tauschen
- die elektronische Kodierung kann nicht nur die Werkzeugnummer, sondern auch technologische Daten enthalten, z. B. den genauen Werkzeugdurchmesser oder die Reststandzeit.

Nachteile:
- teuere Werkzeughalter mit Codiereinrichtung bzw. Speicherchip,
- an jedem Magazin ist eine Abtast- bzw. Lesestation erforderlich,
- zum Lesen/Suchen evtl. reduzierte Laufgeschwindigkeit des Magazins,
- codierte Werkzeughalter nicht in allen Maschinen verwendbar,
- längere Suchzeit, da der kürzeste Weg nicht bekannt ist.

3. Die **variable Platzcodierung.** Bei ihr setzt der Bediener jedes Werkzeug auf einen beliebigen Platz im Magazin und gibt die Werkzeugnummer in die CNC ein, die dann die weitere Datenverwaltung übernimmt. Die Werkzeuge können somit bei jedem Wechselvorgang einen neuen Platz im Magazin einnehmen, da die CNC die Zuordnung „Werkzeug zu Platz-Nummer“ registriert. Programmiert wird die Werkzeugnummer, die CNC sucht anhand ihrer internen Werkzeugverwaltung jedoch den aktuellen Platz des Werkzeuges. Diese Methode setzt sich immer mehr durch, da sie die vorstehend beschriebenen Vorteile der Verfahren nutzt, die Nachteile jedoch vermeidet.

Vorteile:
- Verwendung uncodierter oder elektronisch codierter Werkzeuge,
- Nutzung der zuverlässigen Platzcodierung des Magazins,
- Programmieren der Werkzeugnummer im Programm,
- Suchlauf auf kürzestem Wege,

- kurze Wechselzeiten durch Doppelgreifer, der jeweils für zwei Werkzeuge Magazin- und Spindelplatz vertauscht.

Voraussetzung für die variable Platzcodierung ist eine CNC, die über die dafür erforderliche Software verfügt. Diese muss:

- bei jedem Werkzeugwechsel die richtige Zuordnung der Daten herstellen und diese unverlierbar speichern,
- bei Einsatz eines elektronischen Codiersystems entsprechende Datenschnittstellen für das Schreib-/Lesegerät des Datenbausteins und den Werkzeugdatenrechner bieten,
- den manuellen Werkzeugaustausch unterstützen, indem sie das gesuchte Werkzeug zu einer Entnahmestation bringt und die Werkzeugnummer zur Kontrolle anzeigt,
- für Werkzeuge mit Übergröße feste Plätze reservieren und die benachbarten Plätze freihalten.

2.6 Werkstückwechsel

Der automatische Werkstückwechsel ist ein weiterer Schritt zu einer automatisierten Fertigung. Durch ihn lassen sich die Nebenzeiten für das Spannen und Entladen der Werkstücke vermeiden mit dem Vorteil, dass die Produktivität der Werkzeugmaschine steigt und ihr Arbeiten von der Tätigkeit des Werkers entkoppelt wird bis hin zu einer bedienerlosen Fertigung. Im Zusammenwirken mit der Möglichkeit, viele Bearbeitungsprogramme in der CNC speichern zu können, ergibt sich sogar unter gewissen Voraussetzungen die Verwirklichung einer bedienerlosen, bedarfsgesteuerten Bearbeitung verschiedener Teile einer Teilefamilie in Einzel- oder Kleinserienfertigung. Der automatische Werkstückwechsel ist darüber hinaus eine unabdingbare Voraussetzung für die Integration von CNC-Maschinen in flexible Fertigungssysteme. Der Wechselvorgang wird mit dem Befehl M60 programmiert und unmittelbar ausgeführt.

Der automatische Werkstückwechsel wurde bereits bei konventionellen Drehautomaten verwirklicht, die „von der Stange“ arbeiten und mit einem Stangenmagazin für eine automatische Zuführung neuer Stangen ausgerüstet sind. Somit können sie über lange Zeit bedienerlos arbeiten.

Je nach Art der Werkstücke und deren Aufspannung werden verschiedene Systeme für den automatischen Werkstückwechsels eingesetzt:

- das Arbeiten von der Stange,
- das Pick-up-Verfahren,
- das Wechseln des ungespannten Werkstücks durch ein Ladegerät, z. B. einen handelsüblichen Industrieroboter *(siehe Bild 2.6)*,
- das Wechseln des auf einem Spannmittel, z. B. einer Palette, gespannten Werkstücks.

Die Entscheidung für eins dieser Systeme hängt von der Art und der Größe der Werkstücke sowie der Art der Bearbeitung ab.

Das **Arbeiten von der Stange** kommt nur für relativ kleine Werkstücke in Frage, die aus Vollmaterial hergestellt werden. Somit findet es primär bei Drehmaschinen Anwendung, doch es wird auch bei Bearbeitungszentren und Fräs-Dreh-Zentren eingesetzt. Da das Werkstück zum Abschluss der Bearbeitung abgestochen oder abgesägt werden muss, wird oft ein Entnahmegerät oder ein Roboter eingesetzt, um es aufzufangen, insbesondere dann, wenn es noch weiteren Bearbeitungsgängen zugeführt werden muss. Bei der Drehbearbeitung ist nachteilig, dass das Arbeiten von der

Stange die zulässige Drehzahl der Spindel stark begrenzt, was im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit moderner Schneidstoffe eine erhebliche Verlängerung der Hauptzeit bewirkt. Das hat zu einer anderen Art der Arbeit mit Stangenmaterial geführt, bei der bereits vor der Bearbeitung das maßgerechte Ablängen des Stangenmaterials erfolgt und dann erst das abgelängte Rohteil gespannt wird.

Beim **Pick-up-Verfahren** wird das Werkstück durch das Spannmittel direkt von einer Ablagefläche gegriffen und der Bearbeitung zugeführt. Es findet daher vorwiegend bei Drehmaschinen Anwendung, weil das Spannfutter hervorragend als Greifer zu verwenden ist. Da das Werkstück ungespannt zugeführt wird, muss es auf einer waagerechten Fläche liegen, es kann also nur von oben her gegriffen und gespannt werden. Das ist bei Drehmaschinen mit senkrecht hängender Spindel sehr gut möglich. Dazu muss sich die Spindel von einer Arbeitsposition in die Aufnahmeposition und nach der Bearbeitung in eine ggf. unterschiedliche Ablageposition bewegen. Das lässt sich sehr einfach realisieren, wenn diese Bewegung von der X-Achse der CNC ausgeführt wird. Für die Zu- und Abfuhr der Werkstücke ist ein einfaches Förderband ausreichend. Derartige Systeme sind nur zur Handhabung von nicht zu großen, stabil liegenden, vorwiegend runden Teilen geeignet.

Das **Wechseln des ungespannten Werkstücks durch ein Ladegerät** setzt voraus, dass der Spannvorgang einfach und sicher reproduzierbar ist, sei es, dass ein Drehteil zwischen Spitzen oder im Futter, sei es, dass ein Frästeil sauber ausgerichtet in einem Schraubstock oder einer Spannvorrichtung aufgenommen und gespannt wird. Auch hier unterscheidet man zwischen Systemen mit einem oder mit zwei Greifern. Wie beim Werkzeugwechsel zeichnen sich auch hier Systeme mit zwei Greifern durch eine wesentlich kürzere Wechselzeit aus. Systeme mit einem Greifer müs-



Bild 2.6: Werkstückwechsel mittels handelsüblichem Industrieroboter (Werkbild Chiron)

sen zunächst das fertige Teil wegtransportieren und können dann erst das neue Teil holen und zur Maschine bringen, während Systeme mit zwei Greifern direkt das fertige gegen das neue Teil austauschen können.

Eingesetzt werden solche Systeme für die Handhabung von Wellen, aber auch von Futterteilen bei Dreh- oder Schleifmaschinen, insbesondere wenn die Maschinen mit anderen über ein gesondertes Transportsystem verbunden sind. Dann handelt es sich meist um Portalgeräte, die die Werkstücke von oben her in den Arbeitsraum bringen. Industrieroboter werden häufig eingesetzt, wenn verschiedene sich ergänzende CNC-Maschinen ein flexibles Bearbeitungssystem bilden und der Roboter mehrere Maschinen im Wechsel bedienen kann.

Da beim Werkstückwechsel im ungespannten Zustand keine automatische Werkstückidentifizierung möglich ist, muss bei kleineren Losgrößen oder Einzelfertigung die Programmzuweisung auf andere Art und Weise erfolgen, z. B. durch Nachführung der Bewegung jedes Werkstücks im Leitrechner des Systems.

Das **Wechseln des auf einem Spannmittel, z. B. einer Palette, gespannten Werkstücks** kommt immer dann zum Einsatz, wenn das zu bearbeitende Werkstück in einer Spannvorrichtung aufgenommen werden muss. So ist der Palettenwechsel fast zum Standard-Werkstückwechsel bei Fräsmaschinen und Bearbeitungszentren geworden *(Bild 2.7)*.

Paletten sind Werkstückträger, die auf der Unterseite zur genauen Fixierung und Spannung auf dem Tisch des Bearbeitungszentrums geeignete Flächen und Funktionselemente besitzen. Auch bei Karusselldrehmaschinen werden ganze Planscheiben als Paletten ausgewechselt. Die Maschinen sind dazu mit einer Wechseleinrichtung ausgerüstet, mit der die Palette mit dem bearbeiteten Werkstück automatisch herausgeführt und eine andere mit einem unbearbeiteten Werkstück von einer Wartestation in den Arbeitsraum der Maschine gebracht werden kann. Dadurch lassen sich die gespannten Werkstücke in wenigen Sekunden austauschen. Das Auf- und Abspannen erfolgt dann während der Hauptzeit außerhalb des Arbeitsraums der Maschine.

Bei **flexiblen Fertigungszellen (FFZ) oder Fertigungssystemen (FFS)** führen zusätzliche **Palettenspeicher oder Verkettungssysteme** den Maschinen automatisch immer wieder neue Paletten mit Werkstücken zu und transportieren die bearbeiteten zu einem zentralen Spannplatz. Damit ermöglichen sie den automatischen Werkstückwechsel innerhalb einer beliebig langen Fertigungszeit. Der **Palettenspeicher** an der Maschine bietet im Vergleich zu einem Verkettungssystem bei Einzelmaschinen spezifische Vorteile: Bei einem Bedarf von 4 bis 8 Paletten pro Schicht ist der Palettenspeicher (**Palettenpool**) eine preisgünstige Möglichkeit, während mehrerer Stunden bedienerlos zu fertigen. Der Preisvorteil zeigt sich insbesondere dann, wenn ein Betrieb mit einer Maschine startet und evtl. später weitere Maschinen hinzufügen möchte. Dadurch fällt der Aufwand für die Verkettungseinrichtung erst mit dem Erwerb der zweiten Maschine an.

Bei **FFZ** erfolgt die Steuerung des **Palettenspeichers** über die CNC der Maschine und ist damit auch sehr einfach zu programmieren und zu bedienen. Bei Linearverkettung mehrerer FFZ zu einem FFS wird zur Abwicklung der komplexen Transportauf-

träge eine **separate Leitsteuerung** benötigt. Hier werden dann auch die Prioritäten festgelegt, die einzelnen Vorrichtungen bestimmten Maschinen zugeordnet und die Auslastung simuliert.

Der Flächenbedarf ist bei zwei Bearbeitungszentren geringer als in Einzelverbindung mit einem linearen Transportsystem. Dies macht sich insbesondere bei Maschinen mit integriertem Palettenspeicher für kleinere Werkstücke bemerkbar.

Die Verfügbarkeit von **Palettenpools** kann durch Linearverkettungen niemals erreicht werden, weil der mechanische Aufwand, die Funktionsvielfalt und damit auch die Störungsursachen viel größer sind. Der entscheidende Nachteil des Palettenpools ist seine Nichterweiterbarkeit. Ein späterer Ausbau der Anlage durch Hinzufügen von Bearbeitungsmaschinen, Wasch- oder Messmaschinen, automatischen Werkzeugzubringersystem und weiteren Spannplätzen ist oft nicht möglich.

Zur Verfolgung und Überwachung sind die Paletten in den meisten Fällen mit einer **Codiereinrichtung** ausgerüstet, die eine automatische Identifizierung der Palette

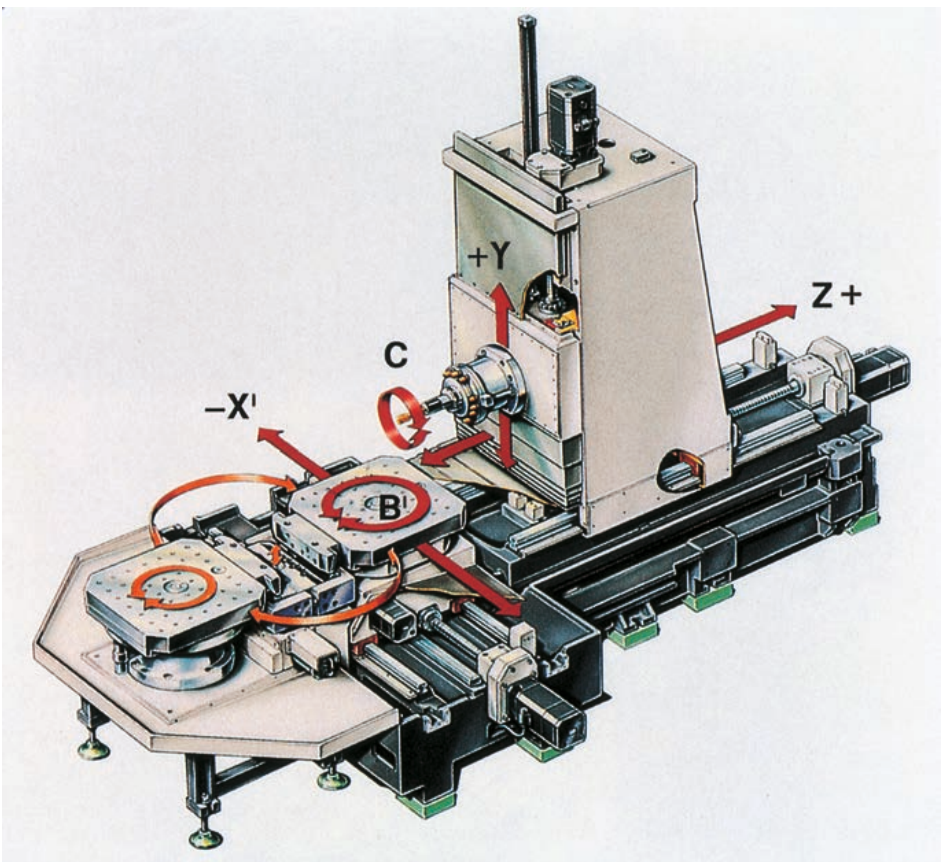


Bild 2.7: Bearbeitungszentrum mit Palettenwechsler (Werkbild Heckert)

und damit des darauf gespannten Werkstücks ermöglicht und das entsprechende NC-Programm im Speicher der CNC aktiviert. Beim Einsatz in flexiblen Fertigungszellen muss die Codiereinrichtung automatisch setz- und lesbar sein, um z. B. die Werkstücknummer, Maschinennummer und eine evtl. einzuhaltende Reihenfolge bei aufeinanderfolgenden Bearbeitungen auf mehreren CNC-Maschinen vorgeben zu können. Bei diesen Codiereinrichtungen besteht auch die Forderung, nach erfolgter Bearbeitung feststellen zu können, in welchen Maschinen des flexiblen Fertigungssystems die Palette zur Bearbeitung war. Dem Bedienungspersonal soll das bei aufgetretenen Bearbeitungsfehlern, Toleranzüberschreitungen oder Ausschuss die Ermittlung der fehlerhaften Maschine oder Werkzeuge erleichtern.

Das Gleiche wird auch durch Paletten mit fester Codierung erreicht, indem die Aktualisierung und Sicherung der Fertigungsdaten in der CNC mittels der Funktion „Werkstückverwaltung“ erfolgt.

2.7 Drehzahlwechsel

Auch Drehzahl und Drehrichtung des Hauptantriebs müssen im Laufe der Bearbeitung eines Werkstückes wiederholt geändert werden. Beim Drehen mit konstanter Schnittgeschwindigkeit erfordert jede Änderung des Durchmessers eine entsprechend angepasste Drehzahl der Arbeitsspindel. Bei Maschinen mit rotierendem Werkzeug ist zumindest für jedes Werkzeugwechsel auch eine andere Drehzahl erforderlich. Deshalb ist für einen automatischen Arbeitsablauf auch die Automatisierung der Drehzahleinstellung notwendig.

Die **Spindeldrehzahl ist eine technologische Funktion**. Sie wird mit der S-Adresse meistens direkt in mm/Umdrehung oder mm/min programmiert und die Drehrichtung rechts/links mit der **Schaltfunktion M03/M04** bestimmt. M05 aktiviert Spindel Halt.

(Siehe auch Teil 2, Kapitel 5.4 Hauptantriebe)

Bei **konventionellen Werkzeugmaschinen** mit Antrieb durch einen normalen Drehstrom-Asynchronmotor wurden die verschiedenen Drehzahlen vorwiegend über Zahnrad-Stufengetriebe erreicht, seltener über stufenlose Getriebe. Formschlüssig geschaltete Schieberadgetriebe sind für eine Automatisierung ungeeignet. Deshalb wurden bei Drehmaschinen vorwiegend lastschaltbare Kupplungsgetriebe eingesetzt. Diese waren aber so groß und schwer, dass sie für den Antrieb von in Supporten angeordneten Spindeln, wie bei Bohrwerken oder Bearbeitungszentren, nicht in Frage kamen. Deshalb wurden oft hydraulische Antriebe bevorzugt.

Durch die stufenlos verstellbaren Elektromotoren vereinfachte sich die Aufgabe, sodass sich diese trotz des zunächst sehr hohen Preises schnell durchsetzten. Wegen des immer noch unzureichenden Verstellbereiches war aber meistens noch ein nachgeschaltetes Stufengetriebe zur Vergrößerung des Drehzahlbereichs notwendig. Ist das Stufengetriebe als formschlüssiges Getriebe ausgeführt, also als Schieberadgetriebe oder mit Klauenkupplungen, muss der Antrieb zum Umschalten stillgesetzt werden. Dazu diente ein in der Steuerung abgelegtes Unterprogramm. Deshalb wurde dieses Stufengetriebe vorzugsweise über elektromagnetische Lamellenkupplungen geschaltet, was auch bei laufendem Antrieb möglich ist.

Inzwischen wurden aber auch die stufenlos regelbaren Elektromotoren bezüglich ihres Stellbereiches weiterentwickelt, sodass

heute auf zusätzliche Stufengetriebe weitgehend verzichtet werden kann. Näheres hierzu siehe Teil 2, Kapitel 3.

2.8 Vorschubgeschwindigkeit

Durch die Vielzahl der Werkzeuge in CNC-Maschinen ergibt sich die Notwendigkeit eines sehr großen programmierbaren und stufenlos regelbaren Verstellbereichs für die Vorschubgeschwindigkeit. Auch bei Laser- oder Wasserstrahlmaschinen ist die Programmierung, Konstanthaltung und in vielen Fällen auch die automatische Anpassung der Vorschubgeschwindigkeit notwendig. Bei interpolierenden Achsen, beispielweise zur linearen Interpolation bei Freiformflächen und bei Kreis- oder Schraubeninterpolation, müssen alle beteiligten Achsenvorschübe ständig so geregelt werden, dass die programmierte Schnittgeschwindigkeit konstant bleibt.

(Siehe auch Teil 2, Kapitel 1.5 Vorschubantriebe)

Der Vorschub ist eine technologische Funktion und wird unter **der F-Adresse** programmiert.

Bei der **direkten Vorschub-Programmierung** wird die Vorschubgeschwindigkeit nach der F-Adresse direkt in mm/min (G94) oder in mm/Umdrehung (G95) eingegeben. Dieser Wert wird von der CNC in den Drehzahl-Sollwert für die geregelten Achsantriebe umgerechnet, an die Antriebsverstärker ausgegeben und bei Bedarf dem Bearbeitungsablauf automatisch angepasst.

Der **Eilgang** zur schnellen Zustellung der Achsen ohne Werkzeugeingriff wird mit G00 programmiert.

Die Festlegung, **wie** die Achsen den programmierten Endpunkt anfahren und erreichen sollen, erfolgt ausschließlich über die **G-Funktionen** (siehe Teil 5.1, NC-Programm, 1.6 Wegbedingungen).

2.9 Zusammenfassung

Für den automatischen Arbeitsablauf numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen sind programmierbare Schaltfunktionen unverzichtbar. Sie ermöglichen eine weitgehend vollständige Bearbeitung der Werkstücke auf einer Maschine ohne manuelle Unterstützung. Die dafür wichtigsten Funktionen für zerspanende CNC-Maschinen sind der automatische Werkzeugwechsel, Werkstückwechsel und Drehzahlwechsel, sowie der Werkzeug- und Werkstück-spezifische Vorschub.

Der automatische Werkzeugwechsel ist für den Einsatz mehrerer Werkzeuge zur Komplett-Bearbeitung von Werkstücken notwendig. Je nach Anzahl und Größe der zum Einsatz kommenden Werkzeuge werden entsprechend geeignete Magazin-Ausführungen eingesetzt. Bei Drehmaschinen ist der Bedarf an unterschiedlichen Werkzeugen geringer. Deshalb ist der Werkzeugrevolver als Stern-, Kronen- oder Scheibenrevolver vorherrschend. Dabei können auch angetriebene Werkzeuge zur Ausführung von Bohr- oder Fräsarbeiten eingesetzt werden.

Bei Fräsmaschinen und Bearbeitungszentren ist der Werkzeugbedarf größer, da viele Werkzeuge maß- oder formgebunden sind. Dafür sind Magazine mit bis zu 100 Werkzeugen und Wechseleinrichtungen in sehr vielfältigen Ausführungsformen entstanden.

Bei den Werkzeugmagazinen unterscheidet man Ketten-, Teller- oder Scheibenmagazine, meist begrenzt auf 32 Werkzeuge, sowie flächig angeordnete Kassettenmagazine mit einer größeren Aufnahmekapazität.

Der Werkzeugwechsel erfolgt am einfachsten nach dem Pick-up-Verfahren, allerdings mit dem Nachteil einer langen Wechselzeit. Schneller sind Greifersysteme mit einem Einfachgreifer oder besser mit einem Doppelgreifer.

Von großem Einfluss auf die Ausführung des Werkzeugwechsels und damit auch auf das Magazin ist die Identifizierung der Werkzeuge. Man unterscheidet hier die Werkzeugcodierung, die Platzcodierung und die variable Platzcodierung.

Mit einem ausreichend großen Werkzeugmagazin und dem automatische Werkstückwechsel ist die vollautomatische Fertigung von Teilefamilien ohne manuelle Eingriffe möglich. Drehmaschinen bieten dafür das Arbeiten von der Stange. Einfachere Werkstücke können oft ohne Spannmittel mit dem Pick-up-Verfahren oder durch einen Laderoboter gewechselt werden. Benötigt das Werkstück ein spezielles Spanmittel, wird es im gespannten Zustand mit einer Palette gewechselt, wenn möglich auch in Mehrfachspannungen.

Die automatische Drehzahlanpassung bei Drehmaschinen ist wegen des in weiten Grenzen veränderlichen Drehdurchmessers und zur Konstanthaltung der Schnittgeschwindigkeit immer notwendig und wird durch stufenlose Regelung realisiert. Bei Maschinen mit rotierenden Werkzeugen ist zwangsläufig mit jedem Werkzeugwechsel auch ein Drehzahl- und Vorschubwechsel verbunden. Dies wird heute vorwiegend durch stufenlos regelbare Elektromotoren verwirklicht. Bei sehr großen Drehzahlbereichen ist zusätzlich noch ein schaltbares Zahnräder-Stufengetriebe erforderlich.

Schaltfunktionen

Das sollte man sich merken:

1. Bei den Schaltfunktionen unterscheidet man nach **M-Funktionen** (Ein/Aus/L/R/Stop) und **technologischen Funktionen** T = Tool, S = Spindle, F = Feedrate, D = Diameter, H = High (Länge)
2. Entscheidende Kriterien zur **Beurteilung** von automatischen Werkzeugwechseleinrichtungen sind
   - Die Anzahl der verfügbaren Werkzeuge
   - Einschränkungen bezüglich deren Abmessungen und Gewicht
   - Die Werkzeugwechselzeit, auch als „Span-zu-Span-Zeit bezeichnet
   - Die Kosten für zusätzliche Aufnahmen, Kassetten oder Halter
3. Für **Drehmaschinen** werden vorwiegend Werkzeugwechsler in Form von Stern-, Kronen- oder Scheibenrevolver eingesetzt
4. Bei **Fräsmaschinen und Zentren** unterscheidet man nach
   - Kettenmagazinen
   - Teller- und Scheibenmagazinen
   - Regal- und Kassettenmagazinen
   - Pick-up-Magazinen, z.B. für zu große Werkzeuge
5. Wichtig ist die Art der **Identifizierung** der Werkzeuge im Magazin. Sie beeinflusst die Zeit für den Suchlauf und den Wechselvorgang, sowie den Aufwand beim Umrüsten (neu Bestücken) des Magazins.
   Man unterscheidet
   - Die **Werkzeugcodierung,** heute vorwiegend elektronisch (RFID)
   - Die **Platzcodierung,**
   - Die **variable Platzcodierung,** d.h. Programmierung der Werkzeug-Nummer, aber suchen der Platz-Nummer auf kürzestem Weg
6. Auch für den automatischen **Werkstückwechsel** stehen unterschiedliche Systeme zur Verfügung:
   - Das Arbeiten „von der Stange“, vorwiegend bei Drehmaschinen
   - Das Pick-up-Verfahren,
   - Wechselpaletten mit Ein- oder Mehrfach-Spannvorrichtungen
7. Die Programmierung der **Vorschubgeschwindigkeit** (F) erfolgt nach G71 direkt in mm/Umdrehung bzw. in mm/min, oder nach G70 in inch/Umdreh-ung bzw. inch/min.
8. Die programmierbare **Drehzahl** (S) der Hauptspindel mit automatischer Nachführung ist für Drehmaschinen immer notwendig. Bei Fräsmaschinen und Bearbeitungszentren ist fast mit jedem Werkzeugwechsel auch ein Drehzahlwechsel erforderlich.
9. **Schaltfunktionen** werden mittels M-Adresse und meistens einer zweistelligen Zahl gemäß DIN 66026 programmiert.
10. Die Eingabe der **Vorschubgeschwindigkeit** erfolgt mittels **G71** direkt in **mm/min** oder **mm/U** oder mit **G70** in **inch/min** oder **inch/U.**

3 Funktionen der numerischen Steuerung

Numerische Steuerungen wurden durch die Integration der Rechnertechnik immer kleiner, schneller, leistungsfähiger und bedienungsfreundlicher. Seit der Entwicklung der ersten CNCs ab 1975 kamen ständig neue Funktionen und Aufgaben hinzu, insbesondere mit dem Ziel, den Automatisierungsgrad und die Zuverlässigkeit der CNC-Maschinen zu verbessern. Steuerungen auf Rechnerbasis machen die Maschinen, die sie steuern und die Menschen, die sie nutzen durch umfangreiche Funktionen produktiver.

3.1 Definition

Unter CNC versteht man eine numerische Steuerung, die einen oder mehrere **Mikroprozessoren** für die Ausführung der Steuerungsfunktionen enthält. Äußeres Kennzeichen einer CNC sind der Bildschirm und die Tastatur *(Bild 3.1)*. Das Betriebssystem der Steuerung, auch kurz als **CNC-Software** bezeichnet, umfasst alle erforderlichen Funktionen, wie Interpolation, Lage- und Geschwindigkeitsregelung, Anzeigen und Editor, Datenspeicherung und -verarbeitung. Zusätzlich bedarf es eines **Anpassprogrammes** an die zu steuernde Maschine, das der Maschinenhersteller erstellt und in der Anpasssteuerung (SPS) integriert. Darin sind alle maschinenbezogenen Verknüpfungen und Verriegelungen für spezielle Funktionsabläufe festgelegt, wie z. B. für Werkzeugwechsel, Werkstückwechsel und die Achsbegrenzungen.

Die werkstückabhängige Steuerung der Maschinenbewegungen bei der Bearbeitung erfolgt durch die **Teileprogramme.** Diese erstellt der Anwender der Maschine und sie zählen **nicht** zur CNC-Software.

3.2 CNC-Grundfunktionen

Neben der klassischen Aufgabe der numerischen Steuerung, die Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück einer Werkzeugmaschine präzise zu steuern, kommen immer neue Aufgaben und Funktionen hinzu. Während einige davon im „Hintergrund“ ablaufen und beispielsweise die Sicherheit überwachen, erfordern andere die Aufmerksamkeit und gelegentliche Eingriffe des Bedieners. Deshalb muss die Steuerung übersichtlich und einfach zu bedienen sein. Denn mit der CNC wurden aus einfachen, zahlenverstehenden Steuerungen komplexe, datenverarbeitende Prozessrechner mit völlig neuen Funktionen. Diese sollen vorgestellt und kurz erläutert werden.

Zu der **Grundausrüstung einer CNC** zählen heute beispielsweise

- ein großer, farbiger **Grafik-Bildschirm** *(Bild 3.1)* für Anzeige, Programmierung, Simulation, Betrieb und Diagnosefunktionen,
- die **Bedienerführung im interaktiven**



Bild 3.1: 4-Fenster-Ansicht einer Bedientafel

Dialog in mindestens 2 umschaltbaren Sprachen

- ein **Programmspeicher** für mehrere Teileprogramme, Korrekturwerte, Werkzeugdaten, Nullpunkttabellen und Zyklen,
- eine **busgekoppelte oder integrierte SPS** mit hoher Verarbeitungsgeschwindigkeit zum Steuern der Schaltfunktionen,
- **programmierbare Software-Endbegrenzungen** der NC-Achsen als Ersatz mechanischer Endschalter und der erforderlichen Verdrahtung,
- **BDE/MDE** (Betriebs- und Maschinendaten-Erfassung) und ein automatisches Logbuch zur Dokumentation von Bedienungsfehlern, Störungsmeldungen, Funktionsabläufen, Warnungen und manuellen Eingriffen.

Hinzu kommen **neue Funktionen,** um die Maschinen genauer, zuverlässiger und bedienerfreundlicher zu machen, wie z. B.:

- **Temperaturfehler-Kompensation** wärmeabhängiger Maschinenungenauigkeiten,
- **variable Platzcodierung** der Werkzeuge zur Beschleunigung der Such- und Wechselvorgänge,
- **Werkzeugbruch- und Standzeitüberwachung** für den automatischen Betrieb,
- automatisches Einlesen der **Werkzeugdaten** in den Korrekturwertspeicher,
- simultane Steuerung synchroner **Haupt-** und asynchroner **Nebenachsen** ohne Wartezeiten,
- Eingabe von **Maschinenparameterwerten** über Tastatur anstelle mühevoller Abgleicharbeiten bei der Inbetriebnahme u. v. a. m.

Für den automatischen Fertigungsablauf übernimmt die numerische Steuerung viele **zusätzliche Funktionen und Aufgaben.** Diese Funktionen werden heute als selbstverständlich vorausgesetzt.

Hier sollen einige dieser Sonderfunktionen aufgezählt und erläutert werden. Die gleichen Funktionen können jedoch in unterschiedlichen Steuerungsfabrikaten andere Bezeichnungen haben, anders ablaufen oder vom Leistungsumfang her differieren.

Achsen sperren

Gezieltes Stillsetzen einzelner oder aller CNC-Achsen, um an der Maschine ein CNC-Programm ohne Bewegung dieser Achsen auf Programmfehler im Schnelldurchlauf testen zu können. Wahlweise und zur Zeitersparnis können auch Werkzeugwechsel, Palettenwechsel, Kühlmittel und die Hauptspindel gesperrt werden.

Angetriebene Werkzeuge

So werden bei Drehmaschinen eingesetzte Werkzeuge wie Bohrer oder Fräser bezeichnet, die das stehende Werkstück bearbeiten und deshalb einen eigenen Antrieb benötigen. Dazu muss die Hauptspindel bahngesteuert werden (C-Achse).

Asynchrone Achsen

Hilfs- oder Nebenachsen, die nicht mit den Hauptachsen interpolieren und von diesen unabhängig verfahren (z. B. Werkzeug- oder Werkstück-Handlinggeräte in einer Maschine).

Datenschnittstellen *(Bild 3.2)*

Schnittstelle zum Anschluss der CNC an übergeordnete Rechner, um Daten auszutauschen oder Fernsteuerfunktionen ausführen zu können. Auch die automatische Werkstück- und Werkzeugerkennung benötigen solche Schnittstellen.

Diagnose-Software

Permanente oder programmierbar zu aktivierende Überwachungsfunktionen für Maschinen- und Steuerungsverhalten zwecks automatischer Dokumentation von Fehlern und deren Ursachen. Dazu nutzt die CNC die Bildschirmdarstellung der Messwerte als Kurven, Diagramme oder in digitaler Form. Alle Daten sind auch über Schnittstelle ausgebbar.

Neben der Fehlerdiagnose bieten Steuerungshersteller auch spezielle Diagnose-Software an, die den Anwender bei der Optimierung seiner Teileprogramme unterstützt. Damit ist es möglich, die Abarbeitungszeit (Taktzeit) signifikant zu verringern.

Beispiel: *Wenn die SPS einen Werkzeugbruch feststellt, kann mit einem asynchronen Unterprogramm zum Werkzeugwechsel gefahren werden. Dort wird das beschädigte Werkzeug gegen ein neues ausgetauscht und die Bearbeitung an der letzten Position fortgesetzt.*

Energieeffizienz

Einige aktuelle CNC-Systeme verfügen über Programme zur Analyse des Energieverbrauchs. So kann über die Schaltzeiten der Versorgungsmodule deren Energieverbrauch ermittelt und aufgezeichnet werden. Den Maschinenhersteller kann dies bei der korrekten Dimensionierung der Versorgungsmodule für einen konkreten Anwendungsfall unterstützen. Dem Anwender bietet sich die Möglichkeit, Arbeitsabläufe und Teileprogramme so zu optimieren, dass nicht unnötig Energie verbraucht wird. Dies macht sich besonders bei der Großserienfertigung bezahlt.

Freischneiden

Am Ende einer Bearbeitung bleibt der Vorschub bei weiterdrehender Spindel für eine programmierbare Zeit stehen, bevor das Werkzeug zurückgezogen wird.

Handeingabe

Manuelles Eintippen und Korrigieren eines NC-Programmes über die Tastatur der CNC

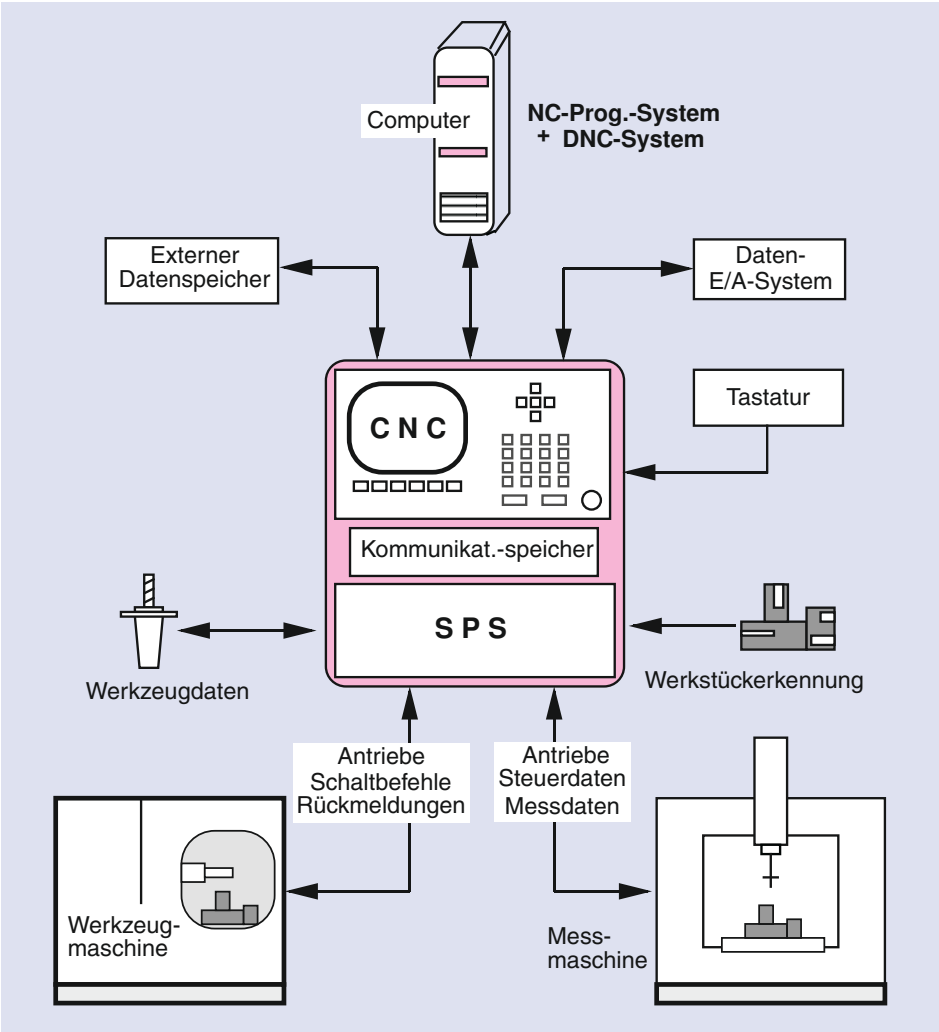


Bild 3.2: Datenschnittstellen einer CNC/SPS zur Übertragung unterschiedlicher, fertigungsrelevanter Daten.

bis zur rechnergestützten Programmierung an der Maschine unter Verwendung von Grafik und interaktiven Dialogen einer WOP-Steuerung.

Hochsprachenelemente (Abfragen, Schleifen, Variablen)

Heutige CNCs verfügen über BASIC- oder C-ähnlichen Sprachen zur Programmierung und Berechnung komplexer Abläufe.

So können Abfragen (IF..THEN..ELSE..END-IF) und Schleifen (FOR..TO..NEXT, WHILE..DO..END) implementiert werden. Zum Teil können sogar Zugriffe auf das Dateisystem (z. B. Log-Datei speichern) in dieser Hochsprache geschrieben werden.

Achtung! Diese Hochsprachenelemente sind herstellerspezifisch und nicht standardisiert. Somit lassen sich Programme, die solche Elemente enthalten, nicht einfach zwischen CNCs unterschiedlicher Hersteller austauschen.

Korrekturwerte

Für jedes in der Maschine befindliche Werkzeug werden aktuelle Werkzeugdaten (z. B. Durchmesser, Länge, Radius, Standzeit) gespeichert, die beim Abarbeiten des NC-Programms zu berücksichtigen sind. Auch Messfehlerkompensationen, Nullpunktverschiebungen, Spanntoleranzen oder Verschleißwerte sind Korrekturwerte und werden in dafür vorgesehenen Datenspeichern zum Abruf bereitgehalten.

Makros

Durch Makros können Elemente der Programmiersprache zusammengefasst und umdefiniert werden. So können bspw. unverständliche G-Codes durch leicht lesbare Worte ersetzt oder bestehende Sprachelemente überblendet werden. Damit kann bspw. durch programmieren eines einzelnen G-Codes eine ganze Reihe von Umschaltungen erfolgen.

Offset

Auf deutsch **Versatz:** Elektronische Kompensation von Spanntoleranzen des Werkstückes oder der Werkzeuge, die das genaue mechanische Ausrichten oder Einstellen ersparen.

Polarkoordinaten

Zwei- bzw. dreidimensionales Koordinatensystem zur Darstellung winkelabhängiger Funktionen oder winkelbezogener Zeichnungen. Für die Bearbeitung auf Maschinen mit linearen Achsen müssen die programmierten Polarkoordinatenmaße in kartesische Koordinatenmaße umgerechnet werden, und zwar entweder beim Programmieren oder in der CNC.

Position setzen

Der Bediener richtet den Spindel-Mittelpunkt mittels Messuhr oder anderer Hilfsmittel an einem Fixpunkt des Werkstückes oder der Vorrichtung aus und setzt die Achsen-Positionen auf die in der Zeichnung oder im CNC-Programm angegebenen Werte.

Programmtest

Beschleunigtes Abarbeiten eines CNC-Programms mit erhöhten Vorschubwerten oder im Eilgang zwecks Prüfung auf grobe Programmierfehler, Kollisionen und andere Fehler. Als Werkstoff wird dazu nicht Metall, sondern ein spezieller, leicht zu zerspanender Kunststoff verwendet.

Reset *(Zurücksetzen)*

Eine Tasterfunktion, die alle aktuellen Daten des Arbeitsspeichers löscht und alle Speicher auf NULL setzt. (Nur in Ausnahmefällen und dann nur unter Aufsicht eines Service-Technikers zu betätigen.)

Ruckbegrenzung *(Slope)*

Einstellbares Beschleunigungs- und Abbremsverhalten der CNC-Achsen, um Schläge zu vermeiden und die Mechanik zu schonen. Wichtig ist die Einstellung aller

Achsen auf den gleichen Wert, damit keine Bahnabweichungen entstehen.

Satz ausblenden *(Block Delete, Skip Block)*

Beim Abarbeiten eines NC-Programms werden Sätze, die mit einem Schrägstrich vor der Satznummer gekennzeichnet sind (/N147 X…Y…), wahlweise je nach Schalterstellung ausgeführt oder übersprungen *(= skip)*, um programmierte Messzyklen oder den Befehl „Maschine-Stopp“ zu aktivieren. Ist die Funktion ausgeschaltet, werden diese Sätze übersprungen und die Werkstücke ohne diese Unterbrechungen bearbeitet.

Satz Vorlauf

Eine zeitsparende Möglichkeit nach Programm-Unterbrechung, um das Programm bis zu einer vorwählbaren Satz-Nr. ohne Maschinenbewegung schnell durchlaufen zu lassen, sodass am vorgewählten Wiedereintritt in das Programm das richtige Werkzeug mit allen Korrekturwerten, die richtige Vorschubgeschwindigkeit und die richtige Spindeldrehzahl zur Verfügung stehen.

Scannen

Zeilenweises **Abtasten** einer Formfläche mit einem Taster oder einem Laserstrahl und gleichzeitiges, fortlaufendes Abspeichern der Messwerte zwecks anschließender Nutzung der Daten zur Herstellung eines identischen oder vergrößerten bzw. verkleinerten Werkstückes. Setzt entsprechend große Datenspeicher in der CNC voraus.

Simulation

Graphische Darstellung des Bearbeitungsvorgangs (Verfahrwege der Werkzeuge) und des Endwerkstücks unter Berücksichtigung der Werkzeugkorrekturen und der Rohteilgeometrie. Abhängig vom Steuerungstyp kann der komplette Arbeitsablauf simuliert und als 3-Ebenenansicht oder Volumenmodell dargestellt werden. Durch die komplette Berechnung des Programms können vorab Fehlerquellen erkannt und die Bearbeitungszeit abgeschätzt werden. Die Simulation wird direkt an der Maschine mit der CNC durchgeführt.

Spiegeln, Drehen, Verschieben

Die programmierten Weginformationen können an einer vorgegebenen Achse gespiegelt und gedreht bzw. um einen bestimmten Weg verschoben werden. Dies erleichtert bspw. die Programmierung von Teilen mit sich wiederholenden Geometrien.

Synchrone Achsen

Alle CNC-Achsen einer Maschine, die simultan interpolieren und koordiniert verfahren. Dies sind in der Regel alle Hauptachsen einer Maschine (Gegenteil: Asynchrone Achsen).

Unterprogramme

Permanent gespeicherte Programme wie Lochmuster, Bohr-, Gewinde- und Fräszyklen, die mit den erforderlichen Daten (Parameterwerten) ergänzt und beliebig oft aufgerufen und ausgeführt werden können (auch als parametrisierbare Unterprogramme bezeichnet).

Wiederanfahren an die Kontur *(Bild 3.3)*

Nach Werkzeugbruch oder Nothalt während der Bearbeitung muss das Werkzeug vor der Bruchstelle wieder in das unterbrochene Programm eintreten und die Bearbeitung ohne Markierungen im Werkstück fortsetzen. Hierbei sind auch die neuen Werkzeug-Korrekturwerte zu berücksichtigen.

Die genaue Funktionsbeschreibung ist jeweils der Dokumentation der betreffenden CNC zu entnehmen.

3.3 CNC-Sonderfunktionen

Grundsätzlich legt der Hersteller die Leistungs- und Ausbaufähigkeit einer CNC schon während der Konzeption und mit der Entwicklung fest. Neue CNC-Konzepte haben darüber hinaus eine **offene Software-Schnittstelle** zur CNC-Systemsoftware und bieten dadurch dem Maschinenhersteller und dem Anwender die Möglichkeit, spezielle Funktionen oder eigenes Know-how auch nachträglich noch zu integrieren. Dazu verfügt die CNC über eine spezielle Programmier-Software, mit deren Hilfe solche Sonderlösungen integrierbar sind. Sogar der Zugriff auf die Grafik der Steuerung ist damit möglich, um beispielsweise Bedienerhilfen, Auswahlmenüs oder dynamische Simulationen grafisch darstellen zu können. So ist es auch kein Problem, eine CNC für Werkzeugmaschinen zur Leitsteuerung für ein Paletten-Transportsystem umzufunktionieren. Dem Maschinen-Hersteller bietet sich damit auch eine Möglichkeit, seine neuen Entwicklungen schon in einem frühen Stadium zu testen, ohne den CNC-Hersteller informieren zu müssen.

Sehen wir uns nun eine Auswahl solcher Sonderlösungen an, die sich mit modernen CNCs realisieren lassen.

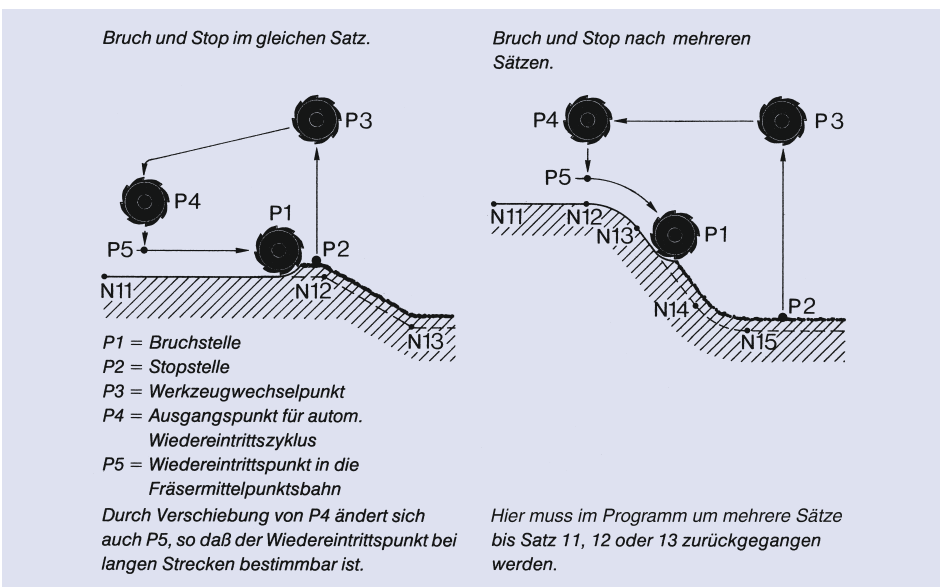


Bild 3.3: Wiederanfahren an die Kontur, automatischer Wiedereintrittszyklus nach Fräserbruch

Achsentauschen *(Bild 3.4)*

Ermöglicht die Verarbeitung von CNC-Programmen, die für Fräsmaschinen mit vertikaler Spindel programmiert sind, auf Maschinen mit horizontaler Spindel und vorgesetztem Winkelkopf (Tauschen von Y- und Z-Achse).

Arbeitsraumbegrenzung

Durch die Programmierung der unteren und oberen Begrenzungswerte jeder Achse wird der freigegebene Arbeitsraum einer CNC-Maschine vorübergehend begrenzt. Die Eingabe von Wegmaßen, die außerhalb dieser **„Software-Limits“** liegen, löst ein Fehlersignal aus und die Maschine bleibt sofort stehen.

Beispiel:
N1 G25 X100 Y255 Z70 $
= untere Grenzwerte für X-, Y- und Z-Achse
N2 G26 X440 Y321 Z129 $
= obere Grenzwerte für X-, Y- und Z-Achse

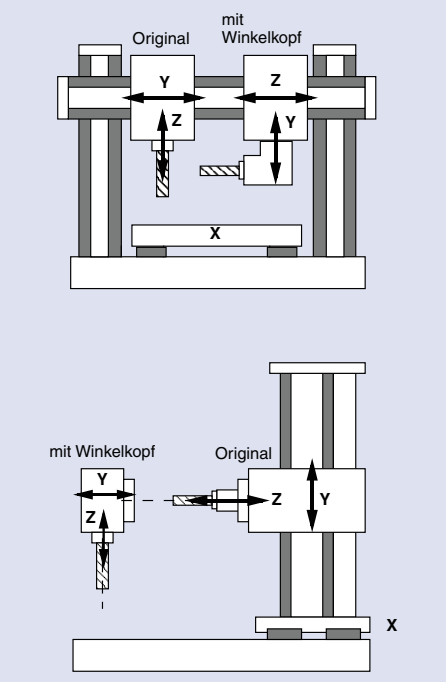


Bild 3.4: Achsen tauschen. Bei vorgesetztem Winkelkopf können Y- und Z-Achse getauscht werden, um NC-Programme verwenden zu können, die für eine vertikale Z-Achse erstellt wurden

Asynchrone Unterprogramme

In der CNC kann ein (kleines) Teileprogramm definiert werden, welches die normale Abarbeitung unterbricht und Sonderfunktionen ausführt. Dieses Teileprogramm wird bspw. durch die SPS oder einen anderen Kanal ausgelöst.

Beispiel 1: Zwei Arbeitseinheiten einer Maschine haben einen überlappenden Arbeitsraum. Wenn die eine in den Arbeitsraum der anderen muss, so kann diese mittels asynchronem Unterprogramm ihre Arbeit unterbrechen und aus dem Weg fahren und an der letzten Position weitermachen, wenn die erste Einheit ihren Arbeitsraum wieder verlassen hat.

Beispiel 2: Wenn die SPS einen Werkzeugbruch feststellt, kann mit einem asynchronen Unterprogramm zum Werkzeugwechsel gefahren werden. Dort wird das beschädigte Werkzeug gegen ein neues ausgetauscht und an der letzten Position weitergearbeitet.

Automatische Werkzeuglängen-Messung *(Bild 3.5)*

Nach dem Einsetzen eines Werkzeuges wird zuerst ein Messzyklus ausgeführt, der durch Anfahren eines Messtasters die absolute Werkzeuglänge feststellt und abspeichert. Insbesondere bei mehrspindlingen Fräsmaschinen vorteilhaft und zeitsparend.

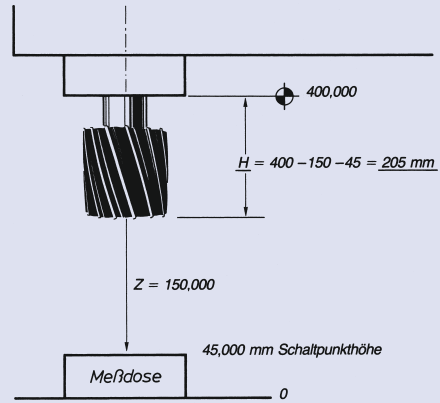


Bild 3.5: Automatische Werkzeuglängenmessung mittels schaltender Messdose

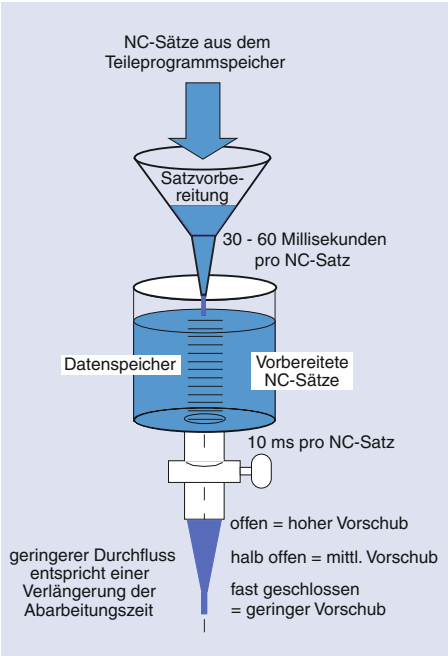


Bild 3.6: Dynamischer Daten-Puffer-Speicher mit kurzer Übertragungszeit zur Sicherstellung kurzer Blockzykluszeiten (Funktionsprinzip)

Automatische Systemdiagnosen, NC-Analyzer

Eine spezielle Software zur Umschaltung des CNC-Bildschirms auf Oszilloskop-Betrieb.

Damit können NC-Programme getestet und eventuell vorhandene Fehler in der Programmierung oder während der Bearbeitung komfortabel gefunden werden.

Der NC-Analyzer beantwortet u. a. folgende Fragen:

- Wo im Programm trat der Fehler zum ersten Mal auf?
- Welche Auswirkungen hat der Fehler auf das Programm?
- Wie sind die Auswirkungen auf andere Variablen bzw. Programmteile?
- Welche Wichtigkeit hat der Fehler für das Programm?

Blockzykluszeit *(Bild 3.6 und 3.7)*

Für eine hohe Oberflächenqualität und Konturgenauigkeit muss die CNC das CNC-Programm sehr schnell und ohne Vorschubschwankungen abarbeiten. Ist die Abarbeitungszeit eines Satzes kürzer als die Vorbereitungszeit für den folgenden Satz, kommt es zu Vorschubeinbrüchen. Deshalb muss die CNC über eine hohe Rechengeschwindigkeit und einen ständigen Vorrat vorbereiteter Sätze verfügen. Ein dynamischer Pufferspeicher, der ständig nachgefüllt wird, hält eine ausreichende Anzahl vorbereiteter Sätze bereit und verhindert somit das ruckelnde „Achsen-Stottern“.

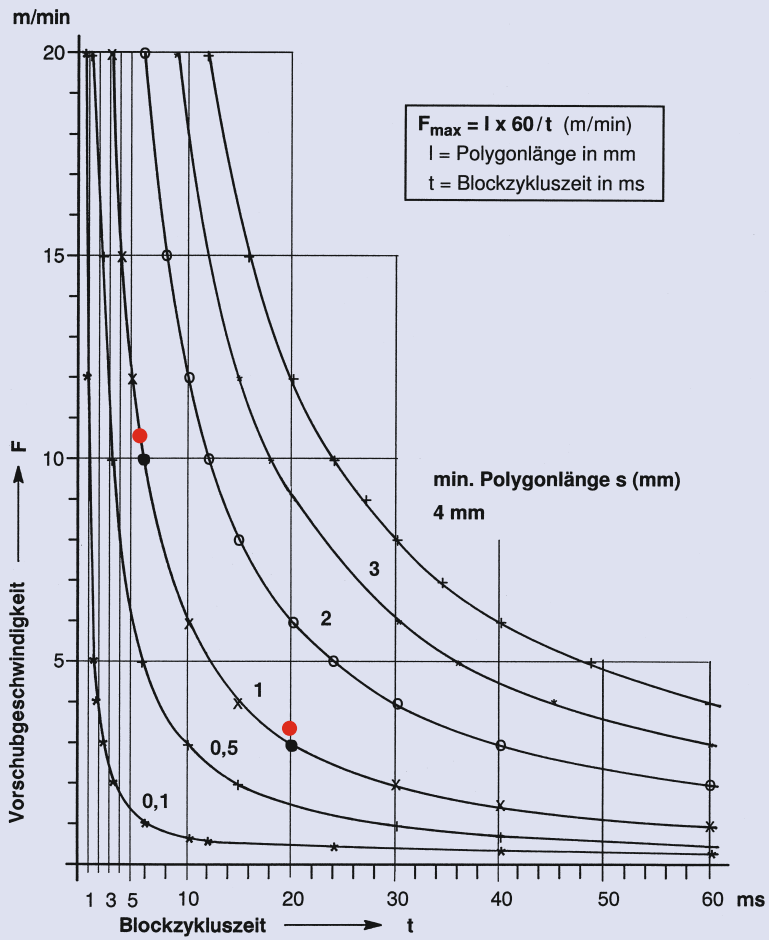
Reicht der Vorrat trotzdem nicht aus, dann muss die Vorschubgeschwindigkeit solange reduziert werden, bis die Achse zwar langsamer, aber kontinuierlich fährt.

Den Zusammenhang zwischen Blockzykluszeit, Polygonlänge und Vorschubgeschwindigkeit zeigt *(Bild 3.7)*.

Beispiel: Bei einer Polygonlänge von 0,1 mm und einer Blockzykluszeit von t = 2 ms beträgt der max. Vorschub F_{max} = 4 m/min.

DNC-Schnittstelle *(Bild 3.2)*

Automatisches Ein- und Auslesen von Teileprogrammen, Werkzeugkorrekturen, SPS-Daten, Status- und Fehlermeldungen usw. Dazu muss die CNC über geeignete Datenschnittstellen verfügen.



Beispiel: Bei einer Zykluszeit von 20 ms und einem Kurvenzug mit 1 mm Polygonlänge beträgt die max. erreichbare Vorschubgeschwindigkeit 3 m/min. Um 10 m/min zu erreichen, darf die Zykluszeit nicht länger als 6 ms sein.

Bild 3.7: Abhängigkeit der maximal erreichbaren Vorschubgeschwindigkeit $F_{max.}$ von der Polygonlänge S einer Kurve und der Blockzykluszeit t der Steuerung

Leistungsfähige DNC-Schnittstellen erlauben auch die rechnergeführte Fernsteuerung der Maschine, z. B. beim Nullpunkt-Anfahren, Löschen bestimmter Programme, Sortieren der Werkzeuge im Magazin u. a. m. (siehe Kapitel DNC)

Dynamische Kollisionsüberwachung
(Bild 3.8 a + b)

Komplexe Maschinenbewegungen bei der Fünfachs-Bearbeitung und die hohen Verfahrgeschwindigkeiten machen Kollisionen schwer vorhersehbar. Eine grafisch-dynamische **Kollisionsüberwachung in der CNC** bedeutet daher eine hilfreiche Funktion, die den Maschinen-Bediener entlastet und die Maschine vor Schäden schützt.

Zwar vermeiden NC-Programme aus CAM-Systemen Kollisionen zwischen Werkzeug bzw. Werkzeugaufnahme und dem Werkstück, lassen aber im Arbeitsraum befindliche Maschinenkomponenten meist unberücksichtigt – außer man investiert in externe Maschinen-Simulationssoftware. Damit ist aber nicht gewährleistet, dass die Verhältnisse an der Maschine (z. B. die Aufspannposition) noch genauso sind, wie sie simuliert wurden. Eine Kollision lässt sich im ungünstigsten Fall erst während der Bearbeitung erkennen. In diesen Fällen unterbricht die Steuerung die Bearbeitung. Maschinenschäden und dadurch entstehende teure Stillstandszeiten werden vermieden. Mannlose Schichten werden sicherer.

Die Kollisionsüberwachung arbeitet sowohl im **Automatik-Betrieb,** als auch im **Manuellen Betrieb.** Ist die Maschine beim Einrichten eines Werkstücks auf „Kollisionskurs“ mit einem Bauteil im Arbeitsraum, wird die Achsbewegung mit einer Fehlermeldung gestoppt und die drohende Kollision angezeigt.

Die dafür notwendige Software zur Beschreibung der **Maschinenkomponenten und des Arbeitsraumes** liefert der Maschinenhersteller. Die Beschreibung der Kollisionsobjekte erfolgt über vereinfachte geometrische Körper. Das Werkzeug wird beispielsweise als Zylinder mit Werkzeugradius (in der Werkzeug-Tabelle definiert) berücksichtigt. Für Schwenkvorrichtungen kann der Maschinenhersteller die Tabellen für die Maschinenkinematik auch gleichzeitig zur Definition der Kollisionsobjekte nutzen. Am Ende wird festgelegt, welche Maschinenelemente miteinander kollidieren können. Da sich Kollisionen bestimmter Körper aufgrund der Maschinenkonst-

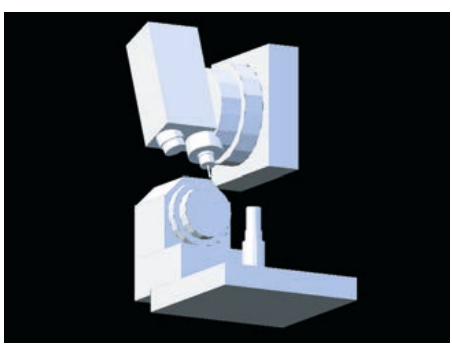


Bild 3.8 a: Kollisionsüberwachung in der CNC (Werkbild Heidenhain)

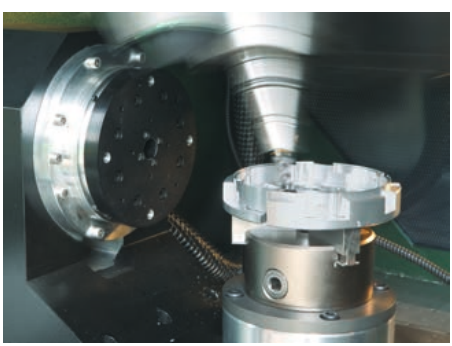


Bild 3.8 b: Kollisionsüberwachung in der CNC real (Heidenhain)

ruktion ausschließen, müssen nicht alle Maschinenteile überwacht werden *(siehe auch Kapitel „Fertigungssimulation“).*

Eckenverzögerung *(Bild 3.9)*

Beim Taschenfräsen entsteht in jeder Ecke beim Eintauchen des Fräsers eine Überlastung, die zu Schäden an Werkzeug und Werkstück führen kann. Deshalb wird ein sogenanntes „Eckenbremsen“ programmiert, was an jeder Ecke den Vorschub automatisch auf den programmierten Wert reduziert und eine Fräser-Überlastung verhindert.

Beispiel: N123 G28 K15 F40 $
d. h. 15 mm vor jedem Eckpunkt Vorschub auf 40 % reduzieren.

Diese Werte können auch manuell eingegeben werden, G29 schaltet das Eckenbremsen wieder aus.

FRAME *(Bild 3.10)*

FRAME ist der gebräuchliche Begriff für eine Koordinatentransformation, wie z. B. Verschiebung und Rotation.

Für die Bearbeitung von schräg liegenden Konturen muss man entweder das Werkstück mit entsprechenden Vorrichtungen parallel zu den Maschinenachsen ausrichten oder, z. B. bei 5-Achs-Maschinen, ein entsprechend verändertes Koordinatensystem erzeugen, das auf das Werkstück bezogen ist.

Mit programmierbaren „FRAMES“ lässt sich das Koordinatensystem programmierbar verschieben oder drehen. Hierdurch kann man

- den Nullpunkt beliebig verschieben,
- die Koordinatenachsen drehen und parallel zur gewünschten Arbeitsebene ausrichten,

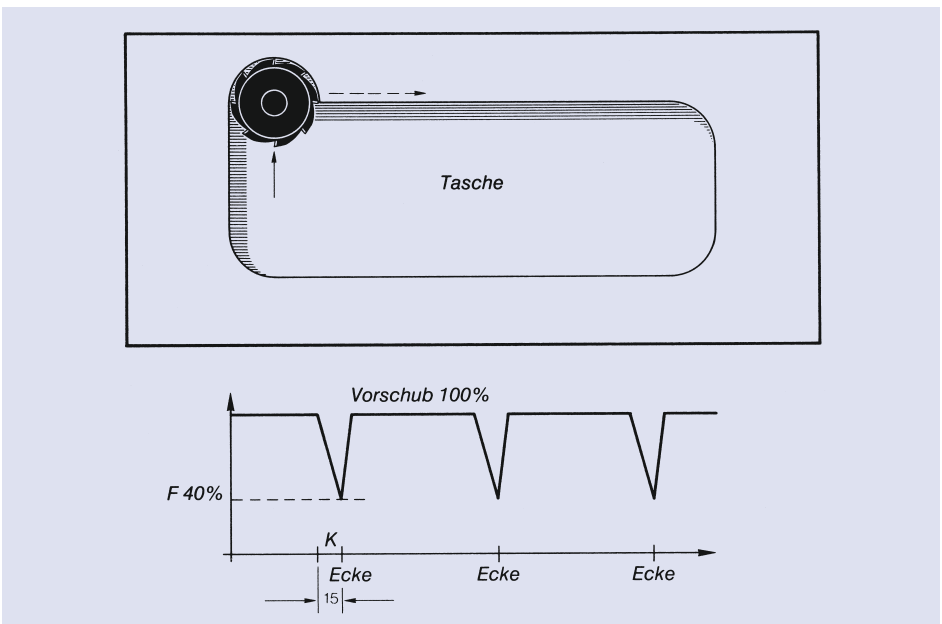


Bild 3.9: Eckenverzögerung, eine modale G-Funktion verhindert Werkzeugüberlastung, Werkzeugbruch und Werkstückbeschädigung beim Taschenfräsen

- und in einer Aufspannung schräge Flächen bearbeiten, Bohrungen in verschiedenen Winkeln herstellen oder Mehrseitenbearbeitungen durchführen.

Frässtrategie

Erzeugung von optimierten Fräsbahnen für spezielle Bearbeitungsaufgaben. Bei CAM-Systemen kann zum Erreichen von optimalen Schnittbedingungen die Fräsbahn durch unterschiedliche Frässtrategien beeinflusst werden. Durch gezielten Einsatz von z. B. helikalen oder trochoidalen Bahnen wird die Standzeit der Werkzeuge erhöht, die Oberfläche verbessert und die Bearbeitung von harten Werkstoffen (bis zu 65HRC) ermöglicht.

Für bestimmte Macros (Zyklen) können diese Strategien auch ohne CAM-System direkt an der Steuerung programmiert werden. Beispiele sind Macros für das Taschenfräsen mit helikaler Bearbeitung, Nutenfräsen mit trochoidaler Strategie oder auch Tauchfräsen für große Zerspanungsvolumen.

Fuzzy-Logic (FL)

Darunter versteht man eine Steuerungs- oder Regelmethode, welche die Ungenauigkeiten und Unsicherheiten des menschlichen Verstandes und der menschlichen Reaktionen nachempfindet, wie z. B. „etwas höher“, „schneller“, oder „Umdrehungsfrequenz erhöhen und Vorschub reduzieren“, um einen Prozess trotz vielfältiger Störgrößen stabil zu halten. Bei Bearbeitungsvorgängen verzichtet die „Fuzzy-Logic“ auf mathematisch exakt berechnete Reaktionen, entscheidet sich schnell für eine der vorgegebenen Alternativen und ist in der Lage, auch mehrere Optimierungseingriffe kurzfristig zu koordinieren. Dazu sind eine ständige Überwachung des Prozesses und die Rückmeldung der Prozessparameter erforderlich.

Erste Anwendungen der FL im Maschi-

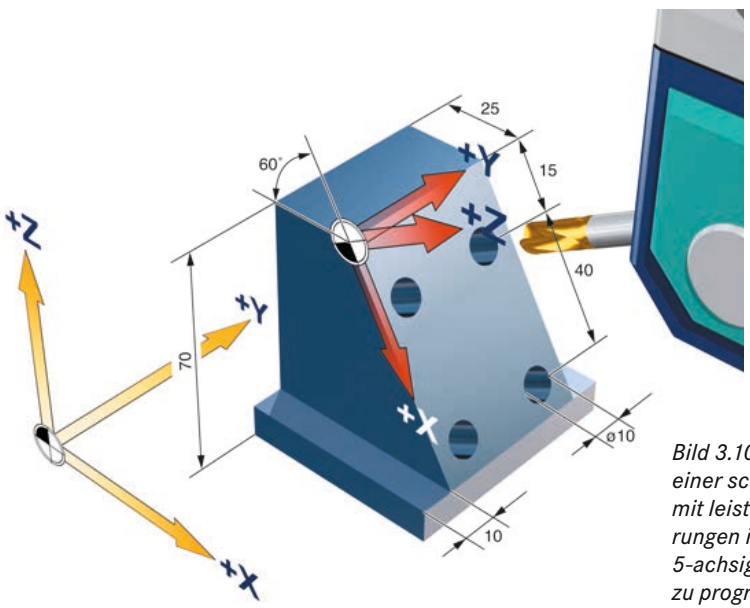


Bild 3.10: Bearbeitung einer schrägen Fläche – mit leistungsfähigen Steuerungen ist es möglich, 5-achsig an der Maschine zu programmieren

nenbau erfolgten bei CNC-Senkerodiermaschinen. Dabei übernimmt die FL die automatische Führung des Erodierprozesses und ersetzt im Prinzip die bisherige analog arbeitende Adaptive-Control-Funktion.

Mit FL lassen sich auch andere Bearbeitungsverfahren optimieren, um Zeitvorteile oder höhere Sicherheiten zu erreichen. Je komplexer der Prozess bzw. die Eingriffe zu dessen Optimierung sind, umso deutlicher werden sich die Vorteile im Vergleich zur analogen Regelungstechnik herausstellen.

Gewindebohren ohne Ausgleichsfutter

Mit dieser Funktion entfallen Ausgleichsfutter für Gewindebohrer, die den Bohrbereich (d. h. die erreichbare Bohrtiefe) unnötig einschränken. Durch das interpolierende Zustellen der Z-Achse in Abhängigkeit von der programmierten Gewindesteigung werden Sackloch-Gewinde exakt auf Endbohrtiefe geschnitten. Dann wird die Spindeldrehrichtung gewechselt und das Werkzeug aus dem Gewinde herausgedreht, ohne Zug- oder Druckkräfte auf den Gewindebohrer auszuüben.

Gewindefräsen *(Bild 3.11)*

Zur Herstellung von Innen- und Außengewinden mit Formfräsern ist eine Schraubenlinien-Interpolation erforderlich. Diese setzt sich aus zwei Bewegungen zusammen: Eine Kreisbewegung in einer Ebene (X, Y), und eine Linearbewegung senkrecht zu dieser Ebene (Z). Dabei müssen das Anfahren des Fräsers an das Werkstück und der Vorschub in Z entsprechend der Gewindesteigung erfolgen.

Kanalstruktur

Bei komplexen Maschinen mit mehreren synchronen Arbeitseinheiten wird die Kanalstruktur der CNC genutzt. Jeder separaten Arbeitseinheit (Kanal) wird eine Anzahl von (synchronen) Achsen zugeordnet, die gemeinsam interpolieren. Jeder Kanal arbeitet ein eigenes Programm ab und ist unabhängig von den anderen Kanälen.

Je nach Bedarf können einzelne Achsen von Kanälen abgegeben und anderen Kanälen wieder zugeordnet werden. Somit kann die logische Struktur der Maschine der Fertigungsaufgabe angepasst werden (→ NC-Hilfsachsen).

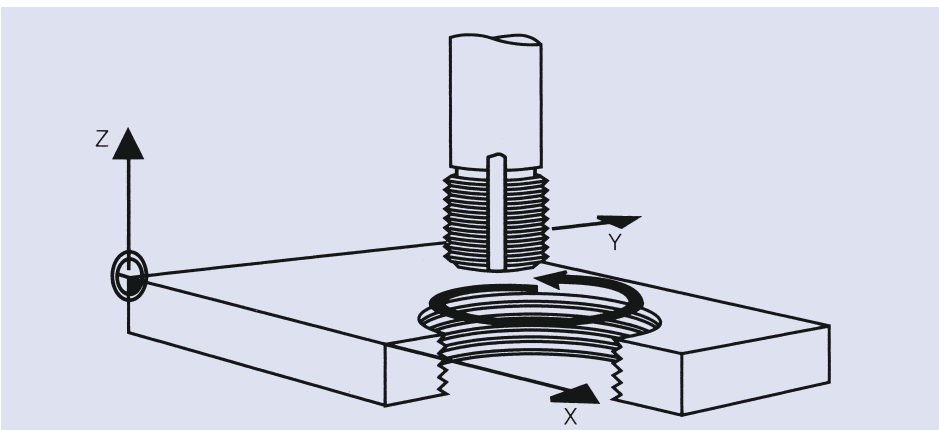
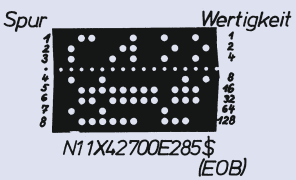


Bild 3.11: Gewindefräsen mit Formfräser und Schraubenlinien-Interpolation

Lesefehler erkennen durch E-Code *(Bild 3.12)*

Um Übertragungsfehler bei der Dateneingabe in die CNC zu erkennen, wird jedes Zeichen binär bewertet und die Bewertungssumme (vergleichbar mit der Quersumme) am Ende jedes Satzes vom Postprozessor nach der Adresse E automatisch hinzugefügt. Beim Einlesen führt die CNC die gleiche Berechnung durch, vergleicht beide Werte und gibt nur bei Übereinstimmung diesen Satz zum Abarbeiten frei. Diese Error-Code-Prüfung bietet wesentlich höhere Sicherheit als der Parity-Check (Prüfung auf gerade bzw. ungerade Anzahl Bits pro Zeichen) und ist auch bei DNC-Betrieb wirksam.



Zeichen	Wertigkeit im ISO-Code	
N	2+4+8+64	= 78
1	1+16+32+128	= 177
1	1+16+32+128	= 177
X	8+16+64+128	= 216
4	4+16+32+128	= 180
2	2+16+32+128	= 178
7	1+2+4+16+32+128	= 183
0	16+32	= 48
0	16+32	= 48
	(1 wird unterdrückt) Summe	1285
	E	285

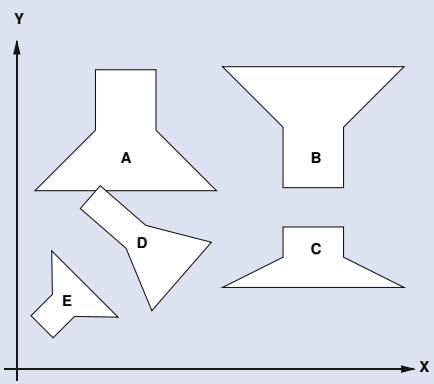
Bild 3.12: Lese- oder Übertragungsfehler lassen sich durch einen zusätzlichen E-Code (E = Error = Fehler) zuverlässiger erkennen als mit dem Parity-Check. Voraussetzung: Maschinelle Programmierung mit automatischer E-Code-Ausgabe in jedem Satz

Maßstabfaktor *(Bild 3.13)*

Alle programmierten Maße eines CNC-Programmes können mit einem beliebigen Faktor umgerechnet werden, und zwar jede Achse unterschiedlich. Dadurch lassen sich mit einem CNC-Programm unterschiedliche, geometrisch ähnliche Teile herstellen. Leistungsfähige CNCs ermöglichen noch ein zusätzliches Drehen um einen beliebigen Winkel α.

Maßstabfehler-Kompensation *(Bild 3.14)*

Dazu werden für jede CNC-Achse die natürlichen Fehlerkurven $\Delta I = f(I)$ gemessen und die daraus ermittelten Korrekturwerte in einen Korrekturwert-Speicher eingegeben. Beim Fahren der Achsen berücksichtigt die CNC diese Korrekturwerte automatisch, sodass die erreichte Genauigkeit höher ist als die Messsystem-Genauigkeit.



A = Originalprogramm,
B = Spiegeln um X-Achse und Verschieben,
C = Y-Maße halbiert (q = 0,5),
D = X-Maße halbiert (p = 0,5) und Teil gedreht,
E = (X, Y) x 0,5 und Teil gedreht.

Bild 3.13: Maßstabsfaktor, d. h. Vergrößern, Verkleinern oder Verzerren von Teilen durch programmierbare Maßstabsfaktoren

Messzyklen *(Bild 3.15 und 3.15 a)*

In der CNC abgespeicherte Ablaufzyklen zum automatischen Messen von Bohrungen, Nuten oder Flächen mit einem schaltenden Messtaster. Mit diesen Messdaten erfolgt die sofortige Berechnung von Positionen, Bearbeitungsgenauigkeiten, Toleranzen, Kreismittelpunkten, Stichmaßen oder die Schräglage des Werkstückes. Über die Datenschnittstelle können die ermittelten Messwerte auch ausgegeben werden.

Beim **„In-Prozess-Messen“** kann durch einen Messvorgang während der Abarbeitung des NC-Programms die Toleranzhaltigkeit des Werkstücks geprüft werden. Bei

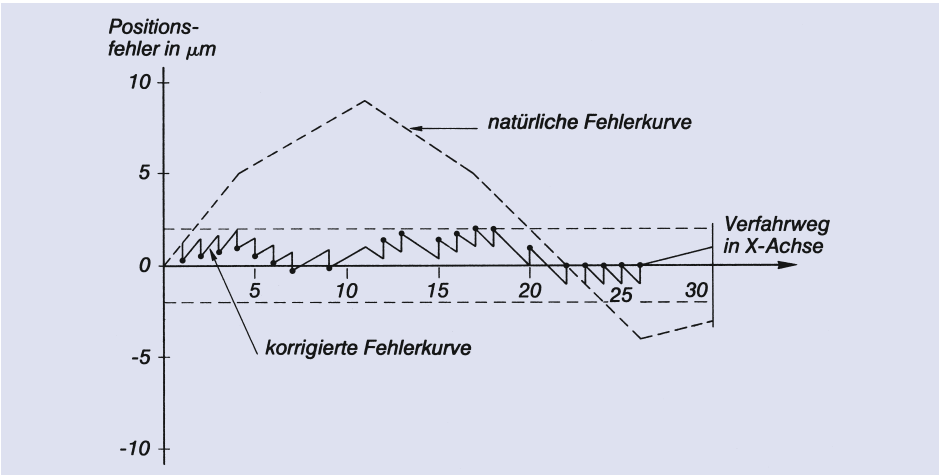


Bild 3.14: Maßstabsfehlerkompensation. Durch gespeicherte und automatisch einfließende Korrekturwerte lässt sich die natürliche Fehlerkurve jeder Achse individuell korrigieren

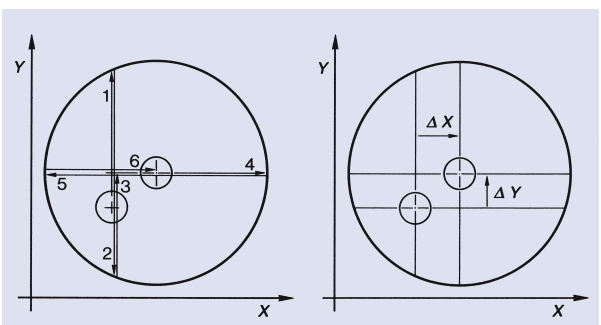


Bild 3.15 (oben): Automatische Messzyklen



Bild 3.15 a (rechts): Ein hochgenauer Messtaster für Bearbeitungszentren zur Werkstückkontrolle

Bedarf wird automatisch eine entsprechende Korrektur im NC-Programm oder für das Werkzeug aktiviert.

Der Einsatz von Messtastern verlangt spezielle Kalibrier- und Messzyklen in der CNC, um exakte Messwerte zu erhalten.

Nano- und Pico-Interpolation
(Bild 3.16)

Während bei der Linear-, Zirkular- und Spline-Interpolation nach mathematisch definierten Kurven unterschieden wird, handelt es sich hierbei um eine **höhere Auflösung bei der Interpolation.** Der Grund ist folgender:

Bei Antrieben mit digitalen Schnittstellen werden zwischen der Steuerung und dem Antriebsregelgerät über das digitale Protokoll (z. B. SERCOSinterface) Lage-, Geschwindigkeits- oder Momentensollwerte ausgetauscht. Je nach Maschinenart und Genauigkeitsforderungen liegt die **Übertragungsgenauigkeit** der Daten zwischen 0,01 µm bis 10 µm (= 0,000.01 mm bis 0,01 mm).

Die Übertragungsgenauigkeit ist nicht mit der Achsauflösung und der Genauigkeit der Wegmesssysteme zu verwechseln. **Die Übertragungsgenauigkeit ist die Genauigkeit bzw. Auflösung, mit der die CNC die interpolierten Sollwerte vorgibt** und worauf das **Antriebsregelgerät reagieren** muss.

Um ein besseres Regelverhalten der Antriebe zu erreichen wird diese Übertragungsgenauigkeit bei modernen Systemen auf eine Nano- bzw. Pikogenauigkeit erhöht (verfeinert). Die Punktvorgabe bei einer **Nanointerpolation** entspricht 1×10^{-9} m (0,000.001 mm), bei der **Pikointerpolation** z. B. $0{,}6 \times 10^{-12}$ m (0,000.000.006 mm). Dies bewirkt beim interpolierten Bahnfahren eine wesentlich bessere Laufruhe der NC-Achsen und dadurch eine höhere Oberflächengüte am Werkstück.

NC-Hilfsachsen

Hilfsachsen müssen vollkommen unabhängig von den Hauptachsen arbeiten, um z. B. Werkzeuge oder Werkstücke unabhängig von dem Bearbeitungsablauf wechseln zu können. Während die Hauptachsen (X, Y, Z, A, B) das Werkstück bearbeiten, fahren die Hilfsachsen (U, V, W) nach einem völlig anderen Programm (→ asynchrone Achsen).

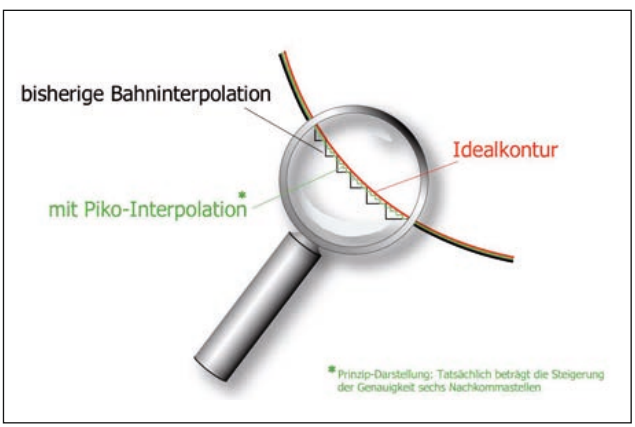


Bild 3.16: Prinzip der Nano- bzw. Pico-Interpolation. Durch die feinere Auflösung der Bahninterpolation wird in Kombination mit digitalen Antrieben ein ruhigeres Fahrverhalten der Achsen und eine bessere Werkstück-Oberfläche erzielt.

Spline-Interpolation, NURBS
(Bild 3.17 und 3.18)

Aneinanderfügen mathematischer Kurven höherer Ordnung, wobei die Übergänge tangentiell erfolgen. Damit lassen sich komplexe Kurvenformen mit weniger NC-Sätzen darstellen als mit der Annäherung durch Polygonzüge und Linearinterpolation. Durch die tangentiellen Übergänge wird ein „ruhigeres" Fahrverhalten der Achsen erreicht. Splines lassen sich nur mit entsprechend ausgestatteten Programmiersystemen programmieren.

Die Splineinterpolation beinhaltet auch die Möglichkeiten der Parabelinterpolation.

Die heute beim 3D-Bearbeiten vorwiegend eingesetzte Linearinterpolation führt bei geometrisch anspruchsvollen Oberflächen mit geringen Toleranzen, wie z. B. bei Turbinenschaufeln, Flugzeug-Integralteilen oder Formwerkzeugen, zu einer **Reihe von Problemen.** Ursache sind meistens die zu hohen Blockzykluszeiten der CNC, Beschleunigungssprünge der Achsantriebe und Regelkreisschwingungen der Achsantriebe.

Insbesondere für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung muss man deshalb nach Lösungen suchen.

Sehen wir uns die Probleme im Detail an:

Problem: Datenumwandlung
Die mathematische Darstellung von Kurven und Formen in CAD-Systemen unterscheidet sich grundlegend von der einfachen Bahnbeschreibung in CNC-Programmen. CAD-Systeme verwenden zur Beschreibung von Kurven und Flächen die Spline-Mathematik, genauer NURBS (Nicht Uniforme Rationale B-Splines).

Darunter versteht man ein seit Jahren bekanntes mathematisches Verfahren zur Beschreibung von Kurven und Freiform-Oberflächen mittels Punkten und Parametern. Auch Regelflächen wie Zylinder, Kugel oder Torus lassen sich damit exakt beschreiben. Anderen Splines sind sie durch die Möglichkeit überlegen, alle Arten von Geometrien – selbst scharfe Ecken und Kanten – sauber darzustellen. Auf dieser mathematischen Grundlage bauen mehrere CAD-Systeme ihre systeminternen Modelle von Flächen und Körpern auf.

Diese Darstellungsart wird auch im Standard für Produktmodelldatenaustausch STEP (ISO/IEC 10303) verwendet, aber nicht in CNCs. Zur Verarbeitung in bisherigen CNCs muss deshalb zur Erzeugung von Linearsätzen die hochgenaue CAD-Flächendarstellung in Polygonzüge umgerechnet und der Form angenähert werden *(Bild 3.17a)*. Dies ist eine der Aufgaben des Postprozessors. Um eine hohe Formtreue zu erreichen, muss bei dieser Approximation ein kleiner Sehnenfehler gewählt werden, was zu einer Vielzahl von kleinsten Einzelschritten und damit zu umfangreichen CNC-Programmen führt.

Problem: Blockzykluszeit
Das Abarbeiten der vielen kleinen Polygonzüge in der CNC stößt an zeitliche Grenzen.

Eine CNC ist ein getaktetes System, das mit der Taktfrequenz des eingesetzten Mikroprozessors arbeitet. Die Blockzykluszeit ist die erforderliche Rechenzeit zur Aufbereitung des nächstfolgenden Bearbeitungsschrittes (1 Satz) in der CNC. Sie liegt bei den heutigen Systemen zwischen 1 und 10 ms. Ist die Rechenzeit länger als die zum Verfahren eines programmierten Satzes erforderliche Zeit, dann führt dies zu unruhigem, stotterndem Maschinenverhalten.

Folge: Die aus Qualitätsgründen kurz gewählten Linearsätze führen nicht nur zu großen Datenmengen, sondern begrenzen

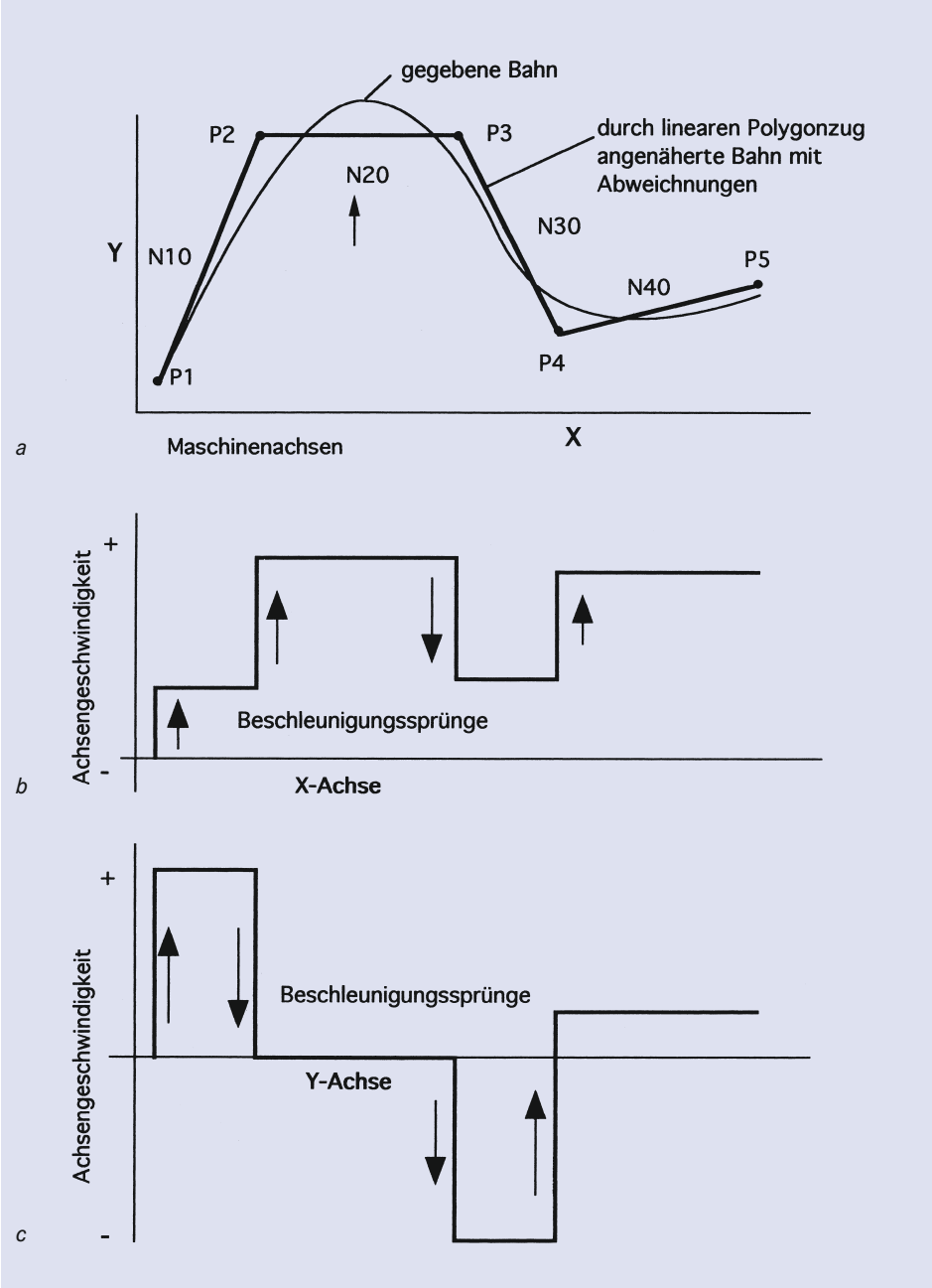


Bild 3.17: Bahnabweichung und Beschleunigungssprünge bei Linear-Interpolation mit konstanter Bahngeschwindigkeit

auch die Vorschubgeschwindigkeit. Dies steht im Widerspruch zu den geforderten hohen Bahnvorschüben beim HSC-Bearbeiten.

Mit NURBS lassen sich wesentlich längere Bahnabschnitte programmieren, die Blockzykluszeit ist dann nicht mehr so kritisch.

Problem: Schwingungen bei Linearinterpolation
Die Beschleunigungssprünge an den Polygonübergängen verursachen in Verbindung mit nachlauffreien Antriebsregelungen Schwingungen bzw. Stöße in der Maschine, was zu extremen Belastungen der Maschinenachsen führt. Die Auswirkungen sind als typische Facetten und Schwingungsmuster auf der Werkstückoberfläche zu erkennen.

Die Lösung: Spline-Interpolation
Wie eingehend erläutert, gehen bei der Umrechnung der CAD-Splines in das CNC-gerechnete DIN-Format die Vorteile der NURBS verloren. Deshalb ist es nahe liegend, CNCs so auszulegen, dass sie NURBS direkt vom CAD-System übernehmen und verarbeiten können. Dabei ergeben sich insbesondere für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung drei wesentliche Vorteile: eine höhere Bearbeitungsgeschwindigkeit (30–50 %), höhere Genauigkeit und die erzeugten Oberflächen werden besser. Damit entfällt auch die zeitaufwändige Nacharbeit am Werkstück.

Weiterhin ergibt sich ein gleichförmiger Bewegungsablauf der Maschine ohne abrupte Beschleunigungsspitzen, was sich positiv auf die Maschinenbelastung, die Werkstückoberfläche, die Lebensdauer und auf die Werkzeugstandzeiten auswirkt.

Dafür muss jedoch ein völlig anderes CNC-Programmformat in Kauf genommen werden, was etwa folgendermaßen aussieht:

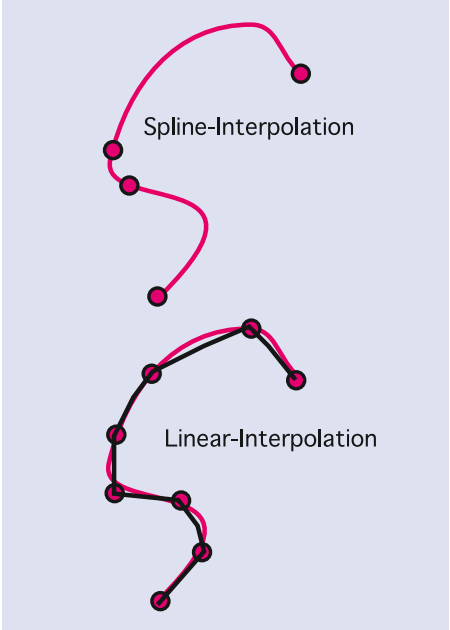


Bild 3.18: Programmierung einer Bahn mit Splines und Nachbildung mit linearen Polygonzügen.

N29 P0[X] = (-3.525, .001) P0[Y]
= (20, -.014, .006)
N30 P0[X] = (-33, -26.371, 26.155) P0[Y]
= 20, 6.947, -3.367)
PO[Z] = (23.977, 25.953, -25.953)
N31 P0[X] = (-33, .265, .095) P0[Y]
= (20, -.034, .012)
P0[Z] = (20.977, -.847, .489)
N32 P0[X] = (-12.155, 36.816, -19.133)
PO[Y] = (20, -7.727, 6.775)
P[OZ] = (20.977, 39.746, -19.808)

Hierin werden für jede Achse die Koeffizienten eines Polynomes dritten Grades übergeben, beispielsweise für die X-Achse:

$x(t) = at^3 + bt^2 + ct + d$

Sprachumschaltung

Alle Anzeigen und Dialoge der CNC sind in zwei oder mehr Sprachen abgelegt. So hat das Bedienpersonal keine Probleme und muss der Service-Techniker einmal eingreifen, dann schaltet er auf seine Sprache um.

Eine besondere Herausforderung stellen dabei Sprachen mit einem anderen Zeichensatz (z. B. Chinesisch) dar. In diesem Fall muss die CNC sowohl den Inhalt (Text) als auch die Darstellung (Zeichen) anpassen. In einer heutigen CNC sollen auch Texte in Teileprogrammen (z. B. Kommentare oder Meldungen) in der Landessprache möglich sein.

Teleservice

Teleservice bietet eine zeit- und kostensparende Unterstützung des Personals, um aus der weit entfernten Service-Zentrale schnelle Diagnosen und Fehlerbehebungen an CNC-Maschinen durchzuführen, z. B.

- bei der Installation und Inbetriebnahme,
- bei der Behebung von Störfällen,
- zur Übertragung von neuen Softwareversionen.

Voraussetzung ist eine direkte informationstechnische Verbindung per Telefon oder Datenleitung vom Hersteller zur Maschine beim Kunden.

Teleservice-Funktionen lassen sich unterteilen in

- nur anzeigende und bewertende Funktionen zur schnellen Beurteilung des Maschinenzustandes und zur Fehlersuche, oder
- aktive und reparierende Maßnahmen mit direktem Eingriff, z. B. in die Software der CNC oder SPS.

Virtueller NC-Kern (VNCK)

Der virtuelle NC-Kern von Steuerungen wird als Berechnungsgrundlage bei Simulationssystemen eingesetzt. Für Maschinenraum- oder Komplettbearbeitungssimulationen stellt der Steuerungshersteller seinen CNC-Kern als virtuelle Umgebung zur Verfügung, damit vor der realen Produktion das exakte, reale Steuerungsverhalten am PC simuliert werden kann. Der virtuelle CNC-Kern testet die Teileprogramme z. B. auf Kollision und Oberflächenfehler und stellt wichtige Kenngrößen für die Fertigungsplanung zur Verfügung. Die Einricht- und Testzeit an der Maschine wird erheblich verkürzt.

Vorschub-Begrenzung

Zu hohe oder zu geringe Vorschubgeschwindigkeiten können Werkzeug und Werkstück zerstören. Deshalb wird der zulässige Geschwindigkeitsbereich programmierbar limitiert. Enthält das CNC-Programm höhere oder niedrigere Werte, dann werden automatisch die Grenzwerte eingehalten.

Vorsteuerung *(Bild 3.19)*

Aus dem Nachlauf- oder Schleppfehler der CNC-Achsen beim Bahnfahren ergeben sich Konturfehler am Werkstück. Infolge der Trägheit im System hat der Fräser die Tendenz, die Sollkontur (grau) zu verlassen, die entstehende Fläche (gelb/rot) weicht von der Sollkontur ab.

Die Größe des Nachlauffehlers ergibt sich aus dem System (z. B. analoge Lageregelung) und der Vorschubgeschwindigkeit.

Durch einen hohen K_V-Wert und die Funktion „Achsen-Vorsteuerung“ wird der geschwindigkeitsabhängige Schleppfehler beim Bahnfahren gegen Null reduziert und die Konturtreue am Werkstück verbessert.

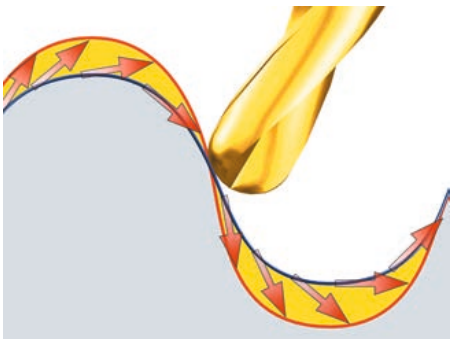


Bild 3.19: Die Funktion „Vorsteuerung“ minimiert den Schleppfehler der NC-Achsen und verbessert die Konturtreue beim Bahnfahren

schwarz: Sollbahn,
rot: Formabweichung, verursacht durch den Schleppfehler

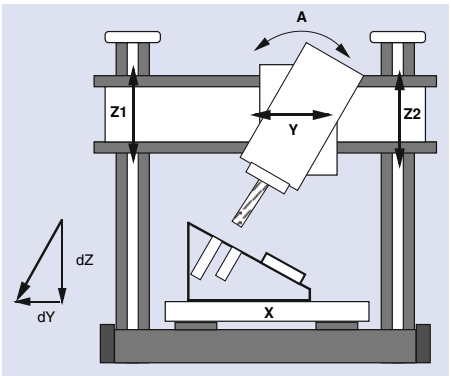


Bild 3.20: 3D-Werkzeugkorrektur. Ermöglicht die Bearbeitung schräger Flächen mit Werkzeugkorrekturen und das Bohren schräger Bohrungen mit Schwenkkopfmaschinen, bei denen die Z-Bewegung nicht in der Pinole liegt

3D-Werkzeugkorrektur *(Bild 3.20)*

Wird für CNC-Maschinen mit 4 oder 5 CNC-Achsen benötigt, wenn eine oder beide Schwenkbewegungen in der Werkzeugachse liegen und Werkzeuglänge bzw. -durchmesser korrigierbar sein sollen.

In diesem Falle funktionieren weder die Standard-Bohrzyklen noch die Werkzeugkorrekturen. Schon das Anfahren einer Bohrposition erfordert komplizierte Berechnungen und für den Bohrvorgang müssen zwei oder drei Achsen linear interpolieren. Mit der 3D-Werkzeugkorrektur kann der Bediener die schräge Spannlage des Werkstückes an der Maschine eingeben/korrigieren und die CNC errechnet sich die daraus resultierenden Positionen und Bewegungen automatisch.

Werkzeugverwaltung

Die Werkzeugmagazine in den Maschinen werden immer größer, die notwendige Verwaltung dafür in der CNC immer umfangreicher. Bei Einsatz von Wechselkassetten entstehen beispielsweise folgende Aufgaben:

- Kassettengröße und Anzahl der Speicherplätze erkennen,
- Unterscheidung nach Eingangs- und Ausgangskassetten,
- Werkzeuge in andere Kassetten umsetzen/umsortieren,
- vorübergehendes Sperren von bestimmten Kassetten,
- Schwenkgeschwindigkeit des Greifers in Abhängigkeit vom Werkzeuggewicht anpassen,
- Kollissionsgefahr prüfen (Länge, Durchmesser, Profil),
- Reststandzeiten überwachen und Ersatzwerkzeug anfordern,
- Verwaltung von Schwesterwerkzeugen,
- unterbrochenen Werkzeugwechsel auch nach Spannungsausfall ordnungsgemäß beenden,
- automatischer Werkzeugdaten-Austausch mit einem Werkzeug-Rechner, u. a. m. (siehe auch Kapitel „Werkzeugsystematik für CNC-Maschinen“).

3.4 Anzeigen in CNCs

Anzeigen sind das **„Interface zum Bediener“.** Deshalb sind gute, informative und übersichtliche Anzeigen eine wichtige Voraussetzung für eine fehlerfreie Bedienung einer NC-Maschine. Heutige CNCs verwenden dazu **LCD- oder Plasma-Anzeigen.** Diese sind flach, lassen sich deshalb problemlos an der bestgeeigneten Stelle platzieren, sie benötigen keine hohen Spannungen wie Bildröhren, flimmern nicht und sind sehr gut ablesbar. Wichtig ist die **Positionsanzeige** für jede Achse. Damit lassen sich die aktuellen Achs-Positionen genau ablesen und feststellen, ob die Zielpositionen schon erreicht sind. Die standardmäßige Anzeige in Messschritten von 0,001 mm ist jedem konventionellen Maßstab überlegen, bei Schleifmaschinen sind bereits Messsysteme mit Messschritten von 0,1 µm im Einsatz.

Elektronische Anzeigen lassen sich an jeder Stelle auf NULL oder einen definierten Wert setzen und ersparen damit dem Programmierer aufwändige Rechenarbeit zur Umrechnung der Zeichnungsmaße auf die absoluten Maschinenpositionen. Der Bediener muss sich anhand der Anzeige auch zu jedem Zeitpunkt informieren können über

- Programm-Nummer, -Name und -Speicherbedarf,
- den Programminhalt,
- die erforderliche bzw. noch freie Speicherkapazität der CNC,
- alle Korrekturwerte, Nullpunktverschiebungen und andere korrigierende Eingriffe,
- aktive Vorschub- und Drehzahlwerte,
- aktive G- und M-Funktionen,
- Unterprogramme und Zyklen,
- Werkstück- und Werkzeug-Verwaltung,
- Warnungen, Zustands- und Fehlermeldungen,
- Maschinenparameterwerte,
- Eingabe- und Simulationsgrafiken,
- Diagnoseprogramme,
- Service- und Wartungshinweise,
- u. a. m.

Je nach Ausbaufähigkeit der CNC stehen als **Anzeigeeinheit** kleinere oder größere Grafikbildschirme zur Auswahl. Für einige Werte ist die Anzeigegröße umschaltbar, grafische Darstellungen lassen sich durch „Zoomen“ verändern. Manchmal sind auch Anschlüsse für einen zweiten oder dritten Bildschirm vorhanden, was besonders bei großen Maschinen sehr vorteilhaft ist.

3.5 Offene Steuerungen

(Bild 3.21 + 3.22)

Die Definition der „Offenen CNC“ wurde lange Zeit in Fachkreisen diskutiert. Schließlich hat man sich darauf geeinigt, dass es mehrere Kriterien zur „Offenheit“ einer CNC gibt, die alle von gleicher Bedeutung sind.

Grundsätzlich muss man zwischen mindestens fünf verschiedenen **Merkmalen der Offenheit einer CNC** unterscheiden:

- **Offen für den Bediener**, um z. B. mit spezieller Grafik-Unterstützung leichter programmieren und besser bedienen zu können,
- **Offen für den Maschinenhersteller** durch die Möglichkeit, individuelle Bedienoberflächen und Anzeigen zu erstellen,
- **Offen in der Hardware-Auswahl**, um Komponenten verschiedener Hersteller verwenden zu können,
- **Offen bezüglich des CNC-Betriebssystems**, um vorhandene Standard-Software portieren zu können,
- **Offen hinsichtlich der E/A-Schnittstellen**, z. B. der Daten- oder Antriebsschnittstellen.

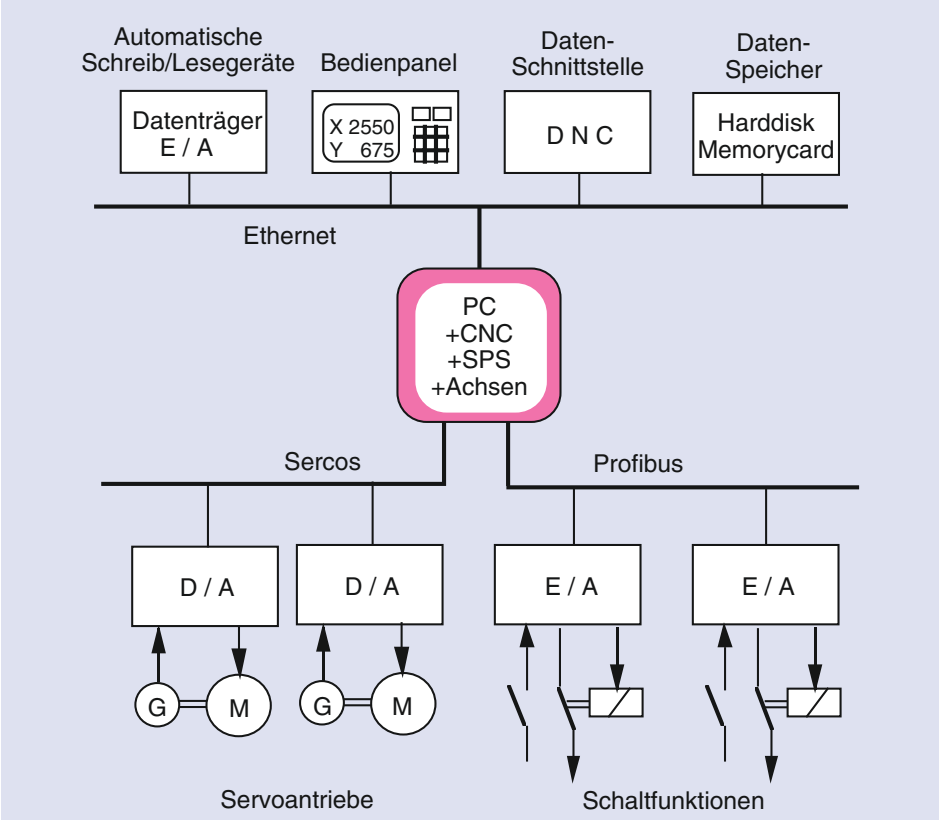


Bild 3.21: Prinzip der offenen Kompakt-CNC „mit serienmäßigen Schnittstellen“ (z. B. Ethernet, Sercos und Profibus)

- **Offen bezüglich des CNC-Kerns,** um Maschinenherstellern die Möglichkeit zu geben, ihr Prozess-Know-how direkt in die CNC zu integrieren.

Es handelt sich demnach generell um die Idee, CNCs durch Nutzung serienmäßiger Rechner und deren Standards zumindest im Eingangsbereich flexibler in der Anpassung und preiswerter zu machen *(Bild 3.21).*

Die heutigen CNCs sind im Gegensatz dazu fast ausnahmslos **geschlossene Systeme**. Auf spezieller Hardware läuft nur die speziell entwickelte Software mit speziellen Applikationen. Es finden keine – oder nur wenige – Standards Verwendung. Jede Funktion muss neu entwickelt werden, auch wenn sie in anderen Bereichen oder in vorhergehenden CNC-Generationen längst vorhanden ist. Die Folgen davon sind hohe Entwicklungskosten, lange Entwicklungszeiten, eine starre Festlegung und kein Raum für individuelle Lösungen. Solche Lösungen sind zu teuer!

Entleiht man den Begriff „offen“ von der Rechnertechnik, dann wäre eine offene

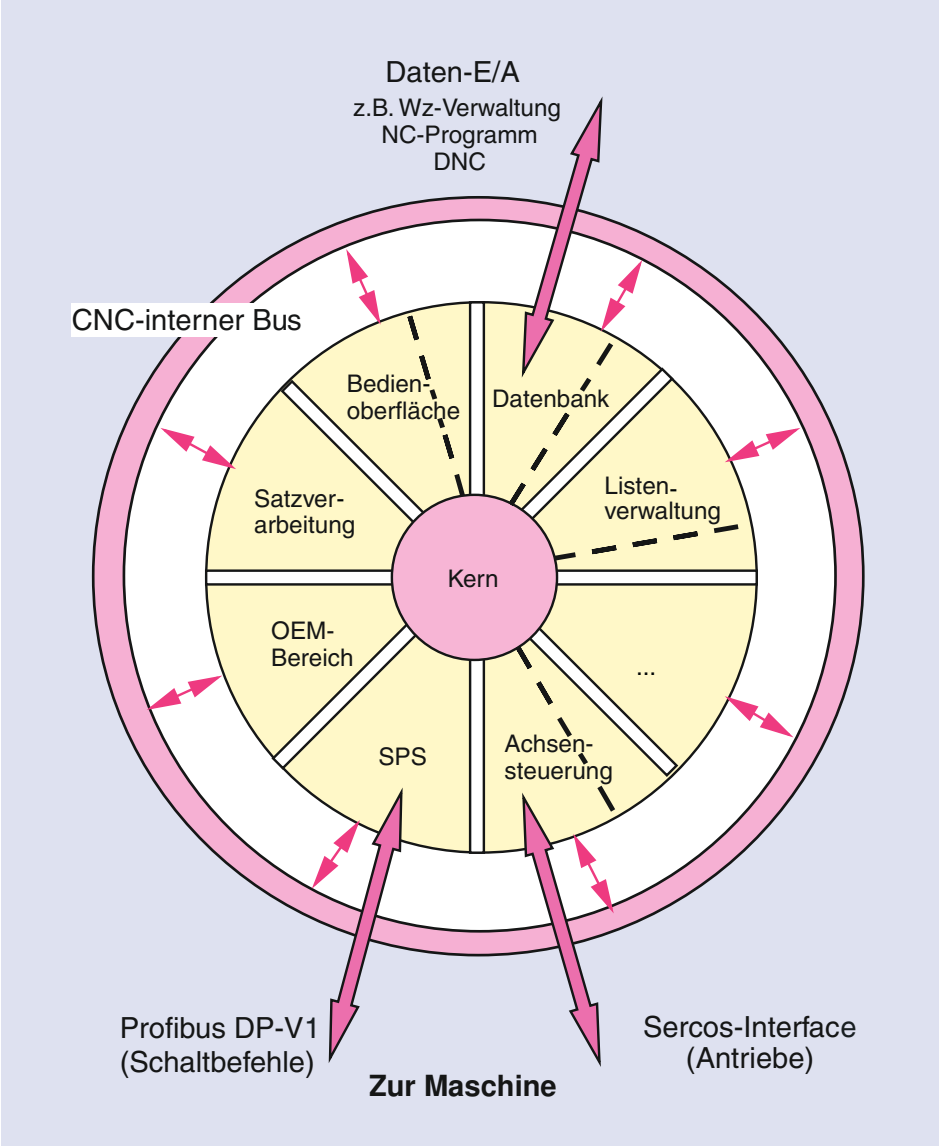


Bild 3.22: Prinzip der kompakten, offenen CNC

CNC eine numerische Steuerung, bei der alle Software-Schnittstellen offengelegt und beschrieben sind. Dies ist vergleichbar mit Rechnern, die eine **„Open System Architecture“** aufweisen. Diese Definition ist jedoch für CNCs nicht ausreichend.

Man scheint sich nach vielen Diskussionen darauf zu einigen, im Prinzip einer

CNC-Kernsteuerung einen PC vorzuschalten *(Bild 3.22)*. Damit lassen sich schon erhebliche Vorteile erreichen, wie z. B.

- eine einfachere, preiswertere Standard-CNC,
- weitgehend freie Gestaltung der Bedienoberfläche,
- Freizügigkeit bezüglich eines zu implementierenden WOP-Programmiersystems,
- einfachere Rechnerkopplung,
- problemlose Übernahme von CAD-Daten,
- Nutzung standardmäßig vorhandener Schnittstellen für Peripheriegeräte, wie
  - Festplattenlaufwerke,
  - Diskettenlaufwerke,
  - Memory-Cards,
  - Standard-Bildschirme,
  - RS 232C oder 242,
  - SCSI-Anschlüsse,
  - Ethernet.

Aber: Auch offene Systeme haben ihre Grenzen!

Es muss klar sein, dass unter dem offenen Teil einer CNC nicht mehr als 20 % speziell erforderlicher Funktionen gemeint sein können. Demnach bleiben 80 % von individuellen Änderungswünschen verschont – zum Vorteil der Anwender. Denn dort könnte sich eine zu freizügige Veränderbarkeit sehr nachteilig auswirken: Anstelle der angestrebten einheitlichen Standard-Steuerung an allen Maschinen wären der Bedienungs- und Anzeigen-Vielfalt fast keine Grenzen gesetzt.

3.6 Preisbetrachtung

(Bild 3.23 + 3.24)

Die Preise für numerische Steuerungen vergleichbarer Spezifikation sind innerhalb von 20 Jahren um mehr als 90 % gefallen. Durch farbige Grafik-Bildschirme, mehrere simultan interpolierbare Achsen, integrierte Programmiersysteme, Werkzeug- und Werkstückverwaltungsprogramme, Automatisierungszusätze, Datenschnittstellen und fast unbegrenzt ausbaufähige Datenspeicher kamen viele neue Funktionen hinzu, die den Preis wieder etwas anheben. Aufwändige Anpassschränke wurden durch kleine, frei programmierbare SPS ersetzt und die gesamte Steuerungs-Logik in Software umgesetzt. Diese lässt sich schnell, preiswert und fehlerfrei reproduzieren und spart Zeit, Aufwand und Kosten. Mit zunehmender Verwendung der SMD-Technik (Surface Mounted Devices) erfährt die CNC-Technik einen weiteren Innovationsschub *(Bild 3.24)*.

Zwar beklagen viele Anwender häufig die zu kurze Lebensdauer der einzelnen Steuerungsgenerationen, auf der anderen Seite nehmen sie aber das damit verbesserte Preis-Leistungs-Verhältnis als selbstverständlich in Anspruch. Sie stellen auch immer neue Forderungen, beispielsweise für das Hochgeschwindigkeitsfräsen, die Laserbearbeitung oder die verbesserte Konturgenauigkeit. Schnittstellen sind erforderlich, die ohne Unterbrechung der Bearbeitung Daten ein- und auslesen können. Drehmaschinen mit 7 bis 32 CNC-Achsen, angetriebenen Werkzeugen und zwei Hauptspindeln sind vielleicht noch nicht das Ende der Entwicklung. Die Servoantriebe müssen digital geregelt werden, weil die analoge Technik zu langsam und zu ungenau ist. Um die dynamische Genauigkeit auch bei den hohen Geschwindigkeiten erreichen zu können, müssen die Antriebe einen Schleppfehler nahe Null haben.

Diese und viele weitere Forderungen lassen sich nur mit leistungsfähiger Mikroprozessor-Technik erfüllen.

In der Regel werden CNC-Maschinen heute nur zum Einrichten im Tip-Betrieb manuell bedient.

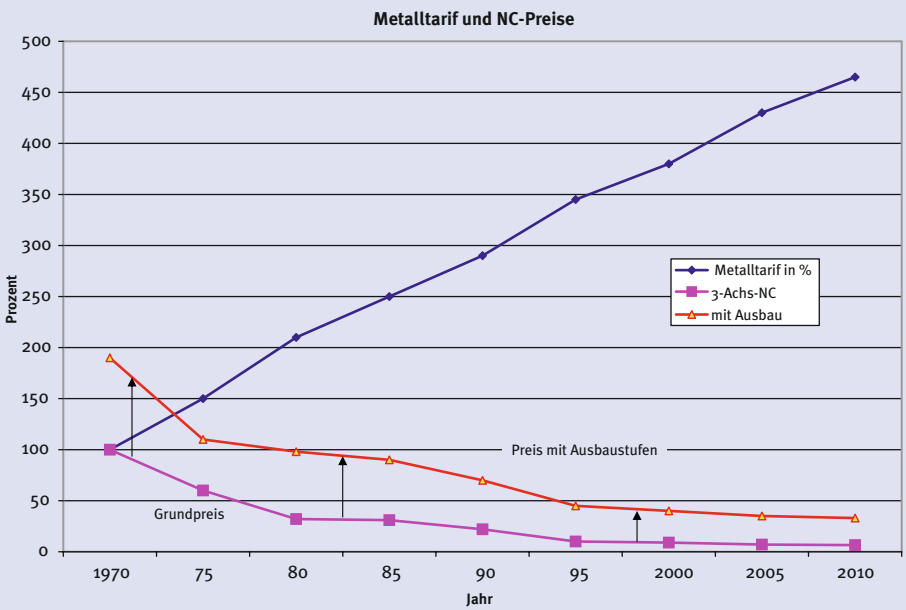
Schon daran lässt sich der hohe techni-

sche Leistungsgrad einer numerischen Steuerung ermessen. Trotzdem müssen die Preise für diese High-Tech-Lösungen immer weiter sinken – trotz gleichzeitig sinkender Maschinen-Stückzahlen, denn CNC-Maschinen werden ja immer produktiver!

Entwicklung der Prozessor-Leistung durch höhere Integration

Mooresches Gesetz: *(Bild 3.25)*
Gordon Moore, einer der Gründer von INTEL, hat bereits zu Beginn der Chipentwicklung vorhergesagt, dass sich die Zahl der Transistoren auf einem Chip etwa alle 18 Monate verdoppeln wird. Irgendwann kommt jedoch dieser Trend an ein Ende – entweder wirtschaftlich oder physikalisch. Spätestens 2020 könnte es soweit sein. Dann dürften die Chipstrukturen nur noch die Stärke von wenigen Atomen pro Transistor haben.

Jahr	Entwicklungsstand
1947	Erfindung des Transistors
1971	2300 Transistoren/Chip
1982	100.000 Transistoren/Chip
1993	3 Mio. Transistoren/Chip
2000	42 Mio. Transistoren/Chip
2010	ca. 3 Mrd. Transistoren/Chip
2020	ca. 200 Mrd. Transistoren/Chip (theoretisch)



Setzt man die Löhne und die NC-Preise von 1970 auf 100 %, dann sind die Löhne bis 2010 auf ca. 465 % gestiegen, die Preise für NC/CNC dagegen auf unter 10 – 20 % gefallen. Gleichzeitig wurde die tarifliche Arbeitszeit pro Woche reduziert.
Daraus resultiert für viele Unternehmen ein wesentlicher Grund zur Rationalisierung durch NC-Maschinen.

Bild 3.23: Preisentwicklung numerischer Steuerungen mit ständig erhöhtem Leistungsumfang im Vergleich zur Entwicklung der Tariflöhne in der Metallindustrie

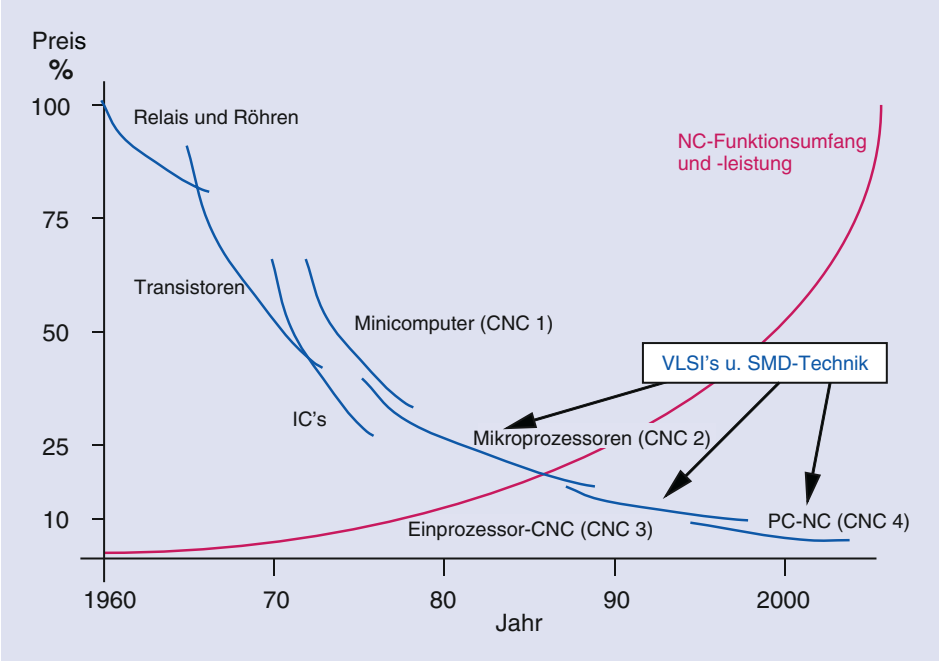


Bild 3.24: Preisentwicklung numerischer Steuerungen durch Verwendung immer höher integrierter elektronischer Komponenten

3.7 Vorteile neuester CNC-Entwicklungen

- Alle benötigten Hardware- und Softwarefunktionen sind in einer zentralen Baugruppe im Schaltschrank integriert
- Leistungsstarke 32-bit-Prozessoren sichern kürzeste CNC- und SPS-Zykluszeiten.
- Trotz kompakter Bauform ist die Erweiterungsfähigkeit mit Hilfe des Sercos III Achsbusses immer gewährleistet.
- Neue Technologien sorgen für höchste Zuverlässigkeit und Fertigungsgenauigkeit – und das bis in den Nanometerbereich.
- Die HMI-Software (HMI = Human Machine Interface = Benutzer-Schnittstelle) stellt (ohne zusätzlichen Bedien-PC) intuitiv bedienbare Bildschirmseiten für alle Bediensituationen zur Verfügung.
- Komfortable Editorfunktionen erleichtern die NC-Programmierung und den Test. Die HMI-Software ist mehrsprachig verfügbar, die Umschaltung der Sprache erfolgt ohne Neustart der Steuerung.
- Die integrierte Benutzerverwaltung verhindert teure, durch fehlerhafte Bedienung herbeigeführte Stillstandzeiten.
- Alarme und Meldungen werden im Klartext ausgegeben und im integrierten Logbuch aufgezeichnet.
- Programme und Parameter lassen sich auf Knopfdruck auf einen USB-Stick sichern.
- Die weitere Komprimierung der Mikroelektronik wird jedoch bald ihr physikalisches Ende erreichen *(Bild 3.25).*

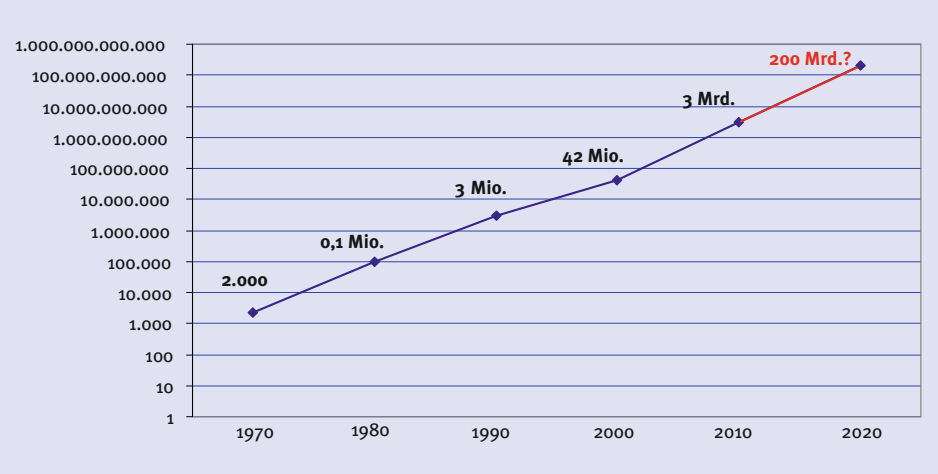


Bild 3.25: Entwicklung der Anzahl Transistoren pro Chip (Quelle: Wikipedia)

3.8 Zusammenfassung

CNCs sind spezielle, leistungsfähige, elektronische Steuerungen mit integrierten Prozessrechner-Funktionen. Mit ihrer Hilfe ist es möglich, fast alle Wünsche der Anwender bezüglich Funktionsumfang, Zuverlässigkeit, Genauigkeit, Schnelligkeit und Sicherheit von Maschine und Steuerung zu erfüllen. So sind innerhalb weniger Jahre aus einfachen, „zahlenverstehenden Maschinen“ **datenverarbeitende Fertigungssysteme** mit einem beliebig anpassbaren Automationsgrad entstanden. Die „offene CNC“ soll dem Anwender noch zusätzliche Möglichkeiten zu akzeptablen Preisen eröffnen. Doch muss hier auch zur Vorsicht gemahnt werden: **Der Anwender sucht zunehmend die universelle Standardsteuerung!**

Die Tendenz zu mehr maschinennaher Intelligenz wurde durch die CNC erst möglich und sie wird noch weiter zunehmen. Heutige CNC-Generationen verfügen insbesondere bei der Dateneingabe, -verwaltung und -speicherung über eine Leistungsfähigkeit, die **mit Personalcomputern vergleichbar** oder größer ist. Darüber hinaus werden CNCs aufgrund ständig verbesserter Elektronik-Bauelemente immer schneller in der Verarbeitung, flexibler bei der Anpassung und universeller bei den Einsatzmöglichkeiten. Dazu kann der Maschinenhersteller auch Software-Zusätze selbst entwickeln.

Eine weitere Aufgabe mit ständig neuen Anforderungen ist die **informationstechnische Anbindung** der CNCs zur Übertragung von CNC-Programmen, Zeichnungen in Form von CAD-Datensätzen, Prüfplänen, Qualitätssicherungsdaten, MDE/BDE-Daten mit Auswertung, Service-, Wartungs- und Diagnosedaten über Teleservice/Internet usw.

Im weitesten Sinne lassen sich alle Informationen, die auf Datenbanken zur Verfügung stehen und zur Produktionsvorbereitung, zum Produktionsablauf und zur Produktionsverbesserung nützlich sind, durch Netzwerkanbindung in die CNC übertragen und nutzen. Wie bei PCs im Internetbetrieb können neue CNC-Funk-



Bild 3.26: CNC für bis zu 4 Achsen und eine Spindel (802 Dsl)

tionsbausteine oder aktualisierte Softwarepakete direkt über das Datennetz in die CNC installiert werden. Aufgrund einer zunehmenden Verwendung handelsüblicher PC-Boards bzw. spezieller PC/CNC-Steckkarten sind die dazu notwendigen Prozeduren von PC-geschultem Personal problemlos ausführbar. Auf dieser Basis lässt sich auch die „Lebensdauer“ einer CNC-Generation gegenüber früheren Steuerungen verlängern *(Bild 3.26).*

Eine konsequent nutzerorientierte Software-Architektur bietet weitgehende Offenheit in allen Funktionsbereichen. Funktions-Bibliotheken und Software-Komponenten auf Basis von Windows-Betriebssystemen ermöglichen dem Anwender die Gestaltung einer eigenen, maßgeschneiderten Bedien- und Programmieroberfläche „seiner“ CNC-Maschinen. So lassen sich durch Hinzufügen oder Anpassen bestehender Funktionen jeweils auf den Prozess optimal abgestimmte Fertigungssysteme generieren.

Funktionen der numerischen Steuerung

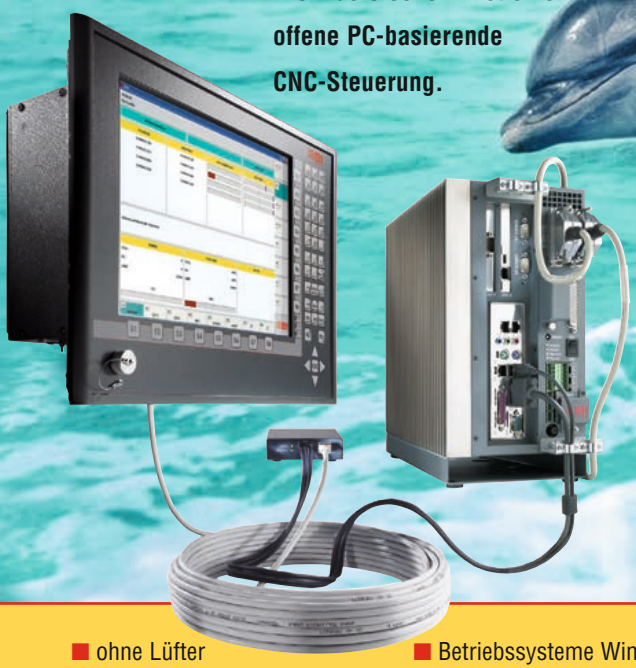
Das sollte man sich merken:

1. Eine CNC ist eine numerische Steuerung, bei der alle Steuerungsfunktionen durch einen oder mehrere integrierte Mikrocomputer und eine entsprechende Software realisiert werden.
2. Heutige CNCs sind z. B. durch folg. Merkmale gekennzeichnet:
   - einen Programmspeicher mit fast unbegrenzter Ausbaufähigkeit
   - speicherbare Werkzeugdaten, die automatisch verwaltet werden (Standzeit, Verschleiß)
   - einen speziell anpassbaren und erweiterbaren Funktionsumfang
   - Messzyklen für Messtaster mit Auswertprogrammen und zur Dokumentation sicherheitsrelevanter Messdaten der Werkstücke
   - meistens ein integriertes, maschinenspezifisches Programmiersystem zur Programmierung an der Maschine
   - Datenschnittstellen zum Anschluss an ein Netzwerk, z. B. Ethernet
   - einen Freiraum für kundenspezifische Funktionen und Erweiterungen,
3. Modular aufgebaute CNCs bieten wahlweise viele Funktionen und Möglichkeiten. Der Käufer muss prüfen, welche Ausbaustufen für seine Anwendung wichtig und wertvoll sind.
4. Werkstattprogrammierbare CNCs bieten sehr leistungsfähige, grafisch unterstützte Programmierhilfen.
5. CNCs verfügen über mehrere unterschiedliche und ausbaufähige Datenspeicher für
   - das Betriebsprogramm,
   - Teileprogramme mit automatischem Nachladen,
   - feste oder freie Zyklen,
   - integrierte Bedienerführungen
   - Diagnosesoftware und Fehlersuchhilfen,
   - MDE- und BDE-Daten,
   - Hinweise und Fehleranzeigen im Klartext,
   - Werkzeugverwaltung und Palettenverwaltung,
   - Nullpunktverschiebungen, Verschleißkorrekturen, Werkzeugdaten,
   - Maschinenparameter u. v. a. m.
6. Eine sehr große Bedeutung haben die verfügbaren Datenschnittstellen zum Anschluss aller infrage kommenden Peripheriegeräte.
7. Wichtige Beurteilungskriterien für die Schnelligkeit einer CNC sind die Datenübertragungsrate, die Rechengeschwindigkeit, die Blockzykluszeit, die Servo-Abtastrate sowie die Zykluszeit der SPS.
8. Bei heutigen CNCs sind oft CNC-, SPS- und Antriebsfunktionen (Regelkreis-Ausgänge) auf einer gemeinsamen Steckkarte untergebracht.

PRÄZISION UND DYNAMIK AUCH IN EXTREMEN UMGEBUNGEN.

Die **macro 8010 EE** ist die intelligente IBH-Steuerungslösung für den Einsatz in extremen Umgebungen. IBH setzt als innovativer IPC-CNC Hersteller auf passives Kühlen und moderne Speicherkarten.

Die *macro 8010 EE* ist eine offene PC-basierende CNC-Steuerung.



- ohne Lüfter
- ohne mechanische Laufwerke
- EMV 4 KV Burst
- 2 PCI Slots
- Betriebstemperatur + 5 °C bis + 50 °C
- Betriebssysteme Windows® XP, Windows® XP Embedded, Windows® 7
- Flash Disk 8 GB
- kompakte Abmessung
- flexible Einbauvarianten

IBH AUTOMATION

IBH Automation Gesellschaft für Steuerungstechnik mbH

Enzstraße 21 · D-70806 Kornwestheim · Germany

Fon +49 (0) 71 54/82 16-0 · **Fax** +49 (0) 71 54/82 16-26 · **e-mail** info@ibh-cnc.com · **www**.ibh-cnc.com



HANSER

So finden Sie den optimalen Werkstoff für Ihre Anwendung.



Moeller
Handbuch Konstruktionswerkstoffe
Auswahl, Eigenschaften, Anwendung
2., überarbeitete Auflage
1.080 Seiten. Vierfarbig.
ISBN 978-3-446-43169-0
€ 199,99

Alles zu Konstruktionswerkstoffen:

- **Überragende Informationsfülle zu allen Konstruktionswerkstoffen**
  Metalle und ihre Legierungen, Kunststoffe, Keramik und Glas, Verbundwerkstoffe
- **Durchgängig praxisorientiert**
  Ausrichtung auf den praktischen Werkstoffeinsatz, hunderte Produktbeispiele aus allen Branchen, Ausblick auf Neuentwicklungen
- **Werkstoffauswahl mit System**
  Strukturierte Auswahl nach unterschiedlichen Kriterien, mit Hilfe von Analyse-Werkzeugen zur Entscheidungsfindung und mit Werkstoffschaubildern

Zusätzlich:

Der gesamte Buchinhalt mit recherchierbarem Volltext als kostenloses E-Book!

Es gibt keine vergleichbare Sammlung von Wissen und Praxiserfahrung

Carl Hanser Verlag · Kolbergerstr. 22 · 81679 München · Tel.: +49 89 99830-0 · Fax: +49 89 99830-157 · direkt@hanser.de · www.hanser-fachbuch.de

4 SPS – Speicherprogrammierbare Steuerungen

Die Bedeutung Speicherprogrammierbarer Steuerungen hat stetig zugenommen. Sie ersetzen nicht nur die früher verwendeten Relaissteuerungen, sondern übernehmen auch viele zusätzliche Steuerungsfunktionen und Diagnoseaufgaben. Von besonderer Bedeutung ist die heutige CNC-integrierte Soft-SPS mit Datenschnittstellen.

4.1 Definition

Unter Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) versteht man Steuerungen mit rechnerähnlicher Struktur für den Einsatz in industrieller Umgebung, um bestimmte Aufgaben und Funktionen, wie Ablaufsteuerungen, logische Verknüpfungen, Zeit- und Zählfunktionen, arithmetische Operationen, Tabellenverwaltung und Datenmanipulationen zu realisieren. Sie sind, je nach Leistungsgröße, unterschiedlich, aber stets mit einer vom Aufbau her „neutralen“ Verdrahtung. Wie Computer bestehen sie aus einer Zentraleinheit (Mikroprozessor), Programmspeicher (RAM, EPROM oder FEPROM), Ein-/Ausgangsmodulen und Schnittstellen für den Signal- und Datenaustausch mit anderen Systemen.

Die Programmierung der Steuerungslogik erfolgt mittels Rechner (PC) und einer systemspezifischen Programmiersoftware. Die Eingabe erfolgt wahlweise als Kontaktplan, Anweisungsliste, Funktionsplan, mittels grafisch unterstützter Sprachen oder mittels höheren Programmiersprachen, z. B. als „Strukturierter Text“. Alle verwenden die grafische Unterstützung bei Programmierung und Simulation der erzeugten Schaltfunktionen.

Für kostengünstige CNCs werden die Bewegungssteuerung der NC-Achsen und die SPS-Funktionen zusammengefasst (integrierte Software-SPS) und von einem gemeinsamen Prozessor gesteuert. Die früher bevorzugte Methode, bei höheren Anforderungen an Schnelligkeit oder Funktionsumfang die Aufgaben auf Prozessor und Coprozessor zu verteilen, ist bei heutigen Steuerungen nicht mehr sinnvoll.

Die Bestrebungen zur Vereinheitlichung und internationalen Normung der SPS-Programmiersprachen sind in der IEC 1131 dokumentiert (in Europa IEC 61131).

4.2 Entstehungsgeschichte der SPS

1970 wurde auf der Werkzeugmaschinenmesse in Chicago erstmals eine neuartige elektronische Steuerung vorgestellt, die sofort großes Interesse fand. Während die Maschinen bis dahin durch aufwändig verdrahtete Relais, Schaltschütze oder elektronische Funktionsbausteine gesteuert wurden, war die neue Steuerung aus der Computertechnik entwickelt worden und hatte völlig neue Eigenschaften. Die wesentliche war, dass die Festlegung der Steuerungslogik nicht mehr „fest ver-

drahtet“, sondern computermäßig „frei programmiert“ wurde. Dazu verwendete man ein computerähnliches Programmiergerät und eine speziell dafür entwickelte Programmiersprache. Das Steuerungsprogramm verblieb während der Inbetriebnahmezeit in schnell änderbaren RAM-Speicherbausteinen und nach abgeschlossener Testphase wurde es unverlierbar auf EPROM-Speicher übertragen. Notwendige spätere Korrekturen konnten ohne aufwändige Verdrahtungsänderungen auf die gleiche Art und Weise vorgenommen werden. Die daraus resultierenden Vorteile bezüglich Steuerungsvolumen, Inbetriebnahmezeit und Änderungsfreundlichkeit waren so interessant, dass dem raschen Erfolg lediglich die hohen Preise entgegenstanden.

Die Ähnlichkeit zu den damals ebenfalls noch recht neuen Numerischen Steuerungen war unverkennbar. Die ständig gestiegenen Anforderungen bezüglich Automatisierung waren steuerungstechnisch derart aufwändig und kompliziert, dass man diese „Programmierbaren Logic-Steuerungen“ (PLC) insbesondere in Verbindung mit komplexen NC-Maschinen sehr schnell zum Einsatz brachte.

So kamen innerhalb weniger Jahre viele neue SPS-Produkte auf den Markt, die zum Teil für spezielle Anwendungen ausgelegt waren.

Leider hat man die von der NC-Technik vorliegenden positiven Erfahrungen einer rechtzeitigen Normung nicht genutzt, was dazu führte, dass die Programmierung der einzelnen SPS-Fabrikate bis heute uneinheitlich ist. Dadurch sind die erstellten Programme SPS-spezifisch und nicht auf anderen SPS-Fabrikaten lauffähig. Das bereits bewährte Prinzip der objektbezogenen, „neutralen“ NC-Programmierung und nachfolgenden steuerungsspezifischen Anpassung über Postprozessor wurde bei SPS nie realisiert. Die Hersteller haben sich mehr darum bemüht, die neuartige Programmierung auf die Kenntnisse und Wünsche der Mitarbeiter in den Elektroabteilungen auszulegen, einer universellen SPS-Programmierung wurde keine Priorität zugeordnet. Rückblickend haben diese „Sprachverwirrung“ und die hohen Preise der Programmiergeräte die schnellere Markteinführung verhindert.

Die Norm IEC 1131 ist ein erster Schritt in Richtung einer universellen SPS-Programmierung.

4.3 Aufbau und Wirkungsweise von SPS

Den prinzipiellen SPS-Aufbau zeigt *Bild 4.1*. Danach bestehen SPS aus den Funktionsbaugruppen Netzgerät, Zentraleinheit, Programmspeicher, meistens mehreren Modulen für Ein-/Ausgänge und verschiedenen Zusatzfunktionen, wie z. B. Merker, Zeitgeber, Zähler oder Achsmodule, sowie einem Baugruppenträger zur Aufnahme dieser Module. Für den Anschluss des Programmiergerätes und als Datenschnittstelle zur Peripherie dient ein entsprechendes Schnittstellen- oder Koppelmodul, heute vorwiegend als Ethernet-Schnittstelle ausgelegt. Zur Ansteuerung der Aktoren und Sensoren sind entweder direkte E/A-Module oder eine geeignete Feldbus-Schnittstelle vorgesehen.

Alle SPS-Hardware-Module werden beim Einstecken in den Baugruppenträger mit der Stromversorgung und dem internen **Systembus** verbunden. Dieser besteht aus mehreren parallelen Verbindungsleitungen und ist unterteilt in den Adressbus, den Datenbus und den Steuerbus. Die Datenübertragung zwischen den einzelnen Baugruppen wird vom Steuerwerk der Zentraleinheit (CPU) organisiert und überwacht.

Bei CNC-gekoppelten SPS hat sich infolge der Weiterentwicklung der elektronischen Bausteine der hardwaremäßige Aufbau stark verändert. Die einzeln steckbaren Baugruppen zur Daten-E/A und -Verarbeitung, sowie Zeit- und Zählfunktionen werden von der Zentraleinheit übernommen. Dadurch entstanden hochintegrierte „Ein-Platinen-Steuerungen“, bei denen CNC, SPS und die Ausgabe der Achssollwerte auf einer gemeinsamen Platine untergebracht sind *(Bild 4.2)*. Solche Platinen sind prinzipiell in jedem PC mit Windows-Betriebssystem funktionsfähig. Zum Anschluss der dezentralen Peripherie ist eine Feldbus-Schnittstelle vorhanden, die Servoantriebe werden über eine spezielle Schnittstelle (z. B. Sercos Interface) angeschlossen. Die Achsen-Regelkreise (Lage-, Drehzahl- und Stromregler) befinden sich im dezentralen Antriebsverstärker.

Die Anschlüsse für Bildschirm und Tastatur sind am **„IPC“** (Industrie-PC) standardmäßig vorhanden. Dies ist eine werkstatt- und einbaugerechte Ausführung eines PCs mit stabilem Metallgehäuse und einer gut zugänglichen Anschlusstechnik.

Grundsätzlich haben SPS die gleichen Aufgaben zu erfüllen wie die aus Relais oder elektronischen Funktionsbaugruppen aufgebauten Steuerungen:

- Eingabebefehle und Rückmeldungen aufnehmen,
- diese nach einer programmierten und damit fest vorgegebenen Matrix verknüpfen, verzweigen und verriegeln und
- daraus die entsprechenden Steuerbefehle generieren und an die Aktoren ausgeben.

Prozessüberwachung

In modernen Werkzeugmaschinen wird die SPS auch dazu eingesetzt, den Prozess selbst zu überwachen. In Programmteilen mit hoher Priorität werden verschiedene Daten der CNC überwacht, um bspw. einen Werkzeugbruch in Bruchteilen von Sekunden festzustellen und rechtzeitig in der richtigen Richtung vom Werkstück wegzufahren, bevor weitere Schäden entstehen können

Zusätzliche Sensoren überwachen die Temperatur, den Öldruck für Schmierung

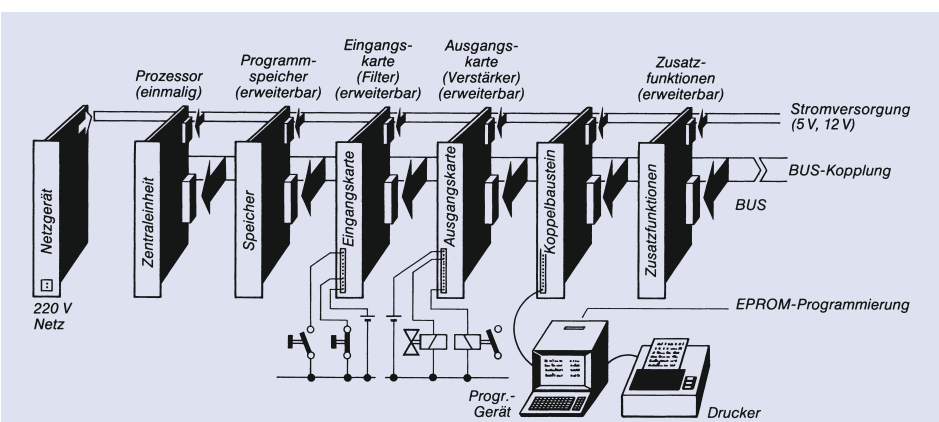


Bild 4.1: Prinzip der einzelnen Funktionsmodule einer SPS. Heute befindet sich die gesamte Elektronik auf einer einzigen Platine.

und Hydraulik und weitere wichtige Funktionen. Je nach Art und Größe der Abweichungen werden Fehlermeldungen aktiviert oder die Maschine abgeschaltet.

Generell lassen sich zwei unterschiedliche Aufgabenbereiche für SPS an Werkzeugmaschinen definieren, nämlich:

- **Programmsteuerungen,** die auch ohne Unterstützung einer CNC nach einem fest vorgegebenen, speziellen Programm unverändert wiederkehrende Abläufe von Maschinen steuern, wie z. B. bei Rundtaktautomaten den Werkstück-, Drehzahl- und Vorschubwechsel. Das Signal zum Weitertakten erfolgt erst, wenn sich alle Bearbeitungsstationen wieder in der Ausgangsposition befinden.
- **Anpass-Steuerungen,** die zwischen CNC und Maschine geschaltet sind und die Aufgabe haben, alle von der CNC ausgegebenen Schaltfunktionen an die Aktoren zu übertragen. Die Ausführung erfolgt unter Berücksichtigung vorgegebener Bedingungen, damit alle Bewegungen ohne Gefährdung von Mensch, Maschine und Werkstück ablaufen können. Diese „überwachte Funktionssteuerung" beinhaltet z. B. den automatischen Ablauf von Werkzeugwechsel, den Palettenwechsel oder andere prozessbezogene Einrichtungen. Dabei ist der gesamte Funktionsablauf vorab festgelegt und wird von der CNC durch ein Ausgangssignal nur „angestoßen". Sind alle Funktionen fehlerfrei abgelaufen und beendet, erfolgt ein Signal von der SPS an die CNC zur Fortsetzung des Bearbeitungsprogramms.

Ähnliche Aufgaben gelten auch für den Einricht- und Handbetrieb, wobei die Befehle manuell vom Bediener erteilt werden.

Bei umfangreichen Anlagen können die Steuerungsaufgaben auf mehrere SPS verteilt werden. Dies wird auch als **„Mehrpro-**

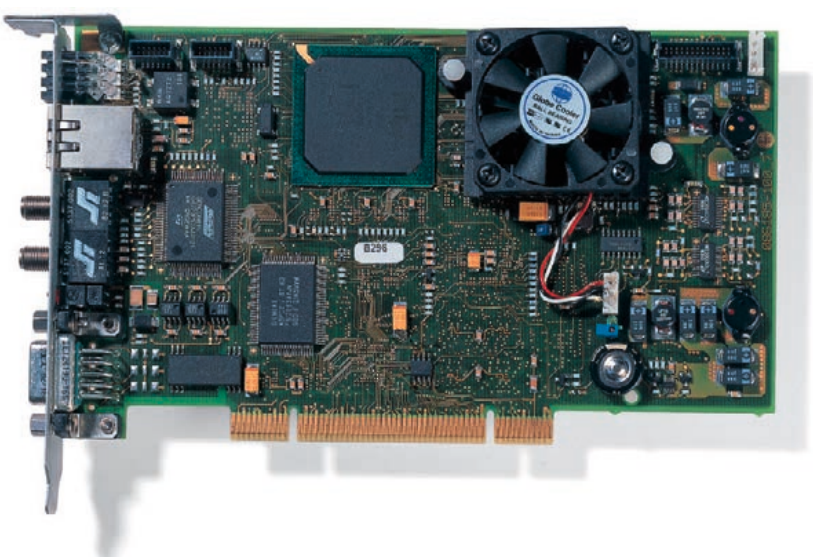


Bild 4.2: Ein-Karten-Lösung: PCI-Bus-Steckkarte mit MC-, CNC- und SPS-Funktionen, sowie TCP/IP-, Profibus DP- und Sercos-Schnittstellen.

zessor-SPS“ bezeichnet und hat den Vorteil, dass die einzelnen Anlagenteile unabhängig voneinander erprobt werden können. Die spätere Datenkommunikation erfolgt, je nach Aufbau, entweder direkt (Rack-intern) oder über Netzwerk (Feldbus oder Ethernet).

4.4 Datenbus und Feldbus

(Bild 4.3 und 4.4)

Bei der Weiterentwicklung der SPS musste insbesondere der ständig zunehmende Datenverkehr berücksichtigt werden. Heutige Steuerungssysteme nutzen dazu die technischen und preislichen Vorteile von **Busverbindungen.**

Diese bestehen aus einer oder mehreren parallelen Verbindungsleitungen und dienen der bidirektionalen **Datenübertragung** zwischen mehreren „Teilnehmern“ eines Systems. Man erkannte bereits sehr früh, dass ein einziges Bussystem die vielfältigen Aufgaben und Forderungen im Fertigungsumfeld nicht erfüllen kann und nutzte aufgabenspezifisch mehrere unterschiedliche Bussysteme.

Als **Datenbus** wird das zum heutigen Industriestandard zählende **ETHERNET** bevorzugt eingesetzt. Es nutzt (heute!) eine Datenübertragungsgeschwindigkeit von 10 oder 100 MBaud („Fast Ethernet“) und kann, je nach Adressen-Konfiguration, 256 oder mehr angeschlossene Geräte (Teilnehmer) direkt erreichen.

Als physikalisches **Übertragungsmedium** dienen spezielle, 4-paarige twisted-pair-Kabel mit 8-poligen Standardsteckern. Für heutige industriemäßige Installationen wird nicht mehr das Einkabel-Prinzip, sondern die bewährte Netzwerktechnik verwendet, wobei jeder Teilnehmer an einem „Switch“ angeschlossen wird. Pro Switch sind bis zu 24 Teilnehmer anschließbar. Die Vorteile liegen darin, dass in jedem Switch die gleichzeitige Übertragung größerer Datenpakete zwischen den Teilnehmern möglich ist, und zwar unter Ausnutzung der vollen Bandbreite. Zum anderen ist die Funktion des Gesamtsystems bei Störungen eines Teilnehmers nicht gefährdet und die Fehlerdiagnose ist vereinfacht.

Durch spezielle **Sicherungsverfahren** ist die Datenübertragung in einem Netzwerk absolut zuverlässig.

Zur **Signalübertragung,** d. h. Ansteuerung von Aktoren und Rückmeldung von Sensorsignalen, wurden speziell dafür geeignete **Feldbussysteme** entwickelt, wie z. B. Profibus, InterBus oder CANbus.

Der speziell zur Ansteuerung von Servoantrieben verfügbare **SERCOS-Bus** verwendet vorzugsweise Lichtwellenleiter und vermeidet damit im Vergleich zu Kupferleitungen alle elektrostatischen oder elektromagnetischen Störungseinflüsse auf die Signalleitungen zwischen NC und Antriebssteuerung.

Durch Nutzung von Busverbindungen anstelle aufwändiger Einzelverdrahtungen werden nicht nur die Anzahl der Kabel und Kontaktstellen, sondern auch die damit verbundenen Störungsursachen auf ein Mindestmaß reduziert.

Welcher Bus für die einzelnen Aufgaben am besten geeignet ist hängt vor allem davon ab, in welchen „Ebenen“ der **Automatisierungspyramide** *(Bild 4.4)* die Anforderungen einzuordnen sind. Auf der oberen Ebene handelt es sich um wenige, nicht zeitkritische Daten, auf den unteren Ebenen sind die Anforderungen umgekehrt: ständige Übertragung zeitkritischer Datenpakete zur Steuerung und Regelung des Prozesses.

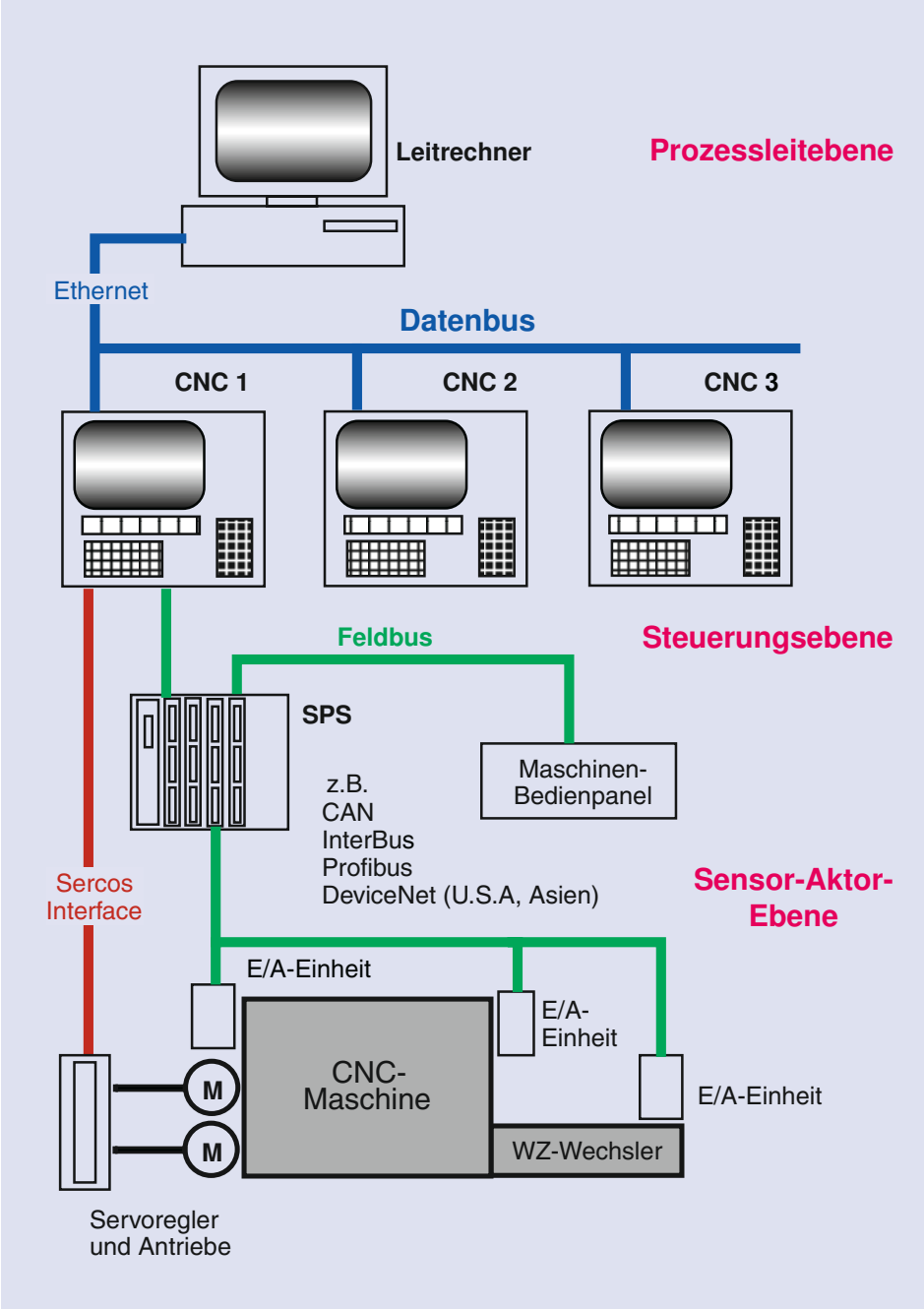


Bild 4.3: Einsatz unterschiedlicher Bus-Systeme vom Leitrechner bis zur Maschine.

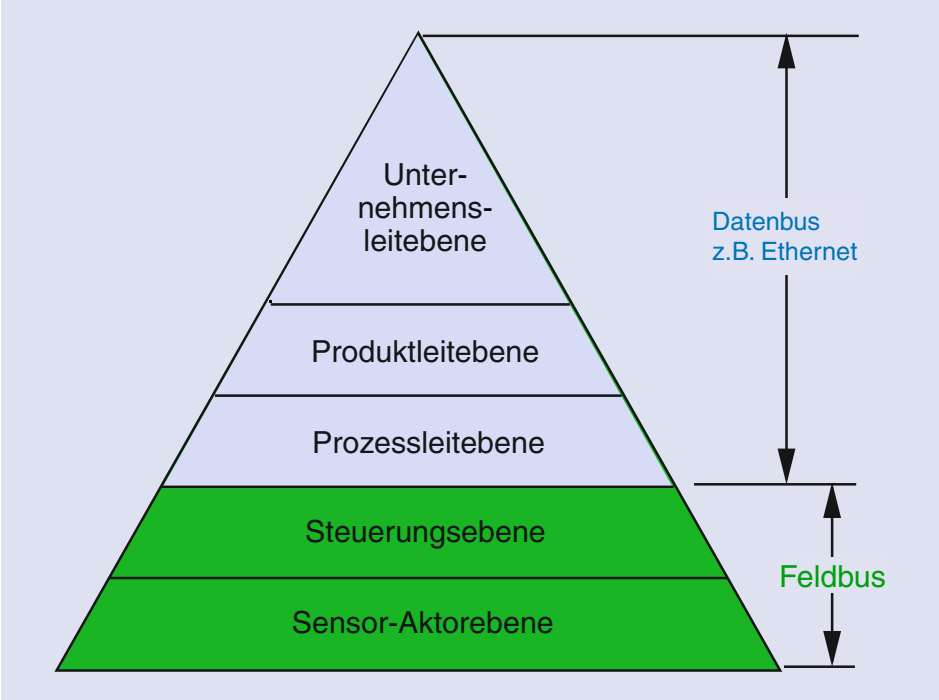


Bild 4.4: Die Automatisierungspyramide stellt die unterschiedlichen Ebenen der Automatisierung dar. In Verbindung mit SPS werden Feldbussysteme für die Steuerungs- und Sensor-Aktorebene eingesetzt.

Typische Anforderungskriterien an einen Bus sind

- die max. Anzahl der Teilnehmer (Aktoren und Sensoren)
- die geforderten längsten Antwortzeiten (kurze Reaktionszeiten)
- der Umfang der zu übertragenden Datenmenge, und
- die max. Übertragungsstrecke.

Auf der Steuerungsebene ist **ETHERNET** weltweiter Standard und am weitesten verbreitet; die erforderlichen Schnittstellen-Bausteine sind klein, preiswert und serienmäßig verfügbar.

Die Stärken der **Feldbussysteme** CAN, Profibus/DP (Dezentrale Peripherie) und InterBus-S liegen vorwiegend im Sensor-/Aktor-Bereich. Der Profibus/FMS ist dagegen mehr für höhere Ebenen, d. h. größere Datenpakete geeignet, wird aber zunehmend durch Ethernet verdrängt.

Zur Vernetzung von Großanlagen werden wegen der zu überbrückenden größeren Entfernungen und zur Vermeidung von Störungen vorzugsweise Lichtwellenleiter verwendet.

Echtzeit-Ethernet und SERCOS III

Viele Unternehmen benutzen mehrere Netzwerke, die entweder gar nicht oder nur mit großem Aufwand miteinander kommunizieren können. Zweifellos wäre es sinn-

voll, wenn eine Maschine einen Fehler nicht nur an das Personal vor Ort melden würde, sondern auch an Produktionsplanungssysteme, die Materialwirtschaft und den Maschinen- bzw. Steuerungshersteller. Die direkte Kommunikation zwischen Entwickler-PC und der Steuerung einer Produktionsstraße könnte zudem erforderliche Software-Updates schneller und preiswerter übertragen.

Deshalb setzen Firmen vermehrt auf ein einheitliches Protokoll, um Informationen zwischen den Unternehmensbereichen zu übermitteln. Hier haben sich **Ethernet** und TCP/IP durchgesetzt, die auch die Basis des Internets und der Bürokommunikation bilden.

Da die Fabrikautomation sehr hohe Anforderungen an Robustheit, Zuverlässigkeit und Sicherheit der Informationsnetze stellt, sieht **Ethernet** in der Produktionshalle etwas anders aus als Ethernet im Büro.

Industrial Ethernet muss dazu 3 wichtige Anforderungen erfüllen:

- Die wichtigste Anforderung ist die **Echtzeit-Kommunikation**, um zu garantieren, dass wichtige Informationen sofort bzw. in den erforderlichen Zeitintervallen übertragen werden. Nur so lassen sich komplexe Abläufe koordinieren.
- Das zweite wichtige Merkmal ist die **Zuverlässigkeit**. Hitze, Staub, Vibrationen und starke Magnetfelder können in nicht abgeschirmten Kabeln Ströme induzieren und dadurch Übertragungsfehler verursachen. Wenn Teile bewegt werden, ist auch ein Kabelbruch nicht auszuschließen. Alle diese Einflüsse dürfen die Zuverlässigkeit einer fehlerfreien Datenübertragung nicht gefährden.
- Gleiches gilt für die **Sicherheit** (Security) gegen Zugriffe von außen. Zwar ist eine einfache Kommunikation erwünscht, jedoch bei Produktionssystemen sind unautorisierte Zugriffe auf jeden Fall zu verhindern. Zur Sicherstellung der Maschinen- und Personensicherheit (Safety) ist eine abgesicherte Datenübertragung über ein zertifiziertes **Safety-Konzept** erforderlich (z. B. SIL3 nach IEC 61508).

Echtzeit-Ethernet Lösungen; hinter dem Begriff **Industrial Ethernet** stecken in der Praxis verschiedene Lösungen, die sich jedoch sehr stark voneinander unterscheiden. Einige Systeme bieten zwar Echtzeit-Funktionen, jedoch mit begrenzter Synchronität, d. h. es ist nicht garantiert, dass mehrere angeschlossene Module im gleichen Systemtakt arbeiten. Andere basieren auf einer engen Verbindung zwischen Steuerungs- und Netzwerkfunktionalität, wodurch der Anwender in der Auswahl seiner Automatisierungssysteme eingeschränkt wird. Wieder andere sind zwar offen, verlangen aber eine rigide Netzwerk-Planung mit vielen Steuerungseinheiten, die nachträgliche Änderungen erschweren und mitunter selbst einfache Standardkommunikation sehr langsam machen.

Feldbusse und Industrial-Ethernet-Systeme bieten heute eine Grundfunktionalität, mit der sich typische Steuerungsaufgaben lösen lassen. Echtzeitanwendungen, die beispielsweise das präzise Zusammenspiel mehrerer Servomotoren verlangen oder Sensordaten sehr schnell verarbeiten müssen, verlangen ein Netzwerk mit einem hohen Datendurchsatz und einer garantierten Synchronität.

Fast-Ethernet (= schnelles Ethernet) mit einem Datendurchsatz von 100 MBit pro Sekunde garantiert die schnelle Übertragung von Informationen. Durch die Voll-Duplex-Eigenschaft des Fast-Ethernet ist es auch möglich direkt zwischen den ange-

schlossenen Geräten zu kommunizieren, um die Reaktionszeiten so kurz wie möglich zu halten.

Durchgängige Information
Auf der **Feldebene**, d. h. in der Kommunikation zwischen einzelnen Antrieben, Sensoren oder Steuerungen garantiert **SERCOS III**, das für anspruchsvolle CNC-Anwendungen konzipiert wurde, die notwendige Präzision. Gleichzeitig lässt sich das Netzwerk extrem einfach in die übergeordnete Leitebene einbinden.

Durch einen Nicht-Echtzeit-Kanal kann der Anwender, zusätzlich zu den Echtzeitdaten, die volle Funktionalität von TCP/IP-Daten nutzen. Somit kann man z. B. eine Webcam zur Produktionsüberwachung über das SERCOS Protokoll betreiben ohne die Echtzeit zu beeinträchtigen. Dies ermöglicht eine völlig durchgängige Systemplanung ohne zusätzlichen Verkabelungsaufwand und Kosten. Verschiedene Module können sogar dieselben Leitungen verwenden, ohne Kompromisse bezüglich Sicherheit oder Zuverlässigkeit.

SERCOS III setzt, wie auch die vorherigen SERCOS-Generationen, auf die bewährte Hardware-Synchronisierung die über Logikbausteine (ASIC) realisiert wird. Durch diesen Aufbau sind zusätzliche Hubs und Switches als teure Schaltstellen überflüssig. **Synchronität ist somit eine Grundeigenschaft jeder SERCOS-Lösung und erfordert keine zusätzlichen Module oder Protokolle**.

Die **Zykluszeit** von 31,25 µs im Echtzeitbetrieb bedeutet nicht, dass ein einzelnes Modul die komplette Bandbreite für sich alleine beanspruchen würde. Bis zu acht Antriebe können in Motion Control-Anwendungen 8 Byte-zyklische Daten empfangen und senden. Dies genügt für die anspruchvollsten Aufgaben, die heute im Maschinenbau vorstellbar sind. Selbst hochpräzise, schnelle CNC-Maschinen arbeiten derzeit mit minimalen Zykluszeiten von nicht mehr als 500 µs. Dank der hohen Effizienz der SERCOS-Technologie sind auf absehbare Zeit keine Anwendungen erkennbar, die eine höhere Geschwindigkeit des Netzwerks notwendig machen würden.

Flexibilität ist eine Grundforderung in der Produktion und Industrial Ethernet ist dafür ein Baustein, um Planung und Herstellung ohne lange Vorlaufzeit aufeinander abzustimmen. Doch von einem modernen Netzwerk wird in der Praxis mehr verlangt. Intelligente Steuerungen bieten die Möglichkeit, Maschinen je nach Bedarf neu zu kombinieren, um einzelne Einheiten kostengünstig zu neuen Lösungen zu kombinieren. Diese Forderung stellt hohe Anforderungen an die Flexibilität des Netzwerks. Üblicherweise werden einzelne Komponenten (Slaves) von einer Steuerung (Master) kontrolliert. Dies ergibt die typische Linienstruktur eines Produktionsabschnitts. Die einzelnen Steuerungen können wiederum über ein gemeinsames Netzwerksegment untereinander kommunizieren.

Aber auch ein **direkter Datenaustausch** zwischen einem Sensor und einem Antrieb, die von unterschiedlichen Steuerungen kontrolliert werden, ist möglich. Das entlastet die Zentralsteuerung und reduziert den Datenverkehr im Netzwerk. Die so genannte C2C (Control-to-Control)-Querkommunikation zwischen Mastern, wie zum Beispiel zwei SPS, ist die Grundlage für die dezentrale Steuerung von komplexen Fertigungsanlagen. Diese Flexibilität in der Kommunikation, die zu verkürzten Reaktionszeiten zwischen Master- oder Slave-

Sercos III interface bietet zahlreiche Vorteile:

- **Sercos** ist eine weltweit genormte digitale Schnittstelle zur Kommunikation zwischen Steuerungen und Feldbusteilnehmern (IEC 61491 und EN 61491). Mit dieser erfolgt hochgenau und in Echtzeit die Synchronisierung von Steuerungen, Servoantrieben, Ein- und Ausgängen, Frequenzumrichtern, Gebern, etc.
- Als Übertragungsmedium wird bei Sercos I und II ein Lichtwellenleiter-Ring eingesetzt, bei Sercos III erfolgt die Kommunikation über das physikalische Medium von Ethernet,
- Sercos III arbeitet mit der Geschwindigkeit des Fast Ethernet von 100 MBit/s.
- Beliebige Ethernet-basierte Protokolle können parallel zu den Echtzeitdaten übertragen werden, ohne dass die Echtzeitcharakteristik beeinflusst wird.
- Direkter Querverkehr: Zwischen beliebigen Teilnehmern kann bei minimaler kommunikativer Totzeit innerhalb eines Kommunikationszykluses direkt kommuniziert werden.
- Frei wählbare Zykluszeit: Der Kommunikationszyklus kann zwischen 31,25 µs und 65 ms variiert werden.
- Synchronizität bis in den Sub-Mikrosekunden-Bereich
- Für hochverfügbare Automatisierungslösungen stellt Sercos III bei Nutzung der Ring-Topologie automatisch sicher, dass Kabelbruch oder Knotenausfall sicher erkannt werden und die Kommunikationsfähigkeit erhalten bleibt („Ring-Redundanz“).
- Die notwendige Zeit für die Erkennung und die Reaktion auf einen Kabelbruch beträgt maximal 25 µs, sodass höchstens die Daten eines Zyklus verloren gehen, danach wird die Kommunikation ungestört fortgesetzt.
- Die Synchronisation bleibt im Redundanzfall mit gleichbleibender Güte erhalten.
- Sichere und nicht sichere Teilnehmer können gemischt in einem Netzwerk betrieben werden, ohne dass die Sicherheitstechnik dadurch beeinflusst wird.
- Es werden sowohl zentrale als auch dezentrale Steuerungsarchitekturen unterstützt.
- Geräte können frei innerhalb eines Netzwerks angeordnet werden.
- Es kann eine Linien- oder Ring-Topologie verwendet werden. Darüber hinaus können hierarchische, synchronisierte und in Echtzeit gekoppelte Netzwerkstrukturen realisiert werden.
- Das Protokoll erkennt automatisch, wo welches Gerät in der Topologie angeschlossen ist. Dies ermöglicht im Servicefall eine einfache Lokalisierung des betroffenen Gerätes.
- Auch die Verkabelung ist einfach, da auf die physikalische Reihenfolge der Geräte nicht geachtet werden muss und die Beschaltungsreihenfolge der beiden Sercos III Ports am Gerät egal ist.
- In der CNC-Technik werden vorwiegend die digital geregelten Servoantriebe über Sercos-Schnittstellen angeschlossen, um sehr hohe dynamische und statische Genauigkeiten zu erreichen.
- Weltweit über 80 Anbieter von SERCOS interface Produkten

Geräten und damit im Gesamtprozess führt, gewährleistet zu jeder Zeit die synchrone Achs-Ansteuerung auch über mehrere SERCOS-Netzwerke hinweg.

Die Technik, die die Querkommunikation zwischen einzelnen Knoten ermöglicht, leistet nicht nur einen Beitrag zur Effizienz und zur Flexibilität von SERCOS-Lösungen. Sie erhöht auch die **Sicherheit,** weil ein SERCOS III-Netzwerk dadurch mit einer **Ring-Struktur** aufgebaut werden kann. Diese bietet im Falle eines Kabelbruchs einen redundanten Signalweg. Das SERCOS-Netzwerk koordiniert sich selbst und bietet flexible Strategien an: Eine klassische Linien-Struktur, um Material zu sparen, oder die redundante Ring-Struktur, um die Sicherheit zu erhöhen. Ingenieure und Planer haben die Wahl, je nach Anforderung die passende Verkabelung zu wählen, ohne an zusätzliche Elemente für die Netzwerk-Infrastruktur denken zu müssen.

Normung

Seit Oktober 2007 ist die Echtzeit-Ethernet-Lösung SERCOS III Bestandteil der beiden verbindlichen IEC-Normen. Das bestätigt die weltweite Bedeutung des SERCOS interface. Denn auch SERCOS 2 war bereits weltweit genormt. Parallel zur Standardisierung der dritten SERCOS-Generation beschloss die IEC auch die Überführung der bestehenden IEC-Norm 61491 von SERCOS 2 in die neuen Normreihen IEC 61158/61784-1. Auch das SERCOS-Antriebsprofil wurde in den neuen IEC 61800-7 Standard aufgenommen.

Gleiches gilt für die **Sicherheit der Datenübertragung**. SERCOS bietet von Haus aus ein zertifiziertes Sicherheitsprotokoll, damit Informationen sicher übertragen werden. **SERCOS safety** erfüllt die Anforderungen der Sicherheitsnorm IEC 61508 bis zum Safety Integrity Level 3 (SIL 3). Diese deckt Risiken ab, die durch den Ausfall von Systemen verursacht werden und zu personellen und materiellen Schäden führen können. Früher waren hierzu separate Leitungen erforderlich. Mit SERCOS III können alle sicherheitsrelevanten Informationen über die vorhandenen Datenleitungen übermittelt werden, damit z. B. im Störungsfall beim Drücken des Not-Aus-Schalters die Stromversorgung garantiert sofort unterbrochen wird. Der Verzicht auf zusätzliche Hardware reduziert Kosten ohne Sicherheitsverlust.

SERCOS safety ist gegen mögliche Fehler wie Wiederholung, Verlust, Einfügung, falsche Abfolge, Verfälschung, Verzögerung und Verwechslung von sicheren Daten mit Standarddaten abgesichert. Das Sicherheitsprotokoll ist gemäß IEC 61508 zertifiziert und wurde zusätzlich vom TÜV auf die Sicherheitsanforderungen geprüft. Zur gesicherten Datenübertragung verwendet SERCOS safety das CIP-Safety-Protokoll der ODVA. Es wird von verschiedenen Kommunikationsstandards wie DeviceNet, ControlNet und Ethernet/IP verwendet und erlaubt Anwendern, dieselben Sicherheitsmechanismen auf verschiedenen Plattformen zu nutzen. Damit wird die durchgängige Verbindung mehrerer CIP-basierter Netzwerke möglich.

SERCOS-Vorteile

Durch die Kombination aus **hoher Performance, flexiblem Einsatz und überprüfter Sicherheit** erfüllt SERCOS III alle Anforderungen an ein modernes, durchgängiges Automationsnetzwerk. Es bietet die nötige Alltagstauglichkeit durch die bewährten Fähigkeiten des SERCOS-Protokolls und die Zukunftssicherheit einer Echtzeit-Ethernet-Lösung. Dank Fast-Ethernet und synchronen Zykluszeiten von

31,25 µs bietet die dritte SERCOS-Generation sehr hohe Leistungsdaten und meistert auch komplexe Automatisierungsaufgaben. So können beispielsweise bis zu 330 Antriebe mit 4 Byte Ein-/Ausgangsdaten und jeweils 8 digitalen E/A in einem Zyklus von einer Millisekunde miteinander kommunizieren. Die Performance von SERCOS III erfüllt damit schon mehr als die Erfordernisse heutiger hoch entwickelter Produktionsmaschinen. Zudem ermöglicht es die schnelle Verarbeitung von Prozessdaten über dezentrale E/A-Baugruppen in zentralen Steuerungssystemen.

4.5 Vorteile von SPS

Zu Beginn waren SPS relativ teuer, kompliziert zu programmieren und von begrenzter Leistungsfähigkeit. Deshalb war das bevorzugte Einsatzgebiet zunächst auf Sondermaschinen, Spezialmaschinen und Prototypen begrenzt, wo man erfahrungsgemäß mit größeren Schaltungsänderungen während der Inbetriebnahme und der Testphase rechnen musste. Die ersten Erfahrungen waren nicht gerade sensationell, aber man erkannte die zeit- und kostensparenden Vorteile. Ständige Leistungssteigerungen bei gleichzeitiger Preisreduzierung und verringerter Baugröße haben dazu beigetragen, dass sich der Einsatzbereich von SPS stetig erweiterte. Für die einfacheren Anwendungen genügen Kompaktgeräte mit einer begrenzten Anzahl von Ein- und Ausgängen, für die gehobenen Leistungsklassen sind abgestufte SPS-Größen mit vielen Ein-/Ausgängen und einem umfangreichen Befehlsvorrat verfügbar.

Im Vergleich zu Relais- oder früheren elektronischen Digital-Steuerungen bieten heutige SPS gravierende Vorteile. Dazu zählen z. B.

- geringer Einbauraum, kleinere Schaltschränke
- Wegfall umfangreicher Verdrahtungen durch Nutzung von Datenbus und Feldbus
- wesentlich geringere Leistungsaufnahme und Wärmeentwicklung
- höhere Zuverlässigkeit (keine Schaltkontakte, weniger Drahtverbindungen/Kontaktstellen, längere Lebensdauer elektronischer Bausteine, verschleißfreie Software)
- online-Korrektur des SPS-Programmes ohne Betriebsunterbrechung
- für Serienmaschinen wird das SPS-Programm unverändert kopiert
- kürzere Schalt- und Reaktionszeiten
- Ferndiagnose und Störungssuche über Internet-/Ethernet-Anschluss
- leistungsfähige, mobile Programmiergeräte auf Laptop-Basis
- automatische Dokumentation anstelle individuell erstellter Schaltpläne
- integrierte automatische Funktionstest-Software mit Fehleranzeige
- insgesamt ein wesentlich geringerer Zeit- und Kostenaufwand

SPS zählen heute zu den festen, unverzichtbaren Ausrüstungen fast aller Maschinen und Anlageteile. Grundlagen und Umgang mit diesen Geräten werden bereits in Berufs- und Fachschulen gelehrt, die Hersteller bieten weiterbildende Kurse an. Für Programmierung, Einsatz, Anschluss und spätere Fehlersuche ist unbedingt geschultes Personal erforderlich.

4.6 Programmierung von SPS und Dokumentation *(Bild 4.5)*

Wie bei CNC-Maschinen, so ist auch bei SPS der wirtschaftliche Einsatz stark von den Möglichkeiten des Programmiersystems bzw. der Programmiersprache abhän-

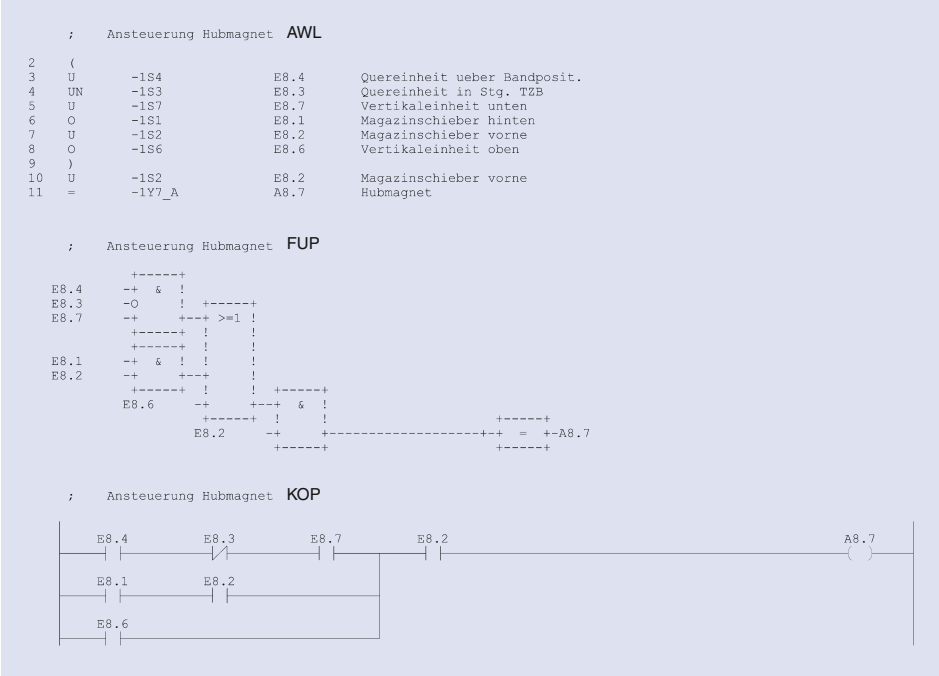


Bild 4.5: Programmierung und Dokumentation von SPS als Anweisungsliste (AWL), Funktionsplan (FUP) und Kontaktplan (KOP).

gig. Dazu muss die Programmierung bedienerfreundlich sein, alle Funktionen müssen programmierbar sein, die erzeugten Programme müssen fehlerfrei sein und erforderliche Änderungen müssen problemlos möglich sein.

Obwohl von Anfang an mit der DIN 19 239 und später mit der IEC 1131 der Versuch unternommen wurde, die Programmierung zu normen, sind die erzeugten Programme auch heute noch SPS-spezifisch unterschiedlich und nicht austauschbar!

Für einfachste low-cost-Anwendungen sind Programmiergeräte mit **Symbol- und Funktionstasten** ausreichend. Dabei entstehen dem Anwender erfahrungsgemäß keine großen Schwierigkeiten, wenn er im Umgang mit Relais-Steuerungen geübt ist. Der während des Programmierens auf dem Bildschirm grafisch dargestellte Kontaktplan ist der gewohnten Form der Schaltpläne sehr ähnlich. Wegen dem begrenzten Funktionsumfang ist diese Methode für komplexe Maschinensteuerungen nicht geeignet.

Zur wesentlich umfangreicheren SPS-Programmierung von Werkzeugmaschinen werden fast ausschließlich Laptops mit **Windows-Oberfläche** verwendet. Die SPS-Programmiersoftware liefert der Hersteller. Die in den Anfangszeiten für jedes SPS-Fabrikat unumgängliche Verwendung eines herstellerspezifischen Programmiergerätes ist überstanden. Damit ist auch eines der wesentlichen Hindernisse beseitigt, die einer schnelleren Verbreitung

dieser Systeme lange Zeit im Wege standen.

Laptops als SPS-Programmiergeräte bieten zusätzlich mehrere Vorteile, wie z. B.:

- universelle, tragbare und komplette Mobilität
- papierlose, stets aktuelle und anlagenbezogene Dokumentation
- eingebaute Hilfe-Software sofort vor Ort verfügbar
- automatische Dokumentation jeder Änderung
- problemloses „Datenmanagement", z. B. zur Dokumentation in einem Zentralrechner über serienmäßige Ethernet-Schnittstelle
- ersetzt Handbücher, Zeichnungen, Anweisungen und handschriftliche Änderungshinweise.

Unter dem **Windows-Betriebssystem** stehen mehrere Möglichkeiten zur SPS-Programmierung zur Verfügung:

- nach IEC 1131 (in Europa IEC 61131)
- in der Hochsprache „C" oder mittels „Strukturiertem Text" (ST), vorwiegend für mathematische Aufgaben
- oder, wie schon bei älteren Geräten nach DIN 19 239, als
  AWL = Anweisungsliste
  AS = Ablaufsprache
  KOP = Kontaktplan
  FUP = Funktionsplan

Hierbei zählen ST, AWL und AS zu den textuellen Sprachen, KOP und FUP zu den grafischen Sprachen. Alle zusammen sind bei heutigen SPS-Programmiersystemen im Standardumfang enthalten. Für den Anwender ist es wichtig, ein SPS-System auszuwählen, das den geforderten Funktionsumfang beinhaltet und dem Personal den Vorteil bietet, auch vorhandene Schaltunterlagen ohne großen Aufwand in SPS-Programme zu übertragen. Alle Systeme bieten den Vorteil, dass während der Eingabe in der einen Form gleichzeitig die andere Form entsteht, sodass z. B. während der Programmierung als Anweisungsliste der Kontaktplan entsteht und auch von der einen in die andere Eingabeart umgeschaltet werden kann.

Ist das Programm erstellt, so erwartet der Anwender vom Programmiersystem weitere Unterstützung, wie z. B.

- Darstellung der **AWL** mit allen Kommentaren und Gerätebezeichnungen
- Darstellung von **Zuordnungslisten,** aus denen die Belegung der Anschlüsse hervorgeht
- Darstellung von **Querverweislisten,** um zu erkennen, welcher Eingang oder Ausgang bei welcher Adresse angesprochen wird
- Darstellung des **Kontaktplans,** der die Konfiguration und Bezeichnung der Kontakte dastellt, sowie zusätzliche schriftliche Informationen enthält
- Unterstützung bei Fehlersuche durch Einzelschritt, Unterbrechungspunkte, Anzeige von Speicherinhalten usw.
- Archivierung von SPS-Programmen.

Ein wesentlicher Vorteil der sog. **mnemotechnischen Sprachen** ist, dass sie der Leistungsfähigkeit von SPS keine Grenzen setzen. Programmiersprachen, die von **Booleschen Gleichungen** ausgehen, werden heute nicht mehr angeboten.

4.7 Programm

Der logische Zusammenhang zwischen den variablen Eingangssignalen und den erzeugten Ausgangssignalen einer elektrischen Schaltung wird in konventioneller Weise in einem elektrischen Schaltplan dargestellt.

Mit Hilfe der von Boole entwickelten

Algebra und der entsprechenden Rechengesetze lassen sich solche Kontaktpläne oder Stromlaufpläne in **Logikpläne** umsetzen. Dies ist die eigentliche Aufgabe der Programmiersysteme.

SPS-Programme sind im Wesentlichen mit den Grundfunktionen „UND“, „ODER“ und „NICHT“ aufgebaut. Aus diesen drei Verknüpfungen können durch Kombination weitere logische Funktionen aufgebaut werden, wie „NAND“ oder „NOR“. Hinzu kommen noch Zeit- und Zählfunktionen, Schieberegister, monostabile und bistabile Taktgeber und andere.

Das auf diese Art erzeugte Programm wird in den Speicher der „Zentraleinheit“ der SPS eingegeben und hat nun seinerseits die Aufgabe, die gewünschten Steuerungsabläufe zu erzeugen. Für den richtigen Ablauf des Programms ist die Reihenfolge der programmierten **„Anweisungen“** maßgebend. Unter einer Anweisung ist jeweils eine Programmzeile des SPS-Programmes zu verstehen.

Kennzeichnend für SPS ist, dass das Programm nacheinander, d. h. schrittweise eine Anweisung nach der anderen, abgearbeitet wird. Obwohl diese serielle Verarbeitung mit hoher Geschwindigkeit erfolgt, im Mittel etwa 0,1 ms pro 1.024 Programmschritte, ist die Abarbeitung des gesamten Programmes von dessen Länge, d. h. der Anzahl der Anweisungen, abhängig. Bei längeren Programmen können demnach für einen gesamten Programm-Umlauf mehrere Millisekunden vergehen. Diese Zeit wird als **Zykluszeit** bezeichnet und ist kennzeichnend für die **Reaktionszeit** der SPS.

Bei einer Zykluszeit von 20 ms wird beispielsweise das Programm 50-mal pro Sekunde durchlaufen. Ändert sich der Eingangsstatus eines Signals unmittelbar nach der Abfrage, dann dauert es max. 20 ms bis zur nächsten Abfrage. Diese Zeit kann nur durch eine „schnellere SPS“ oder durch spezielle Sprungbefehle reduziert werden.

Zusätzlich zu den logischen Verknüpfungen hat die SPS oft noch weitere Aufgaben, wie z. B. aus dem Bereich „Datenhandling“ die Verwaltung und Aktualisierung von Tabellen, das Erkennen und Decodieren von Strichcodes und deren Zuordnung zur richtigen Tabelle, die Korrespondenz über ein Informations-Netzwerk, u. a.

In modernen SPS-Systemen können Programmteile mit verschiedenen Zykluszeiten oder auch ereignisgesteuert definiert werden. So kann eine sehr zeitkritische Aufgabe (z. B. Werkzeugbruchüberwachung) mit einem deutlich höheren Takt ausgeführt werden als eine zeitlich unproblematische Funktion (z. B. Kompensationswerte aufgrund der Erwärmung).

4.8 Programmspeicher *(Bild 4.6)*

Als Programmspeicher werden bei heutigen SPS ausschließlich **Halbleiterspeicher** mit unterschiedlichen Eigenschaften verwendet.

Zum Testen neuer Programme werden zunächst **RAM-Speicher** mit Pufferbatterie bevorzugt, um Änderungen schnell einfügen und prüfen zu können. Diese Speicherbausteine sind bei Spannungsausfall „flüchtig“, deshalb müssen sie über Pufferbatterien mit Spannung versorgt werden. Aufgrund der hohen Zuverlässigkeit kann aber auch der spätere Betrieb problemlos über RAM-Speicher laufen.

Nach abgeschlossenem Probebetrieb werden die Programme vorzugsweise in **FEPROMs** übertragen und unverlierbar gespeichert. Diese Datenspeicher, auch als „Memory-Sticks“ verfügbar, sind durch einen elektrischen Impuls löschbar und sofort wieder beschreibbar. Dazu müssen sie

nicht aus dem Gerät oder aus ihrem Steckplatz entnommen werden, das Löschen und Beschreiben erfolgt „on-board“. Ein manuelles Tauschen der Speicher ist nicht erforderlich.

Früher verwendete, mit UV-Licht löschbare **EPROMs** sind aufgrund ihrer Nachteile nicht mehr aktuell. Sie sind erst nach einer Wartezeit von ca. 1 Stunde wieder beschreibbar.

Bei IPC-gestützten SPS kann die Datensicherung auch auf der **Festplatte** des Rechners erfolgen. Beim Einschalten wird das SPS-Programm in den RAM-Speicher übertragen, wodurch eine kurze Wartezeit entsteht.

Die **Speicherdichte,** d. h. die auf einem bestimmten Volumen speicherbare Anzahl von Bits oder Bytes, ist bei den heutigen Speicherbausteinen so hoch, dass die Programmlänge keine Rolle spielt. Beim Aufbau und bei der Optimierung eines Programmes konzentrieren sich die Bemühungen nicht auf die Minimierung der Programmlänge, sondern auf dessen Übersichtlichkeit, Diagnosefreundlichkeit und den Unterprogramm-Charakter. Dies ist in erster Linie für den Anwender wichtig, um zur Störungssuche möglichst kurze Stillstandszeiten der Anlage zu erreichen. Zusätzlich lassen sich noch **Diagnoseprogramme** vorsehen, die sowohl den Steuerungsablauf und die Taktzeiten, als auch den Unterbrechungspunkt festhalten und eine exakte Fehleranzeige im Klartext auslösen. Weiterhin sind spezielle **Diagnose-Funktionen** verfügbar, die selbstlernend sind. Sie prägen sich den funktionsmäßig korrekten Ablauf einmal ein, vergleichen jeden folgenden Ablauf mit dem gespeicherten und zeigen im Störungsfall den Programmschritt an, wo der Ablauf gestört war.

Speichertyp	Beschreibung	Löschen	Programmieren	Speicherinhalt ist bei Stromabschaltung ...
RAM (SRAM) (DRAM) (SDRAM)	Random Access Memory Speicher mit wahlfreiem Zugriff Schreib-Lese-Speicher	elektrisch	elektrisch	... flüchtig
ROM	Read Only Memory Nur-Lese-Speicher Festwertspeicher	nicht möglich	durch Masken beim Herstellungsprozess	... nicht flüchtig
PROM	Programmable ROM einmalig programmierbarer ROM		elektrisch	... nicht flüchtig
EPROM	Erasable PROM UV-löschbarer Festwertspeicher	durch UV-Licht	elektrisch	... nicht flüchtig
FEPROM	Flash EPROM elektrisch löschbarer Festwertspeicher	elektrisch	elektrisch	... nicht flüchtig

Bild 4.6: Festwertspeicher und deren Eigenschaften.

4.9 SPS, CNC und PC im integrierten Betrieb

(Bild 4.7)

Schon Ende der siebziger Jahre wurde durch den Einsatz von Mikroprozessoren der wichtigste Grundstein für die SPS-Technik gelegt. Damit konnte ein Vielfaches an Informationen auf kleinstem Raum verarbeitet werden und das verbesserte Preis-Leistungs-Verhältnis gab selbst bei kleineren Anlagen den Ausschlag für die SPS-Technik. Die Möglichkeit, vorhandene Betriebsprogramme schnell und fehlerfrei zu kopieren und Änderungen ohne großen Aufwand auch nachträglich noch einzufügen, waren dabei die wichtigsten Argumente.

SPS in entsprechender Ausführung eignen sich sogar für den Einsatz in sicherheitsrelevanten Bereichen und für Anlagen mit erhöhten Anforderungen an die Verfügbarkeit. Damit hat sich die SPS als das Automatisierungssystem schlechthin vor allem in der Fertigungstechnik etabliert. Die Möglichkeit, aktuelle Schaltzustände bei Netzausfall zu speichern, trägt wesentlich zum schnellen, störungsfreien und sicheren Wiederanlauf der Anlage nach Spannungswiederkehr bei.

Zukünftige Weiterentwicklungen werden sich weniger auf weitere Verkleinerung und Leistungssteigerung von SPS beziehen, sondern vielmehr auf die Optimierung des Zusammenspiels mit den anderen Automatisierungskomponenten und auf das „Prinzip der Verteilten Intelligenz“. Darunter ist die Verlagerung von Funktionsblöcken auf mehrere dezentrale Stellen zu verstehen, wie z. B. bei intelligenten Antrieben.

Viele Aufgaben lassen sich heute nur dann effektiv und kostengünstig automatisieren, wenn die Stärken von SPS, CNC und Rechner kombiniert und interaktiv genutzt werden.

Die wichtigsten Argumente für die SPS waren schon immer die einfache Programmänderung und die automatische Dokumentation. Die Entwicklung von anwendungsorientierten, grafischen Werkzeugen hat die SPS-Programmierung ähnlich revolutioniert wie einst die grafisch unterstützte Programmierung und Simulation von NC-Programmen. Beim Einsatz in Verbindung mit CNCs kann beispielsweise die grafisch unterstützte SPS-Programmierung und Funktionsprüfung mittels separatem PC erfolgen und später, im Verbund mit der CNC, lassen sich die letzten Änderungen und Korrekturen mit Bildschirm und Tastatur der CNC vornehmen. CNC und SPS haben schließlich sogar Zugriff auf die gemeinsame Datenbasis. Nur so lassen sich im CIM-Verbund alle im System vorhandenen Daten von jedem integrierten System nutzen, automatisch aktualisieren und ohne Verzögerung weitergeben. Auf diese Weise kommen auch Maschinen- und Fertigungsdaten problemlos und schnell ins technische Büro, um dort zur Schwachstellendiagnose und für Management-Informationen ausgewertet zu werden. Heute sind bereits CNCs mit komplettem Leistungsumfang + integrierte SoftSPS + Achsensteuerung auf *einer* PC-Steckkarte verfügbar.

4.10 SPS-Auswahlkriterien

SPS werden von vielen nationalen und internationalen Herstellern angeboten. Ein Vergleich der einzelnen Produkte mit dem kundenspezifisch erstellten Anforderungskatalog wird jedoch die Auswahl stark einschränken. Oft lässt sich dieser Aufwand durch einen Seitenblick auf die Großanwender von SPS ersetzen, die etwa alle drei bis fünf Jahre die am interessantesten erscheinenden Produkte testen und danach ihre Auswahl neu treffen. Dagegen

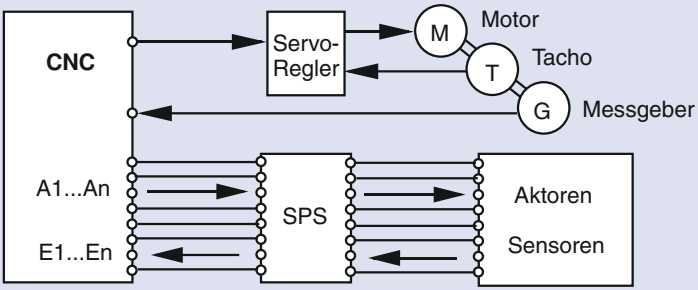


Bild 4.7.1: CNC mit separater SPS; der Informationsaustausch erfolgt über E/A-Module

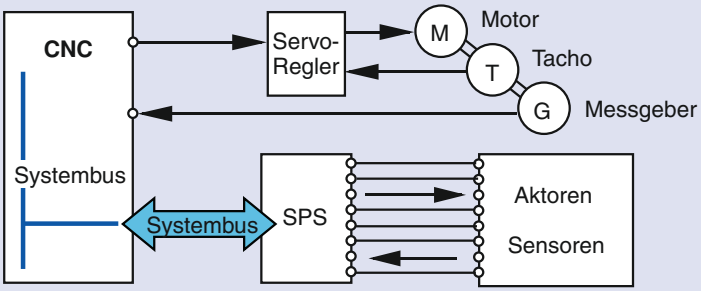


Bild 4.7.2: CNC mit busgekoppelter SPS; der Informationsaustausch erfolgt direkt über Bus, ohne E/A-Module

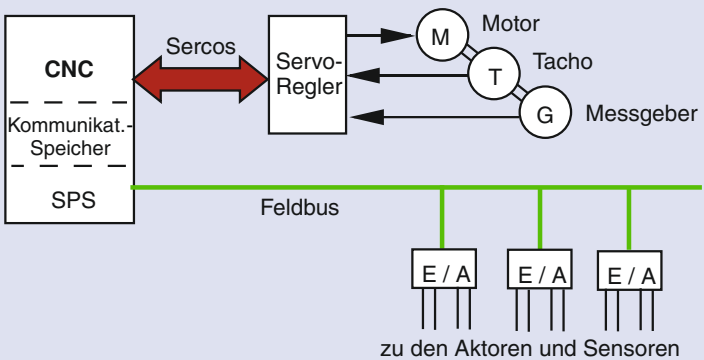


Bild 4.7.3: CNC mit softwaremäßig integrierter SPS; der Informationsaustausch findet in der CNC/ SPS-Betriebssoftware statt

Bild 4.7: Möglichkeiten der CNC/ SPS-Kopplung.

vertrauen insbesondere Großunternehmen auf die Stärken der Marktführer und bleiben bei diesen Produkten. Damit begrenzen sie auch die Kosten für Personalschulung und Ersatzteilhaltung.

In Verbindung mit NC-Maschinen ergeben sich oft ganz andere Auswahl-Gesichtspunkte *(Bild 4.7)*. Die aufwändigste Lösung entsteht bei der Kopplung von CNC und SPS über Einzelverbindungen *(Bild 4.7.1)*. Dies entspricht nicht mehr den heutigen Möglichkeiten und lässt sich auch nicht sachlich vertreten.

Heute lassen sich CNC und SPS unterschiedlicher Hersteller über genormte Datenschnittstellen (z. B. Ethernet) problemlos koppeln. Bei diesen Lösungen werden die etwas höheren Kosten den Vorteilen der SPS-Einheitlichkeit beim Endkunden untergeordnet *(Bild 4.7.2)*.

Bei einigen CNCs sind die SPS-Funktionen bereits als **Software-SPS** in die CNC integriert und ein Feldbus verbindet alle Aktoren und Sensoren der Maschine mit der CNC/SPS *(Bild 4.7.3)*. An dieser Ideal-Lösung wurde lange Zeit entwickelt, bezahlbare Lösungen sind aber erst mit der Verfügbarkeit der standardisierten Schnittstellen-Bausteine möglich geworden.

4.11 Zusammenfassung

Der Einsatz von SPS in Verbindung mit CNC ist heute allgemeiner Standard. Die stetig erweiterte Leistungsfähigkeit der SPS hat dazu beigetragen, dass zunehmend Aufgaben und Funktionen von der CNC in die SPS verlagert wurden. Dies bietet dem Maschinenhersteller und -anwender die Möglichkeit, maschinen- oder anwendungsspezifische Funktionen, wie z. B. Werkzeugverwaltung, Werkzeugwechselvorgang oder Palettenwechsel, sowie deren grafische Darstellung und die Datenverwaltung, selbst und nach eigenen Vorstellungen programmieren und modifizieren zu können. Herstellerseitiges Know-how bleibt auf diese Weise geschützt und kann bei Weiterentwicklungen der Maschinen zeitgleich den neuen Bedingungen angepasst werden. Auch die in Verbindung mit der Automatisierung komplexer Fertigungseinrichtungen auftretenden Forderungen lassen sich mittels SPS in idealer Weise lösen.

Bei **Serienmaschinen** ist durch die Kopierfähigkeit erprobter und fehlerfreier SPS-Programme eine wesentlich kürzere Inbetriebnahmezeit möglich. Für diese Maschinen sind auch Steuerungen mit integrierter CNC + SPS + Achsen-Sollwertausgabe die ideale Lösung, da wenig maschinenspezifische Programm-Änderungen zu erwarten sind. Dagegen bieten die separaten SPS bei **Sondermaschinen und komplexen Anlagen** den Vorteil, dass der Maschinenhersteller alle Ablauf-Funktionen der einzelnen Teilkomponenten bereits vor Inbetriebnahme der CNC programmieren und testen kann.

(Weitere Informationen über Bus-Systeme:
www.sercos.de,
www.profibus.de,
www.interbusclub.com,
www.ubf.de/ethernet.htm,
www.tecchanel.de)

4.12 Tabellarischer Vergleich CNC/SPS

Die Möglichkeit, sowohl eine CNC mit einer SPS zu koppeln, als auch umgekehrt eine SPS mit zusätzlichen NC-Modulen auszurüsten, führt gelegentlich zur Begriffsverwirrung und der Frage, welche Steuerung „steuert“ eigentlich die CNC-Maschine?

Grundsätzlich übernimmt bei CNC-Maschinen die CNC den wichtigsten Teil der Steuerungsaufgaben, nämlich die Steue-

rung der Achsen und den gesamten Bearbeitungsablauf. Die SPS als **„Anpass-Steuerung“** übernimmt Schaltbefehle aus der CNC und steuert festgelegte Funktionsabläufe, beispielsweise für den von der CNC „angestoßenen“ Werkstück- oder Drehzahlwechsel.

In *Tabelle 4.1* werden die wesentlichen Unterschiede von CNC und SPS gegenübergestellt.

Tabelle 4.1: Vergleich CNC und SPS

Die wesentlichen Unterschiede von CNC und SPS beim Einsatz in Werkzeugmaschinen		
Kriterien	**Numerische Steuerungen** **CNC**	**Speicherprogrammierbare Steuerungen** **SPS**
1. Engl. Bezeichnung	(**C**omputerized) **N**umerical **C**ontrol	**P**rogrammable **L**ogic **C**ontroller
2. Technische Ausführung	Weitgehend standardisierte, jedoch maschinenspezifisch modifizierte Hard- und Software zur Steuerung eines bestimmten Maschinentyps.	Standardisierte, ausbaufähige, universell verwendbare Steuerungshardware für alle Schaltfunktionen der Maschine und der Peripherie oder für Maschinengruppen.
3. Aufgabenstellung	Hauptaufgabe ist die Steuerung der Maschinenachsen, d. h. der Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück durch direkte Maßeingabe, sowie der zusätzlich erforderlichen technologischen Funktionen (**F**eed, **S**peed, **T**ool, **M**iscellaneous Functions)	Hauptaufgabe ist das Steuern, Verriegeln und Verknüpfen von festgelegten und immer wiederkehrenden Abläufen im Maschinen- und Anlagenbau. Die SPS übernimmt die Koordination der Abläufe.
4. Funktionsmerkmale	Die NC-Programme für die Bearbeitung der Werkstücke werden vom Maschinen-*Anwender* erstellt und können beliebig gewechselt oder modifiziert werden.	Das SPS-Programm wird vom Maschinen-*Hersteller* erstellt und unverlierbar gespeichert. Es muss nur in Ausnahmefällen geändert oder getauscht werden.
5. Programmierung	Werkstückbezogene, maßstäbliche Programmierung der erforderlichen Verfahrbewegungen der NC-Achsen bzw. der Werkstück-Sollmaße nach der Werkstückzeichnung. Wahlweise auch NC-Programmierung an der Maschine (WOP) Universelle NC-Programmiersysteme erzeugen Quellenprogramme, die über Compiler (Postprozessor) für jedes Maschinen/CNC-Fabrikat in lauffähige NC-Programme umgesetzt werden.	Einmalige Programmierung und Speicherung der zu steuernden Funktionen nach Anweisungslisten (AWL), Funktionsplan (FUP) oder Funktionsbausteinsprache (FBS), Ablaufplan (nach IEC 61131) oder Kontaktplan (KOP), sowie Strukturierter Text (ST) für Prozessdatenverarbeitung. Programmierung mittels Personal Computer (PC) und firmen- bzw. gerätespezifischer Programmiersoftware. Keine Programmierung während des Betriebes.

Die wesentlichen Unterschiede von CNC und SPS beim Einsatz in Werkzeugmaschinen		
Kriterien	**Numerische Steuerungen** **CNC**	**Speicherprogrammierbare Steuerungen** **SPS**
6. Programme	Das NC-Programm enthält die geometrische Bearbeitungsfolge und die erforderl. Schaltfunktionen für Vorschub, Spindeldrehzahl, Werkzeug und Hilfsfunktionen sowie der vorhandenen Automatisierungseinrichtungen (s. Pkt. 3) Programmaufbau nach DIN 66025, ISO und STEP-NC international genormt.	Die Programme müssen SPS-spezifisch erstellt werden und sind nicht für andere SPS-Fabrikate compilierbar. (Die internat. Norm IEC 61131 ist zwar veröffentlicht, aber nicht bindend wegen der vielen existierenden Programme)
7. Programmbestände	Bis zu mehreren Tausend NC-Teileprogramme pro Maschine sind nicht selten. Die Teileprogramme erstellt der Maschinen-Anwender, feste Zyklen und Unterprogramme liefert der Hersteller.	In der Regel nur *ein* festes, anlagenbezogenes Programm. Das Programm erstellt der Maschinen-Hersteller, meist unter Nutzung verfügbarer Funktionsbausteine.
8. Einsatzgebiete	Flexible Steuerung der Maschine. Die CNC muss bezüglich NC-Achsen, Zyklen und Unterprogrammen speziell auf den zu steuernden Maschinentyp ngepasst sein: z. B. Maschinen zum Drehen, Fräsen, Bohren, Nibbeln, Schleifen, Trennen, Laserbearbeiten, u. a.	Steuerung, Verriegelung und Verknüpfung von Maschinenfunktionen. Die modulare Hardware muss nicht speziell an die Maschine angepasst sein, sondern nur die max. Anforderungen bezüglich der Anzahl der Eingänge, Ausgänge, Zeiten, Zähler, Funktionen und Verstärker erfüllen. Die maschinenspezifische Auslegung erfolgt über das Programm.
9. Techn. Umfang	Sehr hoch! Spezifikation sehr umfangreich, anwendungsspezifisch, maschinenabhängig und schon im Verkaufsgespräch stark erklärungsbedürftig.	Je nach Leistungsfähigkeit des Gerätes mittel bis hoch, im Verkaufsgespräch mit wenigen Standard-Funktionen zu erläutern.
10. Beschaffung, Einkauf	Kunde kauft komplettes, funktionsbereites System	Kunde kauft Hardware-Module
11. Projektierung	Käufer und Verkäufer müssen umfangreiche Werkzeugmaschinenkenntnisse haben, um die CNC anpassen zu können. (3D-Fräsen, Drehen, Korrekturwerteingabe und -verarbeitung, HSC-Funktionen, Zykluszeiten, Servo-Abtastraten, Bearbeitungszyklen, Koordinatentransformation, DNC, Messsysteme usw.)	Der Verkäufer muss über Grundkenntnisse im speziellen Maschinenbau verfügen und sollte sich im Steuerungsbau und in der Steuerungstechnik auskennen. Beratung besteht in erster Linie im Prüfen, ob sich die geforderten Zeiten, Funktionen, Abläufe usw. programmieren lassen (Auswahl der HW-Komponenten).



Die wesentlichen Unterschiede von CNC und SPS beim Einsatz in Werkzeugmaschinen		
Kriterien	**Numerische Steuerungen** **CNC**	**Speicherprogrammierbare Steuerungen** **SPS**
12. Historische Entwicklung	Ersatz für Kopiersysteme, Steuerkurven, Programmsteuerungen mit Endschaltern und mechanische Automatisierung. Das *NC-Programm* steuert die Maschinenachsen und den kompletten Bearbeitungsablauf. Erfüllung der Forderung **a)** nach schnellem Programmwechsel, kurzen Rüstzeiten, höherer Fertigungsflexibilität und höheren Fertigungsgenauigkeiten, sowie **b)** nach direkter Verwendung von CAD-Konstruktionsdaten zur Programmierung der Maschinenbewegungen = CAD/CAM. **c)** nach Durchgängigkeit der Daten-Aktualisierung im geschlossenen Kreislauf.	Ersatz für Relais-Steuerungen und festprogrammierte (verdrahtete) elektronische Steuerungen. Wegen der im SPS-Speicher abgelegten Steuerprogramme entstand der Begriff „Speicherprogrammierbare Steuerung“. Erfüllung der Forderungen nach **a)** geringerem Bauvolumen, höherer Zuverlässigkeit, größerem Funktionsumfang, weniger Verdrahtungsaufwand und Fehlermöglichkeiten, flexibleren Änderungsmöglichkeiten, Verbesserung der Dokumentation, kürzeren Bauzeiten, sowie **b)** Adaption der verschiedenen E/A-Bussysteme (Datenbus und Feldbus)
13. Innovationen	Von der automatisierten Einfachmaschine bis zur Entwicklung von komplexen Maschinen, die ohne CNC nicht steuerbar wären, wie z. B. Laserbearbeitung, Stereo-Lithografie, Hochgeschwindigkeitsfräsen, Rapid-Prototyping-Verfahren, Hexapoden, Roboter u. a.	Von kleinen Steuerungen für einfachste Funktionen bis zu computergestützten 32-bit-Steuerungen mit einem sehr hohen digitalen und analogen Funktionsumfang. Ausbau bis zu rechnerintegrierten Systemen mit komplexen Rechenfunktionen. Verwendbarkeit verschiedener E/A-Bussysteme.
14. Vernetzung	Zunehmende Vernetzung mehrerer Systeme in einem Anlagenbereich. *Prozessbus:* Ethernet für mittlere Entfernungen u. kleine zeitkritische Datenmengen (z. B. NC-Programme) TCP/IP, Internet Protokoll zur Vernetzung dezentraler Systeme. *Feldbus:* Sercos und CAN für Antriebe, RS 485 für Sensoren und Aktoren. CAN (ISO/DIS 11 898) low cost, kurze Reaktionszeit. (Entwickelt für den Kfz-Bereich)	Vernetzung unterschiedlicher SPS-Fabrikate und von der zentralen Steuerung zu den dezentralen Ein-/Ausgängen. *Anlagenbus:* Industrial Ethernet Profibus FMS Profibus: (DIN 19 245) Profibus/DP (Dezentrale Peripherie) Interbus-S: (DIN 19 258) CAN-Bus für Maschinen und Anlagen ASI = *A*ktor-*S*ensor-*I*nterface für binäre E/A's.

Die wesentlichen Unterschiede von CNC und SPS beim Einsatz in Werkzeugmaschinen		
Kriterien	**Numerische Steuerungen CNC**	**Speicherprogrammierbare Steuerungen SPS**
15. Service	Erfordert Hybrid-Wissen über Werkzeugmaschinen, (Mechatroniker): Maschinenelemente, Hydraulik, Pneumatik, Elektrik, Elektronik, Wegmesstechnik, Logistik, Servoantriebe, Regelkreise, SPS, sowie die damit verbundene Messtechnik. Umgang mit PCs ist Voraussetzung.	In den meisten Fällen sind Kenntnisse der Steuerungstechnik und Programmierung ausreichend. Nur in Ausnahmefällen sind Kenntnisse wie bei der CNC erforderlich. Handhabung und Umgang mit PCs ist grundsätzlich erforderlich.
16. Entwicklungstendenzen	Tendenz zu Wegmesssystemen hoher Messfeinheit (0,0001 mm bzw. 0,00001 Grad) der NC-Achsen. Interpolation im Nano- und Picometerbereich, um präzisere 3D-Werkstück-Oberflächen zu erzielen. Nutzung von Standard-PC-Hardware in Verbindung mit Echtzeit-Betriebssystemen. Verwendung digitaler Achsantriebe und spezieller Funktionsbausteine für höchste Konturgenauigkeiten beim Hochgeschwindigkeitsfräsen. Einsatz von hochdynam. Linearantrieben.	Starke Tendenz zu Zentralsteuerungen mit Busverbindung zu den dezentralen E/A-Modulen. Verwendung unterschiedlicher Fabrikate für Zentralsteuerung und dezentrale E/A-Module. International genormte, grafisch unterstützte Programmiersprache nach IEC 61131.

SPS – Speicherprogrammierbare Steuerungen

Das sollte man sich merken:

1. Aus früheren NC mit separater Anpasssteuerung wurden CNC mit integrierten oder busgekoppelten SPS.
2. SPS ersetzen nicht nur Relaissteuerungen, sondern übernehmen **zusätzliche** Steuerungs-, Überwachungs- und Anzeigeaufgaben.
3. **Grundfunktionen** sind:
   UND, ODER, NICHT, SPEICHERN, VERZÖGERN.
   Zusatzfunktionen sind:
   ZÄHLEN, RECHNEN, VERGLEICHEN, SPRUNGANWEISUNGEN, UNTERPROGRAMMTECHNIK.
   Höhere Funktionen sind:
   Tabellenverwaltung, A/D und D/A-Umsetzung, Regelkreise, NC-Achsmodule, Tabellenverwaltung, Kommunikation über Datennetze.
4. Wichtige **Kennzeichen** einer SPS sind:
   - Funktionsumfang,
   - max. Anzahl der Ein- und Ausgänge,
   - Zykluszeit, angegeben in ms/K-Anweisung (ms pro 1.024 Anweisungen),
   - Anzahl der Merker,
   - Größe des Programmspeichers (Anweisungen).
5. Anstelle der Verdrahtung tritt bei SPS das **Programm**, auch als **Anweisungen** bezeichnet. Es wird vom Anwender mit Hilfe eines PCs und systemspezifischer Software erstellt.
6. Das **Programm** wird in elektronischen Bausteinen gespeichert, zum Testen in **RAM**, für den späteren Betrieb in **EPROM** oder **FEPROM**.
7. Zur **Programmierung** von SPS bestehen 5 Möglichkeiten:
   - als Kontaktplan,
   - als Anweisungsliste,
   - als Funktionsplan,
   - als „strukturierter Text“,
   - mittels grafisch unterstützter Sprachen.
8. **Vorteile** von SPS sind:
   - Einbau und Verdrahtung der Hardware kann unabhängig von der Software erfolgen,
   - wesentlich kürzere Montage- und Inbetriebnahmezeiten,
   - schnelle und einfache Korrekturen, auch während der Inbetriebnahmephase,
   - automatische Dokumentation und Vervielfältigung der Softwareprogramme,
   - automatische Generierung von Querverweisen, Hinweisen und Angaben,
   - kein Verschleiß, daher hohe Zuverlässigkeit,
   - einfache Installation, kleines Bauvolumen, geringere Leistungsaufnahme
   - wesentlich kürzere Inbetriebnahmezeiten aufgrund identischer, d. h. ausgetesteter und fehlerfreier Programme.

5 Einfluss der CNC auf Baugruppen der Maschine

Die CNC hat die Entwicklung von wesentlichen Baugruppen der Werkzeugmaschinen nachhaltig verändert und führt auch zu neuen Maschinenkonfigurationen und Automatisierungseinrichtungen.

5.1 Maschinenkonfiguration

Wesentliche Ursache für den Einfluss der numerischen Steuerung auf die Maschinenkonfiguration ist, dass keine manuellen Bedienungseingriffe erforderlich sind und die ständig notwendige Beobachtung und Überwachung des Arbeitsablaufs entfällt. Dies hat es auch ermöglicht, die zeitgleich erfolgte Weiterentwicklung der spanenden Werkzeuge besser zu nutzen. Dadurch ließen sich die Schnittgeschwindigkeiten, der Vorschub und die Spantiefen bis zur Leistungsgrenze der Werkzeuge voll nutzen, was wiederum die Zerspanungsleistung der Maschinen erheblich verbessert.

Durch diese Leistungssteigerungen haben sich auch die Anforderungen an die Maschinen bezüglich Steifigkeit und installierter Antriebsleistung erhöht.

Bei großen Maschinen zur Bearbeitung großer Werkstücke ergeben sich durch das Werkstückgewicht und dessen Größe engere Grenzen bezüglich eines automatischen Werkstück- und Werkzeugwechsels. Deshalb müssen für diese Maschinengrößen immer anwendungsspezifische Lösungen entwickelt werden.

Bei Maschinen für die Bearbeitung kleinerer Werkstücke bieten sich jedoch mehrere Ansatzpunkte für eine weitergehende Verbesserung der Gesamtmaschine. So ist bei kleineren und mittleren Drehmaschinen die schon bei Kopierdrehmaschinen eingeführte Lösung mit hinten liegende Maschinenbett – schräg oder senkrecht – eingesetzt worden. So fallen die Späne nicht auf das Maschinenbett und die Späneentsorgung wird nicht behindert, da direkt unter dem Werkstück Platz für den Einbau eines Späneförderers entsteht.

Für den Bediener wird auch der Zugang zu den Werkzeugen und dem Werkstück wesentlich erleichtert.

Weiterhin ist durch den Einbau kompakter, drehzahlregelbarer Drehstrommotoren eine neue Bauform von Drehmaschinen mit hängender, senkrechter Spindel entstanden. Hierbei werden die Längs- und Planbewegungen von der Spindel und nicht vom Werkzeug ausgeführt *(Bild 5.1)*. Dies ermöglicht auch den einfachen Werkstückwechsel nach dem Pick-up-Prinzip, die Zwei-Seiten-Bearbeitung von oben und unten bei Maschinen mit zwei Spindeln, sowie bei der Innenbearbeitung einen verbesserten Spänefall. Gleichzeitig wird auch hier ein guter Zugang zu Werkzeugen und Werkstück erreicht und unterhalb des Arbeitsraums entsteht Platz für den Späneförderer.

Bei großen Drehmaschinen wurde die Bauform der konventionellen Maschinen beibehalten, bei Maschinen für lange Werkstücke also das waagerechte Bett, bei kurzen Werkstücken die Karussell-Bauform. Bei Längs- bzw. Wellendrehmaschinen kann ein Späneförderer evtl. im Innenraum des Bettes untergebracht werden. Bei Karusselldrehbänken erschwert die waagerechte Spannfläche die Abfuhr der Späne. Eine automatische Spänebeseitigung, insbesondere bei Innenbearbeitung, ist kaum möglich.

Die freie Programmgestaltung und die praktisch unbegrenzte Dateneingabe haben bei Drehmaschinen zu Ausführungen mit zwei oder sogar drei unabhängig, aber in wechselseitiger Abstimmung arbeitenden Supporten geführt. Das ermöglicht eine Verringerung der Stückzeit und vergrößert die Zahl der verfügbaren Werkzeuge.

Sogar speziell für die automatisch Fertigung entwickelte Drehautomaten, bei denen die Werkzeugbewegungen konventionell durch Kurvenscheiben erzeugt wurden, wie beispielsweise Mehrspindelautomaten, wurden inzwischen auf numerische Steuerung umgebaut. Dabei wurde aber die grundsätzliche Maschinenkonfiguration beibehalten

Bei den Bohrmaschinen ist die Radialbohrmaschine mit ihren nichtkartesischen Verfahrrichtungen gar nicht übernommen worden. Standardausführung ist nunmehr

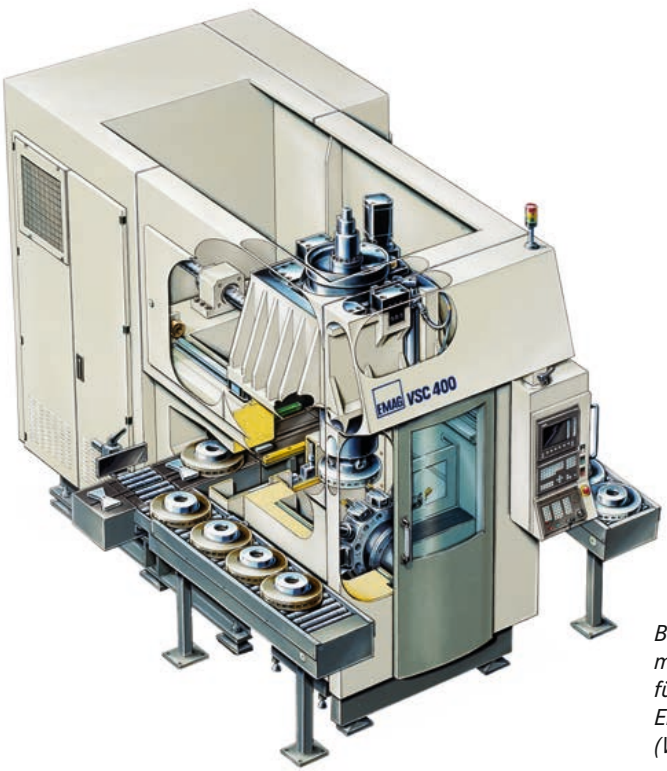


Bild 5.1: Senkrecht-Drehmaschine mit Pick-up-Prinzip für das automatische Be- und Entladen von Werkstücken (Werkbild EMAG)

die Bauform mit vertikaler Spindel und waagerechtem Werkstücktisch. Die Aufteilung der Achsen auf Tisch und Ständer folgt dabei in Abhängigkeit vom Arbeitsbereich den konventionellen Vorgängern. Die Automatisierung macht jedoch einen automatischen Werkzeugwechsel mit einem entsprechenden Einfluss auf die Maschinenkonfiguration fast obligatorisch.

Auch bei den Fräsmaschinen sind Maschinenkonfigurationen zu finden, die es bereits bei den konventionellen Maschinen schon gab. Die numerische Automatisierung hat durch die freizügige Programmgestaltung aber den Trend zur Komplettbearbeitung ausgelöst und damit eine neue Maschinenart entstehen lassen: das Bearbeitungszentrum, eine Maschine, die alle mit umlaufendem Werkzeug erfolgenden Bearbeitungen ermöglicht. Das macht natürlich einen entsprechen dimensionierten Werkzeugwechsler und zu den drei translatorischen Achsen auch noch eine oder sogar zwei rotatorische Achsen notwendig. Im Aufbau entsprechen diese Maschinen vorwiegend auch den bei konventionellen Maschinen, besonders Bohrwerken, schon bekannten Strukturen. Für die Erweiterung des automatischen Ablaufs sind diese Maschinen meist auch mit einem automatischen Werkstückwechsel ausgerüstet. Diese Zusatzeinrichtungen beeinflussen natürlich auch die Struktur der Grundmaschine.

Bei allen diesen Maschinen mit waagerechter Spannfläche besteht das Problem der Spänebeseitigung und der Unterbringung eines Späneförderers. In einigen wenigen Fällen bei Maschinen zur Bearbeitung kleiner Werkstücke wird deshalb das Werkstück bei senkrechter Spannfläche bearbeitet, nachdem es in der Spannstation auf der dort waagerecht liegenden Fläche gespannt wurde.

Auch bei den verschiedenen Arten von Schleifmaschinen wurde allgemein der Aufbau der zu Grunde liegenden konventionellen Maschine beibehalten, weil die Erfordernisse des Schleifprozesses vorrangig waren. Nur bei den kleineren Außenrundschleifmaschinen, bei denen traditionell die Längsbewegung dem Werkstück zugeordnet ist, wurde verschiedentlich der Aufbau einer Drehmaschine mit hinten liegendem geneigtem Bett übernommen, sodass der Schleifsupport die Längsbewegung ausführt.

Verzahnmaschinen sind ihrer Natur nach Einzweckmaschinen mit einem vollautomatischen Ablauf. Daher wurde ihr Aufbau beim Übergang auf eine numerische Steuerung völlig beibehalten.

Eine völlig neue Bauform für Werkzeugmaschinen mit einer ganz anderen Struktur ist erst durch die Verfügbarkeit von CNC-Steuerungen mit einem leistungsfähigen Rechner möglich geworden: Maschinen mit der Positionierung des Werkzeugs über eine Parallelkinematik (siehe hierzu Teil 3, Kap 1.6). Hierbei müssen die im kartesischen Koordinatensystem vorgegebenen Positionssollwerte in schneller Folge in die Sollwerte für die Längen der einzelnen Gelenkstäbe umgerechnet werden. Diese Kinematik ermöglicht wegen der geringen bewegten Massen sehr schnelle Reaktionen, hat aber einschneidende Nachteile beim möglichen Bewegungsbereich, insbesondere bei den Schwenkbewegungen.

5.2 Maschinengestelle

Die Anforderungen an die Maschinengestelle entsprechen im Grundsätzlichen weitestgehend denen bei konventionellen Werkzeugmaschinen. Die höheren Genauigkeitsanforderungen erfordern allerdings

eine Optimierung in Bezug auf die statische und dynamische Steifigkeit. Für eine ungestörte automatische Fertigung ist zudem eine möglichst hohe thermische Stabilität bzw. niedrige thermische Drift wichtig, sodass Temperaturänderungen von der Umgebung her oder durch Wärmequellen in der Maschine nicht zu schleichend anwachsenden Positionsabweichungen in der Maschine führen. Die Wärmequellen in der Maschine können sich insbesondere durch die höheren umgesetzten Leistungen nachteilig bemerkbar machen, sei es durch heiße Späne, die lokal das Maschinengestell aufheizen, sei es durch den hoch belasteten Hauptantriebsmotor, sei es durch die Wärme, die die Lager einer schnell laufenden Arbeitsspindel erzeugen. Hier sind Maschinengestelle aus Mineralguss wegen ihrer großen Masse und der schlechten Wärmeleitung des Betons vorteilhaft *(Bild 5.2)*.

Eine gewisse Gestaltungsfreiheit für die funktionswichtigen Maschinengestelle ergibt sich dadurch, dass CNC-Maschinen, insbesondere von kleinerer und mittlerer Größe, wie nachstehend noch abgeleitet wird, heute meist eine allseitige Maschinenverkleidung besitzen, sodass der Gesichtspunkt der Anmutung bei der Gestaltung der Gestelle unberücksichtigt bleiben kann.

Besondere Anforderungen werden an die im Lageregelkreis bewegten Maschinenteile bezüglich ihres Gewichtes gestellt, besonders wenn sie mit einem Linearantrieb positioniert werden. Durch Steifigkeitsoptimierung mit Hilfe der FEM-Analyse sowie Gewichtsreduzierung durch Topologieoptimierung konnten für Maschinenschlitten sowohl in Gussausführung aber insbesondere bei geschweißten Konstruktionen erhebliche Vorteile erzielt werden *(Bild 5.3)*.

Faserverbundwerkstoffe konnten sich bisher aus Kostengründen in der Serienfertigung nicht durchsetzen.

5.3 Führungen *(Bild 5.4, 5.5)*

Generell werden an die Führungen, insbesondere die Bewegungsführungen, die während der Arbeit der Maschine bewegt werden, folgende Forderungen gestellt:

- geringe Reibung, kein Stick-Slip-Effekt, um genaues Positionieren zu ermöglichen,
- hohe Steifigkeit, um Betriebslasten ohne unzulässige Verlagerungen aufzunehmen,
- hohe Dämpfung, um Schwingungen zu unterdrücken,
- geringer Verschleiß, um einen langen Erhalt der Genauigkeit zu gewährleisten,
- niedrige Kosten.

Diese Anforderungen wurden bei konventionellen Werkzeugmaschinen von Gleitführungen der verschiedensten Ausführungen hinreichend erfüllt. Sie waren hoch belastbar und betriebssicher und hatten ein gutes Dämpfungsvermögen. Einen niedrigen Reibwert und Stick-Slip-Freiheit konnte man durch Ausfütterung mit Kunststoff-Gleitbelägen erreichen.

Der Lageregelkreis stellt aber bezüglich niedriger Reibung und Stick-Slip-Freiheit besonders hohe Anforderungen, um hohe Positioniergenauigkeiten zu erreichen. Daher werden bei numerisch gesteuerten Maschinen heute zunehmend Wälzführungen der verschiedensten Ausführungen eingesetzt. Diese werden von spezialisierten Herstellern geliefert und sind preiswert geworden. Dieser Trend wird unterstützt durch die heute zur Zeitersparnis eingeführten hohen Eilganggeschwindigkeiten, bei denen der niedrige Reibwert leichtere

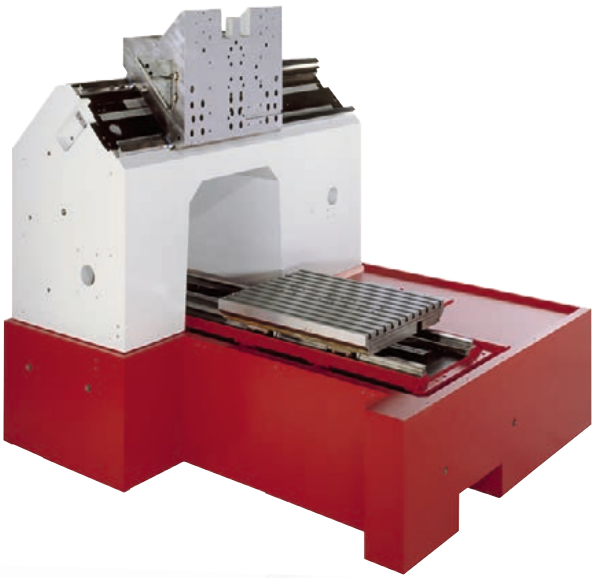


Bild 5.2: Maschinengestell aus Mineralguss

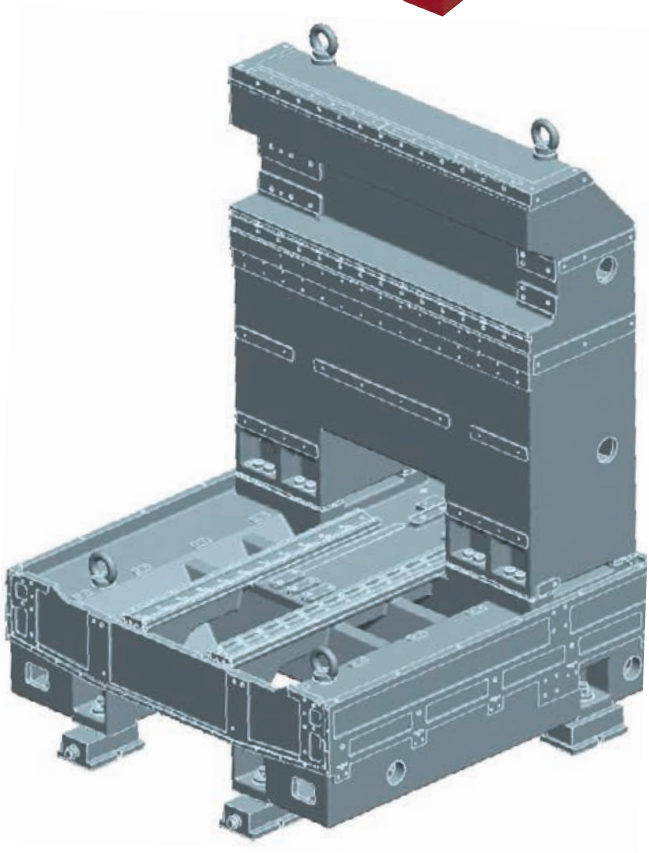


Bild 5.3: Maschinengestell aus Grauguss



Bild 5.4: Hydrostatikführung mit identischen Abmessungen wie eine Linear-Wälz-Führung um die Austauschbarkeit zu gewährleisten (Werkbild INA)

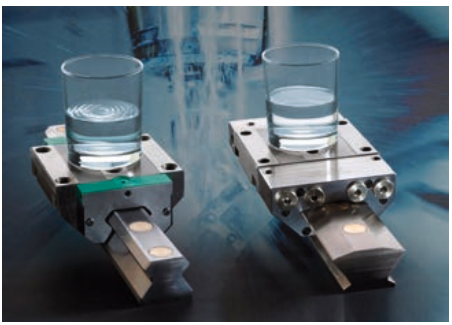


Bild 5.5: Dämpfungsversuch: Links mit einer Wälzführung, rechts mit einer Hydrostatik-Führung (Werkbild INA)

Vorschubantriebe ermöglicht. Eine weitere Verbesserung, insbesondere im Dämpfungsverhalten, wird mit Hydrostatikführungen erreicht. Von einigen Wälzlagerherstellern werden diese serienmäßig angeboten.

5.4 Hauptantriebe

Grundsätzlich ist bei der Projektierung von geregelten Hauptantrieben zu entscheiden, ob Synchron- oder Asynchronmotoren eingesetzt werden sollen. Entscheidend ist dabei, ob der Motor nur im Drehzahl-Regelkreis betrieben werden soll (z. B. als Spindelantrieb für Bohr- und Fräswerkzeuge), oder im Positions-Regelkreis (wie z. B. bei Drehmaschinen mit zusätzlichen C-Achs-Antrieb).

Als Spindelantrieb von Werkzeugmaschinen werden heute ausnahmslos drehzahlgeregelte Elektromotoren eingesetzt mit zwei Hauptaufgaben:

1. Das für den Arbeitsprozess benötigte **Drehmoment** und die geforderten **Drehzahlen** zur Verfügung stellen,
2. Die **Interpolation der Hauptspindelumdrehung** mit den Vorschubantrieben zu ermöglichen, wenn bei Dreh- oder Bearbeitungszentren der Betrieb als C-Achse gefordert wird.

Durch den automatischen Arbeitsablauf bei CNC-Maschinen müssen die Hauptantriebe zusätzliche Anforderungen erfüllen, die teilweise über die von Antrieben konventioneller Maschinen hinausgehen. Dies sind insbesondere:

- **Automatisierte Drehzahländerung**
  Der automatische Arbeitsablauf erfordert auch einen programmierbaren, automatischen Drehzahlwechsel
- **Feinstufige, möglichst stufenlose Drehzahländerung**
  CNC-Maschinen sind kapitalintensive Produktionsmittel mit einem hohen Stundensatz. Deshalb ist es wichtig, auch die Leistungsfähigkeit heutiger Werkzeuge optimal zu nutzen. Um beispielsweise die Schnittgeschwindigkeit beim Plan- oder Kegeldrehen aus technologischen Gründen konstant zu halten, ist eine stufenlose Drehzahländerung erforderlich.
- **Großer Drehzahlstellbereich**
  CNC-Maschinen sind Universalmaschinen, die unterschiedliche Werkstücke mit verschiedenen Werkzeugen bearbei-

ten sollen. Dazu muss die Arbeitsspindel einen großen Drehzahlbereich ohne Zwischenschaltung eines Schaltgetriebes abdecken, d. h. der gesamte erforderliche Stellbereich wird nur vom Motor erbracht.

- **Sehr schnelle Drehzahländerungen**
  Jeder Drehzahlwechsel bedeutet Zeitverlust. Dies macht sich besonders beim häufigen Werkzeugwechsel an Maschinen mit umlaufenden Werkzeugen bemerkbar, wie bspw. bei Bearbeitungszentren. Diese sind mit einem automatischen Werkzeugwechsler ausgerüstet und zu jedem Wechselvorgang muss die Spindel stillgesetzt werden.

  Daraus resultiert die Forderung nach möglichst kurzen Hochlauf- und Abbremsvorgängen des Spindelmotors.
- **Hohe Antriebsleistung**
  Der automatisch ablaufende Bearbeitungsprozess bei CNC-Maschinen macht ihn von der manuellen Bedienung und Reaktionsgeschwindigkeit unabhängig. Das ermöglicht einen vollständig geschlossenen Arbeitsraum. So können Arbeitsgeschwindigkeiten erreicht werden, die die Leistungsfähigkeit neuzeitlicher Werkzeuge voll ausnutzen. Das erfordert Antriebsleistungen, die beim Mehrfachen konventioneller Maschinen liegen.
- **Hoher Bereich konstanter Leistung**
  Die hohe Antriebsleistung sollte über einen möglichst großen Drehzahlbereich verfügbar sein.
- **Hohes Drehmoment bei niedriger Drehzahl**
  Im unteren Drehzahlbereich sollte ein möglichst hohes Drehmoment zur Verfügung stehen.
- **Kleiner Bauraum und geringes Gewicht**
  Bei vielen CNC-Maschinen ist der Hauptantriebsmotor Teil einer größeren mechanischen Baugruppe und wird mit diesem ständig verfahren. Daraus entsteht die Forderung nach einer möglichst geringen Masse und Größe des Motors, um die erreichbare Beschleunigung der gesamten Baugruppe nicht zu beeinträchtigen.
- **Geringe Wärmeentwicklung**
  Die nachteilige Auswirkung einer lokalen Erwärmung der Maschine auf die Genauigkeit wurde bereits erwähnt (Teil 2, 1.3).

Arten von Hauptantrieben *(Bild 5.6)*

Bei den Hauptantrieben stehen im Prinzip die gleichen Motorarten wie bei den Vorschubantrieben zur Verfügung. Der drehzahlgeregelte **Asynchronmotor** wird aufgrund seiner positiven Eigenschaften wie günstiger Preis, einfacher, robuster Aufbau und geringer Wartungsaufwand, vorzugsweise als Standard-Hauptantrieb eingesetzt. Für die Drehzahlverstellung wird er von einem Frequenzwandler gespeist und hat die lange dominierenden Gleichstrommotoren verdrängt. Er wird in verschiedenen Bauformen realisiert. Je nach Art des Hauptantriebes *(Bild 5.6)* können dies Gehäusemotoren oder Bausatzmotoren mit Hohlwelle sein *(Bild 5.7)*.

Um auch bei niedrigen Drehzahlen bis zur Drehzahl Null das volle Drehmoment zu gewährleisten, sind Gehäusemotoren für Hauptspindelantriebe immer fremd belüftet oder flüssigkeitsgekühlt ausgeführt. Bausatzmotoren für den direkten Einbau in die Spindel sind in der Regel immer flüssigkeitsgekühlt, da sowohl eine hohe Leistungsdichte bei vertretbarem Bauvolumen, als auch ein thermisch neutrales Motorverhalten zu gewährleisten ist.

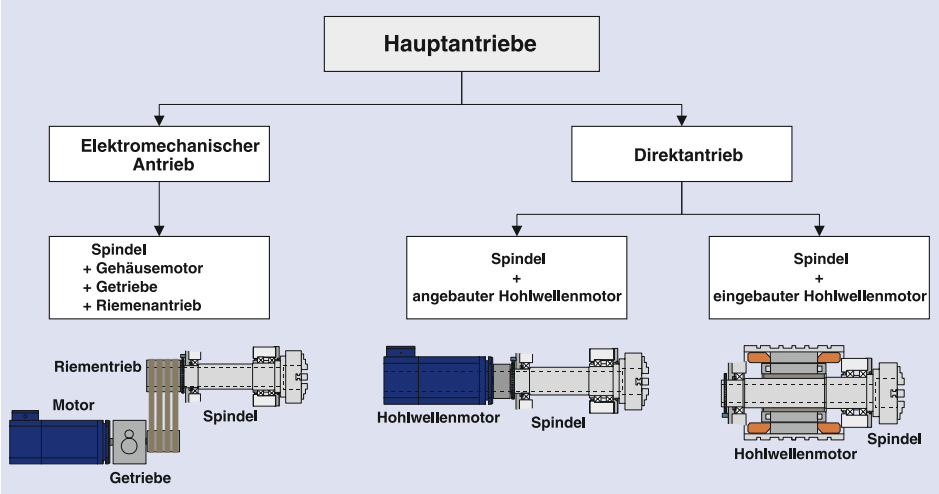


Bild 5.6: Arten von Hauptantrieben

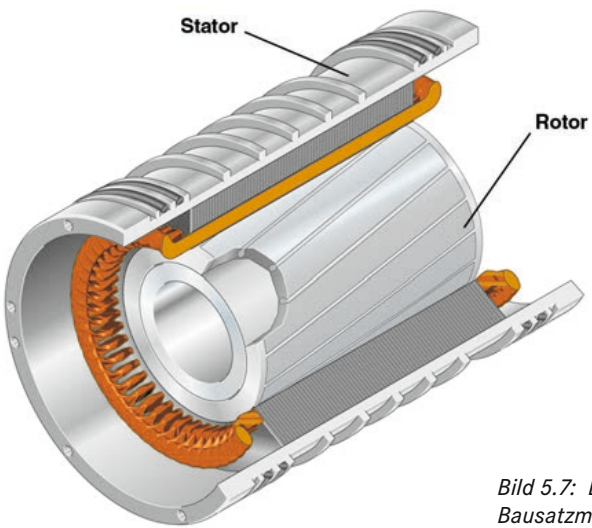


Bild 5.7: Drehstrom-Asynchron-Motor als Bausatzmotor mit Hohlwelle

Bauformen von Hauptantrieben

Die klassische Bauform des Hauptantriebes entsteht mit der Kopplung eines Gehäusemotors an die Werkzeugspindel über eine – teilweise mehrstufige – Getriebe- und/oder Riemenübersetzung. Diese Anordnung bietet den Vorteil, dass der Motor thermisch vom Bearbeitungsraum und von der Spindel entkoppelt ist. Der Motor kann an einer Stelle außerhalb des Bearbeitungsraums angebracht werden, sodass auf Hauptspindelmotoren mit standardisierten Anbaumaßen zurückgegriffen werden

kann. Der Riementrieb begrenzt jedoch Drehzahl, Steifigkeit und Dynamik des Antriebes und damit die Produktivität der gesamten Werkzeugmaschine.

Diese Nachteile führten zur direkt angetriebenen Spindel. Der Riementrieb bzw. das Getriebe wird eliminiert – das Drehmoment wird über den Rotor des Antriebsmotors direkt auf die Spindelwelle übertragen. Das System wird dadurch sehr drehzahlstabil und ermöglicht hohe Verstärkungsfaktoren sowie kurze Beschleunigungs- und Bremszeiten. Um das Werkstück spannen zu können, ist der Motor mit einer Hohlwelle ausgestattet. Da der Wärmeeintrag durch den Motor nicht direkt in die Spindel erfolgt, kann der Motor fremdbelüftet werden. Als Option ist auch eine Flüssigkeitskühlung möglich, mit welcher die Motorausnutzung weiter gesteigert werden kann. Diese Anordnung ist besonders für Bearbeitungszentren vorteilhaft.

Mit der direkten Integration des Antriebsmotors in die Spindel entstand die so genannte **Motorspindel**. Durch den direkten Einbau wird in der Regel eine Flüssigkeitskühlung erforderlich. Diese Ausführungsform des Hauptspindelantriebes wird zunehmend zum Standard im modernen Werkzeugmaschinenbau.

Bei beiden Bauformen des Direktantriebs treten, bedingt durch das Fehlen einer Drehzahlanpassung, folgende Anforderungen besonders in den Vordergrund:

- hohe Leistungsdichte
- großer Drehzahlstellbereich
- großer Bereich konstanter Leistung
- hohes Drehmoment bei geringen Drehzahlen
- hohe Maximaldrehzahl

Drehstrom-Asynchronmotoren

Der drehzahlgesteuerte Asynchronmotor hat sich auf Grund seiner positiven Eigenschaften, wie günstiger Preis, einfacher und robuster Aufbau sowie geringer Wartungsaufwand, zum Standardhauptantrieb entwickelt.

Durch Änderung von Ausgangsfrequenz und -spannung des speisenden Umrichters lässt sich die Drehzahl des Drehstrom-Asynchronmotors über einen weiten Stellbereich verändern. Die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien eines Drehstrom-Asynchronmotors bei Umrichterbetrieb werden als Grenzkennlinien angegeben *(Bild 5.8).*

Der Drehzahl-Regelbereich wäre dann, rein mathematisch gerechnet, „unendlich“, im Feldschwächbereich, d. h. bei konstanter Leistung, bis 1 : 12.

Der Verlauf der Grenzkennlinien wird durch die Höhe der Zwischenkreisspannung sowie durch die entsprechenden motorspezifischen Daten, wie z. B. Induktivität, Widerstand, Motorkonstante und Kippmoment bestimmt.

Im Grunddrehzahlbereich werden die Spannung und die Frequenz bis zur Bemessungsdrehzahl proportional erhöht. Der Motor entwickelt – bei Fremdkühlung – ein konstantes Drehmoment. Erreicht die Spannung bei der Bemessungsdrehzahl den Maximalwert, kann nur noch die Frequenz erhöht werden. Von hier an beginnt der so genannte Feldschwächbereich. Der Feldschwächbereich beginnt mit einem Bereich konstanter Leistung, in dem das Drehmoment hyperbolisch, d. h. umgekehrt proportional zur Frequenz bzw. Drehzahl (1/n) abnimmt. Bei weiterer Erhöhung der Drehzahl bzw. Speisefrequenz wird das Kippmoment bzw. die Kippgrenze des Motors erreicht. Das Kippmoment des Asynchronmotors nimmt quadratisch mit der Fre-

quenz bzw. Drehzahl ($1/n^2$) ab. Im Gegensatz zum Betrieb am Netz stellt die Kippgrenze des Motors bei modernen Umrichtern und entsprechenden Regelungen zunächst keine tatsächliche Grenze dar, da ein Kippen des Motors (drastische Reduzierung des Momentes bis hin zum Stillstand) verhindert wird. Die maximale Drehzahl wird somit nur durch mechanische Komponenten, wie z. B. Lager, Rotor, Rotorbefestigung usw. begrenzt.

Die Angabe der Grenzkennlinien erfolgt meist für Dauerbetrieb (Betriebsart S1) und für Aussetzbetrieb (Betriebsart S6) bei unterschiedlichen Einschaltdauern, häufig 25, 40 oder 60%.

Die Regelung bzw. Reglerstruktur eines Hauptantriebsmotors entspricht weitgehend dem eines modernen Vorschubantriebs. Heute anzutreffende Hauptantriebsregler sind lediglich um einige Funktionen,

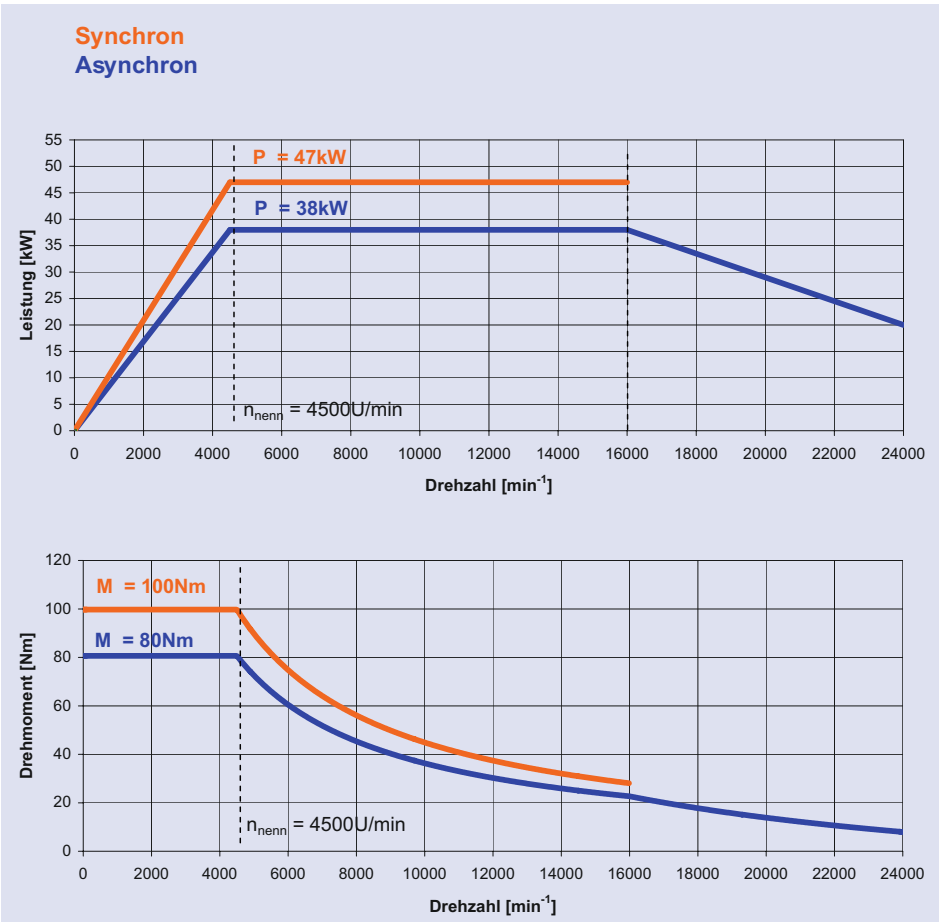


Bild 5.8: Drehzahlregelbereiche von Synchron- und Asynchronmotoren mit gleicher Leistung und gleichem Moment (Werkbild Kessler)

wie z. B. zur speziellen Feldregelung, ergänzt. Somit stellt auch der heute vor allem bei Drehmaschinen geforderte C-Achsbetrieb – die Interpolation der Hauptspindel mit den Vorschubantrieben – kein Problem dar.

Drehstrom-Synchronmotoren

Bei Werkzeugmaschinen wird der Synchronmotor in aller Regel und überwiegend als **Vorschubantrieb** eingesetzt *(siehe Teil 2, Kapitel 1 „Ausführung der Weginformationen“).*

Forderungen nach höherer Leistungsdichte und Temperaturstabilität führen in Sonderfällen auch bei Hauptantrieben zum Einsatz von permanent erregten **Drehstrom-Synchronmotoren.** Moderne, praxistaugliche Motorprinzipien und Regelverfahren lassen mittlerweile den Einsatz von solchen Antrieben in Serienmaschinen zu. Einer größeren Verbreitung stehen allerdings heute noch die höheren Kosten im Wege. **Drehzahlgeregelte Synchronmotoren** werden derzeit als Hauptantriebe vorwiegend dann eingesetzt, **wenn folgende Forderungen gestellt werden:**

- Höchste Anforderungen an Bearbeitungsgüte, Genauigkeit und Laufruhe
- Kürzeste Zeiten bei Hochlauf oder Drehzahlwechsel
- Stillstandsdrehmoment
- Kleiner Einbauraum

Dies ist insbesondere bei hochwertigen Drehmaschinen und Dreh-Fräszentren der Fall, wenn an der Stirn- oder Mantelfläche der Werkstücke Bohr- und Fräsarbeiten mit erhöhtem Qualitätsanspruch ausgeführt werden sollen.

Synchronmotoren werden in zwei Hauptausprägungen angeboten:

- High-Speed-Motoren
  Hierzu stehen vorwiegend 4-polige Synchronmotoren für die Fräsbearbeitung zur Verfügung. Diese Motoren sind für hohe Maximaldrehzahlen bis 40.000/min und einen großen Drehzahlstellbereich optimiert. Diese Motoren werden vorwiegend im Drehzahl-Regelkreis über Frequenzumrichter betrieben. Der Drehzahlregelbereich beträgt hierbei etwa 1 : 3 im Feldschwächbereich, der gesamte Drehzahlregelbereich wäre, rein mathematisch gerechnet, „unendlich“.
- High-Torque-Motoren
  Es stehen 6-polige/8-polige Synchronmotoren zur Verfügung, die für Dreh- und Schleifbearbeitungsmaschinen mit moderaten Maximaldrehzahlen entwickelt wurden. Diese Motoren sind durch eine sehr hohe Drehmomentausnutzung gekennzeichnet.

Der High-Speed-Synchronmotor hat eine weitaus höhere Bedeutung und Verbreitung als der schon aufgrund seiner begrenzten Stückzahl sehr hochpreisige Torquemotor.

Die Drehzahlregelung von Synchronmotoren wird ebenfalls über Spannung und Frequenz des zugeführten Drehstroms gesteuert. Um einen Synchronmotor stufenlos in der Drehzahl regeln zu können, muss ein **Frequenzumrichter** vorgeschaltet werden. Ein Drehgeber misst ständig sowohl Drehzahl als auch Rotorstellung und meldet diese an den Umrichter. Daraus ermittelt die Steuerungselektronik die erforderliche „elektronische Kommutierung“ zur Weiterschaltung des Drehfeldes und auch die tatsächliche Drehzahl.

Nutzen

Im Vergleich zu den preiswerteren Asynchronmotoren bieten Synchron-Spindelantriebe folgende Vorteile:

- Hoher Wirkungsgrad
- Geringes Massenträgheitsmoment, d. h. hohe Dynamik

- Wartungsarm (Bei Rotoren ohne Schleifringläufer)
- Drehzahl ist belastungsunabhängig
- Keine elektrische Leistung für Felderregung notwendig
- Bis zu 60 % höheres Drehmoment und damit kompaktere Maschinenkonstruktionen
- Kürzeste Hochlauf- und Bremszeiten (50 %) aufgrund des Drehmoments
- Hohes Stillstandsdrehmoment
- Hohes Drehmoment auch bei Stillstand und Drehrichtungswechsel
- Kompakte Konstruktion (z. B. für Drehmaschinen, Senkrechtfräsmaschinen) durch den Wegfall mechanischer Komponenten, wie Motorwippe, Riementrieb, Getriebekasten und Spindelgeber
- Hohe Leistungsdichte bei Wasserkühlung
- Maximaldrehzahlen bis 40.000 1/min, Drehmomente bis > 820 Nm
- Geringere Rotorerwärmung auf Grund der Bestückung mit Permanentmagneten. Daraus folgt: im unteren Drehzahlbereich wesentlich geringere Verlustleistung im Rotor und damit weniger Lagererwärmung und Spindelausdehnung
- Höchste Genauigkeit am Werkstück durch ruhigen, gleichmäßigen Spindellauf auch bei kleinsten Drehzahlen, da keine Antriebsquerkräfte wirken
- Interpolierender C-Achs-Betrieb mit den Vorschubantrieben, z. B. bei Drehmaschinen
- Größere Rotor-Innenbohrung als Käfigläufer von Asynchronmotoren bei gleichem Außendurchmesser. Vorteil für den Stangendurchlass von Drehautomaten und für höhere Spindelsteifigkeiten durch größeren Wellendurchmesser bei Frässpindeln.
- Erhöhte Steifigkeit des Spindelantriebes durch die Montage der Motorkomponenten zwischen den Spindelhauptlagern
- Weniger Kühlleistung erforderlich bei gleicher Leistung gegenüber Asynchronmotoren, d. h. höherer Wirkungsgrad
- Nur ein Geber (Hohlwellenmesssystem) zur Erfassung von Motordrehzahl und Spindellage
- Einfacher Service durch Austausch von kompletten Motorspindeln

Weitere Rationalisierungspotentiale, wie geringere Teilebearbeitungszeiten und Aufstellungsflächen, ergeben sich durch optimierte Kombination von Synchron-Spindelmotor, Antriebsregelung und CNC-Steuerung.

Dagegen stehen die wenigen Nachteile:

- Teures Magnetmaterial, d. h. hohe Anschaffungskosten für permanent erregte Motoren
- Hoher Regelaufwand (Frequenzumrichter)
- Evtl. störende Pfeiftöne des Motors

5.5 Maschinenverkleidung

Bei der Behandlung der Hauptantriebe wurde schon darauf hingewiesen, dass der automatische Arbeitsablauf die volle Ausnutzung der hohen Leistungsfähigkeit heutiger Schneidwerkzeuge ermöglicht. Das hat zur Folge, dass die Späne mit hoher Geschwindigkeit weggeschleudert werden und damit Verletzungsgefahr für Personen in der Umgebung besteht. Dem muss durch eine entsprechende Verkleidung und Absicherung des Arbeitsraumes Rechnung getragen werden.

Bei kleinen und mittleren Maschinen sind solche Verkleidungen meist eine am Maschinenkörper angebrachte allseitige, oft mit dem Schaltschrank kombinierte und sogar nach oben geschlossene Blechkonstruktionen. Damit bilden sie mit der

Maschine eine Transporteinheit, eine so genannte Hakenmaschine. Die Maschinenverkleidungen dienen dann nicht nur dem Späneschutz, sondern halten das vernebelte Kühlmittel zurück und bilden auch einen guten Schutz gegen das Prozessgeräusch. Sie sind zentrales Mittel für den Unfallschutz und unterliegen diesbezüglich vielfältigen Vorschriften. Andererseits sollen sie ein leichtes Bedienen, Pflegen und Warten der Maschine ermöglichen. Sie müssen daher umfangreichen Anforderungen genügen, die sich oft widersprechen.

So müssen die Verkleidungen den Arbeitsraum für das Einrichten und den Werkstückwechsel gut zugänglich machen. Sie haben dazu meistens große Türen, um den Arbeitsraum freizugeben. Diese müssen bei arbeitender Maschine aber verriegelt sein oder den Arbeitsablauf beim Öffnen wenigstens sofort unterbrechen. Die Türen und oft auch andere Teile der festen Verkleidung sind mit Fenstern versehen, damit der Arbeitsablauf gefahrlos beobachtet werden kann. Diese Fenster müssen dem „Beschuss“ mit Spänen standhalten, ohne blind zu werden. Das ist nur mit Silikatglas möglich. Andererseits müssen sie aber bei nicht grundsätzlich vermeidbaren Kollisionen auch dem Anprall großer Teile, z. B. wegfliegender Werkstücke, Spannmittel oder Werkzeuge, standhalten. Da ist eine elastische Kunststoffscheibe günstiger. Deshalb werden hier oft Verbundscheiben eingesetzt. Wichtig ist auch, dass die Scheibe in einem Rahmen fest verankert ist, sodass sie nicht leicht herausgedrückt werden kann.

Die ganze Maschine einschließende Verdecke behindern vielfach den Zugang zu Bereichen, die für Reinigungs- und Wartungsarbeiten zugänglich sein müssen. Sie müssen deshalb leicht abnehmbar oder zu öffnen sein.

Oft wird auch die Bedientafel mit der Tastatur und dem für die CNC und mit weiteren Bedienelementen für die manuelle Betätigung der Maschinenbewegungen für das Einrichten und für Wartungsarbeiten in der Verkleidung integriert.

Schließlich bestimmen die Verdecke ganz wesentlich das Erscheinungsbild der Maschine und sind daher Bildschirm wichtiger Ansatzpunkt für ihre Gestaltung. Natürlich unterliegen sie auch, wie alle Bestandteile der Maschine einem starken Kostendruck, zumal sie leicht mehr als notwendiges Übel und nicht als wichtiges Funktionsteil angesehen werden.

5.6 Kühlmittelversorgung

Da sich das Werkzeug bei CNC-Maschinen frei im Arbeitsraum bewegen kann, muss die Zufuhr des Kühlmittels mit dem Werkzeug gekoppelt werden. Dazu wird bei Drehmaschinen das Kühlmittel über den Revolver dem in Arbeitsstellung befindlichen Werkzeughalter zugeführt, der es über ein voreingestelltes Rohr der Schneide zuführt. Bei umlaufenden Werkzeugen wird es über die Arbeitsspindel dem Werkzeug zugeführt. Wegen der starken Vernebelung wird aber zunehmend auf Trockenbearbeitung übergegangen.

5.7 Späneabfuhr

Infolge der hohen Produktivität numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen fällt eine große Menge Späne pro Zeiteinheit an, die ohne Beeinträchtigung des Arbeitablaufs aus der Maschine herausgebracht werden sollte. Auf die Probleme des freien Spänefalls und die Unterbringung der dazu notwendigen Späneförderer in der Maschine wurde im Zusammenhang mit der Maschinenkonfiguration schon eingegangen.

Je nach Form der Späne werden ver-

schiedene Arten von Förderern eingesetzt. Am weitesten verbreitet und am universellsten sind Scharnierbandförderer. Für sehr kleine und krümelige Späne sind Kratzenförderer besser geeignet. Magnetförderer sind nur bei Stahlspänen einzusetzen.

5.8 Zusammenfassung

Der durch die numerische Steuerung ermöglichte automatische Arbeitsablauf hat einen unfangreichen Einfluss auf die Maschinengestaltung, weil die andauernde Bedienung und Beobachtung durch den Facharbeiter entfällt. Damit wird es möglich, die Maschine ganz auf die optimale Durchführung der Bearbeitung auszulegen und die gestiegene Leistungsfähigkeit der Werkzeuge voll auszunutzen. Dies macht eine entsprechend hohe Leistung des Hauptantriebs und einen allseitig geschlossenen Arbeitsraum nötig. Die große Produktivität der Maschinen hat einen hohen Anfall von Spänen zur Folge, die automatisch abgeführt werden müssen.

Den aufgrund des automatischen Arbeitsablaufs erhöhten Anforderungen an die Genauigkeit muss insbesondere bei der Gestaltung der Maschinenkörper und der Führungen Rechnung getragen werden.

Aber auch die Lageregelkreise der CNC stellen Forderungen an die Gestaltung der Maschinen. So sollten bewegte Teile, insbesondere bei Antrieb durch Linearmotoren, möglichst leicht sein. Die Führungen sollten geringe Reibung haben und stick-slipfrei sein.

Weitere Anforderungen an die Maschinengestaltung gehen von dem automatischen Werkzeug- und Werkstückwechsel aus, der oft einen erheblichen Platzbedarf hat.

Einfluss der CNC auf Baugruppen der Maschine



Das sollte man sich merken:

1. CNC-Maschinen sind automatisch arbeitende Maschinen. Sie sind nicht von der Bedienung durch den Facharbeiter abhängig. Deswegen haben sie oft einen anderen Aufbau als konventionelle Maschinen. Insbesondere sollten sie, auch wegen des Arbeitens mit sehr hohen Schnittgeschwindigkeiten, einen allseitig geschlossenen Arbeitsraum haben.
2. Die Maschinengestelle sollten eine hohe statische, dynamische und thermische Stabilität haben, um eine ungestörte automatische Fertigung zu erreichen.
3. Die hohen Anforderungen an die Führungen haben bewirkt, dass zunehmend Wälzführungen eingesetzt werden.
4. Als Hauptantriebe werden vorwiegend frequenzgeregelte Drehstrom-Asynchronmotoren eingesetzt.
5. In zunehmendem Umfang werden direkt angetriebene Motorspindeln verwendet, insbesondere, wenn gleichzeitig Positionieraufgaben oder die Synchronisierung mit Vorschubbewegungen verlangt werden.
6. Maschinenverkleidungen haben sehr unterschiedliche Aufgaben:
   - Schutz vor umherfliegenden Spänen,
   - Zurückhalten des Kühlmittelnebels,
   - Beobachten des Arbeitsablaufs ermöglichen,
   - Rüsten der Maschine und Aufspannen des Werkstücks ermöglichen,
   - Zurückhalten von bei Kollisionen wegfliegenden Teilen.
7. Die Kühlmittelzufuhr muss mit dem Werkzeug gekoppelt werden, bei umlaufendem Werkzeug muss es durch die Spindel zugeführt werden.
8. Die Späne müssen so abgeführt werden, dass sie nicht den Arbeitsablauf stören und auch nicht das Maschinengestell lokal aufheizen.

TEIL 3

Die Arten von numerisch gesteuerten Maschinen

1 CNC-Werkzeugmaschinen

Der Einfluss numerischer Steuerungen auf den Werkzeugmaschinenbau führte im Verlauf der Entwicklung zu teilweise völlig neuen Maschinen und zusätzlichen mechanischen Automatisierungseinrichtungen. Heute ist die CNC-Maschine der Grundbaustein moderner Fertigungseinrichtungen.

Nachfolgend werden die Maschinenarten in der Rangfolge, entsprechend ihrer Bedeutung auf dem Markt, behandelt. Grundlage dazu sind die Umsatzzahlen des Vereins Deutscher Werkzeugmaschinenhersteller.

1.1 Bearbeitungszentren, Fräsmaschinen

Bearbeitungszentren sind Werkzeugmaschinen, die erst aufgrund der Entwicklung von numerischen Steuerungen entstanden sind. Sie wurden aus Werkzeugmaschinen mit umlaufendem Werkzeug, also Bohrmaschinen, Fräsmaschinen oder Bohrwerken, in dem Bestreben entwickelt, in einer Aufspannung möglichst umfangreiche Bearbeitungen im automatischen Ablauf zu ermöglichen. Daraus ergibt sich die Definition:

Ein Bearbeitungszentrum ist eine in mindestens drei Achsen numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine mit einer automatischen Werkzeugwechseleinrichtung und einem Werkzeugspeicher.

Verfügt die Maschine auch über Möglichkeiten zur Bearbeitung mit umlaufendem Werkstück, so spricht man auch von einem **Drehzentrum** oder **Dreh-Fräs-Zentrum.**

Fräsmaschinen ohne automatischen Werkzeugwechsel sind heute die Ausnahme. Einfache, kleinere derartige Maschinen werden heute, vorzugsweise auch für Lehrzwecke, wegen des günstigeren Preises und der kompakten Bauweise konventioneller hergestellt.

Bearbeitungszentren sind in vielen Ausführungsformen bekannt. Zunächst unterscheidet man nach der Lage der Arbeitsspindel zwischen **Horizontal- und Vertikalmaschinen** *(Bild 1.1 und 1.2)*. Während Vertikalmaschinen bevorzugt für die Bearbeitung flacher, plattenförmiger oder sehr langer Werkstücke eingesetzt werden, dienen Horizontalmaschinen mehr der Bearbeitung von kastenförmigen Werkstücken. Ein wichtiger Unterschied ergibt sich dabei: Bei Vertikalmaschinen liegt die Y-Achse horizontal, bei Horizontalmaschinen vertikal. Entsprechend ist bei Horizontalmaschinen die Ständerbauweise mit etwa kubischem Arbeitsraum vorherrschend wie beispielsweise *(Bild 1.4)*, bei Vertikalmaschinen die Kreuztischbauweise oder bei großem Arbeitsraum die Portal- oder Gantrybauweise *(Bild 1.6)*.

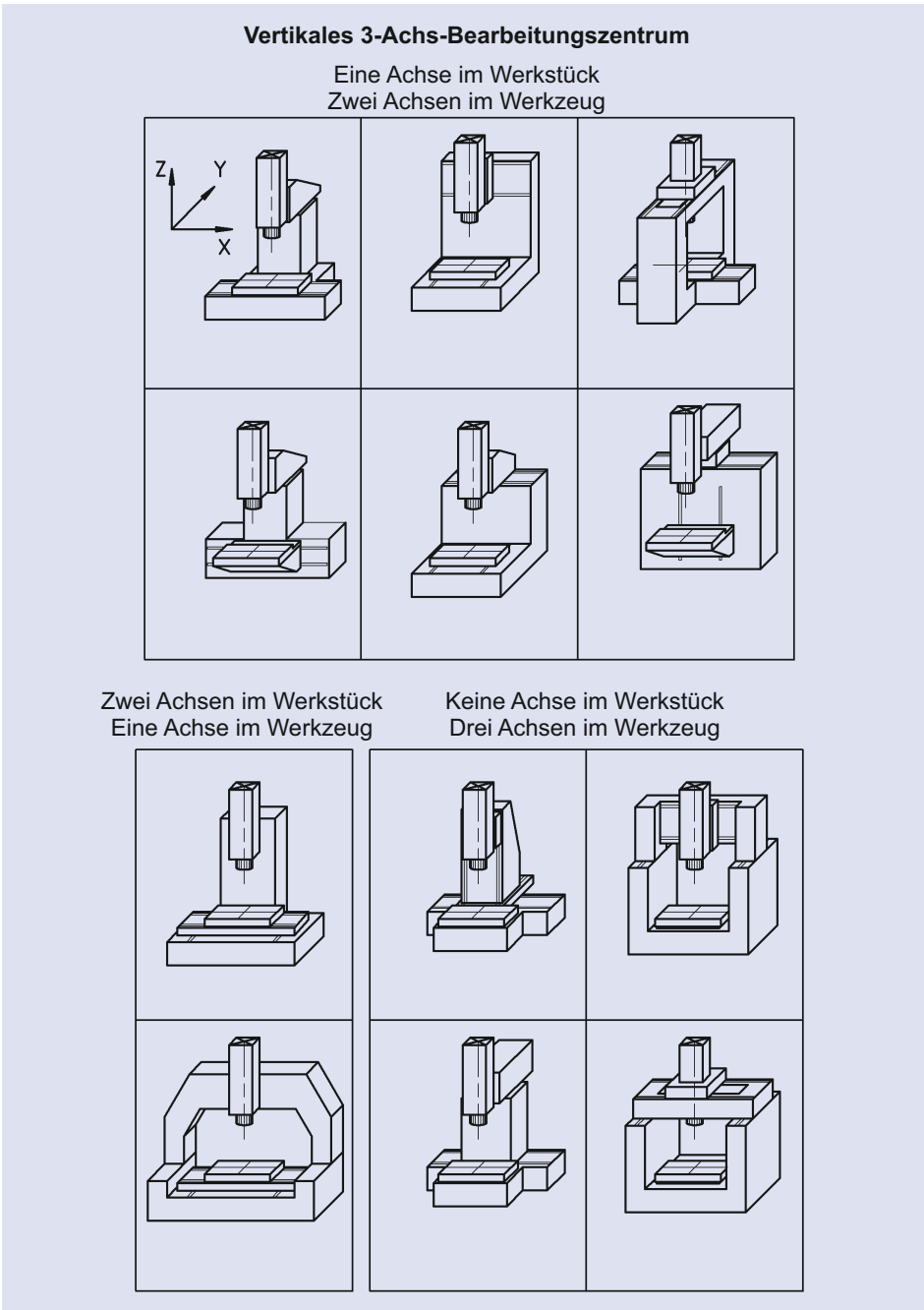


Bild 1.1: Verschiedene Bauformen von vertikalen 3-Achs-Bearbeitungszentren

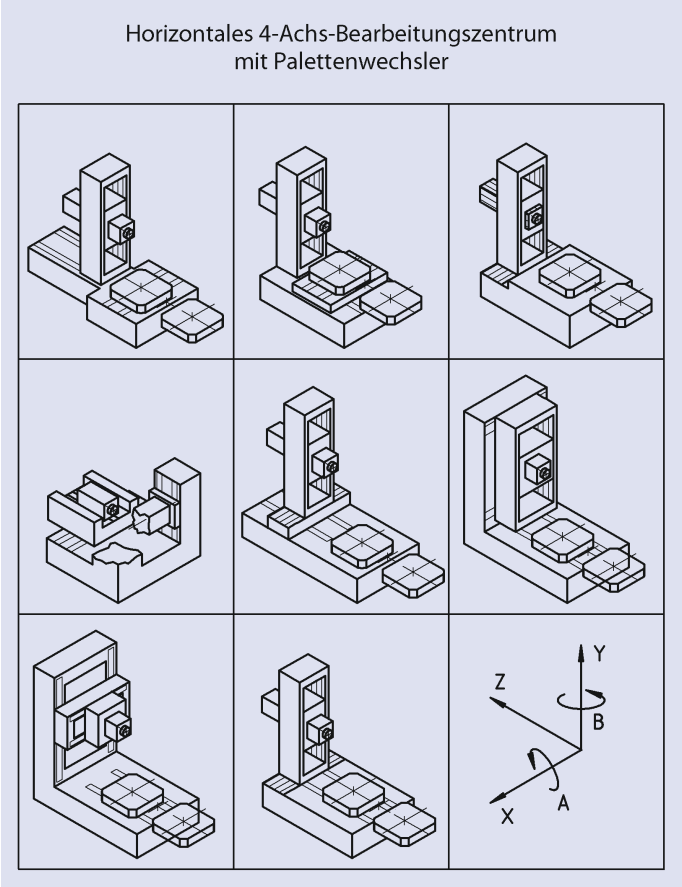
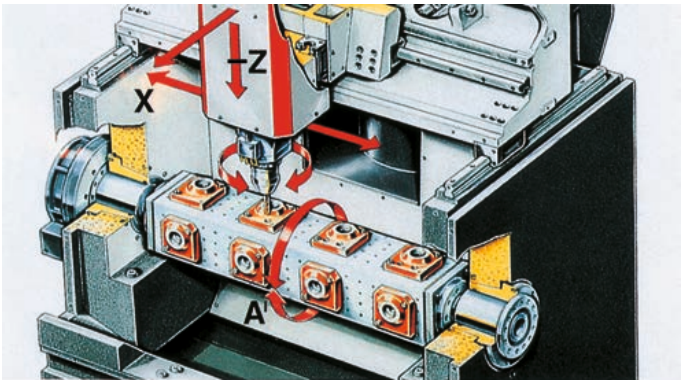


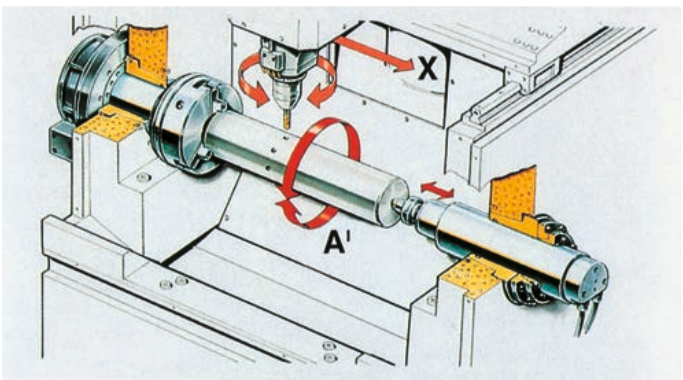
Bild 1.2: Verschiedene Bauformen von horizontalen 4-Achs-Bearbeitungszentren mit Palettenwechsler

Aufgrund der Anzahl der Vorschubachsen unterscheidet man:

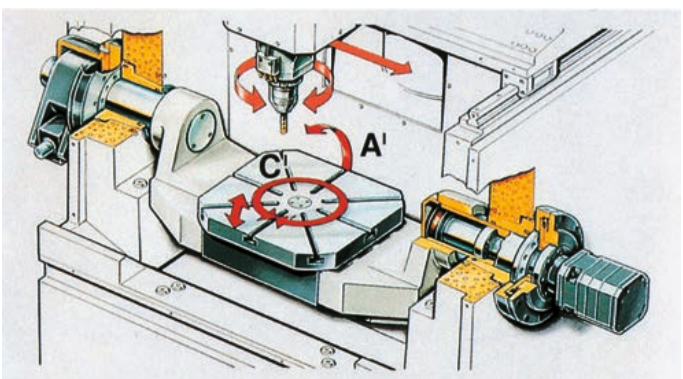
- 3-Achs-Maschinen: drei lineare Achsen, die Grundausstattung einer Maschine mit umlaufendem Werkzeug,
- 4-Achs-Maschinen: drei lineare und eine Drehachse, die Drehachse zur Ermöglichung einer Rundumbearbeitung, bei Horizontalmaschinen in Form eines Drehtisches, bei Vertikalmaschinen in Form eines Wendespanners zur Bearbeitung von Zylindermantelflächen, (*Bild 1.3*, Mitte) oder zur 3-Seiten-Bearbeitung kleiner Werkstücke, (*Bild 1.3*, oben).
- 5-Achs-Maschinen: drei lineare und zwei Drehachsen: damit kann das Werkzeug relativ zum Werkstück in jede beliebige Richtung gebracht werden, ist also das Fräsen beliebig im Raume liegender Flächen oder das Bohren jeglicher schräg liegender Bohrungen möglich. Dabei können die beiden Drehachsen beliebig auf die Werkstückaufnahme und die Werkzeugspindel aufgeteilt sein. Das führt zu einer großen Zahl unterschiedlicher Maschinenbauformen.



Mehrfach-Spannbrücke zur 3-Seiten-Bearbeitung kleiner Werkstücke



Wendespanner zur Bearbeitung von Zylindermantelflächen (A'-Achse)



Schwenkbarer Drehtisch zur 5-Seiten-Bearbeitung (A' und C')

Bild 1.3

Bearbeitungszentren werden heute ausnahmslos mit **Bahnsteuerung**en in mindestens drei bis fünf Achsen ausgerüstet, und zwar mit räumlicher (Simultan-)Interpolation in allen Achsen. Die Programmierung erfolgt deshalb auch vorwiegend über rechnergestützte **Programmiersysteme** und maschinenspezifische Postprozessoren. Für einfachere Bearbeitungsaufgaben und wegen der besseren Werkstatt-Flexibi-

lität bevorzugen erfahrene Anwender die **werkstattorientierte Programmierung (WOP).** Parametrierbare Fräs- und Bohrzyklen, die grafisch unterstützte Eingabe von Konturen mit grafischer Simulation der Bearbeitungsfolge und technologische Programmierhilfen zählen fast schon zur Standard-Ausrüstung.

Zu den unverzichtbaren CNC-Funktionen zählen Werkzeuglängen- und Fräserdurchmesser-Kompensationen, die automatische oder programmierbare Werkzeug-Überwachung, sowie in vielen Fällen die Temperaturfehler-Kompensation. Wichtig ist auch die **Bedienerfreundlichkeit** der CNC, damit das Wiederanfahren nach Unterbrechungen, die Eingabe von Daten und die gesamte Handhabung nicht zum zeitaufwändigen, teuren Problem werden.

3-Achs-Maschinen

Die Drei-Achs-(Fräs-)Maschine mit drei linearen Achsen ist die Grundausstattung eines Bearbeitungszentrums.

Die ausgeführten Bauformen als Vertikalmaschine sind in *Bild 1.1* dargestellt. Ausgeliefert an den Kunden werden diese Maschinen mit drei Achsen nur in wenigen Ausnahmefällen, da mit einem im Verhältnis zu den Gesamtkosten der Maschine nur relativ geringen Aufwand eine vierte oder auch fünfte Achse vorgesehen werden kann. Der Anbau eines Werkzeugwechslers oder auch Werkstückwechslers ergibt damit ein Bearbeitungszentrum mit hohem Automatisierungsgrad.

4-Achs-Bearbeitungszentren

Bestehen in der Regel aus **drei linearen CNC-Achsen und einem Drehtisch**, um kubische Werkstücke in einer Aufspannung auf vier Seiten bearbeiten zu können. Bei Verwendung eines horizontal/vertikal schwenkbaren Werkzeugkopfes kann auch die 5. Seite bearbeitet werden. Verschiedene Bauformen als 4-Achs-Maschinen in Horizontalbauweise werden in *Bild 1.2* gezeigt.

Es können **alle Zerspanungsarten** durchgeführt werden, wie Planfräsen, Bohren, Ausdrehen, Glattwalzen, Gewindebohren und bei weiterem Ausbau auch Konturfräsen, Schrägbohren oder Gewindedrehen. Drehzahlen und Vorschübe müssen zu jedem Werkzeug programmierbar sein *(Bild 1.3)*.

Die Werkzeuge sind in einem mit der Maschine verbundenen **Werkzeugspeicher** untergebracht, werden durch das Programm automatisch gesucht und in die Arbeitsspindel eingewechselt. Ausführung und Aufnahmekapazität der Werkzeugmagazine sind sehr unterschiedlich. Ketten-, Teller- und Kassettenmagazine werden am häufigsten verwendet.

Zusätzliche **Werkstück-Wechseleinrichtungen**, meist als Palettenwechsler ausgeführt, verkürzen die Stillstandszeit der Maschine beim Werkstückwechsel. Das Auf- und Abspannen der Werkstücke erfolgt während der Hauptzeit außerhalb des Arbeitsraumes der Maschine.

Komplexere Zentren verfügen noch über weitere Einrichtungen, wie beispielsweise einen zweiten Drehtisch, eine Schwenkvorrichtung für das Werkstück oder einen horizontal/vertikal auf jeden Winkel einstellbaren Werkzeugkopf.

Dem Anwender stehen heute viele unterschiedliche Bauarten und -größen zur Auswahl. Dabei muss zunächst zwischen Maschinen mit **horizontaler oder vertikaler Arbeitsspindel** unterschieden werden. Während vertikale Arbeitsspindeln im Allgemeinen für plattenförmige Teile besser geeignet sind, werden zur 4- oder 5-Seiten-Bearbeitung kubischer Werkstücke vorwiegend Maschinen mit horizontaler Spindel eingesetzt.

Bei Maschinen mit horizontaler Spindel werden die X-Bewegung (längs) und die Drehbewegung überwiegend vom Werkstück ausgeführt, Y- und Z-Bewegung macht das Werkzeug. Daraus ergibt sich die Achsbezeichnung X'YZB'.

Bei den Bearbeitungszentren mit vertikaler Spindel dominiert die Bauart X'Y'ZA', d. h. lediglich die senkrechte Spindelbewegung in der Z-Achse wird vom Werkzeug ausgeführt, alle anderen Bewegungen macht das Werkstück.

Die universelle Vielseitigkeit eines Bearbeitungszentrums wird nur mit einer Bahnsteuerung voll genutzt. Mit zunehmender Komplexität der Werkstücke und aufgrund neuer Maschinenkonzepte sind für heutige Bearbeitungszentren **3D-Steuerungen** erforderlich, die zumindest in allen Achsen gleichzeitig linear interpolieren können. Beim Einsatz eines schwenkbaren Werkzeugkopfes müssen für eine schräge Bohrung 3 Achsen linear interpolieren. Für Plandrehköpfe kommen eine oder zwei weitere Achsen hinzu. Eine oft gestellte Forderung für den uneingeschränkten Einsatz sind **mehrere Korrekturwerttabellen** für Werkzeuglänge, Fräserdurchmesser, Reststandzeit und Schnittwerte aller Werkzeuge. Für neuere Maschinen muss die CNC auch noch Werkzeuggewicht, Werkzeugkennung, Werkzeugkontur und viele zusätzliche Kenndaten speichern, um eine einwandfreie **Werkzeugverwaltung** zu ermöglichen.

Fünf-Achs-Bearbeitungszentren
(Bild 1.4)

Der Marktanteil dieser Maschinen ist in den letzten Jahren im Vergleich zu anderen Maschinen überproportional gestiegen und

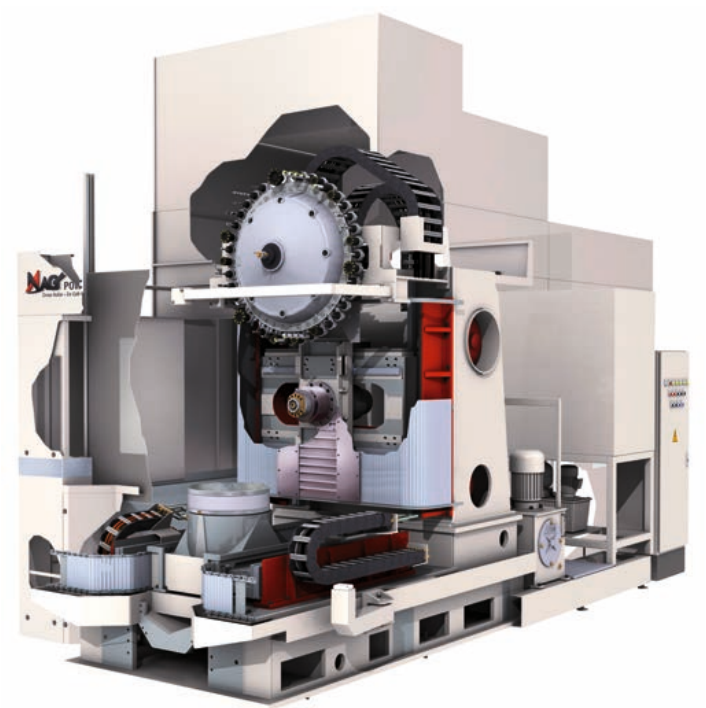


Bild 1.4: Modernes Bearbeitungszentrum mit Linearmotoren in X-, Y-, und Z-Achse (Werkbild MAG IAS GmbH)

sie werden sowohl in der Serienfertigung als auch als verkettete Systeme in der Automobilindustrie eingesetzt. Bearbeitungszentren mit fünf numerisch gesteuerten Achsen können den Werkzeugeingriff an jedem beliebigen Punkt des Werkstückes positionieren, auf der Oberfläche entlangfahren und dabei jeden gewünschten Winkel zur Werkstück-Oberfläche einhalten. Diese universelle Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück kann prinzipiell auf drei Arten erreicht werden, nämlich *(Bild 1.5)*:

1. mit feststehendem Werkstück und **zwei Schwenkachsen des Werkzeuges,** 1) und 2).
2. mit feststehender Werkzeugachse und **zweifacher Schwenkbewegung des Werkstückes**, z. B. durch einen schwenkbaren Drehtisch 3), oder
3. mit je einer Schwenkbewegung der Werkzeugachse und des Werkstückes, die um 90 ° gegeneinander versetzt sind, 4).

Mit solchen Maschinen lassen sich sowohl geometrisch komplizierte Teile herstellen, als auch bei der Bearbeitung gekrümmter Flächen Messerköpfe mit höherer Spanleistung anstelle der sonst üblichen Finger- oder Kugelfräser verwenden. Die **Programmierung** fünfachsiger Simultanbewegungen ist nur mit leistungsfähigen Programmiersystemen möglich. Der maschinenspezifische Postprozessor muss dann noch die Kinematik der zu steuernden Maschine berücksichtigen, damit das Werkzeug exakt die gewünschte Bewegung ausführt. Deshalb müssen auch die tatsächliche Länge und der Durchmesser des Werkzeuges genau mit den bei der Programmierung angenommenen Werten übereinstimmen, denn nur wenige CNC-Fabrikate verfügen über die sonst erforderliche räumliche Werkzeug-Korrekturmöglichkeit.

Portalfräsmaschinen mit verfahrbarem Portal (Gantry-Type)
(Bild 1.6)

Dieser Maschinentyp wird dann bevorzugt, wenn folgende Bedingungen zu beachten sind:

Werkstück: Flache oder gleichartige lange Bauteile.
Werkstatt: Eingeschränkte Aufstellfläche.
Bedienung: Bequeme Bedienung der Maschine in Frässpindelnähe durch mitfahrenden Bedienungsstand und CNC.
Planung: Möglichkeit, die Maschine nachträglich zu verlängern.

Ab einer gewissen Maschinengröße werden zum Verfahren des Portals in der X-Achse zwei **Vorschubantriebe** erforderlich, d. h. je ein Antrieb auf jeder Seite des Portals. Eine **Schräglagenüberwachung** durch die CNC und ebenfalls beidseitige Messsysteme verhindern ein Schränken des Portals. Durch gleich- oder gegenläufige Bewegungen (Spiegeln) in der Y- und A-Achse ist es möglich, zwei gleiche oder zwei spiegelbildliche Bauteile (links und rechts) **gleichzeitig** zu fertigen.

Bei anderen Ausführungen wird auch die Rückseite des Querträgers mit Fräseinheiten bestückt, sodass zwei Werkstückgruppen hintereinander aufgespannt und bei gleicher X-Bewegung gleichzeitig bearbeitet werden können.

Bei diesen Maschinengrößen ist ein **bewegliches Steuergerät** zum Einrichten der Maschine unerlässlich. Die größten und teuersten **3D-Bahnsteuerungen** mit allen Ausbaustufen, wie z. B. parallele Achsen, Schräglagenüberwachung, Temperaturkompensation, werden an diesen Maschinentypen eingesetzt.

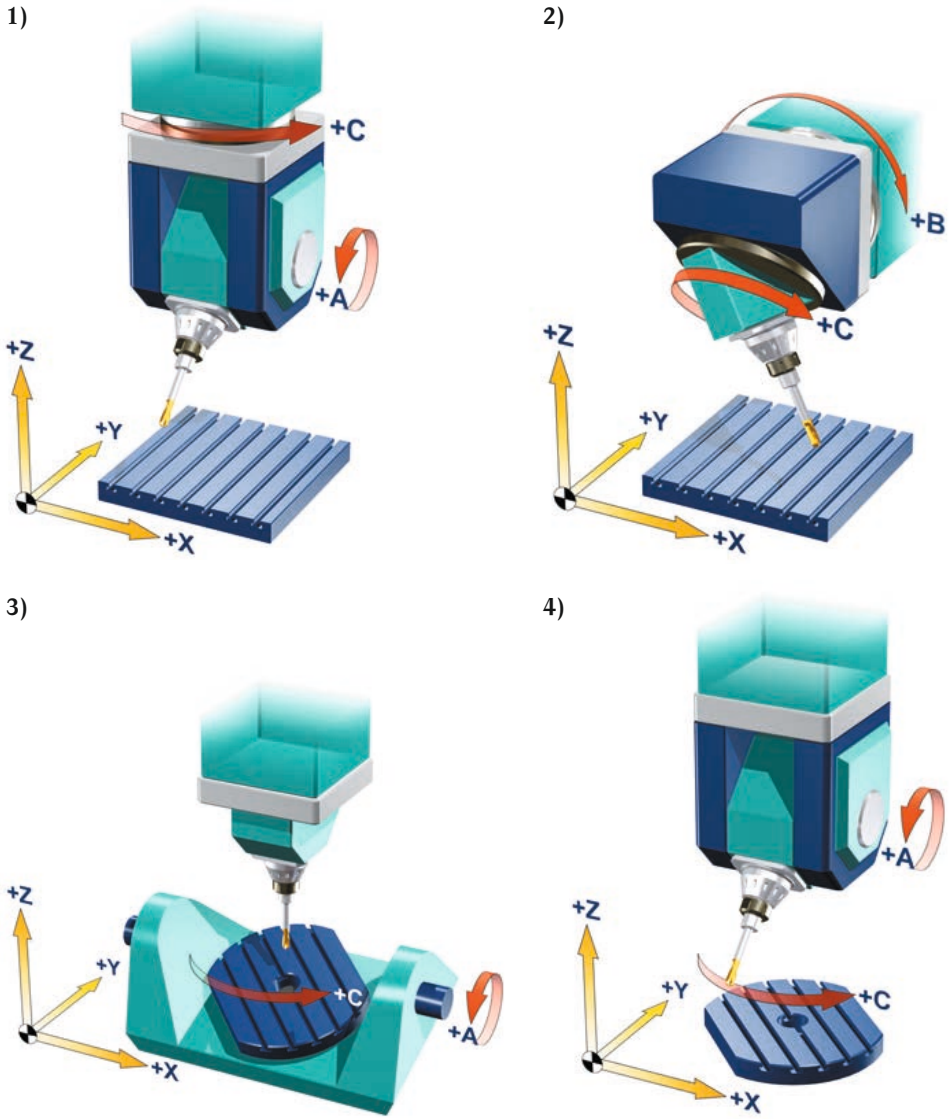


Bild 1.5: Vier Möglichkeiten der Kinematik von 5-Achs-Bearbeitungszentren zur 3D-Bearbeitung

Mehrspindlige Bearbeitungszentren

Alle o. g. Maschinen können als 2-spindlige, 3-spindlige, 4-spindlige Maschinen ausgeführt werden, um mehrere identische Werkstücke gleichzeitig bearbeiten zu können. Besonders in der Großserienfertigung sind 2-, 3- und 4-spindlige Maschinen im Einsatz, was auch entsprechende Mehrfachspannvorrichtungen erfordert.

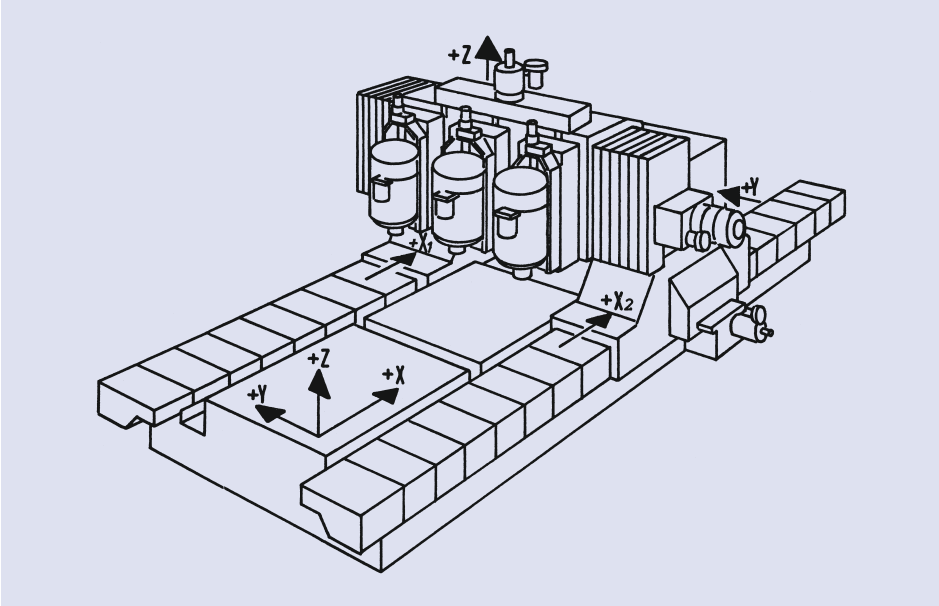


Bild 1.6: 3-Achsen Gantry-Fräsmaschine mit drei Fräseinheiten

Bei **mehrspindligen Maschinen** müssen alle Werkzeuge einheitliche Abmessungen aufweisen. Das identische Längenmaß wird entweder über voreingestellte Werkzeuge oder einzeln justierbare Spindeln erreicht. Im automatischen Betrieb erfolgt dabei der Längenausgleich der einzelnen Spindeln durch das Anfahren von justierten Messdosen.

Fräs-Dreh-Bearbeitungszentren
(Bild 1.7 bis 1.10)

Im Gegensatz zu Dreh-Fräszentren (siehe Punkt 1.2.2) entstand eine interessante Maschinengattung, deren Ursprung das Bearbeitungszentrum für das Fräsen war. Ausgangssituation für die Entwicklung solcher Maschinen war die Analyse von Teilespektren und Teilefamilien, die einerseits durch eine hohe Stückzahl gekennzeichnet sind, andererseits aber unterschiedliche Bearbeitungen verlangen. Ein herausragendes Beispiel dafür ist die Herstellung von Werkzeugsystemen für CNC-Maschinen (siehe Teil 4, Werkzeugsystematik für CNC-Maschinen, *Bild 1.1)*.

Es sind Fräs-Drehteile mit dem Schwerpunkt Fräsen. Die Teile verlangen eine anspruchsvolle 6-Seiten-Bearbeitung. Es sind oft Wiederholteile bis Kleinserien, die eine hohe Flexibilität des CNC-Programms verlangen. Die Werkstücke bewegen sich in der Regel innerhalb Durchmesser 60 mm und einer Länge von 100 mm. Diese Zentren werden auch oft „Stangenbearbeitungszentren“ genannt, weil die verschiedensten hochkomplexen Werkstücke direkt von der Stange zu fertigen sind. Bei der Bearbeitung stehen Fräsprozesse im Vordergrund, aber Drehoperationen werden ebenso effektiv durchgeführt, weil die Dreh-Schwenkeinheiten mit integrierten Drehspindeln ausgerüstet sind.

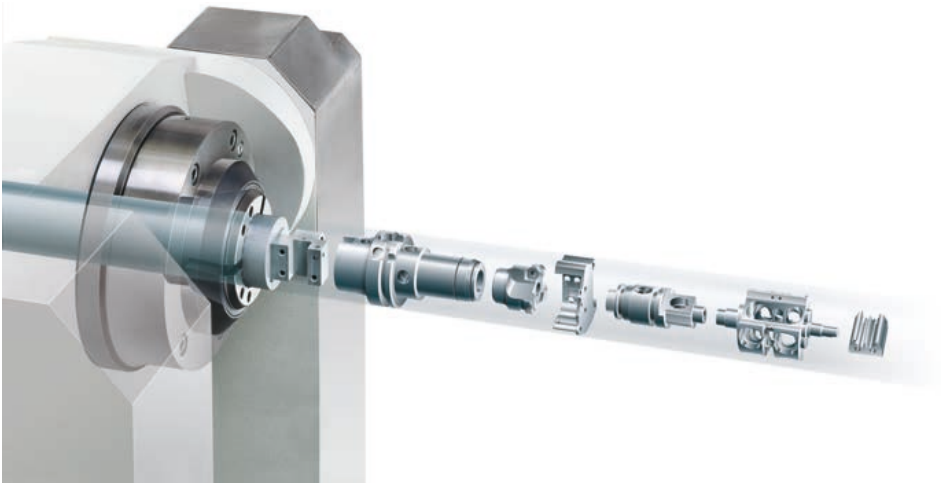


Bild 1.7: Moderne Fräs-Drehzentren sind Multifunktionsmaschinen (Werkbild STAMA)

Das Stangenmaterial wird aus dem Stangenspeicher der Hauptdrehschwenkeinheit zugeführt. Dabei werden die ersten fünf Seiten des Werkstückes 5-achsig simultan bearbeitet. Um die sechste Seite zu bearbeiten wird das Werkstück von der zweiten Dreh-Schwenkeinheit aufgenommen. Anschließend wird die sechste Seite bearbeitet.

Um eine effektive Auslastung der Maschine zu gewährleisten ist ein Werkzeugmagazin mit ca. 100 Werkzeugen empfehlenswert.

Trends in der modernen Zerspantechnologie

Hochgeschwindigkeitsbearbeitung (High-Speed-Cutting HSC)

Die Definition der Hochgeschwindigkeit wird im Allgemeinen anhand der Schnittgeschwindigkeit vorgenommen. Die Schnittgeschwindigkeiten liegen um den Faktor 5- bis 10-mal höher als im konventionellen Bereich. Sie sind jedoch werkstoffabhängig. Beim Hochgeschwindigkeitsfräsen wird mit einem relativ geringen Wirkdurchmesser am Werkzeug gearbeitet, womit sich deutlich höhere Spindeldrehzahlen ergeben als bei der konventionellen Bearbeitung. Somit erweitert sich die Definition von HSC beim Fräsen um die Faktoren hohe Werkzeugdrehzahlen verbunden mit hohen Vorschubgeschwindigkeiten *(Bild 1.11)*.

Trockenbearbeitung

Im Sinne der Umweltverträglichkeit gewinnt die Trockenbearbeitung zunehmend an Bedeutung. Dazu wurde in Forschungsprojekten die Möglichkeit des Einsatzes und der Reduzierung umweltverträglicher Fertigungshilfsstoffe untersucht (z. B. Minimalmengenschmierung). Parallel dazu wurden Werkzeuge für die Trockenbearbeitung entwickelt. Insbesondere in der Automobilindustrie und bei den Zulieferern der Automobilindustrie gewinnt die Trockenbearbeitung zunehmend an Bedeutung.

Hart-Zerspanung

Ebenso an Bedeutung gewinnt die Hart-Zerspanung, womit sich die Möglichkeit

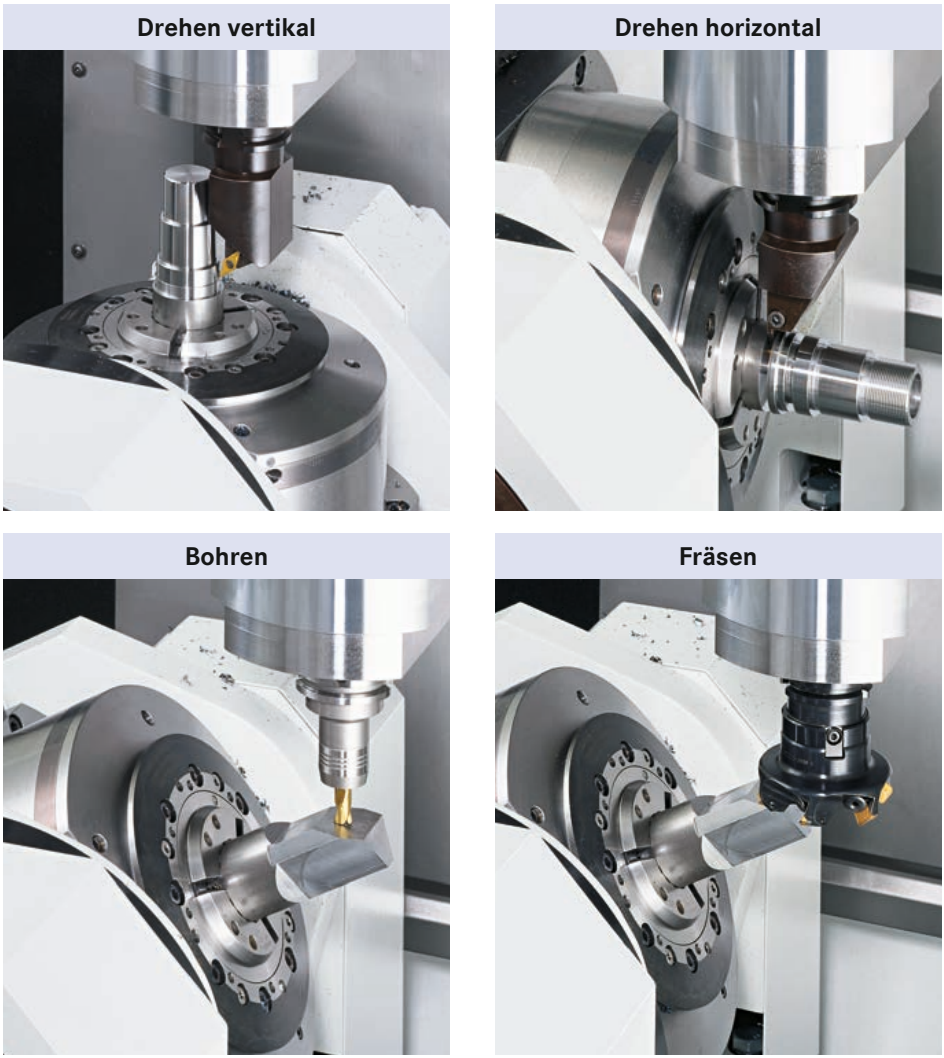


Bild 1.8: Mit modernen Fräs-Drehzentren sind alle Zerspanungstechnologien mit rotierender oder mit stehender Schneide möglich (Werkbild STAMA)

ergibt, hochgenaue Bearbeitung durch Zerspanen mit geometrisch bestimmter Schneide durchzuführen. Durch die Entwicklung geeigneter Werkzeuge und Technologien wurde es möglich, Werkstücke mit Härte bis zu ca. 62 HRC durch Drehen und Fräsen in Schleifqualität zu bearbeiten.

Die Hochleistungsbearbeitung/High-Performance-Cutting (HPC) hat das Ziel, durch eine Reduzierung der Hauptzeiten ein beträchtliches Kostenpotenzial zu erschließen, teilweise um über 50 % gegenüber bisherigen Technologien. Die Erhöhung des Zeitspanvolumens auf Basis

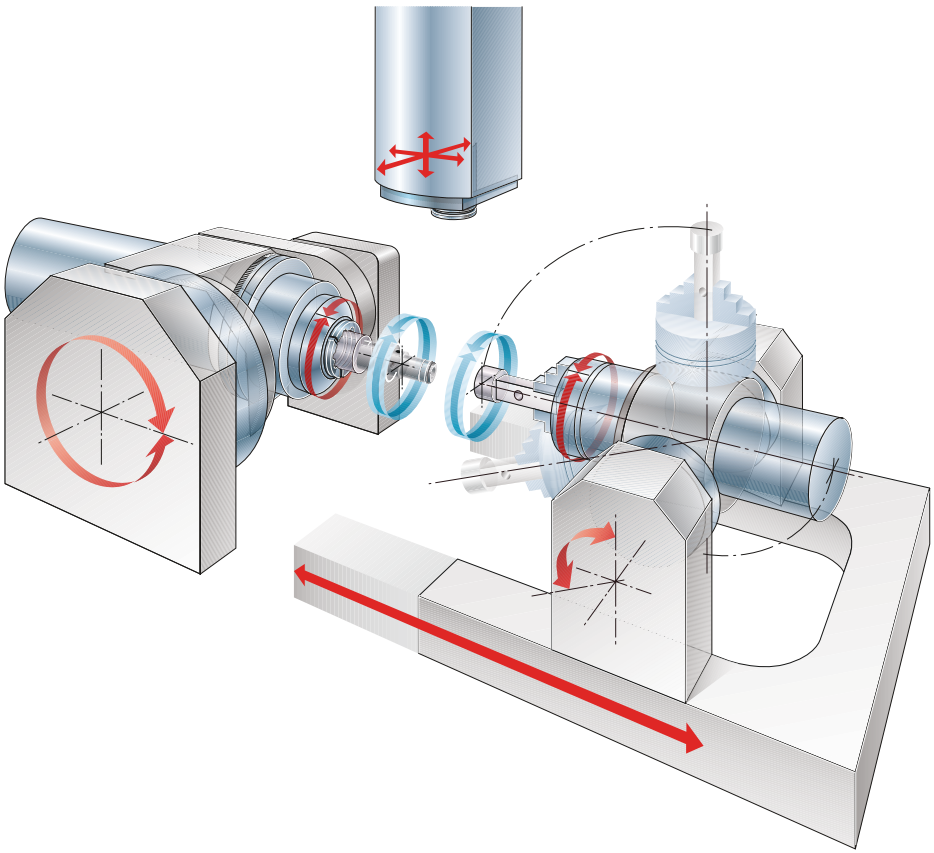


Bild 1.9: Fräs-Drehzentrum in der Ausführung mit Gegenspindel zur Bearbeitung der 6. Seite. Die Gegen(dreh)spindel ist ebenfalls um 120 Grad (– 30 bis + 90) schwenkbar und in Längsrichtung (X-Achse) verfahrbar (Werkbild STAMA)

neuer Werkzeugtypen und optimierter Maschinenkomponenten erhöht die Verfügbarkeit der eingesetzten Werkzeugmaschinen.

Voraussetzungen für die Werkzeugmaschine:

- hohe Steifigkeit und maximal mögliche Dämpfung um Schwingungen und Resonanzen zu vermeiden, was kurze Auskragungen und Schlitteneinheiten mit hoher Steifigkeit erfordert
- schwingungsfreie Spindelantriebe wegen der extrem hohen Umdrehungsfrequenzen
- geringe zu beschleunigende Massen um Beschleunigungswerte bis 3g und K_V-Faktoren 2 – 4 zu erreichen
- Absaugeinrichtungen, insbesondere bei HSC-Maschinen für die Aluminiumbearbeitung

Voraussetzungen an die Steuerung:

- kurze Blockzykluszeiten im Bereich von 1 Millisekunde, d. h. eine Verarbeitungs-



Bild 1.10: Auf einem Dreh-Fräszentrum hergestellte Werkstücke

geschwindigkeit von ca. 100 CNC-Sätzen pro Sekunde, da bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten die Zeiten zum Einlesen und Bereitstellen der in rascher Folge zu verarbeitenden CNC-Sätze sehr kurz sind.

- „Look-Ahead-Funktion“ – um Ecken und Kanten rechtzeitig zu erkennen. Um Konturverletzungen zu vermeiden, sollte der Vorschub kurzfristig automatisch reduziert werden, mit gleichzeitig entsprechender Anpassung der Spindeldrehzahl
- hohe Steifigkeit der Vorschubantriebe mit hohem K_V-Wert um die geforderten Beschleunigungen und Genauigkeiten zu erreichen
- „Nachlauf 0“, d. h. Verfahren der Achsen ohne Schleppfehler, um trotz der hohen Vorschubwerte eine gute Konturtreue zu erreichen.

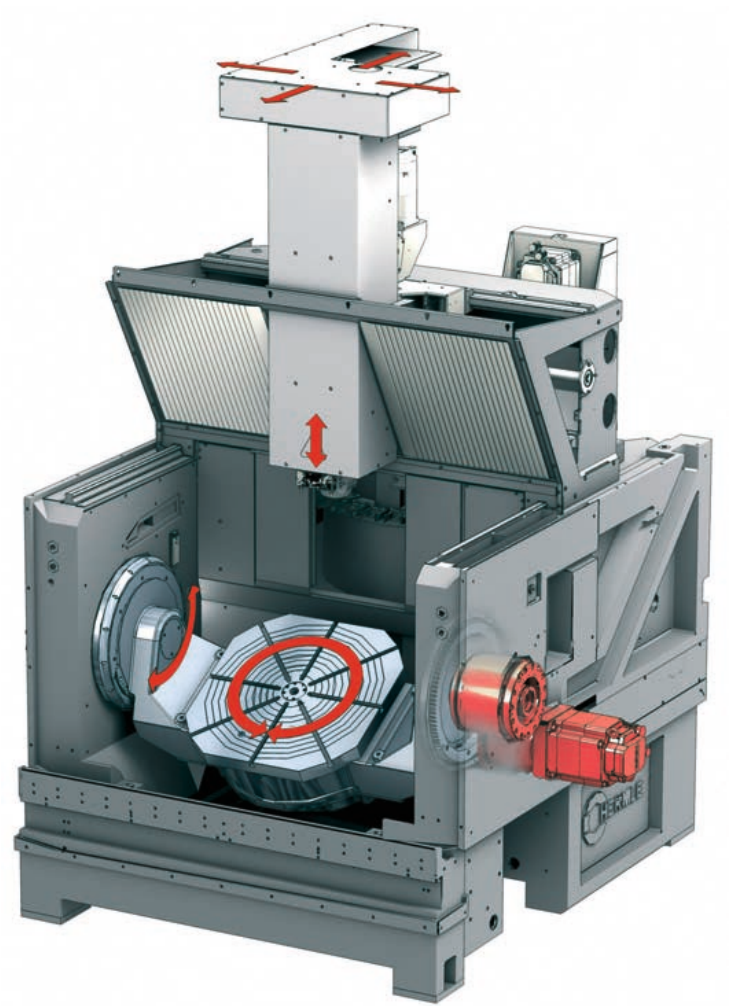


Bild 1.11: Hochgeschwindigkeits-Bearbeitungszentrum (Werkbild Hermle)

Durch den verstärkten Einsatz von CAD-Systemen kommt neuerdings eine weitere Forderung hinzu, nämlich die direkte **Verarbeitung der von CAD-Systemen erzeugten Geometriedaten.** Dies sind im Wesentlichen DXF-Daten, NURBS (Nicht Uniforme Rationale B-Splines) oder Bezier-Formeln. Diese mathematischen Daten müssen dann nicht mehr durch einen Postprozessor in lineare Vektorelemente umgewandelt werden, da sie die CNC direkt übernimmt und verarbeitet. Dadurch lässt sich trotz der hohen Beschleunigungen und Geschwindigkeiten ein wesentlich geschmeidigeres Maschinenverhalten erreichen, was sich auch auf die Oberflächenqualität der Werkstücke vorteilhaft auswirkt.

1.2 Drehmaschinen

Ursprünglich maßen die Wissenschaftler der numerisch gesteuerten Drehmaschine keine große Bedeutung zu. Der Grund dafür war, dass dieser Maschinentyp bereits sehr weitgehend mechanisch automatisiert war, sodass es „nicht sinnvoll sein kann, diesen hohen Stand noch verbessern zu wollen“. Doch hier irrten die Weisen: Nach kurzer Zeit war die CNC-Drehmaschine bereits der am meisten gefragte CNC-Maschinentyp überhaupt. Über mehrere Jahre betrug der stückzahlmäßige Anteil der CNC-Drehmaschine mehr als 50 % aller in Deutschland hergestellten CNC-Maschinen. Erst als neben Bohr- und Fräsmaschinen auch andere, wie Schleif-, Nibbel-, Verzahnungs- und Erodiermaschinen mit CNCs ausgerüstet wurden, ging der Anteil der Drehmaschinen knapp unter die 50 %-Marke zurück. Dazu hat auch beigetragen, dass CNC-Maschinen moderner Bauart immer leistungsfähiger und produktiver wurden, deshalb brauchte man immer weniger Maschinen für die gleiche Produktionsmenge.

Obwohl Drehmaschinen schon immer sehr vielseitig und hoch automatisiert waren, durch die NC und insbesondere durch die CNC wurden sie universeller und flexibler.

Die hohen Stückzahlen erklären auch das große Interesse der Steuerungshersteller, CNCs mit speziellen Funktionen für Drehmaschinen zu entwickeln. Deshalb verfügen CNC-Drehmaschinen heute über die am weitesten fortgeschrittene Automatisierung, inclusive der dafür erforderlichen Programmier- und Steuerungstechnik. Wo die CNC-Hersteller den Forderungen der Maschinenhersteller nicht folgen und nicht liefern können, entwickeln diese ihre zusätzlichen Software- und Hardware-Bausteine selbst.

Drehmaschinen gibt es in mehreren **unterschiedlichen Arten und Bauformen**. Man unterscheidet beispielsweise nach Maschinen

- in Horizontal- oder Vertikal-Bauweise,
- mit Flachbett oder Schrägbett,
- für Stangen-, Futter- oder Wellenteile,
- mit einer, zwei oder mehreren Spindeln,
- mit einem oder mehreren Kreuzschlitten und Werkzeugrevolvern,
- mit oder ohne **Hilfsspindel** zur Bearbeitung der Abstichseite.

Auch der **Automatisierungsgrad** von Drehmaschinen kann sehr unterschiedlich sein *(Bild 1.12)*.

So stehen beispielsweise folgende **Automatisierungskomponenten** zu Verfügung:

- **Werkstückspeicher** mit automatischem Werkstückwechsel,
- **Werkzeugmagazin** mit automatischem Werkzeugaustausch zwischen Revolver und Magazin,
- **angetriebene Werkzeuge**, meistens in Verbindung mit einer zusätzlichen CNC-

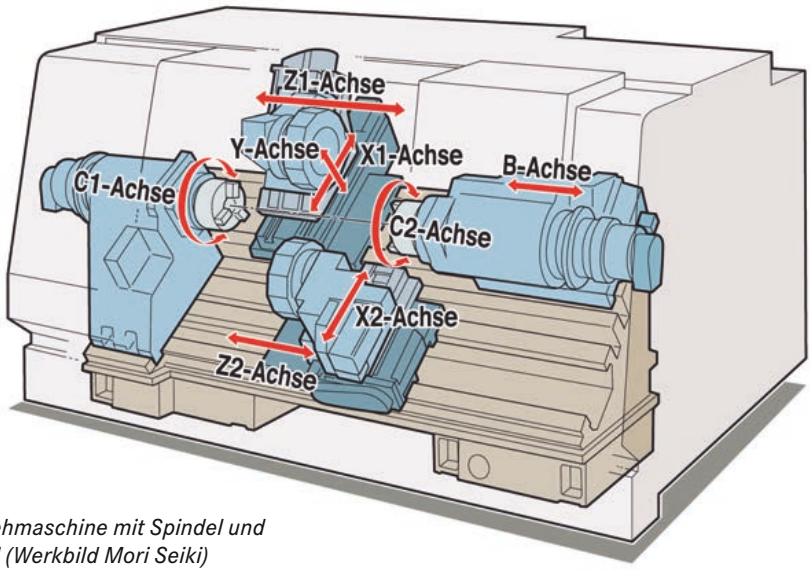


Bild 1.12: Drehmaschine mit Spindel und Gegenspindel (Werkbild Mori Seiki)

Achse (Y-Achse) und gesteuerter **Spindel als C-Achse**,
- automatische Werkzeugüberwachung,
- automatischer **Backenwechsel** im Futter,
- **Lünette und Reitstock** numerisch gesteuert,
- **Einrichtungen zur Verkettung** mehrerer gleichartiger oder unterschiedlicher Maschinen.

Drehmaschinen mit zwei und mehr Supporten *(Bild 1.13 und 1.14)*

Bei Großdrehmaschinen wurde schon lange Zeit vor der CNC-Maschine mit zwei oder drei Werkzeugen gleichzeitig an einem Werkstück gearbeitet. Der Vorteil ist, dass sich die Fertigungszeiten erheblich reduzieren lassen. Dafür nimmt man den kleinen Nachteil in Kauf, dass nicht alle Werkzeuge mit optimaler Schnittgeschwindigkeit arbeiten.

Drehmaschinen mit zwei CNC-Achsen sind für den gleichzeitigen Einsatz von zwei Werkzeugen nicht geeignet. Deshalb rüstete man sie schon bald mit zwei getrennten Supporten und damit vier Achsen aus, um mit beiden Werkzeugen unabhängig voneinander arbeiten zu können. Bei den heutigen CNC-Drehmaschinen sind die beiden Revolver so ausgelegt und angeordnet, dass ein weitestgehend kollisionsfreier Simultanbetrieb möglich ist. Damit lassen sich sowohl Wellen- als auch Futterteile gleichzeitig mit zwei Werkzeugen bearbeiten. Um eine Kollision der beiden Revolver zu verhindern, sind entsprechende Sicherheitsvorkehrungen durch softwareseitige Überwachungen vorgesehen.

Zur Steuerung dieser Maschinen sind spezielle CNCs erforderlich, die in 2 × 2 Achsen unabhängig voneinander interpolieren können. Die ersten Erfahrungen mit 2 × 2-achsigen Drehmaschinen waren sehr negativ, da der Programmierer immer 4-achsig denken musste, um die zeitlichen Abläufe beider Werkzeuge zeitlich ineinander zu schachteln. Der Grund war, dass es nur einen Lochstreifen und einen Leser

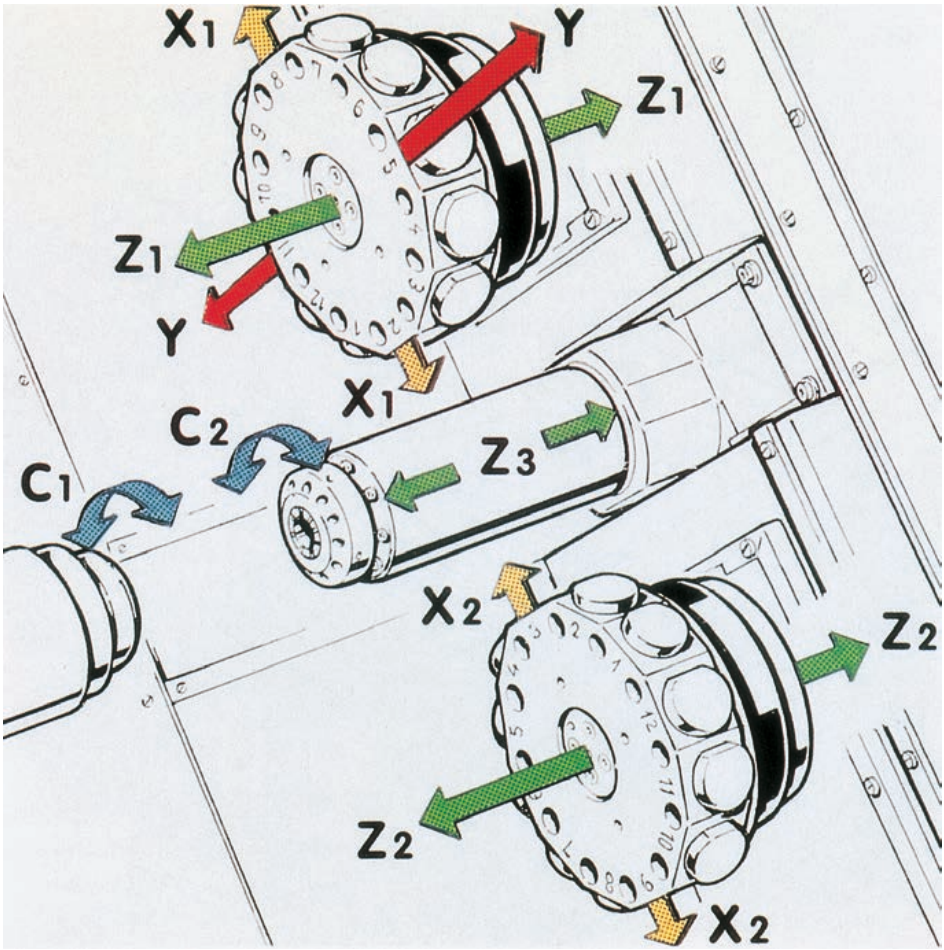


Bild 1.13: Drehmaschine mit Hauptspindel, Gegenspindel und zwei Revolverköpfen, davon einer mit Y-Achse zur Zylindermantelflächenbearbeitung (insgesamt acht CNC-Achsen)

gab und das gesamte Programm nur Satz für Satz eingelesen werden konnte. Mit CNCs, die beiden Supporten einen separaten Speicherbereich für das NC-Programm zuordnen, ist dieses Problem gelöst. Muss an bestimmten Stellen ein Support auf den anderen warten, so lässt sich auch dies durch einen speziellen G-Befehl im Programm erreichen. Die Programmierung ist dadurch wesentlich erleichtert, denn beide Werkzeugbewegungen werden unabhängig voneinander programmiert und nur an kritischen Stellen aufeinander abgestimmt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mehrachsige Drehmaschinen vorwiegend für die Fertigung mittlerer und großer Serien geeignet sind. Ob die Programmierung in der Werkstatt sinnvoll ist, hängt von der Leistungsfähigkeit des Programmiersystems ab *(Bild 1.14)*.

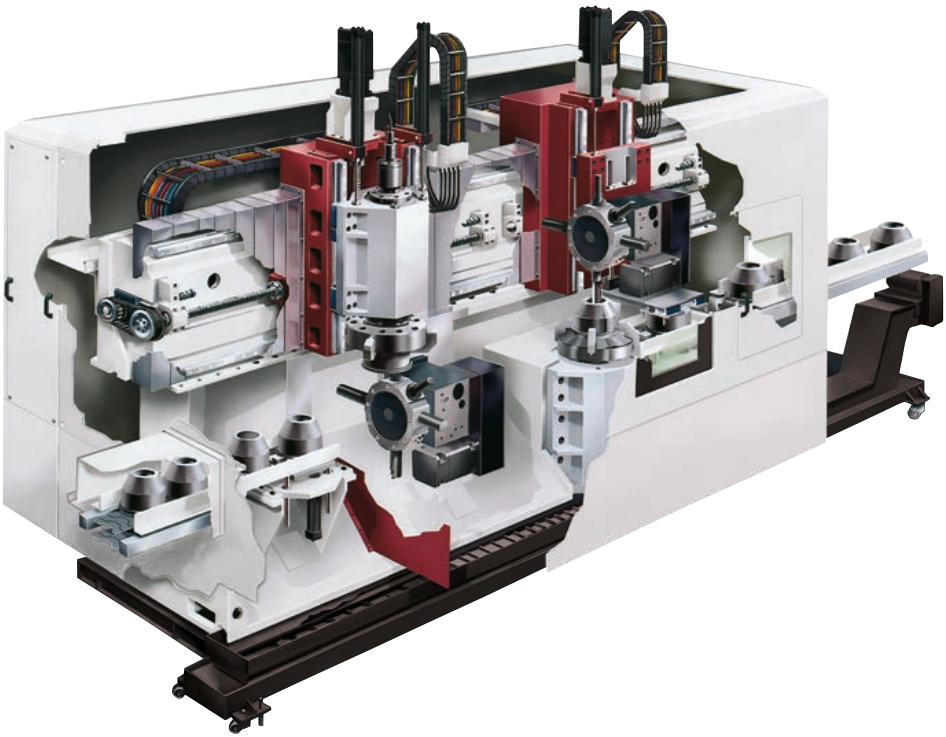


Bild 1.14: Senkrechtdrehmaschine mit 2 Bearbeitungseinheiten und automatischer Werkstückzuführung (Werkbild MAG-Hessapp)

Dreh-Fräs-Zentren

Die Leistungsfähigkeit moderner CNCs hat es möglich gemacht, mit entsprechend ausgerüsteten Drehmaschinen zusätzlich zu den Drehbearbeitungen auch Fräs- und Bohrbearbeitungen an dem im Drehfutter eingespannten Werkstück auszuführen. Auch **Schleifspindeln** wurden schon nach diesem Prinzip zur Nachbearbeitung der Drehteile eingesetzt.

Dafür ist der Revolverkopf mit **angetriebenen Werkzeugspindeln** ausgerüstet, um die erforderlichen Fräser, Bohrer, Gewindebohrer oder Schleifscheiben aufzunehmen. Die Hauptspindel wird bei Bedarf automatisch mit einem zusätzlichen Messgeber gekoppelt und als C-Achse wie ein Drehtisch positioniert und kontinuierlich gesteuert, sodass die angetriebenen Werkzeuge exakt jeden Punkt am Werkstück anfahren und jede gewünschte Form fräsen oder schleifen können. Voraussetzung ist eine CNC, die eine **Koordinatentransformation** durchführen kann. Diese Funktion erlaubt die Programmierung der Fräs- und Bohrbearbeitungen in kartesischen (linearen) Koordinaten und die CNC transformiert die Bewegungen in das Polar-Koordinatensystem (Drehung der C-Achse) *(Bild 1.16)*.

Dreh-Fräs-Zentren eignen sich besonders zur Herstellung **kleinerer, komplizierter Teile** aus Vollmaterial und werden

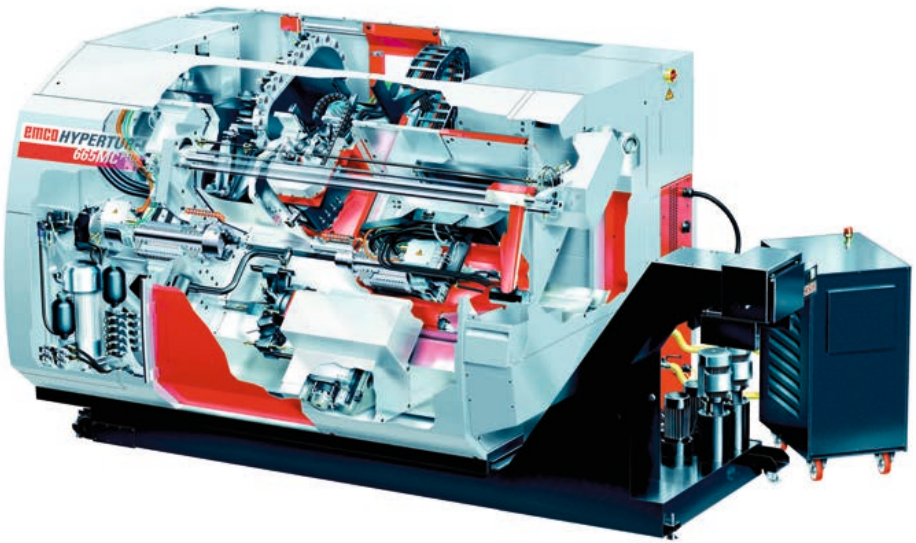


Bild 1.15: Dreh-Bearbeitungszentrum für komplexe Fräs-, Bohr- und Verzahnungsoperationen in einem Arbeitsprozess (Werkbild EMCO)

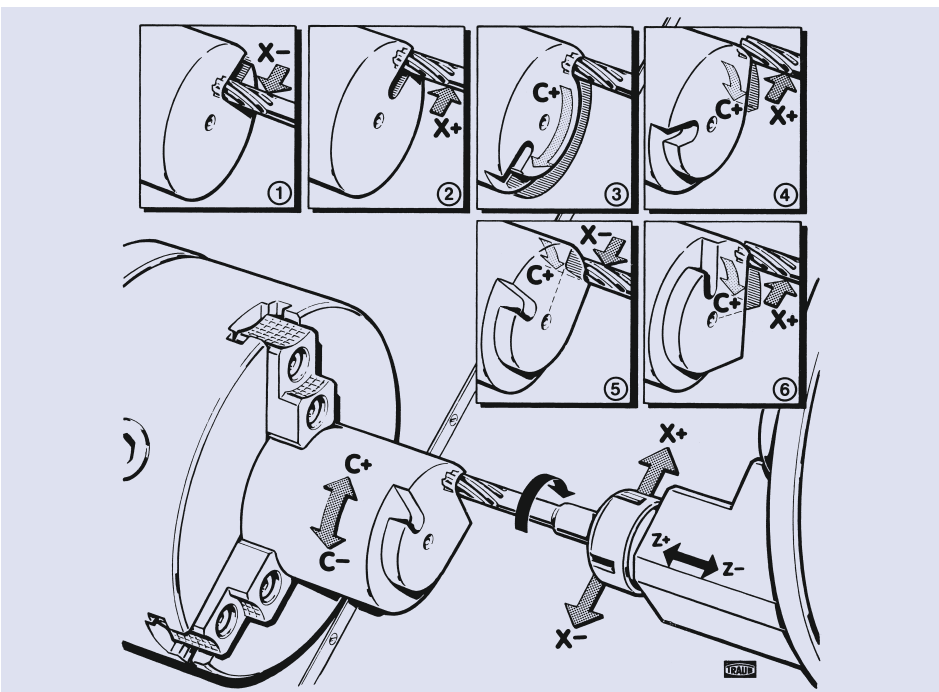


Bild 1.16: Dreh-Fräszentrum: Stirnseitenbearbeitung mit angetriebenem Fräswerkzeug

von allen namhaften Drehmaschinen-Herstellern angeboten.

Für Großteile stehen ebenfalls Dreh-Fräs-Zentren in unterschiedlichen Konfigurationen zur Verfügung. Auch hierbei nutzt man den Vorteil, an dem Werkstück alle notwendigen Dreh- und Fräsarbeiten ohne Umspannen und mit höherer Spanleistung ausführen zu können *(Bilder 1.15, 1.16 und 1.17).*

In Anlehnung an Bearbeitungszentren und Fertigungszellen werden hoch automatisierte Drehmaschinen auch als **Drehzentren** oder Drehzellen bezeichnet. Die Vielfalt der möglichen Bearbeitungen mit solchen Maschinen ist fast unbegrenzt. Dies bringt für den Anwender den großen Vorteil mit sich, die Werkstücke in einer Maschine montagefertig in wesentlich kürzerer Zeit herstellen zu können, als dies mit der Mehrmaschinen-Bearbeitung möglich wäre. Zudem entfallen die sonst evtl. erforderlichen Spannvorrichtungen und die Zeit für das mehrmalige Aus- und Einspannen. Auch Maßabweichungen durch erneutes Spannen werden vermieden. Oder, anders dargestellt: **Die Komplettbearbeitung ersetzt Maschinen, steigert die Qualität und reduziert die Durchlaufzeiten.** Dies wirkt sich selbstverständlich auch auf die Herstellkosten positiv aus.

CNC für Drehmaschinen
(Bild 1.16 und Bild 1.17)

Die Vielfalt der Drehmaschinen-Bauarten und -Ausführungen überträgt sich auch auf die numerischen Steuerungen. So wer-

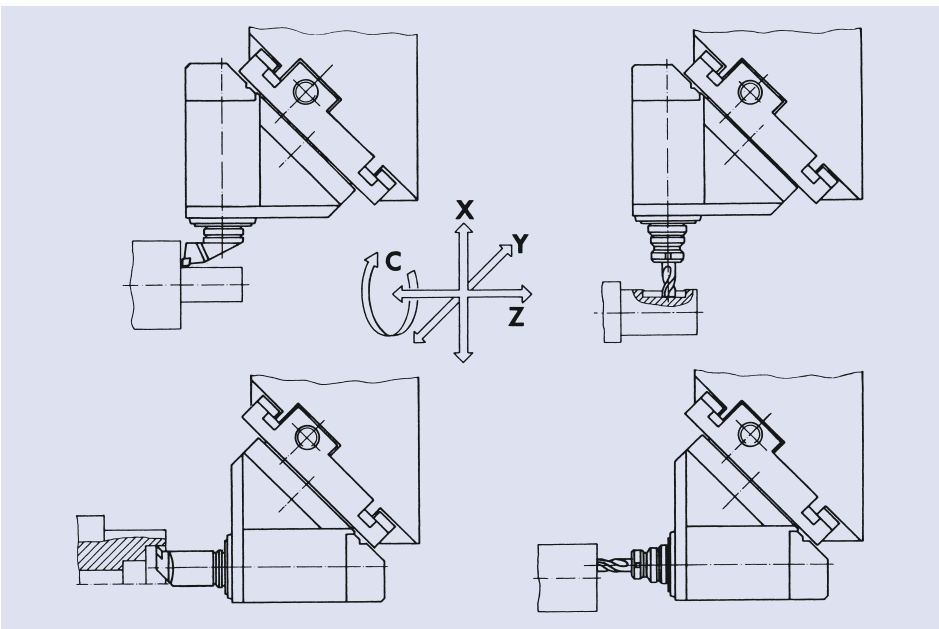


Bild 1.17: Um 90 ° schwenkbarer Werkzeugkopf an einer Drehmaschine zur radialen und achsialen Bearbeitung mit festen und mit angetriebenen Werkzeugen

den heute schon an die Grundausrüstung der CNC **sehr hohe Forderungen** gestellt:

- **zwei bis 7 CNC-Achsen**, bei Mehrspindlern bis 30,
- **2 × 2 oder 3 × 2** unabhängig voneinander interpolierbare Achsen für Mehrschlittenmaschinen,
- Spindel als **C-Achse** steuerbar,
- zusätzliche CNC-Achsen für **Laderoboter**,
- **konstante Schnittgeschwindigkeit** durch automatische Anpassung der Spindeldrehzahl an den Drehdurchmesser,
- Werkzeugversatz- und Schneidenradius-Kompensation für alle Drehwerkzeuge,
- Fräserdurchmesser- und Längen-Kompensation für die angetriebenen Werkzeuge,
- **freie Zuordnung** der Korrekturwerte zu den Werkzeugen, um bei Bedarf einem Werkzeug auch unterschiedliche Korrekturen zuweisen zu können,
- die gleichzeitige Berücksichtigung **mehrerer Werkzeugkorrekturwerte**, wie Werkzeugversatz, Schneidenradius und Werkzeugverschleiß,
- Werkzeugschneiden-Überwachung und Werkzeugbruch-Kontrolle,
- **Werkzeug-Standzeitüberwachung** und automatischer Aufruf eines Schwesterwerkzeuges nach Standzeit-Ende,
- **Rückführung von Messdaten** zu den Korrekturwertspeichern und deren automatische Nachstellung.

Eine weitere, sehr wertvolle Funktion einer Drehmaschine ist das numerisch gesteuerte **Gewindeschneiden**. Dazu benötigt die Hauptspindel ein Messsystem, meistens einen inkrementalen Impulsgeber, zur Rückmeldung zur Spindeldrehzahl und der exakten Winkellage an die CNC. Ein zusätzlich ausgegebener **Referenzimpuls** pro Umdrehung bewirkt, dass beim Geschwindeschneiden der Vorschub immer bei einer bestimmten Stellung der Hauptspindel startet und die einzelnen Schnitte exakt in die bereits vorgedrehten Gewindesteigungen eintauchen. Auch **kegelige Gewinde, Mehrfach-Gewinde und progressive oder degressive Steigungen** lassen sich numerisch gesteuert herstellen. Der Aufwand für mechanische Gewindeschneideinrichtungen und die Umrüstzeit entfallen. Den absolut synchronen Gleichlauf zwischen Spindelumdrehung und Vorschubbewegung steuert die CNC, indem sie die Impulse des Spindelgebers entsprechend verarbeitet.

Programmierung von Drehmaschinen

Wie aus dieser keineswegs vollständigen Aufzählung hervorgeht, wurde aus der einfachen Drehmaschine innerhalb sehr kurzer Zeit eine sehr komplexe **CNC-Maschine.**

Deshalb war ein weiterer Schwerpunkt die Entwicklung einer einfachen, verständlichen und ohne Probleme zu erlernenden Programmiermöglichkeit. Diesen Bemühungen kam der Fortschritt auf dem Gebiet der leistungsfähigen Tischrechner sehr entgegen. Der **farbige Grafik-Bildschirm** trug zu einer schnellen Akzeptanz bei den Anwendern bei. Heute muss der Programmierer keine „Kunstsprache“ mehr erlernen, um eine CNC-Maschine zu programmieren, sondern er arbeitet **dialoggeführt**, beantwortet die vom System gestellten Fragen ohne jegliche Mathematik oder G/M/F/S/X/Z-Funktionen und sieht das Ergebnis seiner Eingaben sofort grafisch am Bildschirm. So werden nacheinander die zu fertigende Geometrie, die Rohteilmaße und der Bearbeitungsvorgang eingegeben, grafisch dargestellt und der Bearbeitungsablauf zu jedem beliebigen Zeitpunkt auch **grafisch-dynamisch** auf dem Bildschirm simuliert. Fehler lassen sich schnell korri-

gieren und das Ergebnis wieder kontrollieren usw., bis zur Eingabe der kompletten, fehlerfreien Bearbeitung. Dann erzeugt das System das CNC-Programm und gibt es auf jedem gewünschten Datenträger und für jede geeignete Maschine aus. Alle Berechnungen, Anfahrbewegungen, Korrekturwertaufrufe und sonstige Spezialitäten generiert der Rechner automatisch. Fehler werden weitgehend ausgeschlossen. Mit der **Werkstattorientierten Programmierung (WOP)** kann heute die Programmierung der CNC direkt an der Maschine erfolgen.

Mehrspindlige, mehrachsige CNC-Drehmaschinen

Die Vorteile der CNC-Technik werden heute auch bei einem Typ Drehmaschine genutzt, der vor kurzem noch zu den typischen „Nicht-CNC-Maschinen“ zählte: den Schalttrommelautomaten. Diese Rundtaktmaschinen sind besonders für die Massenproduktion kleiner, komplexer, hochpräziser Werkstücke geeignet. Die Werkstücke (Rohlinge oder Material vom Ring oder Stange) werden durch die Schalttrommel nacheinander zu 14 Bearbeitungsstationen weitergetaktet und in zeitgleich ablaufenden Arbeitsgängen bearbeitet.

Durch diese gleichzeitige Bearbeitung an allen Stationen verkürzt sich die Gesamtbearbeitungszeit auf eine Taktzeit. Spezielle Schwenkfutter ermöglichen eine fünf- oder mehrseitige Fertigbearbeitung der Werkstücke. Außer spanabhebenden Operationen lassen sich auch Teile montieren, Schrauben eindrehen, Scheiben aufbördeln oder Stifte einpressen.

Bisher liefen alle diese Operationen vorwiegend kurvengesteuert ab. Bei Einzweckmaschinen oder entsprechend großen Serien ist dies nach wie vor eine wirtschaftliche Lösung. Das Problem beginnt erst bei kleineren Losgrößen, also beim häufigen Umrüsten. Lange Stillstandzeiten führen schnell zur Unwirtschaftlichkeit dieser hochproduktiven Maschinenart. Durch Umstellung auf numerische Steuerung der Bearbeitungseinheiten wird man unabhängig von Kurven und Kurvenwechsel. Vorschubwege, Vorschubgeschwindigkeiten und Spindeldrehzahlen sind frei programmierbar. Weitere Vorteile der CNC-Steuerung liegen in der Bearbeitung von verschiedenen Durchmessern auf einer Station, sowie der Herstellung von Radien, Kanten und Kegeln.

Die Zeitersparnis beim Einrichten und Umrüsten beträgt bis zu 85 %, dies kann vier Stunden und mehr ausmachen. Bis zu 20 CNC-Achsen werden durch Eingabe eines anderen Programmes innerhalb von Minuten auf die Fertigung eines völlig neuen Werkstückes umgestellt. Schnell austauschbare Bearbeitungseinheiten an den einzelnen Stationen unterstützen noch die Forderung nach kürzesten Umrüstzeiten.

1.3 Schleifmaschinen

(Dr.-Ing. Heinrich Mushardt)

Bauformen und Anforderungen

Schleifen gilt als das klassische Fein- und Hartbearbeitungsverfahren und wird für vielfältige Aufgaben benötigt: Beispielsweise erfüllen Schleifmaschinen im Werkzeug- und Formenbau hohe Anforderungen an Genauigkeit und Oberflächenqualität, bearbeiten bei der Herstellung und dem Nachschärfen von Werkzeugen härteste Materialien, erzeugen im Getriebebau hochgenaue, komplexe Verzahnungsgeometrien und erreichen in der automatisierten Serienfertigung kurze Taktzeiten.

Heute werden überwiegend numerisch gesteuerte Maschinen hergestellt. Im Unter-

schied zu konventionellen Schleifmaschinen, bei denen ein Bediener zu korrigierenden Eingriffen in der Lage ist, erwartet man von CNC-Maschinen, dass sie die geforderten Qualitätsanforderungen im automatischen Betrieb gewährleisten und dabei weitestgehend unempfindlich gegen Störeinflüsse und variable Prozesseingangsgrößen sind. Beispielsweise sind bei den hohen Genauigkeitsanforderungen alle Deformationen eng einzugrenzen, die unter anderem durch variable Schleifkräfte oder durch Erwärmung von Maschinenbauteilen, Kühlmittel und Umgebung hervorgerufen werden.

Die Schleifverfahren werden nach der Form der zu erzeugenden Flächen differenziert. Ihnen lassen sich entsprechende Maschinentypen zuordnen. Am häufigsten sind die in *Bild 1.18* dargestellten Flach- und Profilschleifmaschinen, Rundschleifmaschinen und Werkzeugschleifmaschinen. Daneben existieren spezielle Bauformen für besondere Einsatzzwecke, zum Beispiel für das Schleifen von Gewinden und Schnecken, Verzahnungen, Kurven und Exzenter.

Prinzipbilder:
Bild 1.18 Flachschleifmaschine
Bild 1.19 Universal-Rundschleifmaschine mit B-Achse
Bild 1.20 Werkzeugschleifmaschine

Die hochgenaue Bearbeitung und die speziellen Einsatzbedingungen der Schleifwerkzeuge stellen besondere Ansprüche an die Steifigkeit der Gestell- und Schlittenbauteile. Außerdem zeichnen sich Schleifma-

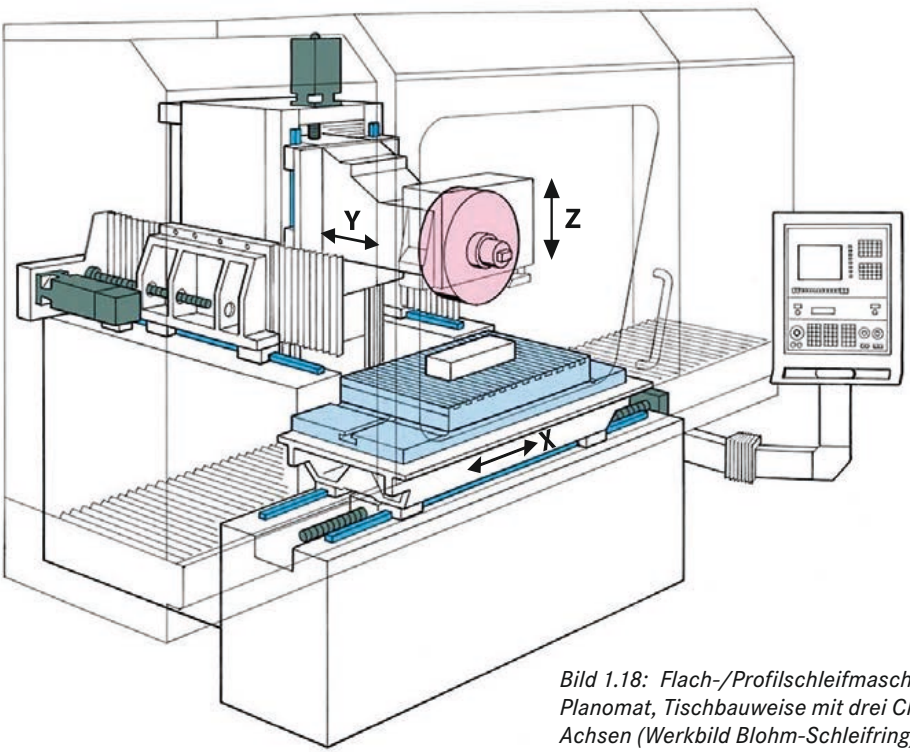


Bild 1.18: Flach-/Profilschleifmaschine Planomat, Tischbauweise mit drei CNC-Achsen (Werkbild Blohm-Schleifring)

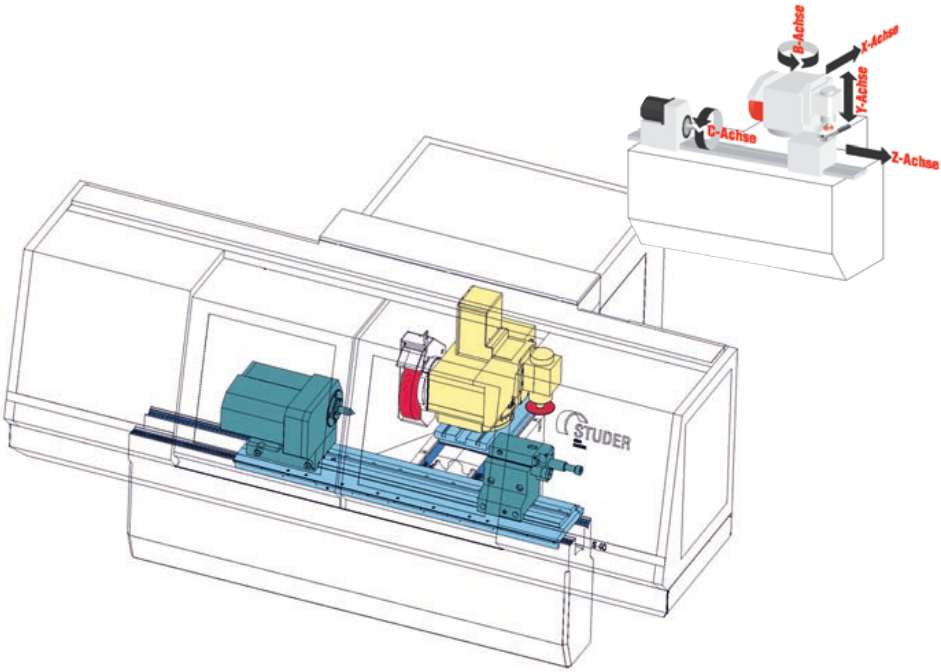


Bild 1.19: Universalrundschleifmaschine S40, Tischbauweise. Schleifkopf mit B-Achse und mehreren Schleifspindeln (Werkbild Studer-Schleifring)

schinen durch sehr präzise Arbeitsspindeln, Führungen und Messsysteme aus, die genaues Positionieren und exakte Vorschubbahnen gewährleisten. Je nach Einsatzbereichen der Maschinen und den geforderten Achsgeschwindigkeiten sind unterschiedliche Führungsprinzipien anzutreffen. Überwiegend sind spielfreie, reibungsarme Wälzführungen im Einsatz, daneben aber auch gut dämpfende und durch Kunststoffbeschichtung stick-slip-arme Gleitführungen oder reibungsfreie Hydrostatikführungen. Bei Vorschubantrieben dominieren Servomotore und Kugelgewindespindeln. Zunehmend werden auch Linearmotore bzw. Torquemotore als Antrieb für rotatorische Achsen eingesetzt. Sie kommen ohne spielbehaftete Übertragungselemente aus. Dies ermöglicht es, sehr schnell und genau zu positionieren und Bahnen zu fahren. Als Messsysteme sind zumindest in den maßbestimmenden Achsrichtungen, das sind die Y-Achse beim Flachschleifen und die X-Achse beim Rundschleifen, Linearmaßstäbe obligatorisch.

Ein schwingungsarmer Lauf aller bewegten Komponenten und gute Dämpfungseigenschaften der Maschinenstruktur sind wichtige Voraussetzungen für markierungsfreie Oberflächen. Da in der Regel beim Schleifen Kühlschmiermittel eingesetzt wird, müssen Spindeln, Führungen und Messsysteme gegen eindringendes Wasser und Öl sowie gegen Verschmutzung durch die anfallenden Schleifspäne geschützt und der gesamte Arbeitsraum abgeschirmt werden.

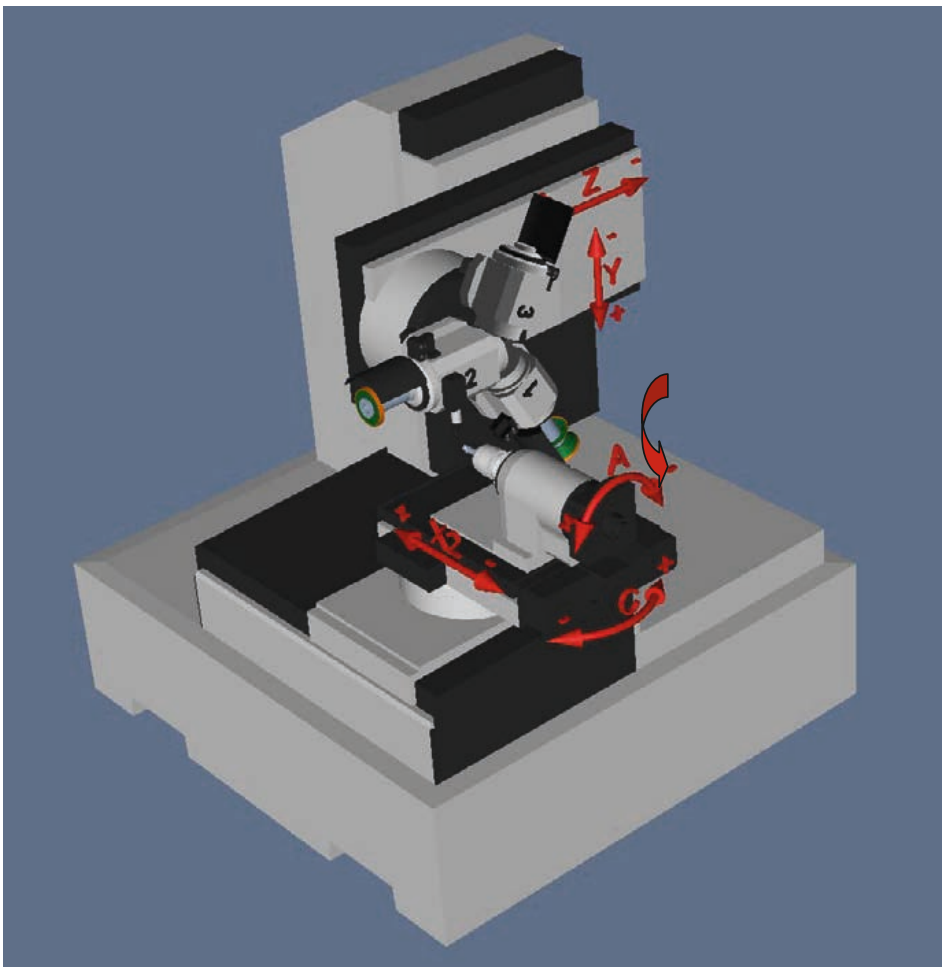


Bild 1.20: Werkzeugschleifmaschine mit drei Schleifspindeln und sechs CNC-Achsen (Werkbild Walter-Schleifring)

Steuerungsaufgaben für den Einsatz von Schleifscheiben

Aus den Besonderheiten der Schleifwerkzeuge und Schleifprozesse leiten sich auch spezielle Anforderungen an die Steuerungen ab.

Als Schleifwerkzeuge kommen überwiegend Schleifscheiben und daneben auch Schleifbänder zum Einsatz. Die Umfangsgeschwindigkeit ist ein einflussreicher Einstellparameter und zur Prozessoptimierung zu beachten. Ein sehr großer Anteil der Schleifmaschinen ist deshalb mit drehzahlregelbaren Spindelantrieben ausgerüstet. Die üblicherweise sehr hohen Drehzahlen erfordern es, die Schleifwerkzeuge auszuwuchten, um Schwingungen im

Schleifprozess zu vermeiden. Dies kann mittels automatischer, in die Schleifspindeln oder Schleifscheibenaufnahmen integrierter Geräte erfolgen.

Schleifscheiben – mit Ausnahme einschichtig belegter Scheiben – werden im eingespannten Zustand in der Maschine abgerichtet und auf den Schleifprozess vorbereitet. Dadurch erhalten sie den erforderlichen exakten Rund- und Planlauf, das der Schleifaufgabe entsprechende Profil und die benötigte Schärfe. Scharfkantige Schleifkörner können selbst härteste technische Werkstoffe zerspanen. Dabei verschleißen sie und stumpfen ab. Wenn Profil und Schärfe durch Verschleiß soweit verloren gegangen sind, dass sich die Werkstücke nicht mehr in der geforderten Toleranz herstellen lassen, werden sie durch Abrichten wieder hergestellt.

Mit dem Abrichten und dem Schleifen laufen in Schleifmaschinen zwei unterschiedliche Zerspanungsprozesse ab. Die Steuerung muss beide Prozesse beherrschen sowie veränderliche Werkzeugschärfe und -durchmesser berücksichtigen. Bei regelbaren Spindelantrieben kann sie die Drehzahl nachführen und die Umfangsgeschwindigkeit konstant halten, wenn sich der Scheibendurchmesser beim Abrichten verändert.

Der Schutz von Bedienern fordert eine sichere Begrenzung der Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit. Die Steuerung muss dafür den aktuellen Durchmesser kennen. Er wird beim Einrichten der Maschine oder beim Scheibenwechsel vom Bediener eingegeben und bestätigt. Nach dem Abrichten wird er aus der Position der Abrichtwerkzeuge automatisch berechnet.

Das Abrichten erfolgt überwiegend mit diamantbestückten Werkzeugen. Dabei kann es sich um feststehende oder rotierende Werkzeuge handeln. Ein Profil lässt sich bahngesteuert erzeugen, indem das Abrichtwerkzeug in zwei Achsen gesteuert an der Schleifscheibe vorbeigeführt wird. Um sehr flexibel einsetzbar zu sein und auch gegenüberliegende Flanken erreichen zu können, sind die Abrichtwerkzeuge optional schwenkbar. Ein dafür geeignetes Gerät zeigt *Bild 1.21*, bei dem das Abrichtwerkzeug, versehen mit einem Radiusprofil, exakt auf einer Schwenkachse ausgerichtet ist. Unvermeidbare restliche Justageabweichungen und Abweichungen vom Radiusprofil kann man ggf. messen und steuerungstechnisch kompensieren, um die Genauigkeit des erzeugten Schleifscheibenprofils zu verbessern und die Werkstückgenauigkeit zu optimieren.

Alternativ lassen sich Schleifscheiben mit profilierten Diamantrollen im Einstechverfahren abrichten. Diamantprofilrollen sind teuer und auf ein bestimmtes Werkstück zugeschnitten, aber sie amortisieren sich in der Serienfertigung durch Zeiteinsparungen. Mit Diamantprofilrollen lassen sich die Schleifscheiben im laufenden Schleifprozess kontinuierlich schärfen. Bei der Bearbeitung hochfester Werkstoffe, die großen Verschleiß verursachen, aber andererseits besonders scharfe Schneiden erfordern, befähigt kontinuierliches Abrichten die Schleifscheibe zu größeren Zeitspanungsvolumen. Sie ermöglicht dadurch eine Verkürzung von Zykluszeiten. Die CNC hat dabei die Aufgabe, die durch das Abrichten entstehende Durchmesserveränderung zu kompensieren und die Schleifscheibendrehzahl anzupassen, um die Schnittgeschwindigkeit konstant zu halten. Außerdem ist es für Hochleistungsprozesse erforderlich, die Position der Kühlmitteldüsen nachzuführen *(Bild 1.22)*.

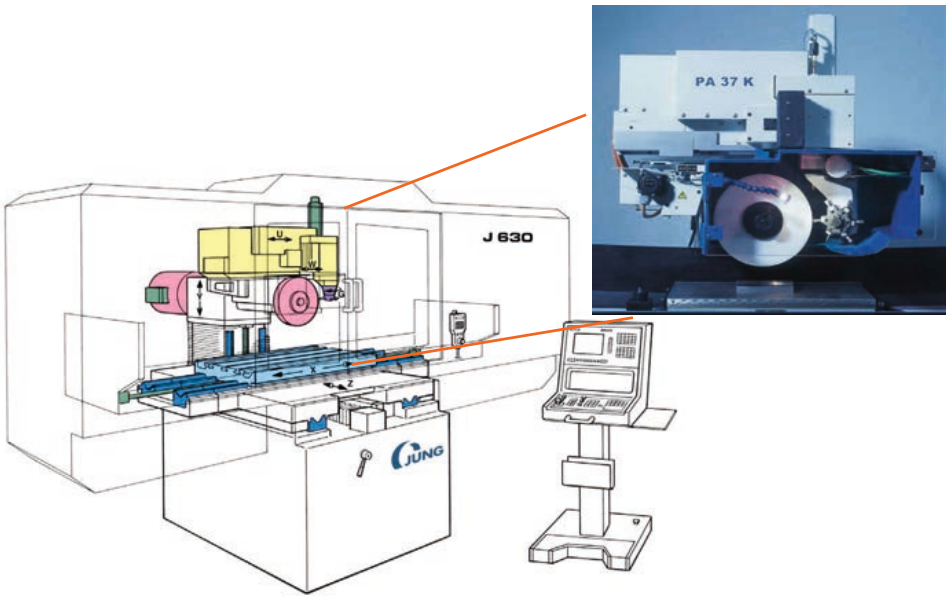


Bild 1.21: Profilschleifmaschine, Supportbauweise mit CNC-Abrichtgerät auf dem Schleifkopf, in drei Achsen gesteuert

Steuerungsaufgaben beim Einrichten, Programmieren und Optimieren von Schleifprozessen

Bedienerorientierte Steuerungen unterstützen die Maschinenbedienung, das Einrichten und die Prozessoptimierung. Zu den Anforderungen zählen auch manuelle Eingriffe in automatisch ablaufende Prozesse, beispielsweise zur Verschiebung der Umsteuerpositionen bei Oszillationsbewegungen, zur Überlagerung von Zustellbeträgen bei variablen Aufmaßen oder zur Einfügung von Abrichtzyklen bei abstumpfender Schleifscheibe.

Beim Einrichten werden die Positionen von Werkstücken, Abrichtwerkzeugen und Schleifscheiben im Arbeitsraum exakt bestimmt. Das Ausmessen kann die CNC unterstützen, indem sie Signale von Messtastern und anderen Sensoren, beispielsweise Körperschallaufnehmern, verwaltet, mit denen der Kontakt zwischen Schleifscheibe und Abrichtwerkzeug oder Werkstück erkannt werden kann. Die automatische Umrechnung in Maschinenkoordinaten ist dann vor allem bei Maschinen mit Schwenkachsen und mehreren Schleifwerkzeugen sehr hilfreich und mindert die Fehlerrisiken *(Bild 1.23)*.

Das Programmieren von Abricht- und Schleifzyklen kann auf vielfältige Weise durch Software unterstützt werden. Zum Profilieren von Schleifscheiben sind Geometriedaten aus Zeichnungsdateien zu übernehmen und Abrichtbahnen zu berechnen. Programmiersysteme verwalten die Schleifscheiben, wählen geeignete Abrichtwerkzeuge aus und optimieren im Dialog mit dem Programmierer die Abrichteinstellgrößen. Daneben können sie

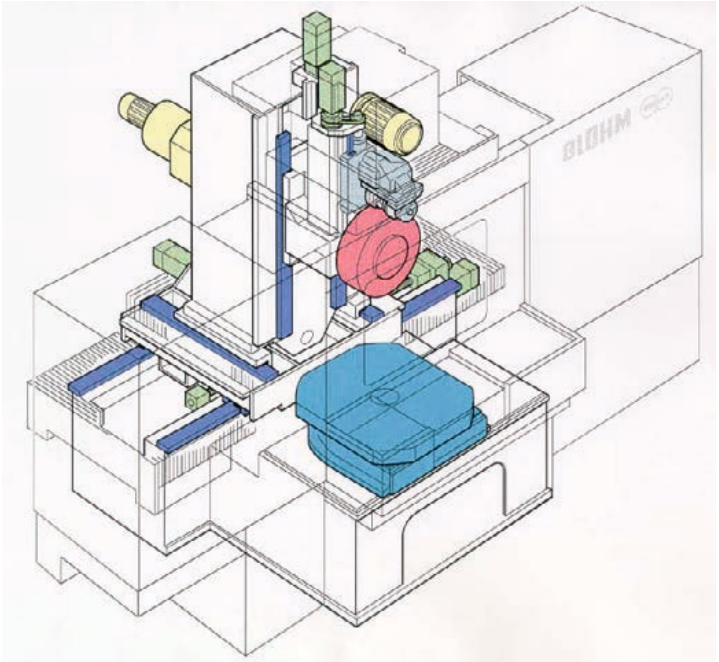


Bild 1.22 a: Profilschleifmaschine mit Diamantrollenabrichtgerät auf dem Schleifkopf und taktisch zum Be- und Entladen während der Bearbeitung (Werkbild Blohm-Schleifring)

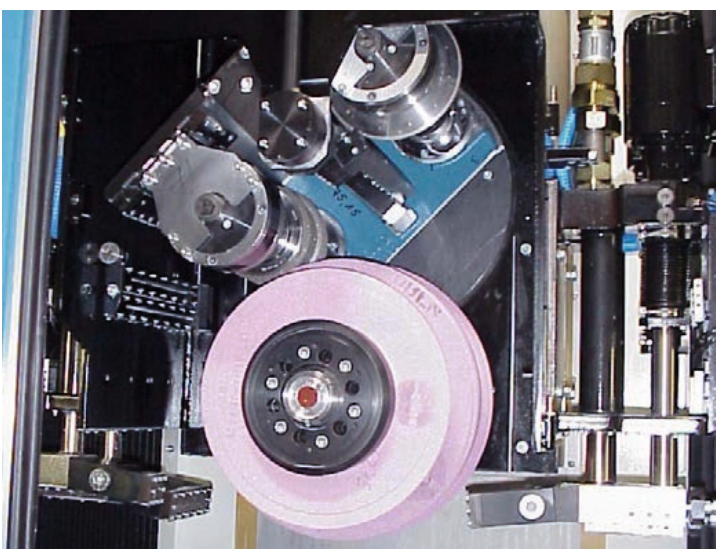


Bild 1.22 b: Abrichtgerät mit Diamantprofilrollen. Die Kühlschmiermitteldüsen sind gesteuert nachstellbar

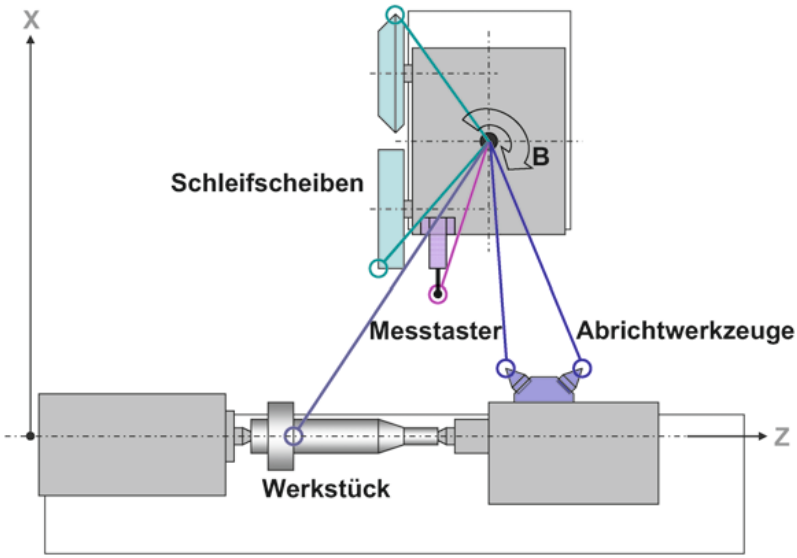


Bild 1.23: Unterstützung der CNC durch Ermittlung der Bezugspunkte von Werkstück, Schleifscheiben- und Abrichtwerkzeugen durch die Software (Werkbild Studer-Schleifring)

Berechnungen zur Kollisionsüberwachung und zur Kompensation von Fehlereinflüssen durchführen.

Beim Schleifen unrunder Formen treten variable Eingriffbedingungen auf, die Kraftschwankungen auslösen und Formfehler am Werkstück verursachen. Diese Effekte und weitere systematische Fehleranteile lassen sich durch angepasste Geschwindigkeitsprofile und durch Vorhalt einer Bahnkorrektur minimieren. Bei hohen Genauigkeitsanforderungen werden nach dem Schleifen verbleibende Formabweichungen am Werkstück gemessen und in weiteren Optimierungsschritten kompensiert *(Bild 1.24)*.

Die große Vielfalt von Bohr-, Senk- und Fräswerkzeugen mit hoher geometrischer Komplexität stellt höchste Anforderungen an die Programmierung von Werkzeugschleifmaschinen. Die aufwändige Berechnung der Vorschubbahnen übernehmen fortschrittliche Programmiersysteme. Sie überprüfen dabei auch die Eingriffsgeometrien und analysieren das generierte Werkstückprofil. Eine Überprüfung der Programme am Bildschirm zeigt Optimierungspotential auf und macht auf etwaige Fehler aufmerksam. So lassen sich Kollisionen im Arbeitsraum schon vor der Inbetriebnahme der Programme an der Maschine erkennen und Risiken reduzieren *(Bild 1.25)*.

Unterschiedliche Aufmaße, Scheibenverschleiß und Wärmedeformationen sind mögliche Ursachen für Maß- und Formfehler. Ihre Einflüsse lassen sich beim Rundschleifen durch den Einsatz von Messsteuergeräten ausschalten, die bei voreingestellten Aufmaßen von Schruppauf Schlichtvorschübe umschalten und den Prozess beim Erreichen des Sollmaßes beenden. Das Schleifen bietet – im Unter-



Bild 1.24: Programmiersystem von Rund- und Unrundschleifen (Werkbild Studer-Schleifring)

schied zum Drehen und Fräsen – die Möglichkeit, die Zustellung bis gegen Null zu reduzieren. Dadurch bauen sich die Schleifkräfte und die Deformationen weitgehend ab. Gleichzeitig verbessert sich die Werkstückrauheit infolge größerer Überdeckung der Schneideneingriffe *(Bild 1.26)*.

Ein typischer Einstechschleifprozess besteht aus mehreren Stufen: Bis zum Kon-

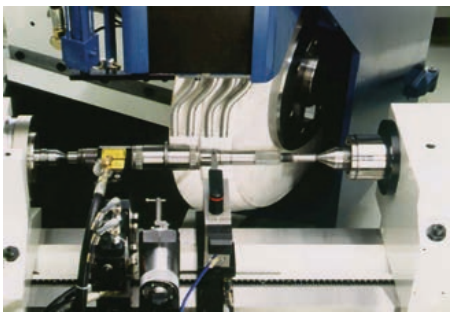


Bild 1.25: Messgesteuertes Schleifen einer Welle (Werkbild Schaudt-Schleifring)

takt mit dem Werkstück wird die Schleifscheibe mit erhöhter Vorschubgeschwindigkeit angestellt, um die unproduktiven Zeitanteile klein zu halten. Der Kontakt kann optional mittels Kraft-, Leistungs- oder Körperschallmessung erkannt werden. Dann wird innerhalb von Sekundenbruchteilen auf Schruppvorschubgeschwindigkeit zurückgeschaltet. Beim Schruppen will man das Potential der Maschine und des Schleifwerkzeugs ausnutzen und den größten Teil des Aufmaßes möglichst schnell abschleifen. Anschließend strebt man beim Schlichten mit reduzierter Vorschubgeschwindigkeit an, die Werkstückqualität zu verbessern und zum Abschluss der Bearbeitung die Toleranzgrenzen einzuhalten.

Automatischer Werkstück- und Werkzeugwechsel

In der Serienfertigung werden die Werkstücke überwiegend automatisch gewechselt. Für variable und prismatische Werkstücke ist ein automatischer Wechsel oftmals nur mittels Spannpaletten zu ermöglichen. Zylindrische Werkstücke lassen sich dagegen meistens direkt greifen und spannen. Wellen werden häufig durch Portallader oder Roboter gewechselt. Futterteile können auch direkt von der Werkstückspindel im Pick-up-Verfahren von Bereitstellungspositionen übernommen werden.

Die Einspannung erfolgt beim Rundschleifen je nach Maschinentyp und Werkstückform zwischen Spitzen, in Spannfuttern oder spitzenlos mit Auflageschienen und Stützrollen. Für schlanke Werkstücke, die

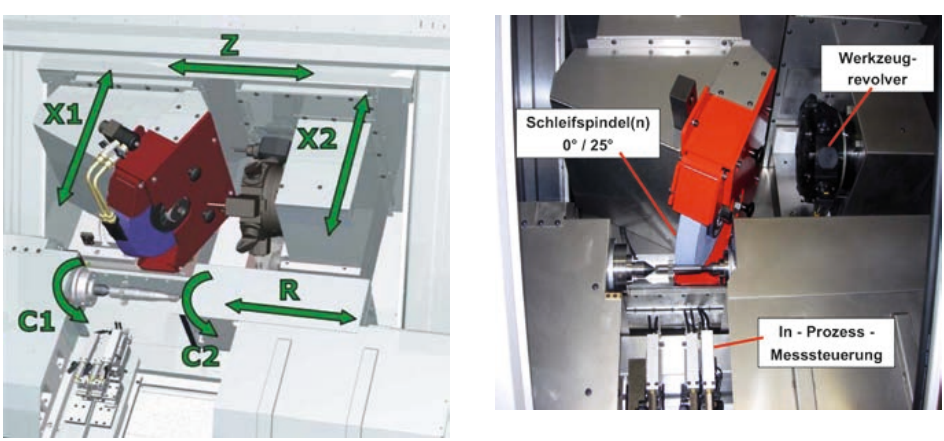


Bild 1.26: Komplettbearbeitung durch Drehen (linkes Bild) und Schleifen (rechtes Bild) (Werkbild Schaudt-Schleifring)

eine zusätzliche Abstützung benötigen, kommen Lünetten zum Einsatz. Wenn sie an Stellen abstützen müssen, die auch überschliffen werden, sind gesteuerte, den Abschliff kompensierende Ausführungen erforderlich.

Werkstückmagazine und automatische Beladungseinrichtungen versetzen die Werkzeugschleifmaschine Helitronic Power in die Lage, unbemannt zu produzieren. Zur kompletten Bearbeitung eines Werkzeuges werden mehrere Profilscheiben benötigt. Sie können im Satz nebeneinander auf der Schleifspindel eingespannt sein. Alternativ gibt es die Möglichkeit, Schleifscheiben automatisch zu wechseln. Im dargestellten Fall werden Dorne mit HSK-Aufnahmen direkt aus einem Tellermagazin von der Schleifspindel übernommen. Zugleich werden die zugehörigen Kühlmitteldüsen übernommen und angekuppelt.

1.4 Verzahnmaschinen

(Dr.-Ing. Klaus Felten)

Grundlagen und Aufgabenstellung

Unter Verzahnmaschinen versteht man eine Gruppe von Werkzeugmaschinen, deren Ziel es ist, sehr präzise Zahnflanken herzustellen. Die Bauarten dieser Maschinen fallen je nach Werkstückart (Kegelräder, Stirnräder, Gerad- oder Schrägverzahnung) und technologischem Prozess (spanlos/spanend, weiches/gehärtetes Material) sehr unterschiedlich aus. Aus diesem Grunde wird im Rahmen dieser Abhandlung zuerst auf die grundsätzlichen Anforderungen und daraus resultierende Bauformen und Eigenschaften von Verzahnmaschinen eingegangen. Als Beispiel wird überwiegend die häufigste Verzahnmaschine, die Wälzfräsmaschine für die Stirnradherstellung herangezogen. In weiteren Abschnitten wird auf die Besonderheiten von Hartfeinbearbeitungsmaschinen und auf Maschinen zur Kegelradherstellung eingegangen.

Zahnflanken sind gekrümmte Flächen. Bei Stirnrädern ist das Zahnprofil eine Evolvente, die Zahnrichtung ist gerade oder schraubenförmig. Die Evolvente wird auch Fadenkurve genannt. Sie wird von der Spitze eines straff gespannten Fadens gebildet, der von einem Grundkreis abgewickelt wird.

Im Endzustand dürfen die Zahnflanken nur wenige Mikrometer von der idealen Sollgestalt abweichen. In vielen Fällen muss sowohl Evolvente als auch Zahnrichtung mit Korrekturen (Konizitäten, Balligkeiten) versehen werden. Neben den Zahnflanken ist die Teilung, also der Abstand der Zähne eines Zahnrads, von entscheidender Bedeutung für die Qualität des gefertigten Werkstücks.

Zahnflanken können grundsätzlich in zwei Verfahrensvarianten hergestellt werden:

- Formverfahren (z. B. spanlose Verfahren, Räumen, Formfräsen, Formschleifen)
- Wälz- oder Hüllschnittverfahren (z. B. Wälzfräsen, Wälzstoßen, Wälzschälen, Wälzschleifen, Wälzhobeln)

Die von der Kinematik einer Maschine her einfachere Variante stellen die Formverfahren dar. Dazu gehören fast alle spanlos arbeitenden Verfahren. Bei den spanend arbeitenden Verfahren kommen Formwerkzeuge zum Einsatz, die die Form der Zahnlücke besitzen. Mit diesen Werkzeugen wird dann im Teilverfahren Zahnlücke um Zahnlücke erzeugt. Ein weiterer Vertreter der Formverfahren ist das Räumen, bei dem ein ganzes Hohlrad in einem Arbeitsgang erzeugt werden kann. Hierbei wird ein Werkzeug eingesetzt, das die Form der gesamten Verzahnung abbildet.

Bei den kinematisch aufwändigeren Wälzverfahren liegt der Erzeugung der Evolvente das so genannte Bezugsprofil zu Grunde. Dieses Bezugsprofil ist zahnstangenförmig, hat also gerade Flanken und bildet bei einigen Verfahren direkt einen Teil des Verzahnwerkzeugs (z. B. Wälzfräsen, Wälzhobeln, Wälzschleifen). Bei anderen Verfahren kann man sich das Bezugsprofil als eine Zahnstange vorstellen, die sowohl mit dem zu erzeugenden Werkstück als auch mit dem erzeugenden Werkzeug abwälzen kann (z. B. Wälzstoßen, Wälzschälen). In allen diesen Fällen entsteht die Evolvente durch eine Vielzahl von Hüllschnitten, die immer als Tangente an die Evolvente gesetzt werden.

Das theoretische Erzeugungsprinzip einer solchen Evolvente mit zahnstangenförmigem Werkzeug und die maschinentechnische Realisierung in einer Verzahnmaschine sind in *Bild 1.27* gezeigt.

Im linken Bildteil sind drei Schnitte eines geradflankigen Werkzeugs dargestellt, die stets tangential zur Evolvente liegen und diese so im Hüllschnittverfahren herstellen. Die Realisierung dieser Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück erfolgt in einer Verzahnmaschine wie rechts dargestellt. Dort sind zwei Einzelbewegungen miteinander kombiniert, die gemeinsam die exakt gleiche Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug ergeben. Sie besteht aus:

- Der rotatorischen Komponente des Wälzens als Rotation des Werkstücks
- Der translatorischen Komponente des Wälzens als Linearvorschub eines zahnstangenförmigen Werkzeugs.

Mit Hilfe dieser Bewegungscharakteristik lassen sich Evolventen im kontinuierlichen Wälzprozess herstellen. An der Entstehung der Zähne eines Zahnrades sind jedoch noch weitere simultan ablaufende Vor-

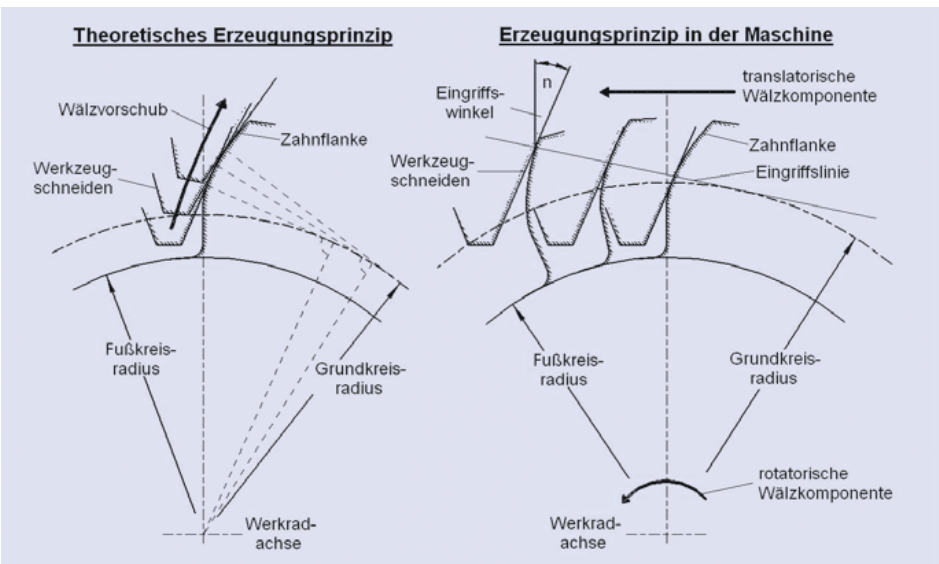


Bild 1.27: Erzeugungsprinzip einer Evolventenflanke (Quelle: Beck)

schubbewegungen beteiligt. So werden durch die radiale Zustellung des Werkzeugs die Zähne vom Kopf zum Fuß hin geschnitten. Zudem wird das Werkzeug durch den Axialvorschub über die gesamte Breite des Werkrades geführt und so das gesamte Rad verzahnt. Im Falle der Fertigung einer Schrägverzahnung muss die Axialbewegung so mit der Rotation des Werkstücks gekoppelt sein, dass das Werkzeug stets in Richtung des Zahnes schneidet. Dem Werkstücktisch wird also zusätzlich zur Wälzdrehung eine Zusatzdrehung aufgeprägt, die vom Schrägungswinkel und der axialen Position des Werkzeugs abhängig ist.

Die hohen Anforderungen an die Werkstückqualität bei stets vier oder mehr gleichzeitig ablaufenden Achsbewegungen haben die Konstrukteure von Verzahnmaschinen stets zu besonderen Lösungen gezwungen. So wurden von Anfang an synchrone Bewegungen mehrerer Achsen durch mechanische Getriebekopplungen realisiert, sodass ein Motor mit Hilfe von Getriebeverzweigungen mehrere Bewegungen gleichzeitig angetrieben hat. Änderungen des Übersetzungsverhältnisses – um beispielsweise ein Zahnrad mit anderer Zähnezahl herzustellen – löste man mit Hilfe von steckbaren Wechselrädern. Unter diesem Aspekt mechanischer Achskopplungen waren Verzahnmaschinen immer automatisierte Maschinen.

CNC für Verzahnmaschinen

Der Einsatz von CNC-Steuerungen begann an Verzahnmaschinen in den 70er-Jahren mit der Steuerung reiner Linearachsen. Zur Steuerung der notwendigerweise gekoppelten Wälzachsen von Wälzfräs- oder Wälzstoßmaschinen reichte Qualität und Geschwindigkeit der Achsinterpolation handelsüblicher Steuerungen nicht aus. Es wurden deshalb – im Unterschied zu jeder anderen Technologie – Maschinen gebaut, die nach wie vor ihre Qualität aus mechanischen Getriebezügen bezogen und bei denen die numerische Steuerung lediglich Zustellbewegungen bediente. Käufliche CNC-Steuerungen waren zu dieser Zeit nicht in der Lage, die qualitätsrelevanten Bewegungen von Verzahnmaschinen mit ausreichender Genauigkeit zu steuern.

Der Wunsch nach höherer Flexibilität von Verzahnmaschinen durch Wegfall der Wechselräder führte Anfang der 80er-Jahre zu Eigenentwicklungen der Maschinenhersteller auf dem Steuerungssektor oder zu Kooperationen mit jeweils einem Steuerungshersteller. Es entstanden Konzepte, bei denen der mechanische Wälzgetriebezug eliminiert und durch einen speziellen elektronischen „Wälzmodul“ ersetzt wurde. Dieser konnte entweder mit einer handelsüblichen Steuerung kombiniert oder in eine Sondersteuerung integriert werden. Erst mit diesem Schritt wurde die eigentliche CNC-Philosophie realisiert, nach der jede Bewegung von einem eigenen Achsmodul angetrieben wird. Für den Begriff „Wälzmodul“ waren auch Begriffe wie „elektronisches Getriebe“ oder „digitaler Zwanglauf zweier Achsen“ gebräuchlich.

Erst seit Anfang der 90er-Jahre sind handelsübliche CNC-Steuerungen zusammen mit digitalen Antrieben in der Lage, die steuerungs- und antriebstechnischen Aufgaben von Verzahnmaschinen in der geforderten Qualität zu lösen. Nach wie vor ist jedoch eine spezielle Software erforderlich. Diese muss zum Beispiel gewährleisten, dass das Steuerungssystem so genannte „endlose Rundachsen“ fehlerfrei verarbeiten kann. Dies bedeutet, dass ein numerisch gesteuerter Drehtisch immer in der gleichen Richtung weiterdrehen darf, ohne

dass das Messsystem nach 360 Grad Tischdrehung den Nullpunkt verliert und deshalb der Referenzpunkt immer wieder neu angefahren und kalibriert werden muss.

Verzahnmaschinen heutiger Bauart werden nur noch ohne Wechselräder gebaut. Das Übersetzungsverhältnis der gekoppelten Achsen wird dabei programmiert oder bei abgeleiteten Bewegungen aus Werkstück- oder Werkzeugdaten bzw. aus Bearbeitungsparametern berechnet. An Maschinen mit komplexer Kinematik wie zum Beispiel Kombimaschinen, bei denen mehrere Verfahren in einer Maschine ablaufen, sind elektronische Getriebe im Einsatz, bei denen entweder mehr als zwei Achsen gekoppelt oder mehrere elektronische Getriebe in einer hierarchischen Stufung untereinander verknüpft sind („kaskadierte Getriebe").

Weichvorbearbeitung von Stirnrädern/Wälzfräsen

In *Bild 1.28* sind die gängigsten Wälzverfahren der Weichvorbearbeitung am gemeinsamen Bezugsprofil Zahnstange dargestellt. Zum besseren Verständnis muss man sich das nur links am Hobelkamm gezeichnete Werkstück ein zweites Mal im Eingriff mit dem Wälzfräser, ein drittes Mal im Eingriff mit dem Schneidrad und ein viertes Mal im Eingriff mit dem Schälrad vorstellen. Beim Wälzfräsen, Wälzstoßen und Wälzschälen handelt es sich wegen der in Wälzrichtung praktisch unbegrenzten Werkzeuglänge um kontinuierliche Wälzverfahren, mit denen Werkstücke ohne Unterbrechung vollständig ausgewälzt werden können. Beim Hobeln muss wegen der begrenzten Werkzeuglänge innerhalb eines Werkstücks immer wieder ein Teilvorgang durchgeführt werden.

Betrachtet man zusätzlich die Ausbildung der Zahnlücke in Zahnrichtung, so zeigen sich zwischen dem Wälzfräs- und Wälzschälverfahren einerseits und den Verfahren Wälzstoßen und Wälzhobeln andererseits deutliche Unterschiede. Sowohl Stoß- als auch Hobelbewegung arbeiten mit einer geradlinigen Schnittbewegung. Dies führt zu einer Spanabnahme, die im We-

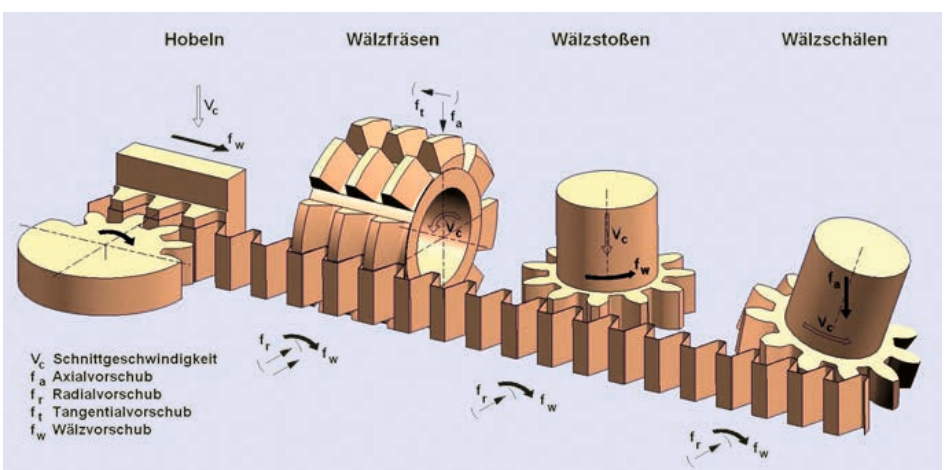


Bild 1.28: Prinzip der vier Wälzverfahren zur Weichbearbeitung

sentlichen in Zahnrichtung verläuft. Beim Wälzfräsen und Wälzschälen wird das rotierende Werkzeug mit Hilfe des Axialschlittens in Zahnlängsrichtung bewegt. Beim Wälzfräsen entstehen wegen des relativ langsam rotierenden Werkstücks abhängig vom Axialvorschub Markierungen in Zahnrichtung, die zusammen mit den vorher beschriebenen Hüllschnitten des Evolventenprofils der wälzgefrästen Zahnflanke ein facettenartiges Aussehen verleihen. Wälzgefräste und wälzgeschälte Späne sind immer kurz, während Späne von Stoß- und Hobelmaschine über die gesamte Zahnradbreite abgenommen werden. Abwälzwerkzeuge können grundsätzlich bei gleichem Modul für die Fertigung unterschiedlicher Zähnezahlen eingesetzt werden.

Wälzfräsmaschinen sind kontinuierlich arbeitende Verzahnmaschinen. Das verwendete Werkzeug ist aus geometrischer Sicht eine Evolventenschnecke, deren Schneckengänge durch Spannuten unterbrochen sind. Die Flanken und der Kopf der Schneidzähne sind hinterarbeitet, um den für die Zerspanung notwendigen Freiwinkel zu schaffen. Werkzeug und Werkrad wälzen wie in einem Schneckengetriebe miteinander. Die Fräserdrehung erzeugt die Schnittbewegung und zusätzlich die translatorische Wälzkomponente durch tangentiales Verschrauben der Schneidflanken.

Die Herstellung einer Geradverzahnung erfolgt unter folgenden Randbedingungen:

- Wälzfräser und Werkstück wälzen mit gekreuzten Achsen analog Schnecke – Schneckenrad.
- Die Achse des Wälzfräsers ist um den Steigungswinkel des Fräsers gegen die Werkstückstirnebene geschwenkt.
- Wälzfräser und Werkstück werden um die Zahntiefe gegeneinander zugestellt.
- Wälzfräser und Werkstück drehen sich im Verhältnis Werkstückzähnezahl zu Fräsergangzahl.
- Der Wälzfräser oder das Werkstück wird mit Vorschubgeschwindigkeit parallel zur Werkstückachse bewegt. Dabei erfolgt die Spanabnahme.
- Nach einer genügenden Anzahl von Werkstückumläufen sind alle Zahnlücken auf der gesamten Werkstückbreite ausgeschnitten.

Auch bei Schrägverzahnungen erfolgt die Bewegung des Frässchlittens parallel zur Werkstückachse. Deshalb muss in diesem Fall die Achse des Wälzfräsers um den Fräsersteigungswinkel und um den Schrägungswinkel der zu fräsenden Verzahnung geschwenkt werden. Dass der Wälzfräser während der Axialvorschubbewegung immer in Zahnrichtung schneidet, erhält das Werkstück zusätzlich zur Wälzbewegung eine Zusatzdrehung durch ein Differentialgetriebe, das bei modernen Maschinen ebenfalls durchweg elektronisch realisiert wird.

Der Axialvorschub des Werkzeugs erzeugt beim Wälzfräsen Vorschubmarkierungen. Der Abstand zwischen zwei Markierungen zeigt den vom Wälzfräser zurückgelegten Weg während einer Werkstückumdrehung. Hierbei zeigt sich auch ein Zusammenhang zwischen Qualität und Bearbeitungszeit insofern, als höhere Axialvorschübe zwar die Bearbeitungszeit reduzieren, andererseits aber zu stärkeren Vorschubmarkierungen– also Qualitätseinbußen – führen.

Beim Wälzfräsen sind an der Herstellung eines Zahnrades nur wenige Zähne des Wälzfräsers beteiligt, da dieser parallel zur Werkstückachse über die Verzahnbreite geführt wird. Für eine gleichmäßige Fräserbelastung und zur Verschleißreduzierung

kann das Werkzeug kontinuierlich oder in Zeitabständen in Fräserlängsrichtung, also tangential zum Werkstück verschoben werden. Diese Bewegung wird Shiften genannt. Für einen bestimmten Wälzfräser sind Modul und Eingriffswinkel definiert. Mit demselben Fräser können allein durch Variation der Maschineneinstellungen Werkstücke mit unterschiedlichen Zähnezahlen, Profilverschiebungen und Schrägungswinkeln hergestellt werden.

Bild 1.29 zeigt eine moderne CNC-Wälzfräsmaschine für die Massenproduktion. Eine solche Maschine benötigt in der Grundausstattung mindestens fünf numerisch gesteuerte Achsen, die in manchen Fällen alle simultan arbeiten. Folgende Achsbewegungen sind davon betroffen:

- A-Achse Tangentialbewegung des Werkzeugs (Shiften)
- B-Achse Wälzbewegung des Werkzeugs (Schnittbewegung)
- C-Achse Wälzbewegung des Tisches bzw. des Werkstücks
- X-Achse Radialbewegung des Werkzeugs
- Z-Achse Axialbewegung des Werkzeugs

In der Regel sind die beiden Wälzbewegungen und die Axialbewegung durch elektronische Getriebe miteinander gekoppelt. Wird höhere Flexibilität gefordert, sollen also unterschiedliche Werkstücke gefräst oder der Schrägungswinkel korrigiert werden, kommt als sechste CNC-Achse die Fräserkopfschwenkung hinzu.

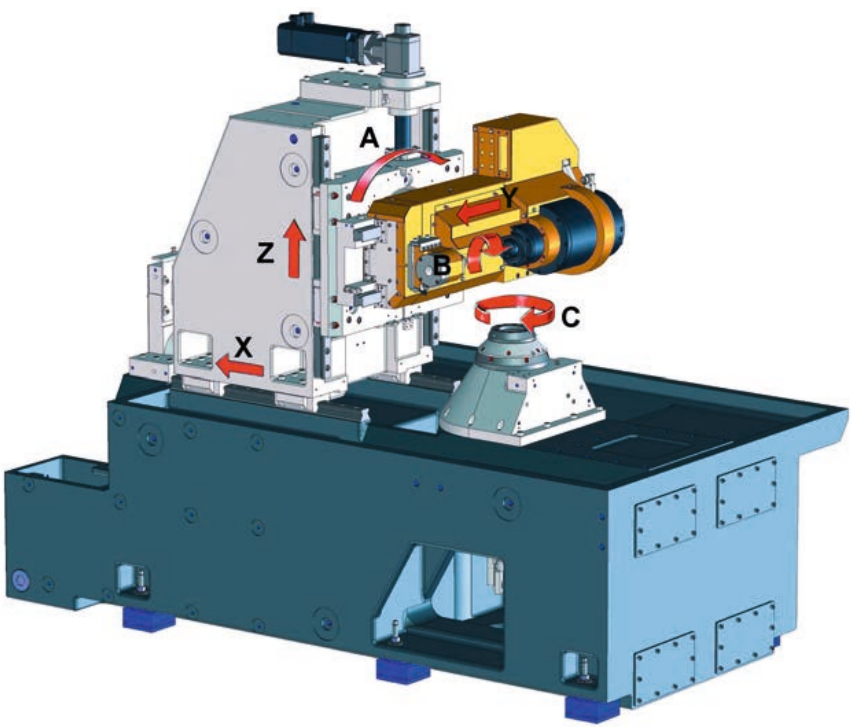


Bild 1.29: Moderne CNC-Wälzfräsmaschine für die Massenproduktion (Werkbild Liebherr)

Spielfreie Tischantriebe sind eine wichtige Grundvoraussetzung für die Herstellung von Verzahnungen mit hoher Qualität. Um die Spielfreiheit sicherzustellen, sind die Hersteller von Wälzfräsmaschinen unterschiedliche Wege gegangen. So sind nebeneinander Duplexschneckenantriebe, Doppelschneckenantriebe, verspannte Zylinderradantriebe und Antriebe mit Hypoidrädern im Einsatz. Die Zukunft gehört aber sicher den Direktantrieben, die darüber hinaus noch hohe Drehzahlen erlauben und damit auch für andere Technologien wie z. B. Zahnflankenschleifen einsetzbar sind. Direktantriebe werden inzwischen bei Neumaschinen mit Ausnahme sehr großer Maschinen für alle Wälzachsen eingesetzt.

Durch den Trend zur Trockenbearbeitung sind neue Maschinenkonzepte mit geänderten Achsanordnungen entstanden. Diese Konzeptionen verfolgen gemeinsam das Ziel, einen freien Spänefall zu ermöglichen. Deshalb wurden die Werkstückspindeln entweder horizontal oder vertikal hängend angeordnet.

Den Vorteilen dieser Konstruktionen steht der Nachteil gegenüber, dass sich diese Achslagen nicht für universelle Plattformkonstruktionen eignen, bei denen auf derselben Basis verschiedene Werkstückarten oder sogar verschiedene Technologien wie zum Beispiel Wälzfräsen und Wälzstoßen realisiert werden sollen. Insofern sind diese Produkte als Einzweckmaschinen anzusehen, deren Einsatz für unterschiedlichste Aufgaben eingeschränkt ist.

Einen Produktbaukasten für die Verfahren Wälzfräsen, Wälzstoßen und Wälzschleifen zeigt *Bild 1.30*. Auf den Maschinen ist durchweg auch das zugeordnete Formverfahren ausführbar. Alle Wälzantriebe sind als digitale Direktantriebe realisiert. Durch die einheitliche Maschinenbasis lassen sich Werkstückzufuhr und Automation sowie Nebenfunktionen wie Entgraten und Schleudern unabhängig vom Verzahnverfahren einheitlich gestalten.

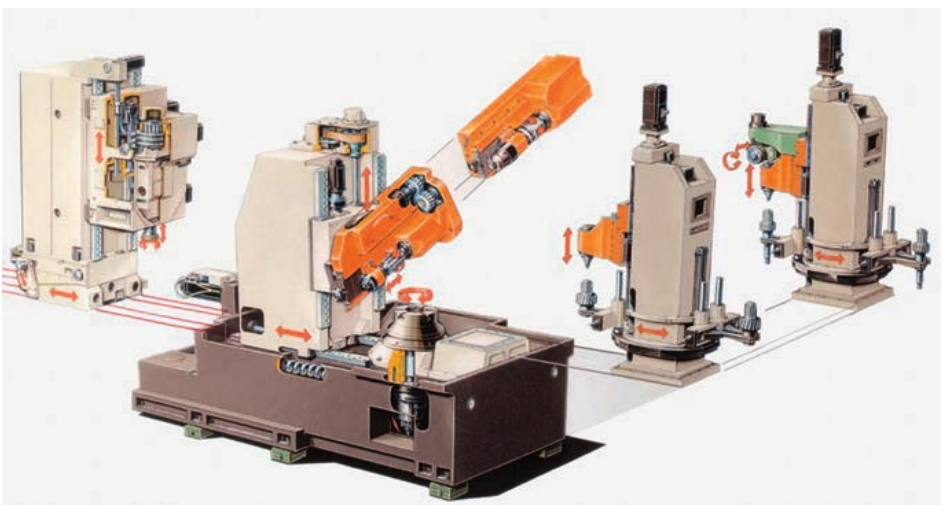


Bild 1.30: Baukasten für Verzahnmaschinen zur Stirnradbearbeitung (Werkbild Liebherr)

Hartfeinbearbeitung von Stirnrädern

Die Bearbeitung gehärteter Zahnflanken folgt im Wesentlichen denselben Grundsätzen wie die Weichbearbeitung. Ziel der Hartfeinbearbeitung ist es, den durch die Wärmebehandlung entstandenen Maßverzug zu beseitigen und eventuelle Flankenkorrekturen zu erzeugen. Die dafür entstandenen Verfahren sind Wälz- und Profilschleifen, Honen sowie Schälwälzfräsen, Hartschälen und Harträumen. Für die Hartbearbeitung sind maschinen- und steuerungsseitig zusätzliche Funktionen nötig, die von entscheidender Wichtigkeit für die Qualität der Zahnflanken sind.

Die Rohteile für eine Hartfeinbearbeitungsmaschine sind bereits verzahnt und das Werkzeug muss mit hoher Präzision in die vorhandene Zahnlücke finden, um alle Flanken zu bearbeiten. Die Erkennung der Werkstücklage erfolgt mit Hilfe eines Sensors, dem beim ersten Werkstück eines Loses die Solllage aufgeprägt wurde und der alle Folgewerkstücke durch eine Korrektur der Winkellage des Werkstücktisches in die gleiche Lage bringt. Unterschiedliche Geometrien der einzelnen Zahnlücken werden dabei ausgemittelt. Man spricht deshalb auch von Einfädel- oder Einmittvorrichtungen.

Beim Arbeiten mit abrichtbaren Werkzeugen wie zum Beispiel Schleifschnecken aus Korund werden in Verzahnmaschinen Abrichteinrichtungen integriert, die für sich wieder mehrachsige Apparate sein können und ein Werkzeug nach bestimmten Strategien (z. B. nach der Fertigung einer vorgegebenen Anzahl von Werkstücken oder bei Erreichen eines bestimmten Verschleißzustandes) wieder in die ursprüngliche Form versetzen. Abrichtwerkzeuge werden mit Diamanten beschichtet.

Herstellung von Kegelrädern

Während die Erzeugung von evolventischen Stirnrädern durch Abwälzen des geradflankigen Bezugsprofils mit dem Werkstück erklärt werden kann, lässt sich die Herstellung von bogenverzahnten Kegelrädern auf das Wälzen des Werkstücks mit dem so genannten Erzeugungsplanrad zurückführen. Bei beiden Rädern eines Kegelradpaares liegt dasselbe Planrad zu Grunde. Der Mittelpunkt des Planrades ist identisch mit der gemeinsamen Spitze der beiden Wälzkegel (siehe *Bild 1.31)*. In der Fertigung wird meistens nur ein Zahn bzw. eine Lücke des Planrades durch das Schneidwerkzeug dargestellt.

Die Verfahren zur Herstellung von Kegelrädern lassen sich prinzipiell in die gleiche Systematik einteilen wie die Verfahren der Zylinderradherstellung. Es gibt auch bei den Kegelrädern Verfahren der Weich- und der Hartbearbeitung. Innerhalb der Weichbearbeitung unterscheidet man ebenso spanlose und spanabhebende Verfahren, und die spanabhebenden Verfahren werden wieder in Form- und Wälzverfah-

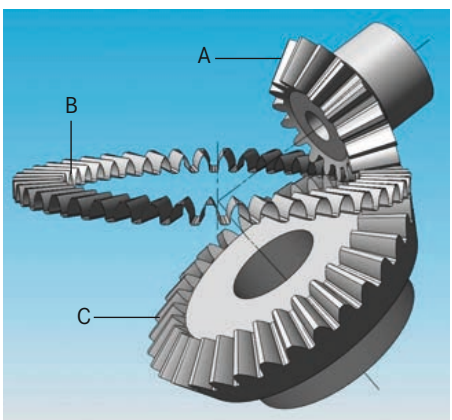


Bild 1.31: Zahnradpaarungen mit sich schneidenden Achsen. A: Antriebsrad, B: Erzeugungsplanrad, C: Abtriebsrad

ren unterteilt. Bei Hartbearbeitungsverfahren unterscheidet man zwischen solchen mit geometrisch bestimmter und geometrisch unbestimmter Schneide. Neben dem Herstellverfahren werden Kegelräder auch danach unterschieden, ob die Zahnhöhe über der Zahnbreite konstant oder vom kleinen zum großen Durchmesser zunehmend – also konisch – verläuft. Die kontinuierlichen Herstellverfahren erzeugen Evolventen oder Zykloiden als Längskurve und Zähne mit konstanter Zahnhöhe.

Konventionelle Kegelradfräsmaschinen haben zehn bis zwölf Achsen, die mit mechanischen Getriebezügen gekoppelt sind. An der Herstellung der Flanken sind drei wesentliche Elemente durch einander zugeordnete Bewegungen beteiligt, die Wälztrommel, der Messerkopf und das Werkrad.

Die kinematische Grundlage für den Herstellungsprozess von Kegelrädern ist das Abwälzen von Erzeugungsrad mit dem Werkstück. Durch die Drehung der Wälztrommel, deren Achse identisch mit der des Erzeugungsrades ist, wird die Drehbewegung des imaginären Erzeugungsrades realisiert.

Der Messerkopf führt die eigentliche Schnittbewegung aus. Die Bahn der Messer im Eingriffsbereich zwischen Werkstück und Messerkopf beschreibt einen Zahn des Erzeugungsrades. Die Drehachse des Messerkopfs liegt exzentrisch und nicht immer parallel zur Drehachse der Wälztrommel. Während des Zerspanprozesses wird sowohl die Fräserachse als auch die Erzeugungsachse gedreht. Die Werkraddrehung setzt sich zusammen aus dem Übersetzungsverhältnis Werkrad – Erzeugungsrad und einer Relativbewegung, die die Wälztrommeldrehung berücksichtigt.

Mit dem Vordringen der CNC-Technik sind Maschinenkonzepte entstanden, die im mechanischen Aufbau einfacher gestaltet und in ihrer Anwendung flexibler sind. Diese Maschinen haben keine Wälztrommel mehr, arbeiten aber ebenso mit Messerköpfen als Werkzeug. Sie besitzen nur noch sechs CNC-Achsen. Die komplexen Relativbewegungen zwischen Werkzeug und Werkstück werden ausschließlich mit Hilfe anspruchsvoller Steuerungs- und Antriebstechnik realisiert. Auf solchen modernen CNC-Maschinen sind alle bekannten Verfahren (Teilverfahren, kontinuierliches Verfahren) und Zahnformen (Kreisbogen, Zykloide) herstellbar, sofern geeignete Werkzeuge eingesetzt werden. Ein Beispiel für eine solche Maschine zeigt *Bild 1.32*. Folgende Achsen sind am Fertigungsprozess beteiligt:

- A-Achse Messerkopfspindel-Rotation
- B-Achse Wekstückspindel-Rotation
- C-Achse Werkstückschwenkachse
- X-Achse Frästiefenzustellung
- Y-Achse Werkstück-Positionierung
- Z-Achse Werkzeug-Positionierung

Die Herstellung von Kegelrädern ist nicht nur Sache einer Maschine oder eines Werkzeugs. Sie erfolgt heute in aller Regel auf der Basis einer speziellen Fertigungsorganisation, die in der Art eines Regelkreises arbeitet. So ist zur Erreichung der geforderten Qualität die Verzahnungsmessmaschine genauso wichtig wie die Werkzeugschärfmaschine und die eigentliche Verzahnmaschine.

Programmierung von Verzahnmaschinen

Die Programmierung moderner Verzahnmaschinen ist stark automatisiert und wird häufig grafisch unterstützt. Der Programmierer bzw. Bediener hat in der Regel die

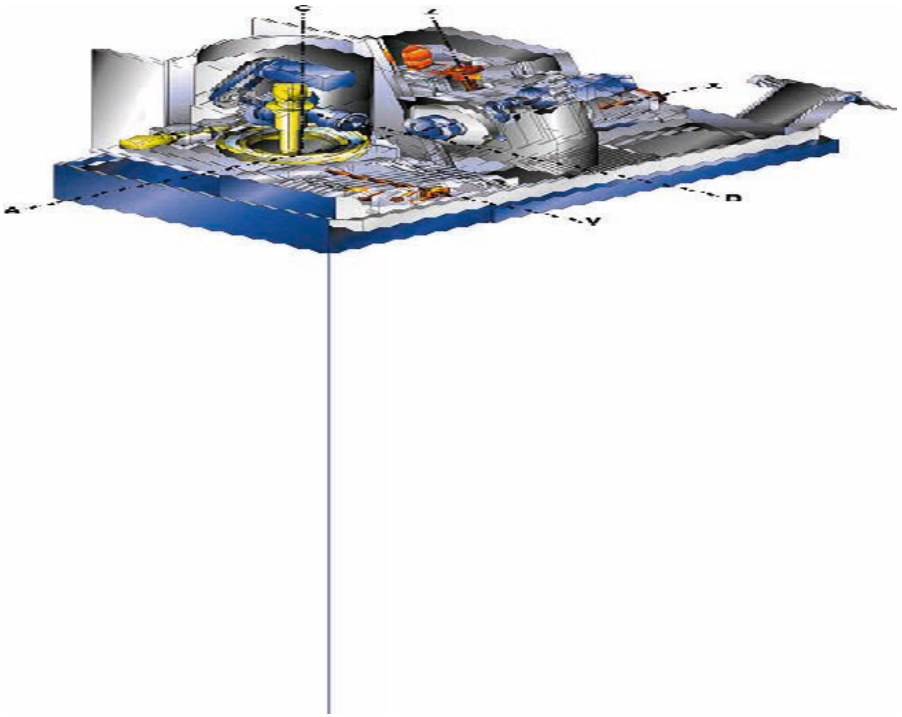


Bild 1.32: Wälzfräsmaschine für Kegelräder (Werkbild Klingenberg)

Sollparameter des Werkstücks und die Istmaße des Werkzeugs in Bildschirmmasken einzugeben. Die Schnittwerte holt sich die Steuerung bei Standardanwendungen aus gespeicherten Datenbanken. Das erstellte Programm liefert auch die erwartete Bearbeitungszeit. Auch Programme, die die Spanbildung simulieren und damit Rückschlüsse auf den Verschleiß des Werkzeugs erlauben, sind im Einsatz. Der Programmierer kann dabei an jeder Stelle manuell eingreifen, um den Prozess zu optimieren oder Sondereinflüsse zu berücksichtigen.

1.5 Bohrmaschinen *(Bild 1.33)*

Alle Bohrmaschinen haben 2 gemeinsame Konstruktionsmerkmale:

1. Ein Spindelkopf mit senkrechter Bohrspindel, die das Werkzeug aufnimmt und die Vorschubbewegung ausführt (senkrechte Z-Achse).
2. Ein Maschinentisch, auf dem das Werkstück aufgespannt und in den Achsen X und Y unter der Bohrspindel positioniert wird.

Der aufzubringende Bohrdruck ist also senkrecht auf den Maschinentisch gerichtet, was den Vorteil bringt, dass das Werkstück fest auf den Tisch gedrückt wird und keine horizontalen Verschiebungskräfte auf Werkstück, Vorrichtung und Achsantriebe wirken.

Bohrmaschinen sind insbesondere zur Bearbeitung plattenförmiger Werkstücke geeignet und zwar sowohl mit ein- als auch mit mehrspindligen Werkzeugen. Hinzu

kommt die Forderung, auch leichte Fräsarbeiten ausführen zu können.

In der einfachsten Ausführung verfügt die CNC-Bohrmaschine nur über einen numerisch gesteuerten Koordinatentisch. Die Bohrtiefe wird durch mechanische Anschläge oder Nockenleisten voreingestellt. Bei solchen Maschinen wird nach beendeter Positionierung durch ein Signal „Tisch in Position" der Bohrzyklus eingeleitet, der ohne CNC-Einfluss mechanisch oder elektrisch abläuft. Nach Abschluss des Bohrvorganges erfolgt wieder Rückmeldung an die CNC „Spindel oben", womit die nächste Positionierung beginnen kann. Programmbestandteil sind Aus-Spän-Zyklen mit Programmierung der Z-Achse (Werkzeug – Länge, Eilgang – Anfahren usw.)

Eine weitere Ausbaustufe, die jedoch zusätzlichen Aufwand an der Maschine erfordert, ist der automatische **Werkzeugwechsel.** Erst damit ist es möglich geworden den Aufgabenbereich des Werkers auf reine Überwachungsfunktionen zu beschränken

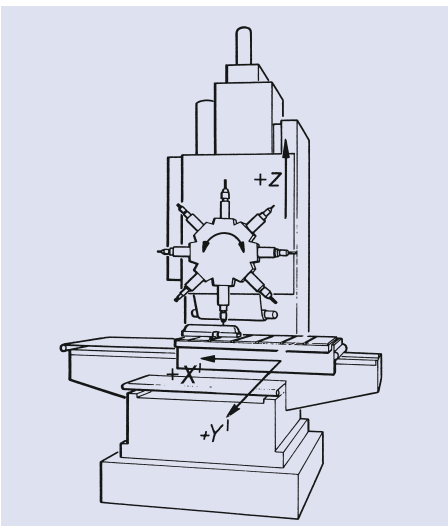


Bild 1.33: 3-Achsen-Bohrmaschine mit Werkzeugrevolver

und somit eine wirklich automatische Bearbeitung durchzuführen.

Hierzu müssen zwei weitere Ausbaustufen bei Maschine und Steuerung vorausgesetzt werden:

Programmierbare Auswahl der **Spindeldrehzahlen** und des **Vorschubes.** Nur so kann eine optimale Anpassung an die Schnittbedingungen für das ausgewählte Werkzeug und das Werkstück erreicht werden, ohne die Notwendigkeit eines manuellen Eingriffes.

Sobald umfangreiche Fräsbearbeitungen, eventuell auch an Konturen, ausgeführt werden sollen, muss an die Stelle der bislang besprochenen Punkt- und Streckensteuerung die **Bahnsteuerung** treten. Meist genügt hierzu die 2 ½ D Bahnsteuerung.

Bei achssymmetrischen Bohrbildern dient die Ausbaustufe „**Spiegeln**" zur Programmiervereinfachung. Bearbeitungen, die sich spiegelbildlich in einem anderen Quadranten wiederholen, lassen sich um eine oder zwei Achsen spiegeln.

Diese Funktion wird entweder mit einem Schalter pro Achse, dem sog. **Symmetrieschalter,** manuell eingeschaltet, oder mit einer **G-Funktion** programmiert. Damit genügt es, zur Bearbeitung des gesamten Bohrbildes nur die Hälfte oder ein Viertel zu programmieren. Ist die Bearbeitung in einem Quadranten beendet, wird die Symmetriefunktion z. B. auf „Spiegeln um die Y-Achse" eingeschaltet und die Bearbeitung mit dem gleichen Programm wiederholt, jedoch nun im 2. Quadranten. Danach folgt durch entsprechende Spiegelung die Bearbeitung im 3. und dann im 4. Quadranten.

Leistungsfähige CNCs lassen darüber hinaus auch das **Drehen und Schwenken** um einen programmierbaren Winkel und das maßstäbliche **Vergrößern und Verkleinern** von Bohrbildern zu.

Weiterhin sollten bei einer Bohrmaschine die immer wiederkehrenden **Bohrzyklen** verfügbar sein. Diese stellen eine Art fester Unterprogramme dar, deren verschiedene Varianten durch **G81 bis G89** aufgerufen werden und die sich dann an jeder neuen X/Y-Position automatisch wiederholen. Mit G80 schaltet sie der Programmierer wieder aus. Beispiel Feinbohrzyklus: Spindel im tiefsten Punkt stillsetzen, Werkstück etwas verfahren, dann erst Werkzeug ausfahren um Rückzugsriefen zu vermeiden.

Unbedingt erforderlich ist auch die **Werkzeuglängen-Korrektur**. Diese ermöglicht den Einsatz von Werkzeugen, deren tatsächliche Länge nicht der im Programm vorgesehenen Länge entspricht. Das Differenzmaß ist in den **Korrekturwert-Speicher** der Steuerung einzugeben, um somit wieder die programmierte Bohrtiefe zu erreichen. Diese Korrekturwerte sind entweder den Werkzeugen fest zugeordnet oder über die H-Adresse frei abrufbar *(Bild 1.33)*.

Bohrzentren *(Bild 1.34)*

Oft besteht der Wunsch des Kunden, höher zu automatisieren, ohne auf die besonderen Vorteile von Bohrmaschinen verzichten zu müssen. Dies hat zur Entwicklung der Bohrzentren geführt.

Ein zusätzlicher Dreh- oder Schalttisch mit horizontaler Achse ermöglicht die **4-Seiten-Bearbeitung** kubischer Werkstücke und erweitert die Bohrmaschine zum Bohrzentrum. Um insbesondere bei größeren Losgrößen Nebenzeiten zu reduzieren, rüstet man diese Maschinen zusätzlich mit zwei **Mehrfach-Spannvorrichtungen** und einem Schwenktisch aus.

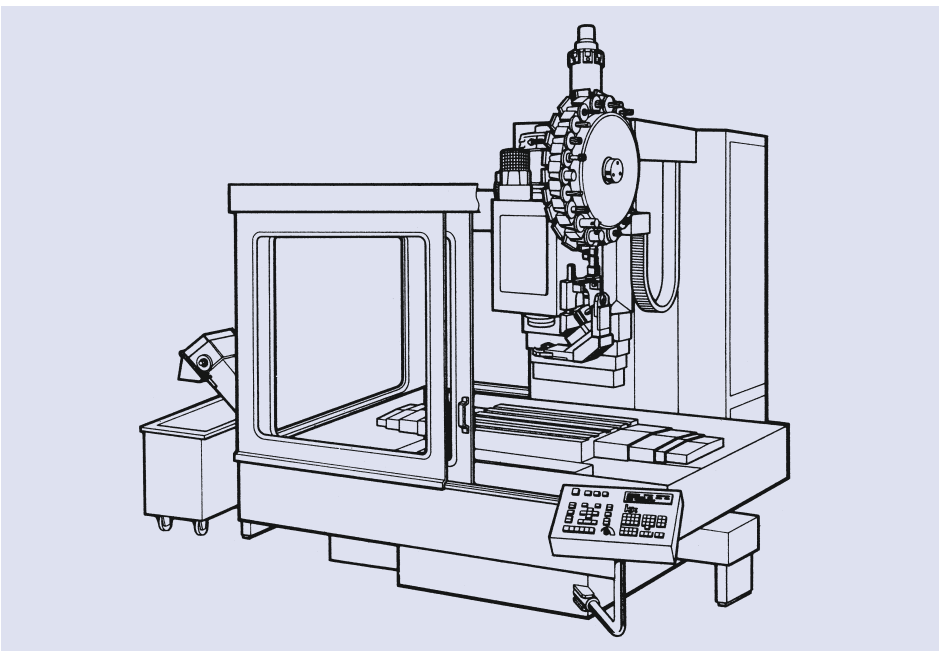


Bild 1.34: Vertikalbohrmaschine in Grundausstattung mit Rundmagazin und X-, Y-, Z-Achse

Dies lässt das manuelle oder automatische Be- und Entladen der Werkstücke außerhalb des Bearbeitungsraumes während der Hauptzeit zu. Ist das Bohrzentrum zusätzlich noch mit **zwei oder drei Hauptspindeln** ausgerüstet, dann ist auch die Mengenleistung dementsprechend größer als bei einspindligen Maschinen.

Leiterplatten-Bohrmaschinen

Eine spezielle Variante der Bohrmaschine wurde zur Bearbeitung bedruckter Leiterplatten für die Elektronik-Industrie entwickelt. Auf diesen Maschinen werden mehrere, gleichartige Leiterplatten übereinander und nebeneinander aufgespannt und mit mehreren Bohrspindeln gleichzeitig gebohrt und gefräst. Die an einer Traverse befestigten Bohrspindeln haben einen Drehzahlbereich von 15.000 – 60.000 Umdrehungen pro Minute und verfügen in einigen Fällen über automatisch wechselbare Werkzeuge. Das Aufnehmen und Ablegen der Werkzeuge erfolgt durch Anfahren der Magazin-Positionen, die sich am hinteren oder vorderen Ende des Bearbeitungstisches befinden. Dort nehmen alle Spindeln gleichzeitig ihre Werkzeuge auf, bzw. legen diese im Magazin ab. So erfolgt das Bohren der Leiterplatten und das anschließende Ausfräsen von Ausschnitten und Rändern in einer Aufspannung.

Die numerische Steuerung für diese spezielle Bohrmaschine kommt deshalb auch nicht ohne spezielle Funktionen aus, wie z. B.

- Steuerung von zwei Achsen (X, Y) im schnellen Positionierbetrieb (Eilgang) und vorschubgesteuerten Bahnbetrieb zum Fräsen. Nach erreichter Position erfolgt der Spindelabruf. Die obere und untere Begrenzung der Bohrspindel-Bewegung (Z-Achse) beim Bohren erfolgt durch Einstellung an externen Einstellelementen und muss nicht programmiert werden.
- Programmierbarer Abruf der einzelnen Spindeln oder Spindelgruppen, sodass wahlweise verschiedene Spindeln in ihren oberen Endpositionen verharren.
- Programmierung im Teach-in-Verfahren, d. h. Anfahren der einzelnen Bohrpositionen über Handverstellung des Tisches ins Fadenkreuz einer Optik und anschließendes Abspeichern der Positionswerte. Bei vorher vorgewähltem Rastermaß muss die Position nicht genau, sondern nur innerhalb der Toleranzbreite von ± ½ Raster angefahren werden. Die Steuerung erkennt und programmiert automatisch den exakten Rasterpunkt.
- Umschaltbares oder programmierbares Rastermaß, d. h. Rasterabstand in Zoll- oder mm-Einheiten, beliebig festlegbar.
- Zusätzliche Maßstabfaktor-Eingabe um die Dehnung bzw. Schrumpfung der Leiterplatte nach dem Entwicklungsprozess berücksichtigen zu können.
- Unterprogrammtechnik für mehrere Bohrbilder, Lochreihen, Lochkreise, sodass bei IC's, LSI's, Potis, Schaltern und anderen Bauelementen mit standardisierten Abständen der Anschlüsse nicht alle, sondern jeweils nur 1 Fixpunkt programmiert werden muss. Alle anderen folgen automatisch aus dem Unterprogramm. Dies ist wichtig auch bei Ausspänzyklen, Tiefbohrzyklen, Gewindebohrzyklen.
- Hinzu kommt in einigen Spezialfällen das Drehen der Lochbilder um beliebig programmierbare Winkel.
- Die Möglichkeit zur Programmierung und Speicherung kundenspezifischer Zyklen, Bohrbilder oder Fräsbilder.
- Das Schriftfräsen, z. B. zum Beschriften der Leiterplatte mit Typenbezeichnung, Fertigungs-Nummer, Datum o. Ä. Dies erfordert einen speziellen Zeichengene-

rator, sodass jeder beliebige Text ohne umständliche Programmierung direkt eingegeben werden kann, möglichst noch mit variabler Schriftgröße.

Schließlich muss die CNC noch folgende Maschinenfunktionen steuern:

- Spindelauswahl und Drehzahl
- Vorschubauswahl zum Bohren (Z) und Fräsen (X, Y)
- Werkzeug ablegen/aufnehmen im Magazin
- Bohren Ein/Aus
- Fräsen Ein/Aus

Diese Funktionen werden über freibelegbare M-Funktionen gesteuert.

Selbstverständlich braucht die Steuerung einen entsprechend großen Programmspeicher, in dem mehrere Programme frei abrufbar abgelegt werden können, mit der Möglichkeit, Korrekturen und notwendige Optimierungen schnell und problemlos durchführen zu können. Da Leiterplatten-Bohrmaschinen in einem enorm schnellen Takt von bis zu 10 Hüben/Sekunde arbeiten, muss die Verarbeitungs- und Ausgabegeschwindigkeit der CNC entsprechend hoch sein, damit selbst kürzeste, aufgrund der CNC-internen Verarbeitung entstehende Wartezeiten vermieden werden.

Bohrwerke

Dies sind meist sehr große Maschinen mit horizontaler Hauptspindel. Auch die Werkstücke sind entsprechend groß und lassen deshalb keinen automatischen Werkstückwechsel zu. Jedes Werkstück wird einzeln ausgerichtet, gespannt und dann bearbeitet.

Für reine Bohrbearbeitungen würde es genügen, die Maschine mit einer weithin gut ablesbaren **Positionsanzeige** auszurüsten. Diese Überlegung geht davon aus, dass die Bearbeitungsgänge nach dem Positionieren der Spindel meistens sehr lange dauern und es müssen nicht viele Positionen sehr rasch nacheinander angefahren werden. Der Maschinenführer hätte Zeit, die nächste X/Y-Position während der Bearbeitung vorzuwählen und anschließend zu positionieren. Noch einfacher ginge es mit einer automatisch arbeitenden **Positionier-Steuerung.**

Doch im Laufe der Zeit wurden auch die großen Werkstücke zunehmend komplizierter, die Bearbeitungen vielfältiger und die Steuerungen billiger. Deshalb rüstet man Bohrwerke heute mit Bahnsteuerungen aus, wobei gelegentlich schon 7 simultane CNC-Achsen zusammenkommen können. Unverzichtbar erscheinen bei Bohrwerken die Funktionen

- Teach-in kompletter Bohrbilder mit Spiegelfunktion, um z. B. die Bohrungen am Gehäuse zu teachen und den dazugehörigen Deckel deckungsgleich herzustellen, *(Bild 1.35)*
- Schräglagenkorrektur zum Ausgleich von Spanntoleranzen,

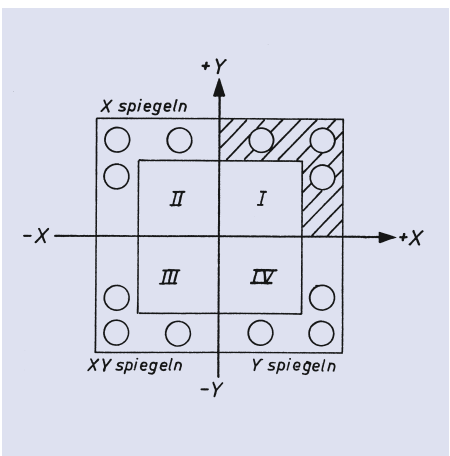


Bild 1.35: Spiegeln der Weginformationen

- Ausfräsen von Bohrungen,
- Gewindefräsen,
- Messzyklen für den Einsatz schaltender Messtaster,
- sowie die grafisch unterstützte Programmierung mit Simulation der Bearbeitung.

Für besondere Bearbeitungen stehen spezielle **Zyklen** zur Verfügung, die am Bildschirm aufgerufen, mit den erforderlichen Parameterwerten versehen und bei Bedarf auch modifiziert werden können. Typische Beispiele sind Lochkreise, Lochreihen, Formenfräsen oder Taschenfräsen. Sehr wichtig ist auch die **einfache Bedienung** der Steuerung, um beispielsweise ein laufendes Programm problemlos unterbrechen und zu einem späteren Zeitpunkt wieder fortsetzen zu können, oder zum Austausch verbrauchter Werkzeuge incl. der dazugehörenden Korrekturwerte. Zudem sollte die CNC dem Anwender die Möglichkeit bieten, spezifische **Unterprogramme** incl. Hilfsgrafik und Parametrierung selbst erstellen zu können.

Als **Messsysteme** kommen vorwiegend lineare Maßstäbe zum Einsatz, bei erhöhten Genauigkeitsforderungen mit zusätzlicher Maßstabfehler-Kompensation in der CNC.

Eine **erhöhte Flexibilität** großer Waagerecht-Bohr- und Fräszentren lässt sich durch folgende Erweiterungen erreichen:

- **Werkzeug-Magazine** mit automatischem Wz-Wechsel,
- austauschbare **Zusatzköpfe** zum Bohren, Fräsen, Gewindewirbeln und Plandrehen,
- Pick-up-Stationen für Sonder-Werkzeugköpfe,
- transportable Bedienstation,
- dreh- und verschiebbare **Aufspanntische,**
- **Kombination mit anderen Großmaschinen,** wie z. B. einem zweiten Bohrwerksständer, einer Karussell-Drehmaschine, oder einer Fahrständermaschine an großer Aufspannplatte.

1.6 Parallelkinematische Maschinen

Im Unterschied zu konventionellen Werkzeugmaschinen, bei denen die einzelnen Achsen seriell, d. h. nacheinander angeordnet sind, wirken bei parallelkinematischen Maschinen alle Bewegungsachsen direkt auf eine zu bewegende Werkzeugträgereinheit mit der eingebauten Hauptspindel. Im Gegensatz zu konventionellen Maschinen, bei denen die Bewegungsachsen die gleiche Anordnung wie das Werkstückkoordinatensystem besitzen, d. h. zueinander ortogonal angeordnet sind, zeichnen sich parallelkinematische Maschinen durch eine **nicht ortogonale Achsanordnung** aus. Die Bewegungsachsen orientieren sich nicht am rechtwinkligen Koordinatensystem. Somit wirkt sich die Lageabweichung einer Bewegungsachse auf die erreichbare Genauigkeit in allen Richtungen aus. Bei den meisten Maschinen, die bisher in der Praxis eingesetzt sind, handelt es sich jedoch um hybride Lösungen. D. h. nur bei einem Teil der Vorschubachsen handelt es sich um parallele Achsen, die restlichen Achsen sind seriell aufgebaut. *Bild 1.36* zeigt eine Übersicht der Einteilung zu Parallelkinematischen Maschinen sowie die Kombination mit der Möglichkeit, hybride Bewegungsachsen zuzuordnen.

Die Ausführung eines Tripod wird in den *Bildern 1.37 und 1.38* gezeigt. Dabei halten und führen 3 Koppelarme der Stabkinematik die kardanisch gelagerte Spindelplattform. Über die drei angetriebenen

Parallel			Hybrid (seriell – parallel)		
Maschinenkoordinatensystem (Freiheitsgrade)					
3	5	6	3	5	
Werkstückkoordinatensystem (Achsen)					
X/Y/Z	X/Y/Z A/B	X/Y/Z A/B/C	X/Y/Z	X/Y/Z C/A	X/Y/Z A/B
↓	↓	↓	↓	↓	↓
TRIPODEN	**PENTAPO-DEN**	**HEXAPODEN**	**Bauformen**		
			I	II	III

Bild 1.36: Parallelkinematische Maschinen, Definition und Einteilung



Bild 1.37: Tripod im Einsatz bei Hochgeschwindigkeitsfräsen an einem Flugzeugteil aus Aluminiumlegierung (Werkbild DST)

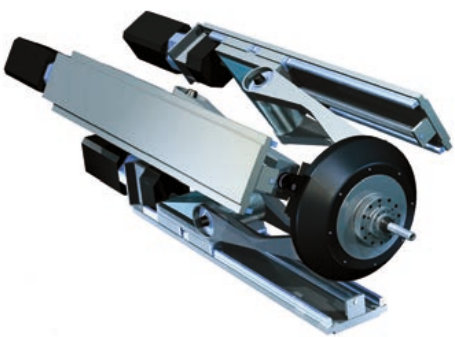


Bild 1.38: Tripod: Grafische Darstellung (Werkbild DST)

Koppelarme bewegt die CNC-Steuerung die Frässpindel bzw. das Werkzeug beliebig sowohl längs in der Z-Achse als auch schwenkend um die A- und/oder B-Achse. Kombiniert mit den X- und Y-Achsen des Bearbeitungszentrums ergibt dies eine 5-Achs-Simultanbearbeitung mit höchster Dynamik. Mehrfach eingesetzt ist dieser Bearbeitungskopf für die Herstellung von großen Flugzeugteilen in Integralbauweise. Ausgangsmaterial sind z. B. Aluplatten mit 60 – 300 mm Dicke und Längen bis zu 30 m. Dabei kommen Zerspanungsraten bis 98 % vor.

Betrachtet man nur den Bearbeitungskopf, haben diese Maschinen keine konventionellen, rechtwinklig zueinander stehenden

X-/Y-/Z-Achsen oder Rundachsen. Daher muss die CNC die jeweilige Kinematik der Maschine berücksichtigen und selbst zum manuellen oder programmierten Fahren linearer Strecken alle CNC-Achsen interpolieren. Dies erfordert eine sehr hohe Rechengeschwindigkeit und erschwert zudem das automatische Einfügen von Korrekturwerten zur Kompensation systematischer, mechanischer Fehler. Die CNC muss demnach alle Achsen simultan steuern können, um eine Relativbewegung der sich bewegenden Spindel zum feststehenden Werkstück zu erzeugen. Dies wird durch Verlängern bzw. Verkürzen der Streben erreicht.

Als Vorteile werden genannt:
- hohe Steifigkeit
- hohe Geschwindigkeit
- geringe zu bewegende Masse.

Dem stehen folgende Nachteile gegenüber:
- geringer Bereich des Arbeitsraumes nutzbar
- geringe Neigungsmöglichkeit der Spindel
- problematische 5-Seiten-Bearbeitung.

1.7 Sägemaschinen

(Dipl.-Ing. Armin Stolzer)

Werkzeugmaschinen mit Sägewerkzeugen dienen dem Trennen von Materialien wie Stabstahl, Platten, Blechen o. Ä. Das Sägen gehört als Prozess zum Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden mit mehrschneidigen Werkzeugen (DIN 8580/8589) und in der Fertigungsorganisation zur so genannten Vorfertigung.

Im Bewusstsein der Anwender hat das Zuschneiden im Vergleich zu den übrigen Produktionsverfahren lange eine eher untergeordnete Rolle gespielt, da es meist nicht der Produktion, sondern dem Lagerbereich zugeordnet wurde. Diese Einschätzung hat sich mit dem Zwang zur durchgängigen Rationalisierung von Produktionsabläufen und mit der Werkzeug- und Maschinenentwicklung bei Kreis- und Bandsägen, grundlegend gewandelt.

Kreissägen

Kreissägemaschinen werden in unterschiedlichen kinematischen Ausführungen für den Einsatz von HSS- und von mit Hartmetall bestückten Sägeblättern angeboten. Darüber hinaus können an einigen Kreissägemodellen Gehrungsschnitte gesägt werden. Da im Allgemeinen nur ein Drittel des Sägeblatt-Durchmessers als Arbeitsbereich genutzt werden kann, benötigt man für große Querschnitte überproportional große Werkzeuge. Heute finden Kreissägemaschinen hauptsächlich bei Material-Durchmessern unter 150 mm Verwendung. Sie kommen als Universalsägen mit Gehrungsschnittmöglichkeit, als schnelle Massenschnitt-Säge oder als Auftragssäge mit hoher Automatisierung zum Einsatz.

Bandsägen

Für den schweren Produktionseinsatz bevorzugt man parallel verfahrende Säge-Einheiten und breite Sägebänder. Die größte Verbreitung finden Horizontal-Bandsägemaschinen in steifer Zweisäulen-Bauweise mit modernen Linearführungselementen. Nicht zuletzt brachte der Einsatz von Mineralguss im Sägeschlitten eine weitere Leistungsverbesserung bei Bandsägemaschinen.

Für Produktionsbandsägemaschinen hoher Steifigkeit stehen heute leistungsfähige

Bandsäge-Werkzeuge aus Bimetall oder mit Hartmetallbestückung zur Verfügung.

Ist ein Werkstoff für Hartmetall-Bandsägewerkzeuge geeignet, lässt sich die Sägeleistung mit Hartmetall-Bändern auf hierfür ausgerüsteten Maschinen um das ca. zwei- bis dreifache steigern.

Bauformen und Ausführungen

Herzstück einer jeden Sägemaschine ist die **Sägeeinheit,** mit der die Sägewerkzeuge geführt und angetrieben werden. Dabei kommt es auf eine möglichst steife Konstruktion an.

Bei **Kreissägemaschinen** wird hierfür eine kompakte Getriebeeinheit mit gehärteten und geschliffenen Zahnrädern eingesetzt, wobei die Sägeeinheit entweder im Schwenklager oder an einer Linearführung präzise und schwingungsarm geführt werden muss. Je nach Arbeitsaufgabe kann der Schnitt von unten, von der Seite, schräg von oben oder senkrecht von oben erfolgen.

Bei **Hochleistungs-Produktionsbandsägemaschinen** ist die lineare Schnittvorschub-Bewegung gängige Praxis. Bei kleineren Arbeitsbereichen sowie bei Langschnittmaschinen läuft das Sägeband vertikal ab, während sich in den anderen Bereichen ein horizontal ablaufendes Sägeband durchgesetzt hat.

Bei der Ausführungsform werden Sägemaschinen vielfach nach dem **Automatisierungsgrad** unterschieden und in drei Gruppen geteilt:

- Manuelle Säge: Der Bediener steuert den Schnitt.
- Halbautomatische Säge: Ein einzelner Schnitt wird automatisch ausgeführt, nach Schnittende schaltet die Maschine ab.
- Automatische Säge: Eine vorgegebene Anzahl von Schnitten wird bedienerlos durchgeführt.

Je nach Aufgabenstellung kann der Automatisierungsgrad durch eine geeignete Zu- und Abfuhrperipherie weiter gesteigert werden. Mit der Materialzufuhr über Schräg- bzw. Universalmagazine oder durch eine vollautomatische Beschickung aus dem Sägezentrum oder mittels eines Manipulators aus einem Langgutlager lassen sich die mannlosen Maschinenlaufzeiten verlängern und so eine verbesserte Wirtschaftlichkeit erreichen.

Steuerung und Technologie-Einstellung

Nicht nur auf der mechanischen Seite, sondern auch auf der Steuerungs-, Antriebs- und Technologieebene hat es deutliche Fortschritte gegeben. Klassische Schützensteuerungen werden mittlerweile durch moderne leistungsfähige CNC-Steuerungen abgelöst. Für einfache Automaten stehen heute serienmäßige Steuerungen mit LC-Display, Funktionstasten, Handbedienfunktionen und Klartext-Diagnose zur Verfügung, die zudem Siemens-SPS-kompatibel programmiert werden. Mit diesen Steuerungen lassen sich eine große Anzahl an Auftragsdatensätzen (Längen-Stückzahl-Kombinationen) über eine Tastatur vorgeben und abrufen. Parallel dazu lässt sich die Sägevorschub-Technologie direkt über das zentrale Bediendisplay einstellen *(Bild 1.39).*

In Verbindung mit Zufuhrmagazinen und Abschnittsortier-Einrichtungen werden höherwertige, zumeist PC-gestützte Bildschirmsteuerungen mit Touch-Screen und umfangreichen Funktionalitäten eingesetzt. Windows-Betriebssystem, Schnittstelle zu übergeordneten Rechnersystemen



Bild 1.39: Moderne Sägemaschinensteuerung (Werkbild Kasto)

sowie umfangreiche Visualisierungs- und Diagnosemöglichkeiten kennzeichnen Sägemaschinensteuerungen für hochautomatisierte Anwendungen. Einen wichtigen Teilbereich hierbei stellt die Technologiesteuerung dar, die es dem Bediener auf einfachem Wege ermöglicht, die gewünschten Schnitt- und Vorschubwerte einzustellen.

Anwendungsorientierte Ausstattung von Sägemaschinen

Auftragssägen in Industrie und Handel
Bei Hochleistungssägen in der industriellen Anwendung wird für auftragsbezogene Zuschnitte in kleineren und mittleren Stückzahlen auf schnelles Handling, gute Zugänglichkeit, einfache Bedienung und hohe Schnittleistungen Wert gelegt. Für längere mannlose Laufzeiten sind Doppelrollenbahnen und Magazine erhältlich, auf denen unterschiedliche Materialquerschnitte und Qualitäten aufgelegt und abgearbeitet werden können *(Bild 1.40)*.

Ein vollautomatisches, mannloses Sägen aus dem Lagervorrat ermöglichen Sägezentren. Dabei sind ein Regalbediengerät für Einzelstangenhandling und eine CNC-Sägemaschine über eine Schnellwechselstation gekoppelt.

Automatische Lagersysteme und Hochleistungs-Sägemaschinen werden über vollautomatische, rechnergesteuerte Stabmanipulatoren miteinander verbunden. Damit ist die kontinuierliche, flexible Versorgung der Sägen aus dem Langgut-Lager gewährleistet. Was und wie viel auch immer pro Auftrag gesägt werden soll, der Manipulator bringt das richtige Material in der passenden Menge auf die Rollenbahn der zuständigen Säge. Ob aus einer Kassette oder einem Kragarm-Fach, alle Arten und Formen werden schnell, sicher und schonend gebracht und als Rest wieder zurückgeräumt.

Auf der Abschnittseite sind Markieren, Sortieren in Behälter, Wenden und Stapeln von Scheiben, Platz sparendes Ablegen von Wellen heute Stand der Technik.

Das Sortieren durch Roboter bietet eine wirtschaftliche Möglichkeit, Abschnitte mit hoher Packungsdichte transportfähig in Behälter zu stapeln, ohne die Taktzeit der Sägemaschine zu erhöhen. Moderne Softwarekonzepte bieten die Möglichkeit, die komplette Vielfalt ohne zusätzlichen Bedienaufwand zu palettieren. Dabei reagiert das System intelligent auf jede neue Abschnittabmessung. Die Notwendigkeit eines Greiferwechsels wird durch das System selbstständig erkannt und durchgeführt. Selbst das Stapelbild der Abschnitte in den Behältern wird für jede Abmessung selbständig generiert und hinsichtlich des Befüllungsgrades in den Behältern optimiert. Mit dem Roboter lassen sich auch Zusatzaufgaben wie Behältermanagement, Markieren oder Entgraten der Abschnitte realisieren *(Bild 1.41)*.



Bild 1.40: Moderne Auftragskreissägemaschine

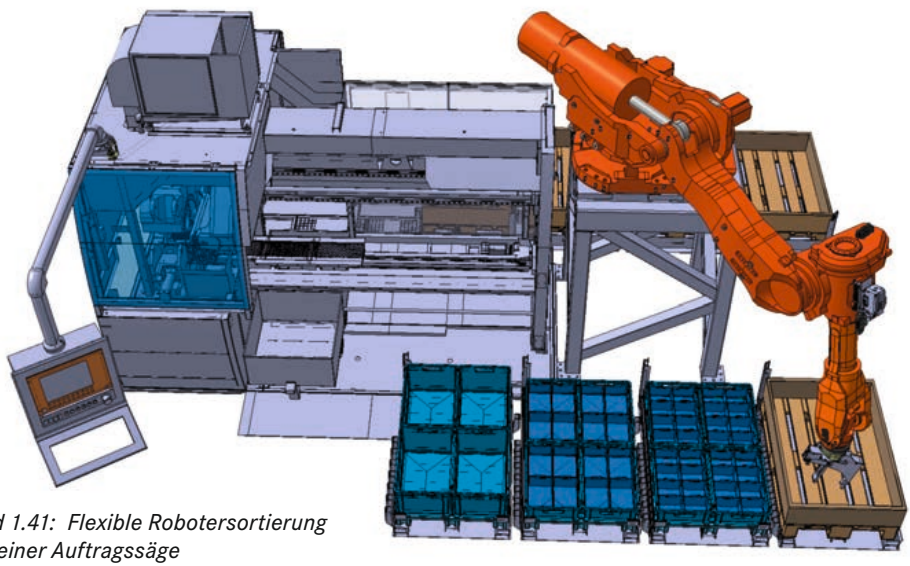


Bild 1.41: Flexible Robotersortierung an einer Auftragssäge

1.8 Laser-Bearbeitungsanlagen

Definition und physikalische Grundlagen

Das Wort Laser ist die Abkürzung für „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ (Deutsch: Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung). Die Funktion des Lasers beruht auf der Eigenschaft von Elektronen, des laseraktiven Materials, beim Übergang von einem höheren Energieniveau auf ein tieferes Energieniveau ein Photon abzugeben. In der praktischen Umsetzung wird ein laseraktives Material im Resonator zwischen zwei Spiegeln eingesetzt und durch eine Energiequelle angeregt *(Bild 1.42)*.

Der Laserstrahl ist ein berührungswirkendes Werkzeug, mit dem fast alle Werkstoffe bearbeitet werden können. Die wesentlichen funktionalen Baugruppen einer Laserbearbeitungsanlage sind:

- Laserstrahlquelle
- Strahlführung einschließlich des Bearbeitungskopfes
- Bewegungsachsen zur Relativbewegung von Laserstrahl und Werkstück
- Werkstückauflage
- Absaug- und Filteranlage
- Schutzkabine.

Strahlquellen

Zur Materialbearbeitung werden aufgrund ihrer hohen Laserausgangsleistung hauptsächlich CO_2- und Nd:YAG-Laser eingesetzt. Für die Oberflächenveredelung, z. B. Härten, Beschichten, Legieren sowie für Schweiß- und Lötanwendungen gewinnt der Diodenlaser zunehmend an Bedeutung.

CO_2-Laser

Der CO_2-Laser ist ein Gaslaser. Das Gas für diesen Laser setzt sich aus Kohlendioxid, Stickstoff und Helium zusammen. Durch

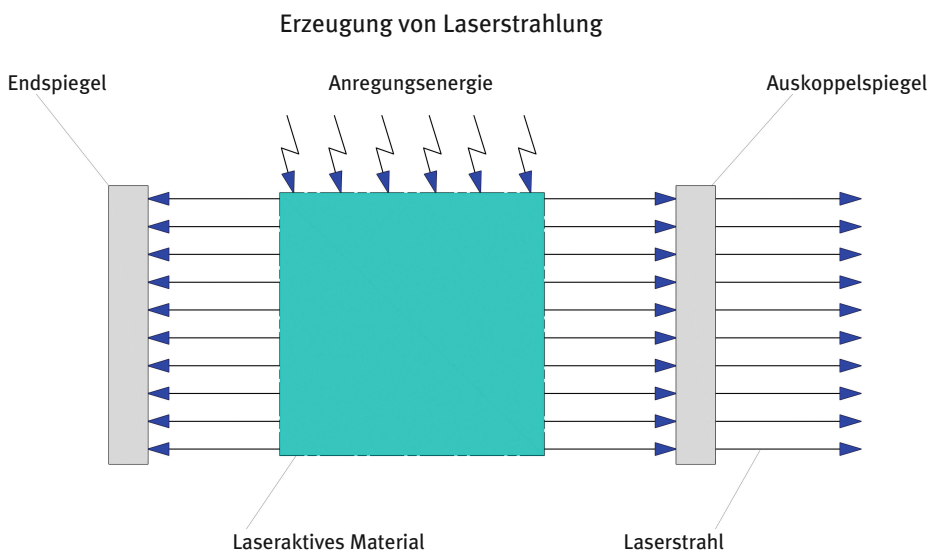


Bild 1.42: Erzeugung von Laserstrahlung

Elektroden werden die Stickstoffmoleküle angeregt. Sie geben ihre Energie an die Kohlendioxidmoleküle weiter. Kohlendioxid ist das eigentlich laseraktive Material, dass nach Anregung Laserlicht emitiert. Die Restenergie des Kohlendioxid wird in Form von Wärme freigesetzt. Daher muss das Gas während des Betriebs ständig gekühlt werden. Die Leistungsbandbreite erstreckt sich von einigen 100 Watt bis 20 kW Laserleistung. Das Einsatzgebiet des CO_2-Lasers ist üblicherweise das Schweißen und Schneiden von Metallen *(Bild 1.43).*

Nd:YAG-Laser

Der Nd:YAG-Laser ist ein Festkörperlaser. Der laseraktive Körper ist ein künstlich hergestellter Einkristall aus Yttrium-Aluminium-Granat (YAG), in dem ein Teil der Yttrium-Atome durch Neodym-Atome (Nd) ersetzt sind. Die Anregung des Kristallstabs erfolgt über Blitzlampen oder Dioden *(Bild 1.44).*

Scheibenlaser

Der Scheibenlaser ist ein Festkörperlaser und spielt bei der Metallbearbeitung eine zunehmend größer werdende Rolle. Vorteile sind sein hoher Wirkungsgrad und die gute Strahlqualität. Das laseraktive Material (Nd:YAG) hat die Form einer dünnen Scheibe. Die Scheibengeometrie hat den Vorteil, dass eine effiziente Kühlung möglich ist *(Bild 1.45)*. Scheiben oder Faserlaser sind ebenfalls Nd:YAG Laser. Beim Scheibenlaser ist der Kristallstab zu einer dünnen Scheibe geformt, beim Faserlaser ist der Kristallstab in die Länge gezogen.

Faserlaser

Das Prinzip des Faserlasers ist: Beim Faserlaser werden im Prinzip anstatt eines Stabes dünne Fasern verwendet. Der Vorteil dabei ist, die Faser muss nicht wie der Stab aufwändig gekühlt werden. Da ihre Oberfläche im Verhältnis zum Volumen sehr groß ist, genügt die Wärmeabgabe an die umgebende Luft. Der Resonator eines

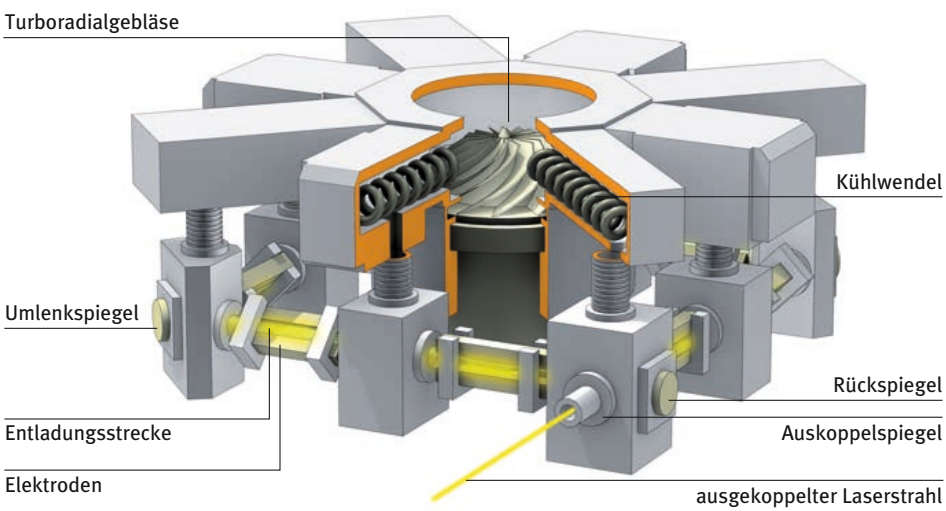


Bild 1.43: Blick in das Innere eines diffusionsgekühlten CO_2-Lasers (Werkbild Trumpf)

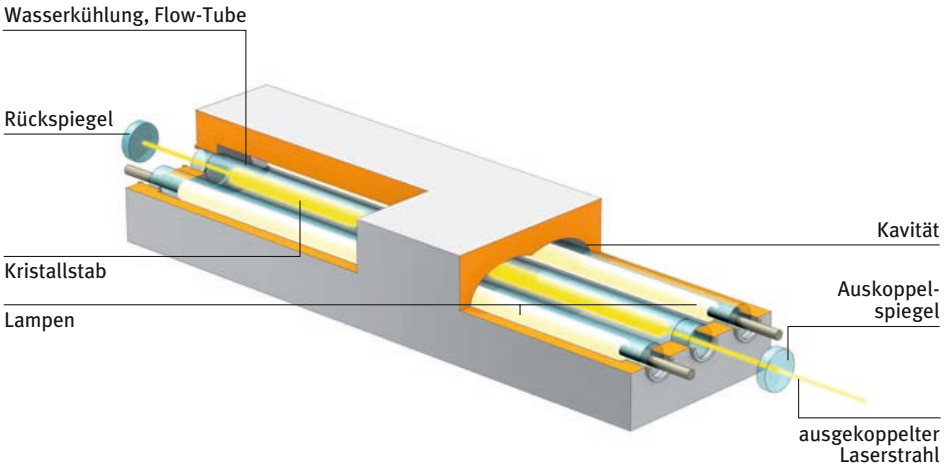


Bild 1.44: Nd:YAG-Laser als Stablaser (Werkbild Trumpf)

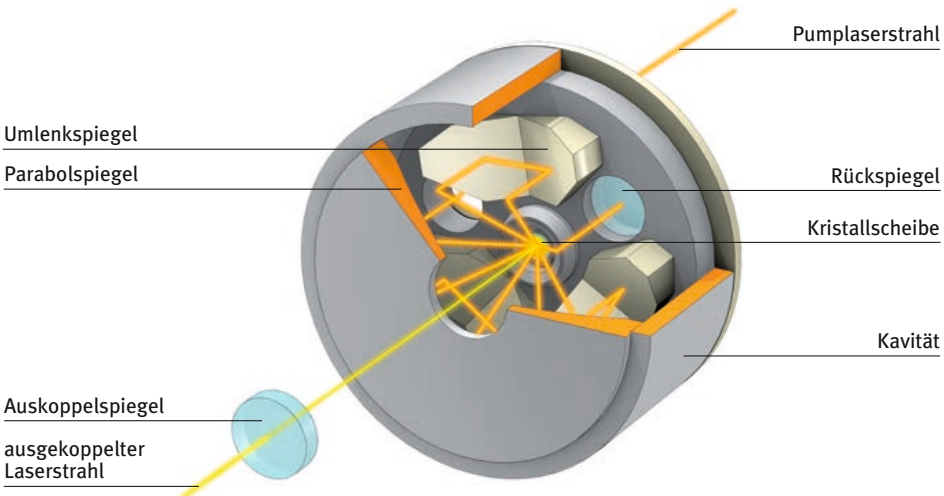


Bild 1.45: Blick in das Innere eines Scheibenlasers. Werkbild Trumpf

Faserlasers besteht im Idealfall nur noch aus einer langen dünnen Quarzglasfaser. Die Strahlquelle kann direkt an eine Transportfaser angefügt werden, z. B. an die Glasfaser eines Laserlichtkabels. Strahlquellen für die Metallbearbeitung erreichen Leistungen von mehreren KW durch parallele Kopplung vieler Einzelfasern.

Diodenlaser

Der Laserstrahl wird von Laserbarren aus Halbleitermaterial erzeugt *(Bild 1.46)*. Das Halbleitermaterial besteht aus einem Gallium-Aluminium-Arsenit-Kristall (GaAlAs). Um die für die Produktionstechnik erforderliche Leistung zu erhalten werden einzelne

Dioden zu Paketen, sogenannten Diodenlaserbarren, zusammengesetzt, die üblicherweise aus 10 – 20 Diodenlasern bestehen *(Bild 1.47)*. Um die Leistung bis in den Kilowattbereich zu steigern, werden mehrere Diodenlaserbarren parallel geschaltet und zu Diodenlaserstapeln aufgebaut. Die Übertragung des Laserstrahls erfolgt durch eine Lichtleitfaser. Nach der Auskoppeloptik ist der Laserstrahl verfügbar.

Die Vorteile des Diodenlasers sind kleine Abmessungen, geringes Gewicht und Wartungsfreiheit.

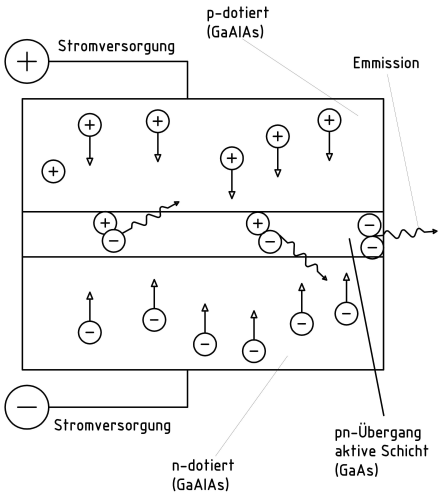


Bild 1.46: Prinzipieller Aufbau eines Halbleiterlasers

Strahlführung

Strahlführung mittels Umlenkspiegel

Bei CO_2-Lasern bestehen Strahlführungssysteme aus mehreren Umlenkspiegeln. Der Strahlweg wird durch ein gasgefülltes Leitungssystem aus Rohren und Faltenbälgern gekapselt.

Strahlführung mittels Lichtleitfaser

Für den Nd:YAG Laser und den Diodenlaser kann die Strahlführung durch eine Lichtleitfaser realisiert werden. Eine Einkoppeloptik sorgt dafür, dass das Laserlicht in eine sehr dünne Faser (z. B. 100 µm) eingespeist wird. Die Auskoppeloptik am Ende der Lichtleitfaser formt den Strahl in die für die Bearbeitung notwendige Weise.

Laserbearbeitungsköpfe

Am Ende der Strahlführung werden Laserbearbeitungsköpfe eingesetzt um den La-

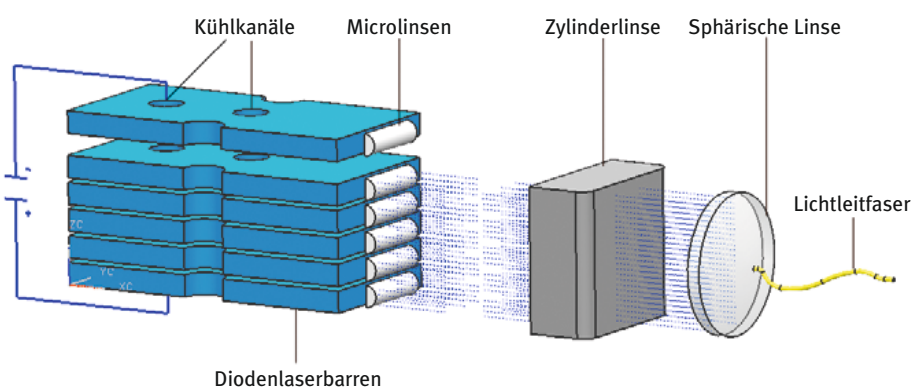


Bild 1.47: Aufbau eines Diodenlasers

serstrahl auf dem Werkstück zu fokussieren. Dazu werden sphärisch oder parabolisch geformte Spiegel oder Linsen eingesetzt. Außerdem wird im Bearbeitungskopf Prozessgas und ggf. Schutzgas zugeführt. Eine ausgefeilte Sensorik (z. B. zur Abstandsregelung) macht den Bearbeitungskopf zu einer für die Prozess-Steuerung zentral wichtigen Baugruppe

Bewegungsachsen

Für die Achsbewegungen zur Positionierung des Bearbeitungskopfes zum Werkstück sind folgende kinematische Anordnungen möglich *(Bild 1.48):*

- Bewegte Optik bei stationärem Werkstück
- Stationäre Optik bei bewegtem Werkstück
- Bewegte Optik bei bewegtem Werkstück

Laserschneidanlagen

Das thermische Trennen mit Laserstrahl wird in drei Verfahren unterteilt:

- Beim **Sublimierschneiden** wird der Werkstoff im Bereich der Schnittfuge verdampft. Da keine nennenswerte Schmelze entsteht, werden glatte Schnittkanten erreicht und das Werkstück kann praktisch ohne Nachbehandlung weiterverarbeitet werden.
- Beim **Schmelzschneiden** wird der Werkstoff im Bereich der Schnittfuge in einen schmelzflüssigen Zustand überführt und mit einem Gasstrahl (z. B. Stickstoff) unter hohem Druck (bis 30 bar) ausgetrieben. Es werden gegenüber dem Sublimierschneiden wesentlich höhere Schnittgeschwindigkeiten erreicht.
- Beim **Brennschneiden** wird mit Sauerstoff als Prozessgas gearbeitet. Der Sauerstoff unterstützt den Trennvorgang und lässt dadurch hohe Schnittgeschwindigkeiten zu. Allerdings sind die Schnittkanten oxidiert. Das kann eine Nachbearbeitung notwendig machen oder Folgeprozesse wie z. B. das Lackieren erschweren.

Laserschneidanlage im Überblick

Wegen der verschiedenen Maschinentypen und Laseraggregate können Laserschneidanlagen sehr unterschiedlich aussehen. Sie bestehen jedoch grundsätzlich aus den gleichen Komponenten.

Das Maschinenkonzept, das man in der Blechfertigung am häufigsten antrifft, ist die Flachbett-Laserschneidanlage, die mit einem CO_2-Laser arbeitet *(Bild 1.49):*

- Grundmaschine mit Antrieben, die alle Komponenten und das Werkstück trägt und bewegt
- Laseraggregat, das den Laserstrahl mit der richtigen Wellenlänge und genügend Leistung liefert
- Strahlführung, die den Strahl lenkt und abschirmt
- Schneidkopf, der den Laserstrahl fokussiert und in dem das Schneidgas zugeführt wird
- Werkstückauflage oder -aufnahme, die das Werkstück trägt
- Absaug- und Filteranlage, die Schneidrauch und Schlackepartikel auffängt
- Schutzkabine, die den Bediener vor reflektierter Strahlung und Metallspritzern schützt.

Anwendungsbeispiele

Flachbett-Laserschneidanlagen

Das meist verbreitete Anlagenkonzept unter den Laserschneidanlagen ist das der Flachbett-Laserschneidanlage, die ebene Blechtafeln bearbeitet. Bei diesen zweidimensionalen Teilen genügt die Bewe-

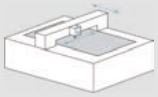
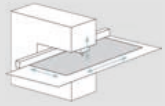
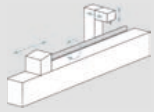
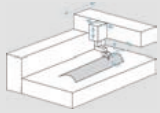
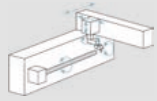
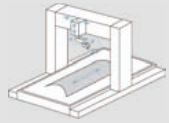
	2D-Lasermaschinen			3D-Lasermaschinen			
Typ	Fliegende Optik: Bewegter Querträger	Feststehender Schneidkopf im C-Rahmen	Auslegermaschine mit Rundachse	Auslegermaschine	Auslegermaschine mit Rundachse	Maschine in Portalbauweise	Knickarmroboter, frei im Raum beweglich
Anwendung	Typische Flachbett-maschine für die Bearbei-tung von Blechtafeln. Geeignet auch für sehr schwere Werkstücke.	Lasermaschinen oder Stanz-Laser-Kombi-maschinen. Werkstück ist bewegt, Gewicht und Blechdicke sind dadurch begrenzt.	Lasermaschine für die 2D-Rohrbearbeitung. Der Laserstrahl schneidet nur senkrecht zum Werkstück.	Lasermaschine für die Bearbeitung von dreidimensionalen Werkstücken, zum Beispiel tiefgezogene Teile.	Lasermaschine für die 3D-Rohrbearbeitung. Der Laserstrahl kann auch schräg zum Werkstück schneiden.	Lasermaschine für die Bearbeitung von sehr großen dreidimensio-nalen Werkstücken.	Schneiden von drei-dimensionalen Konturen in automatisierten Fertigungsstraßen.
Bewegung	Optik: 3 Achsen	Werkstück: 2 Achsen Optik: 1 Achse	Werkstück: 2 Achsen Optik: 2 Achsen	Optik: 5 Achsen	Werkstück: 1 Achse Optik: 5 Achsen	Werkstück: 1 Achse Optik: 4 Achsen	Roboterarm: 6 Achsen Optik: 1 autonome Achse
Grafik							

Bild 1.48: Bewegungsachsen und Maschinenkonzepte für die 2D- und 3D-Bearbeitung (Werkbild Trumpf)

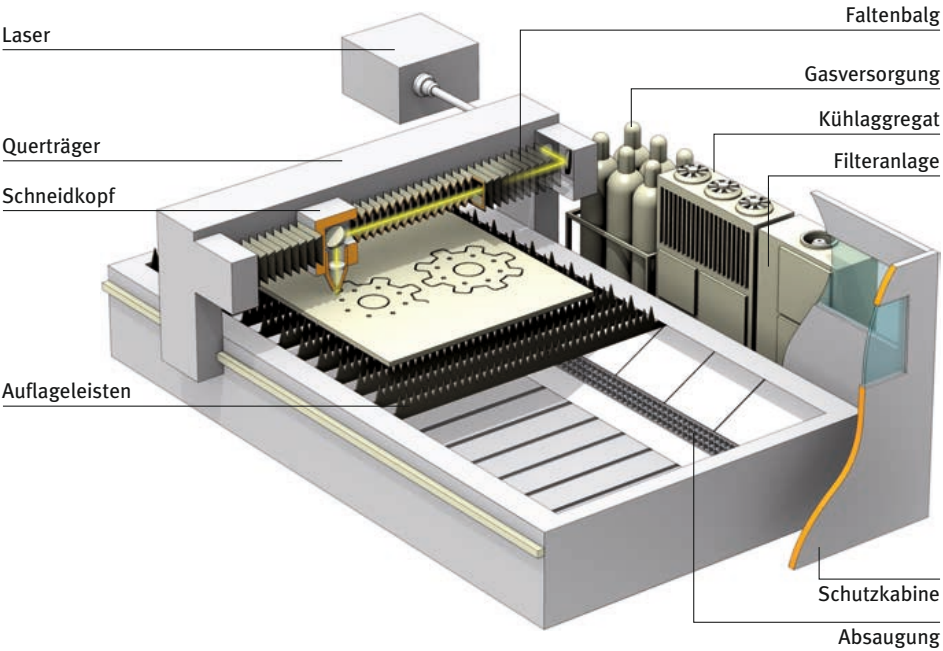


Bild 1.49: Die wesentlichen Bestandteile der Flachbett-Laserschneidanlage im Überblick (Werkbild Trumpf)

gung in der Ebene und der Höhe, um alle Punkte anzufahren. Dazu kann das Werkstück bewegt werden, während der Schneidkopf fest montiert ist. Gängiger sind Anlagen mit fliegender Optik, bei denen sich der Schneidkopf über das Werkstück bewegt.

3D-Anlagen mit dem Laserstrahl

Wenn mit dem Laserstrahl Konturen in dreidimensionale Werkstücke geschnitten werden sollen, muss die Optik sehr flexibel sein. 3D-Laseranlagen haben eine Optik mit mindestens fünf Bewegungsachsen. Die drei Raumachsen werden ergänzt durch eine Dreh- und eine Schwenk-Achse. In Sonderfällen kann außer der Optik auch das Werkstück bewegt werden *(Bild 1.50)*.

Rohre und Profile

Rohre und Profile bis 6 m (9 m) Länge werden mit speziellen Rohrschneidanlagen oder in 3D-Anlagen bearbeitet. Die Bearbei-



Bild 1.50: 3D-Laserschneidanlage mit 5-Achs-Bearbeitungsoptik (Werkbild Trumpf)

tungsoptiken haben 2 bis 5 Bewegungsachsen. Zusätzlich wird hier immer das Werkstück bewegt.

Roboter

Die Kombination aus Roboter und Festkörperlaser kennt man vor allem aus der Automobilindustrie. Die Roboter arbeiten automatisiert in Transferstraßen und bearbeiten dreidimensionale Karosserieteile. Sie eignen sich sowohl für die Bearbeitung von Schweißen als auch Schneidaufgaben. Roboter erweisen sich als günstige Alternative zu 3D-Anlagen und setzen sich daher zunehmend durch. Die Kombination mit CO_2-Lasern war lange Zeit umständlich: Der Laserstrahl konnte nicht über eine Lichtleitfaser geführt werden und gelangte daher über Rohre und Spiegel zum Schneidkopf. Kompakte, diffusionsgekühlte Strahlquellen lösen dieses Problem. Sie sind so kompakt und leicht, dass sie direkt auf dem Roboterarm sitzen können. (Das *Bild 1.51* zeigt einen Roboter, der mit einem Festkörperlaser arbeitet.)

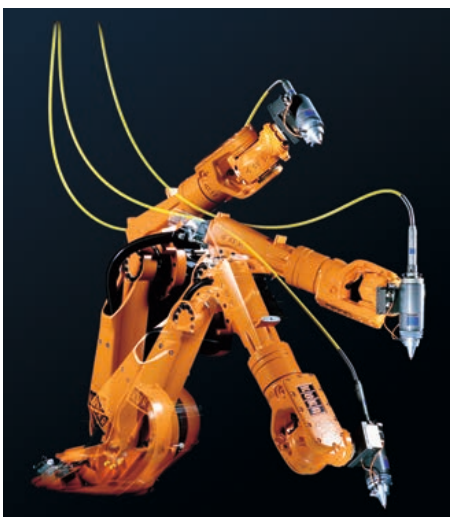


Bild 1.51: Alternative für die 3D-Bearbeitung: Dieser Roboter trägt eine Schneidoptik mit integrierter Abstandsregelung. (Werkbild Trumpf/Kuka)

1.9 Stanz- und Nibbelmaschinen

Stanzprinzip

Stanzen ist ein spanloses Fertigungsverfahren. Es bezeichnet ein Trennverfahren bei dem ein Blech (oder auch ein anderer Werkstoff) in einem Hub durchtrennt wird. Das Form gebende Werkzeug ist zweiteilig. Das Blech befindet sich zwischen dem Oberwerkzeug = Stempel und dem Unterwerkzeug = Matrize *(Bild 1.52).*

Der Stempel bewegt sich nach unten und taucht in die Matrize ein. Die Kanten von Stempel und Matrize bewegen sich parallel aneinander vorbei und trennen dabei das Blech. Deshalb gehört das Stanzen zur Verfahrensgruppe Scherschneiden.

Das Nibbel-Prinzip

Beim Nibbeln werden Stanzlöcher so aneinandergesetzt, dass sie sich überschneiden. Auf diese Weise lassen sich Durchbrüche und Konturen mit beliebiger Form

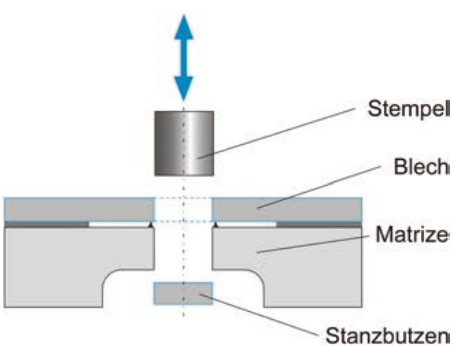


Bild 1.52: Schematischer Aufbau eines Stanzwerkzeuges

erzeugen. Das Blech wird dabei schrittweise um einen Bruchteil des Stempelmaßes verschoben sobald der Stempel aus dem Blech auftaucht. Mit einer Hubfolge von bis zu 1200/min wird so eine Spur aus dem Blech herausgenibbelt.

Als Werkzeug kommt z. B. ein kleiner runder Stempel zum Einsatz. Ob Rund-, Langloch- oder 4-Kant-Werkzeug hängt davon ab, mit welchem Stempel welche Geometrie am besten zu erzeugen ist.

Stanz- und Nibbelmaschinen

bearbeiten Bleche bis zu 12 mm Dicke und einer Tafelgröße bis 1,5 × 3 m. Dazu wird eine Blechtafel mit mehreren Pratzen in einer Koordinatenführung eingespannt und mit 2 Achsen unter dem Bearbeitungskopf mit dem Werkzeug positioniert.

Beim Stanzen hinterlässt die Form des Stempels Löcher mit einem Durchmesser bis zu ca. 100 mm. Formstanzwerkzeuge kommen zum Einsatz, wenn Durchbrüche herzustellen sind, die sich wegen ihrer hohen Anzahl und kleiner Abmessung rationeller stanzen als nibbeln lassen.

Aufbau einer Stanzmaschine

Wenn man die Stanzmaschinen mehrerer Hersteller vergleicht, stößt man dabei auf verschiedene Maschinenkonzepte. Charakteristisch für das jeweilige Konzept ist die Ausführung von Maschinenrahmen, Stanzkopf und Werkzeugaufnahme. *Bild 1.53* zeigt den grundsätzlichen Aufbau einer Stanzmaschine.

Der Maschinenrahmen

Der Maschinenrahmen ist in der Regel aus zentimeterdicken Stahlplatten aufgebaut da er dynamische Kräfte (Beschleunigungskräfte und Schwingung) von mehreren hundert Kilonewton übertragen muss.

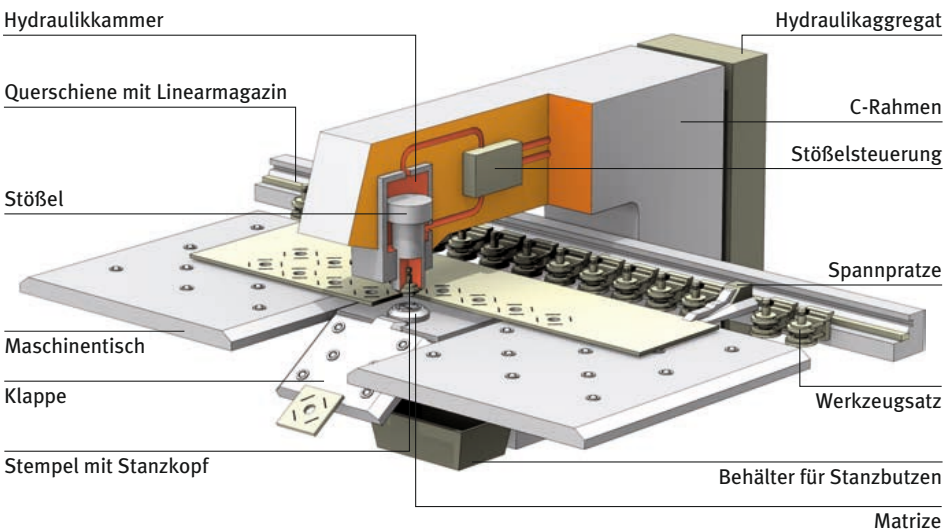


Bild 1.53: Die wesentlichen Komponenten einer Stanzmaschine mit C-Rahmen (Werkbild Trumpf)

Wegen der guten Zugänglichkeit für den Bediener ist der Rahmen in C- oder O-Anordnung aufgebaut.

Der Stanzkopf

Der Stanzkopf ist das Herzstück der Maschine.

Zum Stanzkopf gehört der Stößel sowie der Antrieb der den Stößel bewegt. Die heute realisierbare Hubfolge bei High-End-Maschinen mit 1200/min wird der Stößel hydraulisch oder elektromechanisch angetrieben. Ähnlich wie bei anderen Werkzeugmaschinen gibt es aber eine Tendenz zur (Voll-)elektrischen Maschine.

Werkzeuge

Ein Stanzwerkzeug besteht aus Stempel, Matrize und Abstreifer.

Für Bearbeitungszentren, die vollautomatisch komplizierte Bearbeitungen in immer kürzeren Zeiten ausführen, wurden anspruchsvolle Werkzeuge und Werkzeugwechsler entwickelt, z. B:

- Drehbare Werkzeugaufnahmen, damit sich die Werkzeuge mit hoher Geschwindigkeit in jede beliebige Winkellage drehen lassen
- Multitool-Werkzeuge bis zu 10 Stanzwerkzeugen in einer Aufnahme, die sich zusätzlich durch Rotation in jede Winkellage bringen lassen. Dies reduziert die Bearbeitungszeit bei Teilen, wo unterschiedliche kleine Löcher gestanzt werden müssen *(Bild 1.54)*
- Werkzeugspeicher mit rüstzeitlosem Werkzeugwechsel in die Maschine *(Bild 1.55).*

Flexible Bearbeitungszelle

Für die Einzelteilautomatisierung bieten Maschinenhersteller zusätzliche Komponenten an, die aus der Serienmaschine eine flexible Bearbeitungszelle machen: *(Bild 1.56)*

- Be- und Entladeeinheit mit Sortierfunktion, die die Tafeln einlegt und die Teile einzeln entnimmt und sortiert ablegt
- Mehrere Teilebehälter, in die kleine Teile oder Abfall über die Teilerutsche gelangen und sortiert werden
- Greifer, die das Restgitter entnehmen
- Externer Werkzeugspeicher mit Werkzeugwechsler, der die Werkzeugsätze im Linearmagazin auswechseln kann
- Kompakt- oder Hochregallager, aus dem Material entnommen wird und in dem fertige Teile gelagert werden



Bild 1.54: Linearmagazin (Werkbild Trumpf)

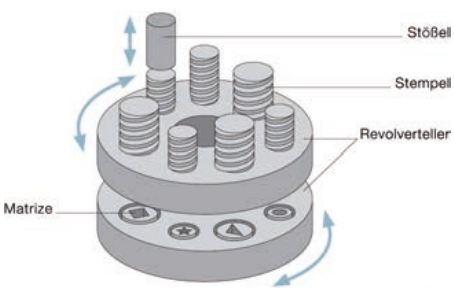


Bild 1.55: Schematische Darstellung eines Multitool-Werkzeuges

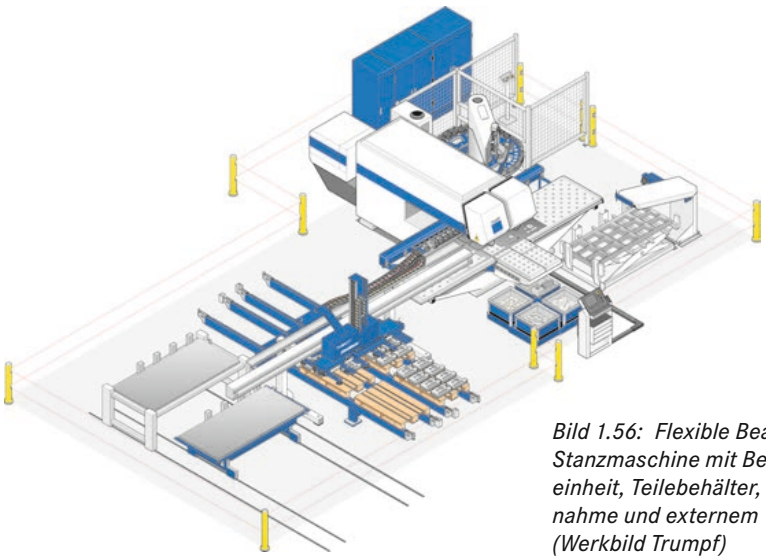


Bild 1.56: Flexible Bearbeitungszelle: Stanzmaschine mit Be- und Entladeeinheit, Teilebehälter, Restgitterentnahme und externem Werkzeugspeicher (Werkbild Trumpf)

- Sensoren, die den Fertigungsprozess überwachen
- Programmiersystem, mit dem die NC-Programme für alle Automatisierungskomponenten erzeugt werden.

Kombinierte Stanz-Laser-Maschine

Die Stanz-Laser-Maschine ist nach dem gleichen Prinzip aufgebaut wie die Stanzmaschine. Der C- oder O-Rahmen ist jedoch so verbreitert, dass zwei Bearbeitungsstationen darin Platz finden: die Stanzbearbeitungsstation und die Laserbearbeitungsstation *(Bild 1.57)*.

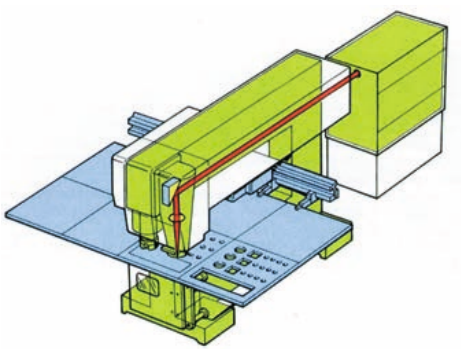


Bild 1.57: Kombinierte Stanz- Lasermaschine mit C-Rahmen (Werkbild Trumpf)

Tabelle 1.1: Blechdicke max. bei Nibbeln/Laserschneiden

Werkstoffe	Stanzen, Nibbeln	Laserschneiden
Baustahl	bis ca. 8 mm	bis ca. 30 mm (abhängig von der Laserleistung)
Edelstahl	bis ca. 8 mm	bis ca. 50 mm (abhängig von der Laserleistung
Aluminium	bis ca. 8 mm	bis ca. 20 mm (abhängig von der Laserleistung)
Kunststoffe	Bedingt, falls nicht zu spröde oder zu labil	Im Prinzip ja, wegen der Entstehung toxischer Gase allerdings problematisch

Aber im Gegensatz zu den Laserflachbettmaschinen wird hier nicht der Laserstrahl bewegt, sondern die Blechtafel. Direkt unter der Laserstation befindet sich eine Öffnung. Durch sie kann die Absaugeinheit Schlackereste und Schneidrauch absaugen.

Der Vorteil der Kombimaschine zeigt sich in der Fertigung: Komplexe Innen- und Außenkonturen schneidet der Laser. Gestanzt wird, wenn Standardkonturen schnell bearbeitet werden sollen, z. B. stanzbare runde Löcher.

Dass die Laserleistung den Möglichkeiten der Stanzbearbeitung und Anforderungen des Anwenders angepasst werden muss zeigt Tabelle 1.1.

1.10 Rohrbiegemaschinen

(Bild 1.58)

Rohrbiegeteile werden als Konstruktionselemente oder zum Durchleiten von Fluiden in den unterschiedlichsten Branchen eingesetzt, z. B.

- im Flugzeugbau für Tragflächen, Triebwerke, Ruder und Bremsen,
- im Maschinenbau für Hydraulikanlagen, Druckluft und Wärmetauscher,
- im Schiffbau für Leitungen aller Art (Frischwasser, Brauchwasser, Seewasser, Kraftstoff, Hydraulik- und Schmierflüssigkeiten oder Sprinkleranlagen),
- im Fahrzeugbau für Auspuffanlagen, Tankeinfüllrohre, Sitzgestelle, Stabilisatoren, Frontschutzbügel, Fahrrad- und Motorradlenker,
- im Apparatebau für Kühlanlagen oder Heizschlangen
- sowie für Sportgeräte, Spielzeug oder Gartenmöbel.

Bei diesen Teilen werden Genauigkeiten von ±0,1° für den Biege- und Verdrehwinkel sowie ±0,1 mm für den Abstand zwischen den einzelnen Bögen verlangt. Um diese Forderungen trotz relativ großer Rohrtoleranzen und der verschiedenen Einflussgrößen auf die Rückfederung einhalten zu können, ist für jeden Programm-

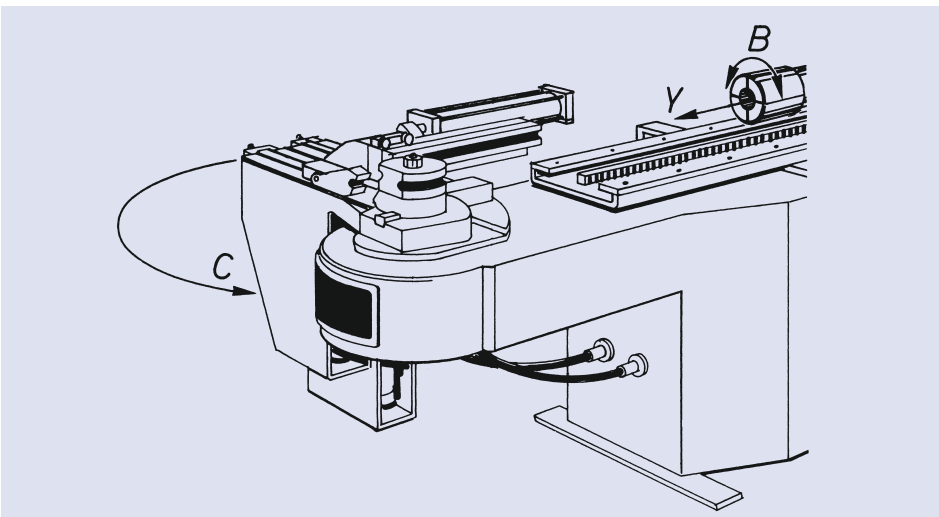


Bild 1.58: Prinzip einer Rohrbiegemaschine

schritt die Eingabe zusätzlicher Korrekturwerte für Längenposition, Biegewinkel und Verdrehwinkel möglich. Die Bewegungen verlangen keine gegenseitige Funktionsabhängigkeit, daher genügen in der Regel relativ einfache numerische Steuerungen für drei bis sechs Achsen. Moderne CNC-Rohrbiegemaschinen mit mehreren Werkzeugebenen verfügen heutzutage über 12 bis 15 gesteuerte Achsen. Als Achsantriebe werden Hydraulikzylinder, hydraulische Schwenkmotoren oder vorzugsweise elektrische Servoantriebe verwendet *(Bild 1.59).*

Die Eingabe des Biegeprogramms in den Speicher der CNC erfolgt entweder mittels Tastatur oder direkt über DNC-Anschluss. Ein solches Biegeprogramm könnte beispielsweise aus folgenden Einzelschritten bestehen:

1. Satz
Einziehen des Rohres (Längspositionierung, Y-Achse) bis zum Anfang des ersten zu biegenden Bogens.

2. Satz
Biegen auf den eingestellten bzw. programmierten Biegewinkel (C-Achse).

3. Satz
Vorschieben des Rohres um das Maß des geraden Zwischenstückes zwischen den einzelnen Bogen (Y-Achse).

4. Satz
Verdrehen des Rohres in eine andere Biegeebene (B-Achse) (der Ablauf von Satz 4 könnte zugleich mit dem Ablauf des Satzes 3 erfolgen, wenn es das zu biegende Rohr zulässt, da normalerweise das gebogene Rohr vor dem Verdrehen in eine andere Ebene erst aus der Rille des Biegewerkzeuges herausgefahren werden muss).

5. Satz
Biegen des 2. Bogens usw. bis zum Programmende.

Das Erstellen eines Biegeprogramms kann auf verschiedene Arten erfolgen:

- anhand einer Biegeteilzeichnung, in der die Biegedaten bereits enthalten sind.
- anhand eines gebogenen Musters oder einer Biegelehre, an die das gebogene Rohr angepasst wird.
- durch Zeichnungserstellung und Bemaßung in einem Rohrisometrierprogramm mit anschließender automatischer Berechnung der Biegedaten,
- durch Vermessen eines gebogenen Mus-



Bild 1.59: 3D-Rohrbiegemaschine, Werkbild Trakto-Technik GmbH & Co. KG

ters oder eines Drahtmodells mittels einer speziellen Rohrmessmaschine, die das komplette Rohrbiegeprogramm errechnet und ausgibt.

In der Hauptsache besteht eine solche 3-Achsen-Rohrmessmaschine aus:

- einem Computer mit Bildschirm und Drucker,
- einem Messtaster, der an einem beweglichen Messarm befestigt ist, oder bei heutigen Ausführungen, mit automatischer Laser-Abtastung,
- einem Auflagetisch, um das zu vermessende Rohr oder Drahtmuster fixieren zu können.

Um ein Programm anhand eines Musterteiles zu erstellen, wird die Geometrie dieses Musters mittels eines Messtasters manuell abgetastet und der Computer errechnet automatisch die notwendigen Biegedaten, die dann im Klartext erscheinen oder auch als Datei abgespeichert werden können. Sofern eine direkte Verbindung zwischen Biegemaschine und Rohrmessmaschine besteht, kann das erstellte Programm auch direkt in die Steuerung der Biegemaschine überspielt werden.

Nach Biegung des ersten Rohres wird dieses auf der Rohrmessmaschine vermessen und der Computer vergleicht nun die Istwerte mit den Sollwerten des Musterstückes und erfasst die Abweichungen, die dann als Korrekturwerte in die numerische Steuerung der Rohrbiegemaschine eingegeben werden können.

Numerisch gesteuerte Rohrbiegemaschinen erfüllen die gestellten Forderungen bezüglich Genauigkeit, schneller Korrekturmöglichkeit und rascher Umrüstbarkeit. Für die vollautomatische Fertigung werden sie zusätzlich mit Magazin, Zuführung, Schweißnahtpositionierung und Ausstoßeinrichtung für das fertige Rohr versehen, sodass in diesen Fällen eine Mehrmaschinenbedienung möglich ist.

Das Fraunhofer-Institut hat in Kooperation mit der Tracto-Technik GmbH ein maschinenintegriertes Messsystem zur Bestimmung des Biegewinkels in Rohrbiegemaschinen entwickelt. Dabei erfolgt die Messung des Biegewinkels unmittelbar nach jedem Biegevorgang direkt in der Biegemaschine, wobei die Dauer eines Mess- und Auswertevorganges nur wenige Sekundenbruchteile erfordert. Der Wert der Rückfederung am Rohrbogen ist von mehreren werkstoff-, maschinen- und prozessbedingten Parameterwerten abhängig und kann nun durch Vorgabe entsprechender Korrekturwerte berichtigt werden. Gleichzeitig hat der Anwender die Möglichkeit einer prozessbegleitenden Erfassung und Protokollierung sowie einer direkten Rückkopplung des Biegeergebnisses auf die folgenden Biegeprozesse.

1.11 Funkenerosionsmaschinen

Bei der Herstellung von Stanz-, Spritzgieß- und Druckgießwerkzeugen, von Press- und Blasformen, von Extrudiermatrizen und Gesenken zählt heute die Funkenerosion zu den wichtigsten Fertigungsverfahren. Die funkenerosiven Bearbeitungsverfahren unterscheidet man nach **Schneiderodieren und Senkerodieren.** Sie haben sich vor allem dort bewährt, wo die zu bearbeitenden Teile folgende Kriterien aufweisen:

- komplizierte Formgebung,
- hohe Werkstoff-Festigkeit,
- problematische manuelle Bearbeitung,
- keine andere Möglichkeit der automatischen Bearbeitung und
- hohe Genauigkeitsforderungen.

Das Funkenerosionsverfahren nutzt den physikalischen Effekt, dass durch elektrothermische Entladungen zwischen einer Anode und einer Kathode Oberflächenpartikel verdampft werden. Dieser Vorgang läuft zwar wesentlich langsamer ab als das Zerspanen mit einem Schnittwerkzeug, aber durch die Möglichkeit, die Maschinen bei der Bearbeitung komplizierter Teile rund um die Uhr vollautomatisch und ohne Aufsicht betreiben zu können, wird der Einsatz wirtschaftlich. Ein Lichtbogen darf beim Erodieren nicht entstehen, da dieser Elektrode und Werkstück zerstören könnte.

Das Einrichten und der Betrieb einer Erodiermaschine stellen hohe Anforderungen an die Qualifikation des Bedienungspersonals. Dies bedeutet, dass ein Metallarbeiter zusätzlich mehrere Wochen ausgebildet werden muss, um die Besonderheiten des Erodierens auch zu beherrschen. Dies ergibt sich auch daraus, dass der Erodierprozess keinen Einblick in den eigentlichen Bearbeitungsraum zulässt. Der Bediener muss im Vergleich zur Zerspanung nach ungewohnten, abstrakten elektrischen Parametern einstellen und den Ablauf an Instrumenten überwachen.

Schneiderodieren

Beim Schneiderodieren wird Werkstückmaterial von einer **Drahtelektrode** mit 0,1 bis 0,3 mm Durchmesser berührungslos, ohne mechanische Krafteinwirkung abgetragen. Tausende von Entladungen pro Sekunde schmelzen und verdampfen kleinste Materialpartikel, die in einer dielektrischen Flüssigkeit kondensiert und weggespült werden. Als **Dielektrikum** verwendet man deionisiertes Wasser, das gleich mehrere Aufgaben erfüllt: Es erzeugt den für die Entladungen notwendigen Übergangswiderstand, spült die abgetragenen Partikel aus der Schneidzone, kühlt die beanspruchten Maschinenteile und verbessert die Gleiteigenschaften an Draht- und Stromzuführungen.

Die für die Entladungen benötigten elektrischen Impulse erzeugt ein **Generator**. Ein Vorschubregler sorgt während der Relativbewegung für den notwendigen Funkenspalt zwischen Drahtelektrode und Werkstück. Bei Kurzschluss, d. h. Kontakt des Schneiddrahtes mit dem Werkstück, muss der Draht bahngetreu zurückgefahren werden, bis der Kurzschluss beseitigt ist. Erst dann kann der Schneidvorgang fortgesetzt werden. Formgenauigkeit und Oberflächengüte der Schnitte sind von der Vorschubgeschwindigkeit und -konstanz abhängig *(Bild 1.60)*.

Die **Drahtelektrode** verschleißt durch die Entladungen. Deshalb läuft ständig neuer Draht mit konstanter Geschwindigkeit durch die Schneidzone. Eine 6-kg-Drahtspule reicht für mehr als 100 Stunden Schneidzeit. Antrieb und Führung der Drahtelektrode sind für präzise Arbeitsergebnisse von großer Bedeutung.

Die **numerische Steuerung** sorgt für die exakte Einhaltung der Schnittbahn durch Steuerung der X/Y-Bewegung. Bei Schrägen oder Raumschnitten mit variierbaren Neigungswinkeln ist der unteren X/Y-Führungsebene eine zweite Bewegung in der oberen U/V-Ebene überlagert. Auch konische Schnitte und kontinuierliche Neigungsänderungen sind möglich.

Als **Werkstückmaterial** lassen sich alle elektrisch leitfähigen Materialien und Halbleitermaterialien schneiderodieren. Die Vorteile des Verfahrens liegen in vielen Fällen darin, dass die Bearbeitung **nach dem Härten** erfolgt und **höchste Genauigkeiten** bei hoher **Oberflächenqualität** erzielbar sind.

Aus der Prinzipskizze ist die Anordnung der fünf Achsen und die Drahtführung zu erkennen.

Senkerodieren

Hierbei wird eine Formelektrode von oben nach unten auf das Werkstück zubewegt und durch Funkenerosion ein „negativer" Abdruck im Werkstück erzeugt. Wie beim Zerspanen, so werden auch bei der Funkenerosion große Volumina im Schruppbetrieb und kleinere im Schlichtbetrieb abgetragen. Für superfeine Oberflächengüten kann ein weiterer funkenerosiver Poliervorgang mit sehr geringen Entladeenergien angeschlossen werden. Dabei führt die CNC die Elektrode in einer planetarischen Zusatzbewegung kreisförmig in der Ebene und stellt sehr langsam in Z-Richtung zu *(Bild 1.61)*.

Im Gegensatz zu Drahterodiermaschinen werden Senkerodiermaschinen nicht nur in kleineren Abmessungen als **Konsol- und Gestellmaschinen,** sondern auch in großen Ausführungen als **Portalmaschinen** hergestellt. Diese Bauweise ist für extreme Werkstück- und Elektrodengewichte erforderlich, z. B. im Karosseriebau und für Großgesenke.

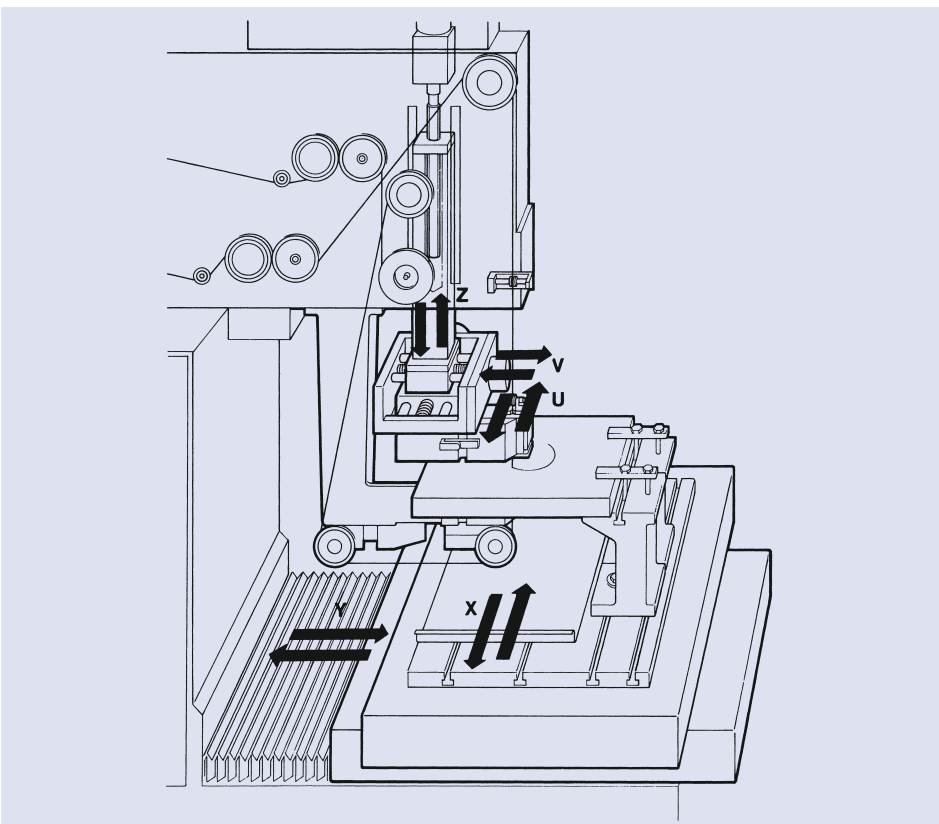


Bild 1.60: Drahterodiermaschine mit fünf CNC-Achsen

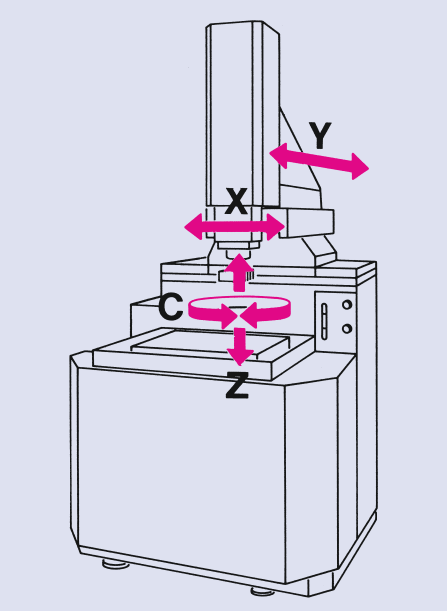


Bild 1.61: Senkerodiermaschine mit vier CNC-Achsen

Für die Erzeugung von Formen und Konturen führt die CNC die Elektrode auf Geraden und Kreisbahnen (X/Y-Ebene) und überwacht die Zustellung in Z-Richtung. Bei Kurzschlüssen zieht sie die Elektrode zurück und stellt sofort wieder zu, ein Vorgang, der ständig abläuft und für den spezielle Regelkreissignale mit dem Generator ausgetauscht werden. Kleinere Maschinen lassen sich auch mit einem automatischen Werkzeug-(Elektroden-)Wechsler und mit Palettenwechslern für die Werkstücke ausrüsten. Die Programmierung der CNC erfolgt häufig direkt an der Maschine, wobei der Bediener auf abgespeicherte Zyklen zugreifen kann und seine Eingabe anhand einer Grafik auch kontrolliert.

1.12 Elektronenstrahl-Maschinen

Diese Maschinen werden seit 50 Jahren zum Schweißen, Bohren und in Einzelfällen zum Härten oder Umschmelzveredeln eingesetzt. Als Werkzeug dient ein energiereicher, schlanker, scharf gebündelter Strahl schneller Elektronen. Die Erzeugung des Strahls gleicht prinzipiell derjenigen im Hals einer Fernseh-Bildröhre, doch sind die Strahlleistungen um Zehnerpotenzen höher und liegen etwa zwischen 1 und 100 kW. Die hohe Leistung wird auf einen kleinen Brennfleck von 0,1 bis 2 mm Durchmesser konzentriert, wodurch man Leistungsdichten von 10^6 bis 10^9 W/cm² erreicht. Trifft ein solcher Elektronenstrahl auf eine Werkstückoberfläche auf, so werden die Elektronen am Atomgitter des Werkstücks gebremst und ihre kinetische Energie in Wärme umgewandelt. Je nach Leistungsdichte und Strahlsteuerung (Dauerstrahl, Pulsbetrieb, Ablenkung) lässt sich das Werkstück härten, schweißen oder bohren. Dabei ist die praktisch verzögerungsfreie Ansteuerbarkeit des Strahls oft der entscheidende Vorteil dieses Verfahrens *(Bild 1.62)*.

Die Strahlerzeugung erfolgt ausschließlich im **Hochvakuum** (10^{-5} mbar), der Bearbeitungsprozess vorwiegend im **Feinvakuum** ($< 10^{-2}$ mbar), da der Elektronenstrahl (EB – Electron Beam) durch Luftmoleküle gestreut und gebremst wird und somit die Leistungsdichte des Strahls abnimmt. Um die Evakuierzeit zu eliminieren, werden Schleusensysteme eingesetzt.

Dieses Verfahren wird dann eingesetzt, wenn der Verzug und/oder die Wärmeeinbringung am Bauteil besonders niedrig sein muss. Ein weiterer Vorteil sind die sehr hohen Einschweißtiefen von 100 bis 200 mm, die hier erreicht werden können (siehe www.pro-beam.de).

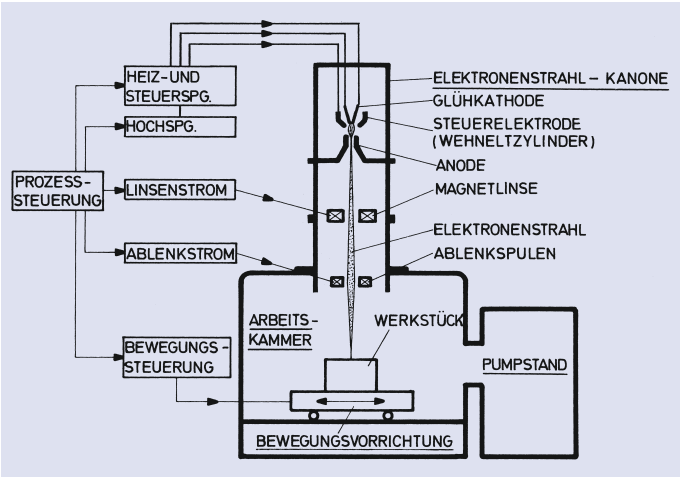




Bild 1.62: Schema einer Elektronenstrahlmaschine, rechts im Bild Abbildung der „Elektronenstrahlkanone“

Beim **EB-Schweißen an Atmosphäre** wird die Vakuumkammer durch ein Druckstufensystem ersetzt und der Schweißvorgang erfolgt innerhalb einer Strahlenschutzkabine (Harte Röntgenstrahlung!). Die Evakuierzeit entfällt, da der Strahlerzeuger ständig unter Vakuum gehalten wird. Der an Luft gestreute Strahl wird mit einem Arbeitsabstand von 10 bis 20 mm von der Druckstufe verwendet.

Anwendung findet dieses Verfahren vor allem beim Schweißen von Aluminium- und Stahlblechen *(Bild 1.63)*.

Die CNC für Elektronenstrahlschweißanlagen muss folgende Sonderaufgaben übernehmen:

- Steuerung von zwei bis acht CNC-Achsen zur Bewegung des Werkstückes, zusätzlich drei bis vier CNC-Achsen für Drahtzuführung
- Steuerung des Strahlstromes,
- Steuerung des Linsenstromes (Fokussierung),
- Strahlablenkung in X- und Y-Achse,
- Pulsbetrieb, Dauerstrahl, Ein/Aus-Schalten des Strahls,
- Überwachungen des Prozesses,
- „online“-Fugensuche während des Schweißens
- Bildverarbeitung zur automatischen Positionierung des Werkstücks
- frei programmierbare Achsen (z. B. für Vektorisierung).

1.13 Wasserstrahlschneidmaschinen

Zum Trennen von weichen und labilen Werkstoffen, wie Gummi, Leder, Papier, Schaumstoff, Styropor, aber auch CFK, GFK oder PVC, können herkömmliche Trennwerkzeuge kaum verwendet werden. Dafür bietet sich heute das Wasserstrahlschneiden an. Das Prinzip ist einfach: Wasser wird mit einem Druck von 4.000 bis 9.000 bar durch spezielle Düsen von 0,1 bis 0,3 mm Durchmesser gepresst. Die Austrittsgeschwindigkeit des Strahls beträgt dabei 800 bis 900 m/s, was mehr als



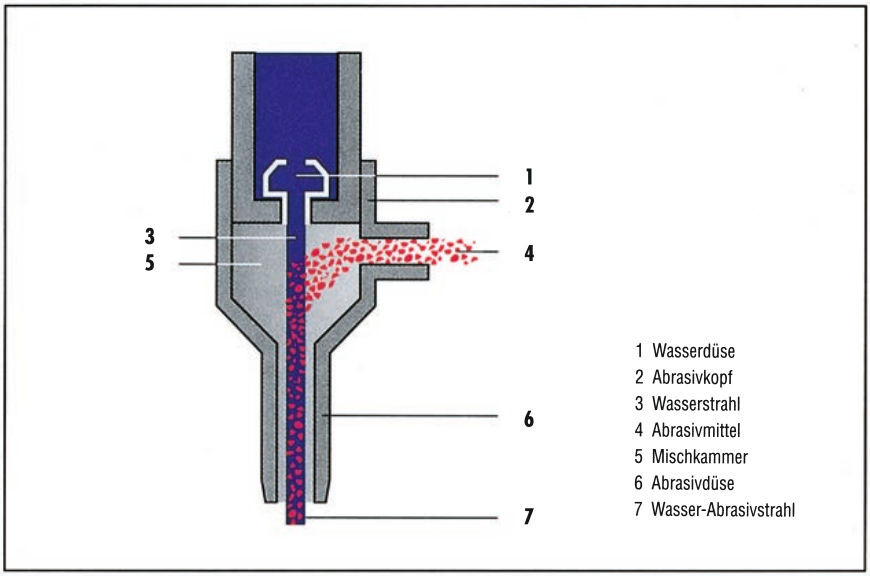
Bild 1.63: Elektronenschweißanlage

der doppelten Schallgeschwindigkeit entspricht. Auf das zu schneidende Material gerichtet, wirkt der Strahl wie ein dünnes, unsichtbares Messer, das sich in den Werkstoff bohrt und dann nach allen Richtungen gleich gut schneiden kann. Die Schnittfuge beträgt nur 0,1 bis 0,3 mm, die Schnittgeschwindigkeit, je nach Material und Stärke, 1 bis 500 m/min. Der Wasserverbrauch liegt dabei bei etwa 1,5 l/min. Dieses kann nach Reinigung über Mikrofilter wieder dem Schneidprozess zugeführt werden.

Ist der Wasserstrahl alleine nicht ausreichend, dann gibt man diesem noch ein Schneidmittel feinster Körnung bei, was als **Abrasiv-Schneiden** bezeichnet wird. Auf diese Weise lässt sich dann auch Stahl bis ca. 80 mm, Titan, Marmor und Glas schneiden *(Bild 1.64 und 1.65)*.

Die Vorteile des Wasserstrahlschneidens sind:

- Bearbeitung flacher und dreidimensionaler Werkstücke,
- Schnittfugen hoher Güte, bei Stahl besser als beim Brennschneiden,
- saubere Schnittkanten ohne Grat,
- geringer Werkstoff-Verlust an der Schnittkante,
- keine Späne, keine Staubentwicklung oder Staubablagerung auf dem zu schneidenden Gut (das Abrasivmittel hinterlässt allerdings eine feine, staubartige Ablagerung),
- hohe Vorschubgeschwindigkeiten,
- keine hohen Schneidtemperaturen,
- keine Vorschubkräfte oder Schnittkräfte, weiches Material verformt sich nicht beim Schneiden,



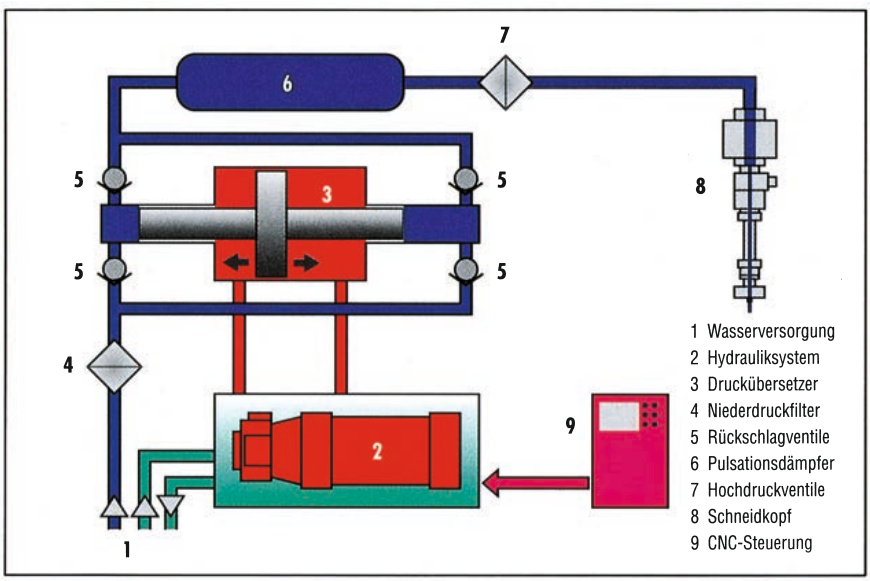


Bild 1.64: Wasserstrahlschneidmaschine, oben Prinzip der Strahldüse, unten Prinzip der Druckerzeugung



Bild 1.65: Kombinierte, wirtschaftliche Fertigung mit Wasserstrahl-Abrasivschneiden und Fräsen. Die Teile werden verschachtelt vorgefertigt und nur präzise Passungen werden nachbearbeitet (Werkbild Bystronic)

- keine elektrische Aufladung der Werkstücke, deshalb lassen sich auch bestückte Leiterplatten ohne Beschädigung empfindlicher Bauteile trennen *(Bild 1.65)*.

Wasserstrahlschneidmaschinen werden meistens nach dem Prinzip einer 3-achsigen Portalmaschine aufgebaut, mit zwei zusätzlichen Schwenkachsen für die Strahldüse. Die Schneiddüse lässt sich aber auch gut mit einem Roboter kombinieren, was ein Höchstmaß an Flexibilität ergibt.

1.14 Entwicklungstendenzen bei numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen

Rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen

Eines der Forschungsprojekte im Bereich zukünftiger Entwicklungen neuer Werkzeugmaschinen ist die Entwicklung von rekonfigurierbaren Werkzeugmaschinen und deren Komponenten. Die Maschinen sollen innerhalb kürzester Zeit flexibel an geänderte Anforderungen angepasst werden, wobei auch komplette Technologiemodule ergänzt oder ausgetauscht werden können.

Hybride Maschinenkonzepte *(Bild 1.66)*

Von hybrider Bearbeitung wird gesprochen, wenn unterschiedliche physikalische Wirkprinzipien innerhalb einer Maschine eingesetzt werden.

Die Laserbearbeitungseinheiten werden in einem Magazin zwischen den beiden Arbeitsräumen der Maschine bereitgehalten. Die Lasereinheiten können sowohl über die Hauptspindel der Maschine als auch mittels integriertem Knickarmroboter genutzt werden. Außerdem kann der am Maschinenbett fest angekoppelte Roboter beide mit Dreh-Schwenktischen ausgestatteten Arbeitsräume bedienen. Neben der Bearbeitung mittels Laser kann der Roboter auch für das Werkstückhandling genutzt werden. Damit entsteht ein hoher Nutzungsgrad für sämtliche Komponenten. Wichtig ist, dass schon bei der CAD-CAM-Planung eines Bauteils die hybride Maschi-

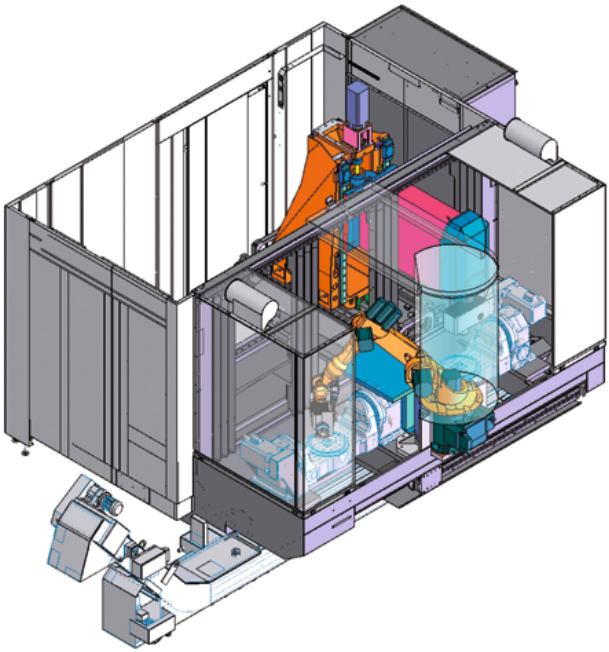


Bild 1.66: Hybrides Bearbeitungszentrum mit Lasereinheit, Roboter für den Laserkopfwechsel und Werkstückwechsel (Werkbild Chiron)

nenstruktur berücksichtigt werden muss. Innerhalb der Maschine selbst ermöglicht die CNC-Steuerung von Roboter und Maschine über die Kopplung der beiden Steuerungssysteme die schnelle und sichere Zusammenarbeit der Komponenten. (Literatur: Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium 208)

Energieeffizienz

Da Energie immer teurer wird ist es Ziel der Maschinenbauer, möglichst energieeffiziente Maschinen zu entwickeln. Im Gegensatz zu früheren Jahren besteht bei Werkzeugmaschinen nicht mehr die Forderung „so schnell wie möglich“, sondern zunehmend „zügig, aber Energie und Kosten sparend“. Simulationen und Diagnosesoftware unterstützen Maschinenhersteller und -anwender bei dieser Aufgabe.

Erläuterung zu Bild 1.67:
Das Bild zeigt aus Übersichtsgründen nur einen Ausschnitt aus der Bearbeitung eines Normteils. Während der Bearbeitung werden an einen quadratischen Aluklotz Außen- und Innenkreise mit verschiedenen Durchmessern sowie Rechtecke mit kleinen Rundungen in verschiedenen Lagen gefräst. Dies ist im Vordergrund erkennbar.

Bei den Schrägen handelt es sich um die An- und Abrückbewegungen zum Werkzeugwechsler im hinteren Teil der Maschine.

Die 4D-Visualisierung zeigt den Programmablauf in Form einer 4D-Grafik. Die Achsen X, Y und Z zeigen die Bewegungen der zugeordneten NC-Achsen. Zu jeder Bahn wird die jeweilige Gesamtleistung der Maschine in Farbe angezeigt. Rot kennzeichnet einen sehr hohen Leistungsbedarf, Orange bis Gelb einen niedrigen, Grün ei-

nen sehr niedrigen und Blau einen negativen.

Wie man anhand der Grafik erkennen kann, ist der Energieverbrauch links oben sehr gering. Dort findet der Werkzeugwechsel statt, d. h. die Übergabe des Werkzeugs zwischen Spindel und Magazin. Beim Anfahren des Werkzeugwechselpunkts, d. h. korrekt beim Abbremsen der Spindel, wird Energie in das Firmennetz zurückgespeist (blaue Farbe). Nach Durchführung des Werkzeugwechsels und Anfahren des Werkstücks, also dem Beschleunigen der Vorschubachsen sowie insbesondere der Spindel, ist ein erhöhter Leistungsbedarf (rote Farbe) festzustellen.

Der Programmbaum zeigt das zugehörige NC-Programm. Links befindet sich der Programmbaum, der für jeden NC-Satz die Satzausführungszeit in Sekunden anzeigt und rechts den programmierten NC-Satz. Beide Anzeigen können bei Bedarf synchronisiert werden, d. h. bei einem Klick auf die 4D-Bahn wird ein roter Cursor eingeblendet (siehe unten rechts), gleichzeitig wird im NC-Programm der zugehörige NC-Satz blau hinterlegt (siehe Programmbaum). Entsprechend wird mit einem Klick auf einen NC-Satz im Programmbaum der zugehörige Satzstartpunkt in der 4D-Grafik angezeigt.

Erläuterung zu Bild 1.68:
Bei dieser Untersuchung wurde die zugeführte elektrische Leistung der Hydraulikanlage (P_Hyd_zu) sowie der Volumen-

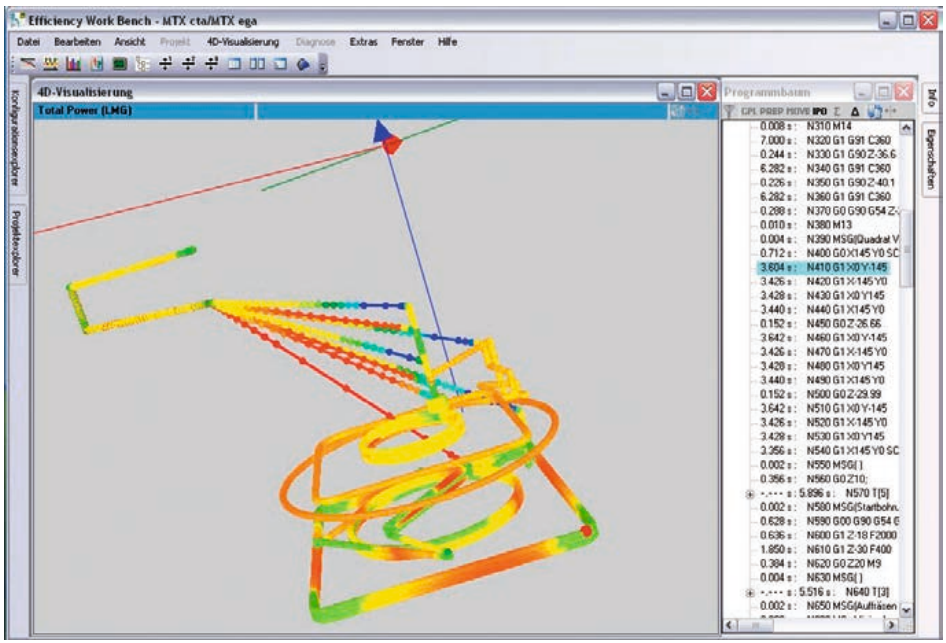


Bild 1.67: Visualisierung der Energieeffizienz
Das Bild zeigt eine Analysesoftware zur Reduzierung der Taktzeit sowie des Energieverbrauchs der Maschine. Dazu sind zwei Fenster geöffnet: links die 4D-Visualisierung der Maschinenbewegungen und rechts der zugehörige Programmbaum.
(Werkbild Bosch Rexroth Electric Drives and Controls, IndraMotion MTX)

strom und der Druck der Hydraulik während der Herstellung eines typischen Werkstücks für diese Maschine aufgezeichnet. Anschließend wurde mittels Messung von Volumenstrom und Druck die abgeführte Leistung (P_Hyd_ab) sowie der Wirkungsgrad berechnet und in ein Diagramm zur Anzeige gebracht.

Nach Abschluss der Untersuchungen an dieser Drehmaschine wurde aufgrund des schlechten Wirkungsgrads die Hydraulikpumpe durch eine drehzahlvariable Pumpe ersetzt.

Erläuterungen zum Prinzip:
Mit entsprechend ausgerüsteten CNCs können alle innerhalb der CNC, der SPS und den Sercos-Antrieben vorhandenen Daten (Signale) im Interpolatortakt (oder vielfachem davon) aufgezeichnet werden. Weiterhin können auch externe Messsysteme, wie etwa Leistungsmessgeräte, Temperatursensoren, Druck- und Volumenstrommessgeräte, über den Antriebs- und/oder IO-Feldbus eingelesen werden. Je Messung, die sich bei Bedarf über mehrere Stunden erstrecken kann, können bis zu 100 Signale aufgezeichnet werden, so auch die Soll- oder Istpositionen der Antriebe X, Y und Z sowie die Gesamtleistung der Maschine.

Die Auswahl der aufzuzeichnenden Signale erfolgt mittels eines Wizards, der den Bediener durch die Menüs führt. Hierbei trägt er unter anderem die gewünschten Start- und Endtrigger ein und wählt via

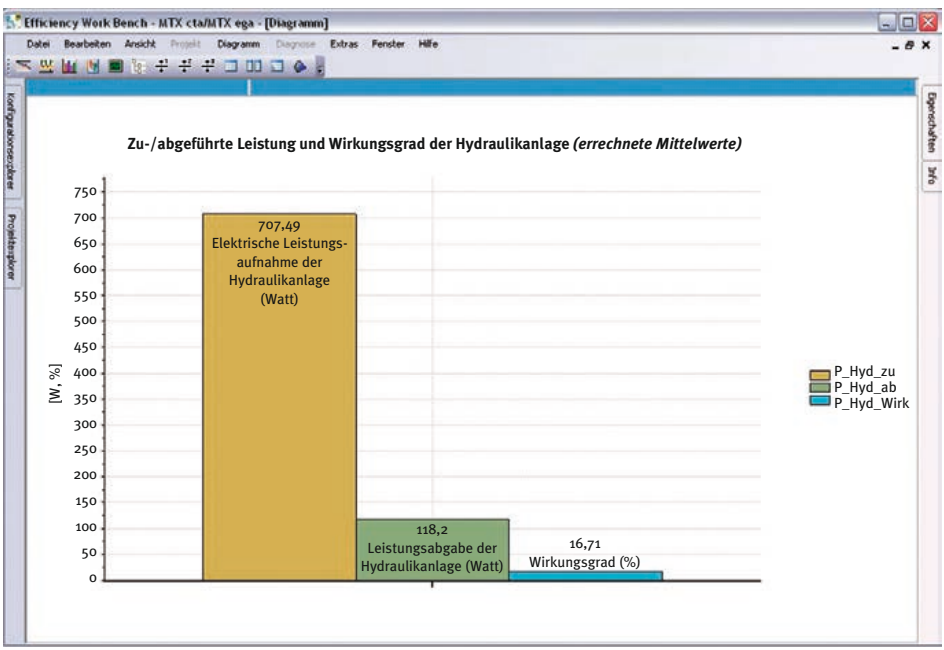


Bild 1.68: Energieverbrauch und Wirkungsgrad
Das Bild zeigt die Ergebnisse einer Leistungsmessung der Hydraulikanlage an einer Doppel-Drehmaschine.

(Werkbild Bosch Rexroth Electric Drives and Controls, IndraMotion MTX)

Drag & Drop die gewünschten Signale aus einem Tree aus, der alle an der Maschine verfügbaren Daten repräsentiert.

1.15 Messen und Prüfen

Messmaschinen *(Bild 1.69)* und Messzyklen *(Bild 1.70 und 1.71)*

Die Einführung numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen in den Betrieben erfordert meist auch umfassende Umstellungen im Bereich der Qualitätskontrolle. Im ständigen Wechsel müssen einfache und komplizierte Werkstücke mit hohen Qualitätsanforderungen geprüft werden. Manchmal wird eine Messmaschine auch nur dazu eingesetzt, um zwischen **GUT** und **AUSSCHUSS** zu unterscheiden, in anderen Fällen soll sie die Korrekturdaten für den Fertigungsprozess liefern.

Dabei liegen die angestrebten Messzeiten je nach Teilegeometrie in der Größenordnung 30 – 100 % der Bearbeitungszeiten, um eventuell erforderliche Korrekturen schnell vornehmen zu können und damit einen unnötigen Stillstand teurer Maschinen zu vermeiden.

Erst die CNC-Messmaschinen, versehen mit den notwendigen Extras für die spezielle Messaufgabe, erfüllten die 11 **wichtigsten Forderungen**, die an einen automatischen Messablauf gestellt werden:

1. Universelle Messtaster für mehrere Achsrichtungen
2. Keine Unterbrechung zum Nachladen von Messprogrammen
3. Hohe Messgeschwindigkeit, d. h. Verstellgeschwindigkeit bis 3 m pro Minute und Feinpositionierung in der Größenordnung der Auflösung, schnelle Erfassung der Koordinatenwerte nach dem Antasten
4. Geringe Messunsicherheit, hohe Messgenauigkeit
5. Keine überhöhte Anzahl von Antast-

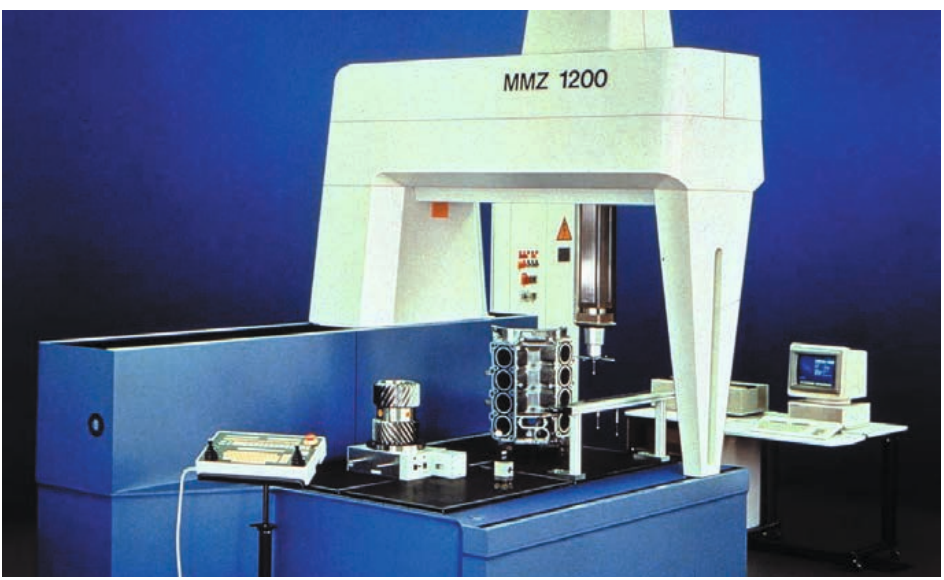
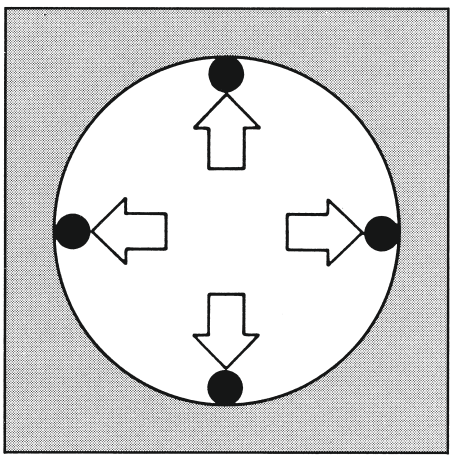
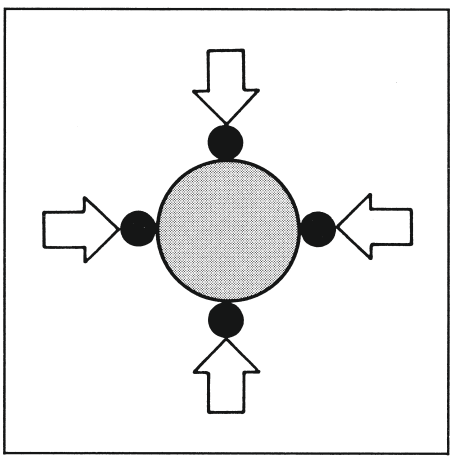


Bild 1.69: CNC-gesteuerte Portal-Messmaschine (Werkbild Karl Zeiss)

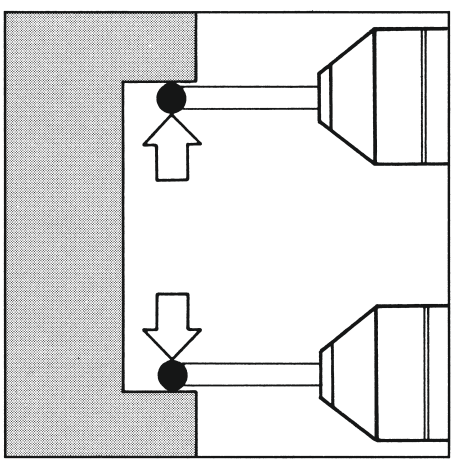
punkten oder Wiederholungen zur Erhöhung der Messgenauigkeit
6. Rasche Umrüstung auf andere Werkstück-Typen
7. Die ausgegebenen Messdaten sollen ohne Umrechnung eine schnelle und sichere Beurteilung der Fertigungsqualität ermöglichen und für Korrekturen verwendbar sein
8. Messprogramme für neue Werkstück-Typen müssen schnell erstellt werden können
9. Vermeidung systematischer Messfehler
10. Zukunftsorientiertes Maschinenkonzept, d. h. z. B. Genauigkeitsreserven, ein universelles Tastsystem, Ausbaufähigkeit für spezielle Messaufgaben,



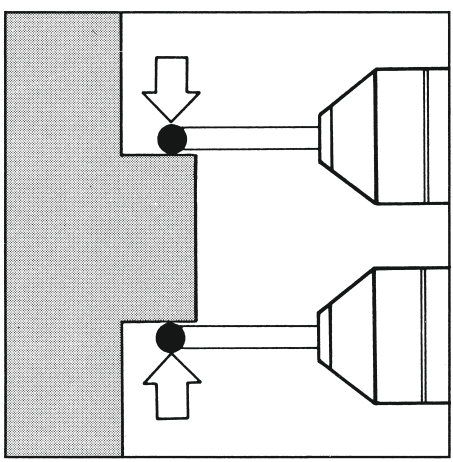
Messzyklus zum Zentrieren einer Bohrung



Messzyklus zum Zentrieren einer Welle

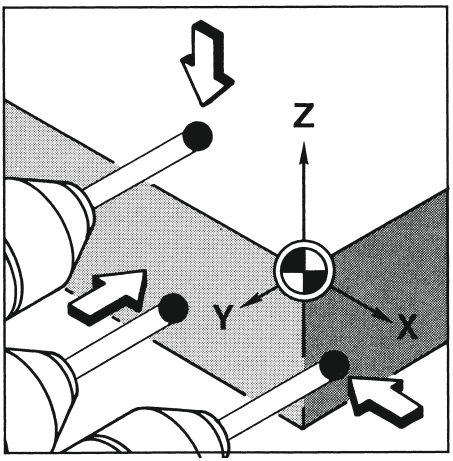


Messzyklus zum Ausmitteln einer Nut

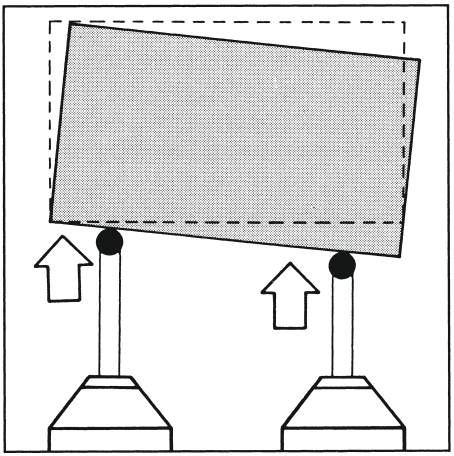


Messzyklus zum Ausmitteln eines Stegs

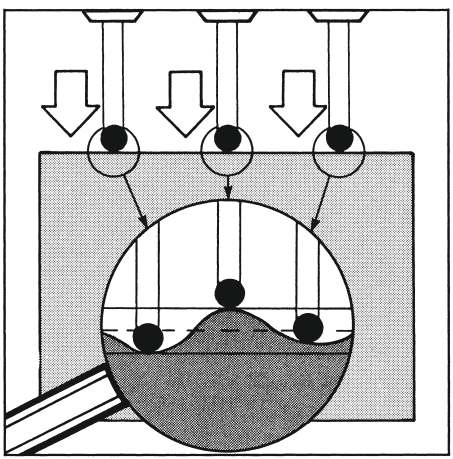
Bild 1.70: Beispiel verschiedener Messzyklen



Messzyklus zur Bestimmung von einzelnen Positionen



Messzyklus zur Bestimmung eines Winkels



Messzyklus zur Bestimmung mehrerer achsparalleler Punkte

Bild 1.71: Beispiel verschiedener Messzyklen

sowie eine allen Erfordernissen leicht anpassbare Software für Steuerung und Datenauswertung und nicht zuletzt die Möglichkeit zur Erstellung kundeneigener, spezieller Rechnerprogramme

11. Automatisch erstellte und ausgedruckte Messprotokolle. Diese sind glaubwürdiger als manuell erstellte Protokolle. Nachfolgende Auswertarbeiten können entfallen.

Die **Programmierung** des Messablaufprogrammes erfolgt heute vorwiegend mit der Messmaschine und dem Musterwerkstück. Nach Einlesen eines entsprechenden Betriebsprogrammes (Prozessors) wird die Messmaschine vorübergehend zum Programmierplatz und die Erstellung der werkstückbezogenen Ablaufprogramme kann durch manuelles Abfahren des ersten Teiles ohne spezielle Programmierkenntnisse erfolgen. Ein Verständnis für geometrische Zusammenhänge und Messtechnik wird jedoch vorausgesetzt. So werden nacheinander sämtliche Positionier- und Messvorgänge gespeichert, bei Bedarf auf Magnetkassette festgehalten und für spätere Wiederholungen dieses Programmes aufbewahrt.

Der Tastkopf ist das wesentlichste Element jeder 3D-Messmaschine und bestimmt de-

ren Messgenauigkeit und universelle Einsatzmöglichkeit.

Bei Berührung mit dem Werkstück übernimmt der Tastkopf als Stellglied die Lageregelung der Achsen in seinen Nullpunkt, oder er liefert selbst Messwerte für X-, Y- und Z-Achse, die den Positionswerten der Messmaschine überlagert werden müssen.

Der Rechner erfüllt in Verbindung mit einer speziellen Software neben der Verarbeitung der Maschinen- und Taststift-Koordinaten eine Vielzahl anderer Aufgaben, wie z. B.

1. Erkennung der Messebene oder -achse mit räumlicher Koordinaten-Transformation (3D-Ausrichtung)
2. Unterscheidung von Innen- und Außenkonturen von Kreisen und Zylindern
3. Erkennung von Fehlbedingungen, wie ungewollte Tasterkollision, Fehlen von Bohrungen, Nichterreichen eines Werkstück-Punktes, Endlagenerkennung der Achsen, Stillstandsüberwachung vor Messdatenaufnahme, usw.
4. Speichern der Messdaten
5. Verarbeiten der Messdaten, deren Auswertung und Ausgabe im gewünschten Format
6. Unterprogramme zur Messung von:
   - räumlichen Elementen, wie Kegel, Kugel, Zylinder, Fläche
   - ebenen Schnitten räumlicher Elemente, wie Ellipse, Kreis, Gerade, Schnittpunkte
   - Koordinatenpunkten und deren Verknüpfung, wie Distanz, Winkel, Symmetrien usw.

Die CNC einer Messmaschine unterscheidet sich jedoch in einigen kleinen, aber wichtigen Details von der CNC einer Werkzeugmaschine. Das Bearbeitungsprogramm für eine Werkzeugmaschine setzt voraus, dass die Werkzeuge und Maschinen-Geometrie mit den angenommenen Werten übereinstimmt. Die Messmaschine muss dagegen feststellen:

a. wie groß die Soll-/Ist-Abweichungen am Werkstück sind
b. ob die erzeugten Bohrungen und Flächen senkrecht zueinander stehen
c. ob eine Bohrung/Schräge/Fläche überhaupt vorhanden ist
d. ob und wann und wie ein Korrekturwert in den Prozess einfließen soll, um die Toleranzen einzuhalten
e. oder ob der Fertigungsprozess sofort zu stoppen ist, da größere Abweichungen auf Fehler in der Werkzeugmaschine schließen lassen.

Zur Umstellung der Messmaschine auf Messen oder Programmieren muss das Betriebsprogramm austauschbar sein, die Steuerung muss über einen ausreichend großen Datenspeicher verfügen, und die Rechnergeschwindigkeit muss groß genug sein, um all die vielen Rechenoperationen in kürzester Zeit ausführen zu können.

Scanning

Darunter versteht man das **kontinuierliche Abtasten einer Oberfläche**. Dazu führt die CNC den Taster kontinuierlich und zeilenweise über die zu messende Oberfläche des Werkstückes. Gleichzeitig speichert der Rechner entweder in einem vorgegebenen Zeittakt oder in Abhängigkeit von der Messstrecke alle Messwerte. Damit der Tastkopf stets innerhalb seines Messbereiches bleibt, regelt die CNC über die Servoantriebe die Antastachse ständig nach. Deshalb muss anstelle eines schaltenden Messtasters ein **messender Taster** eingesetzt werden, dessen Auslenkung ebenfalls ständig gemessen und korrigierend in die Messwerte zurückgeführt wird. Die erzielbare Messgenauigkeit liegt bei einer Auflösung des Messtasters von 0,1 µm bei ± 1 µm *(Bild 1.72 und 1.73).*



Bild 1.72: Scanning-Tastkopf zur Messung von Maß, Form und Lage. Wahlweise Einzelpunkt- und Scanning-Vielpunktmessung



Bild 1.73: Der schaltende Zentraltastkopf für schnelle Einzelantastungen

Die Messwerte lassen sich entweder als **Messprotokoll** auswerten oder von geeigneten CNC-Fabrikaten direkt zum Fräsen einer gleichen Oberfläche verwenden.

Die Weiterentwicklung der Messmaschinen und der Messtaster wird zum verstärkten Einsatz berührungslos arbeitender, **optischer Messtaster** führen, insbesondere unter Ausnutzung der Lasertechnik. Die Messmaschine selbst rückt dabei immer näher an die Fertigungsmaschinen heran, um Korrekturwerte auch auf kurzem, schnellem Weg zurückführen zu können.

1.16 Zusammenfassung

CNC-Maschinen sind durch den Einsatz moderner Steuerungstechnik in der Lage, Werkstücke mit hoher Präzision und komplexen Formen automatisch und ohne manuelle Eingriffe herzustellen. Sie übertreffen manuell oder mechanisch gesteuerte Maschinen bezüglich Flexibilität, Präzision, Wiederholgenauigkeit und Geschwindigkeit. Hauptkennzeichen ist die schrittweise Vorgabe der Werkstück-Sollmaße im NC- oder Teile-Programm und die simultane Steuerung der NC-Achsen.

Die für die Bearbeitung erforderlichen **NC-Steuerungsprogramme** werden heute fast ausschließlich mittels CAM-Systemen oder direkt an der Maschine (Werkstattprogrammierung) erzeugt. Die meisten CNC-Maschinen sind mit Sensoren zur **automatischen Qualitätskontrolle,** sowie für die Überwachung von Werkzeugverschleiß und -bruch ausgerüstet.

Zwischen CNC und Maschine übernimmt eine **SPS als Anpass-Steuerung** mit dem vom Maschinenhersteller geschriebenen SPS-Programm die koordinierte Ablaufsteuerung sämtlicher Zusatzfunktionen, wie Werkzeugwechsel, Werkstückwechsel, Schutztüren, Kühlmittel, Schmierung und anderen Aggregaten.

Zur Messung der **Achspositionen** bzw. des Verfahrweges werden elektronisch auswertbare, digitale **Wegmesssysteme** mit einer Auflösung von 1/1000 mm und feiner eingesetzt, mit Überwachung der Mess-Signale auf einwandfreie Funktion und Notsignal bei Messfehlern.

Als **Vorschubantriebe** für die NC-Achsen werden heute spezielle Drehstrommotoren oder Linearantriebe mit hochdynamischen digitalen Regelkreisen bevorzugt. Diese verfügen über ein hohes Drehmoment, auch bei Drehzahl „Null“, und ersetzen zusätzliche mechanische Klemmungen.

Bearbeitungszentren oder CNC-Sondermaschinen können sechs oder mehr NC-Achsen besitzen, wobei mit X, Y und Z die linearen **Hauptachsen** bezeichnet werden. A, B und C sind **Rotationsachsen** (Dreh- und Schwenkachsen) um die Hauptachsen. Zusätzliche **Hilfsachsen** können bei Mehrspindelmaschinen, bei Maschinen mit Parallelachsen oder zur Positionierung und Steuerung des Werkzeugmagazins vorkommen.

Durch zusätzliche **Automatisierungskomponenten** wie Werkstück- oder Palettenspeicher mit automatischen Wechseleinrichtungen werden CNC-Maschinen zu hoch automatisierten **Flexiblen Fertigungszellen (FFZ).**

Mehrere FFZ, die durch ein automatisches Werkstück-Transportsystem miteinander verbunden sind, bezeichnet man als **Flexible Fertigungssysteme.** Diese erfordern den Einsatz eines zusätzlichen **Leitrechners** für das Gesamtsystem.

CNC-Drehmaschinen, die auch Fräsen können oder CNC-Fräsmaschinen, die auch Drehen können, werden als **CNC-Multifunktions- oder Multitasking-Maschinen** bezeichnet. Durch die Komplettbearbeitung in einer Aufspannung werden die erreichbaren Werkstück-Genauigkeiten messbar verbessert, die Nebenzeiten reduziert und die Wirtschaftlichkeit verbessert. In Planung sind bereits Hybrid- oder Multifunktionsmaschinen mit bis zu 5 Bearbeitungsarten.

CNC-Werkzeugmaschinen

Das sollte man sich merken:

1. **Bearbeitungszentren** sind CNC-Maschinen mit mindestens 3 NC-Achsen, einem Werkzeugmagazin mit automatischem Werkzeug- und Werkstückwechsler. Je nach Lage der Arbeitsspindel unterscheidet man Horizontal- und Vertikalmaschinen.
2. Mit einem zusätzlichem **Dreh-Schwenktisch** oder einem **schwenkbaren Werkzeug** lassen sich prismatische Werkstücke von 5 Seiten und beliebig im Raum liegenden Flächen bearbeiten.
3. **Fräs-Dreh-Zentren** sind **Multifunktionsmaschinen** und für die kombinierte Dreh- und Fräs-Bearbeitung von Werkstücken konzipiert
4. **Drehmaschinen** sind, gemessen an den Stückzahlen, die meist produzierten CNC-Werkzeugmaschinen. Sie werden in vielen unterschiedlichen Bauformen und Werkzeugwechseleinrichtungen hergestellt.
5. **Senkrechtdrehmaschinen** mit zwei Bearbeitungsspindeln, automatischer Werkstück-Zuführung und -Übergabe sind **Fertigungszellen** zur Komplettbearbeitung der Teile.
6. **Dreh-Fräs-Zentren** werden auch für die zusätzliche Bohr- und Fräsbearbeitungen der im Drehfutter gespannten Werkstücke konzipiert.
7. **Schleifmaschinen** unterscheiden sich nach der Form der zu erzeugenden Flächen nach Flach- und Profilschleifmaschinen, Rundschleifmaschinen und Werkzeugschleifmaschinen.
8. Da sich die Schleifmaschine während des Bearbeitungsprozesses abnützt bzw. bei Profilscheiben ihre Form verändert, muss sie – meist mit einem Diamantwerkzeug – im Abrichtvorgang reprofiliert werden. Das Maß der Veränderung an der Schleifscheibe erhält die CNC als Korrekturwert.
9. **CNC-Verzahnmaschinen** werden nur noch ohne Wechselräder gebaut. Das erforderliche Übersetzungsverhältnis der gekoppelten NC-Achsen steuert die CNC durch entsprechende Programmierung.
10. **Laserbearbeitungsmaschinen** werden für unterschiedliche Anwendungen mit unterschiedlich leistungsfähigen Laser-Leistungen eingesetzt:
    - CO_2-(Gas-) und
    - Nd:YAG (Festkörper-) Laser
11. Der laseraktive Körper von **Nd:YAG** ist ein Einkristall aus Yttrium-Aluminium-Granat.
12. Zu den **Lasermaschinen** zählen auch die Generativen Fertigungsverfahren „Stereo-Lithografie“, „Strahlschmelzen“, „Laser-Sintern“ u. a.
13. **Nibbelmaschinen** werden auch mit zusätzlichen Laser-Schneid-Einrichtungen ausgerüstet und dadurch produktiver und flexibler.
14. Beim **Nibbeln** (oder Knabberschneiden) werden Stanzlöcher so aneinander gesetzt, dass sie sich überschneiden. Mit einer Hubfolge vonbis zu 1200/min wird so eine Spur aus dem Blech herausgenibbelt. So lassen sich Durchbrüche und Konturen mit beliebiger Form erzeugen.

15. **Funkenerosionsmaschinen** nutzen den physikalischen Effekt, dass durch elektrothermische Entladungen zwischen Anode und Kathode Oberflächenpartikel (am Werkstück) verdampft werden.
16. Zum **Schneiderodieren** werden durchlaufende Drahtelektroden mit 0,1 bis 0,3 mm Durchmesser verwendet, die berührungslos und ohne mechanische Krafteinwirkung das Werkstückmaterial abtragen.
17. **Parallelkinematische Maschinen**, auch als Stabkinematiken bezeichnet, haben sich in der Praxis vorwiegend als hybride Lösungen durchgesetzt, d. h. ein Teil der Achsen sind seriell aufgebaut.
18. **Elektronenstrahlmaschinen** werden hauptsächlich zum Schweißen hochwertiger Metalle, z. B. Titan im Vakuum, eingesetzt. Bearbeitet wird in einer Vakuum-Kammer. Als Werkzeug dient ein energiereicher, schlanker, scharf gebündelter Strahl schneller Elektronen.
19. Dazu wird die **Strahlleistung** von 1 bis 100 kW auf einen Brennfleck von 0,1 bis 2 mm Durchmesser konzentriert.
20. Beim **Wasserstrahlschneiden** wird Wasser mit einem Druck von 4.000 bis 9.000 bar durch Düsen von 0,1 bis 0,3 mm gepresst. Dabei erreicht die Austrittsgeschwindigkeit des Strahls 800 bis 900 m/s.
21. Dieses Verfahren ist besonders geeignet zum Trennen von „weichen" Werkstücken aus Gummi, Leder, Papier, Schaumstoff, Styropor und elektronischen Leiterplatten, da keine elektrische Aufladung erfolgt.
22. Durch Beigabe eines **Abrasiv-Schneidmittels** feinster Körnung lässt sich auch Stahl bis 80 mm Stärke, Titan, Marmor und Glas schneiden.
23. **CNC-Messmaschinen** sind zur Qualitätssicherung wichtig und werden zum 3D-Vermessen von beliebigen Werkstück-Konturen und für die Prozessüberwachung von Werkstücken mit hohen Genauigkeitsanforderungen eingesetzt.
24. Die **Programmierung** des Messablaufs erfolgt heute vorwiegend mit der Messmaschine und dem Musterwerkstück.
25. Zum Messen von **3D-Oberflächen** führt die CNC den Messtaster kontinuierlich und zeilenweise über die zu messende Oberfläche des Werkstückes und speichert die Messdaten bzw. die Differenzwerte ab.
26. **Energieeffizienz** ist heute ein wichtiges Ziel bei der Auslegung und beim Einsatz von CNC-Maschinen. Zur Verbrauchsmessung und Optimierung verfügen moderne CNC-Maschinen über integrierte Sensoren und Möglichkeiten zur Reduzierung des Energieverbrauchs.

2 Prozessadaptierte Auslegung von Werkzeugmaschinenantrieben

Prof. Dr. Ing. Paul Helmut Nebeling

Innovative Antriebstechnik muss die aktuellen Anforderungen und die spezifischen Anwenderwünsche mit den verfügbaren technologischen Möglichkeiten in hocheffiziente Lösungen umsetzen. Dazu müssen Elektronik, Software und Mechanik von der Berechnung bis zur Ausführung passgenau integriert und optimiert sein, um auch die heutigen ökonomischen und ökologischen Ansprüche an moderne Antriebe zu erfüllen.

In der industriellen Produktion spielen Werkzeugmaschinen eine herausragende Bedeutung für die Bearbeitung von Werkstücken aus unterschiedlichen Materialien. Eine dominierende Rolle übernehmen dabei die spanenden Werkzeugmaschinen. Diese führen die Verfahren mit geometrisch definierter Schneide (z. B. Drehen, Fräsen, Bohren, Reiben) und mit geometrisch nicht definierter Schneide (z. B. Schleifen, Honen, Läppen) aus.

Die **Vorschub- und Hauptspindelantriebe zählen zu den leistungsbestimmenden Kernbaugruppen von spanenden Werkzeugmaschinen.** Die prozessspezifisch abgestimmte Dimensionierung dieser Elemente bestimmt maßgeblich die Leistungsfähigkeit der Maschine. Dabei ist eine Abstimmung der mechanischen und elektrischen Systeme von hoher Bedeutung für die erreichbare Leistung und den Energieverbrauch.

Zusätzlich beeinflussen die **Steuerungstechnik und die Regelung der einzelnen Antriebe** die Stabilität während der Bearbeitung und damit die Genauigkeit und die Bearbeitungszeiten. Auch die **Sicherheit** der Werkzeugmaschinen wird durch die konstruktive Gestaltung der Antriebssysteme realisiert.

2.1 Grenzen der Betrachtung

Werkzeugmaschinen sind häufig in Produktionsanlagen mit mehreren Maschinen eingebunden. Die mechanischen Baugruppen (z. B. Vorschubantriebe mit mechanischen Übertragungselementen und Führungen) und die zugehörigen elektrischen Einheiten (z. B. Servomotoren, Verstärker- und Regelmodule) sind den Maschinen direkt zugeordnet. Periphere Anlagen (z. B. Kühlanlagen, Kühlschmierstoffversorgung) sind entweder für eine oder mehrere Maschinen dimensioniert. Insbesondere bei der Betrachtung der gesamten Fabrikanlage inklusive der Klimatisierung und der Versorgung, z. B. mit Druckluft oder Prozesswasser, ist eine Einbeziehung aller Verbraucher erforderlich. Eventuell kann die Abwärme der einzelnen Produktionsanlagen für die Temperierung der Fabrikanlagen genutzt werden. Die kurzfristige Speicherung von Energie ist derzeit noch auf einzelne Maschinen und deren Antriebe beschränkt *(Bild 2.1)*.

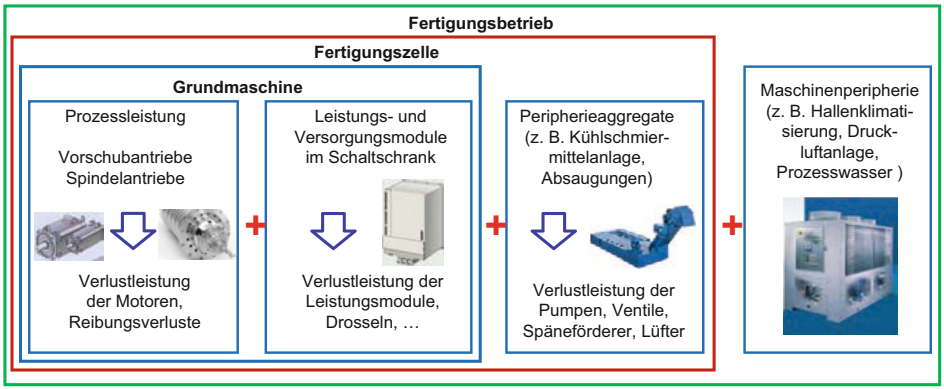


Bild 2.1: Grenzen der Betrachtung

2.2 Ausgangspunkt Bearbeitungsprozess

Werkzeugmaschinen werden zur Bearbeitung metallischer oder nicht-metallischer Werkstücke verwendet. Dabei werden in Abhängigkeit der Maschinentypen unterschiedliche Bearbeitungsprozesse durchgeführt. Dies sind z. B. das Drehen, Fräsen, Bohren, Reiben, Schleifen, Honen als spanende Bearbeitungen. Daneben gibt es auch Werkzeugmaschinen für umformende Verfahren (z. B. Biegen, Ziehen, Schmieden, Pressen) oder für die urformende Bearbeitung (z. B. Druckgießen niedrigschmelzender metallischer Werkstoffe oder Spritzgießen von polymeren Werkstoffen).

In diesem Abschnitt werden die **zerspanenden Werkzeugmaschinen** näher betrachtet *(Bild 2.2)*. Die Schnittbewegung wird bei den spanenden Werkzeugmaschinen in der Regel durch eine rotierende Spindel erzeugt. Diese treibt entweder das Werkzeug (z. B. Fräsen, Bohren, Schleifen) oder das Werkstück (z. B. Drehen) an. Bei verschiedenen Verfahren (z. B. Drehfräsen, Rundschleifen, Wälzfräsen) führen sowohl das Werkstück, als auch das Werkzeug eine rotierende Bewegung aus. Relevant für die Auslegung der Maschinen sind dabei die Prozesskenngrößen. Diese sind insbesondere:

- zu bearbeitender Werkstoff
- Schnittgeschwindigkeit
- Zustellung
- Bearbeitungsstrategie

Aus den während der Bearbeitung gewählten Prozessparametern ergeben sich die Prozesskräfte und die Bahngeschwindigkeiten. Daneben sind die Bearbeitungszeit für eine Operation und der evtl. anschließend erforderliche Werkzeugwechsel weitere Auslegungskriterien. Bei häufigen **Werkzeugwechseln** geht die Verfahrzeit zur Werkzeugwechselposition überproportional als Nebenzeit in die Bearbeitungszeit ein. Daher sind hohe Beschleunigungen und Geschwindigkeiten zur Reduzierung der Nebenzeiten und zur Erhöhung der Produktivität erforderlich. Bei **Bearbeitungszentren** mit oft sehr kurzen Operationszeiten und hohen Werkzeugwechselfrequenzen sind die Bereitstellungszeiten der neuen Werkzeuge und Werkstücke zu beachten. Die Bereitstellungszeiten zum Werkzeugwechsel sollten die Operationszeit im Arbeitsraum nicht übersteigen. Sowohl die konstruktive Ausführung als auch die Dimensionierung der Antriebe beein-

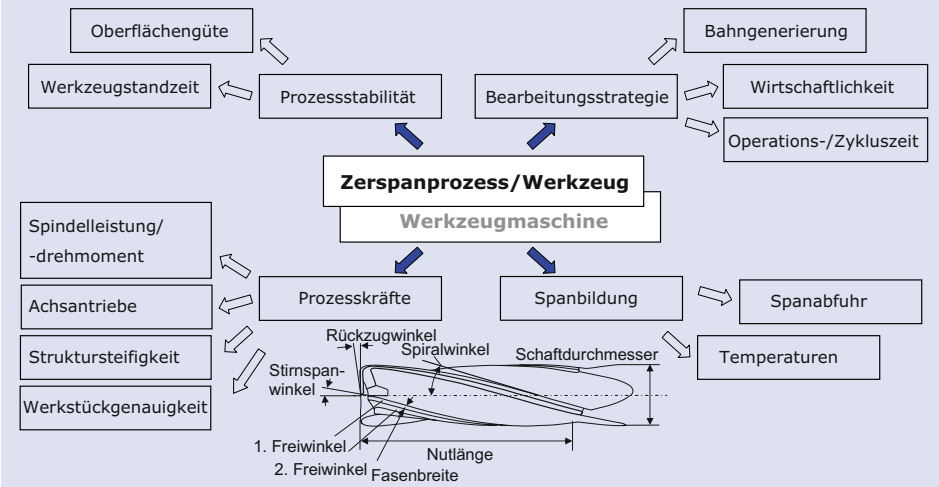


Bild 2.2: Einflussparameter Zerspanprozess/Werkzeugmaschine

flussen diese Zeiten. Auch bei der Auslegung der **Hauptspindel** ist das für die Bearbeitung einerseits und dem für die Beschleunigung der Spindel andererseits erforderliche Drehmoment zu unterscheiden.

Die **Beschleunigungs- und Prozesskräfte** beeinflussen neben der Auslegung der Antriebe auch die Dimensionierung der für die Erzielung der Genauigkeit und Prozessstabilität erforderliche Steifigkeit der Antriebe. Die statische und dynamische **Nachgiebigkeit** (Kehrwert der Steifigkeit) der Antriebe gehen direkt in die am Werkstück erzielbare Genauigkeit und die stabil erreichbareZerspanleistung ein.

Die **Dimensionierung einer Werkzeugmaschine** geht über die rein mechanischen Komponenten wie Lager, Führungen und Gestellbauteile hinaus. Die Erzielung wirtschaftlicher Prozessbedingungen setzt eine gute Abstimmung der mechanischen Komponenten mit der Prozessgestaltung (z. B. Schnittaufteilung, Bearbeitungsstrategie) und der Steuerungstechnik voraus. CNC-Steuerungen kompensieren heute in vielen Maschinen unvermeidbare systematische Ungenauigkeiten der mechanischen Komponenten und tragen damit zur Erhöhung der Genauigkeit bei. Systematische Abweichungen werden mit entsprechenden Hilfsmitteln gemessen, in der Steuerung als **Kompensationswerte** hinterlegt und während des Betriebs der Maschine automatisch korrigiert. Auch thermische Abweichungen lassen sich während des Betriebs durch Messtaster an Referenzpunkten aufnehmen und entsprechend vorgegebener Strategien korrigieren. Durch derartige Korrekturen lassen sich die Anforderungen an die Qualität und Dimensionierung einzelner Komponenten und Baugruppen reduzieren und damit geringere Kosten für die Herstellung erzielen.

Die **Herstellkosten einer Maschine** werden maßgeblich bestimmt durch die Auslegung der Antriebe, der Spindel, der Größe des Arbeitsraums und damit verbunden der Gestellkomponenten, sowie in Abhängigkeit der technischen Leistungsanforderungen und der für den Betrieb der

Maschine erforderlichen Peripheriekomponenten. Der zunehmend an Bedeutung gewinnende **Energieverbrauch** der Werkzeugmaschinen ist davon ebenso abhängig. Hierzu ist eine sinnvolle (nicht zu große) Abstimmung der verfügbaren Komponenten mit den geforderten Leistungsparametern notwendig. Die Optimierung der **Energiebilanz** von Werkzeugmaschinen ist durch die Betrachtung der Peripherieaggregate (z. B. Kühlmittelanlage, Schaltschrankkühlung, Komponentenkühlung) zusammen mit der Temperierung der Maschinenhallen möglich. Beispielsweise lässt sich die Abwärme direkt zur Heizung der Gebäude nutzen. Im Gegensatz dazu ist die ungewollte Aufheizung klimatisierter Bereiche durch Abwärme zu verhindern.

2.3 Energiebilanz

Die für eine Werkzeugmaschine benötigte Energie verteilt sich auf unterschiedliche Verbraucher: Hauptspindel, Vorschubantriebe, Kühlschmierstoffaufbereitung, Druckluft und Nebenaggregate *(Bild 2.3)*.

Eine auf den Anwendungsfall abgestimmte Dimensionierung sowie die sinnvolle Auswahl effizienter Aggregate und Komponenten mit geringer Verlustleistung führen zur optimalen Nutzung der Energie. Bei den **Nebenaggregaten** (z. B. Hydraulik) und der Kühlschmierstoffaufbereitung lässt sich durch den Einsatz moderner Geräte (z. B. frequenzgesteuerter Pumpen und Speicherschaltungen) ein großer Anteil des Energieverbrauchs reduzieren. Ebenso ist auch der Druckluftverbrauch von der konstruktiven Gestaltung z. B. der Labyrinthe abhängig.

Die Anteile der einzelnen Verbraucher und damit die Höhe des gesamten Energieverbrauchs sind stark von dem Maschinentyp, der Größe und dem Anwendungsgebiet abhängig. Im Formenbau oder in der Großteilebearbeitung eingesetzte Bearbeitungszentren haben häufig geringere Verfahrgeschwindigkeiten und Beschleunigungen als Bearbeitungszentren zur Herstellung von Serienwerkstücken aus Aluminium. In der Serienfertigung kommen in kurzen Zeitabständen unterschiedliche Werkzeuge

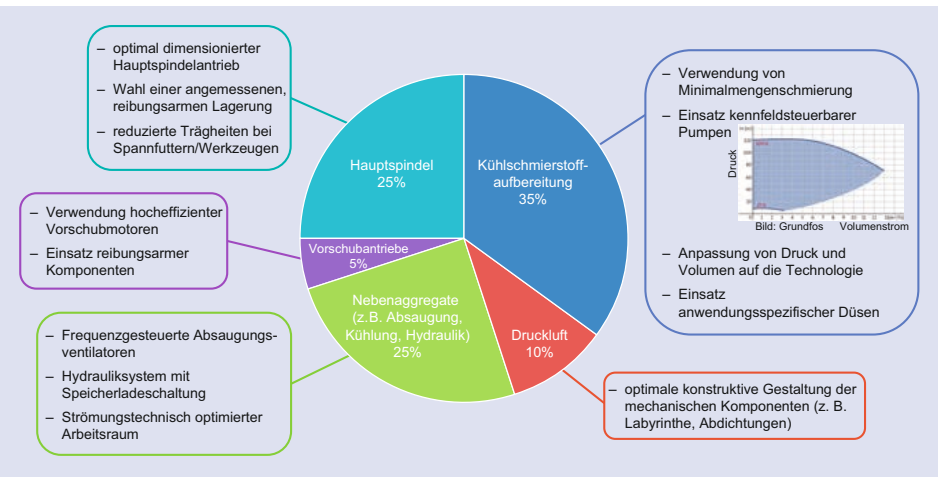


Bild 2.3: Energieverbrauch eines Bearbeitungszentrums

zum Einsatz. Bei jedem Werkzeugwechsel sind die Maschinenachsen und die Spindel zu beschleunigen und abzubremsen. Kurze Werkzeugwechselzeiten durch entsprechend dimensionierten Spindelantrieb und der Einsatz von Sonderwerkzeugen, die mehrere Bearbeitungsoperationen durchführen, steigern die Produktivität derartiger Maschinen.

Bei langen Bearbeitungszeiten (z. B. Formenbau) ergibt sich die Dimensionierung der Antriebe hauptsächlich aus den Anforderungen der Bearbeitungskräfte und der zu erzielenden Genauigkeiten.

2.4 Aufbau von Werkzeugmaschinenantrieben

Antriebe in Werkzeugmaschinen können entsprechend ihrer Verwendung nach verschiedenen Kriterien unterschieden werden:

- Vorschub-, Spindel-, Nebenantrieb
- mit/ohne Belastung durch Gewichtskraft
- geregelte/ungeregelte Antriebe
- konstante/variable Drehzahl

Vorschubantriebe

Bei CNC-Maschinen sind meistens mehrere Achsen an der Erzeugung der Bewegungsabläufe beteiligt. Die übergeordnete CNC steuert die Achsbewegungen durch **Vorgabe der Lagesollwerte** für jede einzelne Achse. Die **Achspositionen** werden über rotatorische und/oder lineare Messsysteme gemessen und als **Lage-Istwert** in den Regelkreis zurückgeführt. Der Aufbau derartiger Antriebe ist in *Bild 2.4* dargestellt.

Vorschubantriebe müssen möglichst präzise und verzögerungsfrei diesen Lagesollwerten folgen. Gleichzeitig soll der Einfluss von Störkräften so gering wie möglich sein. Deshalb werden sie im Allgemeinen mit modularen, **digitalen Antriebsreglern** und Synchron-Servomotoren betrieben. Damit lassen sich hohe Genauigkeiten und kurze Reaktionsgeschwindigkeiten erreichen.

Digitalantriebe bestehen aus einem Versorgungsmodul, welches die dreiphasige Netzspannung gleichrichtet und über den nachgeschalteten **Gleichspannungs-**

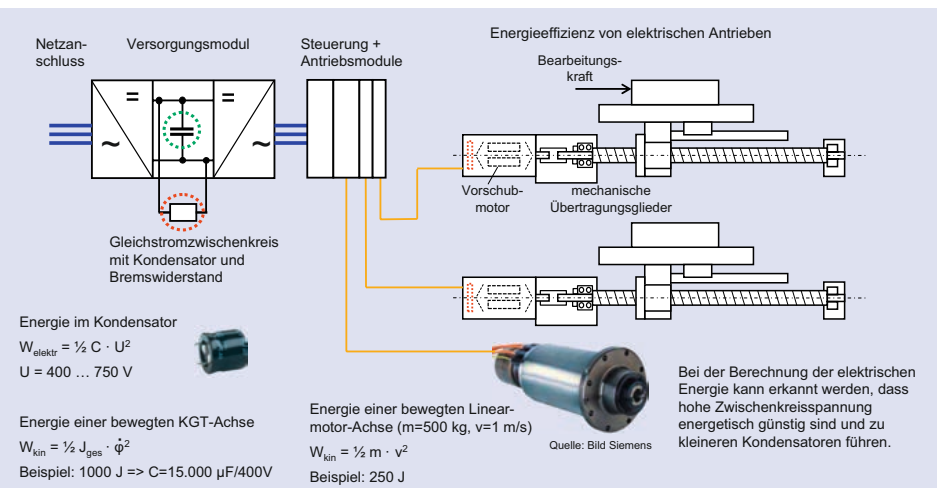


Bild 2.4: Prinzipieller Aufbau von Werkzeugmaschinen-Antrieben

Zwischenkreis die Antriebsregler versorgt. In diesem Gleichstromzwischenkreis befindet sich zur Erhöhung der Gleichstromqualität (Glättung) und zur kurzfristigen Speicherung von Energie ein Kondensator. Die Spannung des Gleichstromzwischenkreises beträgt zwischen 400 V und 750 V. Zur Verbesserung der Energieeffizienz kann eine höhere Speicherkapazität im Gleichstromzwischenkreis mittels größerer Kondensatoren genutzt werden.

Der beim Abbremsen der Achsen entstehende Bremsstrom wird über einen oder mehrere Bremswiderstände in Wärme umgesetzt oder über die sogenannte **Rückspeisung** in das Versorgungsnetz zurückgespeist. Alternativ dazu kann die Bremsenergie auch in einem Speicherantrieb bestehend aus dem Servoantrieb und einer direkt daran angekoppelten Trägheit speichern.

Dazu werden als **Leistungsstellglied** eines modularen Antriebsreglers **Wechselrichter** eingesetzt, die aus dem Gleichspannungs-Zwischenkreis dreiphasigen Drehstrom mit stufenlos regelbarer Frequenz für die Synchronmotoren liefern. Die Stellfrequenz, die durch den Stromregeltakt der Antriebe begrenzt ist, beeinflusst die maximal erreichbare **Geschwindigkeit** der jeweiligen Achse.

Ausschlaggebend für die erreichbare **Bahngenauigkeit** ist eine möglichst hohe Taktfrequenz des Reglers. Je nach Steuerung und den Anforderungen an die Maschine liegen die **Taktzykluszeiten der Lageregelkreise** teilweise deutlich unter 1 ms (125 µs), der Geschwindigkeitsregelkreise bis zu 62,5 µs und der Stromregelkreise bis zu 31,25 µs.

Die Antriebsverstärker der einzelnen Achsen sind in der Regel über einen meistens herstellerspezifischen **Antriebsbus** mit der CNC verbunden.

Hauptspindelantriebe

Ein Hauptspindelantrieb enthält prinzipiell die gleichen Hauptkomponenten wie ein Vorschubantrieb. Lediglich die geforderten Antriebsleistungen und Drehzahlen sind größer. Deshalb sind häufig Umrichter größerer Leistung erforderlich.

Je nach Anwendungsfall sind hohe Drehmomente (z. B. Schwerzerspanung bei niedrigen Drehzahlen) oder hohe Drehzahlen erforderlich. Häufig ist bei hohen Drehzahlen die Brems- und Beschleunigungszeit für die Auslegung relevant. Lässt sich das Drehmoment nicht mit einem Direktantrieb erreichen, werden Getriebe zwischengeschaltet.

Der **Drehstrom-Asynchronmotor mit Kurzschlussläufer** ist der am häufigsten eingesetzte Hauptspindelmotor. Um auch bei niedrigen Drehzahlen oder bei Drehzahl Null das volle Drehmoment zu gewährleisten, sind Gehäusemotoren für Hauptantriebe immer fremdbelüftet oder flüssigkeitsgekühlt ausgeführt.

2.5 Anforderungen aus den Zerspanprozessen

Bei spanenden Werkzeugmaschinen findet an der Schneide der Werkzeuge der Schnittprozess statt. Durch diesen Schnittprozess wird das zu zerspanende Material getrennt. In Abhängigkeit des Prozesses (definierter/nicht definierte Schneide), der Art und Geometrie des eingesetzten Werkzeuges, der Größe der Zustellung und des Vorschubs sowie des zu zerspanenden Materials resultieren unterschiedliche hohe Kräfte in Richtung der Schnittbewegung und orthogonal dazu. Bei der Zerspanung mit **geometrisch bestimmter Schneide** gibt es unterschiedliche Zerspankraftmodelle, mit denen die im Bearbeitungsprozess auftretenden Kräfte analytisch bestimmt werden können.

Beim Drehen ist die Spandicke bei konstantem Vorschub zeitlich nicht variabel, wohin gegen die Spandicke beim Fräsen in Abhängigkeit der aktuellen Position der Schneide im Fräsbogen kontinuierlich variiert. Durch diese kinematischen Zusammenhänge und die unterschiedliche Anzahl der im Eingriff befindlichen Schneiden entsteht beim Fräsen prozessabhängige Schnittkraftschwankung. Die Schnittkraftkomponente ist dabei in der Regel die größte Kraft. Je nach Bearbeitungsprozess kann aus diesen Kräften die Dimensionierung des Spindeldrehmoments und der Vorschubkräfte abgeleitet werden. Bei mehreren orthogonalen linearen Achsen können die Schnittkräfte auch als direkte Vorschubkräfte auftreten.

2.6 Stationäre und dynamische Auslegung von Vorschubantrieben

Aufgrund der unterschiedlichen Prozesse ist eine Unterscheidung nach

- stationärer und
- dynamischer

Auslegung der Antriebe erforderlich *(Bild 2.5)*. Während bei der stationären von lang andauernden kontinuierlichen Prozessen ausgegangen wird, ändern sich die Prozessparameter bei der dynamischen Auslegung häufig in kurzen Abständen.

Bei der **stationären Auslegung** der Antriebe wird von einer kontinuierlichen Kraft (z. B. Zerspankraft, Gewichtskraft) ausgegangen.

Die bei der stationären Auslegung zu berücksichtigende Kraft ergibt sich aus den Bearbeitungskräften und den evtl. in vertikalen Achsen vorhandenen Gewichtskräften. Wird in einer Vertikalachse ein **Gewichtsausgleich** verwendet, können die Gewichtskräfte bei vollständiger Kompensation vernachlässigt oder bei nicht vollständiger Kompensation in reduzierter Form berücksichtigt werden.

Bei der **dynamischen Auslegung** eines Antriebes werden die zu beschleunigenden Massen und Trägheiten der unterschiedli-

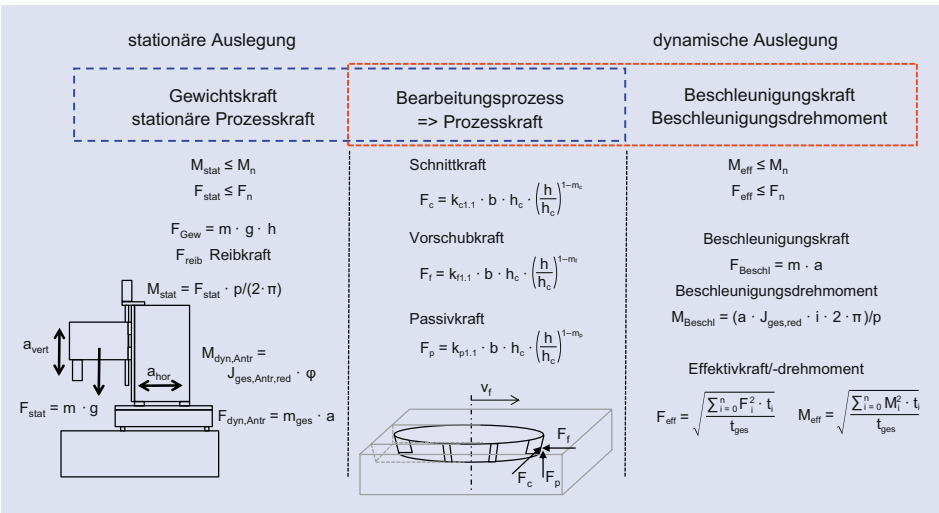


Bild 2.5: Stationäre und dynamische Auslegung von Maschinenantrieben

chen Komponenten des Antriebsstranges berücksichtigt. Die linear bewegten Massen werden bei der Verwendung rotativer Antriebe auf die Antriebswelle reduziert. Die erforderlichen Kräfte bzw. Drehmomente der Antriebe ergeben sich aus den vorgegebenen Beschleunigungen bzw. Verfahr- oder Beschleunigungszeiten.

Die für die dynamische Auslegung anzusetzenden **Beschleunigungen** sind vor allem von dem Einsatzgebiet der Maschinen abhängig. Bei der Bearbeitung von Werkstücken treten beim Fahren von Bögen an Konturen Beschleunigungen in einer oder mehreren Achsen auf. Diese hängen von der Bahngeschwindigkeit und dem Radius ab. Die Abhängigkeit der Bahngeschwindigkeit und des Bahnradius mit der resultierenden Beschleunigung ist in *Bild 2.6* dargestellt. Übersteigt die erforderliche Beschleunigung das zur Verfügung stehende Drehmoment bzw. die Kraft des Vorschubantriebs, muss die Geschwindigkeit reduziert werden. Als weitere Folge bei hohen Bahngeschwindigkeiten und kleinen Konturelementen resultieren Ungenauigkeiten bzw. Konturabweichungen.

Ein anderer Fall liegt beim **Werkzeugwechsel** vor. Dabei wird versucht, ohne Eingriff des Werkzeugs minimale Nebenzeiten zu erzielen. Die am Werkzeugwechsel beteiligten Achsen werden mit maximal möglichem Drehmoment bzw. Kraft beschleunigt, verfahren und abgebremst. Die Belastungen der Antriebe treten dabei nur temporär auf.

Ähnliche Belastungen treten auch bei der Konturbearbeitung an kleinen Übergängen auf. An diesen Stellen wird dann der Motor mit der maximal möglichen Kraft bzw. dem Drehmoment betrieben. Diese Kraft bzw. dieses Drehmoment steht nicht dauerhaft zur Verfügung. Zur Dimensionierung der Antriebe sind deshalb die effektiven Kräfte bzw. Drehmomente zu berücksichtigen

Bei der Berechnung der effektiven Kräfte/Momente werden alle zum jeweiligen Zeitpunkt wirkenden Kräfte/Momente berücksichtigt. Es ist zu berücksichtigen, dass die Effektivwerte von Kraft und Drehmoment immer kleiner als die Nennkräfte/Nennmomente der verwendeten Antriebe sind.

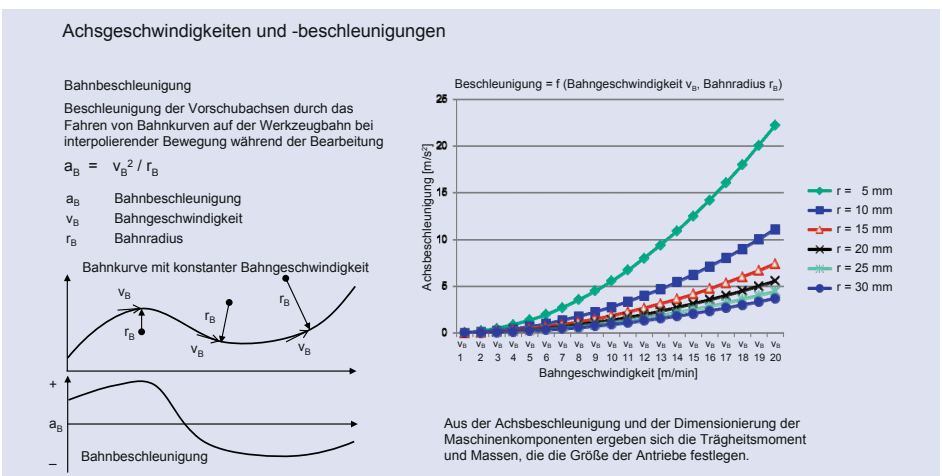


Bild 2.6: Bahnbeschleunigung in Abhängigkeit von Radius und Geschwindigkeit

Das Gesamtträgheitsmoment des Antriebs ergibt sich aus der Summe aller Einzelträgheitsmomente. Bei einem **Vorschubantrieb** über Kugelgewindetrieb sind dabei die folgenden Komponenten zu berücksichtigen:

- linear bewegte Masse,
- Kugelgewindetrieb,
- Lagerinnenring mit Nutmutter,
- Kupplung bzw. Riemenscheiben mit Riemen und
- Trägheitsmoment des Motors

Befindet sich zwischen dem Motor und dem Abtrieb eine Übersetzung (z. B. durch ein Riemengetriebe), geht die Übersetzung quadratisch wiederum über den Ansatz der rotativen Energien in das Trägheitsmoment ein:

Für die Auslegung des Antriebs wird dabei das auf die Motorwelle reduzierte Trägheitsmoment verwendet.

Bei der Verwendung eines **Ritzel-Zahnstange-Antriebs** entfällt die mechanische Übersetzung durch den Kugelgewindetrieb, der bei einer Umdrehung nur die Steigung **p** an Weg erzeugt.

Bei einem **Ritzel-Zahnstangen-Antrieb** berechnet sich das Gesamtträgheitsmoment aus dem reduzierten Trägheitsmoment der bewegten Masse, dem Ritzel-Trägheitsmoment und dem Trägheitsmoment des Antriebsmotors. Aufgrund der nicht vorhandenen mechanischen Übersetzung bei einem Ritzel-Zahnstangen-Antrieb wird häufig zwischen dem Motor und dem Ritzel ein Getriebe mit einer Übersetzung von 5…10 eingesetzt. Zur Verhinderung von Spiel bei Ritzel-Zahnstangen-Antrie-

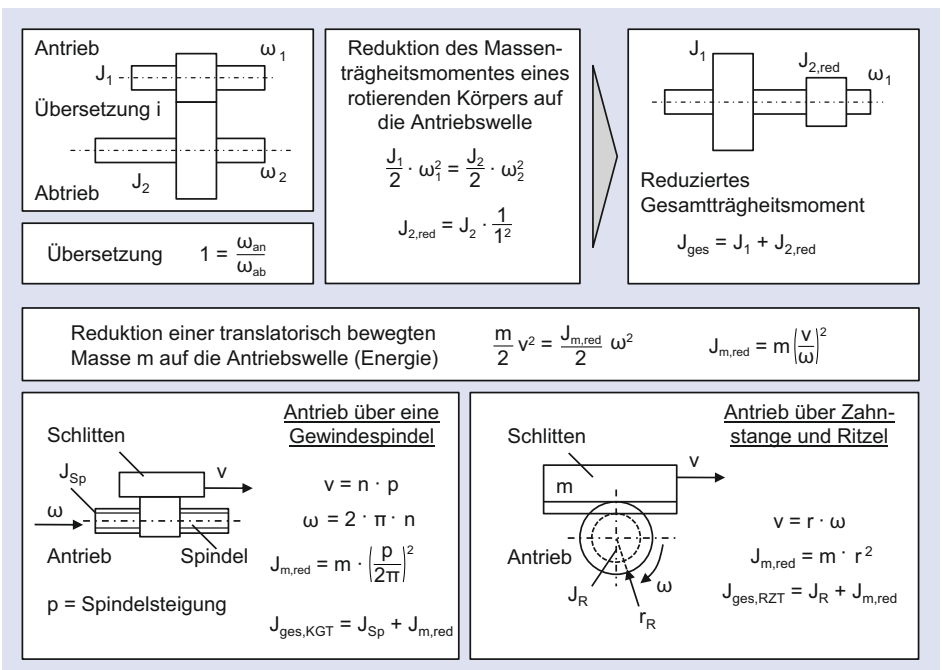


Bild 2.7: Dynamische Auslegung von Vorschubantrieben (nach Weck, Brecher)

ben können diese entweder mechanisch oder elektrisch verspannt werden. Bei einer mechanischen Verspannung treibt ein Motor zwei Ritzel an, die über eine Zwischenwelle mechanisch gegeneinander verspannt sind. Dabei wirkt die Verspannung kontinuierlich. Die elektrische Verspannung basiert auf der Verwendung zweier Ritzel, die jeweils von einem Motor angetrieben werden. In Abhängigkeit des Betriebszustandes können diese Motoren entweder gleich- (Beschleunigung im Eilgang) oder gegengerichtet (während der Bearbeitung) arbeiten.

Für die **dynamische Dimensionierung** des Motorträgheitsmoments wird jeweils das Gesamtträgheitsmoment herangezogen. Als weitere wichtige Kenngröße zur Erzielung von hohen Bahngenauigkeiten bei hohen Verfahrgeschwindigkeiten und Beschleunigungen ist die Regelbarkeit der Antriebe zu betrachten. Dabei wird das Trägheitsmoment der Antriebs- und Abtriebsseite getrennt herangezogen *(Bild 2.8)*. Bei den Antrieben wird davon ausgegangen, dass die motorseitige Kupplungshälfte, das motorseitige Riemenrad bzw. das Ritzel starr mit der Antriebswelle verbunden sind. Ebenso ist die abtriebsseitige Kupplungshälfte bzw. das Riemenrad starr mit dem Kugelgewindetrieb verbunden. Unter diesen Voraussetzungen kann das Trägheitsmoment des Antriebs aus Motor und Kupplungshälfte bzw. Riemenrad gebildet werden. Bei einem Antrieb mit Riemen wird dieser je hälftig dem Antrieb und Abtrieb zugeordnet. Dabei ist der Betrag des Riemens gegenüber den Riemenrädern sehr gering.

Zur Erzielung einer guten Regelbarkeit sollte das Verhältnis der Trägheitsmomente zwischen Abtrieb und Antrieb einen Wert von 2,5 bis 3 nicht übersteigen. Dieses Verhältnis besitzt Auswirkungen auf die Eigenfrequenz des Regelkreises und die einstellbare Geschwindigkeitsverstärkung.

2.7 Lineardirektantrieb in Werkzeugmaschinen

Zur Erzielung hoher Vorschubgeschwindigkeiten ohne mechanische Übertragungselemente kommen in Werkzeugmaschinen Lineardirektantriebe zum Einsatz.

Trägheitsmoment	KGT direkt Kupplung		KGT Riemengetriebe	
	Antrieb	Abtrieb	Antrieb	Abtrieb
Motor Kupplung oder Getriebe	1 0,5	 0,5	1	
Riemenscheibe Motor Riemen			1 0,5	 0,5
Riemenscheibe KGT Nutmutter		 1		1 1
Lagerinnenring Kugelgewindetrieb		1 1		1 1
Last		1		1

Bild 2.8: Zuordnung der Trägheitsmomente

Dabei werden heute überwiegend Synchronmotoren mit Permanentmagneten im Sekundärteil verwendet.

Aufgrund der begrenzten Kräfte dieser Antriebe sind **Gewichtskräfte in Vertikalachsen** durch einen Gewichtsausgleich zu kompensieren. Bei der Auslegung von Lineardirektantrieben darf die effektive Kraft die Nennkraft des Motors nicht übersteigen. Die zu berücksichtigenden Kräfte ergeben sich aus den Prozess-, Reibungs-, Beschleunigungs- und evtl. vorhandenen Gewichtskräften.

Bei der Verwendung eines Lineardirektantriebs ist ein **direktes Messsystem** erforderlich. Da der Lineardirektantrieb keine mechanischen Übertragungselemente besitzt, ist die erforderliche Kraft durch den Linearmotor direkt aufzubringen. Linearmotoren sind aufgrund der Verschleißfreiheit für schnelle Bewegungen mit hohen Beschleunigungen gut geeignet. Die maximale Eigenbeschleunigung beträgt ca. 400 m/s^2. Zusatzmassen der zu bewegenden Bauteile reduzieren das Beschleunigungsvermögen, wodurch Leichtbau bei Linearmotoren sehr wichtig ist. Hinsichtlich der Sicherheit sind die Linearmotorantriebe mit entsprechend stabil ausgeführten Endanschlägen (z. B. Stoßdämpfer) und Klemm- bzw. Bremselementen auszustatten.

Lineardirektantriebe werden direkt in die Maschinenstruktur integriert. Da die Verlustleistung dieser Antriebe die Genauigkeit beeinflussen kann, sind hochwertige Linearmotoren mit Präzisionskühlern ausgestattet.

2.8 Ableitung der Antriebsauslegung aus Prozesskenngrößen

Die **Dimensionierung von Spindel- und Vorschubantrieben** kann aus charakteristischen Prozesskenngrößen abgeleitet werden. Eine entscheidende Kenngröße ist dabei die **Schnittgeschwindigkeit** *(Bild 2.9)*. Diese unterscheidet sich in weiten Grenzen in Abhängigkeit des zu bearbeitenden Werkstoffes. Auch die Strategie der Bearbeitung (konventionell oder Hochgeschwindigkeitsbearbeitung) hat großen Einfluss auf die Schnittgeschwindigkeit,

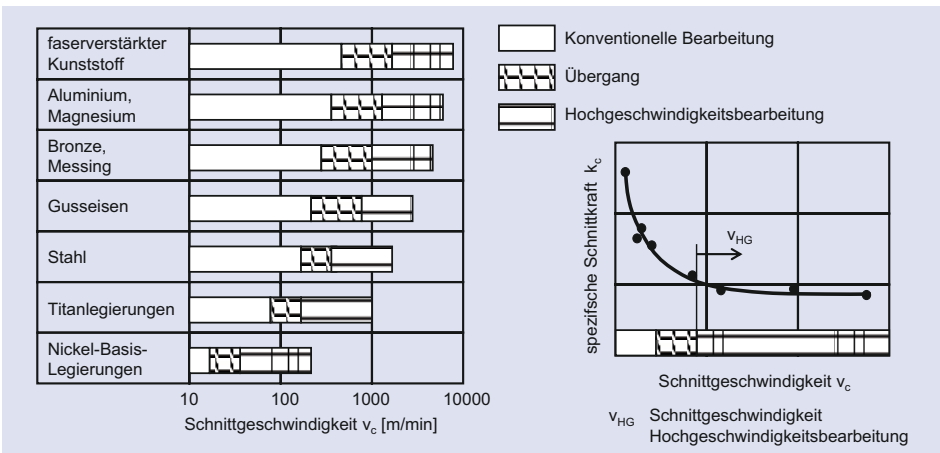


Bild 2.9: Schnittgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Werkstückwerkstoffen

die eingesetzten Werkzeuge, der gewählten Werkzeuggeometrie und den Vorschub- und Zustellbeträgen.

Bei der Leichtmetall- und Faserverbundwerkstoffbearbeitung werden sehr hohe Schnittgeschwindigkeiten verwendet, wohingegen bei der Bearbeitung von schwer zerspanbaren Nickel-Basis-Legierung niedrige Schnittgeschwindigkeiten zum Einsatz kommen. Häufig verwendete Stahl- und Gusswerkstoffe liegen hinsichtlich der Schnittgeschwindigkeit dazwischen. Da die verwendbaren Werkzeuge häufig durch die Geometrie des Werkstückes vorgegeben sind, ist die Schnittgeschwindigkeit gleichbedeutend mit der von der Maschine aufzubringenden Drehzahl.

Auch die spezifischen Schnittkräfte und die Spanungsquerschnitte sind durch den Werkstoff und die Rohteile vorgegeben.

Die spezifischen **Zerspankräfte** unterscheiden sich in sehr starkem Maße in Abhängigkeit des zu zerspanenden Werkstoffes *(Bild 2.10)*. Während Faserverbundwerkstoffe, Leichtmetalle und Kupfer-Messing-Legierungen spezifische Schnittkräfte von $k_{c1.1}$ = 600 – 800 N/mm² aufweisen, liegen Gusseisen und Titanlegierungen im Bereich zwischen $k_{c1.1}$ = 1000 – 1400 N/mm² und hochfeste Stähle teilweise deutlich über $k_{c1.1}$ = 2000 N/mm².

Sowohl die spezifischen Schnittkräfte als auch die Schnittgeschwindigkeiten führen zu unterschiedlichen Auslegungen der Maschinenspindeln. Bei der Bearbeitung von Faserverbundwerkstoffen und Leichtmetallen sind große Leistungen bei hohen Drehzahlen erforderlich. Dagegen sind bei der Bearbeitung von Gusseisen und Stahl mittlere Leistungen aber teilweise hohes Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen erforderlich. Die maximale Drehzahl einer Spindel als weitere Kenngröße bestimmt die Wahl und Gestaltung der Lagerung. Hohe Drehzahlen bei der Leichtmetallbearbeitung erfordern besondere Maßnahmen bei der Gestaltung des Spindel-Lager-

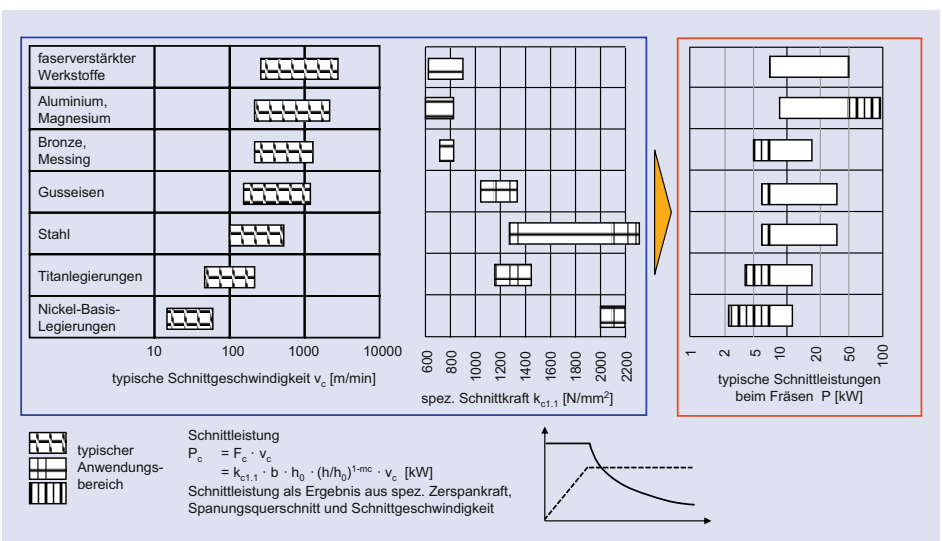


Bild 2.10: Schnittleistungen aus Schnittkraft und Schnittgeschwindigkeit

Systems. Zur Erzielung sehr hoher Drehzahlen werden bei derartigen Spindeln Hybrid-Lager und Öl-Luft-Schmiersysteme verwendet. Dagegen sind Spindeln für niedrigere Drehzahlen in der Regel fettgeschmiert.

Bei der **Auslegung des Spindel-Lager-Systems** ist weiterhin zu berücksichtigen, dass die Kräfte der Zerspanung (z. B. Schnittkraft und Passivkraft) keine zu großen Verformungen der Spindel hervorrufen dürfen. Insbesondere bei der **Schwerzerspanung** treten teilweise sehr große Kräfte auf, die das Spindel-Lager-System und die Vorschubantriebe der orthogonalen Achsen belasten. Bei der Bearbeitung von Stahl und Gusseisen sind im Bereich des Fräsens häufig Spindeln mit Drehzahl von 10.000 – 12.000 1/min für die Bearbeitung ausreichend *(Bild 2.11)*. Dagegen sind bei der Leichtmetallbearbeitung Spindeln mit deutlich höheren Drehzahlen erforderlich. Auch bei Drehmaschinen sind entsprechende Spindeln erforderlich, wobei die Drehzahlen aufgrund der größeren Durchmesser niedriger liegen.

Im folgenden *Bild 2.12* sind die unterschiedlichen Charakteristiken der Spindelkennlinien dargestellt.

Bei universellen Anwendungen ist durch den Konstrukteur **ein Kompromiss zwischen maximalem Drehmoment, Eckdrehzahl und maximaler Drehzahl** zu finden. Der Einsatz von heute weitverbreiteten Motorspindeln erstreckt sich auf ein weites Anwendungsgebiet. Die Auslegung der Motorcharakteristik wird durch den Anwendungsfall bestimmt. Das zur Verfügung stehende Drehmoment wird hauptsächlich durch die geometrischen Dimensionen Länge und Durchmesser beeinflusst. Bei der Dimensionierung kann bei Asynchronmotoren von einer Kraftdichte von 25 – 30 kN/m² Luftspaltfläche und bei Synchronmotoren von 45 – 60 kN/m² aus-

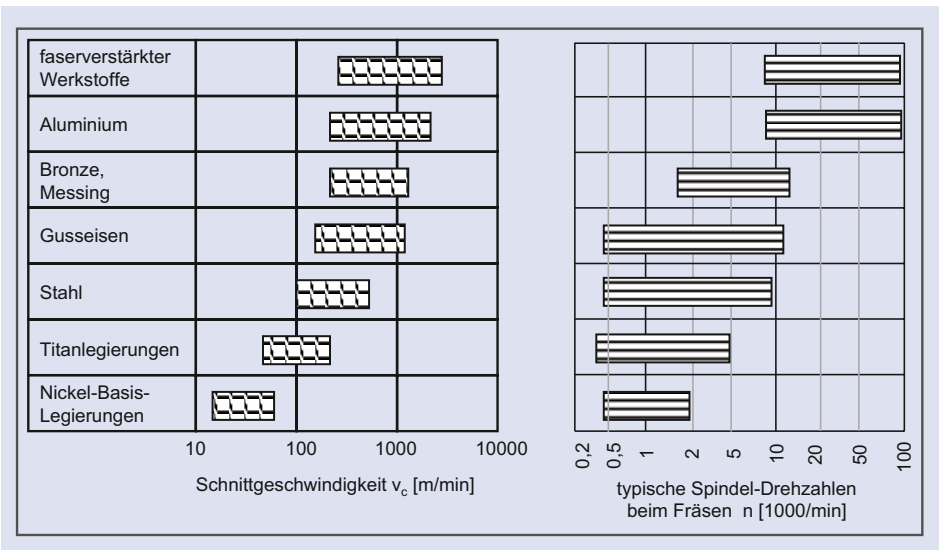


Bild 2.11: Typische Spindeldrehzahlen beim Fräsen unterschiedlicher Werkstoffe

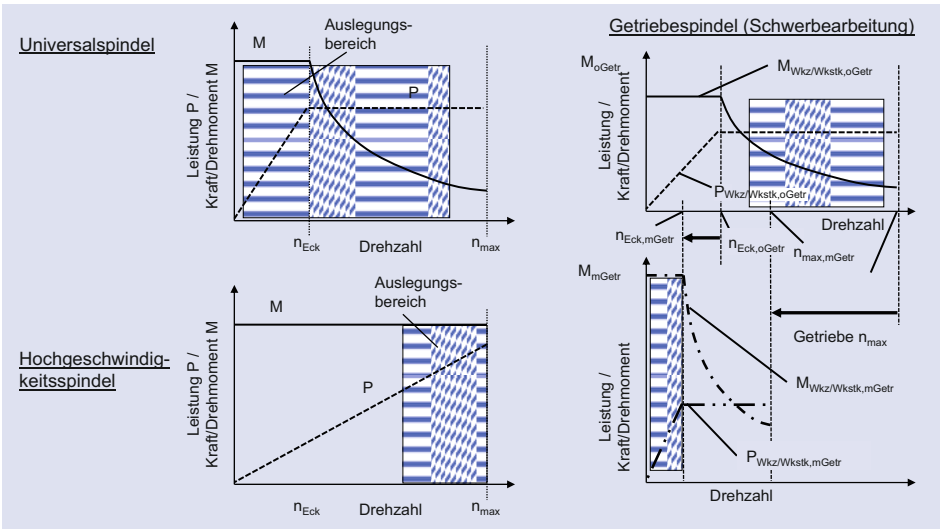


Bild 2.12: Charakteristische Spindelkennlinien

gegangen werden. Sowohl bei Asynchron- als auch bei Synchronmotoren lässt sich ein Bereich mit konstantem Drehmoment und ein Bereich konstanter Leistung realisieren. Die maximale Drehzahl einer Spindel wird durch die Auslegung der Wicklung, aber auch durch das verwendete Ansteuermodul beeinflusst. Das Verhältnis n_{max}/n_{Eck} ist von der Ausführung der elektrischen Maschine abhängig. Synchronmaschinen können $V = n_{max}/n_{Eck} \leq 4$ (mit speziellen regelungstechnischen Maßnahmen auch 6), Asynchronmaschinen bis zu 10 erreichen. Hauptgrund dafür ist die hohe induzierte Gegenspannung bei Synchronmaschinen.

Bei **Hochgeschwindigkeitsspindeln** wird das erforderliche Drehmoment bis zur maximalen Drehzahl beibehalten. Dadurch bauen diese Spindeln sehr kompakt. Bei derartigen Anwendungsfällen ist die **Hochlaufzeit** häufig ein Kriterium der Auslegung. Die während der Bearbeitung erforderlichen Drehmomente sind aufgrund der geringen Bearbeitungskräfte und häufig auch kleinen Durchmesser bei niedrigen Werten.

Insbesondere bei der **Schwerlastzerspanung** ist das Drehmoment das begrenzende Kriterium der Motorspindeln. Bei sehr hohen Drehmomenten ist die Anwendung von direktangetriebenen Motorspindeln nicht sinnvoll. Das Drehmoment wird bei begrenzter Leistung über ein Getriebe übersetzt. Mehrere Getriebestufen sind dann erforderlich, wenn mit derartigen Maschinen auch höhere Drehzahlen (bei geringerem Drehmoment) gefahren werden sollen.

2.9 Universelle/spezifische Auslegung von Maschinen

Beispiel: Hauptspindel

Bei der Auslegung der Hauptspindel einer Werkzeugmaschine sind unterschiedliche Kriterien zu berücksichtigen. Unabhängig vom Bearbeitungsverfahren ist die

- Größe der Werkstücke,
- Art der Rohteile und
- typische zu bearbeitenden Werkstoffe

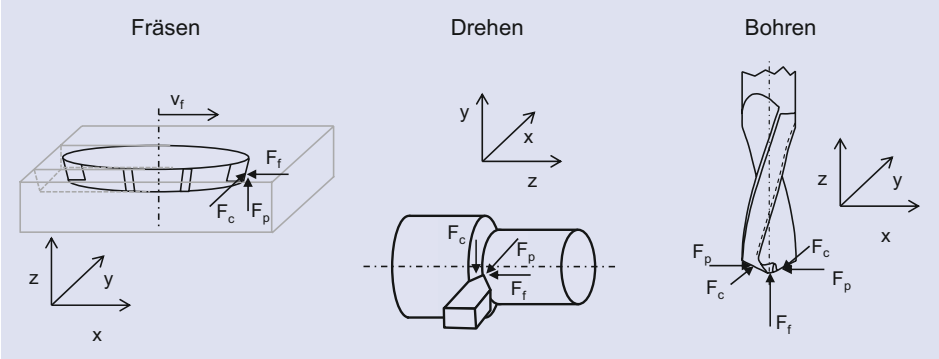


Bild 2.13: Richtungen der Zerspankräfte

Im Bereich der **Drehbearbeitung** sind Guss- und Stahlwerkstoffe weit verbreitet. Insbesondere im automobilen Umfeld sind typische Drehteile z. B. Getriebe-, Nocken- und Kurbelwelle und Zahnräder. Bei der **Fräsbearbeitung** gibt es neben Stahl- und Gusswerkstoffen auch zahlreiche Bauteile aus Leichtmetallen (z. B. Pumpenteile, Ventilgehäuse, teilweise Achskomponenten, Motorblöcke und Getriebegehäuse).

Die Rohteile werden häufig geschmiedet oder bei Leichtmetallkomponenten mit Druckguss erzeugt. Daraus ergibt sich, dass die zu zerspanenden Volumina häufig gering sind und die Maschinenleistung begrenzt werden kann.

Bei Einsatz von Maschinen z. B. für Komponenten des allgemeinen Maschinenbaus lassen sich die Anwendungsgrenzen häufig nicht so exakt beschreiben, sodass **größere Leistungs- und Drehmomentreserven** eingebaut werden müssen. Jedoch ist auch bei einer universellen Auslegung der Maschinen die Abstimmung der Spindelleistung und des Spindeldrehmoments in Abhängigkeit des Arbeitsraums erforderlich.

2.10 Auslegung von Vorschubantrieben spanender Werkzeugmaschinen aus Prozessparametern

Die **Auslegung der Vorschubantriebe** werden durch folgende Größen beeinflusst:

- maximale Vorschubgeschwindigkeit während der Bearbeitung
- maximale Beschleunigung
- maximale Vorschubkraft während der Bearbeitung
- Bahngenauigkeit der Maschine
- Steifigkeit der Achse

Die **maximale Vorschubgeschwindigkeit** während der Bearbeitung ergibt sich in Abhängigkeit des Bearbeitungsverfahrens bei geometrisch definierter Schneide durch den Vorschub pro Schneide, die Anzahl der Schneiden und die Drehzahl von Werkzeug bzw. Werkstück. Der Vorschub pro Schneide ist vom Werkstückwerkstoff, Schneidstoff und der Schneidengeometrie abhängig. Die Drehzahl wird je nach zu bearbeitendem Werkstückwerkstoff von der Schnittgeschwindigkeit und dem Dreh- bzw. Fräserdurchmesser bestimmt. Die Anzahl der Schneiden bei Fräswerkzeugen steht in Abhängigkeit der Durchmesser. Die Zusam-

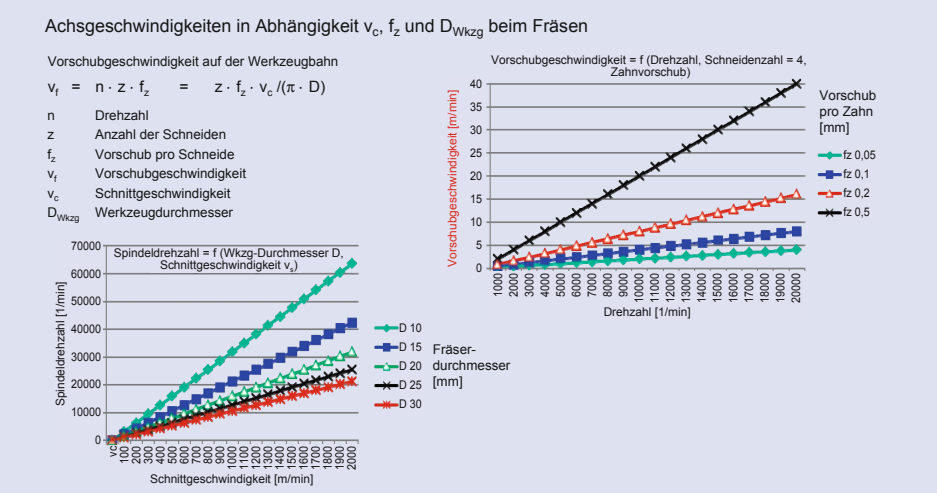


Bild 2.14: Achsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von Schnittgeschwindigkeit, Vorschub pro Schneide und Werkzeugdurchmesser beim Fräsen

menhänge zwischen Schnittgeschwindigkeit, Werkzeugdurchmesser, Zahnvorschub und Bahngeschwindigkeit ist in *Bild 2.14* dargestellt. Bei kleinen Werkzeugdurchmessern stellt die maximale Spindeldrehzahl häufig eine Begrenzung dar. Bei hoher Bahngeschwindigkeit sind die Verarbeitungsgeschwindigkeit der Steuerung, die regelungstechnisch erzielbare Genauigkeit und die zu bearbeitende Bahnkontur relevante Kenngrößen.

Die **Auslegung der Antriebe** geschieht in einem iterativen Prozess *(Bild 2.15)*. Iterationen können aufgrund von Annahmen zu geringer oder zu hoher Belastungen während der Bearbeitung bzw. beim Bewegen der Maschinenkomponenten erforderlich werden. Am Anfang wird das Grundprinzip eines Antriebs festgelegt: **mit oder ohne Getriebe, Kräfte, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Antriebsart**. Zusammen mit den Anforderungen nach mechanischen und elektrischen Kenngrößen (z. B. Steifigkeit, Hochlaufzeit) ergeben sich die Daten der Komponenten (z. B. Durchmesser, Drehzahlen, Reibung).

2.11 Messsysteme für Werkzeugmaschinenantriebe

Für die Erzeugung hochpräziser Achsbewegungen in CNC-Werkzeugmaschinen sind neben den Motoren zur Erzeugung der Bewegung **elektronisch auswertbare Messsysteme** erforderlich. Es kommen sowohl **optische** als auch **magnetoresistive** und **magnetische** Messsysteme zum Einsatz. Bei rotativen Antrieben kann das Messsystem auf der Motorwelle oder als externes direktes lineares Messsystem parallel zur Vorschubbewegung angeordnet sein. Bei linearen Direktantrieben muss das Messsystem parallel zur Vorschubbewegung angeordnet sein. Die Genauigkeit der Positionierung wird durch die Auflösung und Interpolation der Messsysteme beeinflusst. Eine hohe Auflösung mit geringen Teilungsabständen führt zu guten Genauigkei-

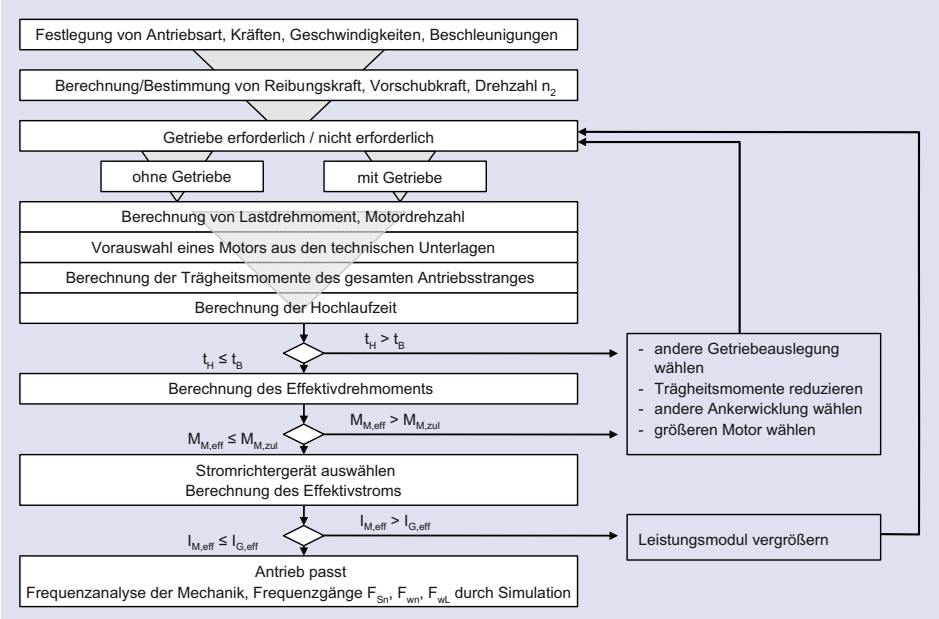


Bild 2.15: Iterative Auswahl geeigneter Antriebskomponenten

ten. Dabei ist die Geschwindigkeit durch die Einlesefrequenz der Steuerungsmodule begrenzt.

2.12 Systembetrachtung einer Werkzeugmaschine

Die Antriebe einer Werkzeugmaschine führen zusammen zu einem Gesamtsystem zur Erzielung von spanend hergestellten Produkten. Die Auslegung beeinflusst die Produktivität eines Systems. Die Häufigkeit der Verfahrbewegungen im Arbeitsraum, die Verfahrwege bei den einzelnen Bewegungen, die Dauer der unterschiedlichen Zyklen während der Bearbeitung und die erforderlichen Genauigkeiten beeinflussen die Anforderungen. Die Erfüllung der unterschiedlichen Kriterien führt teilweise zu gegenläufigen Anforderungen. Eine hohe Steifigkeit steht z. B. einem geringen Trägheitsmoment entgegen. Ebenso ist der Zusammenhang zwischen hoher Verfahrgeschwindigkeit und hoher Vorschubkraft sowie zwischen maximalem Drehmoment und maximaler Drehzahl bei einer Hauptspindel.

Die **Beschleunigung und die maximale Geschwindigkeit** sind die beiden Größen, die die Taktzeit bei Linearachsen beeinflussen. Während sich die Beschleunigung bei kürzeren Verfahrwegen bis zum Erreichen der maximalen Geschwindigkeit bemerkbar macht, ist die Erhöhung der maximalen Geschwindigkeit bei längeren Verfahrwegen vorteilhaft. Die Verfahrzeiten zwischen einzelnen Operationen wirken direkt positiv zur Verkürzung der Taktzeit. Beim Werkzeugwechsel ist die Verfahrzeit der Linearachsen mit der Spindel abzustimmen *(Bild 2.16)*.

Parameter	Haupteinflussgröße	Beeinflussung durch
Achsgeschwindigkeit	■ Verfahrweglänge	■ Kugelgewindetriebsteigerung ■ Motordrehmoment ■ Motordrehzahl ■ Motorstrom
Achsbeschleunigung	■ Häufigkeit der Verfahrenszyklen ■ Häufigkeit der Werkzeugwechsel	■ Trägheitsmoment
Vorschubkraft	■ Bearbeitungsstrategie ■ Schnittaufteilung	■ Motordrehmoment ■ Kugelgewindetriebsteigerung ■ Getriebeübersetzung
Steifigkeit	■ Werkstücktoleranzen	■ Dimensionen der mechanischen Komponenten (z. B. Kugelgewindetrieb-durchmesser und -länge, Lagersteifigkeit)

Bild 2.16: Dimensionierungsbestimmende Antriebsparameter

Für eine definierteWerkzeugmaschine ist eine an den Hauptkriterien orientierte Abstimmung der verschiedenen Parameter festzulegen. Da die **Bewertung einer Werkzeugmaschine anhand der Produktivität** geschieht, ist jeweils eine auf die produzierten, guten Werkstücke bezogene Kenngröße zu verwenden:

- Kosten pro Werkstück
- Energieverbrauch pro Werkstück
- Medieneinsatz pro Werkstück

Unter Berücksichtigung dieser Kriterien kann teilweise ein leistungsstärkerer Antrieb mit entsprechend höherer Anschlussleistung zu geringeren Produktionskosten und geringerem Energieverbrauch pro Werkstück führen (siehe hierzu auch Kap. Energieeffizienz).

Beispiel: Spindelbeschleunigungszeit
Die Spindelbeschleunigungszeit einer Maschine ist abhängig von der Spindelkennlinie (Drehzahl-Drehmoment-Charakteristik) und dem bewegten Trägheitsmoment *(Bild 2.17)*. Für eine Motorspindel ist die Hochlaufzeit zu unterschiedlichen Drehzahlen in folgendem Bild dargestellt. Eine derartige Motorspindel beschleunigt und bremst bei jedem Werkzeugwechsel auf und von Drehzahl 0 1/min von der jeweiligen Bearbeitungsdrehzahl. Die Bearbeitungsdrehzahl ist von der jeweiligen Operation (Werkzeugdurchmesser, Schnittgeschwindigkeit) abhängig. Die Spindelauslegung beinhaltet zwei unterschiedliche Kennlinien.

- mit Dynamikpaket
- ohne Dynamikpaket

Der Unterschied beider Spindeln besteht in einer verschiedenen Eck- und Maximaldrehzahl. Das Drehmoment beider Auslegungen ist identisch. Die Leistung steigt proportional zu der Eckdrehzahl.

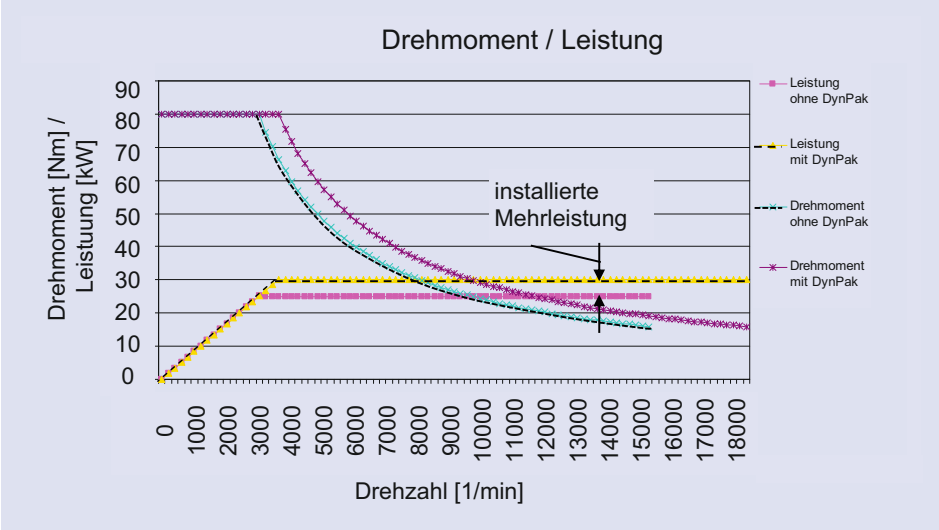


Bild 2.17: Spindelkennlinie einer Motorspindel

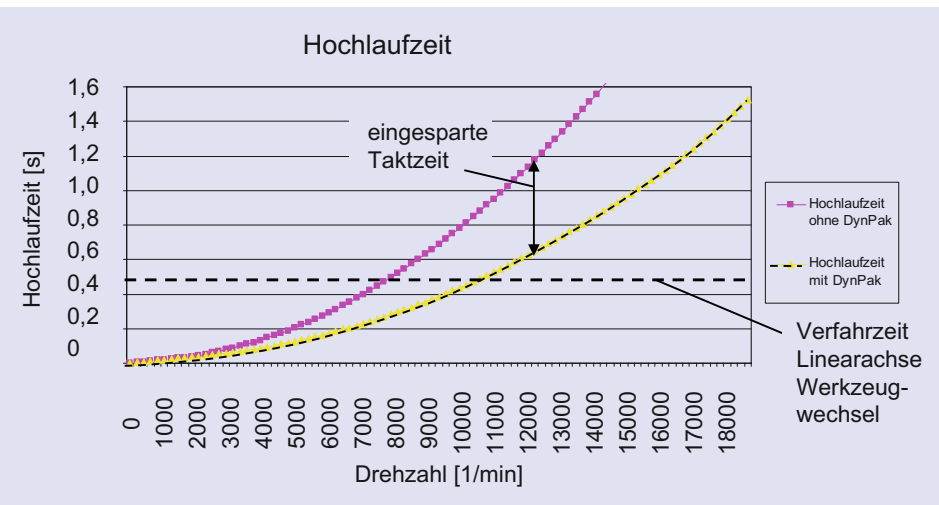


Bild 2.18: Hochlaufzeiten unterschiedlicher Motorspindeln

Diese Auslegung führt dazu, dass bis zu der unteren Eckdrehzahl die gleiche Hochlaufzeit vorhanden ist. Aufgrund des höheren Drehmoments oberhalb dieser Drehzahl reduziert sich die Hochlaufzeit bei höheren Drehzahlen und beträgt z. B. bei 12.000 1/min 0,7 s mit und 1,2 s ohne Dynamikpaket. Wird von einer durchschnitt-

lichen Operationszeit von 3 Sekunden und einer Werkzeugwechselzeit von 2 Sekunden ausgegangen reduziert sich die durchschnittliche Operationszykluszeit von 6,2 s auf 5,7 s. Dies entspricht einer Zeiteinsparung von ca. 9 %. Wird davon ausgegangen, dass die Achse von der Werkzeugwechselposition in 0,5 Sekunden zur Bearbeitungsposition fährt, macht sich die schnellere Hochlaufzeit nur bei Drehzahlen bemerkbar, die höhere Hochlaufzeiten erfordern (ca. oberhalb von 8000 1/min, *Bild 2.18*).

Für den Einsatz der stärkeren Spindel ist ein größeres Verstärkermodul erforderlich (85 A statt 60 A). Die **Verlustleistung der Spindel,** die gekühlt werden muss, ist proportional zur Spindelleistung größer. Dieser Mehraufwand steht der höheren Produktivität gegenüber. Für die Wertung ist das Verhältnis nach Kosten, Energie und/oder Medien zu Produktivität erforderlich.

2.13 Zusammenfassung Antriebsdimensionierung

Bei der näheren Betrachtung der Auslegung der Antriebe einer Werkzeugmaschine wird ersichtlich, dass Größe, Werkstoff und Technologie der zu bearbeitenden Werkstücke Auswirkungen auf die Dimensionierung der Größe der Maschine und die Gestaltung der technologischen Abläufe haben. Daraus kann dann die Dimensionierung von Haupt- und Nebenantrieben der Maschine sowie die Gestaltung der einzelnen Module abgeleitet werden. Bei der prozessspezifischen Auslegung der Maschinen und Antriebe kann die Auslegung so erfolgen, dass kosten- und energieoptimale Bedingungen gefunden werden. **Dazu müssen die mechanischen, elektrischen und steuerungstechnischen Aspekte gut aufeinander und auf die Anforderungen abgestimmt werden.**

3 Energieeffizienz von CNC-Maschinen

Prof. Dr.-Ing. Michael Kaufeld, Hochschule Ulm

Neben den technischen Funktionen wird zunehmend auch bei CNC-Maschinen die Energieeffizienz zum wichtigen Kriterium sowohl bei der Kaufentscheidung als auch beim täglichen Einsatz. Schnelligkeit und Leistungsfähigkeit in der Fertigung konkurrieren dabei mit dem Energieverbrauch. Um die Energieeffizienz der Maschinen besser vergleichen zu können, wird nach dem Vorbild der VDI/NCG-Richtlinien ein standardisierter Prüfzyklus vorgestellt. Der Anwender hat damit die Möglichkeit, Maschinen unabhängig vom jeweiligen werkstückbezogenen Bearbeitungszyklus bei definierten Bewegungen unter Nutzungen aller Aggregate zu vergleichen

3.1 Einführung

Steigende Energiepreise, der Klimawandel und das wachsende Umweltbewusstsein haben das Energie- bzw. Stromsparen zum allgemeinen Thema gemacht. Die Bewertung von Haushaltsgeräten nach ihrer Energieeffizienz ist inzwischen vollkommen selbstverständlich. Beim Autokauf wird auf den Treibstoffverbrauch geachtet und dieser nach den bestehenden Prüfungsnormen verglichen und mit den sonstigen Fahrzeugeigenschaften bei der Entscheidung berücksichtigt.

Auch in der Industrie ist das Thema Strom- und Kostensparen relevant. Immerhin sind 25 % des deutschen Energieverbrauchs dem produzierenden Gewerbe zuzuordnen.

Immer mehr Unternehmen achten beim Kauf von Werkzeugmaschinen zunehmend auf die „Total Costs of Ownership“, die Gesamtkosten der Maschine. Aktuell machen die Anschaffungskosten nur etwa 20 bis 30 Prozent der Gesamtkosten einer Maschine aus. Laut dem PTW der TU Darmstadt bestehen für spanende Werkzeugmaschinen die Kosten über 10 Jahre hinweg gesehen zu 80 % aus den laufenden Kosten. Dabei macht der Energieverbrauch einen Anteil von 20 % aus [2]. *) siehe Seite 290

Durchschnittlich werden dabei etwa 20 % der Energie für den Bearbeitungsprozess und die restlichen 80 % für den Betrieb der Nebenaggregate verbraucht. Größten Anteil mit etwa 30 % haben dabei die Pumpen für den Kühlschmierstoff. Die nächsten großen Verbraucher sind die Kühlung mit ca. 22 % und die Achsantriebe mit ca. 13 %. Das restliche knappe Viertel der Energie geht an das Netzgerät, die Steuerung, die Absaugung, die Transformatoren und an den Späneförderer *(Bild 3.1).*

Es ist verständlich, dass eine eingeschaltete Werkzeugmaschine Energie verbraucht, auch wenn keine Teile bearbeitet werden. Dies kann über 50 % der gesamten Arbeitsenergie sein. Werden Nebenaggregate wie Kühlschmierstoff-Versorgung, Bettspülung und Absaugung abgeschaltet, reduziert sich der Energiebedarf auf ca. 20 %. Bei zu-

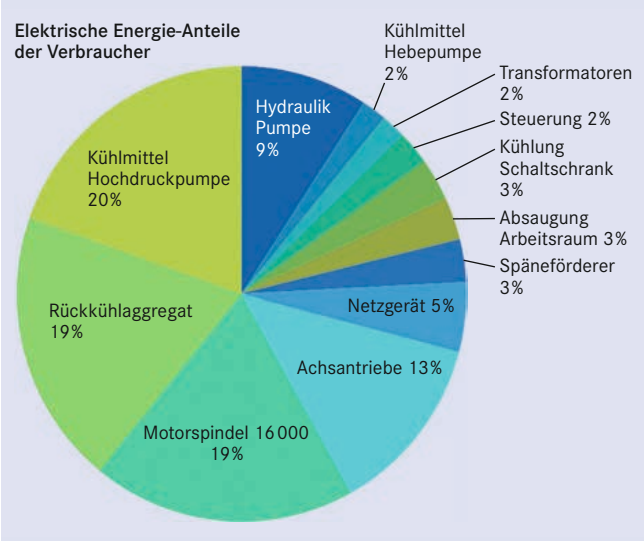


Bild 3.1: Energieverbrauch in einem spanenden Bearbeitungszentrum mit Nassbearbeitung

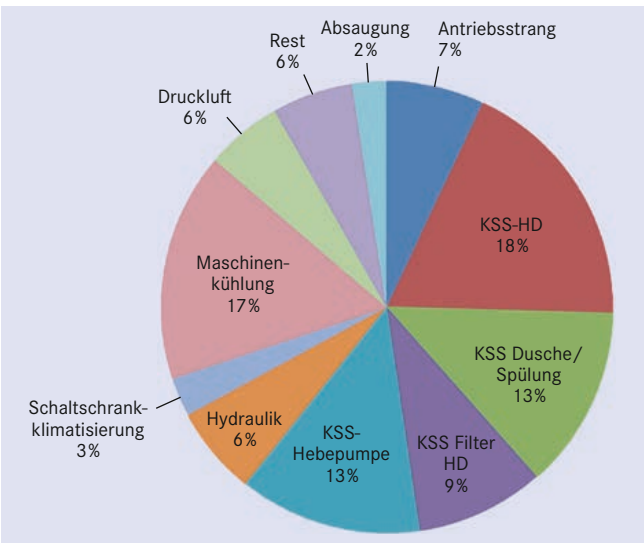


Bild 3.2: Prozentualer Jahresenergieverbrauch der Einzelkomponenten

sätzlicher Abschaltung von Hydraulikaggregaten, Schmiersystem, Achsantrieben und Kühlaggregaten verbleibt ein Restenergiebedarf von etwa 5 %.

Bild 3.2 zeigt gemäß einer Studie des PTW den prozentualen jährlichen Energieverbrauch der einzelnen Komponenten eines Bearbeitungszentrums bei einer repräsentativen 3-Schicht-Serienfertigung. Ersichtlich ist dabei, dass der Energieverbrauch rund um den Kühlschmierstoff mit über 50 % den weitaus größten Anteil aus-

macht. Dabei ist die Hochdruckpumpe mit 18 % der größte Energieverbraucher. Die drei Niederdruckpumpen für die Dusche/Spülung (13 %), den Vorlauf zum Filter für die Hochdruckpumpe (9 %) und die Hebepumpe (13 %) verbrauchen zusammen etwa ein Drittel der Gesamtenergie. Der nächste großer Verbraucher ist die Kühlung, wobei die Maschinenkühlung mit 17 % dabei weitaus mehr zu Buche schlägt als die Schaltschrankklimatisierung mit 3 %. Das restliche Drittel am Gesamtverbrauch besteht aus den Antrieben für Hydraulik (6 %), Druckluft (6 %), Absaugung (2 %), Antriebsstrang (7 %) und verschiedenen kleineren Verbrauchern (Rest 6 %).

3.2 Effizienzsteigerung

Es gibt mehrere Ansatzmöglichkeiten zum Energiesparen bei Werkzeugmaschinen. Die Stellhebel zur Verbesserung der Energieeffizienz von beliebigen Maschinen können zu verschiedenen Zeitpunkten des Lebenszyklus einer Maschine unterschiedlich benutzt werden *(Bild 3.3).*

Die Möglichkeiten des Maschinenherstellers sind:

- Einsatz von energieeffizienten Komponenten (Efficient Components – Produkte und Systeme mit optimiertem Wirkungsgrad),
- Rückspeisung und Zwischenspeicherung von Bremsenergie (Energy Recovery),
- Bedarfsgesteuerter Energieeinsatz (Energy on Demand – z. B. Stand-by-Modus), sowie dem
- Energiesystemdesign (Energy System Design – d. h. systematische Gesamtbetrachtung, Projektierung, Simulation). Dazu zählt z. B. die nutzungsoptimierte Zu- und Abschaltung von Nebenaggregaten.

Eine häufige Ursache für den hohen Energieverbrauch ist, dass die Maschinen vom Hersteller als **Universalmaschinen** konzipiert werden und deshalb viele Komponenten überdimensioniert sind. Der Grund dafür ist, dass bei der Planung und Auslegung der Maschine kein konkretes Anwender-Nutzungsprofil vorausgesetzt werden konnte. Deshalb werden bei der Entwicklung neuer Maschinenkonzepte viele Komponenten nach häufig verlangten und profitabel verkaufbaren Kenngrößen ausgelegt. Dies sind z. B.

- eine hohe Eilganggeschwindigkeit,
- eine hohe Beschleunigung,
- eine hohe Spindeldrehzahl,

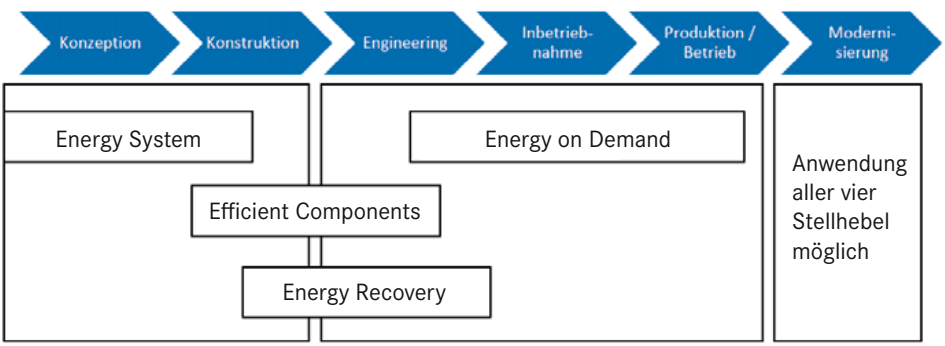


Bild 3.3: Anwendung von vier Stellhebeln in den Phasen des Maschinenlebenszyklus (Erklärungen siehe 3.2 Effizienzsteigerung)

- ein hohes Spindelmoment und
- eine kurze Span-zu-Span-Zeit beim automatischen Werkzeugwechsel.

Deshalb ist für den Käufer einer Maschine **die Möglichkeit des einfachen, systematischen Vergleichs der Energieeffizienz von Maschinen** sehr wichtig. Für den wesentlichen Lebensabschnitt einer Maschine – der Operation Phase *(Bild 3.4)* – d. h. für den Betrieb beim Käufer, steht an erster Stelle der Energieeffizienz **das Verhältnis zwischen der erzielten Leistung, d. h. den produzierten Teilen, und der dafür eingesetzten Energie.**

Die Möglichkeiten des Käufers einer CNC-Maschine für deren energieeffizienten Einsatz sind:

- Falls nicht ausdrücklich gefordert, die Maschinen nicht größer zu kaufen als für den vorgesehenen, aktuellen Bedarf,
- die Automatisierung entsprechend dem tatsächlichen Einsatz und Nutzen zu wählen,
- die Zeit für das morgendliche „Warmlaufen" der Maschinen zu minimieren,
- ein gelegentliches Benchmarking anhand repräsentativer Teile bzw. Zyklen hinsichtlich des tatsächlichen Energieverbrauchs auf unterschiedlichen Maschinen,
- die NC-Programme auf einen effizienten Bearbeitungsablauf hin auszulegen.

Wird diese Betrachtung allerdings konsequent umgesetzt, so findet immer wieder die Diskussion im Spannungsfeld zwischen Produktivität und Energieverbrauch einer Maschine statt. Hierbei stellt sich die Frage, was effizienter ist, eine möglichst kurze Bearbeitungszeit mit hohen Leistungsspitzen oder eine etwas längere Bearbeitungszeit aufgrund reduzierter Eilgänge, Beschleunigungen usw.

Deshalb erscheint es aus der Sicht des Autors wesentlich zielführender zu sein, zum Vergleich der Energieeffizienz von Maschinen **nicht** den Energieverbrauch bei der Fertigung eines konkreten Werk-

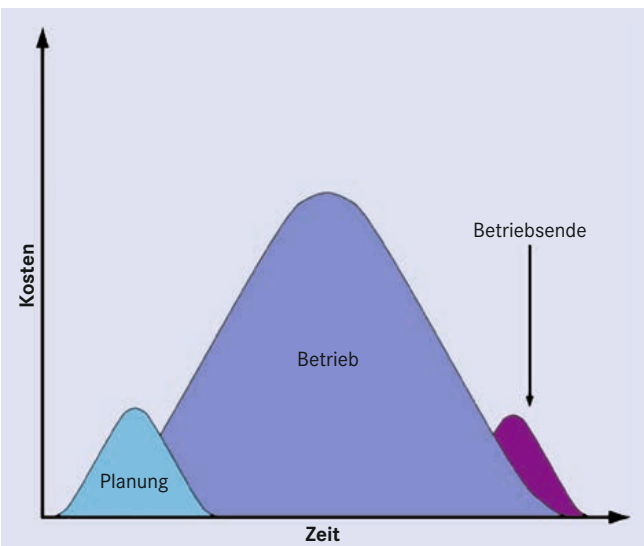


Bild 3.4: Life Cycle Costing Graph – Kosten während der Lebensphasen einer Werkzeugmaschine

stücks zu bestimmen, sondern einen **einfach durchzuführenden, technologieunabhängigen** Prüfzyklus zu definieren. Mit diesem zyklusabhängigen Energieverbrauch kommt man bei der Beschaffung einer Werkzeugmaschine schon ganz in die Nähe des Vergleichs des Kraftstoffverbrauchs pro 100 km beim Autokauf. **Technologieabhängig** und deshalb nicht so einfach änderbar sind dabei solche werkstück- bzw. werkzeugbezogenen Parameter wie Vorschubgeschwindigkeit, Drehzahl, innere oder äußere Kühlmittelzufuhr, Spannvorrichtung bzw. Spannhydraulik, Werkstück- und Vorrichtungsgewicht sowie Bearbeitungswege.

3.3 Definition des Prüfzyklus

Der vorgeschlagene Test-Zyklus, der in einem NC-Programm hinterlegt sein kann, hat eine Dauer von 15 Minuten. Er besteht zu 50 % aus einem Werkzeugwechselzyklus (7,5 min), zu 25 % aus einem Arbeitszyklus (3,75 min) und zu 25 % aus einem Ruhezyklus (3,75 min).

Die einzelnen Zyklen, die hintereinander abgearbeitet werden, sind folgend beschrieben.

A. Werkzeugwechselzyklus

- Die Linearachsen X, Y und Z werden alle auf *gleichen* Abstand vom Werkzeugwechselpunkt (z. B. – 500 mm) im Arbeitsraum positioniert. Sollte der Verfahrweg von 500 mm nicht vorhanden sein, so sind geringere, aber gleiche Werte zu definieren.
- Sind Rundachsen A, B oder C vorhanden, so werden alle auf gleichen Abstand von der Referenzposition (z. B. – 360°) positioniert. Sollte der Drehbereich 360° nicht vorhanden sein, so sind geringere, aber immer gleiche Werte zu definieren.
- **Ablauf:**
  - Maschine einschalten
  - Hauptspindel(n) aus, Pumpen aus, Späneförderer aus
  - Fahrt zum Werkzeugwechselpunkt und gleichzeitig 1 × Durchdrehen der Rundachsen um max. möglichen Drehwinkel (d. h. um 360°) – alle Bewegungen im Eilgang
  - Werkzeugwechsel eines Werkzeugs
    - Entnahme und Ablage des gespannten Werkzeugs in Pos. 1 des Magazins
    - Bei Kettenmagazin: Durchdrehen des Magazins auf gegenüberliegende Position
    - Dort Aufnahme des neuen Werkzeugs
  - Rückfahrt aller Achsen in den Arbeitsraum (X, Y und Z auf – 500 mm; A, B und C auf – 360°) mit gleichzeitiger Beschleunigung der Spindel auf maximale Drehzahl
  - Nach erfolgtem Hochlauf alle Kühlschmiermittelpumpen EIN (äußere und innere Kühlmittelzufuhr, Maschinenbett- und Arbeitsraumspülung) und Späneförderer EIN
  - Nach 1 sec Verweilzeit in dieser Position und den Einschaltzuständen weiter mit Schritt 1 (Wiederholschleife für eine Dauer von 7,5 min)
  - Die Anzahl der Werkzeugwechsel wird über einen internen Zähler in der Steuerung erfasst
  - Nach 7,5 min weiter mit dem Arbeitszyklus

B. Arbeitszyklus

- Gleichzeitige Oszillation und Rotation aller Achsen im Arbeitsraum im definierten Arbeitsvorschub v_f und v_{rot} bei definierter konstanter Spindeldrehzahl für eine Dauer von 3,75 min
- X-, Y- und Z-Achse → + – 500 mm (soll-

ten nur kürzere Strecken realisierbar sein, so sind diese einheitlich festzulegen)
- A-, B- und C-Achse → +–180° (sollten nur kleinere Drehwinkel realisierbar sein, so sind diese festzulegen; fehlen Rundachsen, so sind die Drehachsen entsprechend zu reduzieren)
- Nach 3,75 min weiter mit den Ruhezyklus

C. Ruhezyklus
- Antriebe ausschalten bzw. Stand-by-Modus für 3,75 min aktivieren (Abschaltung aller Nebenaggregate und Hilfsantriebe)
- nach 3,75 min ist der Prüfzyklus abgeschlossen und die verbrauchte Energiemenge ist abzulesen

Gemessen wird die verbrauchte Energie direkt am Netzanschluss entweder über eine Stromzange und anschließende Berechnung der verbrauchten Leistung in kWh, oder einen Stromzähler mit direkter Anzeige der verbrauchten kWh.

Zusätzlich kann noch optional die verbrauchte Druckluftmenge über einen entsprechenden Sensor am Drucklufthauptanschluss gemessen werden. Haben die Messgeräte ein digitales Interface, so können die Messgrößen zeitabhängig erfasst werden und der Energieverbrauch kann den jeweiligen Zyklen zugeordnet werden.

3.4 Ergebnis

Liegen die so ermittelten Kennziffern für Maschinen in ausreichender Menge vor, so kann im Ausblick letztendlich an einem „Energielabel“, wie es zum Beispiel für die Energieeffizienzklassifizierung von Haushaltgeräten bekannt ist, gearbeitet werden.

Der hier vorgestellte Ansatz soll letztendlich dem Anwender ein zusätzliches Kriterium für den Vergleich von Maschinensystemen an die Hand geben. Gleichzeitig bietet er die Grundlage für die Diskussion um einen einfachen und brauchbaren Test bzw. einer einfachen Kennziffer, die ähnlich dem Kraftstoffverbrauch im „Stadt- oder Autobahn-Zyklus“ nutzbar ist. Weiterhin soll er auch Ansporn für alle Hersteller und Nutzer von Maschinen sein, sich dem Thema „Energieverbrauch während der Produktion“ zu stellen. An vielen Stellen wurden schon Rationalisierungsbemühungen mit nicht geahnten Potenzialen erfolgreich umgesetzt, warum sollte dies nicht auch auf dem kostenrelevanten Sektor des Energieverbrauchs bei CNC-Maschinen gelingen!

3.5 Alternativen

Es ist durchaus denkbar, dass außer oder anstatt der oben vorgeschlagenen Test-Prozedur auch davon abweichende Testmethoden vorgeschlagen werden können. So bietet sich beispielsweise an, neben der Energieeffizienz auch die für manche Betriebe interessante **Produktions-Effizienz** festzustellen und zu vergleichen. Dazu könnte in Anlehnung an den vorgeschlagenen Ablauf ein fest programmierter Ablauf mit allen Bewegungen treten, der programmgesteuert z. B. 10-mal wiederholt wird. Danach erfolgen die Messung der verbrauchten Energie und die benötigte Gesamtzeit.

Damit lässt sich klären, welche der getesteten Maschinen

a) die Testprozedur am schnellsten abgearbeitet hat, und
b) den geringsten Energieverbrauch hatte.

Steht zur Beschaffung die Alternative einer zwei- oder mehrspindligen Maschine zur Debatte, so lassen sich nach dem gleichen Test durch Vergleich der Messwerte auch

Rückschlüsse ziehen, welche der beiden Möglichkeiten im Endeffekt die bessere oder **produktionseffizientere** Maschine wäre.

Ein weiterer Testablauf mit reduzierten Eilgängen, Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Abläufen bringt schließlich auch Gewissheit, welche Methode z.B. im auslaufenden Schichtbetrieb die effizientere wäre: Langsamer bewegen, die Maschine schonen und dafür mehr Zeit benötigen, oder mit voller Geschwindigkeit arbeiten und nach kürzerer Zeit die Maschinen ausschalten.

* siehe auch: **Energieeffizienz-Kennziffer für Maschinensysteme – Eine Möglichkeit des Maschinenvergleichs.** Werkstatt und Betrieb 144 (2011) 12, Seiten 60 bis 64

Energieeffizienz von CNC-Maschinen



Das sollte man sich merken:

1. **Definition:** Unter Energieeffizienz versteht man den Energieverbrauch
   - pro Anzahl der produzierten Werkstücke
   - während der Betriebszeit der Maschine
   - während der Leerlaufzeit (Stand-by) der Maschine
   - während der Zeiten/Bewegungen, in denen keine Späne gemacht werden, sondern in einem standardisierten Prüfzyklus die Energieverbräuche aller Aggregate bzw. Achsen bewertet werden.
2. **Art der Betriebsenergien:**
   Elektrische Leistungsaufnahme zur Erzeugung von Achsbewegungen, Drehzahlen, Werkzeugwechsel, Druckluft, Hydraulik, Kühlung, Schmierung und zur Späne-Entsorgung
3. Mögliche **„Stellhebel“** zur Reduzierung der Betriebsenergie sind
   - Richtige Maschinenauswahl: Größe, Leistung, Automatisierungsgrad,
   - Bedarfsgerechte, automatische Zu- und Abschaltung der Hilfsantriebe
   - Reduzierung oder Vermeidung von Energiespitzen
   - Verbrauchsoptimierte Parametrierung aller Antriebe (z. B. Beschleunigungen)
   - Verbrauchsoptimierte Programmierung der NC-Programme im Hinblick auf alle nicht den Span beeinflussende Bewegungen und zugeschalteten Aggregate
   - Einsatz energieoptimierter Komponenten mit Rückspeiseeffekten (z. B. elektrische Antriebe, Pneumatikaggregate),
   - Verzicht auf unnötige Anzeigelampen die dauernd leuchten,
   - Möglichst komplette Abschaltung der Maschine in produktionsfreien Zeiten
4. **Schalt- bzw. Maschinenzustände dem momentanen Bedarf anpassen,** z. B. Zustellachsen nach dem Erreichen der Position klemmen und abschalten, anstatt das Haltemoment durch die Motoren zu regeln.
5. **Hydraulikaggregate** verwenden, welche die Förderleistung der Pumpe bedarfsspezifisch regeln.
6. **Maschinenumgebung mit einbeziehen:** Jede Maschine erzeugt Abwärme, die das Raumklima und die Umgebungstemperatur beeinflusst. Um diese zu stabilisieren wird wiederum zusätzliche Energie benötigt.
7. **Leistungskoordination:** Zeitlich gestaffeltes Einschalten und gegenseitige Überlast-Verriegelung reduzieren die Leistungsspitzen. Bei größeren Betrieben kann beispielsweise ein Art „Energie-Leitrechner“ sinnvoll einsetzbar sein.

4 Generative Fertigungsverfahren

Hans B. Kief, Michael Ott, Johannes Schilp, Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh

Generative Fertigungsverfahren beruhen auf dem Grundgedanken des schichtweisen Aufbaus von Bauteilen, d. h. das Bauteil wird durch die Erzeugung einzelner Schichten additiv aufgebaut. Die Fertigung der Geometrien erfolgt aus formlosen (Flüssigkeiten, Pulver) oder formneutralen Materialien (Band, Draht, Papier, Folie) mittels chemischer und/oder physikalischer Prozesse über eine CAD-CAM Kopplung direkt aus den digital erzeugten CAD-Datenmodellen.

4.1 Einführung

Nachdem die generativen Fertigungsverfahren erstmalig 1987 in den USA der Öffentlichkeit vorgestellt wurden, konnten die ersten Maschinen in den Jahren 1989 – 1990 nach Europa und Deutschland ausgeliefert werden. Damals handelte es sich vor allem um Stereolithographie (SLA) Maschinen. Im Laufe der folgenden Jahre entstanden weitere Prozessvarianten u. a. das Selektive Laser-Sintern (SLS), das Strahlschmelzen und das Laminated Object Manufacturing (LOM). Auf Basis der bekannten Prozesse *(vgl. auch Abschnitt 4.4)* werden in den nächsten Jahren noch neue bzw. modifizierte Verfahren (weiter) entwickelt, da das Potential der generativen Fertigung z. B. in der Multimaterialverarbeitung noch nicht ausgeschöpft ist.

Der Prozessablauf lässt sich wie folgt zusammenfassen *(vgl. auch Abschnitt 4.3):* Während des schichtweisen Aufbaus von Bauteilen wird ein formloses bzw. -neutrales Ausgangsmaterial durch Einbringen von Energie zyklisch Schicht für Schicht verfestigt. Alle Schichtbauverfahren müssen bzgl. der Datenverarbeitung (CAD-CAM Kopplung) drei Voraussetzungen erfüllen:

- Ausgangspunkt für die generative Fertigung eines Bauteils ist ein **3D-CAD-Modell**, in dem die kompletten Werkstückdaten digital abgebildet sind.
- Für den Bauprozess müssen die 3D-Volumenköper mittels des sog. Slice-Prozesses digital in die **einzelnen Schichten zerlegt** und damit **auf zwei Dimensionen reduziert** werden. Diese Schichtdaten geben ein **verfahrensspezifisches CNC-Programm** vor.
- Der anschließende Fertigungsprozess erfolgt auf einer **numerisch gesteuerten Maschine,** die die erstellten Informationen schichtweise abarbeitet und so ein Bauteil generiert.

Ein Vergleich mit konventionellen Fertigungsverfahren zeigt das wirtschaftliche und technische Potential der generativen Fertigung: Während einfache Volumenkörper in großen Stückzahlen mittels bekannter Verfahren wie Drehen, Fräsen oder Gießen wirtschaftlich produziert werden können, steigt mit sinkender Stückzahl und mit zunehmender Bauteilkomplexität

die wirtschaftliche Anwendbarkeit von Schichtbauverfahren. Zudem können einzelne hochkomplexe Bauteile z. B. mit innenliegenden Geometriefeatures ausschließlich mit generativen Fertigungsverfahren hergestellt werden.

Die schichtweise erzeugten Werkstücke können dabei sehr unterschiedliche Aufgaben in verschiedenen Einsatzgebieten erfüllen:

- Modelle:
  - **Konzeptmodelle** dienen zur frühestmöglichen Visualisierung der Abmessungen und des allgemeinen Erscheinungsbildes einer Produktentwicklung.
  - **Designmodelle** dienen zur form- und maßgenauen Darstellung des CAD-Modells. Es ist die Oberflächenqualität und Lage einzelner Elemente von Bedeutung.
- Prototypen:
  - **Funktionsprototypen**, welche dem Serienmuster weitgehend entsprechen, dienen zur Überprüfung einer oder mehrerer vorgesehener Funktionen des späteren Serienteils.
  - **Technische Muster**, welche sich vom späteren Serienbauteil nur durch das Fertigungsverfahren unterscheiden, dienen zur Überprüfung der gestellten Anforderungen.
- Bauteile:
  - Mittels **(Form-)Werkzeugen** können Endprodukte in einem nachfolgenden Fertigungsprozess (z. B. Spritzgießen) hergestellt werden.
  - Kundenindividuelle, endkonturnahe **Einzel- und Serienbauteile** können vollständig funktional eingesetzt werden.

Generative Fertigungsverfahren können demnach in allen Phasen der Produktentwicklung eingesetzt werden.

4.2 Definition

Alle Verfahren, mit deren Hilfe dreidimensionale Modelle, Prototypen und Bauteile additiv, also durch Aneinander- oder Aufeinanderfügen von mehreren Volumenelementen hergestellt werden, bezeichnet man als generative Fertigungsverfahren. In der Literatur und in der Praxis trifft man auf viele weitere Bezeichnungen, welche durch die im Jahr 2010 eingeführte VDI Richtlinie 3404 zusammengefasst und standardisiert werden.

Generative Fertigungsverfahren werden aus historischen Gründen gerne mit dem Namenszusatz „rapid“ versehen, um auszudrücken, dass die generativen Verfahren (bei kleinen und mittleren Stückzahlen) schneller als ihre klassischen Alternativen sind. Durch die Vermeidung des i. d. R. bei klassischen Verfahren notwendigen Werkzeugbaus bieten generative Verfahren neben Geschwindigkeitsvorteilen in den meisten Fällen auch hohe wirtschaftliche Einsparpotentiale. Zusammengefasst werden die generativen Fertigungsverfahren daher auch als **Rapid-Technologien** bezeichnet.

Wie oben erwähnt können die generativen Verfahren über den gesamten Produktentstehungsprozesses wirtschaftlich zum Einsatz kommen *(siehe Bild 4.1)*. Rapid Technologien werden dabei in die Bereiche Rapid Prototyping, Rapid Tooling und Rapid Manufacturing eingeteilt.

Mit **Rapid Prototyping** wird ein Anwendungsbereich der Rapid-Technologien bezeichnet, in dem kostengünstig und schnell Versuchsteile und Prototypen hergestellt werden. Diese Bauteile weisen meist eingeschränkte oder spezielle Funktionalitäten auf. Die Konstruktion kann, muss aber nicht fertigungsgerecht im Hinblick auf die Serienfertigung sein. Ebenso kann im Rapid-Prototyping-Bereich auf den Einsatz

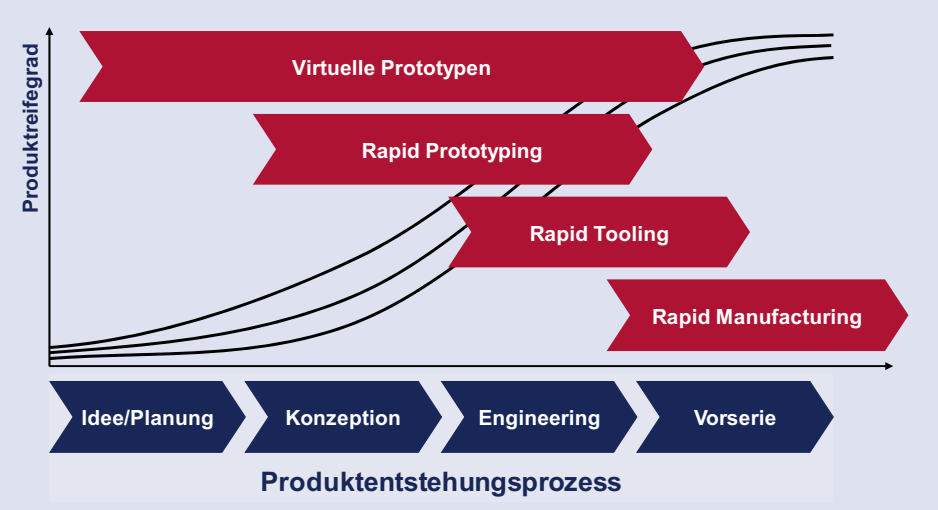


Bild 4.1: Rapid-Technologien im Produktentstehungsprozess

des meist teuren Serienmaterials verzichtet werden. Der Begriff **Rapid Prototyping** deckt damit nur einen kleinen Teil der generativen Anwendungen ab und sollte daher nicht gleichbedeutend mit dem Begriff generative Verfahren verwendet werden.

Unter **Rapid Tooling** versteht man, wenn unter Einsatz von generativen Verfahren Werkzeuge und Formen zur Herstellung von Prototypen, Vorserien- und Serienbauteilen produziert werden (z. B. Gieß-, Spritz- und Ziehformen). Dabei wird größtenteils das selektives Laserstrahlschmelzen eingesetzt, durch welches neben der schnellen Herstellung auch die Formgebungsfreiheiten der Rapid-Technologien effektiv genutzt werden können. Um die nötige Präzision bzw. die geforderten Oberflächeneigenschaften zu erreichen, werden häufig noch klassische Verfahren wie das HSC-Fräsen herangezogen um die generativ hergestellten Werkzeuge und Formen nachzuarbeiten. Man spricht in diesem Fall von *direktem* Rapid Tooling. Als *indirektes* Rapid Tooling bezeichnet man die Herstellung von Werkzeugen durch Abformen von generativ hergestellten Urmodellen. Verfahren, bei denen die Werkzeuge z. B. durch CNC-Programmierung und anschließendem HSC-Fräsen aus dem vollen Rohmaterial innerhalb kurzer Zeit hergestellt werden können, werden neben den generativen Fertigungsverfahren mit zur Gruppe der Rapid-Technologien gerechnet. Auf Grund des Zerspanungscharakters dürfen diese jedoch nicht mit generativen Prozessen verwechselt werden.

Mit **Rapid Manufacturing** wird die generative Herstellung von Endprodukten für die Einzel- oder Serienfertigung bezeichnet. Die Bauteile werden aus den Konstruktionsdaten im Original-Werkstoff gefertigt und besitzen alle Merkmale des Endprodukts. Neben der Möglichkeit zur schnellen Bauteilherstellung werden durch den generativen Aufbau produktseitig konstruktive Gestaltungsmerkmale (z. B. oberflächennahe Kühlkanäle oder gekrümmte Bohrungen) ermöglicht, welche mit kon-

ventionellen Produktionsmethoden nur bedingt oder nicht herstellbar sind.

Mittels Rapid-Technologien gelingt es damit, die Möglichkeiten zur Fertigung von neuen Gestaltungselementen zu erweitern bzw. zu beherrschen und ohne Umwege in die Fertigung von Endprodukten für die Einzel- oder Serienfertigung einzusteigen. Neben der Verkürzung der Produktentwicklung und der Produktentstehung durch den Einsatz der Rapid-Technologien im Prototypen- und Werkzeugbau bzw. zur direkten Herstellung von Endbauteilen erleichtert der Einsatz der generativen Fertigungsverfahren auch die logische Verkettung der Auftragsdatenverarbeitung. Nicht nur die Herstellungszeit selbst kann im Vergleich zu konventionellen Verfahren als schnell bezeichnet werden, durch die direkte CAD-CAM Kopplung wurde auch die Arbeitsvorbereitung z. B. für die Erzeugung und Konvertierung von Fertigungsdaten vereinfacht und beschleunigt.

Zu den zukunftssicheren Rapid-Technologien zählen im Metallbereich v. a. das Strahlschmelzen, auch bekannt unter Laser Forming, Selective Laser Melting (SLM), LaserCusing, Electron Beam Melting (EBM) oder Direktes-Metall-Laser-Sintern (DMLS) *(Bild 4.2)* sowie das Auftragschweißen (Direct Metal Deposition (DMD)). Diese eignen sich sowohl zur Prototypen-Erstellung, als auch zum Reparieren oder Ändern von Werkzeugen und Gussformen. DMD ermöglicht die Bearbeitung von Freiform-Flächen durch schichtweises Aufschmelzen von Metallpulver im Laserstrahl. Dabei ist der Wärmeeintrag ins Werkstück minimal. Beide oben genannten Verfahrensvarianten sind gekennzeichnet durch:

- Das Metallpulver als Ausgangswerkstoff,
- vollständiges Schmelzen des Metallpulvers durch den Laser,
- Mischen und Auftragen von verschiedenen Metallpulvern auf andersartige Grundmaterialien,
- vollautomatische Fertigung, ohne Handarbeit,
- Teilegenerierung direkt aus den 3D-CAD-Daten und
- endkonturnahe Fertigung mit geringer Nacharbeit an den Funktionsflächen.

4.3 Verfahrenskette

Übergreifend über alle Verfahrensprinzipien in der generativen Fertigung gilt ein ähnliches Prinzip der Modellgenerierung und der Prozesskette, welches der unten dargestellte Verfahrensablauf zeigt *(Bild 4.3)*. Der Prozess zur Erzeugung von generativen Bauteilen ist dabei in folgende Bereiche zu unterteilen.

Bauprozessvorbereitung

Grundlage und Voraussetzung aller generativen Fertigungsprozesse ist ein voll-

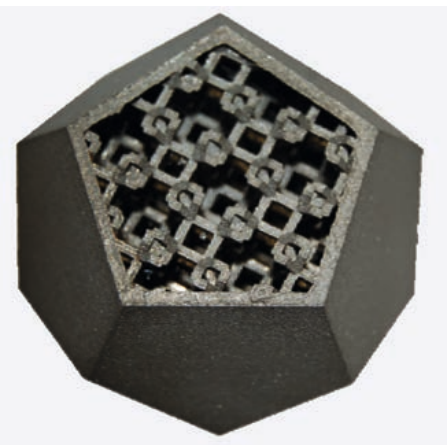


Bild 4.2: Mittels Strahlschmelzen hergestellter Dodekaeder mit innenliegender geometrisch komplexer Struktur aus Metall, ohne mechanische Nacharbeit

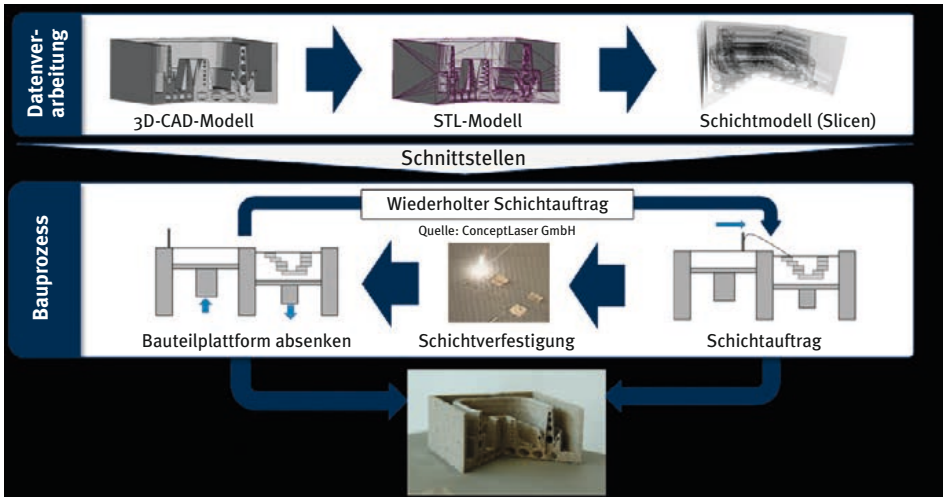


Bild 4.3: Ablauf der Datenverarbeitung sowie des Bauprozesses von 3D-Volumenmodell bis zum fertigen Bauteil

ständiges, maßhaltiges, dreidimensionales CAD-Volumenmodell. Die Wahl des zu verwendenden CAD-Konstruktionsprogramms richtet sich dabei nach den Möglichkeiten zum Datei-Export. Zum Einsatz bei Rapid-Technologien kommen Formate wie STL, IGES oder STEP. Das hauptsächlich Verwendung findende STL-Format basiert auf der Annäherung der Geometrie durch Dreiecke (Triangulation). Dieses Format wird auch von allen gängigen CAD-Programmen unterstützt. Der Prozess der Triangulation umfasst dabei die möglichst genaue Annäherung der Geometrieaußenfläche durch Dreiecke. Diese Dreiecke werden durch die Lage der drei Eckpunkte und den zugehörigen Normalenvektor, der vom Volumen des Bauteils weg zeigt, definiert. Durch die Gesamtzahl der Dreiecke und Normalenvektoren bleibt die Oberflächeninformation erhalten. Eine Verifikation der Geometrie der Bauteile nach der Triangulation sollte dabei aber immer durchgeführt werden. Reparaturfunktionen bei Triangulationsfehlern stellt in der Regel jede Software zur Datenvorbereitung zur Verfügung.

Der STL-Datensatz des Bauteils ist die Eingangsinformation für den Slice-Prozess. Dabei wird das Bauteil in einzelne Schichten zerlegt. Die Schichtdicke richtet sich nach dem zur Anwendung kommenden Verfahren bzw. der gewünschten Oberflächengüte. Beim Slicen wird somit für jede Schicht die Geometrieinformation für den Bauvorgang erzeugt. An Rundungen, Freiformflächen und stumpfen Winkeln wird durch den schichtweisen Aufbau ein Stufeneffekt erzeugt. Dies führt zu einer geringen Oberflächenqualität. Je größer die Schichtdicke ist, desto größer wird dieser Stufeneffekt. Im Gegensatz dazu verringern sich mit größerer Schichtdicke die Bauzeit und somit die Bauteilkosten. Für jeden Bauprozess gilt es einen Kompromiss zu finden.

In einem letzten Schritt in der Bauprozessvorbereitung ist das Bauteil im Bauraum der Maschine virtuell mittels der Anlagensoftware zu platzieren. Gleichzeitig

werden die einzelnen Schichtinformationen in Steuerdaten der Anlage transferiert. Der Anwender legt anschließend anlagenspezifische Parameter, wie beispielsweise die Verfahrgeschwindigkeit oder die Bauraumtemperatur, fest.

Bauprozess

Prinzipiell arbeitet jedes additive Verfahren in drei Prozessschritten. Zunächst wird das Material aufgebracht, dann die Schicht verfestigt und abschließend die Bauplattform zum Aufbringen der nächsten Schicht abgesenkt. Das Aufbringen des Materials und der Verbindungsprozess variieren dagegen je nach Anlage und Fertigungstechnologie. Zudem unterscheiden sich die Materialien hinsichtlich ihres Ausgangszustands in pulverförmige, flüssige und feste Werkstoffe. Die Verfestigung des Ausgangsmaterials erfolgt dabei mit Hilfe einer Energiequelle oder durch Auftragen eines chemischen Aktivators. Nachdem die erste Schicht aus der Bauprozessvorbereitung verfestigt wurde, wird die Bauplattform um eine Schichtdicke abgesenkt und eine neue Schicht des Ausgangsmaterials aufgebracht. Dies geschieht in der Regel mit einem flächigen Auftragsmechanismus, wie beispielsweise einer Walze oder einem Wischer, der eine möglichst homogene Ausgangsschicht herstellt. Es folgt die Verfestigung der neuen Schicht nach den Vorgabedaten aus der Bauprozessvorbereitung. Parallel hierzu wird eine Verbindung mit der darunter liegenden Schicht hergestellt. Bei den additiven Verfahren führt diese Vorgehensweise zu anisotropem Materialverhalten, da die Verbindung des Ausgangsmaterials in der x-/y-Ebene normalerweise höher ist als in z-Richtung.

Nacharbeit

Auch über die Stufenproblematik hinaus können viele generative Verfahren derzeit nur vergleichsweise geringe Oberflächenqualitäten bieten. In den meisten Fällen müssen die Bauteile nach dem Bauprozess nachgearbeitet werden. Dies ist auf den prozessabhängigen Treppenstufeneffekt sowie die eingeschränkte Maßhaltigkeit der additiven Fertigungstechnologien zurückzuführen. Für eine spätere Nacharbeit sind beispielsweise Fixpunkte bei der Konstruktion als Referenzpunkte vorzusehen. Damit ist es möglich, ein Hilfskoordinatensystem aufzustellen, auf das die Nachbearbeitung beispielsweise mittels eines CNC-Bearbeitungszentrums aufbaut. Der Konstrukteur sollte diese Fixpunkte so wählen, dass diese durch die generativen Verfahren auch maßgenau gefertigt werden können. Darüber hinaus kann über thermische Nachbehandlungsprozesse das anisotrope Materialverhalten reduziert bzw. eliminiert werden.

4.4 Einteilung der generativen Fertigungsverfahren

Die heute bekannten generativen Fertigungsverfahren können nach den beiden Gesichtspunkten Ausgangsmaterial und Formgebung eingeteilt werden:

Einteilung nach dem Ausgangsmaterial

Entsprechend *Bild 4.4* werden heute drei Arten von Ausgangsmaterial verwendet:

- Pulverförmige Granulate
- Flüssige Kunstharze
- Feste Ausgangsstoffe

Bei Verfahren, die **pulverartiges oder körniges** Ausgangsmaterial verwenden, kommen Sinter- oder Klebeverfahren zum Ein-

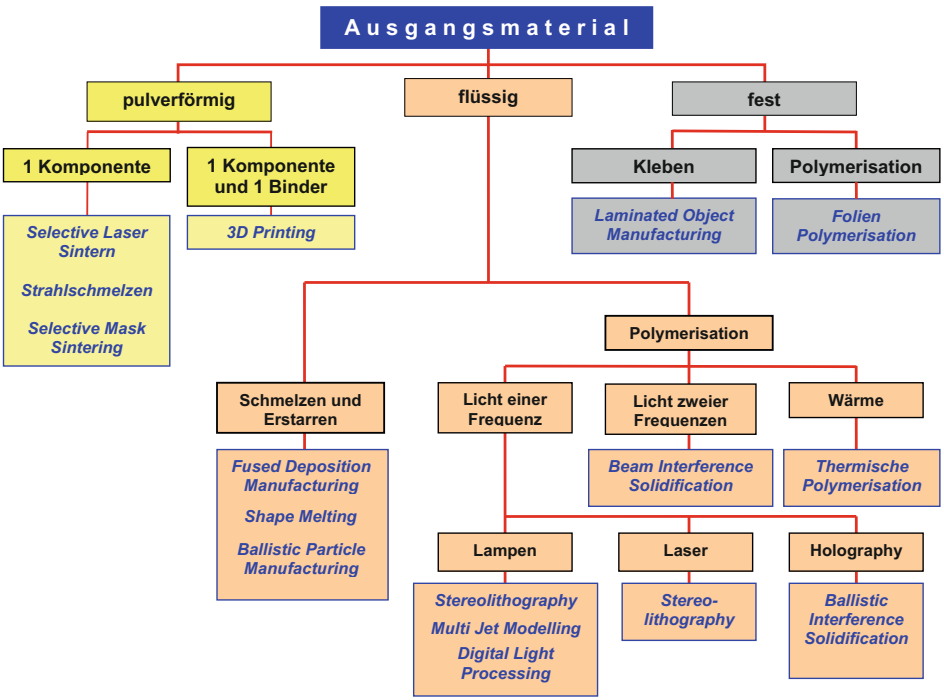


Bild 4.4: Einteilung der heute bekannten generativen Fertigungsverfahren nach dem Ausgangsmaterial

satz. Hierbei wird durch gezielte Bestrahlung mit Laser das in dünnen Schichten „aufgelegte" oder zugeführte Material aufeinandergeschmolzen und verfestigt. Beim 3D-Printing erfolgt die Verfestigung durch gezielt eingebrachten Binder, z. B. Wasser in Gips.

Bei Verwendung **flüssiger** Stoffe werden vorwiegend Kunstharze durch Laserlicht oder Wärme (UV-Strahlen) gezielt verfestigt (polymerisiert) und mit den früheren, darunter liegenden Schichten verbunden. Zu diesem Verfahren zählt aber auch die Verwendung von festen Ausgangsstoffen (Kunststoffen), die durch Schmelzen und anschließendes schnelles Abkühlen auf dem bestehenden Modell dieses schichtweise aufbauen. Dabei wird der zähflüssige Kunststoff schichtweise aufeinander gespritzt.

Werden **feste**, formneutrale Ausgangsstoffe benutzt, so sind dies im Wesentlichen Lagen aus Folie oder Papier, die schichtweise aufeinander geklebt und konturgetreu (mit Laser oder Messer) ausgeschnitten werden. Dabei kommen sowohl konventionelle Klebeprozesse, als auch Teil-Polymerisation (Verkleben durch Erwärmen) zum Einsatz.

Einteilung nach der Art der Formgebung

Hier unterscheidet man Verfahren, die in der Lage sind, dreidimensionale Formen direkt zu erstellen und andere, die durch

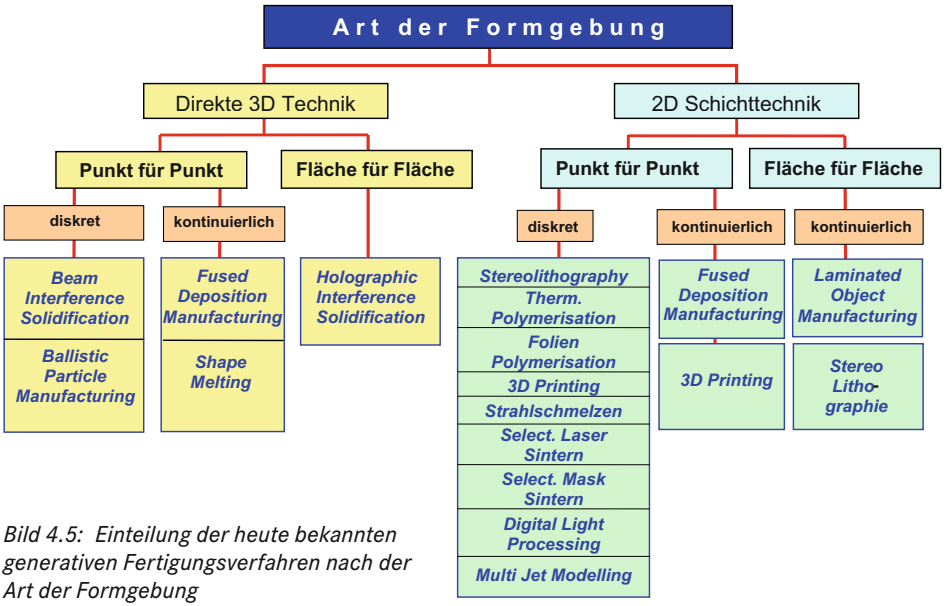


Bild 4.5: Einteilung der heute bekannten generativen Fertigungsverfahren nach der Art der Formgebung

Aufeinanderschichten von zweidimensionalen Einzelschichten die Endform erzeugen. *Bild 4.5* gibt einen Überblick über die einzelnen Verfahren.

Alle heutigen Verfahren arbeiten zweidimensional, d. h. wiederum mit einzelnen Schichten. Dabei werden Schicht-für-Schicht-Modelle aufgebaut und so die dritte Dimension erzeugt. Das gilt auch für solche Verfahren, die eigentlich prinzipiell in der Lage wären, gleich dreidimensional zu arbeiten (z. B. Fused Deposition Manufacturing). Die Begründung ist, dass die dafür erforderliche 3D-Software deutlich komplizierter und deshalb zur Zeit auch nicht verfügbar ist.

4.5 Vorstellung der wichtigsten Schichtbauverfahren

Strahlschmelzen

Verfahrensbeschreibung

Bei generativen Fertigungsverfahren nach dem Prinzip des Strahlschmelzens liegt das Ausgangsmaterial in einem pulverförmigen Zustand vor. Durch einen Auftragsmechanismus (z. B. einer Rakel) wird zu Beginn des Prozesses eine Pulverschicht auf eine Bauplattform aufgebracht. Diese Schicht wird, an Stellen an denen später das Bauteil entstehen soll, je nach Verfahrensprinzip durch einen Elektronen- oder einen Laserstrahl aufgeschmolzen und somit auf der Bauplattform verfestigt. Durch ein wiederholendes Absenken der Bauplattform, Auftragen einer neuen Schicht sowie Verschmelzen des Bauteilvolumens entsteht so Schicht für Schicht das Bauteil *(siehe Bild 4.6)*.

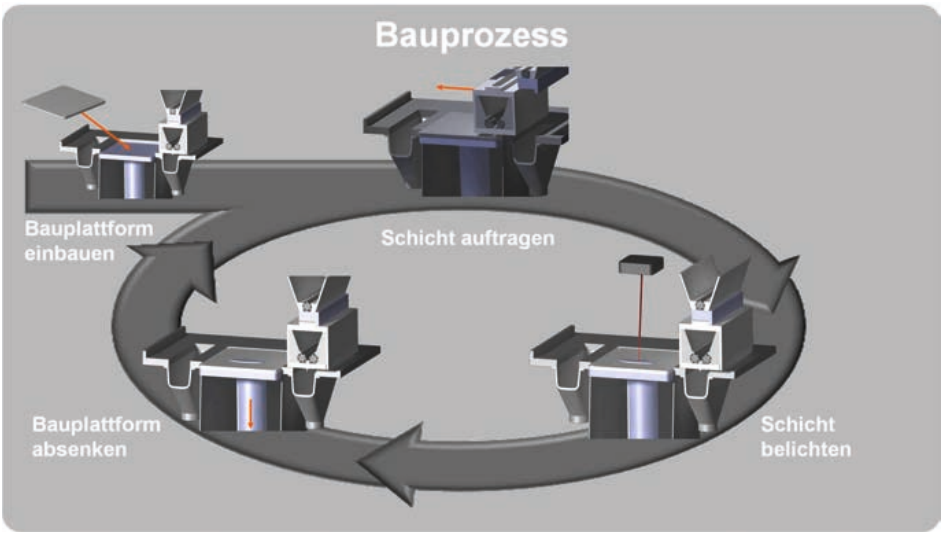


Bild 4.6: Verfahrensablauf bei direkten und indirekten Strahlschmelzverfahren

Die beim lokalen Aufschmelzen des pulverförmigen Ausgangsmaterials auftretenden Effekte sind durch vollständiges Überführen des Ausgangsmaterials in den schmelzflüssigen Zustand charakterisiert und unterscheiden sich dadurch von den Sinterprozessen.

Anstelle eines zweistufigen Sinterverfahrens *(vgl. Beispiel Laser-Sintern)* hat sich im industriellen Umfeld ein einstufiger Strahlschmelzprozess etabliert. Für diesen Prozess existieren unterschiedliche Bezeichnungen. Während die Firma EOS das „Direkte-Metall-Laser-Sintern" (DMLS) verwendet, bevorzugen andere Firmen die Bezeichnungen LaserCusing (Concept Laser) oder „Selective Laser Melting" (SLM) (MTT Technologies). Der Verfahrensablauf ist jedoch bei allen Herstellern ähnlich: Der Ausgangswerkstoff ist immer ein einkomponentiges Metallpulver, welches während des Bauprozesses vollkommen aufgeschmolzen wird. Dadurch kann ein nahezu porenfreies Bauteil erzeugt werden, welches in seinen Materialeigenschaften denen eines konventionell gefertigten (z. B. gegossenen) Bauteils desselben Materials ähnlich ist. Eine thermische Nachbehandlung wie beim IMLS-Verfahren *(vgl. Beispiel Laser-Sintern)* ist nicht notwendig. Derzeit sind als pulverförmiges Ausgangsmaterial unterschiedliche Werkzeug- und Edelstähle, Aluminium- und Nickelbasislegierungen, Titan in Reinform und in verschiedenen Legierungszusammensetzungen sowie Gold verfügbar und verarbeitbar. Die Materialpalette wird stetig in zahlreichen Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten erweitert.

Gerade im Bereich des Prototypenbaus und der Kleinserienfertigung können durch die einstufigen Verfahren einsatzfähige Bauteile für unterschiedliche Anwendungen hergestellt werden. Besonders in der Medizintechnik sowie im Werkzeug- und Formenbau gelten diese Technologien als wichtige wirtschaftliche Fertigungsalternative zur Herstellung von geomet-

risch komplexen Bauteilen und Funktionselementen, wie z. B. konturnahe Kühlkanäle. In weiteren Branchen z. B. der Luft- und Raumfahrt sowie der Automobilindustrie gewinnen diese Verfahren derzeit stark an Bedeutung.

Alle vorgestellten laserbasierten Strahlschmelzverfahren haben allerdings den Nachteil der begrenzten Verfahrgeschwindigkeit des Laserstrahls. Dies hat zwei Hauptgründe:

- Durch die mechanische Spiegeloptik zum Umlenken des Laserstrahls wird dessen Leistung durch die begrenzte thermische Belastbarkeit der Spiegelanordnung beschränkt.
- Durch die Massenträgheitsmomente in der Spiegeloptik wird die Verfahrgeschwindigkeit des Laserstrahls limitiert, da bei zunehmender Ablenkgeschwindigkeit die Genauigkeit der Verfahrwege beeinträchtigt wird.

Verwendet man statt eines Laserstrahls einen Elektronenstrahl im „Electron Beam Melting (EBM)"-Prozess kann dieser Nachteil behoben und somit die Prozessgeschwindigkeit erhöht werden *(siehe Bild 4.7)*.

Für die Strahlerzeugung wird bei dieser Form der Bearbeitung eine sog. Elektronenstrahlkanone verwendet, in welcher der Strahlstrom, d. h. die Leistung des Elektronenstrahls gezielt gesteuert werden kann. Im Bereich der Strahlführung und -formung wird der erzeugte Elektronenstrahl durch elektromagnetische Linsen zu einem Strahl mit einem kreisförmigen Querschnitt geformt, im Brennpunkt fokussiert und in der Ebene abgelenkt. Der Arbeitsbereich befindet sich in einer Vakuumkammer, welche ein Streuen des Elektronenstrahls verhindert. Dort sind der Pulvervorratsbehälter, der Auftragsmechanismus sowie die Bauplattform angeordnet.

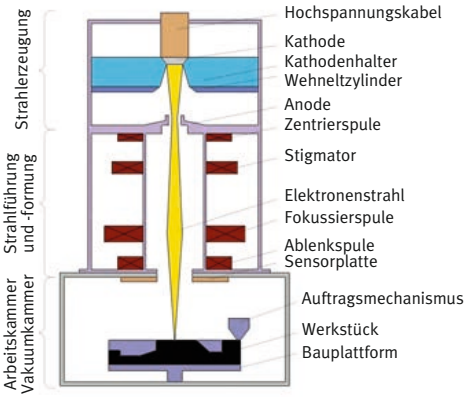


Bild 4.7: Aufbau einer EBM-Anlage (Electron Beam Melting)

Durch den Einsatz des Elektronenstrahls lässt sich aufgrund der größeren Ablenkgeschwindigkeiten und der höheren Leistungsdichte eine höhere Prozessgeschwindigkeit erzielen. Durch die hohe Ablenkgeschwindigkeit ergeben sich zudem Potentiale für eine verbesserte Prozessführung, wie z. B. eine quasiparallele Belichtung sowie eine frei konfigurierbare Strahlformung zur gezielten Beeinflussung und Optimierung des Wärmeeintrags in das Bauteil. Wegen der genannten Vorteile wird derzeit das EBM-Verfahren detailliert untersucht und weiterentwickelt, um zukünftig eine größere Durchdringung in der industriellen Anwendung zu erreichen.

Vorteile des Strahlschmelzens:

- Hohe geometrische Formgebungsfreiheit
- Dünne Wandstärken realisierbar
- Einsatzfähige Funktionsbauteile herstellbar
- Verwirklichung innenliegender, konturnaher Kühlkanäle möglich
- Verarbeitung von Werkstoffen, welche aufgrund ihrer thermischen und mechanischen Materialeigenschaften durch konventionelle Verfahren nicht oder nur schwer zu verarbeiten wären

- Möglichkeit der Multimaterialverarbeitung sowie der Realisierung gradierter Werkstoffeigenschaften

Nachteile des Strahlschmelzens:

- Stützkonstruktionen an Bauteilüberhängen notwendig
- Verwendung einer Bauplattform notwendig, welche in der Nachbearbeitung abgetrennt werden muss
- Auftreten des Treppenstufeneffekts durch den schichtweisen Aufbau des Bauteils
- Hohe Herstellkosten für ein Bauteil bei langen Prozesszeiten
- Eigenspannungen im Bauteil durch hohe Temperaturgradienten beim Abkühlen des aufgeschmolzenen Pulvers
- Teilweise raue Oberflächen und damit verbundene Nachbearbeitung bei Funktionsflächen
- Begrenzte Bauraum- und somit Bauteilgröße (derzeit maximal 300 × 350 × 300 mm^3)
- Schutzgasatmosphäre beziehungsweise Vakuum (beim Elektronenstrahlschmelzen) notwendig

Laser-Sintern (LS) *(Bild 4.8)*

Verfahrensbeschreibung

Der Verfestigungsprozess kristalliner, körniger oder pulverförmiger Stoffe durch Zusammenwachsen der Kristallite bei entsprechender Erwärmung wird definitionsgemäß als Sintern bezeichnet. Dafür wird das Pulverbett zum Teil auf mehrere hundert Grad Celsius erhitzt. Der Prozess kann sowohl für Metalle als auch für Kunststoffe verwendet werden.

Für Metalle wird in einem zweistufigen Prozess mittels des Indirekten-Metall-Laser-Sintern (IMLS) ein im Metallpulver enthaltener Kunststoffbinder aufgeschmol-

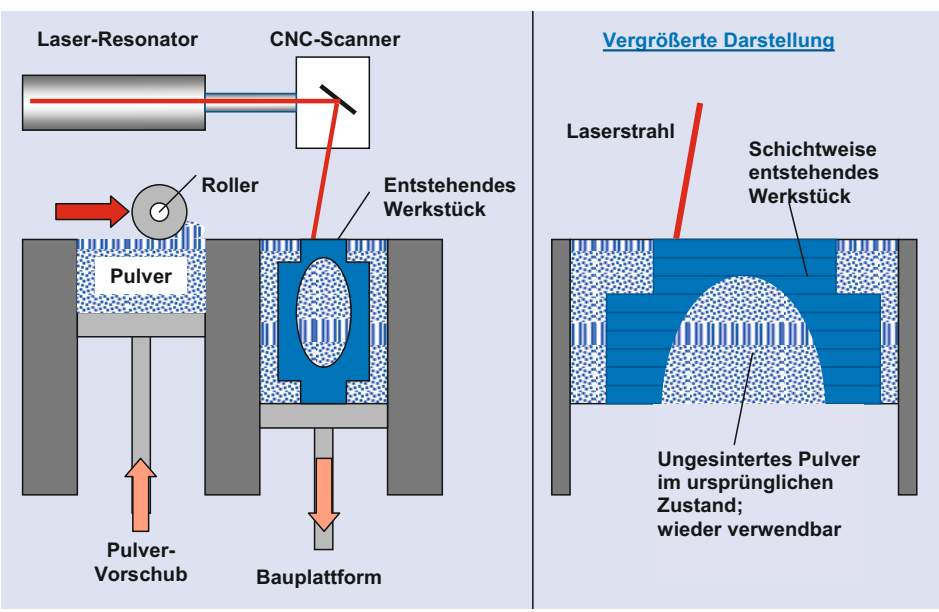


Bild 4.8 Laser Sintern (LS), Funktionsprinzip

zen, welcher die Metallpartikel umgibt. Dadurch entsteht zunächst ein sogenannter „Grünling“ mit geringer Festigkeit. Um daraus ein adäquates Metallbauteil zu generieren, ist eine nachgelagerte Wärmebehandlung notwendig, in welcher der Kunststoffbinder ausgetrieben wird und sogenannte Sinterhälse zwischen den Metallpartikeln entstehen. Zeitgleich wird in das Bauteil Bronze infiltriert, sodass ein stabiles Gefüge entsteht, welches zu ca. 60 % aus Stahl und 40 % aus Bronze zusammengesetzt ist.

Das Laser-Sintern (LS) ist ebenfalls bekannt unter der Bezeichnung Selektives Laser-Sintern (SLS). Das pulverbettbasierte Verfahren ermöglicht die Herstellung von Prototypen und Funktionsbauteilen aus Kunststoffen innerhalb von wenigen Stunden *(Bild 4.9)*. Als Materialien werden hierbei überwiegend Polyamid und Polystyrol verarbeitet. Im Gegensatz zu den Strahlschmelzverfahren, bei welchen das Ausgangsmaterial alleinig durch den Strahl aufgeschmolzen wird, wird beim Laser-Sintern das Ausgangsmaterial zunächst mittels großflächiger Wärmestrahler bis auf eine Temperatur knapp unter dem Schmelzpunkt erhitzt. Durch einen Laser geringer Leistung (bis ca. 30 W) wird das Ausgangsmaterial dann lokal aufgeschmolzen. Die Ablenkung des Laserstrahls wird von einer Scanner-Optik durchgeführt. Im Anschluss an das iterative Herstellen der einzelnen Bauteilschichten wird der gesamte Bauträger langsam bis auf Raumtemperatur abgekühlt. Die notwendige Zeit für diesen Abkühlvorgang entspricht in etwa der des Aufbauprozesses. Ein zu rasches Abkühlen würde zu hohen Temperaturgradienten und damit zu einem großen Verzug der Bauteile führen. Dem Abkühlprozess folgen die Prozessschritte Auspacken, Reinigung und Nachbehandlung der Bauteile. Die gesinterten Bauteile sind im nicht verfestigten Pulver eingebettet und können hieraus entnommen werden. Mittels Druckluft werden die Bauteile anschließend gereinigt und restliche Pulveranhaftungen entfernt. Das nicht verfestigte Ausgangsmaterial kann wiederverwendet werden. Für optimale Prozessergebnisse sollte ein Mischungsverhältnis von Alt- und Neupulver von ca. 1:1 verwendet werden.

Vorteile des Laser-Sinterns

- Kurze Durchlaufzeit im Vergleich zu Strahlschmelzverfahren
- Herstellung komplexer, funktionsintegrierter Bauteile möglich
- Einsatzfähige Funktionsbauteile mit komplexen Geometrien fertigbar
- Große Materialvielfalt
- Kein Support notwendig

Nachteile des Laser-Sinterns

- Schwund und Verzug bei großen Bauteilen durch den thermischen Bauprozess
- Poröse Oberfläche
- Alterung durch UV-Einwirkung



Bild 4.9: Generativ gefertigter Greifer [Festo]



Bild 4.10: 3D-Drucker [voxeljet]



Bild 4.11: Sohlenmodell – erstellt mit 3D-Drucker



Bild 4.12: Getriebemodell erstellt mit 3D-Drucker

3D-Drucken (3DP) *(Bild 4.10 – 4.12)*

Verfahrensbeschreibung

Das 3D-Drucken (3DP, 3D Printing) ist ein generatives Verfahren, bei welchem gezielt flüssiger Binder mit Hilfe eines Druckkopfes oder einer Düse in ein Pulverbett eingebracht wird. Durch wiederholtes Absenken der Bauplattform und anschließendes Auftragen einer dünnen Pulverschicht entsteht dabei schichtweise ein Bauteil. Durch die entsprechende Wahl der Pulver-Binder-Kombination ist eine breite Werkstoffvielfalt, von Kunststoffen über Keramiken und Sand (für Gussformen) bis hin zu Metallen verarbeitbar. Durch die Verwendung eines im Vergleich zum Lasersystem kostengünstigen Druckkopfes entstehen erhebliche Kostenvorteile gegenüber dem Lasersintern. Für Kunststoffbauteile werden die Modelle nach dem Bau durch Infiltration (beispielsweise mit Epoxydharz oder Wachs) nachbehandelt, um die mechanischen Eigenschaften zu erhöhen. Bei der Verarbeitung von Metallpulver wird das Material durch eine Bindersubstanz verbunden und zu einem Grünling verfestigt, welcher anschließend analog zum IMLS wärmebehandelt und mit Bronze infiltriert wird.

Vorteile des 3D-Druckens

- Hohe Baugeschwindigkeit
- Viele Werkstoffe verarbeitbar
- Große Bauräume möglich
- Beträchtliche Anzahl an Anlagenherstellern *(Bild 4.10)*
- Farbige Bauteile herstellbar
- Preisgünstiges Verfahren

Nachteile des 3D-Druckens

- Geringe Oberflächenqualität
- Mittelmäßige mechanische Eigenschaften wegen geringer Dichte

Fused Deposition Modeling (FDM)

Verfahrensbeschreibung

Die Extrusionsverfahren sind dadurch gekennzeichnet, dass eine oder mehrere Düsen flüssiges oder aufgeweichtes Material auf eine Bauplattform aufbringen. Durch das anschließende Erkalten erhält das Bauteil seine Festigkeit. Das Fused Deposition Modeling (FDM), auch als Fused Layer Modeling (FLM) bekannt, ist dabei das relevanteste, mit nur einem Werkstoff arbeitende Verfahren. Eine Untergruppe stellt dabei das Multi-, beziehungsweise Poly-Jet-Modeling dar, bei dem Bauteile mit gradierten Eigenschaften hergestellt werden können. Die Düse besitzt dabei im Normalfall zwei Freiheitsgrade (in x- und y-Richtung), während die gesamte Bauplattform in z-Richtung verfahren werden kann. Auf diese Weise werden dreidimensional Bauteile erstellt. Der Stoffschluss zwischen den Extrusionsraupen ergibt sich beim Erkaltungsprozess. Durch den Aufbau in Strängen ergibt sich eine relativ schlechte Oberflächenqualität, wie in *Bild 4.13* dargestellt.

Vorteile des Fused Deposition Modeling *(Bild 4.13 - 4.14)*

- Gute mechanische Eigenschaften
- Geringe Anlagengröße
- Möglichkeit zu Bürosystemen
- ABS ist zu verarbeiten
- Durch Mehr-Düsen-Systeme ist eine leichte Umsetzbarkeit von Multimaterial-Bauteilen möglich
- Hohe Anzahl an Anlagenhersteller
- Selbstbau-Systeme verfügbar

Nachteile des Fused Deposition Modeling

- Geringe Oberflächenqualität
- Schwer zu realisierende Überhänge, da kein unterstützendes Material vorhanden ist
- Aufwändige Entfernung der Supports notwendig

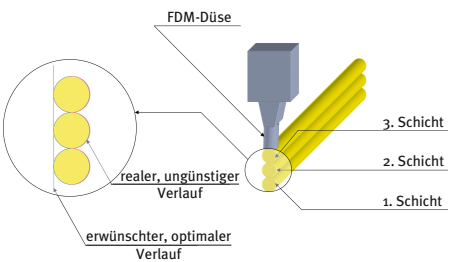


Bild 4.13: Bauteilqualität mittels FDM

Stereolithographie (STL) *(Bild 4.15)*

Verfahrensbeschreibung

Bei der Stereolithographie handelt es sich um das älteste, schichtweise arbeitende Verfahren. In diesem Prozess zur Herstellung von Kunststoffbauteilen wird eine selektive dreidimensionale Polymerisation eines lichtempfindlichen Harzes genutzt. Zur Polymerisation wird meist ein UV-Laser verwendet, mit dem nur im Brennpunkt des Lasers die kritische Energie erreicht



Bild 4.14: Verschiedene Bauteile – erstellt mit FDM

wird, um das Bauteil zu verfestigen. Durch Absenken der Bauplattform legt sich neues, flüssiges Harz über die bereits gehärtete Schicht. Somit kann durch wiederholtes Absenken und Aushärten ein Bauteil dreidimensional hergestellt werden.

Unter dem genutzten Verfahrensprinzip der Polymerisation versteht man eine Kettenreaktion, bei der ungesättigte Moleküle zu Makromolekülen verknüpft werden. Dies lässt sich in die vier Schritte

- Kettenstart oder Primärreaktion,
- Wachstumsreaktion,
- Kettenabbruch (Termination) und
- Kettenübertragung (Verzweigung einer Molekülkette)

unterteilen. Die bei der Stereolithographie eingesetzten Materialien müssen dabei auf UV-Strahlung reagieren und sehr schnell zu einem Kettenabbruch kommen, damit nur die belichteten Bereiche des Harzes aushärten. Um die endgültige Bauteilfestigkeit zu erreichen, wird dem eigentlichen Bauprozess oft ein Aushärtevorgang in einem UV-Schrank nachgeschaltet.

Stereolithographiebauteile werden vor allem als Konzept- oder Funktionsmodelle im Produktentstehungsprozess verwendet. Ein weiteres Einsatzgebiet des Verfahrens ist die Herstellung von Urmodellen für den Vakuum- und Feinguss.

Die Stereolithographietechnik wird vom Marktführer 3D-Systems ständig weiterentwickelt und von allen namhaften Rapid Prototyping Dienstleistern angewendet. Wenn es sich um High-End-Prototypen und Urmodelle für den Vakuumguss handelt, führt kein Weg an der STL-Technik vorbei.

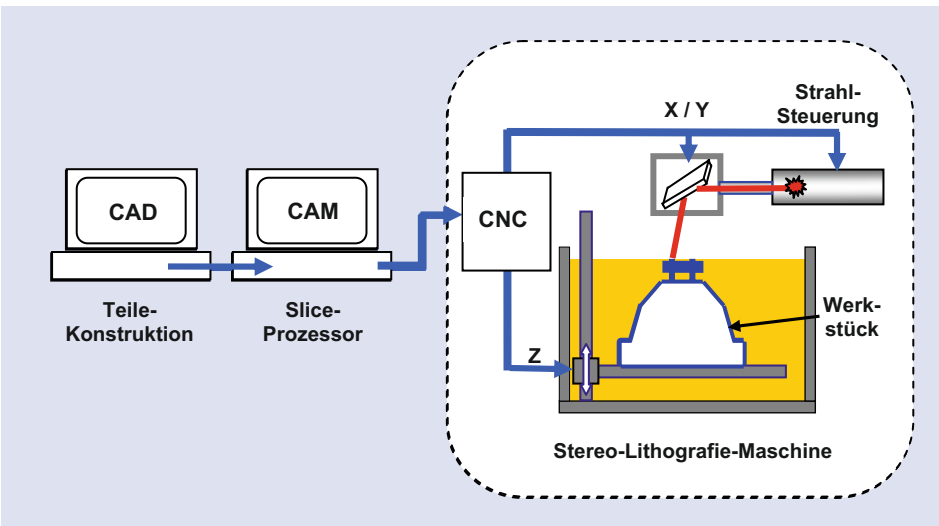


*Bild 4.15: Prinzip der generativen Fertigungssysteme. Die mittels CAD erstellten Werkstückdaten werden in einem Slice-Verfahren in viele, einheitlich dicke Schichten zerlegt und – je nach Verfahren – das Werkstück damit schichtweise aufgebaut. Bei der **Stereolithografie** entsteht das Werkstück auf einer Plattform von unten nach oben (Z-Achse). Schicht für Schicht wird durch Belichtung mit einem UV-/Laserstrahl (X-/Y-Achse) und Verfestigung des flüssigen Monomers aufeinander gesetzt und miteinander verbunden.*

STL ist der 3D-Drucktechnik bei vielen Geometrien bei Weitem überlegen, da bei der STL-Technik nur ca. 3 – 5 % des Bauteilgewichtes an Stützen benötigt wird. Da bei der 3D-Drucktechnik (z. B. Objet) immer alles was senkrecht nach unten geht zu 100 % unterstützt wird, können die Stützen auch bis zum 10 oder 20-fachen des Bauteilgewichtes ausmachen. Ein Waste-Behälter, in welchen mindestens 200 Gramm Material bei einem Baustart zur Druckkopf- und Düsenreinigung gespült werden, ist bei der STL-Technik nicht erforderlich. Dies ist bei Materialkosten von rund 220 Euro je Kilogramm nicht unerheblich.

Aktuell gibt es auch eine STL-Anlage mit einem Laserfocus von lediglich 0,017 mm und einer möglichen Schichtstärke von 0,01 mm. Damit sind auch Teile für den Microbereich herstellbar. Gegenüber den 3D-Drucktechniken ist die Materialvielfalt für das STL-Verfahren um vieles größer.

Eine Weiterentwicklung der Stereolithographie ist die Mikrostereolithographie, durch die Geometrien mit sehr hoher Komplexität und gleichzeitig feinen Details herstellbar sind. Hierbei wird das Harz nicht punktweise durch einen Laser, sondern eine komplette Schicht flächig mit Hilfe eines Digital Light Processing Chip (DLP-Chip) ausgehärtet.

Vorteile der Stereolithographie

- Einfache Herstellbarkeit komplexer, dünnwandiger Strukturen
- Nahezu keine Wärmespannungen aufgrund der geringen Laserleistung (in der Regel unter einem Watt)
- Hohe Genauigkeit der Bauteile erreichbar

Strittige Nachteile der STL:

- Die **Alterung des Materials** ist nur bei sehr geringem Teiledurchsatz, und längerem Stillstand ein Problem. In diesem Fall findet keine „Auffrischung“ mit Neumaterial statt und es kann zu einer vorzeitigen Alterung kommen. Bei ständigem Durchsatz bleibt das Material der Grundfüllung in der Anlage und wird immer nur aufgefüllt. Bei großen Anlagen fasst der Behälter bis 480 kg – ein Materialkippen wäre hier fatal.
- Der **UV-Anteil des Tageslichts** ist kein Problem, da die Anlagenscheiben mit einer UV-Folie versehen sind. Direkte Sonneneinstrahlung darf das Material nicht bekommen.
- **Harzwechsel** ist bei den großen Anlagen problematisch und wird nicht gemacht! Die Kosten für eine Materialfüllung betragen ca. 85.000 € plus Wechselbehälter mit zusätzlichen ca. 50.000 €. Das Risiko eines kompletten Wechsels besteht bei zu geringem Materialdurchsatz wegen der Alterung des Materials. Bei kleinen Anlagen sind mehrere Materialwechsel pro Woche üblich. Diese stellen auch kein Problem dar und der Zeitaufwand liegt bei 30 – 45 Minuten.
- Die Weiterentwicklung der STL-Systeme führte zu komplett neuartigen Anlagen: Sehr klein und fein, bis zu 20 verschiedene Materialien sind verfügbar und der Materialwechsel dauert ca. 60 Sekunden. **Vorteil dieser neuen Anlagen:** Sie haben zwar eine Bauplattform, aber keinen wirklichen Materialbehälter und kommen mit geringsten Mengen Harz aus. Hier besteht deshalb auch kein Alterungsrisiko des Materials.
- Die **Stützen** sind bei dieser Technologie unabdingbare Voraussetzung und nicht wirklich ein Nachteil. Mit Software wie *Materialise E-Stage* (Stützengenerator) werden die Stützen nach der Positionierung der Teile im Handumdrehen automatisch generiert *(Bild 4.16)*.

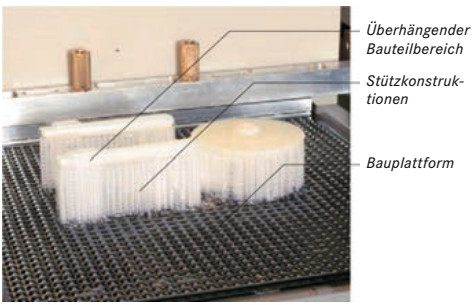


Bild 4.16: Durch Stereolithographie hergestelltes Bauteil mit Stützkonstruktionen

Wirkliche Nachteile der Technologie:

- Sehr hohe Kosten für die erforderlichen Wartungsverträge
- Hohe Anschaffungskosten, da kaum Mitbewerber zu 3D-Systems bekannt sind
- 3D-Systems schützt das System mit einer Chipcodierung für die Material-Nachfüllbehälter. Am Markt angebotene und funktionierende Fremdmaterialien können daher nur auf älteren Anlagen eingesetzt werden.
- Für die Funktion ist ein Normklima im Anlagenraum erforderlich (Regelung der Luftfeuchtigkeit und Klimatisierung).

Weitere Verfahren

Masken-Sintern (MS) *(Bild 4.17)*
Das Masken-Sintern (MS) weist eine starke Ähnlichkeit zum Selektiven Laser-Sintern (SLS) auf. Auch hier wird ein pulverförmiges Ausgangsmaterial durch Energieeintrag aufgeschmolzen. Im Gegensatz zum Laser-Sintern wird beim Masken-Sintern jedoch kein einzelner Laserstrahl durch einen Scanner abgelenkt, sondern die Belichtung einer Schicht erfolgt großflächig über eine Maske. Die Maske wird schichtabhängig so bedruckt, dass an den zu verfestigenden Stellen die von einem UV-Strahler ausgesandte Energie auf das Pulverbett reflektiert wird. Die Maske besteht aus einem Spiegel, welche schichtabhängig mit Keramikpulver bedruckt wird. Durch das großformatige Belichten einer kompletten Fläche sinkt die Bauzeit pro Schicht stark ab.

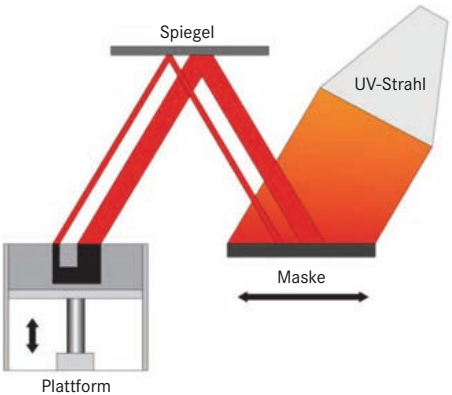


Bild 4.17: Prinzip des Masken-Sintern [Sintermask]

Digital Light Processing (DLP)
Das Digital Light Processing folgt einem ähnlichen Verfahrensablauf wie die Stereolithographie, allerdings kann mit Hilfe eines speziellen Chips eine ganze Schicht zeitgleich belichtet und verfestigt werden. Zur Ansteuerung des DLP-Projektors werden die Baudaten in ein Bitmap-Format konvertiert und von der Spiegeleinheit als Maske auf die Bauebene projiziert. Wie bei der klassischen Stereolithographie sind wegen des Aufbaus im Fluid Stützstrukturen notwendig. Im Speziellen findet dieses Verfahren in der generativen Fertigung von Mikrobauteilen Verwendung.

Laminated Object Manufacturing (LOM)
Beim Laminated Object Manufacturing (LOM), auch Laminated Layer Manufacturing (LLM) genannt, liegt das Ausgangsmaterial plattenförmig vor, beispielsweise in Form von Kunststofffolien oder Papier.

Diese wird schichtweise aufeinander geklebt und nach dem Auflegen entlang der Bauteilkontur geschnitten. Hierzu kommen sowohl Lasersysteme als auch klassische Schneidwerkzeuge, wie Rollen zum Einsatz. Der am Ende entstehende Block wird aus der Anlage entnommen und die nicht zum Bauteil gehörenden Teile entfernt. Es können auch metallische Werkstoffe verarbeitet werden. Durch die geringe Schichtstärke sind hohe Oberflächenqualitäten erzielbar.

Laserauftragschweißen
Beim Laserauftragschweißen wird durch einen Laserstrahl ein lokal begrenztes Schmelzbad auf der Oberfläche eines metallischen Werkstücks generiert. Durch eine Zufuhreinrichtung wird in dieses Schmelzbad der metallische Werkstoff (meist in Pulver- oder Drahtform) eingebracht. Durch die Bewegung dieses Schmelzbades über die Werkstoffoberfläche kann somit eine raupenförmige Linie erzeugt werden. Um den aufgeschmolzenen Werkstoff vor Oxidation zu schützen, läuft der Prozess meist in Schutzgas ab. Durch das Übereinanderlegen mehrerer Schichten werden dreidimensionale Materialvolumina aufgebaut. Die generativ aufgebauten Bauteile sind in ihrer Dichte vergleichbar mit konventionell hergestellten Bauteilen aus dem gleichen Werkstoff. Durch Laserauftragschweißen erstellte Bauteile besitzen meist ein relativ grobes Gefüge, das einem Gussgefüge sehr ähnlich ist. Weiterhin ist durch den Prozess bisher nur eine geringe Oberflächenqualität zu erreichen.

4.6 Zusammenfassung

Generative Fertigungsverfahren können für die Herstellung von Protoypen, Formwerkzeugen und Endprodukten eingesetzt werden. In allen Fällen muss das zu produzierende Bauteil als 3D-CAD-Modell vorliegen. Die Produktion kann, in Abhängigkeit des späteren Verwendungszwecks, mit sehr unterschiedlichen Schichtbauprozessen erfolgen. Neben den aufgelisteten Verfahren existieren noch weitere, die sich jedoch nur marginal von den erwähnten unterscheiden.

Aktuelle Entwicklungen der generativen Fertigungsverfahren in der Industrie und Forschung sind sehr vielschichtig. So wird u. a. an einer Beschleunigung des Fertigungsprozesses, z. B. durch höhere Laserleistungen und damit größere Aufbauraten gearbeitet. Darüber hinaus müssen nach dem generativen Herstellungsprozess für eine ausreichende Qualität der Bauteile weitere Nacharbeitsschritte erfolgen. Damit steht sowohl die Prozessrobustheit als auch die Absicherung der Bauteilqualität im Fokus der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Die stetige Erweiterung des verarbeitbaren Materialportfolios führt dazu, dass sich durch generative Fertigungsverfahren kontinuierlich neue Anwendungsgebiete erschließen lassen.

Generative Fertigungsverfahren

Das sollte man sich merken:

1. **Generative Fertigungsverfahren** fügen formloses oder formneutrales Material schichtweise zu einem physischen Werkstück direkt aus den 3D-CAD-Daten
2. **Rapid-Technologien** setzen sich aus generativen und abtragenden Fertigungsverfahren zusammen und haben das Ziel, schnell Bauteile oder Werkzeuge zu produzieren
3. Bezüglich der Datenverarbeitung müssen für generative Fertigungsverfahren drei Voraussetzungen erfüllt sein:
   - Es existieren Datenmodelle der zu fertigenden Teile auf 3D-CAD-Systemen.
   - In der Prozessvorbereitung wurde das Volumen-/Oberflächenmodell in einzelne, verarbeitbare Schichten zerlegt.
   - Es wurde ein verfahrensspezifisches NC-Programm erstellt.
4. Generativ hergestellte Bauteile sind je nach verwendetem Verfahren in ihrer Konsistenz, Genauigkeit und Oberfläche sehr unterschiedlich
5. Heute wird eine Vielzahl an generativen Verfahren industriell eingesetzt; dabei spielt der Produktentstehungsprozess eine wichtige Rolle
6. Die heute bekannten generativen Prozesse können nach zwei Gesichtspunkten eingeteilt werden:
   - Nach dem **Ausgangsmaterial:** Pulverförmige, flüssige oder feste Materialien
   - Nach der **Art der Formgebung:** direkt dreidimensional oder durch Aufeinanderschichten zweidimensionaler Einzelschichten
7. Alle heutigen, kommerziellen Verfahren arbeiten zweidimensional
8. Die derzeit fünf wichtigsten Verfahren sind:
   - das **Strahlschmelzen** von funktional einsetzbarer metallischer Bauteile und Prototypen
   - das **Laser-Sintern** von pulverförmigen Kunststoffen oder ein-/zweikomponentigen Metallen
   - das **3D-Drucken**, d. h. das pulverförmige Ausgangsmaterial wird durch das gezielte Einbringen einer Binderflüssigkeit verfestigt
   - das **Fused Deposition Modelling**, welches thermoplastische Kunststoffdrähte in einer Düse erhitzt und das Material raupenförmig aufschmilzt
   - die **Stereolithographie,** d. h. schichtweise Polymerisation von flüssigem Harz
9. Unter **Rapid Prototyping** versteht man die schnelle Herstellung von Anschauungsobjekten, bzw. Modellen die nur eingeschränkt Funktionen des späteren Bauteils erfüllen
10. Unter **Rapid Tooling** werden die Verfahren zusammengefasst, die die Herstellung von Werkzeugen, die z. B. die Herstellung von Gießformen ermöglichen, um damit Bauteile im Orginalwerkstoff zu produzieren
11. Mit **Rapid Manufacturing** bezeichnet man Fertigungsprozesse, die die direkte Produktion von funktional einsetzbaren Bauteilen (Endprodukten) zulassen

5 Flexible Fertigungssysteme

Flexible Fertigungssysteme sind so unterschiedlich wie die Fertigungsaufgaben, die sie lösen sollen. Den Kombinationsmöglichkeiten von Maschinen, Werkstücktransport- und Steuerungssystem sind keine Grenzen gesetzt.

5.1 Definition

Unter einem flexiblen Fertigungssystem versteht man eine Gruppe numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen, die über ein gemeinsames Werkstück-Transportsystem und ein zentrales Steuerungssystem miteinander verbunden sind. Mehrere unterschiedliche (sich ergänzende) oder gleichartige (sich ersetzende) CNC-Werkzeugmaschinen führen alle erforderlichen Bearbeitungen an Werkstücken einer Teilefamilie durch. Der Fertigungsdurchlauf erfolgt vollautomatisch, d. h. die Bearbeitungsfolge wird nicht durch manuelle Eingriffe, Umrüst- oder Umspannarbeiten unterbrochen. Deshalb lassen sich mit diesen Systemen auch Pausenzeiten überbrücken und bei Schichtende ein Auslaufbetrieb mit reduziertem oder sogar ohne Personal durchführen *(Bild 5.1)*.

In hoch automatisierten Systemen werden auch das Materiallager, z. B. für Roh- und Fertigteile, die Spannvorrichtungen, die Qualitätskontrolle und die Werkzeugverwaltung in den Bearbeitungs- und Informationsfluss mit einbezogen. Die Integration von Montagebereichen ist ebenfalls möglich.

Durch die Verwendung numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen ist eine fortlaufende Anpassung an einfließende Konstruktions- und Bearbeitungsänderungen problemlos möglich. Flexible Fertigungssysteme sind nicht auf Mindest-Losgrößen angewiesen, sondern bearbeiten auch Einzelstücke und kleine Losgrößen ohne Stillstandszeiten zur Umrüstung. Voraussetzung ist, dass die CNC-Programme, Werkzeuge und Spannvorrichtungen vorhanden sind. Ein Zusammenlegen von Losen zum Erreichen größerer Stückzahlen ist nicht notwendig. Damit lassen sich die Kapitalbindung durch Lagerware und damit die Lagerkosten gering halten.

Flexible Fertigungssysteme sind nicht nur zur Bearbeitung prismatischer Werkstücke, sondern auch von Drehteilen, Blechteilen *(Bild 5.2)* oder für andere Verfahren einsetzbar. Dies erfordert neben unterschiedlichen Werkzeugmaschinen auch unterschiedliche Transportsysteme. Prismatische Werkstücke werden vorwiegend in Spannvorrichtungen einzeln oder mehrfach aufgespannt und auf Paletten transportiert, bei Drehteilen fasst man größere Stückzahlen in geeigneten Behältern zusammen. Anstelle des Palettenwechslers bei Bearbeitungszentren tritt bei Drehteilen der Handhabungsautomat, z. B. Roboter oder Portale, die alle Teile einzeln aus dem Behälter oder von einem Zubringer entneh-

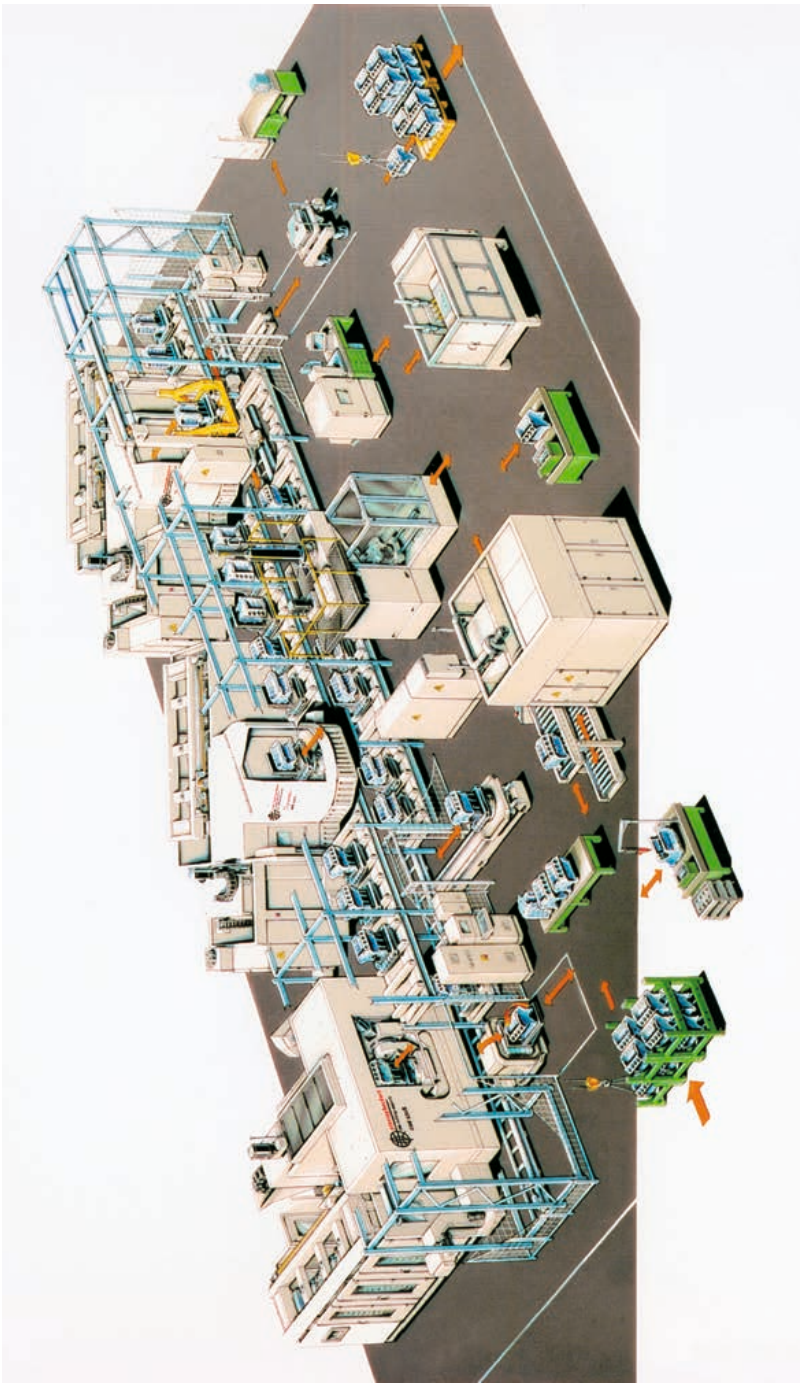


Bild 5.1: Flexibles Fertigungssystem FFS 630 zur Bearbeitung von Motorenteilen bei der DaimlerChrysler AG, Werk Untertürkheim. Es besteht aus zwei Bearbeitungszentren CWK 630 Dynamic sowie zwei Zentren HEC 630 Take five mit einem Palettenlinearsystem in zwei Etagen und separaten Spannplätzen (Heckert-Werkfoto)

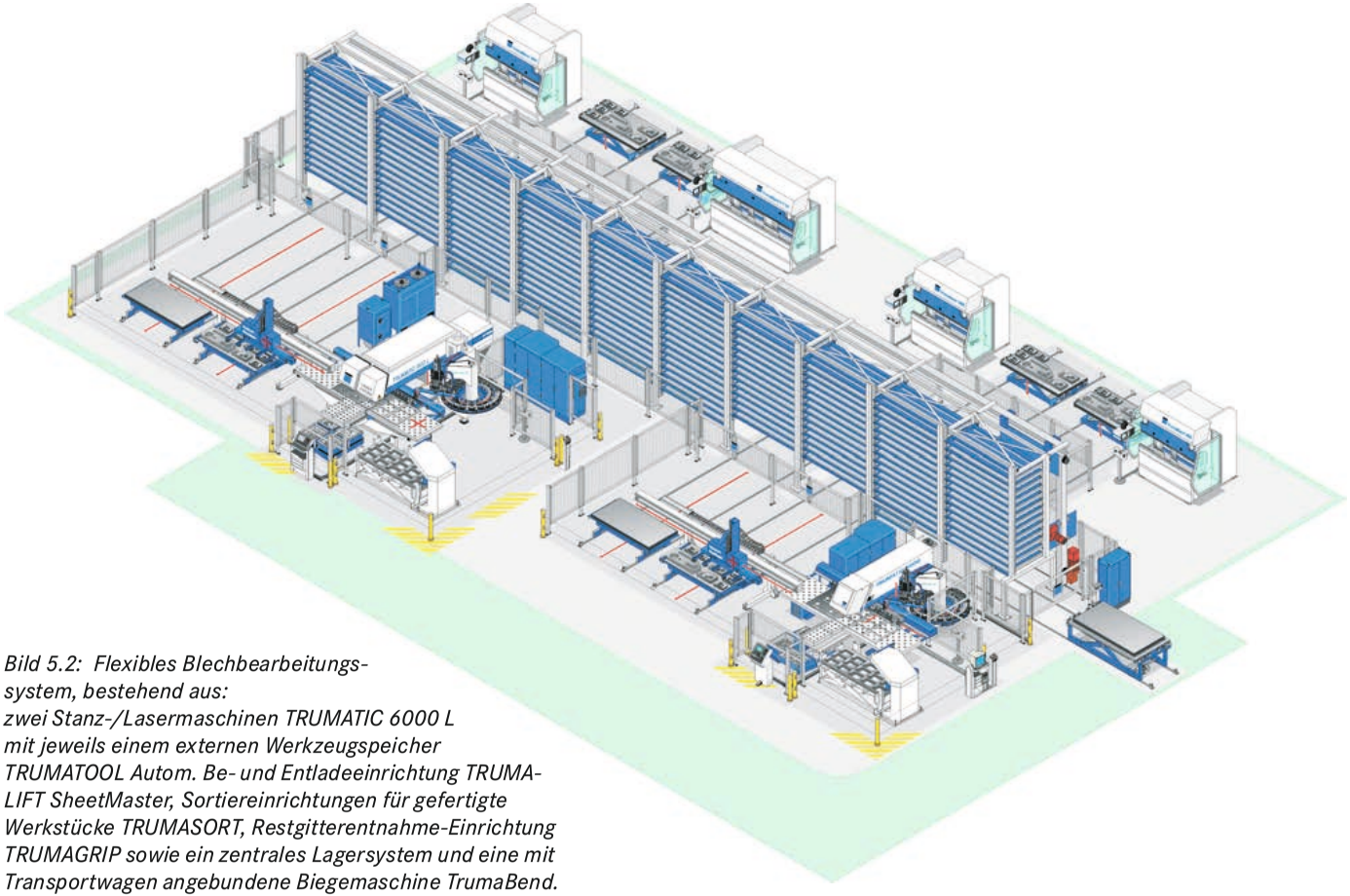


Bild 5.2: Flexibles Blechbearbeitungssystem, bestehend aus: zwei Stanz-/Lasermaschinen TRUMATIC 6000 L mit jeweils einem externen Werkzeugspeicher TRUMATOOL Autom. Be- und Entladeeinrichtung TRUMALIFT SheetMaster, Sortiereinrichtungen für gefertigte Werkstücke TRUMASORT, Restgitterentnahme-Einrichtung TRUMAGRIP sowie ein zentrales Lagersystem und eine mit Transportwagen angebundene Biegemaschine TrumaBend. (Werkbild TRUMPF) www.trumpf.com

men und zum Spannfutter bringen. Dort tauscht ein Doppelgreifer das bearbeitete mit dem unbearbeiteten Werkstück aus und legt das bearbeitete Teil in einem Fertigteilebehälter ab.

Die **Zielvorgaben** für flexible Fertigungssysteme lauten generell:

- Unterschiedliche Werkstücke
- mit unterschiedlichen Bearbeitungen
- in beliebiger Reihenfolge
- in wechselnden Losgrößen
- vollautomatisch, ohne manuelle Eingriffe
- wirtschaftlich fertigen.

5.2 Flexible Fertigungsinseln

Das Konzept der flexiblen Fertigungsinsel sei hier nur erwähnt, um ursprüngliche Definitionsfehler zu korrigieren. Es handelt sich dabei um eine spezielle Organisationsform einer flexibel einsetzbaren Werkstatt, die mit den hier besprochenen flexiblen Fertigungssystemen nichts gemeinsam hat!

Heute versteht man unter einer flexiblen Fertigungsinsel einen abgegrenzten Werkstattbereich mit mehreren konventionellen und CNC-Werkzeugmaschinen und anderen Einrichtungen, um an einer begrenzten Auswahl von Werkstücken alle erforderlichen Arbeiten durchführen zu können. Wesentlich dabei ist die räumliche und organisatorische Zusammenfassung der Maschinen und Betriebsmittel zur möglichst vollständigen Bearbeitung dieser Teile. Die dort beschäftigten Menschen planen, entscheiden und kontrollieren die durchzuführenden Arbeiten weitgehend selbst. Dabei wird auf eine starre Arbeitsteilung verzichtet und ein erweiterter Dispositions- und Aufgabenspielraum für den Einzelnen erreicht.

Fertigungsinseln sind dort vorteilhaft, wo der Produktionsprozess den flexiblen und universell einsetzbaren Mitarbeiter im Fertigungsprozess benötigt.

Die Mitarbeiter in einer flexiblen Fertigungsinsel organisieren die einzelnen Arbeitsgänge selbst und meistens ohne vorgesetzten Meister. Alle anfallenden Arbeiten werden in der Gruppe besprochen, disponiert und zugeteilt. Wichtig ist in den meisten Fällen, dass der vorgegebene Termin eingehalten wird und die Qualität einwandfrei ist. Dazu sind flexible, von den Mitarbeitern selbst eingeteilte Arbeitszeitmodelle von Vorteil. Teamarbeit und Selbstorganisation unterstützen den flexiblen Fertigungsgedanken und tragen dazu bei, Motivation und Arbeitsqualität zu verbessern.

5.3 Flexible Fertigungszellen

(Bilder 5.3 bis 5.5)

Darunter versteht man eine alleinstehende CNC-Maschine, meistens ein Bearbeitungszentrum, ein Drehzentrum oder eine andere CNC-Maschine, die durch zusätzliche Automatisierungseinrichtungen für einen zeitlich begrenzten, bedienerlosen Betrieb ausgerüstet ist. Dazu sind folgende Ausbaustufen notwendig:

- Ein ausreichender **Teilevorrat** in Form von bestückten Paletten oder als Einzelteilspeicher für einen etwa einschichtigen Betrieb
- Eine automatische **Beschickung** der Maschine aus dem Werkstückspeicher und Rückführung der bearbeiteten Teile in den Teilespeicher
- Ein erweiterter **Werkzeugspeicher**, um bei schnell wechselnden Werkstücktypen ohne ständigen Werkzeugaustausch arbeiten zu können
- Ein automatischer **Werkzeugwechsel** mit **Überwachungseinrichtung** zur

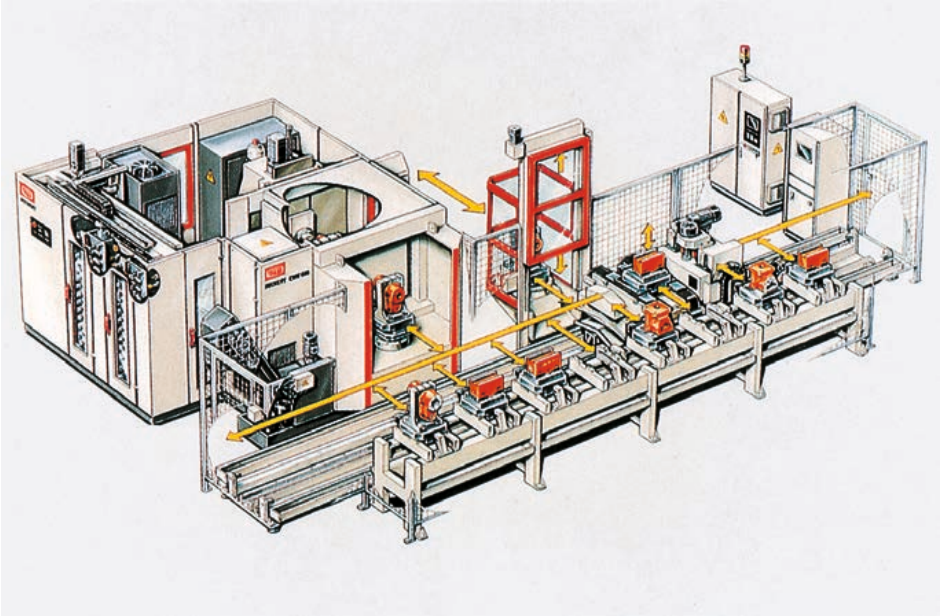


Bild 5.3: Flexible Fertigungszelle mit linearem Palettenspeicher.
Die Zelle besteht aus einem Bearbeitungszentrum, einem Transportwagen für die Paletten, mehreren Spann- und Speicherplätzen für die Paletten und einer Zellensteuerung (HECKERT)

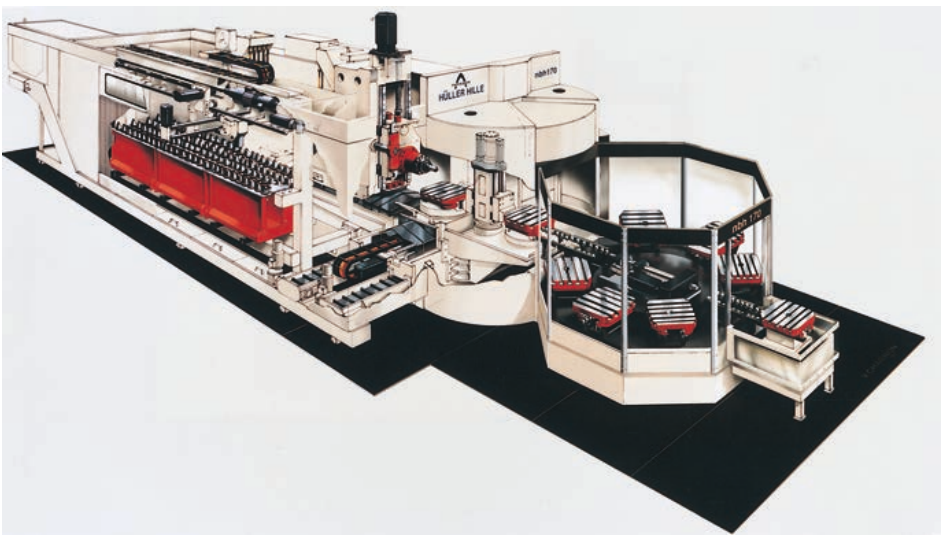


Bild 5.4: Flexible Fertigungszelle mit Rundspeicher für acht Paletten und maschinenintegriertem Palettenwechsler (Hüller Hille)

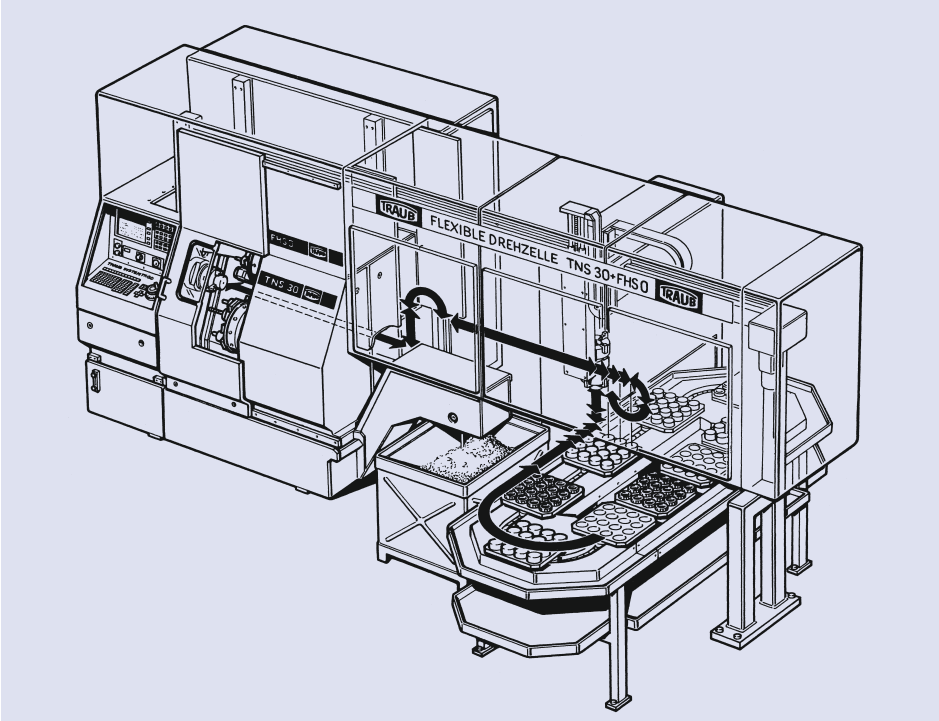


Bild 5.5: Flexible Fertigungszelle für Drehteile.
Den Werkstückwechsel übernimmt ein Portalroboter: Er entnimmt die Rohlinge aus einer Palette und legt die fertigen Werkstücke in einer anderen Palette ab (TRAUB)

Kontrolle auf Bruch oder Verschleiß mit automatischem Aufruf von Schwesterwerkzeugen

- Eine **Maßüberwachung** der bearbeiteten Werkstücke, z. B. über Messtaster und entsprechende Auswertsoftware, um die Korrekturwerte automatisch nachzustellen oder bei Toleranzüberschreitung automatisch abzuschalten (Bruchüberwachung)
- Eine automatische **Stillsetzung** der Maschine nach Abarbeitung des Teilevorrates oder bei Fehlermeldung.

Das Be- und Entladen der Paletten für den personallosen Betrieb in der dritten Schicht erfolgt in der Regel manuell während der ersten und zweiten Schicht.

Die erforderliche **Speicherkapazität des Werkstückspeichers** ist in erster Linie von der Bearbeitungszeit pro Werkstück abhängig. Bei einer mittleren Bearbeitungszeit von 30 Minuten reichen 16 Paletten für 8 Stunden Fertigung aus. Manche Betriebe belasten die Maschinen während der Auslaufschicht nicht mit voller Leistung, sodass bei ca. 60 % Leistung 10 Paletten ausreichen. Dies spart Paletten samt Palettenplätzen und erhöht die Sicherheit gegen Werkzeugbruch. Der Einsatz von Spannvorrichtungen für Mehrfachspannungen erhöht die Bearbeitungszeit der

Paletten und reduziert dadurch die Anzahl der Palettenwechsel.

Bei einzeln zugeführten Teilen sollten 30 Minuten Bearbeitungszeit nicht unterschritten werden, sodass für eine 8-Stunden-Schicht ca. 16 Teile pro Maschine bereitzustellen sind.

Kürzere Bearbeitungszeiten erfordern größere Paletten- oder Werkstückspeicher und stellen wegen des höheren Aufwandes die Wirtschaftlichkeit in Frage. Um mit wenigen gleichartigen Spannvorrichtungen auszukommen, sollte auch die Bearbeitung mehrerer unterschiedlicher Werkstücke möglich sein. Dies erfordert größere Programmspeicher in der CNC. Der DNC-Betrieb erlaubt auch die zentrale Verwaltung der CNC-Programme und verhindert, dass CNC-Programme mit gleichen Namen, aber verschiedenen Inhalten existieren.

Nach der Bearbeitung oder bei Bearbeitungsabbruch ist die Palettencodierung entsprechend zu ändern bzw. die **Transportsteuerung** zu informieren, dass diese Palette nicht mehr in die gleiche Maschine gelangt. Das Gleiche lässt sich auch durch eine entsprechende Verwaltungssoftware in der CNC vornehmen, sodass der Bediener am nächsten Morgen am CNC-Bildschirm den Bearbeitungszustand der einzelnen Werkstücke erkennen kann: Bearbeitung komplett, abgebrochen oder unbearbeitet.

Gelegentlich fasst man auch zwei identische CNC-Maschinen zu einer Bearbeitungseinheit zusammen und bezeichnet dies als „Doppelzelle“.

5.4 Technische Kennzeichen flexibler Fertigungssysteme

(Bild 5.6)

Um die hohen Automatisierungsanforderungen zu erfüllen, müssen flexible Fertigungssysteme für die Zerspanung prismatischer Teile folgende technischen Kennzeichen aufweisen:

- Mehrere FFS-**geeignete CNC-Maschinen**, meistens flexible Fertigungszellen, deren Größe und Anzahl dem zu bearbeitenden Teilespektrum und den geforderten Stückzahlen entspricht
- Einen ausreichenden **Werkstück-Vorrat**, um während einer begrenzten, aber möglichst langen Zeit einen automatischen, personalarmen oder personallosen Betrieb gewährleisten zu können
- Ein automatisches **Werkstücktransport** und -**wechselsystem**, das die Teile vom Aufspannen der Rohteile bis zum Abspannen der bearbeiteten Teile verwaltet und transportiert
- Ein DNC-System zur automatischen **Verwaltung und Bereitstellung der CNC-Programme** und der Korrekturwerte für Werkzeuge und Vorrichtungen
- Eine automatische **Werkzeugversorgung** mit Verwaltung aller Werkzeugdaten und -korrekturwerte vom Einstellgerät bis zur Maschine und zurück
- Eine automatische **Späneentsorgung** jeder Maschine
- Eine automatische **Reinigung** von Werkstück, Spannvorrichtung und Palette in den Bearbeitungsmaschinen oder in separaten Waschmaschinen sowie anschließendes Trockenblasen
- **Leitrechner, Messstationen, Zentralüberwachung, MDE/BDE und Fehler-Diagnosesystem** werden nach Bedarf und Anforderungen installiert.
- Eine prozesssichere Teilebearbeitung

Trotz des hohen technischen Aufwandes **haben installierte flexible Fertigungssysteme auch ihre Grenzen** und zwar bezüglich

- Größe, Gewicht, Form und Material der bearbeitbaren Werkstücke
- Art der durchführbaren Bearbeitungen

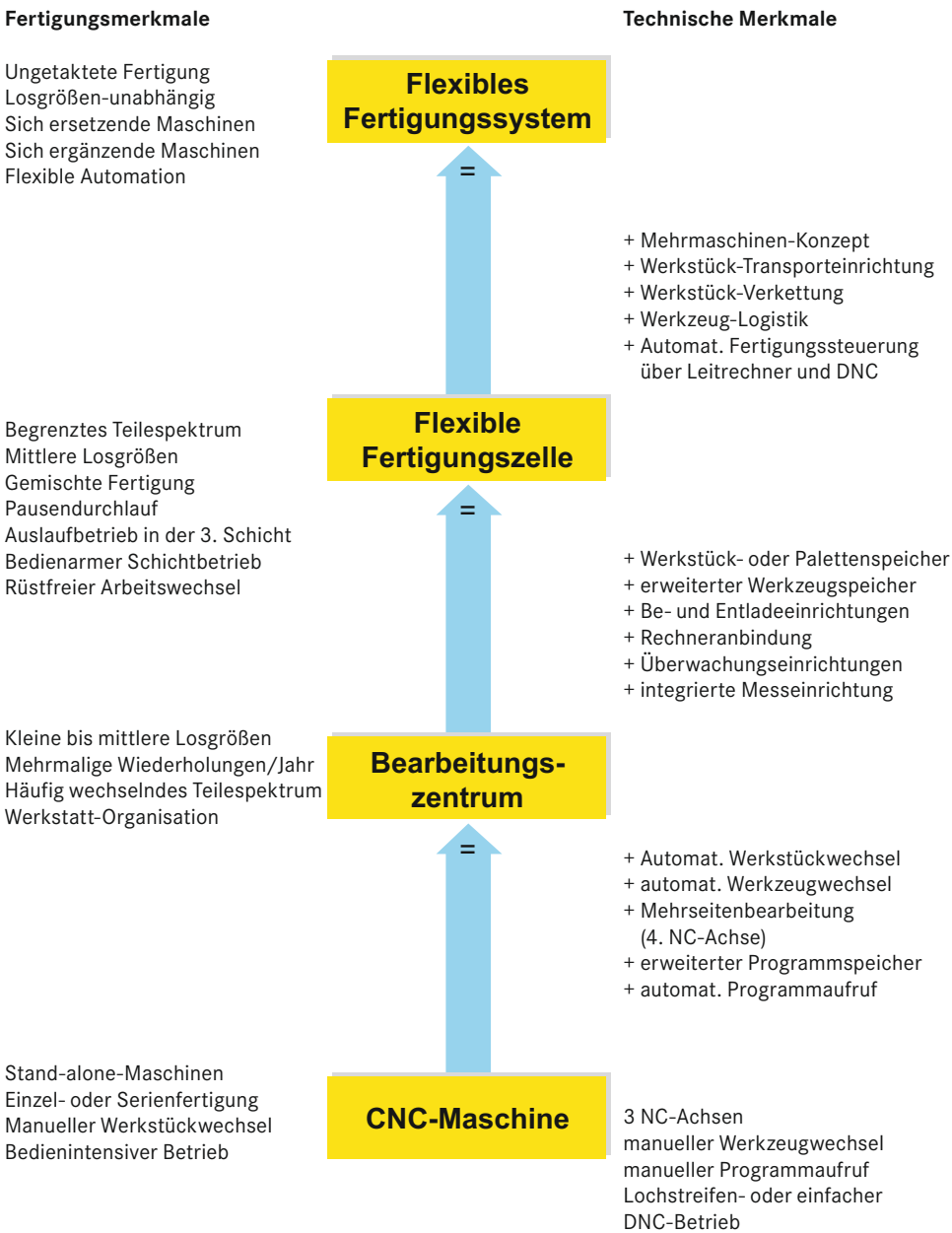


Bild 5.6: In drei Ausbaustufen von der CNC-Maschine zum FFS

(3, 4 oder 5 Seiten, schräge Flächen oder Bohrungen, Technologien)
- Ausbringung des Systems (Stückzahlen pro Stunde)
- Art und Anzahl der verfügbaren Sonder-Werkzeuge
- Genauigkeit der bearbeiteten Werkstücke.

5.5 FFS-Einsatzkriterien *(Bild 5.7)*

Flexible Fertigungssysteme haben sich ganz besonders dort bewährt, wo vorhandene Produkte nur in **kleineren bis mittleren Stückzahlen** gefertigt werden können, oder bei Anlauf- und später bei der Ersatzteilfertigung.

Dazu zwei **typische Beispiele:**

Ein Betrieb stellt Pneumatikzylinder in vier verschiedenen Durchmessern her. Zwischen der kleinsten und der größten Länge kann der Kunde in Millimeter-Abstufungen frei wählen. Die Lagerhaltung sämtlicher Ausführungen hat sich schon beim ersten Ansatz als viel zu teuer erwiesen. Man musste ein System entwickeln, das die Fertigung eingehender Bestellungen innerhalb von 24 Stunden ermöglicht, um am folgenden Tag ausliefern zu können. Das ließ sich auch in idealer Weise realisieren. Zylinderrohr, Kolbenstange und Spannschrauben werden jetzt auftragsbezogen zusammengefasst, gefertigt, geprüft und kommissioniert. Kolben, Deckel und Muttern sind als einheitliche Serienteile an den Montageplätzen vorhanden.

Dieses Prinzip hat man inzwischen erfolgreich auf weitere Produkte übertragen.

Ein anderer Betrieb musste die Serienfertigung für ein noch in Entwicklung befindliches neues Produkt vorbereiten. Es wurden sofort nach Markteinführung größere Stückzahlen erwartet, jedoch mit mehreren Varianten. Man wusste auch, dass sich während der Lieferzeit von ca. 18 Monaten für die Maschinen das vorgelegte Musterteil noch erheblich verändern würde. Eine Fertigung auf Einzweckmaschinen

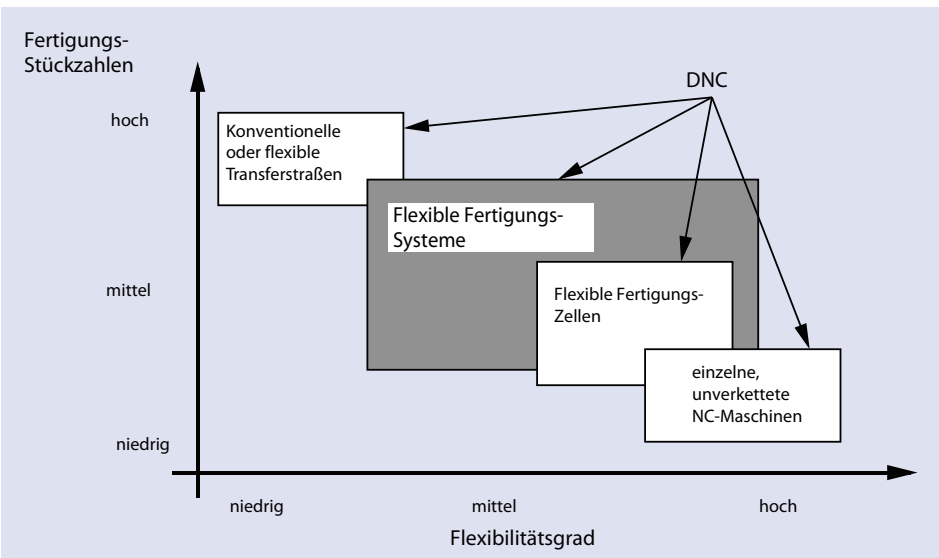


Bild 5.7: Einsatzkriterien flexibler Fertigungszellen und -systeme

oder Transferlinien schied demnach von vornherein aus, denn man hätte die Maschinen ständig den sich ändernden Formen und Bearbeitungen anpassen müssen. Die Lösung war ein flexibles Fertigungssystem, bestehend aus mehreren einheitlichen Bearbeitungszentren. Damit ließen sich die Konstruktionsänderungen und Varianten problemlos realisieren. Nach der Einführungsphase wurden für die schnell zunehmenden Stückzahlen Transferstraßen und Rundtaktmaschinen installiert, auf denen die Großserien-Produktion der Standardteile erfolgte. Das FFS war noch mehrere Jahre zur Herstellung kleiner Stückzahlen in Spezialausführung voll ausgelastet.

Aus *Bild 5.7* lässt sich dieser zwischen Einzelmaschinen und Transferstraßen liegende Einsatzbereich von FFS gut erkennen. Er ist nach den langjährigen positiven Erfahrungen erheblich größer geworden.

Die **Planung** eines flexiblen Fertigungssystems beginnt mit der Analyse der infrage kommenden Teile. Dazu werden sie nach Größe, Gewicht, Material, Stückzahl, Losgröße und Variantenvielfalt erfasst. Daraus ergeben sich die notwendigen Bearbeitungen, die Anzahl der Werkzeuge und die Bearbeitungszeiten. Auf dieser Basis lassen sich Art, Anzahl und Größe der erforderlichen Werkzeugmaschinen bestimmen. Gleichzeitig werden Spannart, Bearbeitungsfolge und die Anzahl der zu steuernden CNC-Achsen festgelegt.

Jedes Flexible Fertigungssystem sollte für den Anwender unter weitestgehender Verwendung von Standard-Komponenten maßgeschneidert sein. Es sollte nicht nur die aktuell in Frage kommenden Teile, sondern auch die zukünftigen Planungen des Anwenders und die Produktionsstrategien berücksichtigen.

Die Integration bereits vorhandener CNC-Maschinen in ein FFS ist zwar möglich, sollte jedoch im Interesse eines einheitlichen, ungestörten Konzeptes nicht zur Forderung erhoben werden. Dagegen lassen sich konventionelle, handbediente oder mechanisch programmierte Maschinen nicht in ein flexibles Fertigungssystem integrieren. Dies scheitert an den für diese Maschinen nicht vorhandenen Palettenwechsel-Einrichtungen und der starren, nicht automatisch änderbaren Programmierung.

Dagegen ist unter bestimmten Voraussetzungen der Einsatz numerisch gesteuerter Einzweck-Sondermaschinen sinnvoll, wie z. B. Bohrkopfwechsler, Planfräsmaschinen oder Sonder-Bearbeitungseinheiten.

Flexible Fertigungssysteme sind demnach keine neuen Maschinen, sondern eine Kombination bereits verfügbarer Komponenten: Bearbeitungs-, Automatisierungs- und Informationssysteme.

5.6 Fertigungsprinzipien

(Bild 5.8)

Grundsätzlich bestehen mehrere Möglichkeiten, Teilefamilien auf CNC-Maschinen zu bearbeiten. Dies sind:

- **Ergänzende Bearbeitungen auf mehreren Maschinen nacheinander in mehreren Aufspannungen** *(Bild 5.8 a)*

Dies erfordert einen entsprechenden Platzbedarf zwischen den Maschinen, um die halbfertigen Teile zwischenzulagern, sowie ein mehrmaliges Spannen/Entspannen der Teile, was sich negativ auf die Genauigkeit auswirkt. Zudem besteht die Gefahr, dass bei Ausfall einer Maschine die gesamte Produktion stillsteht.

- **Getaktete, ergänzende Bearbeitungen auf mehreren CNC-Maschinen nacheinander in einer Aufspannung** *(Bild 5.8 b)*

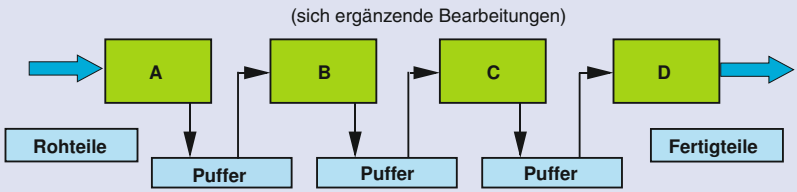


Bild 3.8a: Ergänzende Bearbeitung auf NC-Maschinen und konventionellen Maschinen

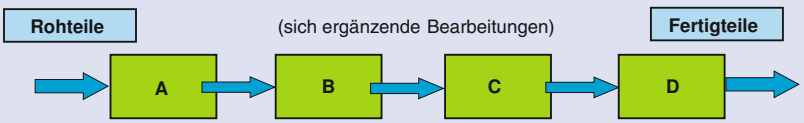


Bild 3.8b: Bearbeitung auf einer flexiblen Transferlinie mit „sich ergänzenden Maschinen“

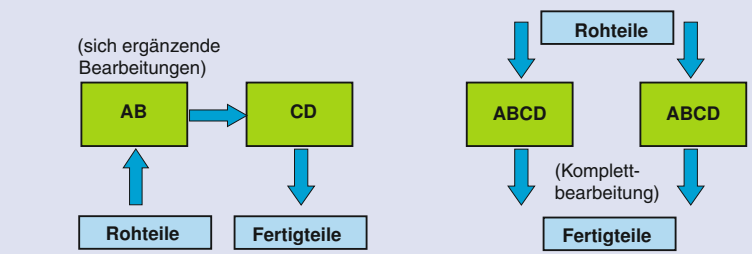


Bild 3.8c: Fertigung auf Bearbeitungszentren ohne automatische Werkstücktransport

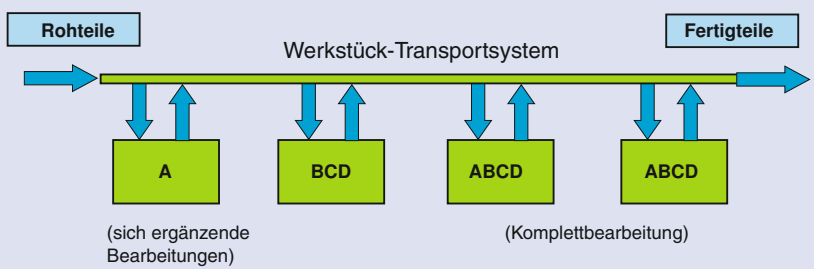


Bild 3.8d: Fertigung auf FFZ und FFS mit „sich ersetzenden Maschinen“ und unterschiedlichen Bearbeitungsprinzipien, je nach Werkstückgruppe, und automatischem Werkstücktransport.

Bild 5.8: Fertigungsprinzipien mit unverketteten und verketteten Maschinen. ABCD bezeichnet die verschiedenen Bearbeitungen an den Werkstücken, wie z. B. Fräsen, Bohren, Reiben, Gewindeschneiden.

Mögliche Lösung bei hohem Werkzeugbedarf. Paletten-Abstellplätze oder Werkstück-Lagerplätze zwischen den Maschinen entfallen.

Die ergänzende Bearbeitung (A+B+C+D) erfordert die Aufteilung der CNC-Programme in mehrere Einzelprogramme mit einheitlichen Bearbeitungszeiten, um Leerlaufzeiten einzelner Maschinen zu vermeiden.

Bei Ausfall einer Maschine besteht jedoch die gleiche Gefahr wie bei *Bild 5.8 a.*

- **Fertigbearbeitung in einer Aufspannung in einer oder zwei Maschinen**

Ergänzende Bearbeitung AB + CD oder Komplettbearbeitung ABCD. Damit werden höhere Genauigkeiten und geringere Nebenzeiten erreicht. Ohne automatischen Werkstücktransport wären Werkstück-Lagerplätze an jeder Maschine erforderlich *(Bild 5.8 c).*

Dies ist das typische Einsatzgebiet von alleinstehenden CNC-Maschinen, meistens Bearbeitungszentren, Doppelzellen oder Drehzellen. Automatische Werkstückwechsler an jeder Maschine vermeiden unnötige Stillstandszeiten.

- **Fertigbearbeitung in einem FFS mit automatischem Werkstücktransport** *(Bild 5.8 d)*

Geeignet zur gleichzeitigen Fertigung mehrerer, auch unterschiedlicher Werkstücke in beliebigen Losgrößen. Wichtig ist, dass mit jedem Werkstückwechsel auch immer das zugehörige CNC-Programm, die Werkzeuge und die Spannvorrichtungen vorhanden sind.

Der zur Bearbeitung vorbereitete Werkstückvorrat befindet sich abholbereit auf mehreren, gemeinsam genutzten Palettenabstellplätzen. Sowohl für die ergänzende Bearbeitung auf zwei oder mehr Maschinen (A + BCD), oder für die Komplettbearbeitung (ABCD) geeignet.

Heutige flexible Fertigungssysteme nutzen vorwiegend das in *Bild 5.8 d* dargestellte Prinzip.

5.7 Maschinenauswahl und -anordnung

Die Auswahl der Werkzeugmaschinen richtet sich nach der Werkstückgröße und den durchzuführenden Bearbeitungen. Je nach dem ausgewählten Fertigungsprinzip *(Bild 5.8)* können sowohl Universalmaschinen (Bearbeitungszentren, flexible Fertigungszellen), als auch Einzweckmaschinen (Mehrspindel-Bohrkopfwechsler, Fräseinheiten) oder Sondermaschinen in einem FFS zusammengestellt werden. Manchmal ist es auch erforderlich, Maschinen unterschiedlicher Hersteller zu kombinieren. Dabei ist zu fordern, dass alle Maschinen mit einheitlichen Werkzeugaufnahmen, einheitlichen Palettenwechslern und einheitlichen Tischhöhen versehen werden können.

Voraussetzung ist, dass alle Maschinen über FFS-geeignete numerische Steuerungen verfügen.

Für die **Planung und Ausführung des Gesamtsystems** sollte ein erfahrener Hersteller beauftragt werden. Dieser vergibt auch die Aufträge an die Unterlieferanten und sorgt für einheitliche Schnittstellen. Dadurch bleibt die Verantwortung für die spätere Funktion des Gesamtsystems in einer erfahrenen Hand!

Auch für die Planung der zu integrierenden Waschmaschinen, Messmaschinen, Wendespanner sowie für das Transportsystem mit Paletten, Rüstplätzen und Spannvorrichtungen sollte der Generalunternehmer verantwortlich sein. Eine werksinterne **FFS-Arbeitsgruppe** des Käufers sollte sehr eng mit den einzelnen Herstellern zusammenarbeiten und Planungsfehler rechtzeitig erkennen sowie möglichst mit-

tels eines leistungsfähigen Simulationssystems den späteren Betriebsablauf sehr genau unter die Lupe nehmen. Auch die Beschaffung eines geeigneten CNC-Programmiersystems und die Programmierung der zu fertigenden Teile kann bereits beginnen. Das FFS sollte nach seiner Installation sofort mit der Produktion beginnen können.

Nach dem heutigen **Stand der Erfahrungen** erscheint es ratsam, möglichst standardmäßige Maschinen und Steuerungen zu verwenden und keine „Spezial-Sonder-Zusatzentwicklungen" von den Herstellern zu fordern. Je mehr unterschiedliche Maschinentypen integriert werden, umso schwieriger wird es, bei Ausfall einer Maschine die Fertigung weiterzuführen. Grundsätzlich sollten die funktionsfähigen Maschinen die Arbeiten einer ausgefallenen Maschine problemlos übernehmen können, damit die Fertigung weiterläuft, wenn auch mit reduzierter Ausbringung. Dafür ist das Prinzip der „**sich ersetzenden Maschinen**" am besten geeignet.

Mit Blick auf die geforderte **Flexibilität** sollte auch keine Maschine so ausgelegt werden, dass sie nur für ein spezielles Werkstück verwendbar ist. Jede Maschine im FFS muss nach Austausch der Werkzeuge und mit einem anderen CNC-Programm universell (flexibel) einsetzbar sein. Nur so ist es möglich, die Fertigung den sich ändernden Marktforderungen oder Konstruktionsänderungen problemlos anzupassen. Auch eine spätere Systemerweiterung lässt sich leichter und billiger durchführen, wenn vorhandene Sondermaschinen keine schwer zu umgehenden Engpässe bilden.

5.8 Werkstück-Transportsysteme *(Bilder 5.9 bis 5.11)*

Die Projektierung flexibler Fertigungssysteme beginnt meistens mit der prinzipiellen Festlegung auf das am besten geeignete Werkstück-Transportsystem. Liegen Anzahl und Typenauswahl der im FFS zu installierenden Maschinen fest, dann erfolgt die Feinplanung der Maschinenanordnung und deren Anbindung an das Transportsystem. Oft ist die Aufstellfläche bereits vorgegeben – und meistens zu klein, sodass keine großen gestalterischen Spielräume verbleiben. Danach richtet sich dann auch das Werkstück-Transportsystem. Dabei stehen zur Auswahl:

- **Lineare, schienengebundene Systeme** mit 1 oder 2 Transportwagen *(Bild 5.9)*
- **Rollenbahn- oder Doppelgurt-Systeme** mit mehreren Paletten im Umlauf *(Bild 5.10)*
- **Flächensysteme** mit mehreren induktiv geführten Transportwagen (AGV = Automated Guided Vehicles *(Bild 5.11 und 5.12)*

Der automatische Werkstücktransport von der Spannstation zu den Maschinen und zurück ist eine wichtige Komponente eines FFS. Hierzu werden vorwiegend (standardisierte) Paletten verwendet, die sowohl den Transport, als auch das Ein- und Auswechseln der Teile an den Maschinen übernehmen. Zur Aufnahme und Fixierung der Werkstücke dienen die Spannvorrichtungen, die auf den Paletten befestigt werden. Dazu sind definierte und sehr genaue Fixierungen vorgesehen. Die Anzahl der Paletten in einem FFS ist durch die Zahl der Paletten-Transport- und -Abstellplätze plus Bearbeitungsstationen begrenzt. Durch Einsatz von mehrstöckigen Regalen und entsprechenden Regalbediengeräten lässt sich die 5. Dimension nutzen. Da Regalspei-

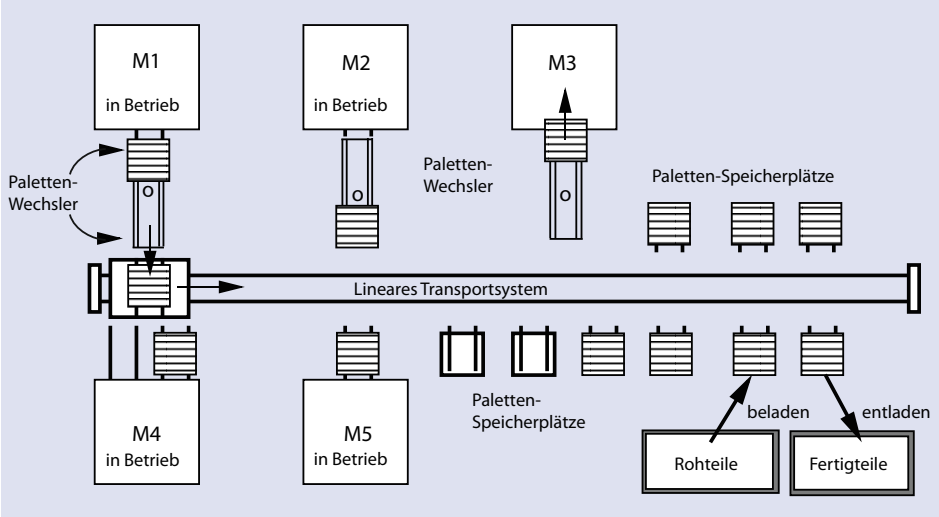


Bild 5.9: Lineares, schienengebundenes Transportsystem mit paralleler Anordnung der Maschinen beiderseite der Transportstrecke.
Kennzeichen: Der Transportwagen verfügt über einen Transportplatz.
Bei Bedarf kann ein Wagen mit zwei Plätzen oder ein zweiter Wagen hinzugefügt werden, mit entsprechender Änderung der Transportsteuerung.
Die gerüsteten Paletten werden auf Speicherplätzen abgelegt und bei Bedarf vom Transportwagen abgeholt.
Maschine 1 bis 3 sind mit Palettenwechslern ausgerüstet,
Maschine 4 hat je einen festen Ein-/Ausgangsplatz,
Maschine 5 ist mit nur einem Wechselplatz ausgerüstet.
Dadurch ergeben sich unterschiedliche Wechselstrategien.

cher auch doppelseitig ausgeführt werden können, sind der Anzahl der Ablageplätze im Regalspeicher sehr weite Grenzen gesetzt.

Das **Spannen und Entnehmen** der Teile in den Vorrichtungen erfolgt vorwiegend manuell. Kleinere Teile können in Mehrfach-Spannvorrichtungen gespannt werden, um die Gesamt-Bearbeitungszeiten zu verkürzen. Falls vorteilhaft, lassen sich auf diese Weise auch die erste und die zweite Aufspannung der Teile in einer Vorrichtung kombinieren. In zunehmendem Maße werden auch hydraulische Spannvorrichtungen eingesetzt, um z. B. Spannvorgänge zu vereinheitlichen und konstant zu halten.

Zur **Erkennung und Identifizierung** des auf einer Palette gespannten Werkstückes dient eine Codiereinrichtung an der Palette oder an der Vorrichtung. Diese wird vor Beginn der Bearbeitung in der Maschine elektronisch „gelesen“ und mit dem vorbereiteten CNC-Programm der Maschine verglichen. Davon ist die Startfreigabe für die Bearbeitung abhängig. Meistens kann auf diese Einrichtung verzichtet werden, denn die Transportsteuerung kann die Verwaltung, den fehlerfreien Transport und die Identitätskontrolle an den Maschinen zuverlässig übernehmen.

Das Transportsystem stellt sowohl technisch als auch kostenmäßig einen wesent-

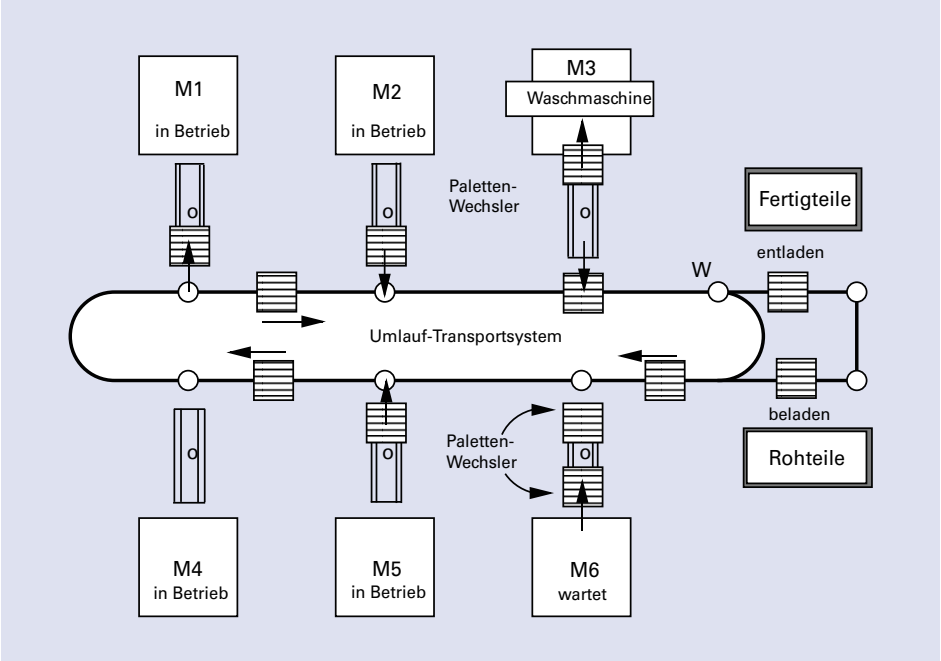


Bild 5.10: Paletten-Umlaufsystem mit paralleler Anordnung der Maschinen auf beiden Seiten der Transportstrecke.
Kennzeichen: Es sind keine zusätzlichen Paletten-Speicherplätze vorhanden. Die unbearbeiteten Werkstücke kreisen auf dem Transportsystem, bis ein Eingangsplatz eines Palettenwechslers frei ist.
Die Palettenwechsler vor den Maschinen sind gleichzeitig Ein- und Ausgangspuffer für je eine fertige und eine bearbeitete Palette. Die bearbeiteten Paletten werden nach dem Verlassen der Maschinen automatisch zu der Waschmaschine und dann an der Weiche W zu den Be-/Entladestationen geleitet.

lichen Anteil am Gesamtsystem dar. Deshalb ist es sehr wichtig, der Planung des Funktionsablaufes eine entsprechend hohe Aufmerksamkeit zu widmen, um unnötige Nachbesserungen, Kosten und Verfahrwege zu vermeiden.

Transportsysteme müssen **hohe Anforderungen** erfüllen, wie z. B.:

- Hohe Fahrgeschwindigkeiten, bei schienengebundenen Systemen bis 240 m/min und mehr
- Mehrere Transportwagen steuern
- Zügiges Andocken und Wechseln der Paletten
- Manuelle Eingriffsmöglichkeiten bei Störungen (z. B. Handbetrieb)
- Leistungsfähiger, zuverlässiger und zuordnungssicherer Transport der Paletten zu den einzelnen Stationen
- Einhaltung der Sicherheitsforderungen, z. B. bei Kollisionen, unerwarteten Hindernissen, Spannungsausfall, Steuerungsfehlern
- Erfüllung der Transportaufgabe mit möglichst geringem Kostenaufwand für

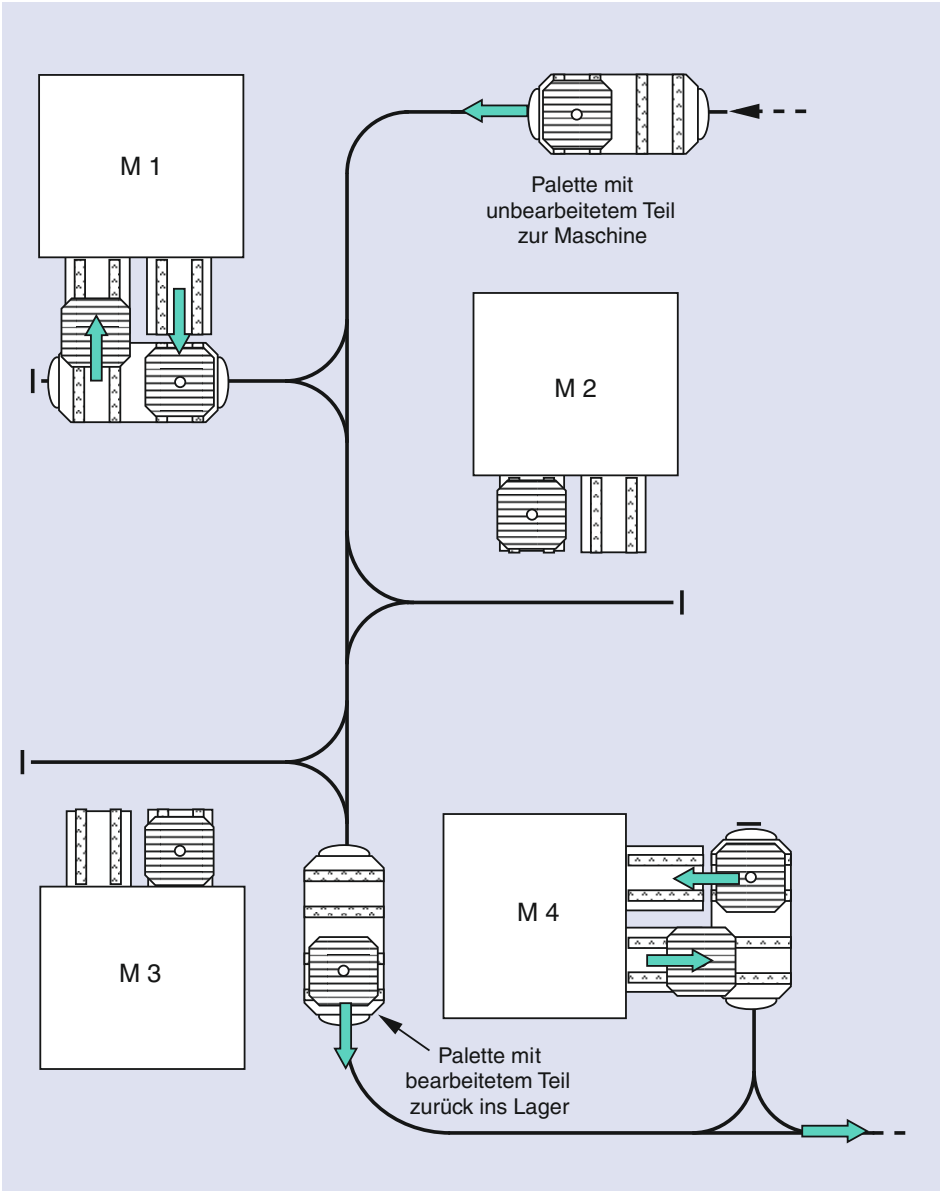


Bild 5.11: Flächen-Transportsysteme mit AGV (Automated Guided Vehicles) nutzen die vorhandenen Verkehrswege. Die Wagen werden durch einen Draht im Boden funkgesteuert. Kennzeichen: Die Maschinen können beliebig auf der vorhandene Fläche verteilt werden. Die Wagen fahren im „Einbahnverkehr" vom Materiallager zu den Maschinen und zurück. Dort werden sie entladen und mit neuen Werkstücken beladen. Die Fahrgeschwindigkeit ist aus Sicherheitsgründen begrenzt.

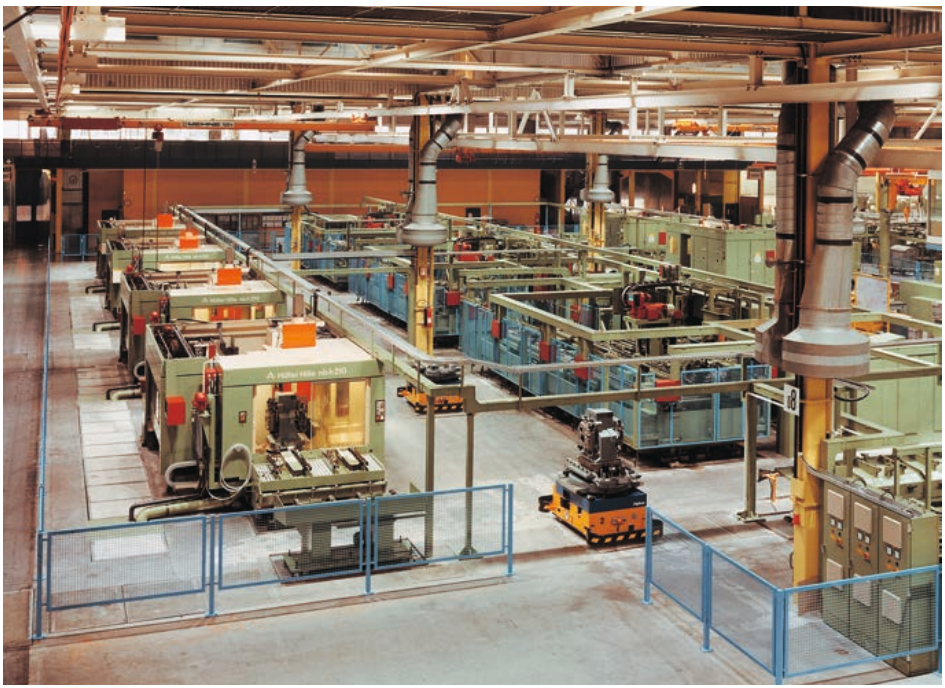


Bild 5.12: Transportwagen (AGV) für 1 Palette in einem FFS

Hardware, Software, Montage, Wartung, Steuerung und Funktionssicherheit

- Dauerhafte Gewährleistung der Bearbeitungsgenauigkeit der Werkstücke, d. h. die Palettenführung und -indexierung darf keinem Verschleiß durch den Transport und durch die Wechseleinrichtungen unterliegen
- An den Maschinen dürfen keine Wartezeiten wegen fehlender Paletten entstehen, was vor der Festlegung durch ein Simulationssystem feststellbar ist
- Die Rüst- und Spannplätze müssen so ausgelegt sein, dass das Wechseln der Spannvorrichtungen und der Werkstücke problemlos und schnell ablaufen kann
- Das Transportsystem sollte zur Integration zusätzlicher Maschinen einfach erweiterbar sein
- Wartung und Reparaturen müssen möglichst ohne längere Stillstandszeiten ablaufen
- Nach Möglichkeit sollten auch die auszutauschenden Werkzeuge zu und von den Maschinen transportiert werden können, um ein zusätzliches Werkzeug-Transportsystem einzusparen.

Rüst- bzw. Be- und Entladestationen stellen elementare Komponenten eines FFS dar. Ergonomische Lösungen berücksichtigen die Bedürfnisse der Bediener und erleichtern deren Arbeit. Dazu muss auch eine gute Zugänglichkeit zu den Paletten/Vorrichtungen/Werkstücken möglich sein, z. B. durch automatisches Absenken, Kippen und Drehen. Unfallgefährdende Podeste und Leitern zum Erreichen der Werkstücke werden vermieden.

Auswahl des Transportsystems

Es stehen mehrere unterschiedliche Transportsysteme zur Verfügung. Die richtige Auswahl ist abhängig von den Werkstückabmessungen und -gewichten, sowie von der Anordnung der Maschinen.

Am häufigsten sind **geradlinige, schienengebundene Transportsysteme** anzutreffen *(Bild 5.9 und 5.13)*. Sie sind platzsparend, haben eine hohe Verfahrgeschwindigkeit und die Wagen können wahlweise mit einem oder zwei Palettenplätzen ausgerüstet werden. Zudem bieten sie die Möglichkeit, die Maschinen nur auf einer oder auf beiden Seiten der Verfahrstrecke anzuordnen. Für eine spätere Systemerweiterung lässt sich die Strecke problemlos verlängern. Die Steuerungslogistik ist einfach und problemlos.

Die von der automatischen Montagetechnik bekannten **Paletten-Umlaufsysteme** unter Verwendung von **Doppelgurt-Transportbändern** sind grundsätzlich geeignet, jedoch nur für kleinere und nicht zu schwere Werkstücke. Hierbei tragen die Transportpaletten die auf Spannvorrichtungen aufgespannten Werkstücke und übergeben diese in die Maschinen. Die Paletten warten außerhalb der Maschinen und übernehmen die bearbeiteten Werkstücke für den Weitertransport. Bei Mehrmaschinenbearbeitung müssen die Werkstücke wieder auf ihre ursprüngliche Trägerpalette zurückkommen, wenn sich die teilespezifische Zielcodierung für die noch anzufahrenden Stationen an der Palette befindet. Bei größeren Paletten sind aufwändige Übergabestationen an den Maschinen erforderlich.

Auch **Rollenförderer**, bei denen die Paletten durch Reibverbindung auf angetriebenen Rollenstrecken transportiert werden, sind serienmäßig verfügbar. Die Gesamtstrecke lässt sich aus mehreren Bahnsegmenten zusammensetzen und entsprechend gestalten. Transporthöhe und Bahnbreite sind anpassbar. Die Belastbarkeit reicht bis ca. 750 kg pro Meter, die Transportgeschwindigkeit ist von 1 bis ca. 12 m/min wählbar. Der Antrieb erfolgt über Elektro-Getriebemotoren. Ihr Einsatz ist sehr selten.

Ähnliches gilt für **Rollenbahnen mit Staurollenketten**. Hierbei übernehmen Rollenketten den Palettentransport, an den Ecken steuern Weichen oder Schwenkeinheiten die Änderung der Transportrichtung.

Dagegen sind die von Montagebändern bekannten **Unterflur-Schleppkettenförderer** wegen des zu hohen Installations- und Reparaturaufwandes und wegen hoher Störungsanfälligkeit nicht mehr anzutreffen.

Bei größeren Paletten oder schweren Werkstücken haben sich fahrerlose **Flurförderzeuge** (AGV) bewährt, deren Größe spezifisch unterschiedlich ist *(Bild 5.12)*. Die Wagen folgen funkgesteuert einem im Boden eingelassenen Draht, wobei auch Weichen und Warteplätze möglich sind. Sie nutzen die bereits vorhandenen Verkehrswege und können fast jeden beliebigen Punkt im Werkstattbereich erreichen. Bereits vorhandene Maschinen können an ihrem Platz und auf den teueren Fundamenten stehen bleiben, entfernt liegende Material- und Werkzeuglager lassen sich ebenfalls in den Materialfluss integrieren. Die Fahrgeschwindigkeit der Wagen ist aus Sicherheitsgründen wesentlich niedriger als bei linearen, schienengebundenen Transportsystemen. Deshalb müssen meistens mehrere Wagen gleichzeitig unterwegs sein.

Bei Drehzellen kommen für das Ein- und Auswechseln der Teile vorwiegend **Handhabungsgeräte, Portal- oder Flächenroboter** zum Einsatz. Als Alternative sind

auch Maschinen vertikaler Bauart einsetzbar, die ohne separate Handhabungsgeräte auskommen.

Funktionsablauf des Transportsystems

Das Kernstück eines FFS ist ein intelligent funktionierendes Transportsystem und damit die Transportsteuerung. Im Gegensatz zu Systemen mit Palettenumlauf erfordern lineare, schienengebundene und mit Flurförderzeugen ausgerüstete FFS eine zentrale Steuerung. Dabei muss sich die jeweilige Transportstrategie der aktuellen Situation des Systems anpassen, d. h. beim Anfahren, bei Normalbetrieb, beim Umrüsten und zum Leerfahren (Auslaufbetrieb) ändert sich die Logistik entsprechend der Aufgabe.

Betrachten wir uns zunächst den Funktionsablauf bei Normalbetrieb des FFS *(Bild 5.13)*.

Auf den Palettenabstellplätzen stehen mehrere unterschiedliche Werkstücke abholbereit, die Maschinen arbeiten und der Transportwagen befindet sich in Warteposition für den nächsten Transportauftrag. An den beiden Spannplätzen steht ein Maschinenbediener bereit, um die bearbeiteten Werkstücke von den Spannvorrichtungen zu entnehmen und neue Rohteile aufzuspannen.

Alle Maschinen verfügen über zwei Paletten-Übergabestationen, die linke für das ankommende, unbearbeitete, die rechte für das abholbereite, bearbeitete Werkstück. Alternativ werden auch Palettendrehwechsler eingesetzt. Jede Maschine im FFS kann mit den CNC-Programmen für die Bearbeitung aller Werkstücktypen im System programmiert werden und ist mit den dazugehörigen Werkzeugen ausgerüstet. Weiterhin sind eine Waschmaschine (M4) und eine Messmaschine (M5) im System integriert.

Der automatische Ablauf erfolgt nach folgender **Strategie:**

1. Maschine 2 ist mit der Bearbeitung fertig und hat die Palette auf dem rechten Wechselplatz abgestellt. Vom linken Platz hat sie die bereitstehende Palette zur Bearbeitung übernommen.
2. Es gehen 2 Meldungen an die Transportsteuerung:
   a) Neue Palette bringen
   b) Fertige Palette abholen
3. Die Transportsteuerung weiß,
   a) welches Werkstück zur M2 muss (wurde vor Beginn der Bearbeitung eingegeben und gespeichert) und
   b) auf welchem Abstellplatz sich ein solches befindet (die Transportsteuerung hat diese Palette dort abgestellt und die Platznummer gespeichert)
4. Der Transportwagen fährt zuerst zu dem entsprechenden Abstellplatz, dockt an und übernimmt die Palette
5. Der Wagen fährt zur M2 und übergibt die Palette auf den freien, linken Wechselplatz
6. Anschließend übernimmt der Wagen die bearbeitete Palette vom rechten Wechselplatz und bringt sie zur Waschmaschine. Dort müssen alle Werkstücke gewaschen und getrocknet werden. Ist der Eingangsplatz von M4 belegt, stellt der Wagen die Palette vorübergehend auf einem freien Speicherplatz ab.
7. An der M4 übernimmt der Wagen vom rechten Wechselplatz eine saubere Palette, wenn vorhanden, und bringt diese zur Messmaschine. Befindet sich dort ein gemessenes Werkstück auf dem Ausgangsplatz, transportiert er dieses zu einem freien Spannplatz. Dort wird es manuell entspannt und bei den Fertigteilen abgelegt, falls die „GUT-Meldung“ von der Messmaschine vorliegt. Nach dem Spannen eines Rohteils betätigt der Bediener einen Signaltaster „Abholen“.

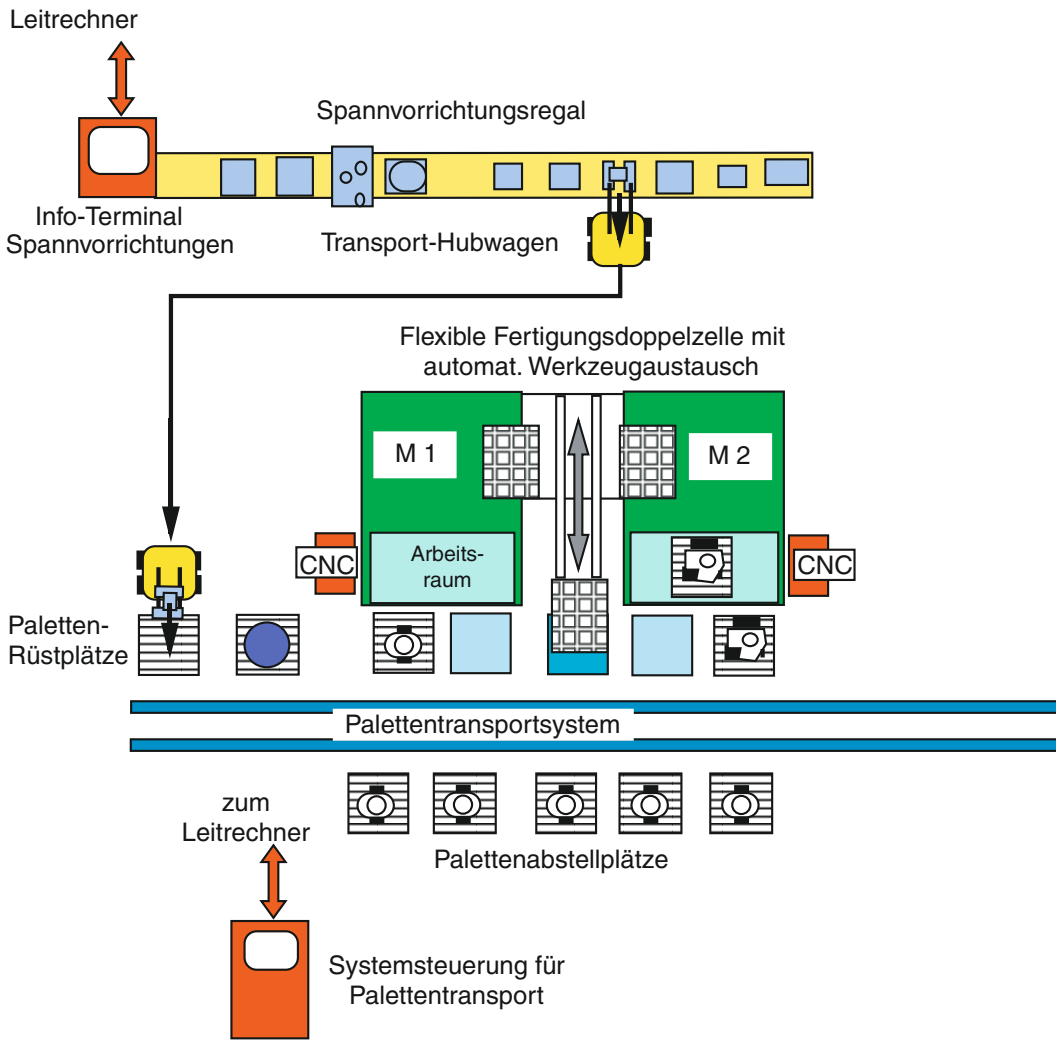
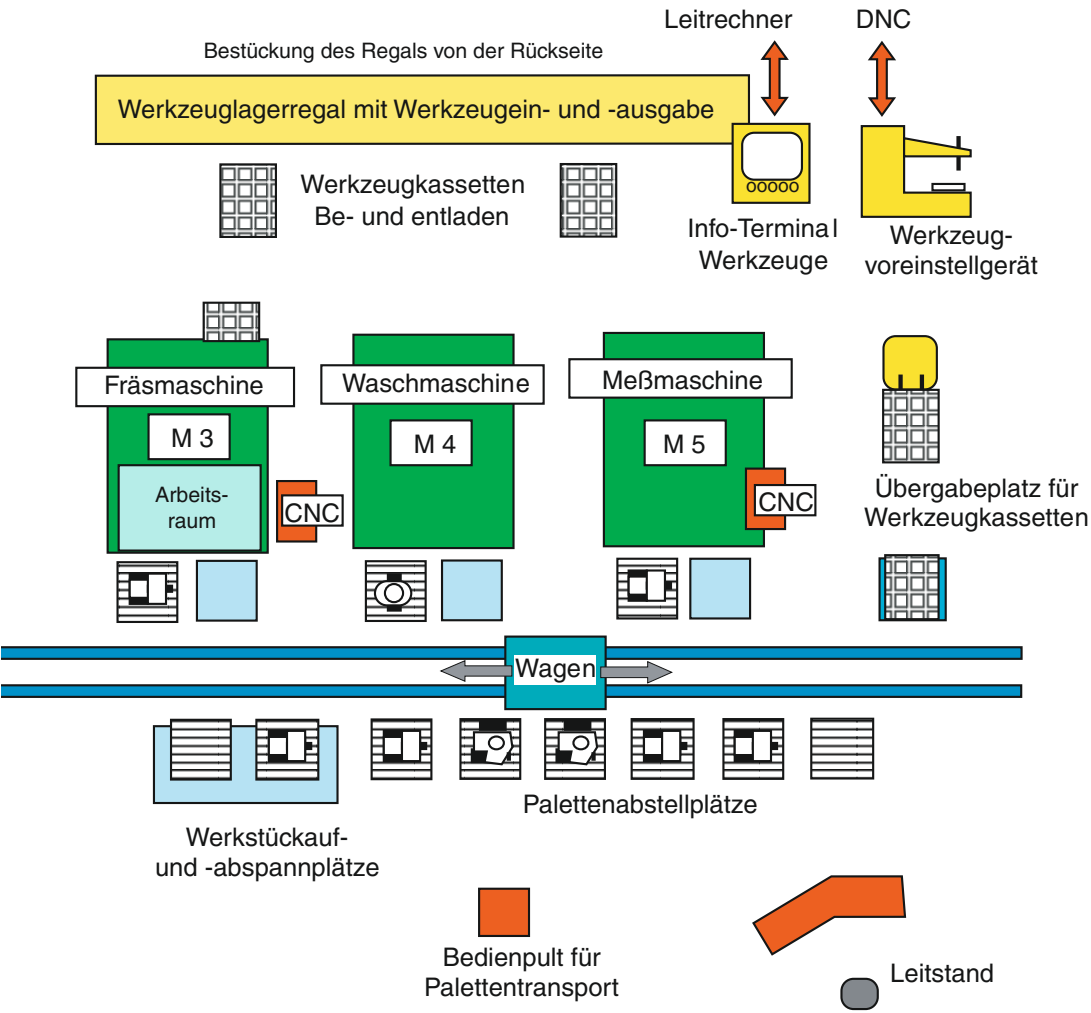


Bild 5.13: Typisches System-Layout eines flexiblen Fertigungssystems. Kennzeichen: Die Maschinen sind auf einer Seite des Transportsystems angeordnet, wodurch ein guter Zugang bei Wartungs- und Reparaturarbeiten besteht.



Die Palettenabstellplätze befinden sich auf der anderen Seite der Schienenstrecke, sodass bei optimaler Belegung kurze Fahrstrecken zurückzulegen sind.
Die flexible Doppelzelle wird mit Werkzeug-Austauschkassetten versorgt. Ein Portalroboter übernimmt das Werkzeughandling an den beiden Maschinen (M1 und M2).

8. Der Wagen, sobald frei, holt die Palette ab und legt sie auf einem freien Speicherplatz ab.

Diese Vorgänge wiederholen sich fortlaufend in chaotischer Reihenfolge. Jede Bewegung wird in einer steuerungsinternen Datenbank festgehalten, und zwar auch bei Ausfall der Netzspannung, um den problemlosen Wiederanlauf zu sichern. Vorübergehend abgestellte Paletten holt der Wagen automatisch, sobald der Ziel-Eingangsplatz frei ist.

Soweit der normale, ungestörte Ablauf. In der Praxis erhält die Transportsteuerung ständig neue Signale „Werkstück abholen" und „Werkstück bringen" von den einzelnen Stationen. Je nach vorgegebener Strategie und programmierter Priorität werden diese Aufträge gespeichert, nach Prioritäten geordnet und ausgeführt. An erster Stelle steht dabei sicherlich die Priorität, die Maschinen zu befüllen, d. h. ein neues Werkstück zu bringen und den Ausgangsplatz freizumachen.

Ist auf einem Ausgangsplatz ein fertiges Werkstück abholbereit und der Wagen ist frei, dann kann dieser Einzelauftrag ausgeführt werden, auch wenn kein Werkstück für den Eingangsplatz verfügbar ist.

Kommen die Transportaufträge für den Werkzeugaustausch und zum Palettenumrüsten noch dazu, dann entstehen weitere Aufgaben für die Logistik: Die umzurüstenden Paletten ausschleusen, Paletten mit Austauschwerkzeugen zu den dafür vorgesehenen Wechselplätzen bringen und von dort abholen, usw.

Soll eine Maschine oder das gesamte System leergefahren werden, ändert sich die Logistik ebenfalls: es wird kein neues Werkstück zu den Maschinen gebracht, nur abgeholt, Wasch- und Messmaschine jedoch müssen weiter bedient werden.

Ist bei **Auslaufbetrieb des Systems** kein unbearbeitetes Werkstück mehr verfügbar, schaltet die entsprechende Maschine ab, wenn sie z. B. während einer bestimmten Wartezeit keine Palette auf dem Eingangsplatz vorfindet. Sind alle Werkstücke bearbeitet, gewaschen und gemessen, schaltet das gesamte System ab.

Hieraus wird verständlich, dass bei größeren Systemen eine frühzeitige Simulation dieser Abläufe unumgänglich ist, um spätere Überraschungen und teuere Änderungen zu vermeiden. Dann werden Strategien modifiziert, die Transportgeschwindigkeiten bis zur Grenze erhöht und nach anderen Abhilfen gesucht. **Transportwagen mit zwei Plätzen** reduzieren die Nebenzeiten, weil mit einem Andock- und Fixiervorgang zwei Paletten gleichzeitig gewechselt werden können. Oder man muss einen zweiten Transportwagen einsetzen und die Fahrbefehle beider Wagen aufeinander abstimmen, um Kollisionen zu vermeiden.

Steuerung des Transportsystems

Die Steuerung ist dem jeweiligen Transportsystem angepasst. So sind für die Rollen- oder Doppelgurttransportbahnen völlig andere Steuerungsprinzipien notwendig als für schienengebundene oder AGV-Systeme. Beim Palettenumlauf übernimmt die Transportstrecke die Werkstücke und muss diese automatisch zu einer oder mehreren definierten Maschinen bringen. Dazu werden z. B. Palettencodierungen unter Verwendung von RFID-Systemen verwendet, die entsprechend programmiert sind. Sie werden unterwegs gelesen und transportieren jede Palette im freien Umlauf zielsicher zu den einzelnen Stationen. Nach erfolgter Bearbeitung wird die Palettencodierung beim Verlassen jeder Maschine so geändert, dass jetzt das nächste Transportziel (Werkzeugmaschine, Waschma-

schine, Messmaschine oder Spannplatz) daraus erkennbar ist.

Bei Umlaufsystemen mit Paletten-Stauräumen und Mehrfach-Spannwürfeln wäre erfahrungsgemäß eine Transportsteuerung ohne eindeutige Palettencodierung und -verwaltung sehr aufwändig oder bezüglich Sicherheit sogar überfordert.

5.9 FFS-geeignete CNCs

Leistungsfähige CNCs sind eine wesentliche Voraussetzung für den reibungslosen Betrieb eines FFS. Zwar wurden bereits erste FFS installiert, als noch keine CNCs verfügbar waren, doch die Leistungsfähigkeit und der Funktionsumfang dieser frühen Systeme ist mit den heutigen Anforderungen nicht vergleichbar. Um die Anforderungen eines automatischen und zeitweise unbemannten Betriebes zu erfüllen, müssen FFS-geeignete CNCs über mehrere spezielle Funktionen verfügen. Dazu zählen beispielsweise:

- Ein großer **Datenspeicher**, um für eine begrenzte Zeit vom DNC-Rechner unabhängig zu sein. Auch für die Werkzeug-Korrekturwerte, Nullpunktkorrekturen, Spanndifferenz-Korrekturen und für die Werkzeugdatenverwaltung wird viel Speicherplatz benötigt, jedoch ist bei der heutigen Steuerungstechnik ein großer Datenspeicher kein Problem.
- Eine leistungsfähige **Verwaltung** der gespeicherten Daten, um den gesamten Datenbestand jederzeit zu aktualisieren, anzuzeigen, überprüfen und korrigieren zu können. Und dies sowohl an der CNC, als auch von einer zentralen Steuerung oder vom Leitrechner aus
- Sind **mehrere CNC-Programme** in der CNC gespeichert, dann muss jedes Programm über einen externen Befehl definiert abrufbar und bei Betriebsbereitschaft automatisch startbar sein
- Der pausenlose Betrieb erfordert eine **CNC-interne Werkzeugverwaltung** für Ersatz- und Schwesterwerkzeuge, mit Standzeitüberwachung und automatischer Zuordnung der jeweiligen Korrekturwerte
- Programmabhängig müssen jedem Werkzeug **mehrere unterschiedliche Korrekturwerte** zuzuordnen sein, um die vorgegebenen Toleranzbereiche bei den einzelnen Bearbeitungen ausnutzen zu können
- Bearbeitete Werkstücke müssen mittels **Messtaster** und den speziellen, in der CNC gespeicherten Messprogrammen kontrollierbar sein. Je nach Messergebnis muss aus dem Messprotokoll ein GUT-/SCHLECHT-Signal ausgegeben werden
- Zum Anschluss an das DNC-System ist eine leistungsfähige **Datenschnittstelle** (z. B. Ethernet) für den bidirektionalen Datenverkehr zwischen DNC-Rechner und CNC unbedingte Voraussetzung
- Es ist eine **Paletten- oder Werkstückverwaltung** in der Transportsteuerung erforderlich, um Bearbeitungsprioritäten (Reihenfolge des Palettenaufrufs) vorgeben zu können; eine Statusanzeige muss schnell über den Gesamtzustand aller Werkstücke (Bearbeitet/Unbearbeitet/Bearb. abgebrochen/usw.) informieren
- Eine CNC-interne, automatische **Maschinen- und Betriebsdatenerfassung** (MDE/BDE) erfasst alle während der unbemannten Schicht aufgetretenen Störungen, weist auf abgebrochene Bearbeitungen hin und informiert fortlaufend über den statistischen Nutzungsgrad der Maschine
- Für den Nachtbetrieb mit **reduzierter Zerspanungsleistung** müssen die entsprechend reduzierten Vorschubgeschwindigkeiten aktivierbar sein
- Bei Ausfall einzelner Komponenten des FFS müssen **Notstrategien** verfügbar

sein, um einen Notbetrieb der intakten Anlagenteile aufrecht zu halten.
- Bei Störungen erfolgt automatisch Meldung per SMS an ein festgelegtes Mobiltelefon und an den Betreiber als e-mail.

5.10 FFS-Leitrechner *(Bild 5.14)*

Die übergeordnete Steuerung und Überwachung der einzelnen Komponenten in einem FFS ist Aufgabe des Leitrechners. Dazu ist heute ein Industrie-PC oder Laptop mit Standard-Betriebssystem und zusätzlicher Software für die spezifischen Leitrechner-Funktionen ausreichend.

FFS-Leitfunktionen sind z. B. folgende Aufgaben:
- Visualsierung des Gesamtsystems
- Steuerung der Hintergrundprozesse
- Aktualisierung der Datenbanken
- Störungsmeldungen und DNC-Funktionalitäten.

Hinzu kommen auch die Werkzeugverwaltung mit Anschluss an die Werkzeugvoreinstellung, sowie die Anbindung an Produktionsplanungssysteme.

Der Datenverbund erfolgt über Feldbussysteme und die E/A-Ebene der PC-Netzwerke mittels Ethernet und Übertragungsprotokolle via TCP/IP.

Grundsätzlich kann ein FFS auch ohne einen übergeordneten Leitrechner arbeiten. Dies betrifft im Wesentlichen den automatischen Fertigungsablauf, d. h. Paletten zubringen, bearbeiten und wieder abstellen. Dafür reicht eine automatische Werkstück-Transportsteuerung aus. Alle anderen organisatorischen Arbeiten im Umfeld des FFS müssen dann manuell terminiert, überwacht und rechtzeitig ausgeführt werden, damit keine Wartezeiten wegen fehlender Werkstücke, Werkzeuge, Spannvorrichtungen, CNC-Programmen oder anderer Störfaktoren entstehen.

Damit ist im Wesentlichen definiert, welche wichtigen **Koordinierungs-Aufgaben** einem übergeordneten FFS-Leitrechner übertragen werden. Diese sind abhängig von der Auslegung und dem Automatisierungsgrad des Systems und können folgende Funktionen beinhalten *(Bild 5.13 und 5.14):*
- Entgegennahme der **Fertigungsaufträge** mit Stückzahlen und Terminen vom PPS und die Terminüberwachung anhand der Rückmeldungen
- **Maschinenbelegung** bei normalem Betrieb unter Berücksichtigung der aktuellen Werkzeugbestückung, d. h. an welchen Maschinen müssen bei Jobwechsel die wenigsten Werkzeuge ausgetauscht werden
- Maschinenbelegung bei **Eilaufträgen,** jedoch ohne die laufenden Aufträge komplett aus der Produktion zu nehmen
- **Paletten** zum Umrüsten auf andere Spannvorrichtungen bereitstellen (Anzahl, Termine), Spannvorrichtungen bereitstellen
- Bereitstellung der **Rohteile** (das PPS hat bereits festgestellt, dass ausreichend Rohteile vorhanden sind)
- Anforderung der erforderlichen **Werkzeuge** (Sonder-, Spezial- oder Serienwerkzeuge) incl. der **Werkzeugdaten** und deren Bereitstellung an den Maschinen
- Ausgabe einer **Werkzeug-Differenzliste** an die Werkzeugvoreinstellung, aus der für jede Maschine die zu tauschenden Werkzeuge zu ersehen sind
- Information an den DNC-Rechner, die entsprechenden **CNC-Programme** abrufbereit zu halten
- Information an die **Transportsteuerung** über die Zuordnung der Werkstücke zu den einzelnen Maschinen, Identcodes, Prioritäten usw.
- Bereitstellen der zugehörigen **Messpro-**

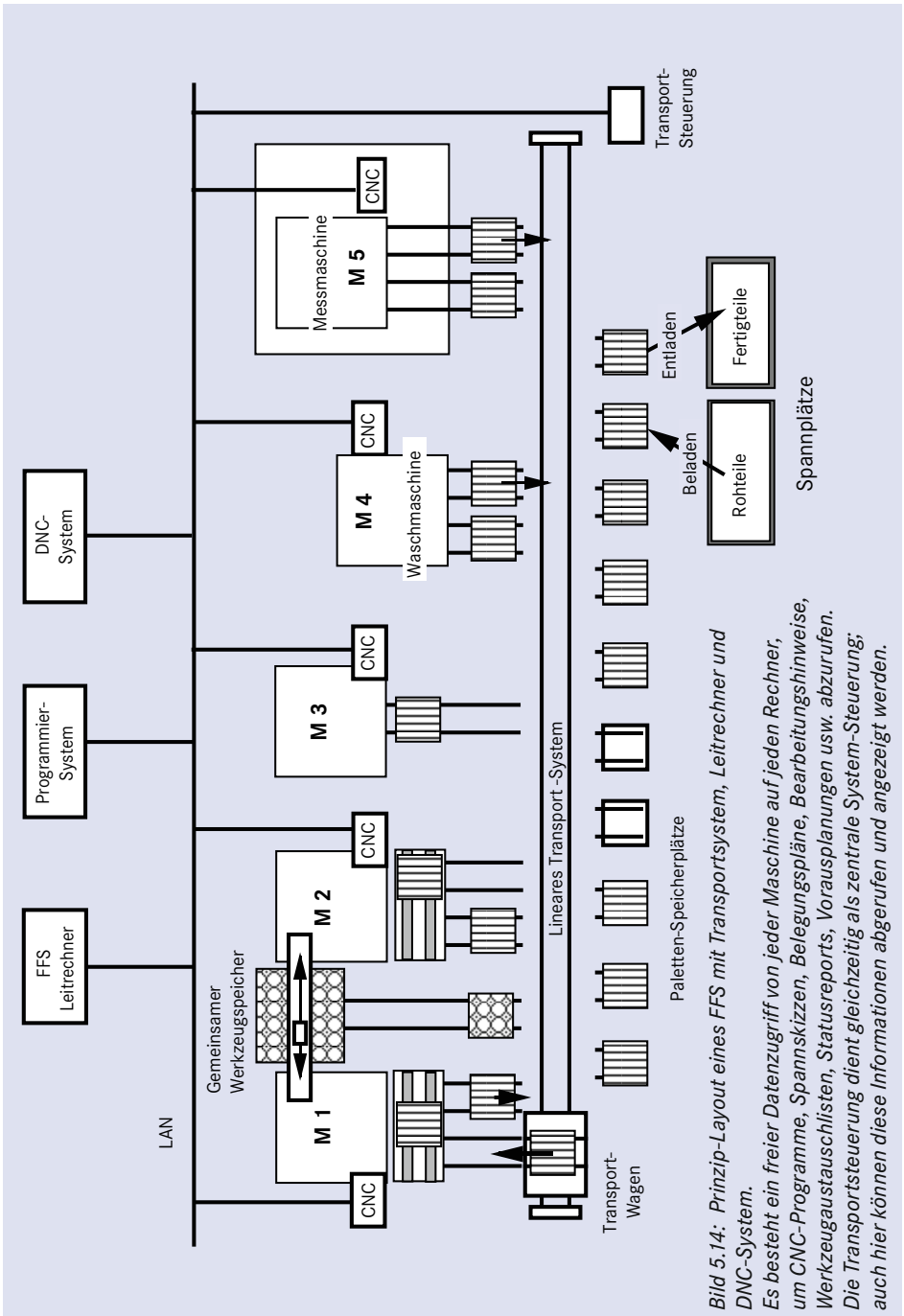


Bild 5.14: Prinzip-Layout eines FFS mit Transportsystem, Leitrechner und DNC-System.
Es besteht ein freier Datenzugriff von jeder Maschine auf jeden Rechner, um CNC-Programme, Spannskizzen, Belegungspläne, Bearbeitungshinweise, Werkzeugaustauschlisten, Statusreports, Vorausplanungen usw. abzurufen. Die Transportsteuerung dient gleichzeitig als zentrale System-Steuerung; auch hier können diese Informationen abgerufen und angezeigt werden.

gramme für die im System integrierte Messmaschine oder für die maschinenInterne Kontrolle
- Informationen an das **Werkstattpersonal** über die Produktionsänderung, die dazu notwendigen Vorbereitungen, Statusmeldungen, Alternativstrategien bei Maschinenausfällen, Termine, Stückzahlen
- **Visualisierung des Betriebsablaufs** auf dem Leitrechner mit Vorwarnung bei absehbaren Problemen, usw.

Damit kann die vollautomatische Fertigung der Werkstücke normalerweise erfolgen.

Fällt eine Maschine vorübergehend aus, dann weist der Leitrechner unter Nutzung einer vorbereiteten Ausfallstrategie die Werkstücke anderen Maschinen zu, sofern dies vom PPS genehmigt und technisch durchführbar ist. Die Entscheidung liegt dann beim Personal.

Eine weitere Aufgabe ist die **zentrale Überwachung der Anlage** und ihres Zustandes mit Hilfe und unter Auswertung der **BDE/MDE**-Daten. Dafür sind beispielsweise folgende **Rückmeldungen** wichtig:
- Maschine betriebsbereit/läuft/wartet/gestört
- Maschine in Reparatur/Zeitangaben/Grund
- Bearbeitung freigegeben/gesperrt
- Palette fehlt/unterwegs/bereit/in Bearbeitung
- Produzierte Teile pro Los
- Ausschussteile/Ursache/Zeit
- Transportsystem betriebsbereit/gestört

Aus diesen und weiteren Daten lässt sich ein aussagekräftiger Statusbericht und eine gute Statistik erstellen, aus der auch Tendenzen und Schwachstellen gut erkennbar sind.

5.11 Wirtschaftliche Vorteile von FFS *(Tabelle 5.1)*

Die wirtschaftlichen Vorteile flexibler Fertigungssysteme im Vergleich zu alternativen Fertigungsmethoden ergeben sich bei der Einzel- und Kleinserienfertigung durch Nutzung mehrerer Systemeigenschaften:

1. **Eine höhere zeitliche und technische Nutzung der Fertigungsmittel** durch höhere Automatisierung, Pausenbetrieb, Auslaufbetrieb in der 2. oder 5. Schicht, personalarme **oder** personallose Schichten oder an Wochenenden
2. **Steigerung der Produktivität** durch schnelle, unterbrechungslose Umrüstung auf wechselnde Fertigungsaufgaben
5. **Reduzierung der Produktionsfläche** durch Wegfall von Zwischenlagern und Arbeitsflächen an den Maschinen, durch z. B. Nutzung von Hochregallagern
4. **Anpassungsfähigkeit** an geometrische Veränderungen der Werkstücke und technologische Änderungen der Bearbeitung durch Änderung der CNC-Programme
5. **Schnelles Reagieren auf Marktveränderungen** durch flexible Prioritätsänderungen in der Fertigung
6. Nachträgliche **Erweiterungs- und Anpassungsmöglichkeit** bei neuen Aufgaben oder höheren Stückzahlen

Während unverkettete, einzelne CNC-Maschinen und flexible Fertigungszellen vorwiegend für die Produktion von Werkstücken mit kleineren bis mittleren Stückzahlen eingesetzt werden, erreicht man **durch die Verkettung mehrerer CNC-Maschinen eine höhere Wirtschaftlichkeit bei der Produktion von kleinsten bis zu mittleren Losgrößen**. Dies wird im Wesentlichen erreicht durch die Vermeidung von Maschinen-Wartezeiten und durch die

Tabelle 5.1: Nutzungsminderung ohne Automatisierung und Nutzungszeitgewinn durch flexible Automatisierung (theoret. Zahlenwerte).
Die Nutzung der Samstage würde zusätzliche 14 % Nutzungszeitgewinn bringen.

Programmlaufzeiten abzüglich Ausfallzeiten	**Berechnung**	**Stunden/ Jahr**	**Verbleibende Tage**	**% Stunden**
Theoret. Nutzungszeit	**365 T x 24 h**	**8.760**	**365**	**100%**
- Samstage und Sonntage	52 W x 2 T x 24 h	- 2.496	261	- 28 %
- Feiertage	8 T x 24 h	- 192	253	- 3 %
- 3. Schicht an 253 Tagen	253 x 8 h	- 2.024	253	- 23 %
- Personal-Ausfälle (Mittelwert)	52 W x 1,5 h	- 78	253	- 1 %
- Organisat. Störungen	253 T x 1.5 h	- 380	253	- 4 %
- Werkst.- und Auftragswechsel	253 T x 4 x 0,5 h	- 506	253	- 6 %
- Austausch von Verschleiß-Wz	20 Wz/T x 2,5 min/Wz x 253 T	- 211		
Summe der Ausfallzeiten:		**- 5.886**		**- 67%**
Verfügbare Programmlaufzeit:	**8.760 - 5.886**	**2.874**	**253**	**33%**
Nutzungsgewinn im FFS				
+ 6h Auslaufbetrieb 3. Schicht	253 T x 6 h	1.518	253	17 %
+ Pausendurchlaufbetrieb	1h/Schicht x 2 x 253	506	253	6 %
+ 50% weniger Personalausfälle	4	0	253	0
+ 60% weniger org. Störungen	380h x 60%	228	253	3 %
+ keine Unterbr. bei Auftr.-wechsel		506	253	6 %
+ keine Unterbr. bei Wz-Austausch		211	253	2 %
Nutzungsgewinn:		**+ 3.009**		**+ 34%**
Programmlaufzeit pro Jahr:		**5.883**	**253**	**67%**

Nutzung verfügbarer Zeitreserven aufgrund einer besseren, vorausschauenden Organisation.

Sind Spannvorrichtungen und Werkzeuge erst einmal vorbereitet und die CNC-Programme in den CNC-Maschinen verfügbar, so wird in einem FFS ein wesentlich höherer Nutzungsgrad der Maschinen erreicht als bei unverketteten CNC-Einzelmaschinen.

Für die Beurteilung des **Flexibilitätsgrades** besteht keine allgemein gültige Skala, d. h. es lässt sich kein absoluter Maßwert für die Flexibilität angeben. Dies ist nur durch einen relativen Vergleich von Maßzahlen früherer oder alternativer Fertigungskonzepte für die gleiche Aufgabenstellung möglich.

Solche Maßzahlen sind:

- die Reduzierung der Durchlaufzeiten der Teile
- die Reduzierung des Bestandes an Halbfertigteilen
- die Reduzierung des Lagerbestandes an Fertigteilen aufgrund der auftragsbezogenen Produktion
- die Reduzierung des Umrüstaufwandes, gemessen an der Zeit für die Umstellung auf eine andere Fertigungsaufgabe
- die Anzahl der möglichen Umrüstungen

pro Stunde ohne Maschinen-Stillstandszeiten
- das Verhältnis von Hauptzeit zu Umrüstzeit
- die Größe des auf dem FFS insgesamt zu fertigenden Teilespektrums
- die höhere Auslastung der Maschinen durch die zusätzlichen Automatisierungseinrichtungen.

Nach den ersten Betriebserfahrungen mit einem neuen FFS sind durch Verbesserungsvorschläge der Mitarbeiter oft noch weitere Optimierungen möglich!

5.12 Probleme und Risiken bei der Auslegung von FFS

(Bilder 5.15 bis 5.17)

Die Vielfalt der Möglichkeiten, aber auch die Probleme bei der Realisierung flexibler Fertigungssysteme sind ohne Zweifel größer als diese hier beschrieben werden können. Wichtig bei der Gesamtplanung ist, dass hinterher das FFS die Teile nicht nur flexibel, sondern auch zu marktgerechten Kosten fertigen muss. Hierauf hat der Automatisierungsgrad der Anlage einen wesentlichen Einfluss: Zu viel Automatisie-

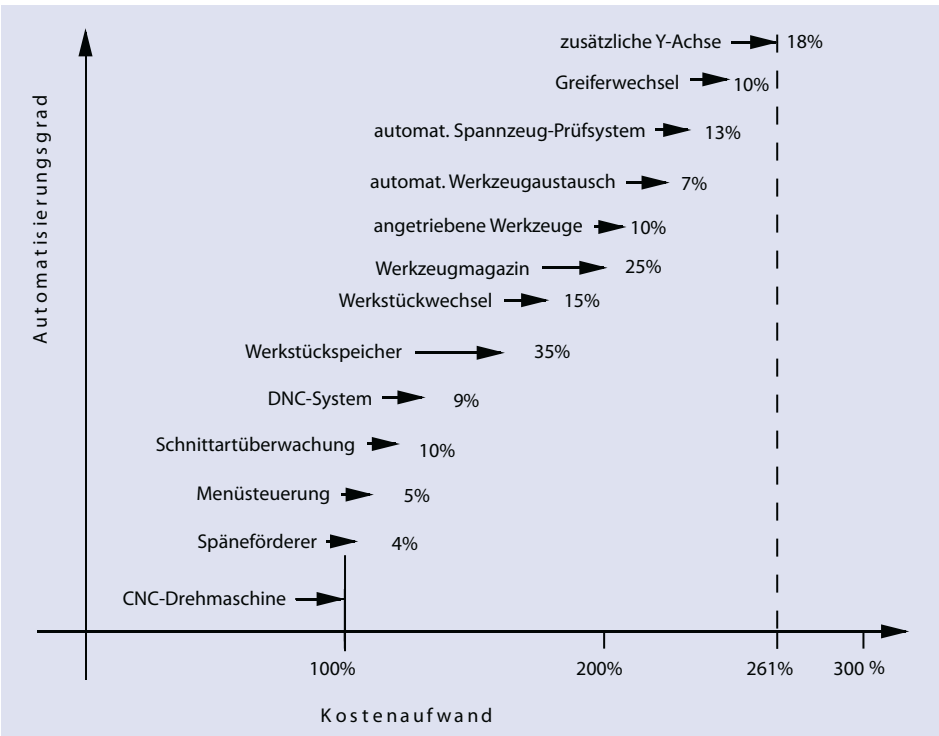


Bild 5.15: Zusatzkosten für den Ausbau einer CNC-Drehmaschine zur flexiblen Fertigungszelle. Dafür sind mehrere mehr oder weniger teuere Ausbaustufen erforderlich. Es ist im Einzelfall zu prüfen, ob sich dieser zusätzliche Kostenaufwand rentiert oder ob nicht zwei weniger automatisierte Maschinen wirtschaftlicher wären.
Die Prozent-Angaben sind lediglich Richtwerte und beinhalten Hard- und Softwareanteile.

rung erhöht die Investitionskosten, wie am Beispiel einer Drehmaschine dargestellt *(Bild 5.15)*. In solchen Fällen ist zu überlegen, ob nicht zwei Maschinen mit weniger Automatisierung wirtschaftlicher wären.

Auch ist erfahrungsgemäß die max. Anzahl der an den Maschinen speicherbaren Werkzeuge ein Problem. Um nicht alle Maschinen mit übergroßen und teuren Werkzeugspeichern ausrüsten zu müssen, muss zuerst die Konstruktion der Teile auf die Verwendung von Standardwerkzeugen ausgerichtet werden. Ist die Anzahl der Werkzeuge trotzdem noch zu hoch, dann könnte ein zentraler Werkzeugspeicher für den automatischen Werkzeugaustausch die geeignete Lösung bieten. Müssen Werkstoffe bearbeitet werden, die zu Werkzeugstandzeiten von wenigen Minuten führen, muss ein fortlaufender automatischer Ersatz gewährleistet sein.

Auch der **vorübergehende Notbetrieb** eines FFS ist sehr schwer durchführbar. Ist das System auf den Einsatz eines Leitrechners ausgelegt, dann können dessen umfangreiche Koordinierungsaufgaben nicht ohne weiteres von anderen Systemen übernommen werden. Das Personal ist sicherlich auch nicht ausreichend darauf vorbereitet, die ausgefallenen Funktionen problemlos manuell zu steuern.

Zu den Risiken zählen auch die hohen **Gesamt-Investitionskosten** eines FFS. Daraus resultieren hohe Belastungen durch **Fixkosten und Abschreibung**, die sich bei mangelnder Kapazitätsauslastung negativ auf das Betriebsergebnis auswirken. Um dies zu vermeiden, müssen bereits erhebliche Vorleistungen während der Planungsphase erbracht werden. Die Produktivität des FFS muss so berechnet sein, dass sich der erhöhte Maschinenstundensatz durch eine entsprechend höhere Ausbringung kostensenkend auf die Stückkosten auswirkt.

Da bei FFS aber auch mit kaufmännisch schwer nachweisbaren Vorteilen argumentiert wird, wie z. B. Reduzierung der Umlauf- und Lagerbestände oder marktorientierten Vorteilen, dürfen diese nicht zu hoch bewertet werden. Nicht selten war auch zu beobachten, dass FFS mit Fertigungsaufgaben belegt wurden, für die sie ursprünglich nicht geplant waren. Auf diese Weise konnten schon einige Systeme ihre Flexibilität unter Beweis stellen.

Nicht selten enden Planungen aufgrund der Forderungen bei völlig anderen Systemen, wie z. B. bei flexiblen Rundtaktmaschinen, die insbesondere bei kleineren Werkstücken in mittleren bis größeren Losgrößen ihren wirtschaftlichen Einsatz finden *(Bild 5.16 und 5.17)*.

5.13 Flexibilität und Komplexität

Flexibel fertigen bedeutet die Fähigkeit, sich ändernden Situationen problemlos anzupassen. Bei FFS bedeutet dies, dass das Gesamtsystem möglichst genau auf die zu fertigende Produktpalette abgestimmt ist und Produktionsumstellungen ohne großen Aufwand und problemlos zulässt.

Prinzipiell lassen sich alle Teile auf FFS fertigen, trotzdem ist bereits bei der Planung die infrage kommende Teilefamilie nach Machbarkeit abzugrenzen. Dazu muss geprüft werden, ob die vier wichtigsten Voraussetzungen gegeben sind und auch eingehalten werden:

1. Eine ausreichend große Teilefamilie mit entsprechendem „Ähnlichkeitsgrad“ und ausreichenden Stückzahlen, um die Maschinen auslasten zu können,
2. eine Auswahl möglichst standardmäßiger, sich ersetzender Maschinen, die allle geforderten Bearbeitungen ohne manuelle Eingriffe oder Nacharbeit durchführen können,

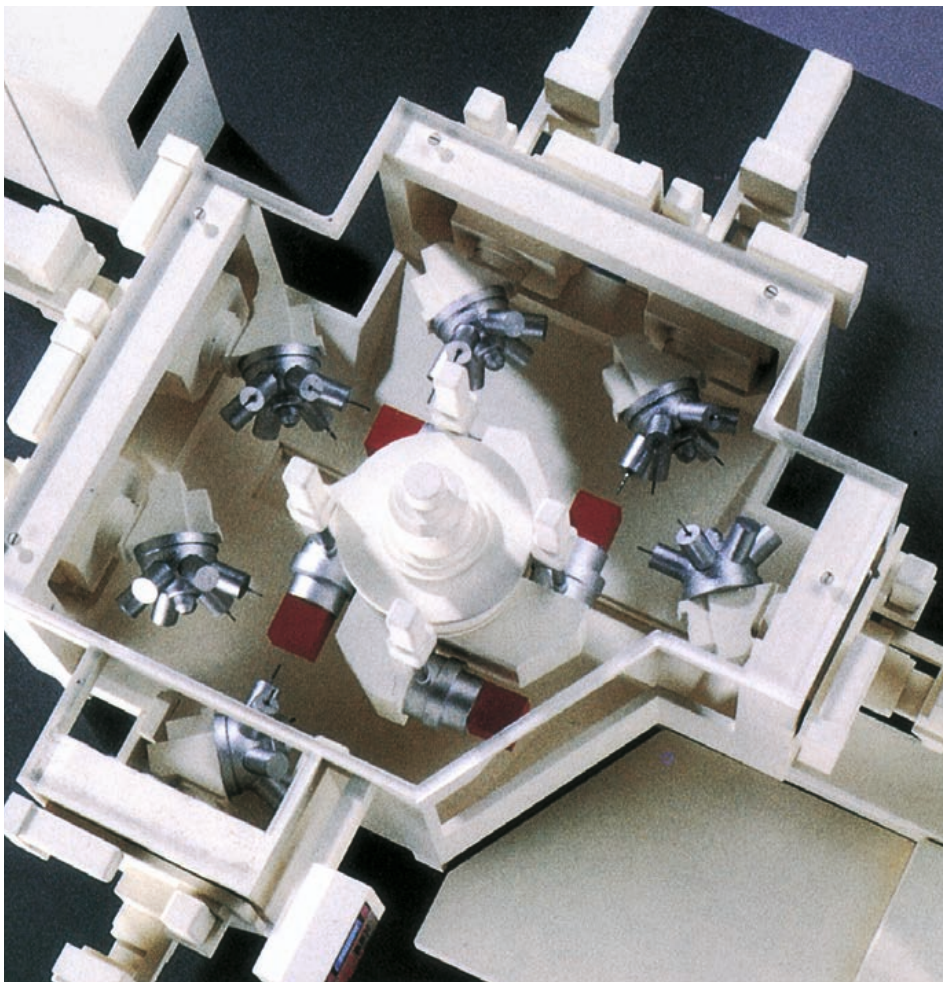


Bild 5.16: Modulares Mehrstationen-Bearbeitungszentrum mit wahlweise zwei bis sieben Bearbeitungseinheiten für mittlere und größere Losgrößen. Sonderfall einer „Flexiblen Rundtaktmaschine“.
In der Mitte der Maschine befinden sich vier Werkstücke in drehbaren Spannvorrichtungen, die um 4-mal 90° weitergetaktet und auf fünf Seiten ohne Umspannen bearbeitet werden.
Die Bearbeitung erfolgt gleichzeitig an zwei bis vier Werkstücken mit zwei bis sieben Spindeln.
Jeder Revolverkopf verfügt über sechs oder acht Werkzeugspindeln. Da bei den Revolverköpfen alle Spindeln mitlaufen, ist zum Werkzeugwechsel kein „Spindel-Halt“ erforderlich, was eine Wechselzeit von ca. 1 s ermöglicht.
Der (manuelle) Werkstückwechsel erfolgt während der Bearbeitungszeit.
Die Rollenführungen, Motoren, Antriebe, Kugelumlaufspindeln, Wegmesssysteme usw. sind außerhalb des Arbeitsraumes angeordnet.
Diese Maschine ist wegen des Umrüst- und Programmieraufwandes nicht für kleine Losgrößen oder Einzelstücke geeignet.

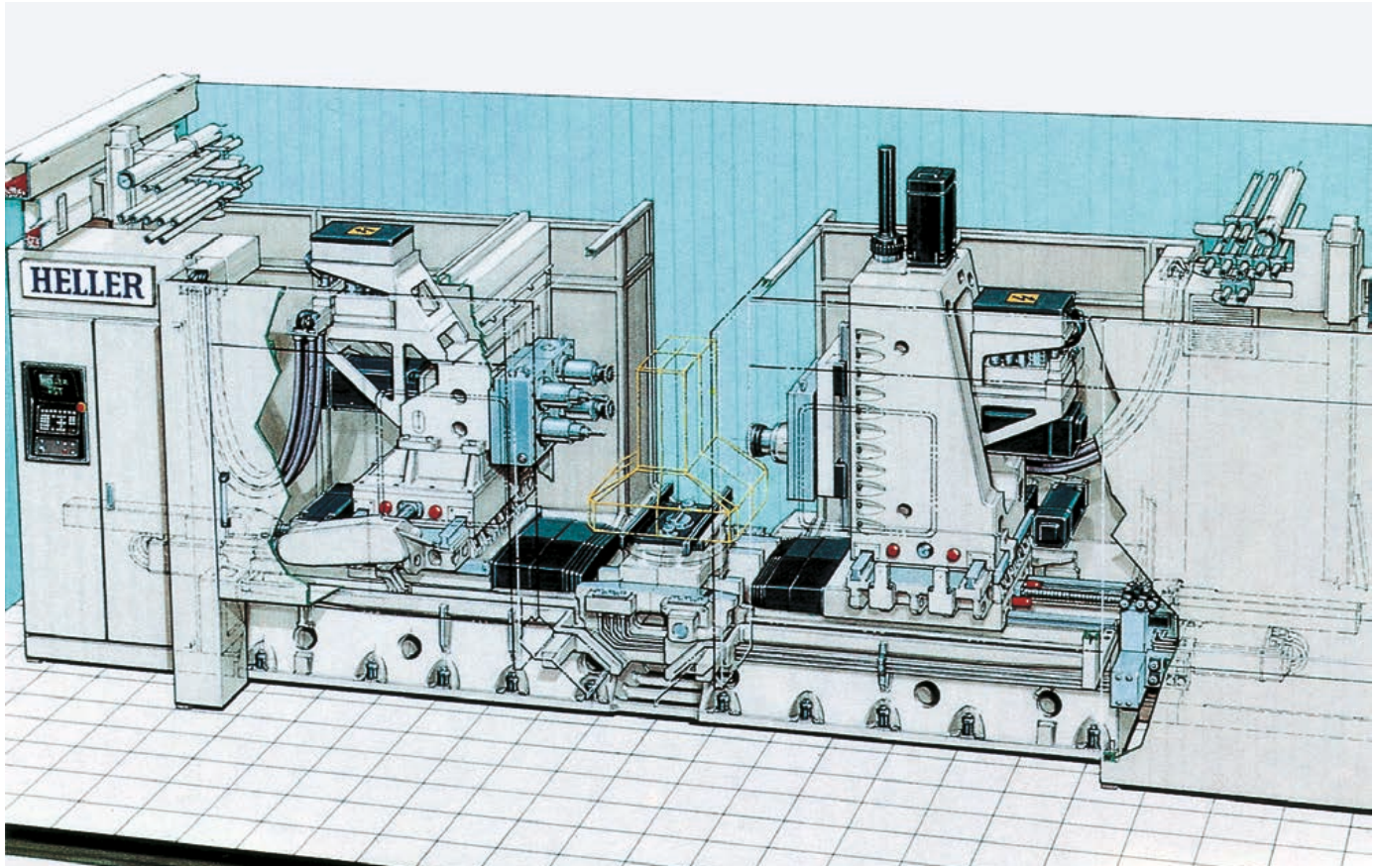


Bild 5.17: Baueinheiten für flexible Transferlinien. Verwendung flexibler Normbaugruppen auf standardisierten Grundmaschinen. So lassen sich kundenspezifische Fertigungslinien zusammenstellen.

3. ein geeignetes Werkstück-Transportsystem mit automatischem Paletten- bzw. Teilewechsel an den Maschinen,
4. geeignete Spannvorrichtungen, wobei auch die Mehrfachspannung kleinerer Teile infrage kommen kann.

Daraus entsteht wiederum die Frage nach einer sinnvollen Verwendung von Mehrspindel-Maschinen zur gleichzeitigen Fertigung von zwei bis vier identischen Teilen, was jedoch größere, komplexere und teurere Spannvorrichtungen erfordert, evtl. mit zusätzlichen Dreh- und Schwenkbewegungen zur 5-Achs-Bearbeitung.

Spannt man bereits in dieser Situation den Bogen der zu fertigenden Teilefamilie zu weit, so wird die vorgesehene Investitionssumme sehr schnell überschritten und die späteren Fertigungskosten sind zu hoch – was sich insbesondere bei den „einfachen" Teilen auswirkt.

Produkt-Komplexität, Anlagekosten und Fertigungskosten stehen im direkten Zusammenhang

Obwohl aus Kostengründen immer mehr Fertigungseinrichtungen modernisiert, automatisiert und computergesteuert werden, Personalkosten und Fertigteile-Lager abgebaut werden, können bei zu großzügiger Planung die Produkte trotzdem zu teuer werden.

Zu groß geplante Fertigungs- und Montageeinrichtungen erfordern auch eine größere Fertigungsfläche, was die damit produzierten Teile wiederum höher belastet. In vielen Fällen ist die nach der technischen Planungsphase entstandene Anlagen-Komplexität nicht erforderlich und sollte in der zweiten, wirtschaftlich orientierten Phase auf sinnvolle Einsparmöglichkeiten überprüft werden. Die Ursachen zu groß geratener Lösungen findet sich meistens in zu weit gesteckten Planungszielen, die weit über die tatsächlich geforderten Lösungen hinausgehen. Oder durch Konstrukteure, die sich nicht an das **sinnvoll ausgewählte und limitierte Werkzeug-Sortiment** halten, was z. B. Maschinen mit vergrößerten Werkzeugspeichern und komplexe Fertigungsmittel erfordert. Deshalb sollten auch in jeder zerspanenden Fertigung die Werkzeuge streng unterteilt werden nach Standard-, Serien- und Sonderwerkzeugen mit entsprechend abgestuften Stundenkostensätzen.

Flexibilität in der Fertigung ist umso einfacher zu erreichen, je problemloser die herzustellenden Produkte sind und je intensiver der spätere Fertigungsablauf inclusive der denkbaren Störeinflüsse vorausgeplant wurde. Deshalb muss es im Interesse aller Produktverantwortlichen sein – vom Manager über den Konstrukteur bis zum Servicetechniker – das Gesamtsystem so einfach und unkompliziert wie möglich zu gestalten. Dann lässt sich eine wirtschaftliche, flexible Fertigung leichter und schneller erreichen.

Fertigungsflexibilität richtig eingesetzt muss dazu führen, die Gesamtkosten zu reduzieren. Dies lässt sich durch mehrere Einflussfaktoren erreichen, wie z. B.

- eine angepasste Organisation
- Reduzierung der Fertigungs- und Lieferzeit
- Termintreue
- Abbau oder Vermeidung von Lagerbeständen
- gleichzeitige Fertigung unterschiedlicher Teile
- Fertigung unterschiedlicher Losgrößen
- Änderung der Fertigungspriorität bei Eilaufträgen
- Vermeidung von Ausschuss und Nacharbeit
- gleich bleibend hohe Fertigungsgenauigkeit und

- generell hohe Produktqualität
- Schulung und Einweisung des Personals in Möglichkeiten und Grenzen des Systems.

Bei Flexiblen Fertigungssystemen gilt dies für **alle Losgrößen**. Durch die schnelle, unterbrechungslose Umstellung von FFS auf andere Teile machen sich diese Einflussfaktoren insgesamt kostengünstig bemerkbar.

5.14 Simulation von FFS

Zur Planung und für den Einsatz flexibler Fertigungssysteme werden Simulationen eingesetzt, die ganz andere Aufgaben und Schwerpunkte haben als für die Simulation der CNC-Programme. Bei der Simulation von FFS steht das Verhalten der Gesamtanlage unter wechselnden Vorgaben im Mittelpunkt, wobei als wesentliches Ergebnis die Frage nach der Wirtschaftlichkeit beantwortet werden soll. Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit von FFS ist jedoch nicht die Einzelmaschine, sondern **das Zusammenspiel aller FFS-Komponenten**.

Aber auch die fortlaufende Veränderung der Werkstücke, des Teilemixes und der Losgrößen erfordern Anpassungen und erzeugen Veränderungen, die nicht vorhersehbar sind. Deshalb sind zuverlässige Aussagen über das spätere Systemverhalten oder Vorhersagen über Auswirkungen von Parameteränderungen ohne wirklichkeitsnahe Simulation der gesamten Fertigungssituation kaum möglich.

Diese unkalkulierbaren Risiken steigen mit der Anlagengröße bzw. der Investitionshöhe und verunsichern den Käufer. Deshalb setzen Anbieter und Lieferanten von FFS bereits mit Beginn der Planungsphase die computerunterstützte Simulation ein. Dabei handelt es sich um Computerprogramme, denen das System-Layout und die Daten des Systems eingegeben wird. Dann können durch verschiedene Detailänderungen die jeweiligen Auswirkungen auf den Fertigungsablauf getestet werden. Auf diese Weise sind Engpässe oder Überdimensionierungen sehr schnell zu erkennen.

Der **Anlagenplaner** macht zunächst auf Basis **statischer Berechnungen** mit den vom Kunden gelieferten Daten erste Aussagen über die benötigte Anzahl von Bearbeitungsstationen. Dann ermittelt er das geeignete Transportmittel, die Anzahl der Spannvorrichtungen und Paletten, sowie die Anzahl der Rüst- und Ablageplätze.

Diese statischen Berechnungen sind wegen der Komplexität solcher Systeme nicht ausreichend, sondern stellen lediglich die Basis für die anschließende **dynamische Simulation** dar. Diese dynamische Simulation ist flexibler, billiger und schneller als die früher angewandte Methode, das ganze System im verkleinerten Maßstab unter Verwendung von technisch wertvollen „Spielzeug-Baukästen“ aufzubauen und damit die Tests zu fahren.

Das für eine Simulation ausgegebene Geld wird sich vielfach lohnen und ist deshalb jedem Käufer eines FFS zu empfehlen. Vielleicht ergibt sich gerade durch die Simulation, dass eine völlig andere System-Konzeption wesentlich vorteilhafter wäre und die geforderte Wirtschaftlichkeit bzw. Rentabilität besser garantiert.

Wichtigstes Ziel der Simulation während der Planungsphase ist in den meisten Fällen eine Optimierung der Investitionskosten. Die Ergebnisse der unterschiedlichen Simulationsexperimente werden auf dem Bildschirm mit Farbgrafik dargestellt.

Aber auch der **Systembetreiber** kann später mit Hilfe der gleichen Simulationstech-

nik prüfen, wie sich seine Anlage bei neuen Gegebenheiten verhalten würde. Er kann zuverlässige Aussagen machen, Engpässe erkennen und rechtzeitig planen. Ein verändertes Teilespektrum oder neue Aufträge lassen sich ebenso „durchspielen" wie die Auswirkungen technischer oder organisatorischer Störungen.

Aus der Simulation kann der Betreiber z. B. erkennen:

- Die Auslastung der Maschinen bei unterschiedlichem Produktmix
- die optimalen Losgrößen
- die Auslastung von Waschmaschine und Messmaschine
- die Auslastung bzw. Engpässe des Transportsystems
- die Anzahl der benötigten Werkstückträger und Spannmittel
- die Anzahl der benötigten Werkzeuge im Magazin
- die Auswirkung von kurzen oder längeren Störungen
- die Fertigungs-Durchlaufzeiten pro Werkstück
- die Einhaltung der Termine
- die Aktivitäten des Anlagenführers.

Im Gegensatz zur **Planungssimulation**, die mit vorgegebenen Werten und unterschiedlichen System-Konfigurationen umgehen muss, setzt die **Betreibersimulation** eine Online-Verbindung zu dem Fertigungsleitrechner voraus. Damit kann das Simulationssystem die relevanten Daten direkt vom Prozess übernehmen und prozesskonform arbeiten. Die Ergebnisse der Simulation können dann wieder direkt in die Fertigungsplanung einfließen.

Vergleichbare Simulationsprogramme stehen auch für Roboter und Montagesysteme zur Verfügung, jedoch wiederum mit unterschiedlichen Aufgaben und Schwerpunkten.

Systembedingte Parameterwerte:
Die Untersuchung eines Computermodells aufgrund **unterschiedlicher FFS-Konfigurationen** erfolgt durch Eingabe von systembedingten Parameterwerten, wie z. B.

- Anzahl und Anordnung der Maschinen
- Anzahl der Plätze im Werkzeugmagazin und im Werkzeuglager
- Werkzeugwechselzeit (Span-zu-Span)
- Strategie und Zeitbedarf des Werkzeugaustausches
- Werkstück- und Werkzeugtransportsystem
- Anzahl Transportplätze des Fahrzeuges
- Mittlere Geschwindigkeit des Transportsystems
- Transportstrecken
- Übergabezeit des Transportsystems
- Anzahl der Paletten im System
- Anzahl und Typenvielfalt der Spannvorrichtungen
- Umrüstzeiten bei Produktionsänderungen

Danach lassen sich die **fertigungsbezogenen Parameterwerte** eingeben, wie z. B.

- Fertigungsstückzahlen und Losgrößen
- Anzahl der unterschiedlichen Werkstücke
- Anzahl der benötigten Werkzeuge pro Werkstück
- benötigte System-, Spezial- oder Sonderwerkzeuge
- erforderliche Bearbeitungen und Bearbeitungszeiten (aus den CNC-Programmen)
- erforderliche Spannlagen (3, 4, 5 oder 6 Seiten bearbeiten)
- Umrüstzeiten

Aus diesen Vorgaben errechnet das Simulationssystem die Ergebnisse bei Veränderung des Produktionsprogrammes oder Produktmixes, wie z. B.

- Nutzungs- und Leerzeiten der FFS-Komponenten
- Über-, Unter- und Restkapazitäten
- Engpässe im System
- Durchlaufzeiten und Endtermine
- Auswirkungen von Eilaufträgen und geänderten Fertigungsprioritäten
- Mögliche Notstrategien bei Störungen
- Bedarf von Werkzeugen und Schwesterwerkzeugen
- Kosten, Nutzungszeiten, Umrüst- und Stillstandszeiten
- Personalbedarf

5.15 Produktionsplanungssysteme (PPS)

Mit zu den Aufgaben eines fertigungsbezogenen Simulationssystems zählt in erster Linie die Absicherung, dass trotz der vielen unterschiedlichen Fertigungsaufgaben ein kostenoptimaler Fertigungsverlauf möglich ist. Dazu sind jedoch mehrere Voraussetzungen zu erfüllen, die das rein fertigungstechnisch orientierte Simulationssystem nicht berücksichtigt. Dies ist Aufgabe eines PPS.

Strategisches Ziel eines PPS ist, die Auftragsdurchlaufzeit vom Auftragseingang bis zur Auslieferung so zu steuern und zu optimieren, dass verlangte Liefertermine und Kosten der zu fertigenden Aufträge eingehalten werden.

Wegen der meist sehr komplexen Zusammenhänge dieser Aufgabenstellung gerade bei flexiblen Fertigungssystemen ist für den späteren reibungslosen Betrieb ein PPS eine unbedingte Voraussetzung.

Ein PPS hat grundsätzlich drei unterschiedliche Aufgabenbereiche:

1. Die **Planungsfunktionen**, um alle Aufträge einzuplanen, zu verwalten und termingerecht mit der Produktion zu beginnen
2. Die **Steuerungsfunktionen**, um in Abstimmung mit den zur Verfügung stehenden Fertigungskapazitäten und dem Materialvorrat die Fertigungsaufträge zu erteilen und den terminlichen Ablauf zu überwachen.
5. die **Unterstützung** der Verkaufsabteilung durch vorausschauende Kapazitäts-, Zeit- und Materialüberprüfung, um für Angebote verbindliche Aussagen machen zu können, ohne die aktuelle Planung zu stören oder zu beeinträchtigen.

Bei FFS kann man davon ausgehen, dass es sich dabei vorwiegend um die Produktion von Standarderzeugnissen in wechselnden Losgrößen handelt und – in Einzelfällen – auch kundenspezifische Modifikationen zu berücksichtigen sind.

Aufgabe des PPS kann nun sein, die Auftragsdurchlaufzeit so zu steuern, dass möglichst kurze Lieferzeiten erreicht werden, ohne Veränderung der laufenden Produktion. Viele Unternehmen müssen jedoch aus Wettbewerbsgründen kürzere Lieferzeiten zusagen und deshalb Eilaufträge einplanen, die eine Änderung der bestehenden Fertigungsplanung erfordern. Diese Forderung ist ohne die Unterstützung eines leistungsfähigen PPS auf Dauer nicht zu erfüllen. Daraus lässt sich erkennen, dass PPS-Systeme unterschiedliche Schwerpunkte verarbeiten und dementsprechend flexibel sein müssen. Dazu benötigt das System umfangreiche Daten, die fortlaufend aktualisiert werden müssen.

Mit diesen Daten können Lagerbestände, Anlieferzeiten, Materialbedarf, Auslastung der Fertigung, Kosten usw. so detailliert erfasst und in die Planung einbezogen werden, dass der Verkaufsabteilung stets die aktuellen Fertigungskosten und Zusatzkosten für besondere Kundenforderungen vorliegen. Preise, Rabatte und Provisionen

lassen sich viel realistischer und schneller berechnen als mit der manuellen Vorkalkulation.

Unter der Voraussetzung, dass alle erforderlichen Parameterwerte verfügbar sind, wie z. B. Stücklisten und Fertigungszeiten pro Werkstück, liefert ein PPS die Daten für:

- Material- und Zeitbedarf
- Material- und Kapazitätsplanung
- Produktionskosten
- Einkaufssteuerung
- Werkstattsteuerung
- Montagezeiten
- Störungsmeldungen und Reparaturzeiten
- Kostenrechnung

Hinzu kommen Datenschnittstellen für weitere **Zusatzfunktionen** wie z. B.

- Qualitätskontrolle mit Statistik
- Wiederholteilfertigung
- Prognosen
- Auftragsverwaltung
- Kontenführung
- Lohn- und Gehaltsbuchführung
- u. a.

Aus diesen Daten sollte das PPS die Herstellkosten und Lieferzeiten für ausgehende Angebote berechnen können. Eine weitere Funktion ermöglicht, bei vorgegebenem Liefertermin den spätesten Produktionsbeginn festzustellen und daraus die Anliefertermine für Material und Zulieferteile zu ermitteln. Und dies alles in möglichst kurzer Zeit!

Die sich aus der **Fertigungsplanung** ergebende Maschinenbelegung zeigt in einer abschließenden **Simulation,** ob auch die Maschinenkapazität dafür ausreicht, ob andere Aufträge gefährdet würden oder wie durch kurzfristige Umdisponierung Engpässe beseitigt bzw. umgangen werden könnten.

Mit diesem Leistungsumfang ist ein PPS ein wahrhaftig wertvolles Planungsinstrument – wenn es stets mit aktuellen Daten versorgt und richtig eingesetzt wird!

5.16 Zusammenfassung

Die Verwendung leistungsfähiger CAD-Systeme und die Möglichkeit, die mit CAD-Systemen erzeugten Daten direkt in der Fertigung zu verwenden, führen zu immer kürzeren Innovationszeiten neuer Produkte. Die Sicherheit, einmal installierte starre Fertigungseinrichtungen über mehrere Jahre fast unverändert für die Massenproduktion einsetzen zu können, ist bei der kurzen Lebensdauer heutiger Produkte nicht mehr gegeben. Auch die Typenvielfalt hat in der Fertigung ständig zugenommen und der Käufer erwartet, dass sich der Hersteller darauf eingestellt hat. Der schnelle Typenwechsel birgt auch die Gefahr in sich, dass überhöhte Lagerbestände sehr schnell zu unverkäuflichem und teuerem Schrott werden.

Die Nachfrage nach automatisierten Fertigungslösungen für kleine und mittlere Losgrößen steht deshalb bei den Planungen zunehmend im Mittelpunkt. Da es aber kein für alle Fälle optimales Fertigungssystem gibt, ist das wirtschaftliche Optimum nur mit speziell auf die jeweiligen Forderungen ausgelegten Lösungen erreichbar. Dafür stehen heute eine ausreichende Anzahl und Typenvielfalt von Maschinen und Automatisierungseinrichtungen zur Verfügung und lassen sich in vielen unterschiedlichen Varianten kombinieren. Dabei lassen die meisten System-Konzeptionen auch eine schrittweise Erweiterung zu, sodass die hohen Investitionssummen auf mehrere Jahre verteilt werden können.

Durch die gemachten Betriebserfahrungen ist dann auch der Rentabilitätsnachweis leichter zu erbringen.

Der Einsatz flexibler Fertigungssysteme erfordert eine gründlich Analyse der Fertigungsaufgabe, die Vorgabe der zu erreichenden Hauptziele und die Berücksichtigung der Zuwachsraten und zukünftigen Veränderungen. Heute verfügen mehrere Hersteller über ausreichende Erfahrungen und bieten auch entsprechende Unterstützungen und Beratungen an. Damit kann das Risiko durchaus innerhalb akzeptabler Grenzen gehalten werden.

Die mit flexiblen Fertigungssystemen angestrebte **Wirtschaftlichkeit bei der Fertigung kleinster und mittlerer Losgrößen** wird nur dann erreicht, wenn die theoretischen Systemeigenschaften auch genutzt werden, nämlich:

Die bessere Nutzung der verfügbaren Maschinenstunden durch

- Pausenüberbrückung
- Auslaufbetrieb in der 2. oder 5. Schicht
- Minderung organisatorisch bedingter Maschinen-Stillstandszeiten
- Unterbrechungslosen Auftragswechsel
- Automatische Fertigung mit reduziertem Personalbestand.

Über allen technischen Planungsideen muss von Anfang an **die ständige Überwachung der wichtigsten Zielvorgaben** stehen:

- Erfüllt das FFS die schriftlich definierten technischen Forderungen?
- Ist die automatische, durchgängige Nutzung der vielen fertigungsrelevanten Daten gesichert (CAD/CAM, Werkzeugdaten)?
- Wo liegen die finanzielle Investitionsgrenze und die Kosten/Maschinenstunde, um die Wirtschaftlichkeit garantieren zu können?
- Ist die Wirtschaftlichkeit auch bei Teilauslastung gegeben?
- Sind am Ende der Planungsphase trotz aller Kompromisse die Flexibilität, die Produktivität und die Rentabilität des Systems noch gegeben?
- Oder wären alternative Fertigungskonzepte wesentlich besser geeignet und dazu noch preiswerter?

Erfahrungsgemäß ergeben sich erst während der Planungsarbeiten die besten Ideen für das neu zu planende Konzept. In vielen Fällen werden die Vorgaben offensichtlich erfüllt, sonst würden die Installationen flexibler Fertigungssysteme nicht ständig zunehmen.

Flexible Fertigungssysteme

Das sollte man sich merken:

1. **Flexible Fertigungszelle:** Eine CNC-Maschine, meist ein Bearbeitungszentrum, mit einem begrenzten Teilevorrat, der nacheinander abgearbeitet wird. Im Regelfalle ohne DNC- oder Leitrechner, sofern der CNC-interne Programmspeicher die erforderlichen Programme speichern kann.
2. **Flexible Transferstraße:** Die werkstückseitige Verknüpfung mehrerer CNC-Maschinen nach dem Linienprinzip, d. h. alle Teile durchlaufen die einzelnen Stationen und werden mit aufeinanderfolgenden, unterschiedlichen Programmen bearbeitet.
3. **Flexibles Fertigungssystem:** Eine Gruppe von CNC-Maschinen, lt. Statistik meistens 6 – 10, die über ein gemeinsames Werkstücktransportsystem und ein zentrales Steuerungssystem miteinander verbunden sind. Die Maschinen führen alle erforderlichen Bearbeitungen an einem begrenzten Teilespektrum durch, ohne dass die automatische Folge durch manuelle Eingriffe unterstützt oder unterbrochen wird.
4. **Allgemein:** In einem FFS sind verschiedene Fertigungseinrichtungen über ein gemeinsames Steuerungs- und Transportsystem so miteinander verbunden, dass
   - unterschiedliche Werkstücke
   - mit unterschiedlichen Bearbeitungen
   - in beliebiger Reihenfolge
   - in wechselnden Losgrößen
   - vollautomatisch und ohne manuelle Eingriffe
   - wirtschaftlich gefertigt werden können.
5. Ein FFS besteht nicht aus neuen Maschinenkonzepten, sondern aus einer **Kombination bereits vorhandener Komponenten:**
   Mehrere sich ersetzende oder sich ergänzende CNC-Maschinen
   + Werkstücktransporteinrichtung
   + Be- und Entladeeinrichtung für Paletten und Werkstücke
   + Überwachungseinrichtungen des Gesamt-Systems
   + Entsorgungseinrichtung (Späne, Kühlmittel)
   + Leitrechner
6. FFS sind entstanden aus der **Kombination** von Kommunikation, Automation und Rechner.
7. Eine **Transferstraße** ist wesentlich produktiver als ein FFS, aber sie ist leider **keine Alternative** zu FFS.
8. Die **Simulation** von FFS hat andere Aufgaben und Schwerpunkte als die Simulation der NC-Programme. Hier steht das Verhalten der Gesamtanlage und die Wirtschaftlichkeit unter wechselnden Vorgaben im Mittelpunkt.
9. Wichtigstes Ziel der dynamischen Simulation während der Planung ist neben der System-Auslegung die Optimierung der Investitionskosten.
10. Auch der spätere FFS-Betreiber kann aus der Simulation das Verhalten des Systems bei veränderten Fertigungsvorgaben, bei Störungen und bei Ausfall einzelner Komponenten erkennen.

6 Industrieroboter und Handhabung

(Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH) Alexander Bay, Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH) Christian Schmid)

Industrieroboter haben ähnliche Kennzeichen und Merkmale wie CNC-Maschinen, jedoch sehr unterschiedliche Kinematiken und spezielle, flexible Steuerungen. Die Aufgabenbereiche, die besonderen Anforderungen und die Programmierung sind ebenfalls sehr unterschiedlich. In weniger als vierzig Jahren haben sie die industrielle Landschaft deutlich verändert.

Einführung

Während der Einsatz der CNC-Technik die Bearbeitungszeiten metallverarbeitender Maschinen in der industriellen Fertigung weitestgehend durch geräte- und programmiertechnische Maßnahmen verkürzte, erforderte der Einsatz von Robotern neue Fertigungskonzepte. Die Entwicklung von CNC-Bearbeitungsmaschinen ist heute weit fortgeschritten. Eine Verringerung der Hauptzeiten ist nur in geringem Umfang möglich. Daher konzentriert sich das Interesse auf die Reduzierung von Nebenzeiten und auf Fertigungsvorgänge, die durch Industrieroboter rationell gestaltet werden können.

Beim industriellen Einsatz kooperiert der Industrieroboter zusammen mit den anderen Geräten und Maschinen im Fertigungsprozess. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einer Fertigungszelle. Ein Roboter ist deshalb nicht isoliert zu betrachten, sondern als ein Teil im Zusammenwirken vieler Komponenten der Fertigungszelle. Dies wird z. B. dann deutlich, wenn die Robotersteuerung mit Sensoren, Transfermitteln, Bearbeitungsmaschinen oder anderen Industrierobotern Signale und/oder Daten austauscht.

Aus der Automobilindustrie, aber mittlerweile auch in unzähligen anderen produzierenden Branchen, ist der Industrieroboter heute nicht mehr wegzudenken. Bereits zu Beginn der 70er-Jahre wurde er dort zu einfachen Handhabungszwecken, insbesondere zum Punkt- und Nahtschweißen eingesetzt. Dies erfolgte vorwiegend aus Rationalisierungsgesichtspunkten, wie der Verkürzung von Bearbeitungszeiten, Verbesserung der Produktqualität und der Einsparung von Kosten.

Auch technologisch schwierig zu beherrschende Prozesse, wie etwa die automatische Montage von Motorteilen, Getrieben oder die Montage von Karosserieteilen, aber auch die Verarbeitung von natürlichen Werkstoffen wie z. B. Holz, Leder, Textilien oder allgemein elastische nachgiebige Materialien wurden durch den Einsatz von Robotern automatisiert. Fortschritte in der Sensorentwicklung ermöglichen weitere neue Anwendungen in den Bereichen Qualitätssicherung und Inspektion.

Mit dem Fortschritt in der Mikroelektronik sowie in der Regelungs- und Antriebstechnik war Mitte der siebziger Jahre der Grundstein für den Beginn der Industrieroboter-Technik gelegt. Ausgehend von hydraulisch betriebenen Robotern, deren Eigenschaften bezüglich Genauigkeit und Dynamik an die Grenzen des Machbaren gestoßen waren, konzentrierte man sich auf die Weiterentwicklung des Roboters, vor allem durch den Einsatz von elektrischen Antrieben. Bei den ersten industriellen Anwendungen wurden Roboter zunächst für leicht beherrschbare Arbeiten eingesetzt. Mit der Verbesserung der Fähigkeiten des Industrieroboters und der Entwicklung von geeigneten Werkzeugen für Füge- und Bearbeitungsaufgaben begann die Erschließung von prozessbezogenen Anwendungsfeldern. Schließlich wuchsen die Anforderungen an die Dynamik und die Genauigkeit der Roboter, die neue Leistungsklassen von Robotersteuerungen mit besonderen Funktionen für Bearbeitungsaufgaben voraussetzten. Das führte dazu, dass Industrieroboter zunehmend mit einer speziellen „Eigenintelligenz“ ausgestattet werden.

6.1 Definition: Was ist ein Industrieroboter?

Die Definition war bisher in verschiedenen Ländern keineswegs einheitlich. Aus diesem Grund wurde der Begriff Industrieroboter auch in der Norm ISO/TR 8373 vereinheitlicht. Sie lautet:

Manipulation industrial robot:
An automatically controlled, reprogrammable, multi-purpose, manipulating machine with several degrees of freedom, which may be either fixed in place or mobile for use in industrial applications.

Weiterhin sind die einzelnen Begriffe aus dieser Definition erläutert:
reprogrammable: whose programmed motions or auxiliary functions may be changed without physical alterations
(umprogrammierbar: die programmierten Bewegungen oder Hilfsfunktionen sind ohne physikal. Änderungen wechselbar)

multi-purpose: can be adapted to a different application with physical alterations
(vielseitig: anpassbar an unterschiedliche Anwendungen durch physikal. Änderungen.)

physical alterations: means alterations of the mechanical structure or control system except for changing programming cassettes, ROMs, etc.
(physikalische Änderungen: Änderungen der mechan. Struktur oder des Steuerungssystems, jedoch nicht den einfachen Programmwechsel)

In der europäischen Norm EN775 wird der Industrieroboter wie folgt definiert:
Ein Roboter ist ein automatisch gesteuertes, wiederprogrammierbares, vielfach einsetzbares Handhabungsgerät mit mehreren Freiheitsgraden, das entweder ortsfest oder beweglich in automatisierten Fertigungssystemen eingesetzt wird.

Zusammenfassend lassen sich folgende Kriterien festhalten:
Der Industrieroboter
- ist frei programmierbar
- ist servogesteuert
- hat mindestens drei CNC-Achsen
- verfügt über Greifer und Werkzeuge
- ist für Handhabungs- und Bearbeitungsaufgaben konzipiert.

6.2 Aufbau von Industrierobotern

Aufgabe des Industrieroboters ist das Aufnehmen, Halten und Führen von Werkstücken und/oder Werkzeugen. An der Erzeugung und Ausführung der hierzu erforderlichen Bewegungen sind eine Reihe unterschiedlicher Komponenten beteiligt. Jedes dieser Teilsysteme *(siehe Tabelle 6.1)* trägt zur Lösung der Bewegungs- und Halteaufgabe durch das Gesamtsystem Roboter bei.

Tabelle 6.1: Komponenten eines Robotersystems [WAR 90]

Teilsystem	Merkmale und Teilfunktionen
Mechanische Struktur	1. Aufbau aus Bewegungsteilsystemen 2. Festlegung der Freiheitsgrade und des Arbeitsraumes 3. Sicherung der Position und Orientierung der Handhabungsobjekte
Kinematik	1. Räumliche Zuordnung der einzelnen Glieder von Roboterarm und Endeffektor 2. Zeitliche Zuordnung zwischen den Bewegungsachsen und der Bewegung des Endeffektors
Achsregelung und Antrieb	1. Regelung der dynamischen Antriebsprozesse 2. Zuführen der Stellenergie zu den Antrieben der Achsen der Bewegungsteilsysteme 3. Erzeugung der Bewegung einzelner Achsen
Effektoren	1. Greifen und Handhaben von Produktteilen (Fügen, Verschrauben, Prüfen, usw.) 2. Bearbeiten von Werkstücken mit Werkzeugen (Schweißen, Entgraten, Schleifen, Lackieren, usw.)
Sensoren und Sensorsysteme	1. Erfassung der inneren Zustände von Manipulator und Effektor (Lage, Geschwindigkeit, Kräfte, Momente) 2. Erfassen der Zustände der Handhabungsobjekte und der Umgebung 3. Messen physikalischer Größen 4. Identifikation und Zustandsbestimmung von Werkstücken und Wechselwirkungen 5. Analyse von Situationen und Szenen in der Umwelt
Steuerung	1. Steuerung, Überwachung von Bewegungs- bzw. Handhabungssequenzen und Fahraufträgen 2. Synchronisation und Anpassung des Manipulators an den Handhabungsprozess 3. Vermeidung bzw. Auflösung von Konfliktsituationen
Programmierung	1. Erstellung der Steuerprogramme (mit Softwaresystemen z. B. Compiler, Interpreter, Simulator usw.) 2. Interaktive/automatische Planung der Roboteraufgabe
Rechner	1. Ausführung der Rechenprozesse (Programmentwicklung, Sensordatenverarbeitung, Datentransformation) 2. Abwicklung der Mensch-Maschine-Kommunikation 3. Globale Steuerung und Überwachung flexibler Fertigungssysteme und Maschinen (u. a. Industrieroboter)

Wichtigste Bestandteile eines Roboters sind:

- das mechanische Gestell inklusive der Getriebe
- die Aktoren zum Agieren innerhalb der erfassten Umgebung
- die Sensoren zur Erfassung der Achspositionen und der Umwelt
- die Robotersteuerung.

6.3 Mechanik/Kinematik

(Bild 6.1)

Der mechanische Aufbau eines Roboters wird mit Hilfe der Kinematik beschrieben. Dabei sind folgende Kriterien von Bedeutung:

- Bewegungsform der Achsen (translatorisch oder rotatorisch)
- Anzahl und Anordnung der Achsen, z. B. Reihenfolge und Lage
- Länge der translatorischen Achsen
- Form des Arbeitsraums

Industrieroboter haben im Allgemeinen die Struktur einer offenen kinematischen Kette ohne Verzweigungen, deren Glieder bzw. Hebel durch Gelenke paarweise miteinander verbunden sind. Jedes Gelenk besitzt genau einen entweder rotatorischen oder translatorischen Freiheitsgrad. Ein Ende der kinematischen Kette ist gelenkig mit der Basis des Roboters verbunden, in welcher der Ursprung des raumfesten Referenzkoordinatensystems liegt; das freie Ende dient zur Aufnahme des Endeffektors (Greifer oder Werkzeug).

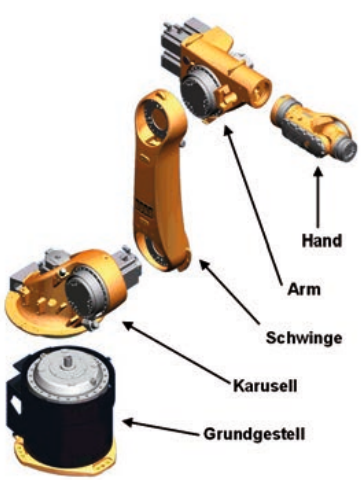


Bild 6.1: Aufbau eines Industrieroboters

Jeder Roboter hat einen ihm zugänglichen Arbeitsraum, der die Menge der erreichbaren Positionen darstellt. Nach der Konstruktion des Roboters durch die Anordnung seiner Gelenke kann man verschiedene Grundformen von Arbeitsräumen unterscheiden. Nimmt man zum Beispiel einen Roboterarm mit der Gelenkanordnung RRT *(Bild 6.2)*, dann wird mit dem ersten Gelenk eine Rotationsbewegung erzielt, die mit dem zweiten zu einer Torusoberfläche erweitert wird. Diese wird durch das Lineargelenk kontrahiert oder expandiert, was den vollständigen Arbeitsraum des Roboters ergibt. Häufige Grundformen für Arbeitsräume sind:

- Quader (Roboter des Typs TTT)
- Zylinder (z. B. RTT)
- Kugel (z. B. RRR, RRT)

Die Torusform ist bei den gängigen Robotern meist nicht sehr ausgeprägt und in der Regel einer Kugel angenähert. Das Handgelenk des Roboters hat die Funktion, an einer gewünschten Position auch jede Orientierung einzustellen. Es hat sinnvollerweise kürzere Glieder als der Arm, auch gibt es keine Lineargelenke. Typische Bauformen von Handgelenken sind TRT und TRR. An das letzte Glied des Handgelenks schließt sich ein Flansch an, um den Effektor anzukoppeln.

Man unterscheidet verschiedene Arten von Industrierobotern *(Bild 6.3)*.

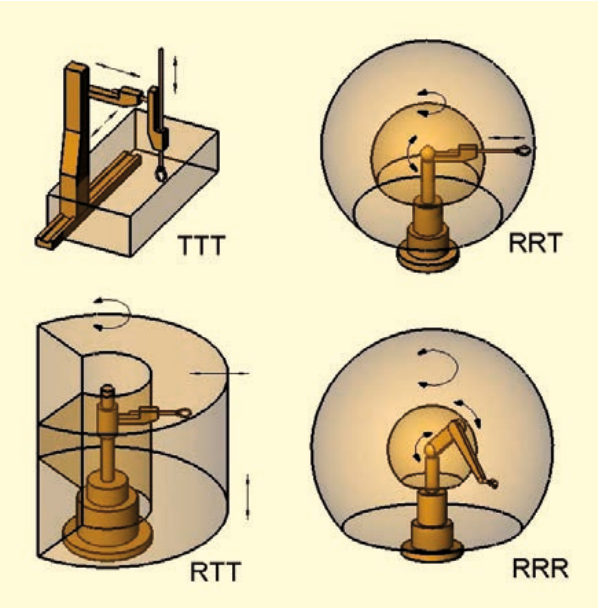


Bild 6.2: Arbeitsräume eines Industrieroboters

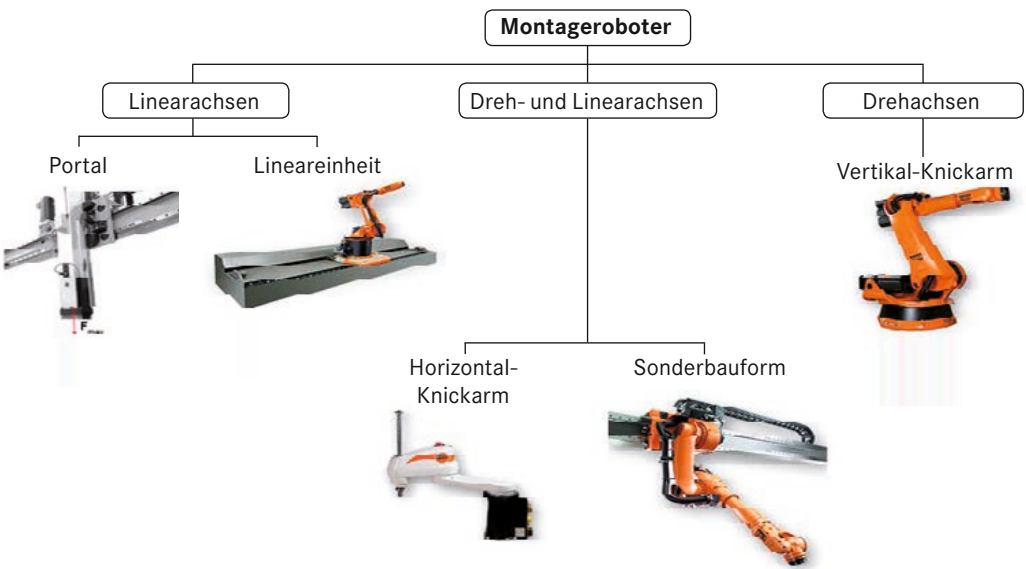


Bild 6.3: Arten von Industrierobotern

6.4 Greifer oder Effektor

Ein Effektor ist der Teil des Roboters, der die eigentliche Handhabungsaufgabe ausführt. Er wird am Handgelenk des Roboters befestigt und an Energie- und Steuerleitungen angeschlossen, um die Werkstücke oder Werkzeuge zu greifen, festzuhalten, zu transportieren und in der gewünschten Lage zu positionieren. Je nach Handhabungsaufgabe kommen Sensoren, Fügehilfen, zusätzliche elektrische Leitungen (Schweißstrom) oder bei Lackierrobotern Schläuche für die Farbzubereitung hinzu.

Insgesamt sind dafür 3 Hauptachsen erforderlich, um jeden Punkt in den 3 Raumkoordinaten anzufahren, sowie 3 zusätzliche „Orientierungsachsen" für den Greifer, um das Werkstück durch Drehen, Kippen und Schwenken in die gewünschte räumliche Orientierungslage zu bringen.

Die vielfältigen Anwendungen von Industrierobotern erfordern hinsichtlich Größe, Bauart, Funktion und Einsatzmöglichkeiten ein breites Spektrum an angebotenen Greifern. Dabei unterscheidet man zwischen folgenden, nach dem Wirkprinzip gegliederten, Greifern:

- Mechanische Greifer, wie z. B. Parallel-, Zangen-, Dreipunktgreifer
- Druckluftgreifer, wie z. B. Beugefinger, Loch- und Zapfengreifer
- Sauggreifer (besonders für Werkstücke mit glatter Oberfläche geeignet)
- Magnetgreifer (nur für paramagnetische Werkstoffe tauglich)
- Adhäsivgreifer, die den Haftklebeeffekt nutzen (selten) und
- Nadelgreifer (für z. B. Textilien, Leder, usw.).

Spezielle **Greifer-Wechselsysteme** tragen erheblich zur flexiblen Nutzung von Industrierobotern bei. Besonders in der Montage kleiner Stückzahlen sind Greifer und Fügewerkzeuge laufend zu wechseln, da der Roboter hier oft mehrere Arbeitsoperationen nacheinander ausführt. In solchen Fällen wird durch das Wechselsystem an Flexibilität gewonnen, wenn der Werkzeugwechsel automatisch geschieht.

Dabei geht es nicht nur um die sichere mechanische Kopplung, sondern auch um Verbindungen im Energie- und Informationsfluss. Dafür sind in die Wechselflansche Steckverbindungen für elektrische bzw. pneumatische Leitungen eingelassen. Bei kühlungsbedürftigen Punktschweißzangen ist zusätzlich eine Kühlwasserleitung zu koppeln.

6.5 Steuerung *(Bild 6.4)*

Die Intelligenz eines Industrieroboters und damit die Fähigkeit flexibel zu agieren, befindet sich in der Robotersteuerung. Alle notwendigen Eingangsdaten wie z. B. Weg, Geschwindigkeit oder Eingriffe des Bedieners werden in der Steuerung verarbeitet und wirken entsprechend der vorgegebenen Logik als Ausgangsdaten auf die Roboterantriebe oder Roboterwerkzeuge.

Als Mensch-Roboter-Schnittstelle steht heute bei den meisten Robotersteuerungen ein Programmiersystem zur Verfügung, welches auf einem Standard-PC lauffähig ist. Des Weiteren ist es möglich, maßgeschneiderte Bediengeräte für den Produktionsbetrieb oder universell einsetzbare Programmierhandgeräte zu verwenden.

Aufgaben der Robotersteuerung

Die Robotersteuerung enthält alle Komponenten und Funktionen, die zum Betrieb, zur Bedienung und zur Programmierung und zur Überwachung eines Roboters erforderlich sind.

Die Robotersteuerung übernimmt die verschiedenartigsten Aufgaben innerhalb einer Roboterzelle:

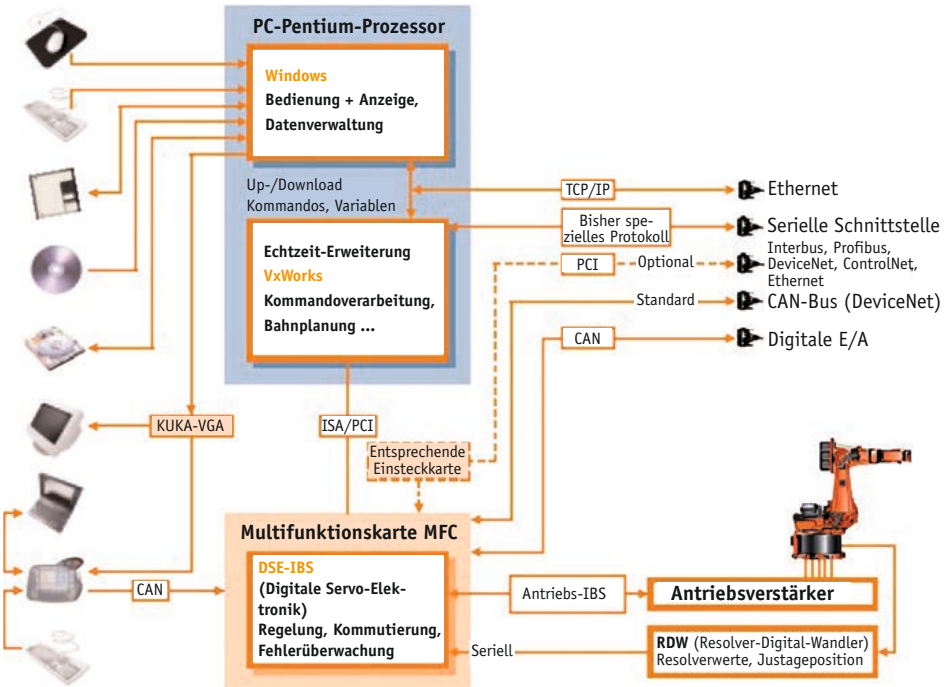


Bild 6.4: Robotersteuerung, prinzipieller Aufbau und Schnittstellen

- Steuerung der Verfahrbewegungen des Roboters
- Beeinflussung der Prozesskomponenten im System
- Beeinflussung der Förder- und Zuführkomponenten
- Steuerung der Greiferfunktionen
- Aufnahme und Auswertung von Sensorsignalen
- Aufnahme und Verarbeitung von Prozessinformationen zur Beeinflussung des Prozesses
- Diagnosefunktionen zur Fehlererkennung am Roboter oder am Prozess
- Unterstützung des Bedieners
- Unterstützung des Programmierers beim Einrichten der Automationszelle.

Um all diese Aufgaben ausführen zu können, benötigt die Robotersteuerung neben einer leistungsfähigen Rechnereinheit Schnittstellen zum Roboter, zur Peripherie, zum Prozess und zum Bediener.

Bedien- und Programmiergerät

Zur Bedienung und Programmierung des Roboters stehen verschiedene Komponenten zur Verfügung.

Im Normalfall werden Roboter mit Hilfe des Programmierhandgerätes (PHG) bedient und programmiert. Über das Programmierhandgerät *(Bild 6.5)* können alle Befehle eingegeben und alle Funktionen der Robotersteuerung aktiviert werden.



Bild 6.5: Controlpanel

Rechnereinheit

Die Rechnereinheit besteht aus einem Hauptrechner, der die Gesamtkoordination innerhalb der Robotersteuerung übernimmt. Diesem Hauptrechner unterlagert sind Achsregelrechner, die jeweils die Lageregelung und die Überwachungen für die Roboterachsen ausführen. Die Hauptrechner der Robotersteuerungen werden mittlerweile mit leistungsfähigen Multicore-Prozessoren ausgestattet, die die Performance der Steuerung verbessern und neben der Robotersteuerung weitere Automatisierungsaufgaben übernehmen können.

Leistungsteil

Das Leistungsteil einer Robotersteuerung liefert die notwendige Energie für die gesamte elektronische Ausrüstung und für die Servoantriebe. Die technischen Anforderungen an diese Stromversorgung bezüglich Spannungskonstanz und Störungssicherheit sind sehr hoch, da durch die ständigen Lastwechsel der Servomotoren große Lastschwankungen auftreten.

Zur Stromversorgung der Servoantriebe werden heute fast ausschließlich **Stromrichter** eingesetzt. Diese bestehen aus den Leistungshalbleitern, der Ansteuerschaltung für die Halbleiter und Spannungsfiltern zur Einhaltung der EMV-Grenzwerte des Versorgungsnetzes. Ein vorgeschalteter Transformator übernimmt die Anpassung an das Versorgungsnetz sowie die Filterung von hochfrequenten Störungen in die Robotersteuerung und auch umgekehrt von den Servoreglern in das Netz.

Die steuerungstechnische Verbindung zwischen Servoverstärkern und der Robotersteuerung wird heute vorwiegend über ein Bussystem realisiert. Über dieses können nicht nur die Ansteuerbefehle zur Servoeinheit, sondern auch die Rückmeldungen und Fehlerzustände zur Robotersteuerung übertragen werden. Somit besteht die Möglichkeit einer zentralen Diagnose für diese Anlagenkomponenten.

Auf die gleiche Weise erfolgt auch die Einstellung und Anpassung der Servoregler an die einzelnen Roboterachsen. Über den Bus werden die notwendigen Parameter für ein optimales Regelverhalten zum Servoregler gemeldet. Dies bedeutet, dass im Servicefall keine Einstellungen am Servoregler erfolgen müssen.

Das gesamte Leistungsteil der Robotersteuerung sowie die Ballastschaltung im Besonderen erzeugen Verlustwärme. Deshalb ist der Schaltschrank meistens mit einem Kühlsystem ausgerüstet.

Achsregelung

Der geschlossene Regelkreis für die Achsantriebe hat die Aufgabe, die von der Steuerung vorgegebenen Führungsgrößen jeder Achse mit der programmierten Geschwindigkeit zu verfahren und auch stabil festzuhalten. Da das gesamte kinematische System ein schwingungsfähiges Gebilde

darstellt, muss die Achsregelung so abgeglichen werden, dass insgesamt ein stabiles, schwingungs- und resonanzfreies Verhalten erreicht wird. Dieser Abgleich kann bei heutigen modernen Systemen automatisch erfolgen.

Antriebe

Die Servoantriebe dienen zum präzisen Verfahren jeder NC-Achse sowie zu Festhalten der eingefahrenen Positionen. Als Antriebsmotoren werden heute auch bei Robotern vorwiegend drehzahlgeregelte und weitgehend wartungsfreie Asynchron- oder Synchronmotoren im geschlossenen Positions-Regelkreis eingesetzt. Die Anforderungen an die Antriebe sind sehr hoch aufgrund des stark veränderlichen dynamischen Verhaltens des Roboters bei unterschiedlichen Werkstückgewichten und der mehr oder weniger starken Auslegung der Kinematik innerhalb des Arbeitsbereiches.

Messsysteme

Messsysteme haben die Aufgabe, Position bzw. Winkel aller Achsen, der Verstellgeschwindigkeit und der Beschleunigung in den einzelnen Achsen zu messen. Dafür werden meistens inkrementale Messsysteme verwendet, in einigen Fällen sind absolute Messsysteme unerlässlich. Diese Forderung stellt sich beispielsweise bei Schweißrobotern, um nach einem Netzausfall die Stellung sämtlicher Achsen sofort wiederzuerkennen.

Sicherheitsfunktionen

Zum Sicherheitsteil einer Robotersteuerung gehören unter anderem:

- Hard- und Softwareendschalter für alle Achsen
- Personen-Lichtschranken zur sofortigen Stillsetzung
- Betriebsartenwahlschalter als Schlüsselschalter
- Überwachung der Schaltsysteme für Zustimmungsschalter, Notausschalter
- Überwachung der Geschwindigkeiten im Einrichtbetrieb
- Einschaltdiagnose für alle kontaktbehafteten Schaltvorgänge, die Sicherheitsfunktionen übernehmen (z. B. Antriebe ausschalten usw.)
- Spannungs- und Temperaturüberwachung.

Hierzu bestehen Normen und Vorschriften, die in erster Linie der Sicherheit des Personals dienen. Diese Normen und Vorschriften durchlaufen zurzeit grundlegende Änderungen. Unter dem Punkt SafeRobot ist beschrieben, wohin diese Entwicklung geht und was heute schon möglich ist.

6.6 SafeRobot Technologie

Roboter und Werker rücken zusammen – SafeOperation

Nach heutigem Stand der Technik dürfen Industrieroboter aus Sicherheitsgründen nur in abgesicherten Arbeitsbereichen betrieben werden. Stets verhindern Schutzzäune oder andere aufwändige Schutzeinrichtungen, dass der Mensch dem Roboter zu nahe kommt. Kontrolliert und im Produktionsablauf überwacht wird der Roboter durch eine übergeordnete SPS, und nur ein geringer Anteil von Robotern zusätzlich durch externe Sensoren geführt. In jedem Fall bewegt sich der Roboter im Produktionsbetrieb nur, wenn sich kein Werker in seinem Arbeitsbereich aufhalten kann. Durch den Einsatz der SafeRobot Technology (SRT) ist es nun bei vielen Anwendungen möglich, diese Trennung zwischen Bediener und Roboter aufzulösen. Neben dem Verzicht auf aufwändige Sicherheitstechnik können neue Anlagenkonzepte vor al-

lem in der Montagetechnik realisiert werden. Die Stärken von Mensch (Sensorik) und Roboter (Arbeitsleistung) werden in idealer Weise kombiniert. Hierdurch werden Automatisierungsaufgaben, die bisher nicht wirtschaftlich darstellbar waren, durch kostengünstigere Teilautomatisierung lösbar.

Mit der Technologie des „sicheren" Roboters – einer zweikanalig-redundant ausgeführten Überwachungstechnik direkt am Roboter – wird nun vor Ort entschieden, ob der Roboter in einen gesperrten Bereich einfährt oder nicht. Die aktuelle Position aller Achsen wird permanent erfasst und zyklisch innerhalb weniger Millisekunden mit konfigurierten Grenzwerten verglichen. Da diese Lösung keiner mechanischen Nocken bedarf, ist die Anzahl der Arbeits- oder Schutzbereiche natürlich deutlich größer. Bei Bereichsverletzung leitet der Roboter sofort selbst den notwendigen Stopp ein. Dadurch werden Nachlaufwege im Fehlerfall deutlich reduziert und der Platzbedarf gesenkt.

Der „menschgeführte Roboter" – SafeHandling

Wie oben bereits erwähnt, war bisher der Betrieb eines Roboters nur „hinter Gittern" erlaubt. Es war unvorstellbar, dass ein Werker neben oder gar mit einem Roboter arbeitet. Diese Sicherheitsvorstellungen erklären den geringen Automatisierungsgrad in den Endmontage-Linien der Automobilindustrie und sie erklären die schleppenden Fortschritte in den Bereichen der Mobilen-Robotik und der Service-Robotik. Mittels eines Führungsgriffes (Joy Stick), der direkt am Roboter oder am Roboterwerkzeug befestigt ist, bewegt der Mensch den Roboter. Ohne Programm und ohne zusätzliche SPS! Gleichzeitig lassen sich so auch Punkte und Bahnen ohne textuellen Programmieraufwand einlernen.

Voraussetzung für die Kooperation von Mensch und Roboter sind eine sicher überwachte und reduzierte Geschwindigkeit des Robotersystems (kartesisch), die sichere Überwachung der Geschwindigkeiten jeder einzelnen Roboterachse (achsspezifisch) und ein dreistufiger Zustimmtaster am Führungsgriff.

Teilautonome Systeme – Neue Bereiche der Robotik

Für viele Zuführ- und Fügeaufgaben im Montagebereich werden heute einfache Manipulatoren eingesetzt. Bei größeren Bauteilen und höheren Anforderungen an die Positioniergenauigkeit sind unter Umständen zwei Bediener zum Betrieb des Manipulators notwendig. Der Manipulator kompensiert zwar die Gewichtskraft der zu bewegen Teile, unterstützt den Bediener jedoch nur bedingt beim Aufbringen von Fügekräften. Der größte Nachteil des Manipulators liegt jedoch in der 100-prozentigen Bindung des Werkers an das Gerät.

Anders der menschgeführte Roboter. Bei dieser Anwendung holt der Roboter selbständig und programmgesteuert im Automatikbetrieb das zu montierende Teil z. B. von einer Palette und bringt es nahe zum Einbauort. Dies geschieht in einem abgesicherten Arbeitsbereich. Der Werker übernimmt nun die Kontrolle über den Roboter und führt nur noch die kritische Fügeoperation aus. Die Kraft des Roboters und die Sinne des Menschen ergänzen sich zu einem hoch effizienten System. Nachdem der Werker anschließend den Roboter wieder in eine abgesicherte Arbeitsposition zurückgeführt hat, kann dieser im Automatikbetrieb das nächste Teil holen. Durch diese „Arbeitsteilung" von Werker und Roboter wird es möglich, einen Werker an gleichzeitig zwei Montagestationen einzusetzen.





Bild 6.6: Design-Studien eines Führungsgriffes

Gleitender Automatisierungsgrad
Zum ersten Mal in der Geschichte der Robotik sind Produktionsaufgaben mit einem gleitenden Automatisierungsgrad möglich. Gab es bisher nur die beiden Extreme, eine Produktionsaufgabe vollständig zu automatisieren (mit dem Roboter „hinter Gittern“) oder zu 100 % manuell (Verzicht auf Roboter) durchzuführen, so kann jetzt individuell und kostenoptimiert automatisiert werden. In der Betriebsart „menschgeführt“ sind die Zäune zwischen Mensch und Maschine gefallen *(Bild 6.6)*.

6.7 Programmierung

Für die Wirtschaftlichkeit einer Roboteranlage ist der Zeitbedarf für die Ausarbeitung von anforderungsgerechten und fehlerfreien Anwenderprogrammen besonders wichtig. Programmieren heißt, ein Programm zu erstellen und es in die Robotersteuerung einzugeben. Dabei ist das Programm selbst die Aufeinanderfolge aller Informationen, die das Handhabungssystem zur Durchführung eines Bewegungs- oder Arbeitszyklus braucht. Da sich aus der Analyse der Arbeitsaufgabe, den Einsatzbedingungen und der Beweglichkeit von Robotern verschiedene Anforderungen an die Programmierung ergeben, existieren auch verschiedenartige Programmierverfahren. Jede Robotersteuerung kann Programme in mindestens einer Programmiersprache abarbeiten.

Programminhalt

Ein Arbeitsprogramm muss alles enthalten, was für den vollständigen Arbeitsablauf des Industrieroboters im technologischen Prozess gebraucht wird. Die dazu gehörenden Bestandteile werden in *Tabelle 6.2* erklärt.

Programmierverfahren

Eine Roboterprogrammerstellung kann in die Bewegungs- und Ablaufprogrammierung aufgeteilt werden. Bei der Bewegungsprogrammierung geht es um die Festlegung der Bahnpunkte bzw. Bewegungsabschnitte. Die Ablaufprogrammierung beinhaltet die Verknüpfung von Bewegungsabschnitten, die Definition von Prozessparametern, Zeiten, Wartepositionen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und die Kommunikation mit peripheren Einrichtungen. Die Programmierverfahren für Industrieroboter lassen sich wie folgt einteilen:

Tabelle 6.2: Grundbestandteile von Handhabungsprogrammen [HES 96]

Bestandteil	möglicher Inhalt	Merkmale für Anwender
Programmablauf	Befehle für Bewegungen Befehle für Greiferbetätigung Befehle für Prozesskommunikation und zum Hauptrechner Befehlsverknüpfung Befehlsfolge	Notwendige Bestandteile des Handhabungsprogramms
Wegbedingungen	Sollwerte für Position Sollwerte für Orientierung spezielle Punktmuster Arbeits- oder Zwischenpositionierung	Freizügige Gestaltung und Korrigierbarkeit über das Handhabungsprogramm
Bewegungsbedingungen	Bewegungsgeschwindigkeit Verhalten in der Anfahrphase Verhalten beim Positionieren Bewegungsabhängigkeit in den Achsen Interpolationsbedingungen	Sicherstellung des stabilen Bewegungsverhaltens Bewegungsoptimierung Gewährleitung für spezielle Bewegungsbahnen
Logische Entscheidungen	Programme variabler Struktur Programmdurchlauf abhängig von Prozess- und Sensorsignalen	Notwendigkeit für komplexe Bedien- und Montageaufgaben Programmauswahl
Überwachung/ Diagnose	Funktionsüberwachung Prozessüberwachung Reaktion auf Störungen Aktionen zur Fernwartung	Erfüllung von Zuverlässigkeits- und Sicherheitsforderungen anspruchsvolle Servicehilfe

Online-Verfahren
(prozessgekoppeltes, direktes Programmieren; prozessnahe Programmierung)

- Teach-In Programmierung (Anfahren von Punkten)
- Playback-Verfahren (Abfahren einer Bahn; direktes Führen des Roboterarmes vom Bediener)
- Manuelle Eingabe über Tasten

Offline-Verfahren *(Bild 6.7 und 6.8)*
(prozessentkoppeltes, indirektes Programmieren, prozessferne Programmierung)

- textuelles Programmieren mit Robotersprachen
- Explizite Programmiersprachen. Sie geben die Arbeitsaufgabe in elementaren Schritten an. Jedes Bewegungselement ist mit einer Anweisung zu beschreiben. Die Programmierung ist roboterorientiert
- Implizite Programmiersprachen. Der Arbeitsauftrag wird global formuliert. Die Einzelaktionen generiert der Roboter selbst, wozu eine gewisse „Intelligenz“ gebraucht wird. Die Programmierung ist aufgabenorientiert.
- Teach-In Programmierung mit Phantomarm
- Interaktive Programmierung am Bildschirm mit Grafikunterstützung
- Akustische Programmierung (Eingabe in natürlicher Sprache und Spracherkennung).

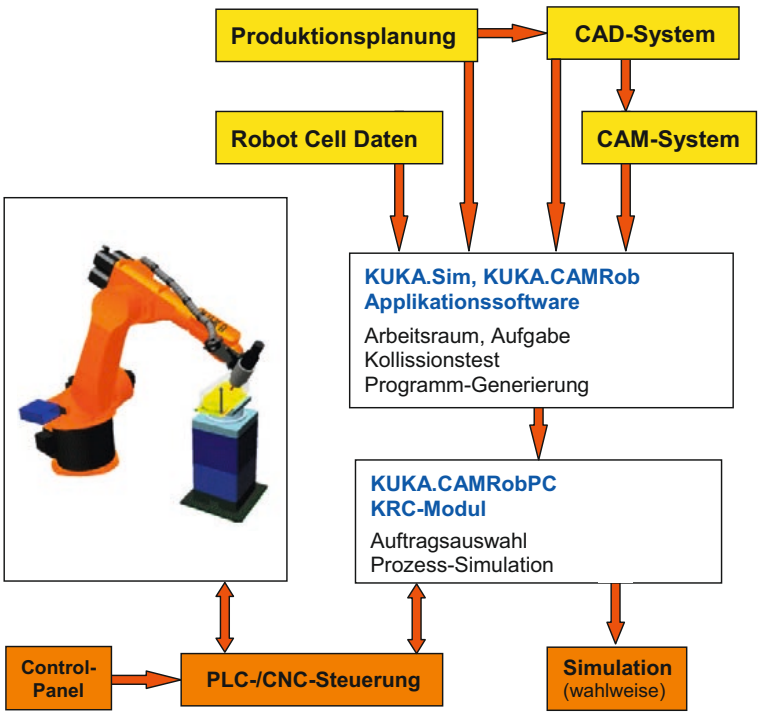


Bild 6.7: Programmierkonzept der offline-Programmierung für KUKA-Roboter

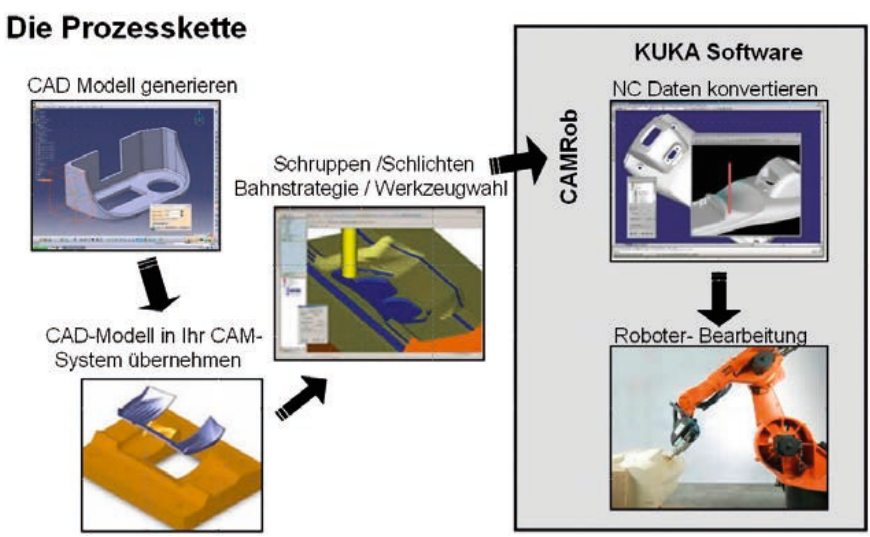


Bild 6.8: Die Prozesskette zur Erstellung eines Bearbeitungsprogrammes

Hybride Programmierverfahren

(kombinierte Verfahren, welche die Vorteile von Online- und Offline-Verfahren vereinen)
Die Geometrieanweisung (Bahnen und Positionen) werden nach dem Teach-In programmiert, die Ablauf-, Kontroll-, Überwachungs-, und Kommunikationsanweisungen werden dagegen in Form eines Codes oder einer Sprache eingegeben.

Automatische Programmgenerierung

Nach Beschreibung eines Zielzustandes erzeugt ein System das dazu erforderliche Programm selbstständig. Das erfordert einen Programmlöser, der die Aufgabe in Teilaufgaben zerlegt und daraus die zu programmierenden Aktionen plant und das Programm darstellt. Solche Ansätze finden sich heute schon bei der automatischen Generierung von Bahn- und Prozessdaten, zum Beispiel beim Fräsen oder Kleben. Hierbei kann aus CAD- bzw. CAM-Daten direkt ein Roboterprogramm generiert werden.

6.8 Sensoren *(Tabelle 6.3)*

Sensoren dienen dazu, Störeinflüsse wie Lageveränderungen, Musterabweichungen oder andere auftretende äußere Störungen zu erkennen und berücksichtigen zu können.

Die Zunahme des Roboter-Einsatzes in der Fertigung ist unter anderem von der Entwicklung geeigneter Sensoren abhängig. Die Erfassung des inneren Zustandes eines Robotersystems, der aktuellen Wechselwirkung des Effektors mit der Umgebung und der des äußeren Zustandes im Einsatzbereich des Robotersystems erfolgt durch Sensoren. Die Funktion von Sensoren basiert auf der Umwandlung eines am Eingang anliegenden physikalischen Phänomens (z. B. Druck, Kraft, Berührung, Bewegung) in ein quantitatives elektrisches Maß. Diese elektrische Größe wird nach der Digitalisierung von einem Sensorrechner oder der Robotersteuerung ausgewertet. Es werden zu diskreten Zeitpunkten aktuelle Zustände des Roboters und seiner Umgebung erfasst, um die korrekte Akti-

Tabelle 6.3: Technische Sensoren (nach Hesse)

		berührende Sensoren				berührungslose Sensoren										
Prinzip		taktil				elektrisch		optisch/visuell					akustisch			
Sensortyp		mechanischer Taster	Dehnungsmessstreifen	Messdose (Piezzo)	druckempfindliche Kunststoffstrukturen	induktiver Näherungsschalter	kapazitiver Näherungsschalter	Lichtschranke	Reflexionssensor	Laserscanner	Infrarotsensor	Videosystem	Ultraschallschranke Sonar	Sonar	Ultraschall-Array
Signalart	Digital	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	Analog	X	X	X								X		X	X

onsausführung zu überwachen (z. B. die Messung der Öffnungsweite der Greiferbacken) oder Parameter zur Beeinflussung nachfolgender Operationen direkt aus der Umwelt aufzunehmen (z. B. Teileidentifikation, Abstände). Aufgrund erfasster Zustände wird die weitere Operationsausführung gesteuert.

Während den die Operationsausführung begleitenden Messungen sind sensorüberwachte bzw. sensorgeführte Aktionen realisierbar. Sensorüberwachte Aktionen werden solange ausgeführt, bis die gemessenen Größen vorgegebene Grenzwerte überschreiten. Bei sensorgeführten Aktionen werden die Vorgaben zur Operationsausführung gegebenenfalls korrigiert, damit die Messgrößen die vorgegebenen Grenzwerte ständig einhalten.

Sensoren sind also technische Fühler (Messwertaufnehmer), die einen Roboter in beschränktem Umfang mit Sinnen ausstatten. Sie gewinnen Informationen über Eigenschaften, Zustände oder Vorgänge und stellen diese als elektrisches Signal bereit. Das eigentliche primäre Wandlungselement, das eine nichtelektrische Messgröße aufnimmt und als elektrisches Signal weitergibt, wird auch Elementarsensor bezeichnet.

6.9 Anwendungsbeispiele von Industrierobotern

(Bild 6.9 – 6.14)

KUKA.CNC ist die neue Steuerungsgeneration für die direkte CNC-Programmcode-Verarbeitung auf einem KUKA Roboter.

Mit ihr können CNC-Programme nach DIN 66025 direkt mit der Robotersteuerung abgearbeitet werden. Der komplette Standard Code-Umfang kann über die Steuerung interpretiert und vom Roboter umgesetzt werden. (G-Funktionen, M/H/T-Funktionen, lokale und globale Unterprogramme, Steuersatzstrukturen, Schleifen, usw.) Durch diese Möglichkeiten erweitern sich die Einsatzgebiete eines Industrieroboters vor allem auf folgende **Anwendungsfelder:**

- Fräsen von Formteilen aus weichen bis mittelfesten Materialien wie Holz, Kunststoff, Aluminium, Verbundmaterialien, etc.,
- Polieren und Schleifen von Formteilen,
- Beschichten und Oberflächenbehandlung komplexer Bauteiloberflächen, *(Bild 6.7)*
- Besäumen und Beschneiden komplexer Bauteile und Bauteilkonturen
- Laser-, Plasma-, Wasserstrahlschneiden von komplexen Bauteilen

Durch die direkte Einbindung des CNC-Kerns auf der Robotersteuerung wird der Roboter zu einer Bearbeitungsmaschine mit offener Kinematik, die die Vorteile eines Industrieroboters

- großer Arbeitsbereich
- hohe Flexibilität
- niedrige Investitionskosten
- 6-achsige Bearbeitung, usw.

mit den Vorteilen einer CNC-Steuerung kombiniert:

- G-Code-Programmierung
- CNC-Benutzeroberfläche
- Werkzeugradiuskompensation
- große Punktevorausschau
- erweiterte Spline-Bahnplanung
- komfortable Werkzeugverwaltung, usw.

Die CNC-Kern-Einbindung ermöglicht zudem eine direkte Verarbeitung des CNC-Programms auf der Robotersteuerung. Ein umständliches Umwandeln von CNC-Programmen in ein Roboterprogramm ist somit nicht mehr notwendig, wodurch der Einsatz von Industrierobotern in typischen

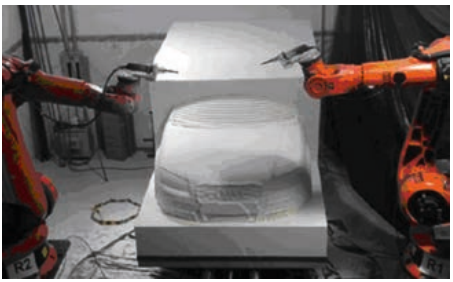


Bild 6.9: Fräszelle im Modellbau



Bild 6.10: Kockpitmontage im Automobilbau

Bearbeitungsprozessen wesentlich einfacher wird. Sowohl CAD/CAM Programmierer als auch CNC-Maschinenbediener können somit mit bestehendem Know-how einen Industrieroboter programmieren und bedienen.

CNC – Roboterbearbeitung und Werkzeugmaschinen-Automatisierung

Neben der grundsätzlichen Möglichkeit, über den in der Robotersteuerung integrierten CNC-Kern entsprechende Programme abzuarbeiten, bietet der Hersteller weiterhin den vollen Funktionsumfang einer Robotersteuerung an. So kann für unterschiedliche Anwendungen zwischen einem CNC-Betrieb und einem herkömmlichen Roboter-Betrieb umgeschaltet werden. Dadurch lässt sich für den jeweiligen Prozess die ideale Steuerungs-, Programmier- und Bedienumgebung auswählen.

Der CNC-Modus bringt vor allem in Bahnprozessen große Vorteile. Bearbeitungsprogramme mit einer großen Anzahl an Bahnpunkten können über den CNC-Kern und dessen Unterfunktionen genauer und mit reduzierten Taktzeiten abgearbeitet werden. Diese Genauigkeits- und Taktzeitverbesserungen sind vor allem durch die erweiterten Bahnplanungsfunktionen im CNC-Kern begründet. Die Bahnplanung mit einer Punktevorausschau von mehr als 500 Punkten ermöglicht es dem Roboter, im Bearbeitungsprozess die Geschwindigkeiten konstant zu halten und Beschleunigungs-/Bremsrampen optimal zu planen. Aber auch die Bahngenauigkeit wird durch diverse Spline Interpolationen im CNC-Kern verbessert. Akima und B-Spline Berechnungen stellen sicher, dass der Roboter möglichst genau seine Sollbahn abfährt. Diese typischen CNC-Funktionalitäten werden mit den herkömmlichen Funktionen einer Roboter-Steuerung verbunden und bringen somit ein optimales Bearbeitungsergebnis. (z. B. Roboterkompensations-Berechnungen, Elastizitätsmodelle, …)

Aber auch der Einsatz eines Roboters im Umfeld von herkömmlichen CNC-Bearbeitungsmaschinen wird durch die Möglichkeit der G-Code-Verarbeitung neu definiert. In automatisierten Bearbeitungsanlagen kann zukünftig neben der Werkzeugmaschine auch der Roboter per DIN 66025 Code programmiert und bedient werden. Dies erleichtert die Roboterintegration und bietet vor allem dem Bediener an der Maschine einen wesentlichen Vorteil. Dieser muss zukünftig nicht mehr roboterspezifische Programmier-Kenntnisse haben, son-



Bild 6.11: Automatischer Werkzeugwechsel an Bearbeitungszentren



Bild 6.12: Schleifen und Polieren von Implantaten

dern kann mit vorhandenem CNC-Wissen auch den Roboter bedienen.

Ein Sonderfall der automatisierten Bearbeitung, ist die Bearbeitung von Bauteilen die vom Roboter gehandhabt werden. Die Kombination von Bearbeitung und Handhabung macht diese Prozessvariante besonders effizient. Da der Roboter die Bauteile fasst, an eine Bearbeitungsstation führt, dort die Bearbeitung durchführen lässt und anschließend einem Ablagesystem übergibt, ist keine weitere Transport- oder Handhabungskinematik für die Prozessautomatisierung notwendig. Bearbeitungsmaschine und Automatisierungsanlage verschmelzen in einem solchen Beispiel zu einer Einheit, was einen positiven Einfluss auf die Kosteneffizienz hat.

Durch die CNC-Programmierung eröffnet sich der Robotik eine Vielzahl neuer Programmiersysteme. Der Markt an CAD/CAM-Systemen bietet für unterschiedlichste Bearbeitungsanwendungen entsprechende Speziallösungen. Dadurch werden sich auch zukünftig die Möglichkeiten der Roboterprogrammierung und Roboterverwendung entsprechend vervielfältigen. Zunehmend mehr CAD/CAM-Hersteller haben diese Entwicklung erkannt und statten ihre Software mit entsprechenden Modulen zur Roboterprogrammierung und Simulation aus.

6.10 Einsatzkriterien für Industrieroboter

Bedeutende Gründe für die flexible Automatisierung mit Robotern sind die zunehmende Typen- und Variantenvielfalt der Produkte aufgrund von Marktbedürfnissen, kürzere Produktionslaufzeiten der Produkte mit häufigeren Modellwechseln, geringer werdende Stückzahlen mit hohen Umrüstzeiten und geringer Auslastung, konventioneller Betriebsmittel, erhöhte Anforderungen an die Qualität der Produkte, zu hohe Durchlaufzeiten mit zu großen Lagerbeständen und zu hoher Kapitalbindung, belastende und monotone und gesundheitsschädliche Tätigkeiten für



Bild 6.13: Fräsen von Steinwannen



Bild 6.14: Lichtbogenschweißen

die Werker, Kostendruck auf die Produkte und die verstärkt zunehmende Produktdifferenzierung.

Der Einsatz von Industrierobotern hängt zum einen von äußeren Rahmenbedingungen, aber auch von wirtschaftlichen Gesichtspunkten ab:

- **Umweltbedingungen**
  Reinraum, Tiefkühl, giftige Dämpfe, Hitze …
- **Arbeitssicherheit**
  Gefahrstoffe, Gewicht, Lärm …
- **Qualitätsanforderungen in der Produktion**
  Präzision, Nullfehlerproduktion
- **Lohnkosten**
  Steigende Lohnkosten wirken sich in Industrieländern zunehmend als Wettbewerbsnachteil aus
- **Flexibilität**
  Robotereinsatz erhöht die Flexibilität in der Produktion

Bei der Auswahl eines Roboters sind verschiedene Kriterien von Bedeutung:

- Die generelle Aufgabe am Einsatzort
- Die Traglast, deren Angriffspunkt und Eigenträgheit
- Der Arbeitsbereich, in dem der Roboter sich bewegen soll
- Die Prozessgeschwindigkeit bzw. die Zykluszeit der Abläufe
- Die verlangte Genauigkeit, bezogen auf Bahnverhalten oder Position
- Die Art der Steuerung, inclusive spezieller Forderungen des Anwenders, und
- Die Fähigkeit des Robotersystems, sich in das Anlagenumfeld integrieren zu lassen.

Durch diese Einsatzmöglichkeiten eines Industrieroboters ergeben sich folgende Vorteile:

- **Hohe Verfügbarkeit**
  Uneingeschränkte Produktion zu jeder Zeit.
- **Optimierte Nutzung von Taktzeiten**
  Nutzung von Nebenzeiten im Produktionsprozess für Zusatzaufgaben wie Nachbearbeitung von Teilen
- **Erhöhung des Outputs**
  Roboter können in konstant hoher Geschwindigkeit bei gleich bleibender Qualität arbeiten, dadurch niedrigere Ausschussquote und höherer Durchlauf in der Produktion
- **Zeit sparend**
  Optimale Positionierung des Roboters an den Maschinen führt zu reduzierten Taktzeiten
- **Kosten sparend**
  Hohe Verfügbarkeit in Verbindung mit optimaler Produktionsqualität und kurzen Taktzeiten führt zu schnellem ROI und wettbewerbsfähiger Produktion
- **Schnell**
  Höhere Bearbeitungsgeschwindigkeiten als bei manueller Bearbeitung bei gleich bleibend hoher Qualität
- **Flexibel**
  Einfache Programmierbarkeit ermöglicht flexible Anpassungen an sich ändernde Produktionsprozesse und saisonale Schwankungen
- **Präzise**
  Hohe Positioniergenauigkeit auch bei Dauerbetrieb führt zu erhöhter Produktqualität und geringerem Ausschuss
- **Investitionssicherheit**
  Industrieroboter zeichnen sich durch sehr lange Lebenszeiten aus (durchschnittlich 15 Jahre).

6.11 Vergleich Industrie-Roboter und CNC-Maschine

Nach den technischen Merkmalen sind Industrieroboter typische CNC-Maschinen – und dennoch sehr unterschiedlich in wesentlichen Details.

CNC-Maschinen verfügen über mehrere feste Bewegungsebenen, aufgebaut aus linearen Hauptachsen und 1 bis 2 Dreh- oder Schwenkachsen. Durch die konstruktive Ausführung sind diese Bewegungsachsen sehr stabil, deshalb ist auch eine hohe Belastung der Werkzeuge möglich, was insbesondere für die Metallbearbeitung sehr wichtig ist. Durch diese Stabilität ist auch eine sehr hohe dynamische Genauigkeit während der Bearbeitung gewährleistet. Auch die Wiederholgenauigkeit ist sehr hoch. Deshalb ist ihr Einsatzgebiet vorwiegend die Metallbearbeitung mit unterschiedlichen Maschinentypen.

Serienmäßige Industrie-Roboter sollen dagegen flexibel einsetzbar sein und verfügen dazu über viele Freiheitsgrade in ihrer Bewegung. Diese erreicht man durch kaskadierten Aufbau von bis zu 7 Schwenk- und Drehachsen. Dadurch ist ihre Präzision begrenzt. Sie werden dementsprechend hauptsächlich zur Handhabung von Werkstücken oder Werkzeugen eingesetzt. Dazu verfügen sie bei Bedarf über automatisch wechselbare Greifer oder Werkzeuge. Für anspruchsvollere Aufgaben rüstet man Roboter auch mit speziellen Sensoren oder Videokameras aus. Dann sind sie z. B. in der Lage, unterschiedliche Werkstücke und deren Lage zu erkennen, sie richtig zu greifen und die Bearbeitung der abweichenden Werkstückposition anzupassen.

Spanende **CNC-Maschinen** unterteilt man nach ihrem Hauptaufgabengebiet, wie

z. B. zum Drehen, Fräsen, Schleifen, Nibbeln und Stanzen, Hybride Maschinen aber auch als Bearbeitungszentren, z. B. zum Bohren und Fräsen. **Roboter** müssen wie CNC-Maschinen dem jeweiligen Einsatzgebiet entsprechend ausgelegt sein. Deshalb unterscheidet man nach Montage-, Handhabungs-, Bestückungs-, Lackier-, Schweiß-, Entgrat-Robotern und insbesonders nach der Größe, Kinematik und Tragfähigkeit.

Sehr häufig ist die **Kombination CNC-Maschine und Roboter** anzutreffen, wobei z. B. ein spezieller, in die Maschine integrierter Roboter die Werkzeuge vom Magazin in die Spindel wechselt und wieder zurückbringt. Für den Werkstückwechsel bei Drehmaschinen ist ein serienmäßiger Roboter oft ausreichend. Auch für große und trotzdem relativ leichte Werkstücke, wie z. B. für die Handhabung von Karosserie-Pressteilen, werden Roboter eingesetzt.

Für den automatischen Wechsel von großen, schweren Werkstücken oder Spannvorrichtungen an CNC-Maschinen werden dagegen keine Roboter, sondern vorrangig Paletten unterschiedlicher Größe mit mechanischen Palettenwechslern eingesetzt.

Bezüglich der **Steuerungen** bestehen keine großen Unterschiede. Auch die Anzahl der zu steuernden und interpolierenden CNC-Achsen ist maschinenspezifisch. Die Steuerungen für CNC-Maschinen verfügen über wesentlich mehr Befehle und Bearbeitungszyklen (feste Bearbeitungsunterprogramme) und meistens über ein integriertes, maschinenspezifisches, grafisch unterstütztes Programmiersystem zur Programmierung an der Maschine.

Die **Programmierung** von CNC-Maschinen erfolgt vorwiegend mit CAD/CAM-Systemen und anschließender Simulation zur Kontrolle. Die bei Robotern übliche Teach-In-Programmierung vor Ort wird bei Werkzeugmaschinen nur in Ausnahmefällen benutzt.

Die **Bearbeitungsprogramme** für CNC-Maschinen können mehrmals täglich wechseln, um unterschiedliche Teile herzustellen. Das Ablaufprogramm für einen Roboter erfolgt jedoch meistens nach dem gleichen, einmal festgelegten Muster, das evtl. prozessabhängig automatisch und begrenzt modifizierbar ist.

Einsatz- und Aufgabengebiete für CNC-Maschinen und -Roboter sind demnach, wie gesagt, sehr unterschiedlich. Die erforderliche Flexibilität wird für beide hauptsächlich durch die CNC erreicht. Bei CNC-Maschinen steht hierbei die „Umrüst-Flexibilität“ an erster Stelle, bei Industrie- und Montagerobotern meistens die „Umbau-Flexibilität“, d. h. die Wieder-Verwendbarkeit an anderer Stelle der Fertigung.

6.12 Zusammenfassung und Ausblick

Die immer stärkere globale Vernetzung der Wirtschaft und der damit einhergehende Einsatz von industriellen Produkten und Systemen erfordern Standardisierung der Schnittstellen, auch die der Kommunikation von Robotern und Montageanlagen. Diese sollten weltweit einheitlich und möglichst einfach in der Anwendung sein. Dies gibt dem Anwender Investitionssicherheit und dem Hersteller Stabilität für neue Entwicklungen.

Ohne Kommunikation zwischen den einzelnen Steuerungen einer Anlage läuft bei der modernen Automatisierungstechnik wenig. Vor allem mit den offenen Bussystemen wie Ethernet und TCP/IP lassen sich komplette Produktionsanlagen auch standortübergreifend in Echtzeit steuern und

regeln. Der Trend der Roboterhersteller geht eindeutig dahin, eigene Steuerungen mit diesen, in der Computerindustrie schon länger gebräuchlichen, Technologien auszustatten und zu verbinden.

Die Verlagerung von immer mehr Software-Ressourcen in den Roboter selbst, eröffnet neue Perspektiven im Zusammenhang mit der Wartung. Wurde ein Instandhaltungsprozess bisher durch einen Stillstand der Anlage oder zyklisch-präventiv initiiert, so interpretiert der einzelne Roboter in Zukunft Zählerstände, Messpunkte oder ähnliche statistische Daten selbst und meldet sich nach Erreichen bestimmter Stände oder Ereignisse selbstständig zur Wartung an. Auch im Service sind Szenarien denkbar, den Roboter über Web-Portale beim Betreiber direkt mit dem System des Herstellers zu verbinden, um so eine Ferndiagnose, aber auch die automatische Bestellung von Ersatzteilen durchzuführen. Während der Situationsbewertung wird auf verschiedene Datenbanken im Roboter zurückgegriffen, in denen Daten zur Instandhaltungshistorie, zum Belastungsprofil der Elemente des Antriebsstranges und fallbasierte Lösungen zur Interpretationshilfe abgelegt sind. Über die Anbindung an eine Serviceplattform kann so auf ein breites Erfahrungswissen zurückgegriffen werden. Sind die Kriterien erfüllt, wird die Instandhaltung automatisch zum optimalen Zeitpunkt initialisiert. Dabei wird gleichzeitig eine Anbindung an die Produktionsplanung und -steuerung, das Ersatzteilwesen und andere relevante Bereiche realisiert. Die Maschinenverfügbarkeit kann so ein bisher unerreichtes Niveau erreichen.

Schließlich wirken sich die neuen Kommunikations-Hierarchien und -Mechanismen auch auf das Qualitätsmanagement aus. Der heute noch sehr arbeitsintensive Vorgang der Nutzung von Prozess- und Produktinformationen „auf Papier“, der häufig kostenintensiv und fehleranfällig ist, wird zukünftig durch einen automatisierten Ablauf ersetzt. Ausgehend von einer kontinuierlichen Messung der Produkt- und Prozessdaten durch die Prozess-Roboter und den Vergleich der Messwerte mit Referenzmodellen wird eine Interpretation der Messdaten vorgenommen. Die bereits interpretierten Mess-Ergebnisse werden dann online in einer zentralen Datenbank abgelegt. Für ein individuelles Produkt lassen sich damit individuell der Entstehungsprozess sowie der Qualitätsnachweis elektronisch dokumentieren. Durch die Integration der Kompetenz des Prozess-Lieferanten kann daraufhin für einen optimalen Produktions-Output eine kontinuierliche Prozessnachführung/Fehlerbehebung durchgeführt werden.

Industrieroboter und Handhabung

Das sollte man sich merken:

1. **Definition von Industrierobotern**
   Ein Roboter ist ein automatisch gesteuertes, umprogrammierbares, vielfach einsetzbares Handhabungsgerät mit mehreren Freiheitsgraden, das entweder ortsfest oder beweglich in automatisierten Fertigungssystemen eingesetzt wird.
   Industrieroboter
   - sind frei programmierbar
   - sind servogesteuert
   - haben mindestens 3 NC-Achsen
   - verfügen über Greifer und Werkzeuge
   - sind für Handhabungs- und Bearbeitungsaufgaben konzipiert
2. **Mechanik/Kinematik**
   Industrieroboter haben die Struktur einer offenen kinematischen Kette ohne Verzweigungen, deren Glieder bzw. Hebel durch Gelenke paarweise miteinander verbunden sind.
   Jedes Gelenk besitzt entweder einen rotatorischen oder translatorischen Freiheitsgrad.
3. **Greifer/Effektoren**
   Man unterscheidet zwischen folgenden, nach dem Wirkprinzip gegliederten, Greifern: Mechanische Greifer, Druckluftgreifer, Sauggreifer, Magnetgreifer, Adhäsivgreifer und Nadelgreifer
4. **Die Steuerung**
   Die Robotersteuerung übernimmt mehrere Aufgaben innerhalb einer Roboterzelle:
   - Unterstützung bei der Programmierung,
   - Steuerung der Verfahrbewegungen des Roboters
   - Beeinflussung der Prozesskomponenten im System,
   - Beeinflussung der Förder- und Zuführkomponenten,
   - Steuerung der Greiferfunktionen,
   - Aufnahme und Auswertung von Sensorsignalen,
   - Aufnahme und Verarbeitung von Prozessinformationen zur Beeinflussung des Prozesses,
   - Diagnosefunktionen zur Fehlererkennung am Roboter oder am Prozess,
   - Unterstützung des Bedieners,
   - Unterstützung beim Einrichten der Automationszelle
5. **Einsatzkriterien für Industrieroboter**
   Der Einsatz von Industrierobotern hängt zum einen von äußeren Rahmenbedingungen, aber auch von wirtschaftlichen **Gesichtspunkten** ab:
   Umweltbedingungen, Arbeitssicherheit, Qualitätsanforderungen in der Produktion, Lohnkosten, Flexibilität.

TEIL 4

Werkzeuge in der CNC-Fertigung

1 Aufbau der Werkzeuge

Walter Götschi, Dipl. Ing. ETH, WinTool AG, Zürich,
KOMET GROUP GmbH, Besigheim

Bei der manuellen Bearbeitung kann man sofort auf Unregelmäßigkeiten oder Probleme reagieren. Bei der Bearbeitung in der CNC Maschine muss im Voraus an jedes mögliche Problem gedacht werden. Deshalb ist es wichtig, die Möglichkeiten und Besonderheiten der Werkzeuge gut zu kennen und diese präzise formulieren zu können.

1.1 Einführung

CNC-Maschinen arbeiten selbständig, präzise und zuverlässig. Voraussetzung ist, dass das CNC-Programm fehlerfrei ist, das Rohteil richtig aufgespannt wird und die richtigen Werkzeuge in der Maschine eingesetzt werden.

Beim Einrichten der Maschine setzt man das Werkzeug ein, welches in den Arbeitsanweisungen aufgeführt ist. Beim Rüsten des Werkzeugs geht man so vor, wie es im Werkzeugblatt dokumentiert ist. Beim Erstellen des NC-Programms verwendet man eines der bereits dokumentierten Werkzeuge. Eigentlich ganz einfach, wenn alles schon vorbereitet ist. Aber einerseits muss man die Angaben in den Unterlagen verstehen und anderseits muss jemand da sein, der ein neues Werkzeug dokumentieren kann, wenn eine Aufgabe zu lösen ist, für die noch kein Werkzeug definiert ist. Diese Aufgabe stellt sich auch dann, wenn die Werkzeuge für eine neu zu beschaffende Maschine ausgewählt werden müssen. Zudem ist es angebracht, die Zweckdienlichkeit der vorhandenen Werkzeuge gelegentlich zu überdenken, damit allenfalls besser geeignete Werkzeuge beschafft werden können. Dazu sind ausreichende Kenntnisse der verschiedenen Aspekte von Werkzeugen notwendig.

1.2 Anforderungen

Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit von Werkzeugen hat einen geometrischen und einen technologischen Aspekt. Beide sind Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit einer CNC-Bearbeitung von Werkstücken.

Die **geometrische Zuverlässigkeit** bezieht sich darauf, dass ein Werkzeug während der Bearbeitung seine Form nicht verändern darf und ein Ersatzwerkzeug mit gleicher Geometrie ohne Problem bereitgestellt werden kann. Das klingt zwar naheliegend und einfach, bei genauer Betrachtung zeigt sich aber durchaus eine Herausforderung. Die Kraft, mit welcher ein Werkzeug auf das Werkstück einwirkt, verändert immer auch die Geometrie des Werkzeugs. Bei geeignetem Aufbau des Werkzeugs hält sich die Veränderung in den Grenzen der für das Werkstück tolerierbaren Abweichung *(Bild 1.1)*.

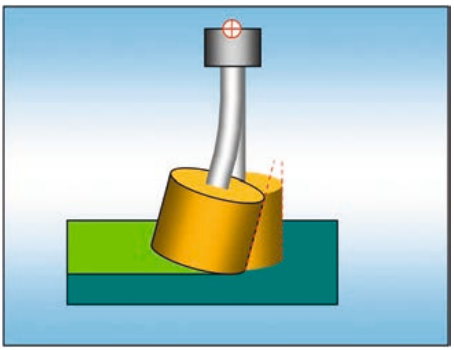


Bild 1.1 Aspekte der geometrischen Zuverlässigkeit eines Werkzeugs im Einsatz.

Ebenso ist es nur mit einer gewissen Toleranz möglich, bei einem Werkzeug die Wendeplatte auszuwechseln. Die Genauigkeit der Geometrie nach dem Ersetzen der Schneide ist abhängig von der Qualität und dem Aufbau des Werkzeugs. Die Toleranz der neu gekauften Werkzeuge ist abhängig vom Lieferanten und dessen Herstellungsqualität.

Die Ungenauigkeit nach dem Ersetzen der Schneide kann bei Bedarf durch erneutes Ausmessen des Werkzeugs und der Übertragung der Korrekturwerte an die CNC-Maschine behoben werden. Wenn möglich, wird zur Vereinfachung des Arbeitsablaufs versucht, mit Werkzeugen zu arbeiten, die nach dem Ersetzen der Wendeplatten nicht erneut ausgemessen werden müssen.

Die **technologische Zuverlässigkeit** bezieht sich auf die gleichbleibende Leistungsfähigkeit der Zerspanung. Es muss vorherbestimmbar sein, wie lange ein Werkzeug eingesetzt werden kann, bis es nicht mehr scharf ist und daher ausgewechselt werden muss. Bei gegebenen Schnittdaten muss stets die gleiche Standzeit resultieren, damit man im Voraus den Werkzeugwechsel einplanen kann. Die Standzeit bedeutet dabei, wie viele Minuten das Werkzeug im Zugriff ist, bis es verbraucht ist und deshalb ersetzt werden muss.

Schnittdaten

Unter „Schnittdaten“ versteht man die Randbedingungen, unter denen das Werkzeug eingesetzt wird *(Bild 1.2 und Bild 1.3).* Dies sind:

- **Schnittgeschwindigkeit** Vc in m/Min. (Geschwindigkeit, mit welcher die Schneide sich über die Werkstück-Oberfläche bewegt).
- **Vorschub** F in mm/Min oder MPR (mm/Umdrehung). (Geschwindigkeit, mit welcher sich das Werkzeug vorwärts bewegt)
- **Zustellung** quer zur Bearbeitungsrichtung, bei Fräsenmaschinen in zwei Richtungen: Eingriffs-Tiefe ap in mm (wie tief befindet sich ein Werkzeug im Material) und Eingriffs-Breite ae in mm (wie viel Material wird in einem Schnitt bearbeitet).
- **Kühlung/Schmierung** (unterschieden wird bezüglich der Art der Kühlung: innen, außen, des Kühlschmierstoffs: Luft, Emulsion usw. und der Intensität: Hochdruck, Nebel usw.)
- **Randbedingungen** seitens des Werkstücks (Werkstoff, Qualität der Aufspannung, Möglichkeit zur Abfuhr der Späne, wechselnde Eingriffsverhältnisse durch bereits vorhandene Schlitze oder unregelmäßiges Aufmaß bei Gussteilen).

Hinweis: Bei der NC-Programmierung werden F und S als Angaben verlangt. In den Tabellen für Schnittgeschwindigkeiten der Werkzeughersteller finden sich jedoch meist die Angaben für Vc und fz. Aus Vorschubgeschwindigkeit Vc und Durchmesser D des Werkzeugs (Fräsen) bzw. Werkstücks (Drehen) kann die Spindeldrehzahl S berechnet werden:

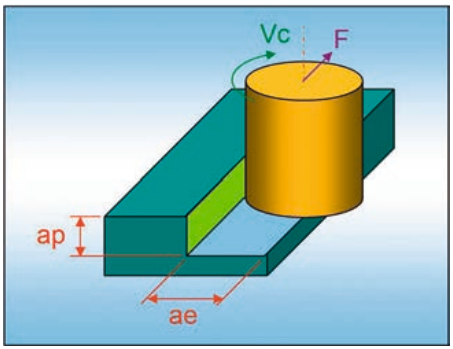


Bild 1.2: Eingriffsbreite (ae) und -tiefe (ap) bei Fräswerkzeugen in Bezug zu Vorschub F() und Schnittgeschwindigkeit (Vc)

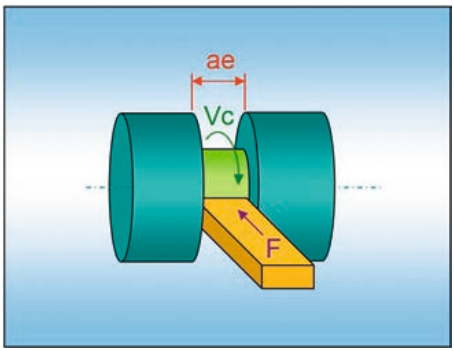


Bild 1.3: Eingriffsbreite (ae) beim Einstechen in Bezug zu Vorschub (F) und Schnittgeschwindigkeit (Vc).

S = (2 × Vc)/(D × Pi). Ebenso lässt sich aus dem Vorschub F und der Spindeldrehzahl der Vorschub fz pro Schneide (Zahn) berechnen: F = (fz × n)/fz , wobei n für die Anzahl der Schneiden steht *(Bild 1.4)*.

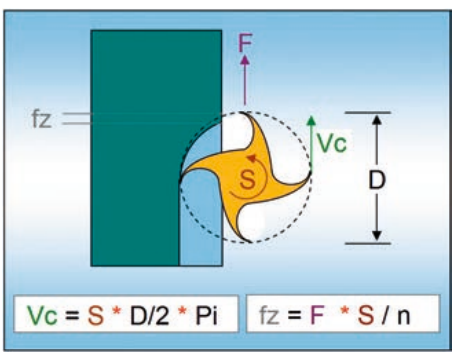


Bild 1.4: Vorschub pro Zahn (fz) und Vorschub pro Minute (F) in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit (Vc).

Flexibilität

Neben der Zuverlässigkeit der Werkzeuge hat die Flexibilität eine große Bedeutung. Ist doch häufig die Aufgabe gestellt (ganz typisch bei Lohnarbeitsbetrieben), von heute auf morgen neue Werkstücke zu bearbeiten und die hierfür geeigneten Werkzeuge bereit zu haben. Die Lösung für dieses Problem liegt in den modularen Werkzeugsystemen, mit welchen aus Standardelementen Werkzeuge für verschiedene Aufgaben kombiniert werden können.

Handhabung

Speziell bei modularen Werkzeugsystemen wird gefordert, dass die Handhabung einfach ist und Fehler nicht möglich sind. Eine leichte Handhabung lässt die Vorzüge der CNC-Technik erst richtig nutzen, die ein schnelles Umrüsten auf wechselnde Bearbeitungsaufgaben verlangt. Als Beispiel für das Abwägen zwischen einfacher Handhabung und Zuverlässigkeit im oben beschriebenen Sinn kann der Vergleich angestellt werden zwischen einigen typischen Spannsystemen für Fräswerkzeuge:

Ein Schaftfräser kann mit einem Bohrfutter schnell und einfach gespannt werden, die technologischen und die geometrischen Erwartungen werden dabei erfüllt. Bei der Verwendung von Spannzangen wird eine höhere Qualität erreicht, es muss aber für jeden Durchmesser eine Spannzange gekauft und beim Spannen einge-

setzt werden. Mit Hydrodehnspannfuttern oder Schrumpffuttern wird eine noch höhere Qualität der Spannung und damit der technologischen und geometrischen Leistung erreicht, aber die Anforderungen für Anschaffung, Unterhalt und Handhabung steigen.

1.3 Gliederung der Werkzeuge

Um Eigenschaften und Merkmale für mehrere Werkzeuge gemeinsam zu formulieren, werden diese in Gruppen gegliedert. Je nach Betrachtungsweise wird dafür eine andere Gliederung verwendet. Einige dieser oft verwendeten Gliederungen werden nachfolgend erläutert.

Stehend/Rotierend

Die **stehenden Werkzeuge** werden in Drehmaschinen eingesetzt. Das Werkzeug bewegt sich in der ZX-Ebene. Das Werkstück rotiert um die Z-Achse. Die Schnittgeschwindigkeit Vc wird durch die Drehzahl des Werkstücks und den zu bearbeitenden Durchmesser bestimmt *(Bild 1.5)*.

Damit nicht für jeden zu bearbeitenden Durchmesser die zur Schnittgeschwindigkeit passende Drehzahl berechnet werden muss, verfügt die CNC über den Befehl G96 für konstante Schnittgeschwindigkeit (VC konstant). Je nach Bearbeitungsdurchmesser wird die Drehzahl dann automatisch angepasst (je kleiner der Durchmesser, desto höher die Spindeldrehzahl). Sinngemäß wird der Vorschub F mit dem Befehl G95 auf Vorschub pro Umdrehung eingestellt, damit unabhängig von der Spindeldrehzahl bei jeder Umdrehung des Werkstücks die gleiche Strecke vorwärtsgefahren wird.

Bei **rotierenden Werkzeugen**, die auf den Fräsmaschinen eingesetzt werden, arbeitet man für die Spindeldrehzahl S üblicherweise mit der Einstellung G97 (Umdrehungen pro Minute) und G94 für konstanten Vorschub F pro Minute *(Bild 1.6)*.

Das Werkzeug rotiert normalerweise um die Z-Achse (Ebenenwahl G17) und es bewegt sich in allen drei Achsen.

Im Unterschied zu stehenden Werkzeugen, haben rotierende meist mehr als eine Schneide (Zahn). Dies muss bei der Berechnung des Vorschubs F berücksichtigt werden. Bei vielen Spänen und engen Verhältnissen (z. B. beim Fräsen einer Nut) ist es wichtig, dass nicht zu viele Schneiden den Weg für die Spanabfuhr beengen.

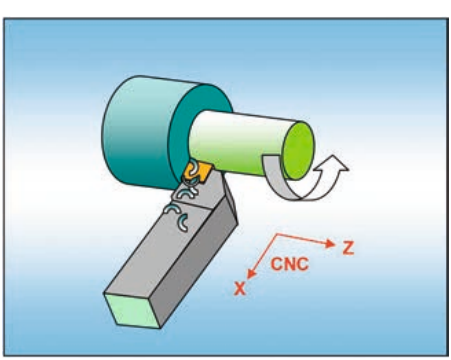


Bild 1.5: Achslage des Koordinatensystems für das NC-Programm beim Drehen.

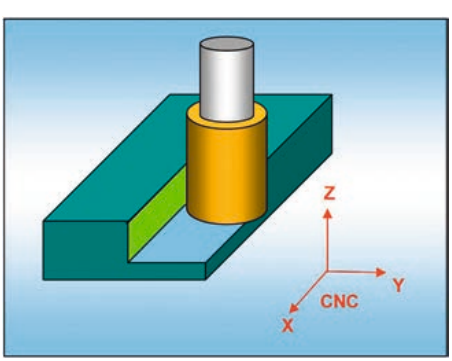


Bild 1.6: Achslage des Koordinatensystems für das NC-Programm beim Fräsen (3-achsig).

Komponente/Komplett-Werkzeug

Wenn man von einem Werkzeug auf einer CNC-Maschine spricht (z. B. 20 mm Fräser), denkt man an ein zusammengebautes, einsatzbereites Werkzeug. Demgegenüber denkt man beim Einkauf eines Werkzeugs (z. B. 20 mm Fräser) lediglich an die Komponente *(Bild 1.7)*.

Ein Komplett-Werkzeug ist also eine Kombination aus mehreren Komponenten. Für die CNC-Maschine müssen immer Komplett-Werkzeuge bereitgestellt werden. Im Lager und im Einkauf spricht man von Werkzeug-Komponenten, die gemäß Anweisung im Werkzeugblatt zu einem Komplett-Werkzeug zusammengebaut werden.

Werkzeug-Typ

Wie jedem anderen Gegenstand gibt man auch den Werkzeugen Namen, damit man sich präzise ausdrücken kann. Hammer, Meißel, Bohrer und Drehstahl sind gängige Bezeichnungen für Werkzeuge. Je mehr unterschiedliche Werkzeuge man hat, und je detaillierter man sich darüber unterhält, desto feiner ist die Gliederung und desto mehr Bezeichnungen werden zu deren Unterscheidung verwendet. Eine offizielle Gliederung wurde schon früh von der DIN erstellt.

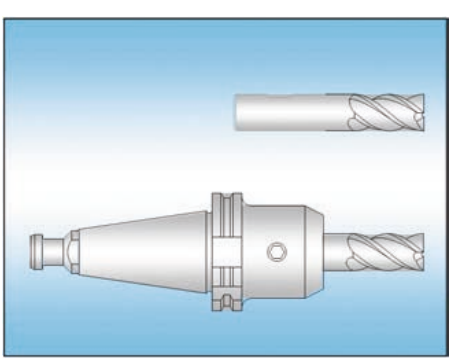


Bild 1.7: Zu unterscheiden: Der Fräser als einzelne Komponente und als Komplett-Werkzeug.

Die wichtigsten Werkzeugtypen nach DIN 4000 sind:

- FSJ – Fräser mir Schaft und Wendeplatten
- FSN – Fräser mit Schaft ohne Wendeplatten
- FBJ – Fräser mit Bohrung und Wendeplatten
- FBN – Fräser mit Bohrung ohne Wendepl.
- BNJ – Bohrer mit Wendeplatten
- BNN – Bohrer ohne Wendplatten
- BGN – Bohrer für Gewinde
- DDJ – Drehwerkzeuge
- MHX – Aufnahmen für rotierende Werkzeuge
- MFX – Aufnahmen für stehende Werkzeuge
- SPJ – Wendeplatten (Schneidplatten)
- SKJ – Stechkörper (Platten zum Einstechen)

Die DIN-Norm enthält für jeden Werkzeugtyp eine Liste der Parameter, die zur geometrischen Beschreibung des Werkzeugs notwendig sind. Innerhalb eines Werkzeugtyps (z. B. BNN) sind unterschiedlich aussehende Werkzeuge zusammengefasst (z. B. Spiralbohrer und Stufenbohrer). Die Norm enthält deshalb auch passende Bilder, die erklären, wo die Werte (A1, B4 usw.) zu messen sind *(Bild 1.8 und Bild 1.9)*.

Mit der Angabe des Werkzeugtyps und den Werten zu den Parametern (A1, B4 usw.) kann ein Werkzeug somit geometrisch einheitlich und systematisch definiert werden.

Der Nutzen dieser Normierung besteht darin, dass sich z. B. Lieferant und Kunde nicht missverstehen. Wenn der Kunde beim Lieferanten nach einem Werkzeug

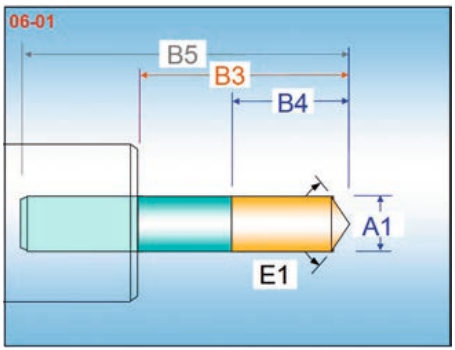


Bild 1.8: Schema Bild für die Geometriedaten bei Spiralbohrern.

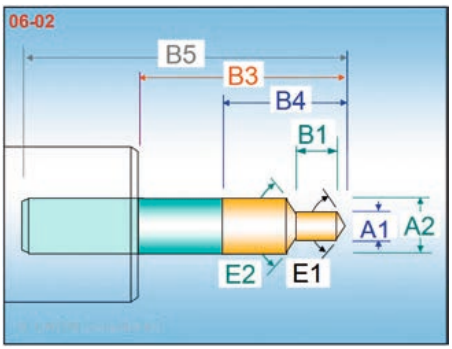


Bild 1.9: Schema Bild für die Geometriedaten bei Stufenbohrern.

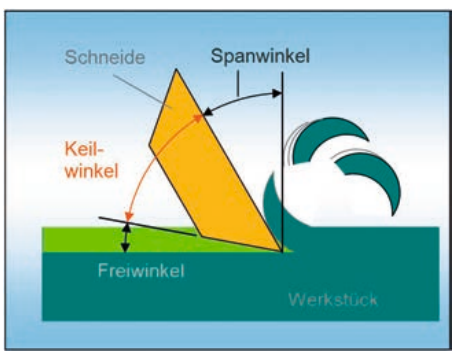


Bild 1.10: Wichtige Winkel an der Schneide.

Bild	Durchmesser A1	Durchmesser A2	Länge B1	Länge B4
06-01	10.00			50.00
06-01	12.00			50.00
06-01	14.00			55.00
06-02	10.00	14.00	22.00	60.00

Bild 1.11: Sachmerkmalleiste (Prinzip).

mit größerem Spanwinkel fragt, wird ihn dieser schnell und kompetent beraten können, weil beide das gleiche darunter verstehen *(Bild 1.10)*. Wenn der Kunde von einem Fräser nach DIN 844 spricht, ist es klar, dass dieser mit einem Zylinderschaft und nicht etwa mit einem Morsekegel ausgestattet ist.

Die DIN-Norm wird zudem als Basis für Softwareanwendungen im Fertigungsumfeld und für den Datenaustausch verwendet. Inzwischen wurden diese Aspekte in der neueren und umfassenderen ISO 13 399-Normierung aufgenommen.

Sachmerkmalliste

In der DIN-Norm ist zu jedem Werkzeug-Typ eine Liste der zur Beschreibung verwendeten Parameter (Sachmerkmale) enthalten. Diese Liste von Parametern wird als Sachmerkmalleiste bezeichnet. Zur Beschreibung eines Werkzeugs wird zu jedem Sachmerkmal der entsprechende Wert erfasst *(Bild 1.11)*.

Diese Darstellung eignet sich für Listen. Die Sachmerkmale können aber statt nebeneinander auch untereinander oder in beliebiger anderer Anordnung dargestellt werden. Dies kennt man insbesondere von

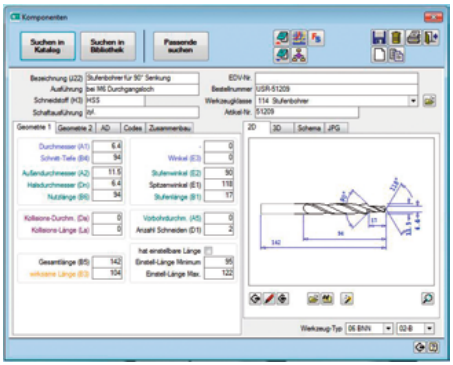


Bild 1.12: Darstellung der Sachmerkmale als Feldbeschriftung (Maske) in einer Anwendung

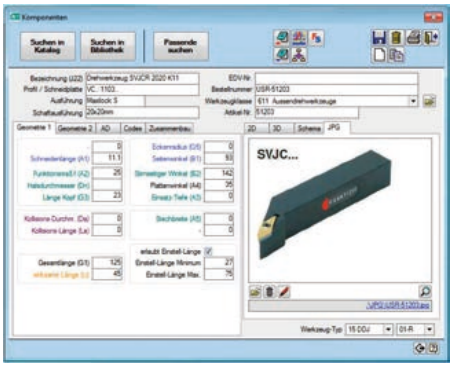


Bild 1.13: Unterschiedliche Sachmerkmale für unterschiedliche Werkzeug-Typen.

Formularen in der EDV oder Karteikarten. Hier spricht man eher von „Masken“ für die Datenerfassung, was jedoch nur einer anderen Form der Darstellung entspricht *(Bild 1.12, Bild 1.13)*.

So, wie in einer Adressverwaltung andere Daten erfasst werden, als in einer Artikelverwaltung, werden für die unterschiedlichen Werkzeugtypen ebenfalls andere Felder benötigt. Sinnvoll ist es, wenn dabei Felder, die in allen Werkzeugtypen vorkommen, auch wieder an gleicher Stelle im Formular stehen (z. B. Durchmesser, Preis, Bestellnummer).

Es ist naheliegend, dass man in einer betriebsinternen Anwendung zusätzlich zu den beschreibenden Merkmalen, auch interne und organisatorische Datenfelder benötigt. Beispiele dafür sind SAP-Nummer, Lagerbestand, Lagerort, und Verwendungsnachweis.

Werkzeug-Klassifikation

Im Unterschied zum Werkzeug-Typ, der eine betriebsübergreifende Bedeutung hat, ist die Klassifikation der Werkzeuge eine betriebsinterne Aufgabe. Die Klassifikation der Werkzeuge dient dazu, sich im Betrieb einfacher verständigen zu können. Die Werkzeuge werden dabei nach deren Art und Form in Klassen eingeteilt (z. B. Gewindebohrer metrisch für Sackloch). Es ist üblich, jeweils mehrere Klassen zu einer Oberklasse zusammenzufassen und **mehrere Oberklassen einer Hauptklasse** zuzuordnen. Es ergibt sich so eine dreistufige betriebsspezifische Gliederung, über welche die gesuchte Klasse einfach gefunden wird *(Bild 1.14)*.

Die Klassifizierung ist eine detaillierte schrittweise Gliederung der Werkzeuge. Innerhalb jeder Klasse sind gleichartige Werkzeuge in unterschiedlicher Größe enthalten. In den meisten Firmen entspricht die Klassifizierung auch der Gliederung der Schränke, in welchen die Werkzeuge versorgt sind. Beim Aufbau einer neuen Klassifizierung ist es besser, mit einer groben Gliederung anzufangen, damit es übersichtlich bleibt.

Schneidstoff

Die Gliederung der Werkzeuge nach Schneidstoff (Material, aus welchem das Werkzeug hergestellt ist) ist nicht Teil der

Klassifikation. Sie dient speziell dazu, die Eignung und Leistungsfähigkeit der Schneide für bestimmte Werkstoffe zu beurteilen und passende Schnittwerte zu wählen.

Um den Verschleiß der Werkzeuge zu reduzieren, werden die Werkzeuge zudem mit Beschichtungen versehen, die je nach Hersteller unterschiedlich bezeichnet werden, jedoch immer demselben Ziel dienen.

Die Schneidstoffe für eigentliche Werkzeuge werden gegliedert in:

- HSS und HSS-E (Schnellarbeitsstahl)
- VHM (Voll Hartmetall)

Als Schneidstoffe für Wendeplatten werden verwendet:

- HSS (High Speed Steel)
- HM (Hartmetall mit/ohne Beschichtung)
- Cermet (Keramik-Metall Verbundwerkstoff)
- Diamant (PKD Polykristallin/Monokristallin)
- CBN (Kubische Bohrnitrid)
- Keramik (Oxid, Nitrid, Mischungen)

Die Wahl des Schneidstoffs und der Schnittgeschwindigkeit sind vor allem abhängig vom Werkstoff und der Art der Bearbeitung (Schruppen/Schlichten usw.). Anhand der standardisierten Gliederung der Werkstoffe nach DIN ISO 513 kann der Einsatzbereich für die verschiedenen Schneidstoffe schell und übersichtlich charakterisiert werden. Dabei werden die Werkstoffe in die Gruppen P, M, K, N, S und H gegliedert *(Bild 1.15).* Die Bearbeitung ihrerseits wird gegliedert in die Bereiche 01, 10, 20, 30, 40 und 50, wobei 01 einer Feinbearbeitung entspricht, 30 dem Schruppen und 50 einer sehr groben Bearbeitung mit unregelmäßigen Eingriffsverhältnissen (z. B. unterbrochener Schnitt).



Bild 1.14: Beispiel einer Gliederung einer kundenspezifischen Klassifikation.

1.4 Maschinenseitige Aufnahmen

Beim Aufbau eines Komplett-Werkzeugs ist der maschinenseitigen Aufnahme spezielle Aufmerksamkeit zu widmen, damit das Werkzeug in der Maschine eingesetzt werden kann. Dabei sind für rotierende Werkzeuge (Bearbeitungszentren) und stehende Werkzeuge (Drehmaschinen) unterschiedliche Anforderungen zu berücksichtigen.

Rotierende Werkzeuge

Die Spindel der CNC-Maschine muss das Werkzeug genau zentrisch aufnehmen und die Rotation ohne Vibration übergeben. Zu-

Stahl

		R_m (N/mm²)
P	Ferritische Stähle mit niedriger Festigkeit und niedrigem Kohlenstoffgehalt.	< 450
	Automatenstähle mit niedrigem Kohlenstoffgehalt.	400 < 700
	Normale Baustähle und Stähle mit niedrigem bis mittlerem Kohllenstoffgehalt (< 0,5% C).	450 < 550
	Normale, niedrig legierte Stähle und Stahlguss, Kohlenstoffstahl (> 0,5% C). Vergütungsstahl; ferritische und martensitische rostfreie Stähle.	550 < 700
	Normale Werkzeugstähle, härtere Vergütungsstähle, martensitische rostfreie Stähle.	700 < 900
	Schwierig zerspanbare Werkzeugstähle, harte hochlegierte Stähle und Stahlguss.	900 < 1200
H	Hochfeste Stähle, schwierig zerspanbar; gehärteter Stahl; martensitische rostfreie Stähle.	>1200

Rostfrei

M	Calcium-behandelte Stähle, weniger schwer zerspanbar; gehärteter Stahl.	
	Austenit und Duplex-rostfreie, Mo-haltige Stähle, schwierig zerspanbar.	
	Austenite und Duplex, sehr schwierig zerspanbar.	
	Austenite und Duplex, extrem schwierig zerspanbar.	

Guss

K	Guss von mittlerer Härte, Grauguss.	
	Niedrig legierter Guss, Temperguss, Kugelgrafitguss.	
	Legierter Guss mittlerer Härte; Temperguss; GGG; mittlere Zerspanbarkeit.	
	Hoch legierter Guss, schwer zerspanbar, Temperguss. GGG. Schwer zerspanbar.	

Andere Werkstoffe

N	Nichteisen-Legierungen, leicht zerspanbar. Aluminium mit < 10% Si. Messing; Zink; Magnesium.	
	Nichteisen-Legierungen, schwierig zerspanbar. Alu mit > 10% Si. Bronze; Kupfernickel.	
S	Nickel-, Kobalt- und eisenhaltige Superlegierungen mit Härte < 30% HRc. Incoloy 800; Inconel 601, 617, 625. Monel 400.	
	Titanlegierungen Ti-6Al-4V.	

Bild 1.15: Einteilung der Werkstoffe nach DIN/ISO 513

dem ist bei großen Werkzeugen viel Kraft zu übertragen, ohne dass das Werkzeug in der Aufnahme rutscht, damit die Zerspanungsleistung bis zum Span übertragen werden kann. Weil in einem NC-Programm mehrere Werkzeuge verwendet werden, muss die Aufnahme so gestaltet sein, dass ein automatischer Werkzeugwechsler möglichst schnell und sicher das Werkzeug in der Spindel auswechseln kann.

Die zur Bearbeitung benötigten Werkzeuge werden vor Gebrauch in einer Kette oder Kassette eingesetzt. Der Werkzeugwechsler bedient sich von diesem Vorrat und tauscht, gesteuert vom Befehl M06 im NC-Programm, das Werkzeug in der Spindel.

Alle Werkzeuge für eine Maschine müssen dieselbe Aufnahme haben, weil die Spindel der Maschine für einen bestimmten Typ ausgelegt ist. Der Werkzeugwechsler benötigt die Greiferrillen an der normierten Stelle, damit die Werkzeuge zielsicher gefasst, aus der Spindel entnommen bzw. neu eingesetzt werden können. Damit das Werkzeug nicht wieder aus der Spindel fällt, wird es kräftig in die Aufnahme der Spindel gezogen und gehalten.

Dafür wird bei Steilkegel-Aufnahmen ein **Rückzugsbolzen** eingeschraubt, der mit dem Rückzugs-Mechanismus der CNC-Maschine übereinstimmen muss. Bei HSK Aufnahmen sind für den Einzug des Werkzeugs **Bohrungen im Hohl-Schaft-Kegel** angebracht.

Die verschiedenen maschinenseitigen Aufnahmen sind in unterschiedlichen Größen genormt und die Spindeln werden gemäß Angabe des Kunden mit einer zur CNC-Maschine passenden Größe ausgerüstet.

Bei Werkzeugen für Bearbeitungszentren hat sich der Steilkegel nach DIN 69 871 (ISO 7388) durchgesetzt. Dieser ist genormt in den Größen 40, 45, 50 und 60. Nicht kompatibel, aber mit gleichem Prinzip werden auch Steilkegel verwendet in der Ausführung DIN 2080, MAS-BT und CAT *(Bild 1.16).*

Für die HSC-Bearbeitung (High Speed Cutting) mit hohen Drehzahlen wurde die HSK Aufnahme (DIN 69 893/ISO 12 164) entwickelt. Sie zeichnet sich aus durch hohe Genauigkeit und hohe Steifigkeit. *(Bild 1.17).*

Für Maschinen mit relativ geringer Leistung (z. B. Frässpindel bei Dreh-Fräs-Zentren) werden die Spindeln oft mit dem ursprünglich als Kupplung für das modulare Werkzeugsystem vorgesehenen CAPTO, ABS oder UTS-Kupplung ausgerüstet. Dies ermöglicht die direkte Verwendung von Werkzeugen der modularen Werkzeugsysteme.

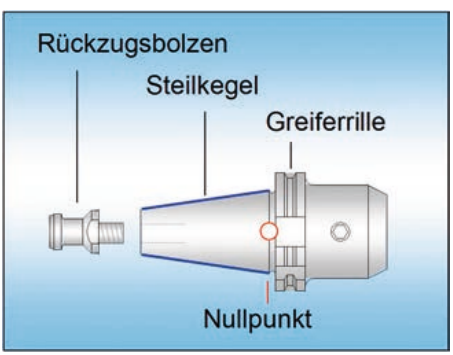


Bild 1.16: Steilkegel zur Aufnahme des Komplett-Werkzeugs in der Spindel der Maschine.

Stehende Werkzeuge

Die Anforderungen an die Werkzeugaufnahme bei Drehmaschinen unterscheiden sich naturgemäß von jenen mit rotierenden Werkzeugen. Wichtig ist hier, dass die Werkzeuge stabil bleiben und wenig Platz in Anspruch nehmen. Weil die meisten Drehmaschinen nicht mit einem automatischen Werkzeugwechsler, sondern mit einem Revolver als Werkzeugträger bestückt sind, ist eine einfache Handhabung wichtig. Die in einem NC-Programm verwendete Anzahl Drehwerkzeuge ist allgemein kleiner, als bei Fräsprogrammen. Mit einem Revolver können daher genügend Werkzeuge einfach beladen werden und die Zeit zum Aktivieren eines nächsten Werkzeugs im



Bild 1.17: Werkzeugaufnahmen: links: HSK-Aufnahmen nach DIN 69 893 rechts: Steilkegel nach DIN 69 871

Bearbeitungsprozess ist schneller als bei Verwendung eines herkömmlichen Werkzeugmagazins mit Werkzeugwechsler.

Die Revolver sind zur Aufnahme der Werkzeuge typischerweise mit VDI (DIN 69 880/ISO 10 889, mit CAPTO (ISO 26 623), Prismen (DIN 69 881), ABS oder mit HSK Trennstellen ausgerüstet *(Bild 1.18 – 1.21).*

Die Werkzeuge werden mit den Aufnahmen in nummerierten Stationen in den Werkzeugträger (Revolver) gespannt. Man platziert also beispielsweise den „Schruppstahl 636 101“ in der „Station 1“ als Werkzeug „T5“ auf dem Revolver „1“. Im NC-Programm wird das Werkzeug mit dem Aufruf „T5 M06“ aktiviert. Die CNC-Maschine bringt durch Drehen des Revolvers jene Station in die Arbeitsposition, auf welcher sich das Werkzeug T5 befindet. In der nachfolgenden Abbildung handelt es sich dabei um einen Sternrevolver mit 12 Stationen. Es sind auf den Stationen 2, 5 und 12 keine Werkzeuge eingesetzt *(Bild 1.22).*

Die Hersteller von CNC-Drehmaschinen entwickeln die Werkzeugrevolver so, dass sie auf den Arbeitsraum und das Gesamt-

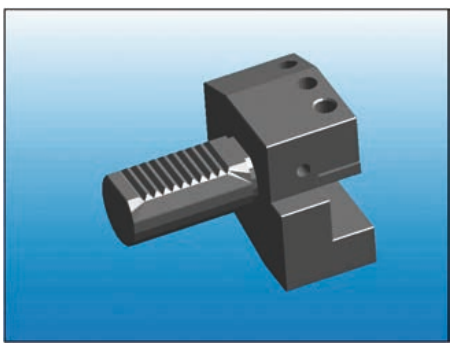


Bild 1.18: VDI-Halter mit Aufnahme für Drehwerkzeuge mit Vierkant Schaft.



Bild 1.19: CAPTO-Aufnahmen verschiedener Größe.



Bild 1.20: Prismen-Aufnahme DIN 69 881 für Bohrstangen.



Bild 1.21: Prinzip der ABS-Kupplung.

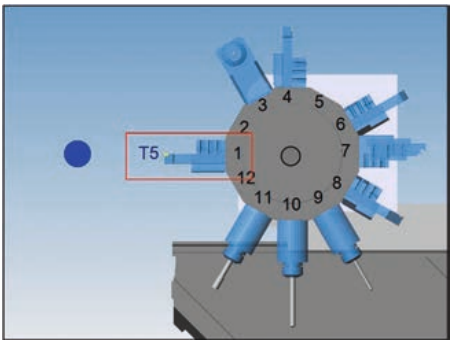


Bild 1.22: Sternrevolver mit Platznummern.

konzept der Maschine abgestimmt sind. Dabei berücksichtigen sie die Stabilität, schnelles Einwechseln der Werkzeuge und die Möglichkeit, einen möglichst großen Arbeitsraum kollisionsfrei bedienen zu können. Im Wesentlichen lassen sich alle Konstruktionen auf eines der nachfolgenden Prinzipien zurückführen.

Beim Sternrevolver stehen die Werkzeuge radial außen am Revolver. Das gewünschte Werkzeug wird durch Drehen des Revolvers in die Arbeitsposition bewegt *(Bild 1.23).*

Beim Scheibenrevolver werden die Werkzeuge seitlich montiert *(Bild 1.24).*

Angetriebene Werkzeuge

Im Unterschied zur Aufnahme auf der Spindel einer Fräsmaschine sind die Aufnahmen für Drehwerkzeuge statisch und rotieren nicht. Weil sich das Werkstück dreht, kann mit einem Spiralbohrer auf einer Drehmaschine genau zentrisch im Werkstück ein Loch gebohrt werden. Mit angetriebenen Werkzeugen für Drehmaschinen erweitert man die Möglichkeiten der Bearbeitung. Wenn ein angetriebenes Werkzeug eingesetzt wird, wird die Spindel mit dem Werkstück angehalten und das Werkstück steht stabil in einer vorbestimmten Position. Mit dem angetriebenen Bohrer kann dann an beliebiger Position ein Loch gebohrt werden. Dabei wird zwischen radialem und axialem Einsatz von angetriebenen Werkzeugen unterschieden. Die radiale Bearbeitung erfolgt senkrecht zur Spindelachse in die Mantelfläche des Werkstücks *(Bild 1.25).*

Mit der axialen, exzentrischen Bearbeitung wird das Werkstück stirnseitig bearbeitet *(Bild 1.26).*

Damit angetriebene Werkzeuge eingesetzt werden können, benötigt man eine Drehmaschine, die dafür ausgelegt ist. Die Aufnahme am Revolver enthält dann den An-

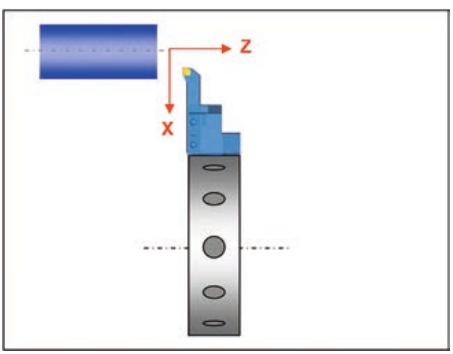


Bild 1.23: Sternrevolver, Prinzip.

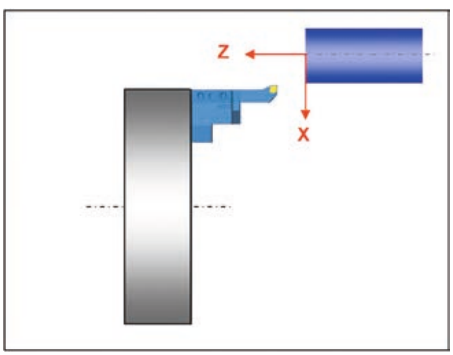


Bild 1.24: Scheibenrevolver, Prinzip.

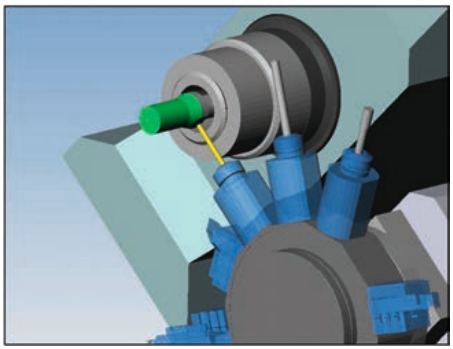


Bild 1.25: Angetriebene Werkzeuge für radiale Bohrungen auf einem Sternrevolver.

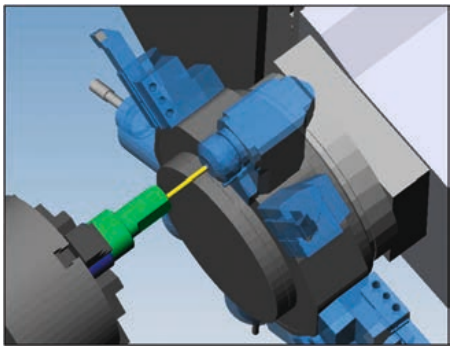


Bild 1.26: Angetriebenes Werkzeug für axiale Bearbeitung auf einem Sternrevolver.

trieb, der über eine maschinenspezifische Kupplung an die Werkzeugaufnahme übertragen wird. Zudem muss die Hauptspindel, welche das Werkstück trägt, über eine numerisch gesteuerte (indexierte) C-Achse verfügen, damit das Werkstück in einer definierten Position angehalten und stabil positioniert werden kann.

Damit auch andere als axiale und radiale Bearbeitungen möglich sind, muss eine Dreh-Fräsmaschine zur Verfügung stehen. Diese verfügt über eine zusätzliche angetriebene Spindel auf einem schwenkbaren Kopf. Damit kann das Werkstück, ähnlich wie bei einer CNC-Fräsmaschine, mit rotierenden Werkzeugen in zwei Achsen bearbeitet werden. *(Bild 1.27)*

Der Vorteil derartiger Maschinen liegt darin, dass Werkstücke ohne nochmaliges Aufspannen auf einer zweiten Maschine in einem Arbeitsgang fertig bearbeitet werden können. Dadurch spart man die Umrüstzeit und weil man nicht neu aufspannen muss, ist es auch einfacher, die geforderte Toleranz des Fertigteils zu erreichen *(Bild 1.28)*.

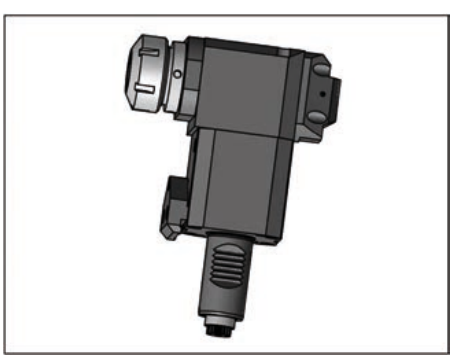


Bild 1.27: Winkelkopf mit VDI-Aufnahme für angetriebene Werkzeuge.

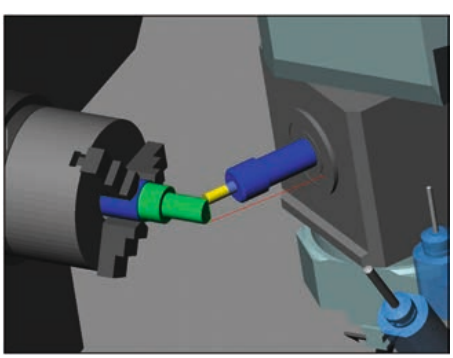


Bild 1.28: Drehmaschine mit B-Achse für angetriebene Werkzeuge.

1.5 Modulare Werkzeugsysteme

Bei modularen Werkzeugsystemen wird der Werkzeugkörper aus einzelnen Elementen aufgebaut. Auf der einen Seite muss dieser zur Maschinenaufnahme passen, auf der andern Seite nimmt er die Schneide auf. Dieselben Elemente können teilweise für Bohren, Fräsen und Drehen verwendet werden *(Bild 1.29)*.

Die Anforderungen in der Fertigung sind ständig Veränderungen unterworfen. Bedingt durch immer kürzere Produktlebenszyklen und den Wunsch nach individuellen Produkten sind im Vergleich zu früheren Jahren kleinere Losgrößen mit zunehmender Variantenvielfalt zu fertigen. Diesem Individualisierungstrend wird in der Werkzeugmaschinen- und Präzisionswerkzeugbranche durch entsprechende Produktstrukturierung Rechnung getragen. Als erfolgreiche Ansätze für dieses Prinzip gelten die Bildung von Baureihen, Baugruppen, Plattformen, Modulen und Baukästen *(Bild 1.30, 1.31)*.

In der Präzisionswerkzeugindustrie werden unterschiedliche Module miteinander zu einem Werkzeugkörper kombiniert. Auf der einen Seite muss dieser zur Maschinenaufnahme passen, auf der andern Seite nimmt er die Schneide auf. Durch Kombinationen aus Standardwerkzeugen, Wende-

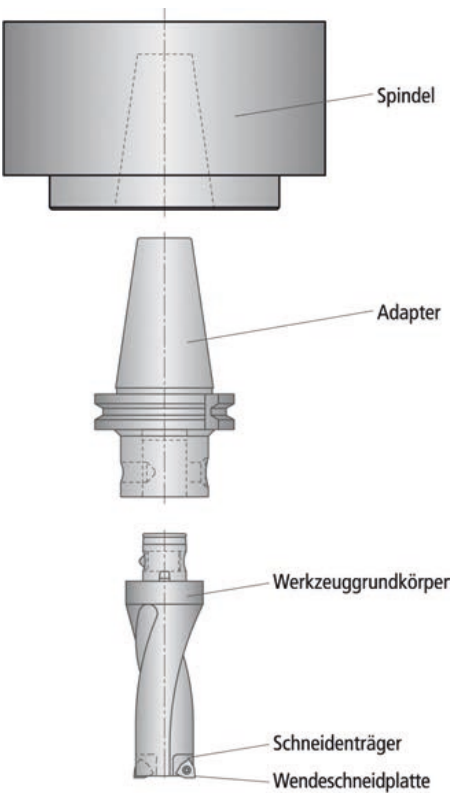


Bild 1.29: Aufbau modularer Werkzeuge.



Bild 1.30: Universell kombinierbare modulare Komponenten.

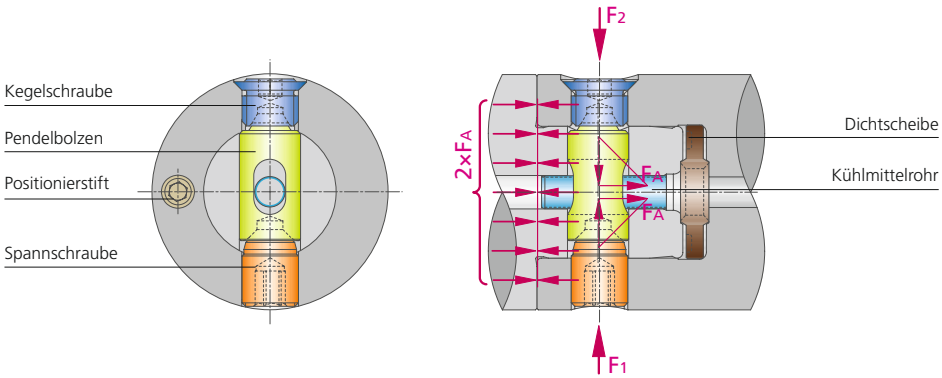


Bild 1.31: ABS-Kupplung der Firma KOMET, ein modulares Kupplungssystem für alle Werkzeuge, d. h. sowohl für rotierende, als auch für stehende. Sind die Werkzeugaufnahmen mit dem ABS-System versehen, dann lassen sich Werkzeuge, Verlängerungen oder Adapter einsetzen.

schneidplatten, Elementen, Baugruppen, Grundkörpern, Kassetten und Verstellmechanismen werden verschiedene Werkzeuge für die spanabhebende Bearbeitung realisiert.

Die Produktstrukturierung versetzt sowohl den Werkzeuganwender als auch den Werkzeughersteller in die Lage, schnell auf sich ändernde Anforderungen zu reagieren. Vor dem Hintergrund einer rationellen Fertigung lässt sich das Werkzeugspektrum innerhalb eines relativ kurzen Zeitraums erweitern. Der Werkzeuganwender kann seine Erzeugnisse auch bei kleineren Losgrößen in einem günstigen Kosten- und Zeitrahmen fertigen. Somit stehen die Individualisierung und die Standardisierung nicht in Widerspruch zueinander.

1.6 Einstellbare Werkzeuge

Feinbearbeitung von Bohrungen

Das Ziel der Feinbearbeitung ist die Verbesserung der Genauigkeit einer Bohrung hinsichtlich der Maßhaltigkeit, Form, Lage oder Oberflächengüte. Die Schnitttiefe ap beträgt dabei in der Regel 0,1 bis 0,25 mm,

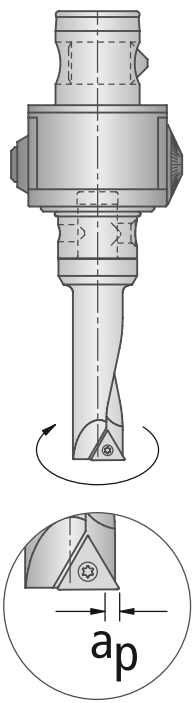


Bild 1.32: Einstellbares Werkzeug für die Feinbearbeitung.

jedoch maximal 0,5 mm. Verfügt das rotierende Werkzeug über eine Schneide, so spricht man auch von **Ausspindelwerkzeugen.**

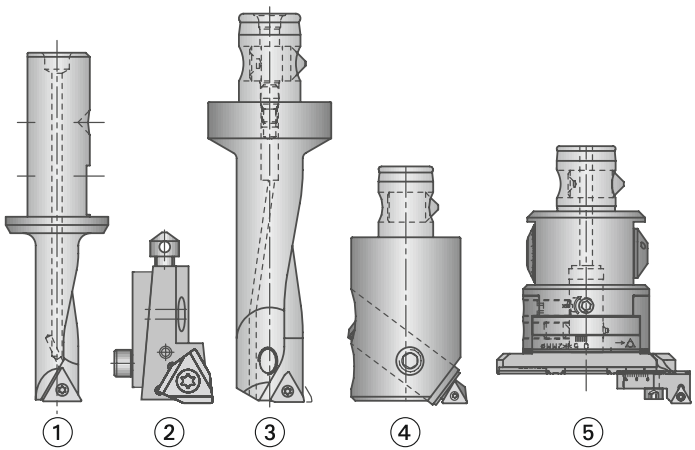


Bild 1.33: Die Einstellelemente einer Wendeschneidplatten-Feinverstellung.

Das Bohrungsmaß selbst wird über die Schneide des Werkzeugs realisiert. Diese Schneide kann entweder fest auf einen Werkzeugdurchmesser bezogen oder radial verstellbar sein. Ausspindelwerkzeuge mit festen Schneiden finden jedoch kaum Verwendung. Die radiale Verstellung der Schneide ist wegen folgender Gesichtspunkte erforderlich:

- **Flexibilität** des Werkzeugs: Die Bearbeitung unterschiedlicher Durchmesser soll mit ein und demselben Werkzeug erfolgen.
- Erzielbare **Oberflächengüte:** die Oberflächengüte hängt unter anderem vom Eckenradius der Schneide ab, sodass auf einem Schneidenträger Wendeschneidplatten mit unterschiedlichen Eckenradien verwendet werden. Da sich dabei der Abstand der Schneidecke von der Mittelachse des Werkzeugs verändert, ist bei unterschiedlichen Eckenradien eine Korrektur des f-Maßes erforderlich, um den Durchmesser identisch beizubehalten.
- **Verschleißkompensation.** Die Verstellbarkeit der Schneide wird durch eines der fünf im Folgenden beschriebenen konstruktiven Prinzipien verwirklicht:

1. Konstruktionsprinzip: **Wendeschneidplatten-Feinverstellung.** Diese wirken direkt auf die Wendeschneidplatte. Der Verstellweg ist gering (0,01 bis 0,1 mm). Die Befestigung der Wendeschneidplatte erfolgt mittels einer Klemmschraube. Durch den als „Anzug“ bezeichneten Versatz der Mitte der Klemmschraube zur Mitte der Gewindebohrung der Wendeschneidplatte wird die Wendeschneidplatte in den Plattensitz hineingezogen. Bei diesem Verstellprinzip wird im Bereich des Anzugs verstellt, der gleichzeitig die Wegbegrenzung darstellt.
2. Konstruktionsprinzip: **Verstellung von Kassetten und Kurzklemmhaltern.** Die Einstellung erfolgt durch Verstellschrauben (Abdrückschrauben), Verstellstifte oder Keile. Der Verstellweg beträgt je nach Ausführung ca. 0,1 bis 0,3 mm auf dem Grundkörper einer Bohrstange.
3. Konstruktionsprinzip: **Verstellkopf:** Dabei ist der Schneidenträger direkt befestigt. Die Anwendung solcher Bohrstangen ist rückläufig, da der Verstellweg und die Flexibilität begrenzt sind.
4. Konstruktionsprinzip: **Bohrstangen mit Feindreheinsätzen:** Diese zählen zu

den konventionellen Spindelwerkzeugen. Die Modularität zeigt sich darin, dass Feindreheinsätze verwendet werden, um unterschiedliche Durchmesser sowie den Einsatz mehrerer Wendeschneidplattenformen zu ermöglichen. Die Feindreheinsätze sind für unterschiedliche Bohrungsarten wie Grundbohrungen oder Durchgangsbohrungen ausgelegt. Bohrstangen mit größerem Durchmesser-zu-Länge-Verhältnis können somit ebenfalls realisiert werden. Bei den Grundkörpern der Werkzeuge handelt es sich meist um kundenspezifisch gefertigte Sonderbohrstangen. Die verwendeten Feindreheinsätze sind als sog. Module als Standardartikel erhältlich.

5. Konstruktionsprinzip: **Feinverstellköpfe mit integriertem Verstellmechanismus.** Bei diesem Prinzip wird ein auch als Schieber bezeichnetes Bauteil in radialer Richtung verstellt. Im Schieber ist eine Trennstelle zur Aufnahme von mit Wendeschneidplatten bestückten Bohrstangen, Schneidenträgern oder Wechselbrücken integriert. Bei den ersten drei genannten Konstruktionsprinzipien erfolgt die Verstellung der Schneide in der Regel auf einem Werkzeugvoreinstellgerät. Bei den beiden anderen Konstruktionsprinzipien bietet eine Skalenscheibe die Möglichkeit der Visualisierung des Zustellwegs.

Bei Feinverstellköpfen hat der Anwender die Wahl zwischen jenen mit einer Skalenscheibe und jenen mit einem Display, in dem die Durchmesserveränderung digital angezeigt wird *(Bild 1.34)*.

Modularität durch Feinverstellköpfe

Die Modularität der Feinverstellköpfe zeigt sich in der praktischen Anwendung durch eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten für unterschiedliche Verstellwege sowie den möglichen Einsatz von Bohrstangen, Schneidenträgern und Wechselbrücken. Als Basis dient ein Feinverstellkopf oder eine Baureihe von Feinverstellköpfen *(Bild 1.35)*.

Für kleine Bohrungsdurchmesser von 0,5 bis 25 mm werden Bohrstangen mit Zylinderschaft oder auch mit einer modularen Trennstelle, im Durchmesserbereich von 25 bis 60 mm Bohrstangen mit Kerbzahnkörpern und Schneidenträgern und im Durchmesserbereich von 60 bis 125 mm Wechselbrücken mit Schneidenträgern verwendet *(Bild 1.36)*.

Sind höhere Drehzahlen erforderlich, die vor allem bei kleinen Bohrungsdurchmes-



Bild 1.34: Feinverstellkopf mit Display-Anzeige.



Bild 1.35: Feinverstellköpfe für unterschiedliche Durchmesser.

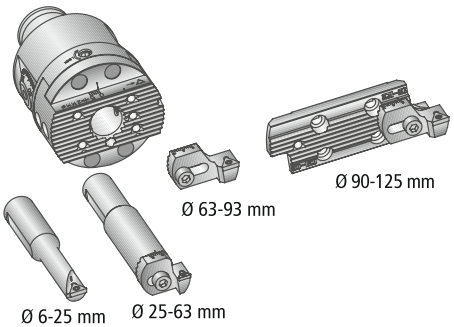


Bild 1.36: Modular kombinierbare Elemente.

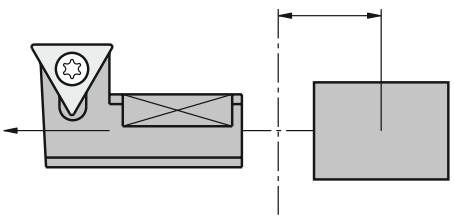


Bild 1.37: Dynamischer Wuchtausgleich.

sern oder HSC-Bearbeitungen (High-Speed Cutting) auftreten, werden Feinverstellköpfe mit automatischem Wuchtausgleich verwendet. Deren Funktionsweise kann wie folgt beschrieben werden: Ein Masse-Element wird bei Verstellung des Schiebers automatisch in die entgegengesetzte Richtung verstellt *(Bild 1.37)*.

Dieses Prinzip funktioniert sehr gut für kleine Bohrungsdurchmesser, weil die entsprechenden Bohrstangen eine geringe Masse haben. Feinverstellköpfe mit automatischem Wuchtausgleich können für Drehzahlen zwischen 18.000 und 40.000 U/min eingesetzt werden. Bei größeren Bohrungen mit Durchmessern zwischen 103 und 206 mm werden die Wechselbrücken in Leichtbauweise ausgeführt, um die zu verstellende Masse gering zu halten.

Bei rotierenden Werkzeugen spricht man von einer Unwucht, wenn die Masse des Werkzeugs nicht vollständig rotationssymmetrisch verteilt ist. Man unterscheidet zwischen statischer und dynamischer Unwucht. Meist treten beide Formen der Unwucht zugleich auf. Durch die Unwucht und die bei der Rotation entstehenden Fliehkräfte treten bei hohen Drehzahlen Vibrationen auf, die sich auf das Bearbeitungsergebnis, den Verschleiß des Werkzeugs und die Spindellagerung der Werkzeugmaschine negativ auswirken *(Bild 1.38)*.



Bild 1.38: Wechselbrücken in Leichtbauweise reduzieren die Unwucht.

1.7 Gewindefräsen

Beispiel Innengewindefräsen *(Bild 1.39)*

Zur Erzeugung von Innengewinden auf CNC-Maschinen wird neben dem bekannten Gewindebohren mit oder ohne Ausgleichsfutter zunehmend das **Gewindefräsen und Bohr-Gewindefräsen** bevorzugt. Diese Verfahren bieten den Vorteil, dass nicht für jeden Gewindedurchmesser ein oder mehrere spezielle Werkzeuge erforderlich sind und deshalb weniger Plätze im Werkzeugmagazin belegt werden. Voraussetzung ist eine Maschine mit 3D-Bahnsteuerung, meistens ein Bearbeitungszentrum, um die erforderlichen simultanen Achsenbewegungen präzise steuern zu können.

Eine Übersicht der verschiedenen Gewindefräsverfahren zeigt *Bild 1.39 a.*

Den Ablauf beim Innengewinde-*Senkfräsen* mit vorgebohrtem Kernloch zeigt *Bild 1.39 b.*

Zum konventionellen **Innengewindefräsen** (GF, GSF) muss das Kernloch vorgebohrt sein. Je nach Werkzeug und Gewindetiefe kommen unterschiedliche Werkzeuge zum Einsatz, weshalb sich auch unterschiedliche Bewegungsabläufe ergeben.

Ein konventioneller Gewindefräser taucht zentrisch in das Kernloch ein, fährt in einer kreisförmigen Anfahrkurve an die Gewindekontur und dann in einer einzigen 360°-**Wendelinterpolation** eine Gewindesteigung nach oben. Damit ist das Gewinde fertig, der Fräser fährt zur Bohrungsmitte und dann aus der Bohrung heraus.

Beim Gewindesenkfräsen *(Bild 1.39 b)* wird beim Eintauchen auch der Bohrungsrand gesenkt.

Beim **zirkularen Gewindefräsen** (EP, WSP) kommt ein Gewindefräser mit einer oder mehreren Schneiden auf einer Ebene zum Einsatz. Das Gewinden erfolgt in mehreren Wendelbewegungen (Kreis in X-/Y-Ebene und simultane Linearbewegung in der Z-Achse) am besten von unten nach oben. Zum **stufenweisen Gewindefräsen** kommt ein Fräser mit einer oder zwei Schneidplatten zum Einsatz, der je nach Gewindetiefe ein- oder mehrmals noch oben versetzt und das Gewinde in einzelnen Stufen erzeugt.

Beide Verfahren werden bei größeren Gewindetiefen und Abmessungen bevorzugt. Mit einem Halter können durch Wechseln der Platten mehrere Gewindesteigungen gefertigt werden.

Generell ist zu unterscheiden, ob **abmessungsgebundene oder abmessungsungebundene Gewindefräser** zum Einsatz kommen. Abmessungsgebundene Werkzeuge sind für einen gewissen Ge-

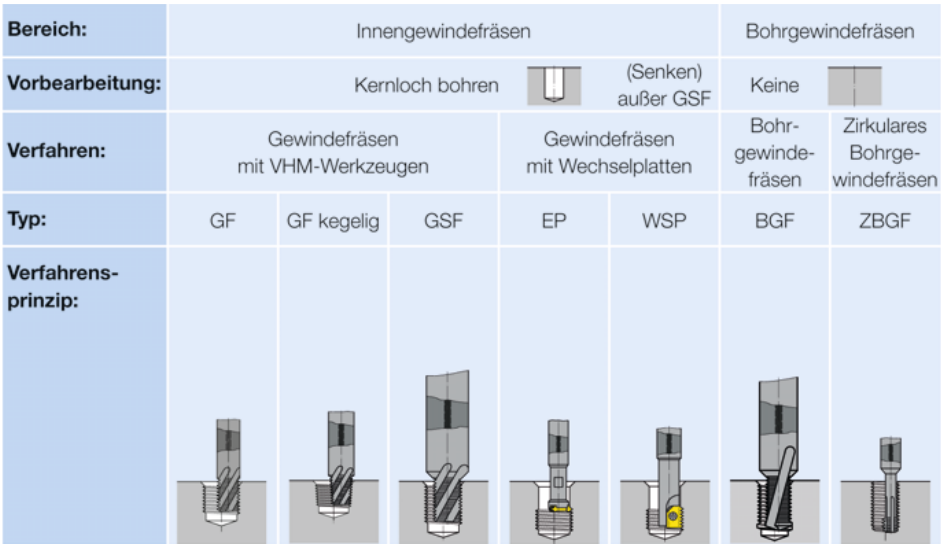


Bild 1.39 a: Die verschiedenen Innengewinde-Fräsverfahren

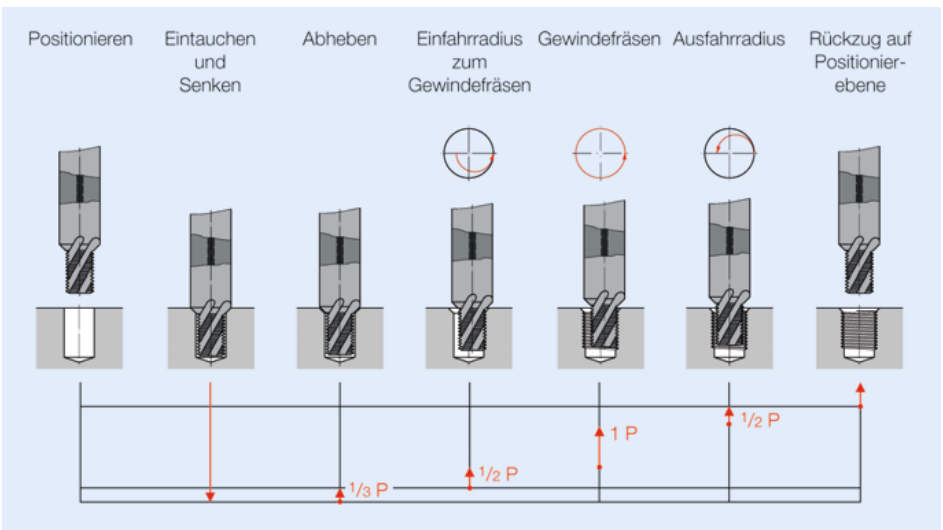


Bild 1.39 b: Ablauf beim Innengewinde-Senkfräsen (mit vorgebohrtem Kernloch)

windebereich ausgelegt, die herstellbaren Gewindegrößen sind fest vorgegeben. Mit abmessungsungebundenen Werkzeugen kann, bei vorgegebener Steigung, ein beliebiger Gewinde-Durchmesser ab einem entsprechenden Fräser-/Gewindedurchmesser-Verhältnis hergestellt werden.

Bei abmessungsungebundenen Gewindefräsern ist zu beachten, dass ein bestimmtes **Verhältnis zwischen Fräser-**

durchmesser und Gewindedurchmesser nicht unterschritten werden darf. Für metrische Regelgewinde gilt als Richtwert ein Verhältnis von 2 zu 3, für metrische Feingewinde von 3 zu 4. Dieser Zusammenhang erklärt sich aufgrund der entstehenden Profilverzerrung beim Gewindefräsvorgang. Dabei bewegt sich ein geradliniges Gewindeprofil auf einer Wendel-Interpolation, was das entstehende Gewindeprofil im Gewindegang verzerrt. Diese Verzerrung darf gewisse Toleranzen nicht überschreiten, damit ein lehrenhaltiges Gewinde entsteht.

Im Gegensatz zum Gewindefräsen, bei denen die Kernbohrung vorhanden sein muss, erfolgt das **Bohr-Gewindefräsverfahren** *(Bild 1.39a,* BGF, ZBGF) ohne Vorbearbeitung. Das Werkzeug dringt in das volle Material ein, bohrt das Kernloch und fräst während des Rückzuges in einer Wendelinterpolation (XY zirkular und Z linear) das Gewinde. Dieses Verfahren kommt nur bei kurzspanenden Werkstoffen wie z. B. GG zum Einsatz.

Beim **zirkularen Bohrgewindefräsen** (ZBGF) setzt das Werkzeug bei bereits eingeleiteter Wendelinterpolation auf dem vollen Material auf und fräst das Gewinde **von oben nach unten.** Nach Erreichen der programmierten Gewindetiefe fährt das Werkzeug zentrisch aus dem Gewinde heraus.

Bei den **Anfahrradien** ist zwischen einer 90°- und einer 180°-Bewegung zu unterscheiden. Dieses Heranfahren soll den Umschlingungswinkel des Werkzeugs möglichst gering halten und damit Werkzeugbruch verhindern. Je stabiler das Werkzeug, desto kürzer kann die Anfahrschleife sein.

Vorteile des Gewindefräsens allgemein

- Nahezu durchmesserunabhängiges Arbeiten in Abmessungen und Toleranz
- Nur ein Werkzeug für Rechts- und Linksgewinde
- Keine Spanprobleme durch kleine „Kommaspäne“, die sich leicht aus der Bohrung entfernen lassen
- Kein Drehrichtungswechsel der Spindel
- Kein axiales Verschneiden der Gewinde
- Geringer Schnittdruck, vorteilhaft bei dünnwandigen Werkstücken
- Die Gewindetiefe reicht bis zum Bohrungsgrund
- Bei Werkzeugbruch kann das Werkzeug problemlos aus der Bohrung entfernt werden, teure Nacharbeiten entfallen.

Nachteile

- Je nach Werkzeug ist eine Gewindetiefe bis max. 4 × D möglich
- Der Durchmesser des Gewindefräsers darf max. ⅔ bzw. ¾ des Gewinde-Durchmessers betragen oder die Werkzeuge müssen profilkorrigiert sein
- Nicht alle Gewindesysteme sind herstellbar.

1.8 Sonderwerkzeuge *(Bild 1.40)*

Diese werden zum einen dann verwendet, wenn es für die erforderliche Bearbeitung kein fertiges Werkzeug zu kaufen gibt (z. B.

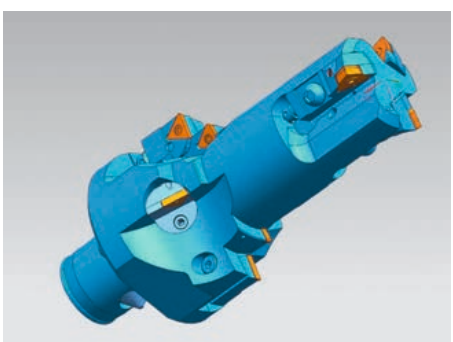


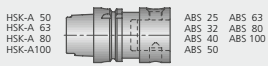
Bild 1.40: Sonderwerkzeug für die Komplett-Bearbeitung von Bremsscheiben.

Programmübersicht – Aufnahmen / Adapter

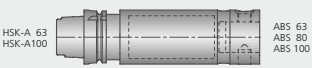
KOMET

HSK-A Aufnahmen ISO 12164-1

mit ABS® Anbindung



Leichtbau-Adapter mit ABS® Anbindung



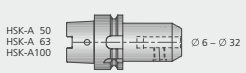
Exzenter-Verstelleinrichtung mit ABS® Anbindung



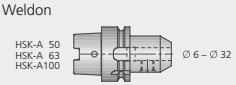
Torsions-Schwingungsdämpfer mit ABS® Anbindung



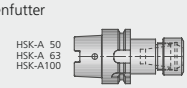
Spannfutter Whistle Notch



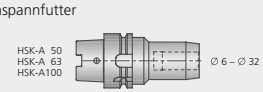
Spannfutter Weldon



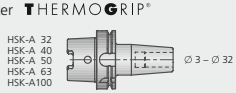
Spannzangenfutter



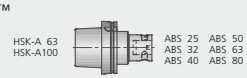
Hydro-Dehnspannfutter



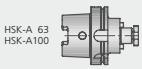
Schrumpffutter THERMOGRIP®



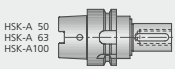
Easy Special™



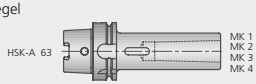
Fräseraufnahme



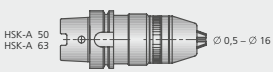
Kombi-Aufsteckfräsdorn



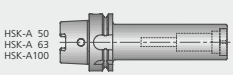
Morsekegel



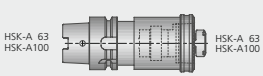
Spannfutter



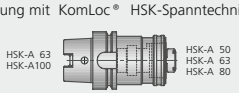
Prüfdorn



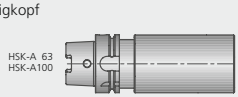
Verlängerung mit KomLoc® HSK-Spanntechnik



Reduzierung mit KomLoc® HSK-Spanntechnik



Halbfertigkopf



PSC Aufnahmen ISO 26623

Capto*-Schnittstelle mit ABS® Anbindung

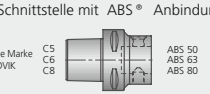
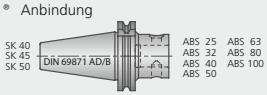


Bild 1.41: Übersicht, Werkzeugaufnahmen für Bohr- und Fräswerkzeuge

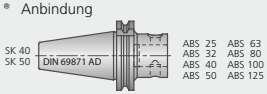
KOMET

Steilkegelaufnahmen

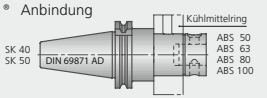
mit ABS® Anbindung



mit ABS® Anbindung



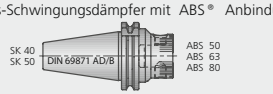
mit ABS® Anbindung



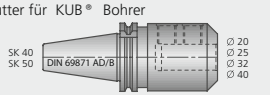
Exzenter-Verstelleinrichtung mit ABS® Anbindung



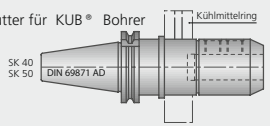
Torsions-Schwingungsdämpfer mit ABS® Anbindung



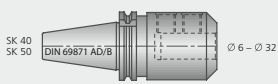
Spannfutter für KUB® Bohrer



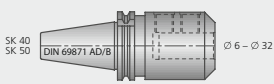
Spannfutter für KUB® Bohrer



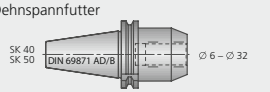
▸ 447



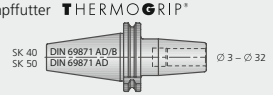
▸ 446



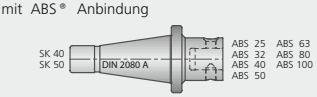
Hydro-Dehnspannfutter



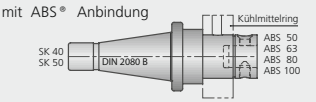
Schrumpffutter THERMOGRIP®



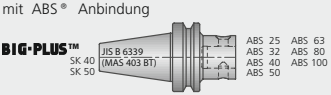
mit ABS® Anbindung



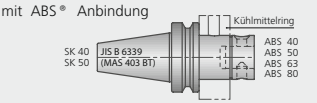
mit ABS® Anbindung



mit ABS® Anbindung



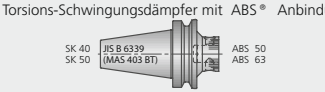
mit ABS® Anbindung



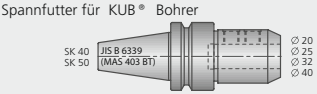
Exzenter-Verstelleinrichtung mit ABS® Anbindung



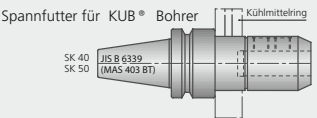
Torsions-Schwingungsdämpfer mit ABS® Anbindung



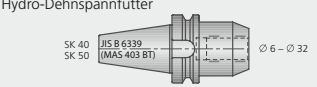
Spannfutter für KUB® Bohrer



Spannfutter für KUB® Bohrer



Hydro-Dehnspannfutter



Schrumpffutter THERMOGRIP®



Easy Special™

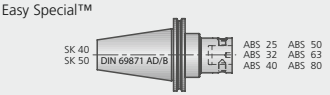


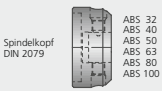
Bild 1.41: Übersicht, Werkzeugaufnahmen für Bohr- und Fräswerkzeuge (Fortsetzung)

Programmübersicht – Aufnahmen / Adapter

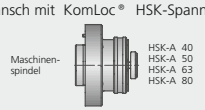
KOMET

Flanschaufnahmen

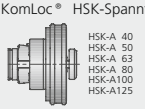
Vorsatzflansch mit ABS® Anbindung



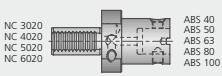
Vorsatzflansch mit KomLoc® HSK-Spanntechnik



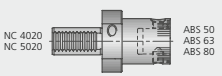
Einbauflansch mit KomLoc® HSK-Spanntechnik



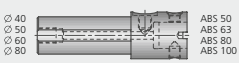
VDI Aufnahme mit ABS® Anbindung



VDI Torsions-Schwingungsdämpfer mit ABS® Anbindung

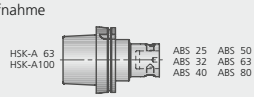


TC-Aufnahme mit ABS® Anbindung

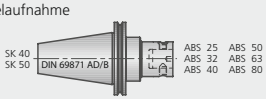


Easy Special™ Aufnahmen

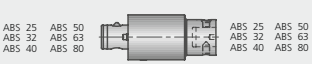
HSK-A Aufnahme



Steilkegelaufnahme

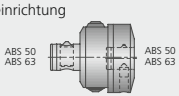


ABS® Aufnahme

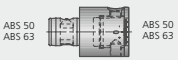


ABS® Aufnahmen

Verstelleinrichtung



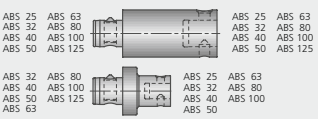
Exzenter-Verstelleinrichtung



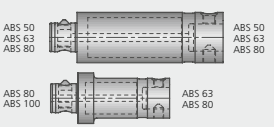
Torsions-Schwingungsdämpfer



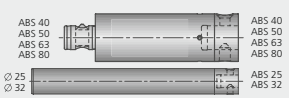
Verlängerung / Reduzierung

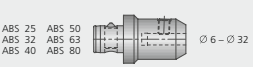


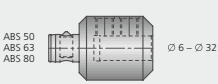
Verlängerung / Reduzierung Leichtbau



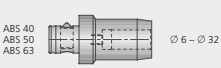
Dämpfungselement







Hydro-Dehnspannfutter



Schrumpffutter

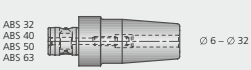
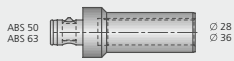


Bild 1.41: Übersicht, Werkzeugaufnahmen für Bohr- und Fräswerkzeuge (Fortsetzung)

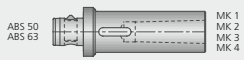
KOMET

ABS® Aufnahmen

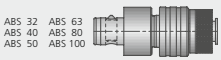
Aufnahme HTR



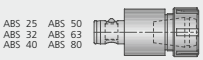
Aufnahme HMK



Gewindefutter GWF



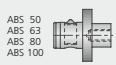
Spannzangenfutter SZV



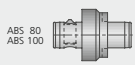
Spannfutter NCB



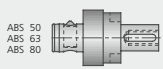
Fräseraufnahme FA



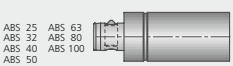
Fräseraufnahme FAM



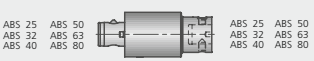
Kombi-Aufsteckfräsdorn FAK



Halbfertigkopf

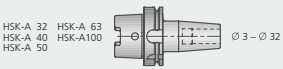


Easy Special™

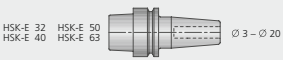


Schrumpftechnik THERMOGRIP®

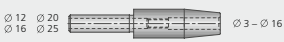
HSK-A Aufnahme



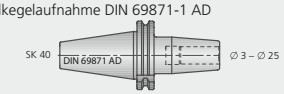
HSK-E Aufnahme



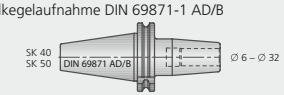
Verlängerung / Reduzierung



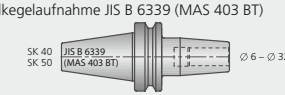
Steilkegelaufnahme DIN 69871-1 AD



Steilkegelaufnahme DIN 69871-1 AD/B



Steilkegelaufnahme JIS B 6339 (MAS 403 BT)



ABS® Aufnahme



Symbole



Bild 1.41: Übersicht, Werkzeugaufnahmen für Bohr- und Fräswerkzeuge (Fortsetzung)

Reibahlen für einen speziellen Durchmesser mit vorgegebener Toleranz). Viel öfter aber werden Sonderwerkzeuge eingesetzt, wenn mit dem Sonderwerkzeug eine Bearbeitung in einer Operation erledigt werden kann, für die sonst mehrere Werkzeuge eingesetzt werden müssten. Weil Sonderwerkzeuge wesentlich teurer sind als Standardwerkzeuge lohnt sich die Anfertigung nur dann, wenn eine größere Zahl von Teilen zu bearbeiten ist (Serienfertigung).

Die Einsparungen, die mit einem Sonderwerkzeug erreichbar sind, werden im Wesentlichen aus der eingesparten Rüst- und Bearbeitungszeit berechnet und mit den Kosten bei konventioneller Bearbeitung mit mehreren Werkzeugen verglichen.

1.9 Werkzeugwahl

Bei der Wahl der Werkzeuge sind verschiedene Aspekte zu berücksichtigen und gegenseitig abzuwägen. In den meisten Fällen wird man unter den im Betrieb bereits vorhandenen Werkzeugen das am besten geeignete verwenden. Dabei wird man vorwiegend auf Grund der technischen Eignung entscheiden.

Geht es jedoch in Zusammenhang mit einer neuen Werkzeugmaschine oder der Beschaffung für ein erweitertes Teilespektrum um die Neubeschaffung von Werkzeugen, oder um die strukturelle Beurteilung des bisherigen Sortiments, wird man weitergehende Überlegungen machen. Natürlich sind die Kosten ein wesentlicher Aspekt. Zusätzlich wird man aber technische Aspekte beurteilen, wie

- eine einfache Handhabung,
- gute Resultate in der Zerspanung,
- optimale Möglichkeit zur Kühlung,
- die Stabilität, und nicht zuletzt
- die Möglichkeit, der mehrfachen Verwendung. Dies insbesondere bei modularen Systemen, die sich bei gegebener maschinenseitiger Aufnahme mit mehreren unterschiedlichen Werkzeugaufnahmen oder Verlängerungen kombinieren lassen.

Speziell die im Durchmesser einstellbaren Werkzeuge zum Ausbohren und Feinbohren sind auf Basis modularer Systeme erhältlich. Bei Werkzeugen mit wechselbaren Schneidplatten sind bei der Auswahl speziell Kombinierbarkeit und Variantenvielfalt der Wendeplatten zu berücksichtigen.

Aufbau der Werkzeuge

Das sollte man sich merken:

1. Eine gute **Werkzeugvorbereitung** ist sowohl für die heute gestellten Qualitätsansprüche als auch zur Vermeidung von Wartezeiten an den Maschinen unerlässlich.
2. Für Betriebe mit CNC-Maschinen muss ein **großer Werkzeugbestand** weit vorausschauend geplant werden.
3. Voraussetzung für eine qualitativ hochwertige CNC-Fertigung ist **die geometrische und die technologische Zuverlässigkeit** der Werkzeuge.
4. Man unterscheidet zwischen **stehenden** und **rotierenden** Werkzeugen.
5. Ein Komplett-Werkzeug wird aus **mehreren Werkzeugkomponenten** zusammengesetzt.
6. **Werkzeugkomponenten** für ein rotierendes, modulares Werkzeug sind
   - der Adapter mit Steilkegel und Anzugsbolzen,
   - die Greiferrille, passend zum Wechsler,
   - der Werkzeug-Grundkörper mit den Schneidenträgern
   - und die austauschbaren Wende-Schneidplatten.
7. Spanende Werkzeuge werden aus verschiedenen **Schneidstoffen** hergestellt:
   - HSS = High-Speed-Steel
   - HM = Hartmetall
   - VHM = Voll-Hartmetall
   - Cermet = Keramik-Metall
   - Keramik = Oxid, Nitrit, Mischungen
   - PKD = Polykristalliner Diamant
   - CBN = Kubisches Bohrnitrit
8. Zum Einsetzen der Werkzeuge in die Maschine sind unterschiedliche **Werkzeugaufnahmen** erforderlich.
9. Werkzeug-Aufnahmen müssen hohe Anforderungen erfüllen, um die **Schneidkräfte** aufzubringen, einen **präzisen Sitz** zu garantieren und den **automatischen Werkzeugwechsel** zu ermöglichen.
10. Die Werkzeug-Aufnahmen sind nach DIN genormt.
11. Zur Feinbearbeitung von Bohrungen stehen **einstellbare Werkzeuge** zur Verfügung.
12. **Sonderwerkzeuge** sollten nur eingesetzt werden, wenn kein Standard-Werkzeug verfügbar ist.

2 Werkzeugverwaltung (Tool Management)

Bevor auf einer CNC-Maschine ein Fertigteil erstellt werden kann, sind eine Reihe von Vorbereitungen zu treffen. Dabei spielen die Werkzeuge in Zusammenhang mit der NC-Programmierung, dem Einkauf, dem Rüsten, dem Ausmessen und der Überwachung eine wichtige Rolle. Seit einigen Jahren wird deshalb bei den meisten Firmen über eine strukturierte Werkzeugverwaltung gesprochen oder eine solche bereits eingesetzt.

2.1 Motive zur Einführung

Verwenden neuer Technologien

Steigende Ansprüche in Design und Qualität, kombiniert mit Zeit- und Kostendruck, zwingen die Unternehmen zu permanenter Investition in noch leistungsfähigere Ausrüstung und Verfahren. Die modernen CNC-Maschinen (z. B. Dreh-Fräs-Maschinen) sind hoch produktiv, sie sind aber in Vorbereitung und Anwendung sehr anspruchsvoll. Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz neuer Technologien ist deshalb die gleichzeitige Anpassung der Organisation mit der Möglichkeit zum Speichern und Abrufen der zusätzlich benötigten Informationen. Das dafür zusätzlich erforderliche Wissen kann so in den betrieblichen Ablauf eingebunden und für die benötigten Aufgaben bereitgestellt werden. Dadurch wird vermieden, dass Betriebsmittel, Werkzeuge und Anweisungen falsch oder unvollständig bereitgestellt werden und als Folge Unterbrechungen in der Fertigung resultieren *(Bild 2.1)*.

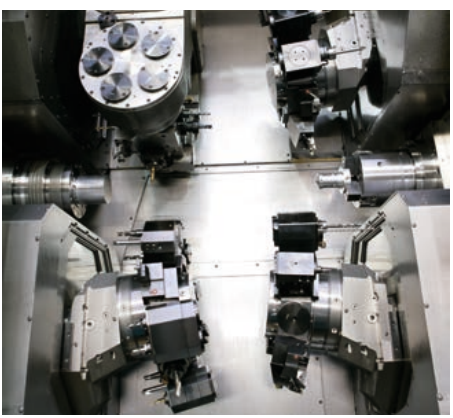


Bild 2.1: Arbeitsraum eines Dreh-Fräs-Zentrums.

Passende Informationen bereitstellen

Beim Kauf neuer Ausrüstung wird die benötigte Information für die Verwendung mitgeliefert (z. B. Schnittwerte bei Werkzeugen). Diese Information liegt jedoch in lieferantenspezifischer Formulierung vor (z. B. maximaler Einstelldurchmesser eines Feinbohrwerkzeugs). Bevor die neue Anschaffung eingesetzt werden kann, müssen die Angaben in das betriebsspezifische und aufgabenorientierte Format gebracht werden (z. B. konkret benötigter Einstellwert

für ein Feinbohrwerkzeug). Zudem muss diese Information an allen betroffenen Arbeitsplätzen verfügbar gemacht werden (z. B. muss der konkrete Einstelldurchmesser sowohl in der NC-Programmierung als auch in der Werkzeugausgabe bekannt sein). Die betriebsspezifisch aufbereiteten Informationen liegen dann als allgemeine oder teilespezifische Anweisungen vor (z. B. geeignete Schnittwerte für den Einsatz eines Werkzeugs in einem bestimmten Werkstoff) und müssen verwaltet und in den Auftragsablauf eingebunden werden. Dies ist erforderlich um zu vermeiden, dass wegen ungeeigneter Schnittwerte wertvolle Kapazität verloren geht, oder die Standzeit der Werkzeuge reduziert wird.

Informationen verfügbar machen

Die Werkzeug- und Fertigungsdaten werden in betriebsspezifischer Form in Datenbanken verwaltet. Dafür wird eine Softwareanwendung eingesetzt, mit der die Informationen abteilungsübergreifend von verschiedenen Personen verwendet werden können, ohne dass diese mehrfach erfasst werden müssen. Damit die Daten auch in anderen Softwareanwendungen genutzt werden können, werden entsprechende Schnittstellen eingesetzt. Von unterschiedlichen Arbeitsplätzen (z. B. CAM-System, Voreinstellgerät, Werkstatt-Logistik) wird auf dieselbe Datenbasis zugegriffen und somit ein reibungsfreier Arbeitsablauf gewährleistet. Die zentrale Datenhaltung vermeidet Fehler und Stillstandszeiten in der Fertigung, die durch vergessene Aktualisierungen in den Spezifikationen oder unvollständige Anweisungen entstehen.

Planen und vorbereiten

Für die Planung der Maschinenbelegung, die Vorbereitung der Werkzeuge der Nachtschicht, den Einkauf von Verbrauchsartikeln oder den Entscheid für eine Neuanschaffung sind ausreichend Informationen notwendig. Die strukturierte Verwaltung aller Angaben im Umfeld der Werkzeuge ermöglicht, kurzfristig solche Informationen und Zusammenhänge verfügbar zu machen.

Notwendigkeit einer Lösung

Die Bedeutung des Informationsaustausches zwischen den Arbeitsbereichen ist firmenspezifisch unterschiedlich. Allgemein gilt, dass fehlende und unklare Informationen bedeutende Fehlerquellen sind und sich durch Kapazitätsverlust, Ausschuss, Zeitverzögerung und ineffiziente Arbeitsabläufe bemerkbar machen. Manuelle Schnittstellen und mündlicher Informationsaustausch sind potentielle Fehlerquellen und Hürden für neue Mitarbeiter.

Je mehr Personen am Fertigungsprozess beteiligt sind, umso wichtiger sind verbindliche Anweisungen und klare Abläufe. Häufig auszuführende Tätigkeiten müssen effizienter organisiert werden als selten anfallende Arbeiten. Besonders wichtig sind verbindliche Spezifikationen bei komplexen Bearbeitungssituationen zur Vermeidung von Maschinenschäden und bei Produkten mit besonderen Risiken im Falle einer fehlerhaften Lieferung *(Bild 2.2)*.

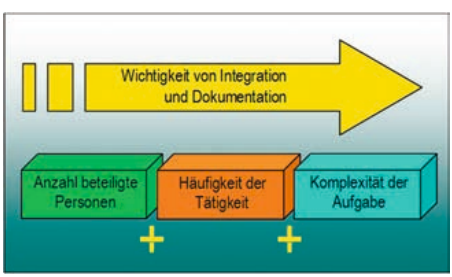


Bild 2.2: Wichtigkeit einer systematischen Dokumentation für fehlerfreie Prozesse.

2.2 Evaluation einer Werkzeugverwaltung

Typischerweise entsteht das Bedürfnis nach einer Werkzeugverwaltung dann, wenn der Arbeitsablauf wiederholt Probleme bereitet, z. B. ständiges Suchen nach Werkzeugen oder Maschinenschaden wegen Fehlern. Oder im positiven Fall, weil neue Technologien eingeführt werden und die Organisation den steigenden Anforderungen rechtzeitig angepasst werden soll (z. B. Einführung eines zentralen Voreinstellgeräts). Auch wenn das Bedürfnis lediglich in einem einzelnen Arbeitsbereich akut ist (z. B. Reduktion des hohen und falschen Werkzeugbestands), kann das Problem nur dann nachhaltig gelöst werden, wenn die Informationen aus allen Arbeitsbereichen sinnvoll miteinander verknüpft werden. Aus verschiedenen Gründen kann diese Aufgabe nur mit einer darauf spezialisierten Lösung zweckdienlich und nachhaltig gelöst werden. Der voraussichtliche Nutzen, den eine gute Werkzeugverwaltung bietet, kann mit wenigen Kenndaten ermittelt und den geplanten Projektkosten gegenübergestellt werden.

Bevor eine Werkzeugverwaltung beschafft wird ist festzulegen, welche Aufgaben damit gelöst und welche Schwachstellen und zusätzlichen Möglichkeiten abgedeckt werden sollen. Die Zusammenstellung beschreibt die Aufgaben und Ziele, ohne die dafür verwendete Methode vorwegzunehmen und damit die Lösungswege einzugrenzen. Je nach Art der Fertigung (Serien, Prototypen), der Branche in welchem das Unternehmen tätig ist (Medizintechnik, Maschinenbau, Zulieferer) und der eingesetzten Fertigungsmaschinen, wird den verschiedenen Aufgaben eine unterschiedliche Priorität beigemessen. Die Beschreibung der Aufgaben bezieht sich auf alle betroffenen Abteilungen und dient als Basis für ein Lastenheft.

2.3 Lastenheft

Das Lastenheft ist eine systematische Aufstellung der Anforderungen an die geplante Lösung. Sie dient als Basis für die von den möglichen Lieferanten zu erstellenden Angebote und ist gegliedert in die folgenden Kapitel:

- Die **Einleitung** beschreibt den Hintergrund und die angestrebten Ziele in globaler Form.
- Die **Randbedingungen** erläutern das Mengengerüst der betroffenen Daten, die Anforderung an die Nummerierungssysteme, die Anzahl benötigter Arbeitsplätze für die verschiedenen Aufgaben, die EDV-technischen Gegebenheiten einschließlich der zu integrierenden Anwendungen, sowie Angaben zur Organisationsform und der vorgesehenen Einführungsphasen.
- Die **Prozessanforderungen** sind gegliedert nach Arbeitsplatz. Sie beschreiben die Anforderungen der Mitarbeiter an die Lösung aus Sicht des Arbeitsablaufs als Teil des Fertigungsprozesses (z. B. Drucken der Netto-Bedarfsliste mit Barcode und Lagerort).
- Die **funktionalen Anforderungen** beschreiben nicht selbstverständliche Randbedingungen für spezifische Aufgaben und entsprechen oft dem Detailwissen einzelner Mitarbeiter, welche die Aufgabe derzeit ausführen. So soll z. B. festgehalten werden, ob die Werkzeuggröße bei der Netto-Beladeliste berücksichtigt werden muss.
- Die **nicht funktionalen Anforderungen** beschreiben Randbedingungen und Wünsche, die sich auf die ganze Lösung beziehen und nicht einzelne Funktionen betreffen. So kann z. B. festgehalten wer-

den, dass die Installation von Updates ohne externe Dienstleistung durch IT des Kunden möglich sein soll. Die nicht funktionalen Anforderungen sind meist gegliedert in Vorgaben der IT, Anforderungen der Qualitätssicherung und allgemeine Wünsche der Anwender (z. B. verständliche, intuitive Bedienung).

Anstatt ein Lastenheft zu erstellen, können die Anforderungen auch mit möglichen Lieferanten besprochen werden, welche dann für das Unternehmen einen Vorschlag ausarbeiten. Die Lieferanten verfügen über Erfahrung aus ähnlichen Unternehmen und können diese mit einfließen lassen. Je nach Kompetenz und Reputation des Lieferanten kann damit ein besserer Vorschlag resultieren, als mit einem selbst erstellten Lastenheft.

2.4 Beurteilung von Lösungen

Der Anwender legt bei der Beurteilung einer neu zu beschaffenden Lösung spezielles Augenmerk auf jene Aspekte, die den primären Grund für eine Beschaffung verursacht haben (z. B. Kapazitätsverlust durch Suchen von Werkzeugen) und die unmittelbar angrenzenden Schwachstellen (z. B. Reduktion der Werkzeugkosten durch Zentralisierung der Lagerhaltung). Es ist die Aufgabe der Verantwortungsträger, die Aufgabe global zu betrachten und dem Bedürfnis strukturell zu begegnen, statt mit einer lokalen Lösung vorübergehende Linderung herbeizuführen. Weil es sich um eine übliche Aufgabe der CNC-Fertigung handelt, muss die Lösung nicht neu erfunden werden, sondern aus den verfügbaren Anwendungen ist die am besten geeignete zu wählen und in sinnvollen Schritten einzuführen. Unabhängig von den technischen Fakten sind dabei auch die Hintergründe des Herstellers zu beleuchten. Dieser sollte unter anderem über eine nachhaltige Vision und entsprechende Ressourcen verfügen und nicht derart mit anderen Produkten verflochten sein, dass der universelle Einsatz oder der Abdeckungsgrad der Aufgaben beschränkt ist.

Vor der Einführung, die schrittweise erfolgt, wird ein Einführungsplan erstellt, der die Verantwortlichkeit und den erwarteten zeitlichen Aufwand aufzeigt.

2.5 Einführung einer Werkzeugverwaltung

Die Einführung einer Werkzeugverwaltung beginnt mit der Kommunikation im Betrieb. Nur wenn alle Beteiligten den Vorteil der strukturierten Organisation erkennen, wird der erwartete Nutzen erreicht. Dies erfolgt am besten anlässlich eines Workshops, bei dem genügend Zeit zur Verfügung steht, um alle Fragen und Hinweise der Mitarbeiter anhand einer Testinstallation zu behandeln.

Die Einführung konzentriert sich im ersten Schritt auf die Erfassung der Stammdaten, wobei gleichzeitig die Vielfalt der Werkzeuge auf das Notwendige reduziert wird. Damit wird bereits ein Teil des Nutzenpotenzials ausgeschöpft, weil für die NC-Programmierung, die Werkzeugausgabe und die technologische Planung ein einheitliches System zur Verfügung steht.

In einem nächsten Schritt wird die Logistik eingeführt und danach die prozessorientierte Verwendung für weitere Aufgaben und die Integration mit anderen Systemen. Die Erfahrung des Lieferanten ermöglicht dabei eine realistische Zeit- und Kostenplanung.

2.6 Gliederung

Die Werkzeugverwaltung wird in der zerspanenden Fertigung benötigt, um die In-

formationen über die vorhandenen Werkzeuge einheitlich zu organisieren und im Umfeld zu integrieren. Die Werkzeugdaten sind dabei in einer Datenbank gespeichert und werden mit der Werkzeugverwaltungs-Software erfasst und verwendet. Im Unterschied zu einer allgemeinen Lösung für die Verwaltung der Betriebsmittel, beinhaltet eine Werkzeugverwaltung spezialisierte technische Datenfelder, Grafiken und Parameter, die für den Einsatz im Fertigungsprozess erforderlich sind.

Anders als bei Handwerkzeugen besteht ein Werkzeug in der CNC-Fertigung normalerweise aus mehreren Einzelteilen. Der korrekte Zusammenbau der einzelnen Komponenten zu einem solchen Komplett-Werkzeug ist Voraussetzung für einen fehlerfreien Fertigungsprozess. Für die Bearbeitung eines Teils mit der CNC-Maschine (Arbeitsgang) sind jeweils mehrere Komplett-Werkzeuge erforderlich, die in einer Werkzeugliste dokumentiert werden. Jede Komponente, jedes Komplett-Werkzeug und jede Werkzeugliste hat eine Identifikation, unter welcher die zugehörige Spezifikation gefunden wird.

Die Werkzeugverwaltung gliedert sich in die Dokumentation der Werkzeuge (Stammdaten) und die Logistik (Bestandesführung, Bewegungsdaten).

Die Dokumentation umfasst mindestens alle Informationen, die für einen reibungsfreien und nachvollziehbaren Fertigungsprozess benötigt werden. Zudem können damit Ersatzteile, Erfahrungswerte für den Einsatz und zugehörige Dateien verwaltet werden. Es stehen Funktionen zur Verfügung um die Daten zu pflegen, zu verarbeiten, zu drucken und mit anderen Anwendungen auszutauschen.

Die Logistik befasst sich mit der Bedarfsplanung, dem Bestand und dem Aufenthaltsort der Werkzeuge. Sie umfasst einerseits die Lagerhaltung und den Einkauf der Einzelteile mit entsprechender Auswertung des Verbrauchs. Anderseits können damit die Bewegungen der zusammengebauten Komplett-Werkzeuge innerhalb des Unternehmens geplant und koordiniert werden.

2.7 Integration

Die Werkzeugverwaltung dient dem Ziel, einen effizienten und fehlerfreien Auftragsablauf in der Fertigung zu gewährleisten. Vorhandenes Wissen wird allgemein verfügbar gemacht und die in den Stammdaten festgehaltenen Vorgaben werden beachtet. Damit dies möglich ist, müssen die Informationen für die unterschiedlichen Aufgaben an den jeweiligen Arbeitsplätzen verfügbar sein. Die Integration der Werkzeugdaten ermöglicht anderen Anwendungen die Verwendung der Werkzeugdaten, die mit der Werkzeugverwaltung gepflegt werden. Dabei greifen diese Anwendungen entweder direkt auf die Datenbank der Werkzeugverwaltung zu, oder die Daten werden über Schnittstellen ausgetauscht. Speziell in der CNC-Fertigung, wo mehrere Personen am Fertigungsprozess beteiligt sind, vermeidet die Integration Fehler, Verzögerungen und mehrfache Datenerfassung.

Fehlt eine zentrale Werkzeugverwaltung, werden die Informationen zu den Werkzeugen an verschiedenen Arbeitsplätzen in Tabellen und Listen notiert. Dies bedeutet ein Mehrfaches an Aufwand für die Datenpflege und die Gefahr, veraltete Informationen zu verwenden oder die vollständige Information von verschiedenen Stellen beschaffen zu müssen.

2.8 Werkzeug-Identifikation

Damit der Arbeitsablauf fehlerfrei klappt, muss eine Dokumentation erstellt werden,

in der die dazu benötigten Werkzeuge unmissverständlich aufgeführt sind. Bei mehreren tausend Werkzeugen ist eine klare textliche Beschreibung sehr aufwändig und lang. Deshalb verwendet man dafür eine möglichst kurze, nicht sprechende, eindeutige Identifikationsnummer und dokumentiert die Details in der Datenbank der Werkzeugverwaltung. Das Vorgehen ist vergleichbar mit der Telefonnummer, die als Identifikation für einen Telefonbesitzer verwendet wird.

Der Vorteil einer für das ganze Unternehmen gültigen Identifikation für Werkzeuge liegt darin, dass man die gewünschten Informationen einfach abrufen kann. Ob es sich um die Bestellnummer, geometrische Angaben, den Lagerort der die Schnittwerte handelt, die Information ist sofort verfügbar. Wenn man als Identifikation eine kurze Nummer wählt, ist sie zudem schnell eingegeben. Würde man die Bestellnummer des Artikels dafür verwenden, wäre sie länger, die Nummern wären nicht einheitlich strukturiert und wenn man den Lieferanten wechselt, hätten sie nichts mehr mit dem Artikel gemein.

Bei der Vergabe der Identifikation für Werkzeuge ist zu unterscheiden zwischen einzelnen Komponenten und den daraus zusammengebauten Komplett-Werkzeugen. Es ist zur Vermeidung von Missverständnissen empfehlenswert, eigene Nummernkreise zu verwenden. Z. B. ab 50 001 für Komponenten und ab 600 01 für Komplett-Werkzeuge *(Bild 2.3)*.

Als Identifikation für die Werkzeuglisten (Rüstlisten) kann z. B. ein Nummerkreis ab 7 001 001 festgelegt werden. Die Werkzeug-

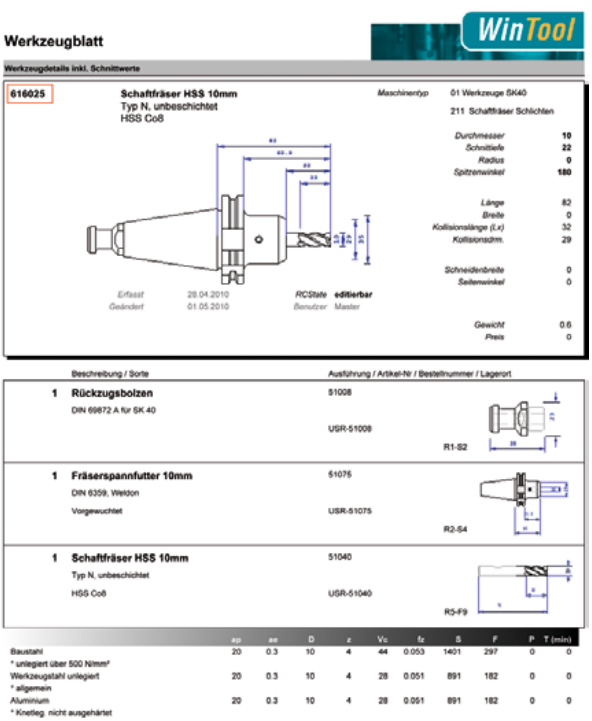


Bild 2.3: Fortlaufende 6-stellige Zahl als Identifikation für Komplett-Werkzeuge

liste enthält alle Werkzeuge, die für einen Arbeitsgang (eine Bearbeitung) benötigt werden. Zusammen mit der Identifikation wird bei der Werkzeugliste auch der Arbeitsgang (z. B. 100 1004 – 20) erfasst *(Bild 2.4).*

Als Identifikation für die Arbeitsgänge wird eine Kombination der Zeichnungs- oder Teilenummer und der Nummer des Arbeitsgangs verwendet (z. B. 100 1004 – 20). In der Verwaltung der Arbeitsgänge werden alle Dokumente (Anweisungen für die Mitarbeiter und Instruktionen für die Maschinen) zusammengefasst. Wenn möglich verwendet man für diese Dokumente das gleiche Prinzip für die Identifikation wie für die Werkzeugliste. So bekommt das NC-Programm und die Aufspannskizze z. B. ebenfalls die Identifikation 7 001 001.

2.9 Werkzeuge suchen

Ein wichtiger Vorteil der Werkzeugverwaltung ist die Möglichkeit, dass komfortabel nach vorhandenen Werkzeugen gesucht werden kann. Statt im Lager mit dem Messschieber abzuklären, ob die Schneidenlänge für eine Bearbeitung ausreicht, kann diese in der Werkzeugverwaltung abgefragt werden.

Kennt man die Bestellnummer, können die zum Werkzeug gehörigen Daten direkt aufgerufen werden.

Sucht man ein Werkzeug für eine be-

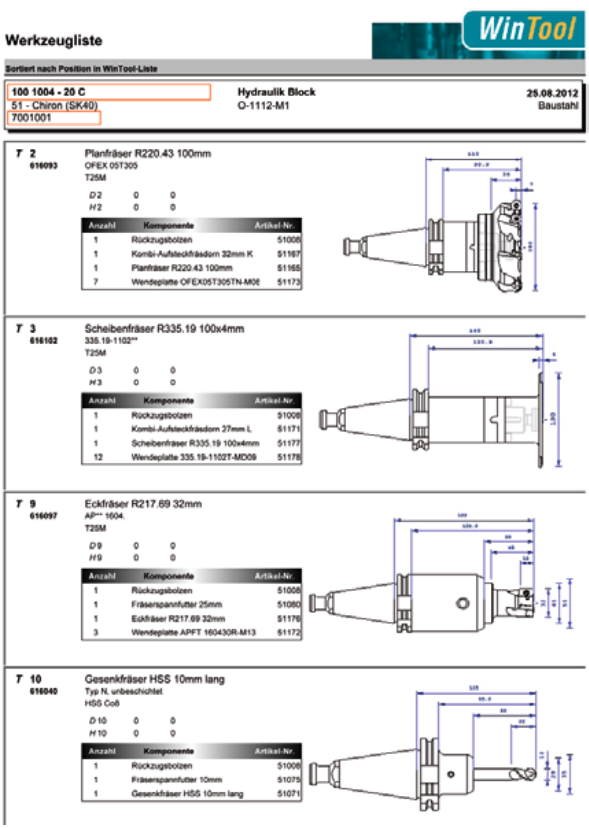


Bild 2.4: Fortlaufende 7-stellige Zahl für Werkzeuglisten, zusätzlich ist der Arbeitsgang erfasst.

stimmte technische Aufgabe (z. B. für ein Gewinde M8), verwendet man die Klassifikation mit zusätzlichen Filtern für die Geometrie, die Technologie und die Verfügbarkeit im Lager.

In der Datenbank der Werkzeugverwaltung kann auch abgefragt werden, in welchen Werkzeuglisten eine bestimmte Komponente vorkommt. Dieser Verwendungsnachweis wird benötigt, wenn Komponenten nicht mehr lieferbar sind, damit man die Komponenten in allen betroffenen Werkzeuglisten ersetzen kann. Der Verwendungsnachweis kann auch verwendet werden, wenn man Angaben zur Verwendung einer Komponente aus einem bereits vorhandenen NC-Programm übernehmen möchte *(Bild 2.5)*.

2.10 Werkzeug-Klassifikation

Sucht man ein Werkzeug (Komponenten oder Komplett-Werkzeug) für eine technische Aufgabenstellung, kennt man die Identifikation nicht. Man wird deshalb über die Klassifikation suchen. Jedes Werkzeug ist einer Klasse zugeteilt. Alle Werkzeuge innerhalb einer Klasse sind ähnlich (z. B. Schaftfräser HSS zum Schruppen). Die Klassifikation ist eine hierarchische Gliederung, bei der man über z. B. drei Stufen schrittweise die gewünschte Klasse findet, auch wenn man diese nicht im Voraus auswendig kennt.

Wird einer der Datensätze ausgewählt, werden alle Details und die Identifikation angezeigt. Je nach dem, ob man eine Komponente oder ein Komplett-Werkzeug gesucht hat, wird der passende Datensatz gefunden.

2.11 Werkzeug-Komponenten

Die **Komponenten** sind Einzelteile, welche zu Komplett-Werkzeugen kombiniert werden. Komponenten werden als Einheit eingekauft und in der Werkzeugausgabe gelagert. Es wird unterschieden zwischen schneidenden Komponenten (z. B. Wendeschneidplatte) und nicht schneidenden

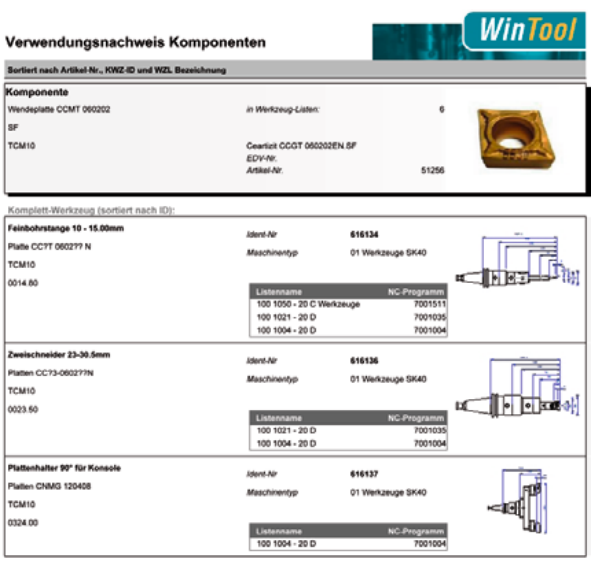


Bild 2.5: Verwendungsnachweis einer Komponente auf Stufe Komplett-Werkzeuge und Arbeitsgänge.

Komponenten (z. B. Spannzangen). Schneidende Komponenten werden beim Einsatz verschlissen und müssen daher periodisch ersetzt und eingekauft werden. Nicht schneidende Komponenten sind bei normalem Gebrauch praktisch unbeschränkt einsetzbar. Sie werden meist zusammen mit einer neuen Werkzeugmaschine beschafft. Spannmittel werden wie nicht schneidende Komponenten behandelt.

Die **Kopfdaten** sind für alle Komponenten einheitlich gegliedert und beinhalten die Bezeichnung, die Bestellnummer und die eindeutige Artikel-Nr (Identifikation). Jede Komponente ist einem Werkzeug-Typ zugeteilt, welcher Anzahl und Bedeutung der beschreibenden Datenfelder bestimmt (Sachmerkmalleiste). Zudem ist jede Komponente einer Werkzeugklasse zugeteilt, damit sie über die Klassifikation gefunden wird.

Die beschreibenden Daten (geometrische Werte) unterscheiden sich je nach Werkzeug-Typ. Die Felder und deren Bedeutung der Datenfelder sind in der Sachmerkmalleiste und den zugehörigen Schemen festgehalten *(Bild 2.6)*.

Zusätzlich zu den Datenfeldern sind in der Werkzeugverwaltung **Grafiken** enthalten. Sie sind entweder direkt in der Datenbank gespeichert, oder über Dateiverknüpfungen zugeordnet. Dabei sind in der Regel vier Typen von Grafiken zu unterscheiden.

a) Die 2D-Grafik (DXF) enthält Maßlinien und geometrische Information für den Anwender. Sie wird für den Aufbau der Zeichnung des Komplett-Werkzeugs verwendet und entspricht bezüglich Verwendung der Layer, der Ausrichtung und dem Nullpunkt dem Standard nach BMG 3.0/DIN 69 874. Anwendungen für die Werkzeugverwaltung verfügen meist über eine integrierte Funktion zur automatischen Erstellung der 2D-Grafiken auf Basis der erfassten Geometriedaten, sodass diese Arbeit beim Aufbau der eigenen Bibliothek in vielen Fällen entfällt *(Bild 2.7)*.

b) Die 3D-Modelle werden insbesondere bei Drehwerkzeugen benötigt, um daraus die Modelle der Komplett-Werkzeuge zu generieren. Nullpunkt und Ausrichtung sind in den ISO-Standards normiert *(Bild 2.8)*.

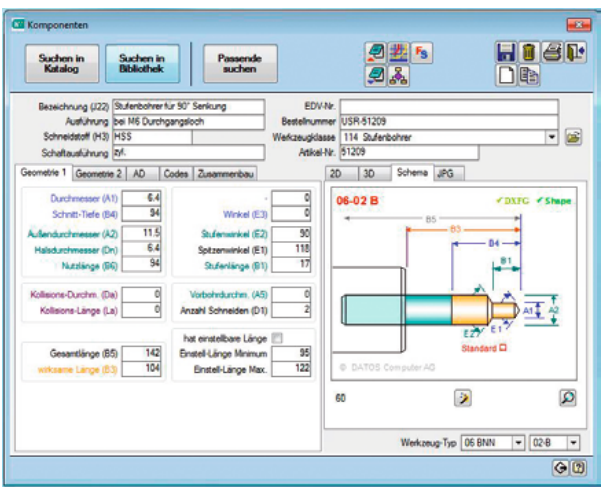


Bild 2.6: Die Verwendung standardisierter Prinzip-Skizzen (Schema) ist Voraussetzung für eine fehlerfreie Datenerfassung.

c) Ein Photo oder eine Grafik aus dem Internet wird bei komplexen Komponenten verwendet, um Form und Einsatz genauer zu erklären.
d) Die pdf-Datei aus dem Katalog des Werkzeugherstellers wird in der Werkzeugverwaltung eingebunden, falls dies zur Erklärung der korrekten Handhabung notwendig erscheint.

Um den Aufwand der erstmaligen Erfassung der Komponenten in der Werkzeugverwaltung zu reduzieren, stellen die Werkzeughersteller Daten und Grafiken in entsprechend aufbereiteter Form zur Verfügung. Für die technischen Daten der Werkzeuge werden derzeit das DIN 4000 und das ISO 13399 Austauschformat verwendet *(Bild 2.9)*.

2.12 Komplett-Werkzeuge

Die Komplett-Werkzeuge sind aus mehreren Komponenten aufgebaut. Am hinteren Ende befindet sich die Komponente, welche zur Werkzeugaufnahme der Maschine passt, auf der anderen Seite befindet sich die schneidende Komponente (z. B. Bohrer oder Wendeplatte). Dazwischen werden unterschiedliche Komponenten (z. B. Verlängerung, Spannzange) verwendet, um die gewünschte Geometrie des Komplett-Werkzeugs zu erreichen. Die Dokumentation des Komplett-Werkzeugs beschreibt,

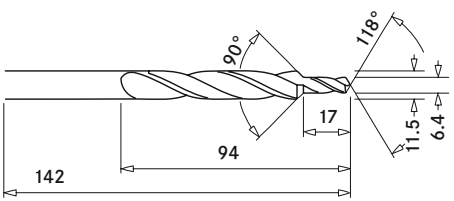


Bild 2.7: DXF Grafik für geometrische Information und Zusammenbau des Komplett-Werkzeugs.

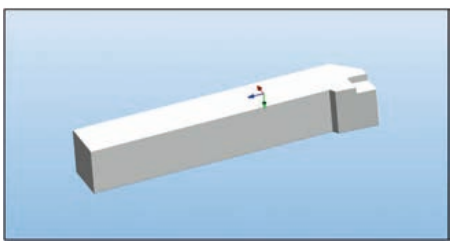


Bild 2.8: Modell (STL oder Step) eines Drehwerkzeugs für den Aufbau eines Komplett-Werkzeugs.

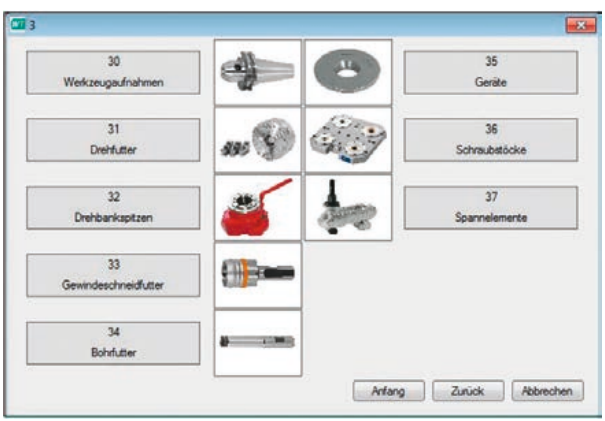


Bild 2.9: Integrierte Werkzeugkataloge vereinfachen die Datenerfassung.

wie die Komponenten zusammengebaut werden müssen. Damit stellt man sicher, dass die im CAM-System verwendete Geometrie mit dem in der Werkstatt zusammengebauten Werkzeug übereinstimmt *(Bild 2.10)*.

Die **Kopfdaten der Komplett-Werkzeuge** enthalten die eindeutige Identifikation, die Bezeichnung und die Zuteilung zur Werkzeugklasse.

Die geometrischen Felder werden beim Aufbau des Komplett-Werkzeugs automatisch aus den Werten der Komponenten berechnet. Bei einstellbaren Werkzeugen (z. B. Feinbohrwerkzeug mit einstellbarem Durchmesser) werden zusätzliche Angaben beim Komplett-Werkzeug gespeichert.

Die **Stückliste** enthält alle Komponenten in der jeweiligen Stückzahl und Reihenfolge. Es können zusätzliche Angaben für den Zusammenbau des spezifischen Komplett-Werkzeugs erfasst werden (z. B. Einstell-Toleranz +0.03/–0.01 mm, oder die minimale Auskraglänge).

Zu jedem Komplett-Werkzeug werden die Sollwerte für die Voreinstellung erfasst, die zum Messen/Einstellen des Werkzeugs auf dem Voreinstellgerät verwendet werden. Zusätzlich zu den Sollwerten können Angaben zum genauen Ort und der Methode der Messung angegeben werden, damit z. B. bei einem Einstechwerkzeug klar ist, ob die linke oder rechte Schneidecke auszumessen ist.

Die **Schnittwerte** werden von der schneidenden Komponente als Vorschlag ins Komplett-Werkzeug übernommen. Sie müssen auf die konkrete Situation in diesem Komplett-Werkzeug angepasst werden, weil z. B. verlängerte Werkzeuge andere Schnittwerte benötigen als kurz gespannte.

Mit einer Werkzeugverwaltung ist es viel einfacher als von Hand, die Dokumentation zu erstellen. Die einzelnen Komponenten werden per Mausklick ausgewählt und angefügt. Die Zeichnung des Komplett-Werkzeugs und die Stückliste werden automatisch aufgebaut. Die meisten Daten werden aus den Feldern der Komponenten von der Software automatisch berechnet und eingetragen.

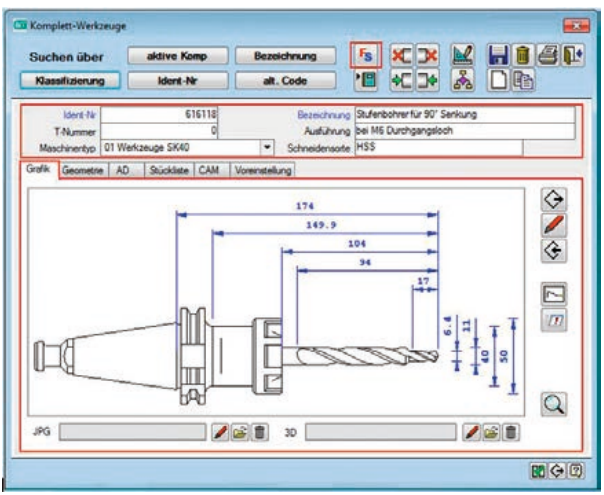


Bild 2.10: Komplett-Werkzeug mit Kopfdaten, Grafik und spezialisierten Registern für jedes Thema.

2.13 Werkzeuglisten

In der Werkzeugliste sind alle Komplett-Werkzeuge aufgeführt, die für einen Arbeitsgang benötigt werden. Sie wird als Rüstliste ausgedruckt und dient der Kommissionierung und Bereitstellung der Komplett-Werkzeuge. Das Druckformat kann dabei in weiten Bereichen selbst festgelegt werden. Die Liste beinhaltet die benötigten Komponenten mit Lagerort und den wichtigsten geometrischen Angaben und Toleranzen des Komplett-Werkzeugs.

Die Kopfdaten beinhalten die eindeutige Identifikation, die Zuordnung zum Arbeitsgang und Bezeichnung. Die Werkzeugliste enthält alle für den Arbeitsgang benötigten Komplett-Werkzeuge, zusammen mit dem vorgesehenen Platz in der Maschine (T-Nummer, Revolver). In dieser Liste können auch Anforderungen an das Komplett-Werkzeug erfasst werden, die nur für diesen Arbeitsgang gültig sind (z. B. minimale Schneidenlänge). Die Komplett-Werkzeuge sind in der Reihenfolge aufgeführt, wie sie im NC-Programm verwendet werden.

2.14 Arbeitsgänge

Um ein Teil herzustellen, werden mehrere Arbeitsgänge benötigt. Z. B. Absägen, CNC-Drehen, Reinigen und Verpacken. Im PPS System ist die Beschreibung der Arbeitsgänge gespeichert. Die zugehörigen technischen Informationen sind nur in der Werkstatt vorhanden (z. B. NC-Programm oder Werkzeugblatt mit Stückliste). Mit der Werkzeugverwaltung können deshalb auch weitere für die CNC-Bearbeitung benötigte Dokumente organisiert werden (z. B. Zeichnungen aus dem CAD, NC-Programme vom CAM-System). Oft wird dieser Aufgabenbereich auch „NC-Programmverwaltung“ oder „NC-Mappen“ bezeichnet.

Solche NC-Mappen können mit unterschiedlichem Status gekennzeichnet werden, damit nicht versehentlich ungeprüfte NC-Programme, veraltete Rüstlisten oder überholte Zeichnungen verwendet werden. Gesperrte Mappen können nicht verwendet werden, archivierte Daten werden ausgeblendet, mit freigegebenen Mappen kann sofort gearbeitet werden *(Bild 2.11).*

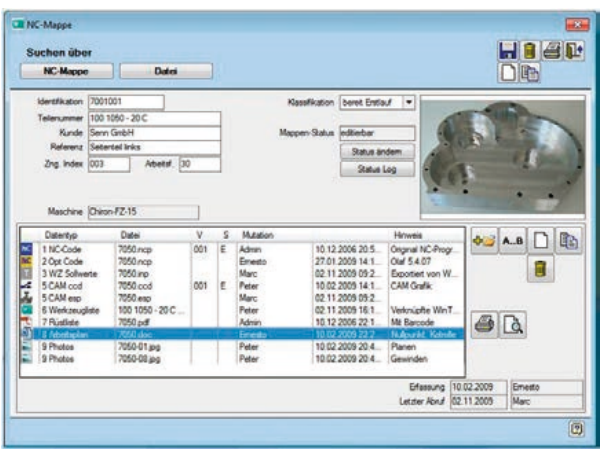


Bild 2.11: NC-Mappe zur Verwaltung aller Dokumente, die für einen Arbeitsgang benötigt werden.

CAM (NC-Programmierung)

Mit dem CAM-System werden die Bearbeitungsbefehle (NC-Programm) für die CNC-Maschinen erstellt. Geometrie, Bezeichnung und Schnittwerte der Komplett-Werkzeuge werden direkt aus der Werkzeugverwaltung übernommen. Dadurch ist sichergestellt, dass alle verwendeten Werkzeuge dokumentiert sind und mit der Realität in der Werkstatt übereinstimmen.

Für die sichere Datenübergabe von der Werkzeugverwaltung an die CAM-Systeme müssen die bei den Werkzeugen gespeicherten Daten einheitlich (Sachmerkmalleiste, Schema) und vollständig erfasst sein.

Nach Fertigstellung des NC-Programms wird die Liste der verwendeten Werkzeuge vom CAM-System als Werkzeugliste in der Werkzeugverwaltung übergeben *(Bild 2.12).*

2.15 Werkzeug-Voreinstellung

Die CNC-Maschine benötigt zur Positionierung der Werkzeuge bei der Bearbeitung deren genaue Abmessungen, also die Position der Schneidecke in Bezug zum Nullpunkt des Werkzeugs. Nur mit diesen Korrekturwerten weiß die Steuerung der Maschine, wo sich die Schneide des Werkzeugs in Bezug zur Spindel tatsächlich befindet.

Im Prinzip können die Werkzeuge auch auf der CNC-Maschine ausgemessen und die Werte für Länge und Durchmesser so bestimmt werden. Während der dafür verwendeten Zeit steht jedoch die Maschine und sie ist nicht produktiv. Deshalb sind die CNC-Maschinen so aufgebaut, dass die Schneidenposition auch außerhalb der Maschine auf ein gegebenes Maß eingestellt oder das Ist-Maß bestimmt werden kann. Die Werte werden dann beim Einsetzen der Werkzeuge in die Maschine übernommen.

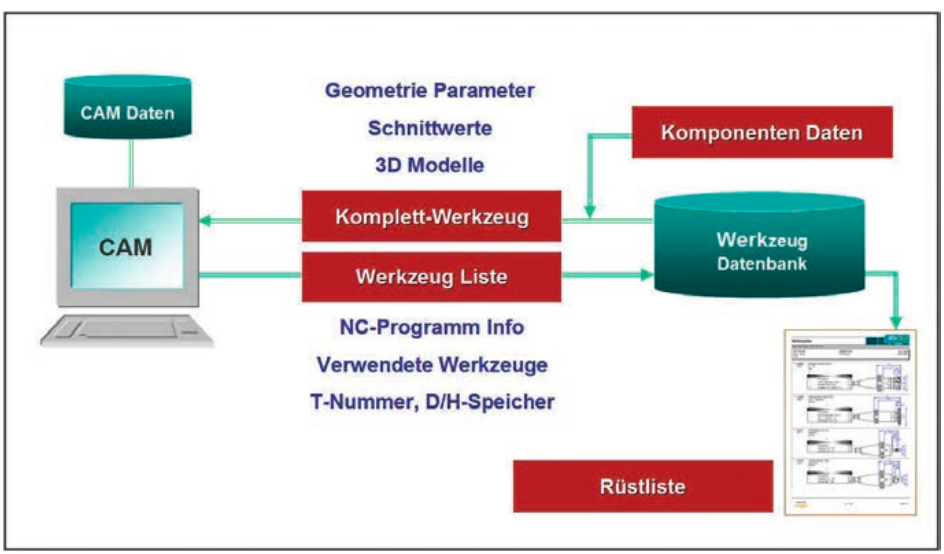


Bild 2.12: Integration mit dem CAM System

Komfortable Voreinstellgeräte übernehmen Sollwerte, Bezeichnung und Toleranzen aus der Werkzeugverwaltung und übergeben die gemessenen Ist-Werte direkt an die Steuerung der CNC-Maschine. Die Integration der Werkzeugverwaltung mit den Voreinstellgeräten erfolgt im Austauschformat des jeweiligen Geräteherstellers und beinhaltet auch die Grafiken und Angaben zur Messmethode *(Bild 2.13)*.

Damit eine Messung auf dem Voreinstellgerät möglich ist, verfügt dieses über eine identische Aufnahme (Adapter), wie die eigentliche CNC-Maschine an ihrer Spindel. Komfortable Voreinstellgeräte finden die Schneidecke selbständig und übernehmen die Messwerte automatisch. Bei einfacheren Geräten wird die Messoptik manuell an die gewünschte Position bewegt und die angezeigten Werte werden gespeichert, ausgegeben oder abgeschrieben.

Bei einer zentralen Werkzeugausgabe wird eher ein komfortables Gerät beschafft, weil damit viele Werkzeuge gemessen werden und die Zeiteinsparung den höheren Preis rechtfertigt. Bei dezentraler Organisation des Messvorgangs ist wegen der geringeren Verwendungshäufigkeit ein einfacheres Gerät angebracht. Das Gerät soll nicht über mehr Funktionen verfügen, als wirklich benötigt werden, da sonst die Arbeit unnötig kompliziert wird. So ist es wenig ratsam, z. B. die Lagerverwaltung im Voreinstellgerät zu integrieren, weil dadurch die Lösung komplexer und von der Integration mit IT-Systemen (z. B. ERP-System) abhängig würde.

Bei den Werkzeugen mit gegebener Geometrie werden die exakten Werte der Schneide bestimmt. Bei einstellbaren Werkzeugen muss zuerst das Werkzeug auf die vorgegebenen Werte eingestellt werden, die mit dem Voreinstellgerät überprüft werden.

Die Soll-Daten (Länge, Durchmesser, Eckenradius) werden im Werkzeugblatt festgelegt. Mit dem Messen bestimmt man die Ist-Daten. Zusammen mit der Identifikation, Bezeichnung usw. werden diese Ist-



Bild 2.13: Komfortables Gerät zum Schrumpfen und für die Einstellung/Messung der Korrekturwerte von Werkzeugen (DMG).

Daten an die Steuerung übergeben. Dies erfolgt entweder mittels ausgedruckter Etikette (Papier), mit einem automatisch beschriebenen RFID-Chip, oder über eine Austauschdatei *(Bild 2.14)*.

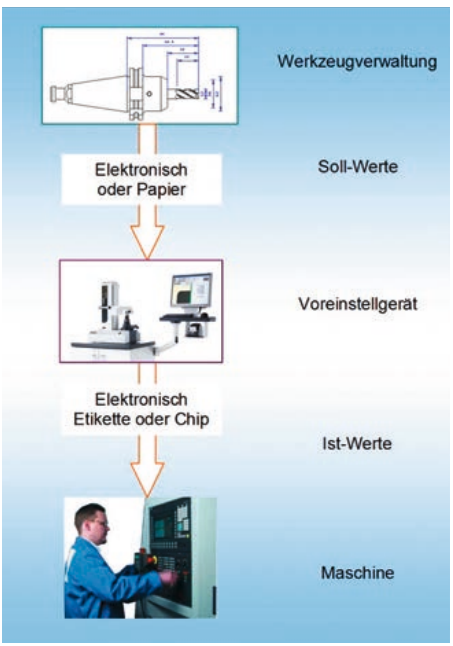


Bild 2.14: Datenfluss von der Werkzeugverwaltung über das Voreinstellgerät zur CNC-Maschine.

2.16 Werkzeug-Logistik

Die Logistik befasst sich mit den Beständen, den Lagerorten und der Beschaffung von Werkzeugen. Innerhalb der Logistik wird unterschieden zwischen den einzelnen Komponenten und den daraus zusammengebauten Komplett-Werkzeugen. Bei den Komponenten wird unterschieden zwischen dem betriebsinternen Materialfluss und der Beschaffung bei externen Lieferanten (Lagerhaltung).

Lagerhaltung der Komponenten

Die Logistik der Komponenten umfasst die Bestandsführung, die Planung des Bedarfs und die Überwachung des Mindestbestands. Dabei wird bei Erreichen des Mindestbestands von der Werkzeugverwaltung ein Beschaffungsvorgang ausgelöst, der vom Einkauf mit dem ERP-System abgewickelt wird. Die Logistik der Werkzeugverwaltung verfügt über eine auf das Umfeld des Einsatzes abgestimmte Bedienung und über geeignete Schnittstellen zu Lagersystemen und anderen Geräten der Fertigung.

Bei der Entnahme von Komponenten wird gleichzeitig eine Lagerbuchung vorgenommen, die den Lagerbestand reduziert und den Verwendungszweck und den Ort der Verwendung (Kostenstelle) protokolliert. Nach der Verwendung werden die Komponenten wieder im Lager eingebucht und der Bestand erhöht sich. Verschlissene Komponenten werden zur Entsorgung oder zum Nachschärfen gebucht.

Erreicht der Lagerbestand die als Mindestbestand erfasste Menge, wird der Artikel im Bestellvorschlag aufgenommen. Die Bestellung aller vorgeschlagenen Artikel erfolgt periodisch nach vorgängiger Kontrolle durch den beauftragten Mitarbeiter.

Zur Vereinfachung der Lagerbuchungen (Entnahme, Zugang) können Barcodes verwendet werden. Statt die Artikelnummer über die Tastatur einzugeben, kann diese vom Lesegerät erkannt und in die Anwendung übernommen werden. Ebenfalls zur Vereinfachung der Buchungsvorgänge besteht die Möglichkeit, alle Artikel einer Rüstliste auf Knopfdruck zu buchen. Eine weitere Vereinfachung der Lagerbuchung wird erreicht, wenn nur die Verschleißteile (Schneiden) in der Lagerbuchhaltung geführt werden.

Auf Basis der Lagerbuchungen werden periodisch Auswertungen erstellt, mit denen Verbrauchsänderungen und Kosten analysiert werden. Die Zahlen dienen zur Optimierung der Mindestbestände, zur Vereinbarung von Liefermengen mit Lieferanten und zur Beurteilung der Werkzeugstandzeiten.

Verwendung der Komponenten

Bei der innerbetrieblichen Logistik interessiert vor allem, an welchem Ort sich eine gesuchte Komponente befindet und an welcher Kostenstelle sie verbraucht wurde. Verbraucht werden dabei nur die Verschleißteile (Schneiden), die anderen Komponenten (Grundkörper, Spannmittel) werden lediglich zwischen Lager, Werkzeugausgabe und Maschinen verschoben. Die Buchung der Komponenten an die einzelnen Kostenstellen und Orte erfolgt gleichzeitig mit der Entnahme/Einlagerung im Lager. Die Bereitstellung von Werkzeugen und Betriebsmitteln wird mit einem Fertigungsauftrag ausgelöst, der sich auf eine Werkzeugliste in den Stammdaten bezieht.

ERP-Lösung (Einkauf)

Das ERP-System (Enterprise-Resource-Planning-System) steuert und unterstützt alle Geschäftsprozesse des Unternehmens (Materialwirtschaft, Produktion, Rechnungswesen usw.). Dazu gehören auch die Bereitstellung von Rohmaterial, Verbrauchsmaterial und Werkzeugen. Die detaillierte Planung und Bestandskontrolle der einzelnen Werkzeuge übernimmt dabei die Werkzeugverwaltung. Bei Bedarf übergibt die Werkzeugverwaltung eine Bestellanforderung (BANF) an das ERP-System, welches die tatsächliche Bestellung ausführt. Voraussetzung ist dabei, dass die Artikel in beiden Systemen mit derselben Nummer erfasst sind.

Logistik der Komplett-Werkzeuge

Die Komplett-Werkzeuge werden aus Komponenten aufgebaut und nach Gebrauch meist wieder in die Einzelteile zerlegt. Von einem Komplett-Werkzeug können gleichzeitig mehrere Exemplare zusammengebaut werden, sofern die Komponenten in ausreichender Anzahl verfügbar sind. Die Logistik der Komplett-Werkzeuge bezieht sich auf den Zustand und Aufenthaltsort der zusammengebauten Exemplare.

Beim Einplanen eines Fertigungsauftrags sind die für den Arbeitsgang benötigten Komplett-Werkzeuge anhand der zugehörigen Werkzeugliste bekannt. Ebenso ist bekannt, welche Komplett-Werkzeuge sich auf der für die Bearbeitung vorgesehenen CNC-Maschine befinden. Die benötigten, aber noch nicht auf der Maschine vorhandenen Komplett-Werkzeuge werden in einer Netto-Beladeliste ausgedruckt. Sie müssen entweder neu zusammengebaut oder aus dem Zwischenlager entnommen werden. Mit einer koordinierten Logistik der Komplett-Werkzeuge wird der Aufwand für die Bereitstellung der Werkzeuge und das Einwechseln in der Maschine reduziert.

Lagersysteme

Neben den herkömmlichen Werkzeugschränken werden in der zentralen Werkzeugausgabe Lagersysteme eingesetzt, die dem Bediener das Regal mit dem gewünschten Artikel bereitstellen. Der Zusammenhang zwischen der Artikelnummer und dem Lagerplatz wird in der Werkzeugverwaltung gespeichert. Beim Buchen einer Werkzeugentnahme im Logistik-Bereich der Werkzeugverwaltung wird das Lagersystem automatisch angesteuert. Mit derartigen mehrstöckigen Lagersystemen können auf gleicher Grund-

fläche mehr Artikel gelagert werden als in herkömmlichen Lagerkästen. Zudem muss man beim Kommissionieren die Artikel nicht über weite Distanz zusammentragen *(Bild 2.15)*.



Bild 2.15: Lagersysteme (Kardex Remstar Shuttle)

Im Unterschied dazu dienen Werkzeugausgabesysteme dem Ziel, der eigentlichen Fertigung jederzeit Ersatzschneiden zur Verfügung zu stellen. Für die Entnahme muss man sich identifizieren und die gewünschte Artikelnummer eingeben (Tastatur oder Barcode). Weil diese Systeme direkt mit der Werkzeugverwaltung oder dem Lieferanten verbunden sind, ist der verfügbare Bestand jedes Artikels immer bekannt und die Befüllung kann rechtzeitig veranlasst werden. So wird verhindert, dass eine Maschine wegen einer fehlenden Schneide stillsteht.

Werkzeugverwaltung, Tool Management



Das sollte man sich merken:

1. Eine gut organisierte, stets aktuell gehaltene und weitgehend automatisch funktionierende Werkzeugverwaltung ist eine der wichtigsten Voraussetzungen für eine CNC-Fertigung ohne Wartezeiten.
2. Die Werkzeugverwaltung hat die Aufgabe, einen fehlerfreien und effizienten Auftragsablauf zu gewährleisten.
3. Die Werkzeugverwaltung organisiert, aktualisiert und verwaltet alle Informationen und Daten für jedes Werkzeug in einer Datenbank.
4. Sämtliche Daten müssen jederzeit an den Arbeitsplätzen und beim Einsetzen des Werkzeugs in die CNC-Maschine verfügbar sein.
5. Zur eindeutigen Identifikation der Werkzeuge dienen **Identifikationsnummern.**
6. Die **„Klassifikation“** eines Werkzeugs sagt aus, wofür es eingesetzt wird, wie z. B. Bohren, Schruppen, Planfräsen usw.
7. Werkzeuge werden **betriebsspezifisch klassifiziert,** damit man sie einfacher findet.
8. In der **Werkzeugliste** sind alle Komplettwerkzeuge aufgeführt, die für eine Bearbeitung in der Maschine benötigt werden.
9. Die **Identifikation** ist eine eindeutige Nummer für ein Werkzeug im eigenen Betrieb. **Die Komponenten und die Komplett-Werkzeuge werden unabhängig nummeriert.**
10. Die Werkzeugverwaltung gliedert sich in die **Dokumentation** (Identifikation, Klassifikation usw.) und die **Logistik** (Anzahl, Lagerorte und Transport) der Werkzeuge.
11. Bei **einstellbaren** Werkzeugen kann insbesondere der Durchmesser eingestellt werden, damit man weniger unterschiedliche Werkzeuge an Lager halten muss.
12. Informationen über die Werkzeuge werden in mehreren Bereichen eines Betriebs benötigt. Es ist deshalb wichtig, dass die Daten **zentral und einheitlich** verwaltet werden.
13. Moderne CNCs verfügen über eine Software zur Werkzeugverwaltung in der Maschine incl. Ausgabe der Updates. Dazu gehören:
    - Verwaltung von Ersatz- oder Schwesterwerkzeugen im Magazin
    - Korrekturwertspeicher für Länge, Durchmesser, Verschleiß, Standzeit
    - Verwaltung von Werkzeug- und Platznummer im Magazin (VPC)
    - Übergröße und freizuhaltende Leerplätze rechts und links davon.

3 Elektronische Werkzeug-Identifikation

Voraussetzung für eine durchgängige, lückenlose Werkzeugdatenverwaltung ist ein geschlossener Datenkreislauf. Dazu werden alle Werkzeugdaten automatisch erfasst, fortlaufend aktualisiert, im Werkzeugrechner gespeichert und bei Bedarf an die CNC-Maschine übertragen. Hierzu werden heute vorzugsweise RFID-Systeme eingesetzt. Die Überwachung der Werkzeuge im Arbeitsraum der Maschine übernehmen spezielle Laser-Systeme.

3.1 Einführung

Eine wichtige Aufgabe der Werkzeugverwaltung ist es, nicht nur die Werkzeuge selbst zuverlässig zu identifizieren, sondern auch die zu jedem Werkzeug gehörenden Daten unverwechselbar verfügbar zu haben. Je nach Leistungsfähigkeit der CNC müssen beispielsweise folgende Werkzeug-Daten eingegeben werden:

- WZ-Typ
- WZ-Nummer
- Ersatz-WZ
- Magazinplatz
- Standard-/Serien-/Sonder-WZ
- Bohrkopf/Plandrehkopf
- WZ-Gewicht
- Max. Vorschub und Drehmoment
- Standzeit/Reststandzeit
- Vorwarngrenze bei Standz.-Ende
- WZ gebrochen/defekt
- Festplatz/variabler Platz
- WZ-Radius 1/2
- Schneidenradius
- Kollisionsradius 1/2
- WZ-Länge 1/2
- Kollisionslänge 1/2
- Spez. WZ-Code (kundenabh.)
- Verschleißkorrektur 1/2
- WZ gesperrt
- Fehler-Code (Ursache für WZ-Sperre)
- Maschinen-Zuordnung
- Letzter Einsatz in Maschine …

Die Wünsche nach weiteren Kennzeichnungsdaten können mit der Leistungsfähigkeit der CNCs noch zunehmen. Es lässt sich aber schon aus dieser Aufzählung erkennen, dass

- die Daten automatisch ein- und auslesbar sein müssen, da die manuelle Eingabe wegen des erforderlichen Zeitaufwandes und der Fehlermöglichkeiten unzumutbar ist,
- einfache, mechanische Werkzeug-Codierungen die Anforderungen nicht erfüllen (z. B. Codierringe),
- die Daten unverwechselbar und unverlierbar gespeichert sein müssen,
- Dateneingabe, -handhabung und -ausgabe an mehreren Stellen des Betriebes möglich sein muss,
- die Datenverwaltung nach der einmaligen Eingabe in der CNC erfolgen muss, um Zeit zu sparen,

- das Identifikationssystem für unterschiedliche Werkzeuge verwendbar sein muss.

Dafür bieten heute die **elektronisch arbeitenden Werkzeug-Identifikationssysteme** die besten Voraussetzungen. Deren wichtigste Komponente ist ein elektronischer Datenspeicher-Chip, der fest mit dem Werkzeug verbunden wird und mit einem speziellen „Lesekopf" gelesen werden kann *(Bild 3.1)*.



Bild 3.1: Zwei feststehende und ein drehendes Werkzeug mit integriertem Datenträger

3.2 Funktionsweise/Prinzip

Der Datenaustausch zwischen dem Datenträger-Chip und der Elektronik erfolgte bei den früheren Systemen über Kontakte. Kontaktverschleiß und Verschmutzung führten gelegentlich zu Lesefehlern. Heute stehen induktive, kontaktlos arbeitende Geräte zur Verfügung, die eine wesentlich höhere Lesesicherheit haben.

Es werden zwei unterschiedliche Prinzipien eingesetzt, und zwar

das Nur-Lese-System *(Bild 3.2)* und
das Schreib-Lese-System *(Bild 3.3)*.

Das **Nur-Lese-System** verwendet Datenträger mit einer vorgegebenen, achtstelligen Identnummer. Die Leseköpfe im Werkzeugraum, am Einstellgerät und an der Maschine arbeiten in Verbindung mit einem zentralen Werkzeug-Rechner, der alle Werkzeugdaten in einer Datenbank speichert und verwaltet. Der Codeträger liefert dem Werkzeugrechner nur die Identnummer und dieser ordnet die vorher eingegebenen, Werkzeug-bezogenen Daten den festen Identnummern zu. Alle Daten werden auf dem Bildschirm des Rechners in einer übersichtlichen Maske geordnet und angezeigt. Die CNC erhält die Daten automatisch, wenn die Identnummer beim Einbringen des Werkzeuges in das Werkzeug-Magazin durch den Lesekopf erkannt wird.

Das **Schreib-Lese-System** verwendet Datenträger mit höherer Speicherkapazität und kann bis zu 511 Byte Werkzeugdaten speichern. Diese Kapazität reicht aus, um die wichtigsten Daten wie Werkzeug-Nummer, -Typ, Länge, Durchmesser, Standzeit, Gewichtsklasse u. a. zu speichern. Diese Daten können jederzeit durch den Schreib-Lesekopf aktualisiert, geändert und gelesen werden. Anders dargestellt: Das Werkzeug trägt alle Daten ständig mit sich und benötigt deshalb beim Einbringen in eine CNC-Maschine keine Verbindung zum Werkzeug-Rechner. Verlässt ein Werkzeug die Maschine, werden die Daten auf dem Datenträger automatisch aktualisiert, wie z. B. Reststandzeit, Verschleißkorrektur u. a.

Ist die CNC an einen DNC-Rechner angeschlossen, dann können die Daten bei Bedarf auch über diese Verbindung an den Werkzeugrechner zwecks externer Verwaltung weitergegeben werden.

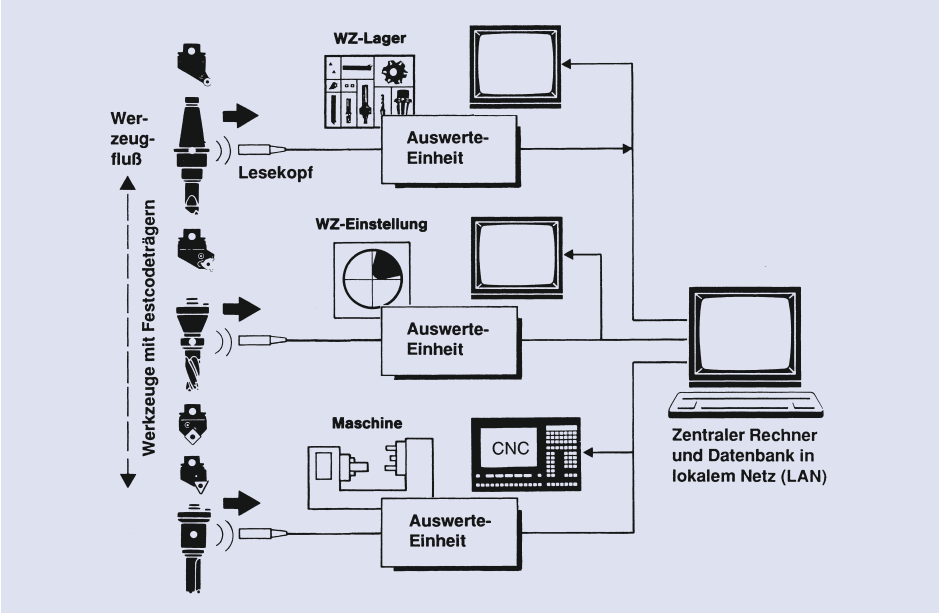


Bild 3.2: Beim Nur-Lese-System ist der Datenträger mit einer festen Nummer versehen, alle zugeordneten Daten jedes Werkzeuges sind im zentralen Rechner unter dieser Nummer gespeichert und werden dort abgerufen.

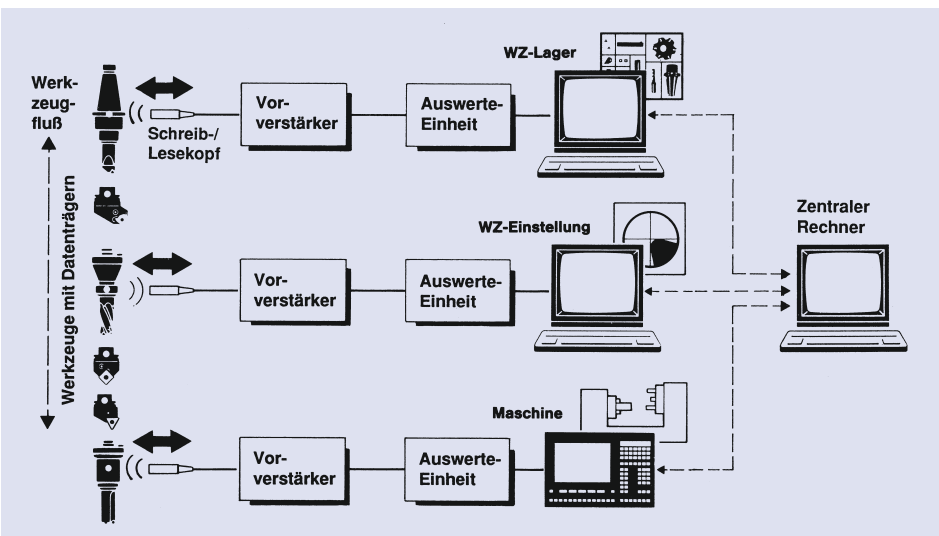


Bild 3.3: Beim Schreib-Lese-System sind in dem Datenträger die Werkzeugnummer und alle zugehörigen Werkzeugdaten programmiert und können direkt gelesen werden.

3.3 Komponenten eines WZ-Ident-Systems

Nach der bisherigen Darstellung besteht ein elektronisches Werkzeug-Identifikationssystem aus folgenden Komponenten:

- den **Codeträgern**, auch als „Chip“ bezeichnet, mit fester oder veränderbarer Codierung,
- den **Lese- bzw. Schreib-Lese-Köpfen** mit **Vorverstärkern**,
- der **Lesestation**, die mit den Leseköpfen zusammenarbeitet und die Ident-Nummer an einen Rechner oder eine CNC weitergibt, bzw.
- eine **Auswerteinheit** für Schreib-Lese-Systeme, deren Ausgänge (RS232, V24) zum Anschluss eines PCs oder einer CNC geeignet sind,
- einem **Werkzeug-Rechner** zur Speicherung und Verwaltung der Werkzeugdaten und
- einer entsprechenden **Software** für Datenspeicherung, Datenverwaltung, Datenaustausch und zur übersichtlichen Anzeige über spezielle Bildschirmmasken.

Die technischen Daten bezüglich Leseabstand, Lesezeit, Programmierzeit, Schreibzyklen, Stromversorgung u. a. sind bei den Herstellern zu erfragen.

3.4 Organisatorische Vorteile elektronischer Werkzeug-Ident-Systeme *(Bild 3.4)*

Im Hinblick auf die bei hoch automatisierten CNC-Maschinen benötigten Datenmengen, die für eine umfassende Werkzeugverwaltung erforderlich sind, bietet ein solches System gravierende Vorteile, wie z. B.:

- einen **automatischen Datenfluss** zwischen Einstellgerät, Werkzeug, Werkzeugrechner, CNC und Bediener,
- mehr **Sicherheit beim Datenaustausch** durch Vermeidung von Eingabefehlern

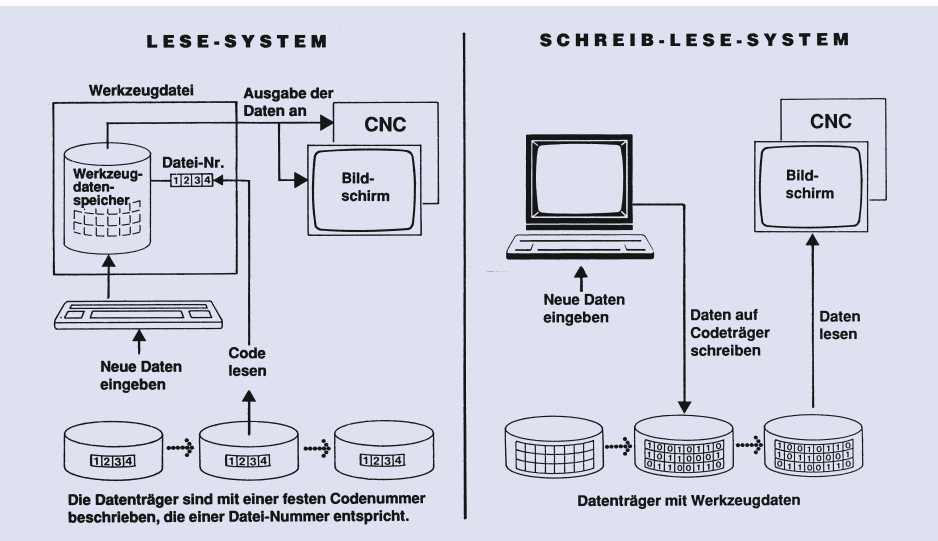


Bild 3.4: Funktionsprinzipien des Nur-Lese-Systems und des Schreib-Lese-Systems

und zusätzliche Überwachung gegen zufällige Schreib- und Lesefehler,
- **kürzere Rüstzeiten** an den Maschinen,
- bessere **Nutzung der Werkzeug-Standzeiten,**
- **Rationalisierung** des Werkzeug-Lagers und der Werkzeug-Einstellung,
- **Wegfall der Werkzeug-Datenblätter** in der Werkstatt,
- bessere, automatische **Werkzeug-Statistik,**
- **Unterstützung der Mitarbeiter** bei Zusammenbau, Vermessung und Kontrolle der Werkzeuge,
- Möglichkeit der **besseren Werkzeug-Verwaltung.**

3.5 Werkzeugerkennung und -datenverwaltung mit RFID

In der rechnergesteuerten Fertigung sind Material- und Informationsfluss untrennbar miteinander verbunden. Dies gilt für Paletten, Spannvorrichtungen und Werkstücke, insbesondere jedoch für die Werkzeuge, die häufig ihren Einsatzort wechseln und ihre Daten verändern. Mechanische Codierungen und Barcode-Etiketten haben sich deshalb für eine automatische Werkzeugdatenverwaltung als unbrauchbar erwiesen. Durchgesetzt haben sich die induktiv arbeitenden Systeme, bekannt unter der Kurzbezeichnung „RFID“. Dieses Prinzip und die Komponenten garantieren eine ausreichende Robustheit, Unempfindlichkeit gegenüber rauen Umgebungseinflüssen und eine zuverlässige Datensicherheit.

Durch Einsatz von RFID-Systemen ist die Standortbestimmung der Werkzeuge, die Vermeidung von Maschinenschäden durch falsche Werkzeugdaten, sowie die Verwendung ohne nochmaliges Vermessen während der Gesamt-Standzeit gewährleistet. Dies gilt sowohl für die Nutzung in der Maschine, als auch während des Transports und im Werkzeuglager (Geschlossener Kreislauf).

Beim Einsortieren in das Magazin werden die Werkzeugdaten automatisch gelesen, in den Speicher der CNC übertragen und während des Betriebes fortlaufend dem aktuellen Magazinplatz zugeordnet. Bei den folgenden automatischen Werkzeugwechseln vom Magazin in die Spindel und zurück sind keine weiteren Lesevorgänge erforderlich, was die Wechselzeiten verkürzt.

Was bedeutet „RFID“:

Das Kürzel „RFID“ steht für „Radio Frequency Identification Device“. Dies ist eine automatische, elektronische **Identifikationstechnik**, welche zur berührungslosen Identifikation von Gegenständen, Waren, Personen, Tieren, in der Prozesssteuerung, der Verfolgung von Waren oder Güterströmen, bei der Zutrittskontrolle, und vielen weiteren Aufgabengebieten zunehmend eingesetzt wird. Dafür stehen mehrere unterschiedliche Datenträger und Leseköpfe zur Verfügung.

Ein RFID-System umfasst folgende Komponenten:

- den **Transponder** (auch RFID-Etikett, -Chip, -Tag, -Label oder Funketikett genannt) als Datenträger,
- die **Sende-Empfangs-Einheit** (auch Reader oder Schreib-Lesekopf genannt) für die Korrespondenz mit dem Transponder,
- die **Auswerteinheit**, die den bidirektionalen Datentransfer zwischen Schreib-Lesekopf und dem Transponder steuert und Daten zwischenspeichert. Sie ist angeschlossen an
- ein **Rechnersystem** zur Bearbeitung und Verwaltung der Daten.

Je nach Einsatzgebiet werden spezielle Transponder eingesetzt, die je nach erforderlicher Reichweite im Hoch- oder Niedrig-Frequenzbereich beschreib- und lesbar sind. Der Datenaustausch erfolgt berührungslos mittels eines induktiv, d. h. elektromagnetisch arbeitenden Schreib-Lese-Systems. Je nach erforderlicher Reichweite arbeiten die Transponder entweder ohne eigene Energieversorgung (passive Transponder) oder mit eigener Energieversorgung durch Batterie oder Akku (aktive Transponder).

Transponder stehen in verschiedenen Ausführungen zur Verfügung, z. B. als Klebeetikette, Knopf, Chipkarte, Stift, Schraube oder als Plakette. Die Gehäuse sind hermetisch verschlossen, äußerst robust und widerstandsfähig gegen Schock, Vibration, Druck, Chemikalien und Temperatur. Zur Identifikation von Werkzeugen werden die Transponder in eine Bohrung im Werkzeughalter eingesetzt und verklebt. Abmessung und Position der Bohrung in den Aufnahmen sind genormt (ISO 14443, ISO 18000-4, ISO 10536, ISO 15693 u. a.) *(Bild 3.5)*.

Festprogrammierte Transponder (ROM) lassen sich nur einmal beschreiben. Die beschreibbaren EEPROM erlauben das Überschreiben der gespeicherten Informationen mehr als 1.000.000-mal. Dies ist mehr als ausreichend, da Werkzeuge in aller Regel relativ selten neu beschrieben werden. Die Lesezyklenzahl ist unbegrenzt.

Die Datenträger werden in jede Art von Werkzeughaltern eingesetzt. Selbst in den moderneren Haltern für Schrumpfwerkzeuge ist die Anwendung möglich.

Die im Bild dargestellten größeren Varianten wurden vor allem früher, noch vor der Norm, eingesetzt. Vor allem die Version mit Gewinde, hatte den Vorteil, dass man diesen Datenträger zerstörungsfrei austauschen konnte. In der heutigen Standardversion wird der Datenträger eingeklebt. Dadurch ist ein zerstörungsfreier Tausch nicht mehr möglich, aber eigentlich auch nicht nötig, da die Datenträger auf Lebenszeit mit dem Werkzeughalter verbunden bleiben.

Ein weiteres Einsatzgebiet dieser Datenträger ist die Montagetechnik. Immer wenn in einer vollautomatischen Montagelinie mehrere kleine Werkstückträger verwendet werden, sind diese Datenträger nötig.



Bild 3.5: Transponder, Datenträger für den industriellen Einsatz in Werkzeugen
Abmessungen: 10 × 4,5 mm, Schutzart IP 67
Kapazität: 511 Byte oder 2.047 Byte
Typ: EEPROM, read and write (Balluff)

Wichtig für viele Anwendungen in der Praxis ist, dass die Daten nicht mehr optisch erfasst werden müssen (Scanneranlagen, Handscanner etc.), sondern mittels Funkwellen an das Schreib-Lese-System übermittelt werden. Und dies in Bruchteilen einer Sekunde.

RFID-Funktionsprinzip

Die Datenübertragung zwischen Transponder und Lese-Empfangs-Einheit findet mittels elektromagnetischer Wellen statt. Bei niedrigen Frequenzen geschieht dies induktiv über ein Nahfeld, bei höheren Frequenzen über ein elektromagnetisches Fernfeld. Die Entfernung, über die ein RFID-Transponder ausgelesen werden kann, schwankt je nach Ausführung (passiv/aktiv), benutztem Frequenzband, Sendeleistung und Umwelteinflüssen zwischen wenigen Zentimetern und mehr als einem Kilometer.

Der **Reader** (= Leser) erzeugt ein elektromagnetisches Feld, welches die Antenne des RFID-Transponders empfängt. In der Antennenspule entsteht, sobald sie in die Nähe des elektromagnetischen Feldes kommt, Induktionsstrom. Dieser aktiviert den Mikrochip im RFID-Tag. Durch den induzierten Strom wird bei passiven Tags zudem ein Kondensator aufgeladen, welcher für eine kurzzeitige Stromversorgung des Chips sorgt. Dies übernimmt bei aktiven Tags die eingebaute Batterie.

Ist der Mikrochip einmal aktiviert, so empfängt er vom Lesegerät Befehle. Indem er eine Antwort in das vom Reader ausgesendete Feld moduliert, sendet er seine Seriennummer und andere vom Reader abgefragte Daten an die Auswerteinheit *(Bild 3.6)*.

Beispiel: Bei den von Fa. Balluff für die Werkzeugidentifikation hergestellten passiven Transpondern (Typ ‚BIS M') erfolgt die Abfrage im LF-Bereich zunächst mit 70 kHz zur Energieversorgung, die Datenübertragung mit 455 kHz. Beschreibbare Transponder verfügen über eine Speicherkapazität von 511 Byte oder (in seltenen Fällen) bis 2.047 Byte.

511 Byte sind nach vorliegenden Erfahrungswerten in 95 % der Anwendungen ausreichend, um alle Werkzeugdaten zu speichern.

Nach DIN 69873 sind die Abmessungen der Datenträger definiert: 10 mm Durchmesser und 4,5 mm Bauhöhe.



Bild 3.6: Auswerteinheit, Schnittstelle zur Maschinensteuerung
Interface: wahlweise seriell, parallel, Interbus, Profibus, DeviceNet

Speichereinteilung *(Tabelle 3.1)*

Bei der internen Speichereinteilung der Datenträger unterscheidet man zwischen den beiden Blockgrößen 32 Byte und 64 Byte (auch mit Größe einer Seite bezeichnet).

Speichergröße bis 1.023 Byte = 32 Byte je Block

Speichergröße ab 2.047 Byte = 64 Byte je Block

Tabelle 3.1: RFID, Lesezeiten im dynamischen Betrieb: Die angegebenen Zeiten gelten, nachdem der Datenträger erkannt wurde. Ist der Datenträger noch nicht erkannt, müssen für den Energieaufbau bis zum Erkennen des Datenträgers 30 ms hinzugerechnet werden.

Transponder	Lesezeit [ms]
Datenträger mit 32 Byte je Block	
von 0 bis 3	14
für jedes weitere Byte	3,5
von 0 bis 31	112
Datenträger mit 64 Byte je Block	
von 0 bis 3	14
für jedes weitere Byte	3,5
von 0 bis 64	224

Technische Vorteile der RFID

Die RFID-Vorteile im Vergleich zu Barcode-Systemen sind:

- Kontaktlose Identifikation (auch ohne Sichtkontakt) möglich
- Durchdringt verschiedene Materialien wie Karton, Holz, Öl etc.
- Beliebiges Lesen und Beschreiben des Speichers
- Identifizierung und Lesen in weniger als einer Sekunde
- Resistent gegen Umwelteinflüsse
- Form und Größe des Transponders sind beliebig anpassbar
- Transponder können komplett in das Produkt integriert werden
- Hohe Sicherheit durch Kopierschutz und Verschlüsselung
- Der RFID-Chip ist ein permanenter Datenspeicher, auf dem alle Produktdaten hinterlegt werden können. Es ist keine redundante Datenbank notwendig, um erste Informationen gewinnen zu können.
- Die Erfassung von RFID-bestückten Objekten ist gegenüber dem Barcode mehr als zwanzigmal schneller möglich.
- Das Auslesen eines RFID-Tags ist selbst bei größter Verschmutzung möglich
- Die Platzierung des zu erfassenden Objekts ist gegenüber dem Barcode weniger problematisch. Es genügt, wenn sich das Objekt innerhalb des Leseabstands der Erfassungseinheit befindet.

3.6 Werkzeugüberwachung

Ein Lasersystem zur Werkzeugüberwachung ist im Prinzip eine hochpräzise Lichtschranke, deren Ausgangssignale von jeder CNC oder SPS zur Messwerterfassung genutzt werden können. Mit Hilfe des sichtbaren Laserstrahles, der Verstellmechanik und der im Empfänger integrierten Einstellhilfe lässt sich das System schnell und ohne weitere Hilfsmittel in der Maschine ausrichten. Es muss auch für den rauen Einsatz in Bearbeitungszentren ausgelegt sein, deshalb wird die Optik von Sender und Empfänger durch einen pneumatisch betätigten Verschluss und Sperrluft vor Kühlmittel und Spänen geschützt.

Im Zusammenwirken mit der CNC muss das System in der Lage sein, Werkzeuge in der Maschine nach Länge und Durchmesser µm-genau zu messen, sowie kleinste Werkzeuge im gesamten Arbeitsbereich der Maschine auf Werkzeugbruch zu überwachen.

In der Grundausführung können Werkzeuge mit 1 mm Durchmesser im Abstand bis zu 20 m geprüft werden. Mit fokussierten Systemen können auch Werkzeuge mit Durchmessern kleiner als 0,05 mm überwacht oder in Länge, Durchmesser und Rundlauf gemessen werden. Durch die **Werkzeugmessung** im Arbeitsraum und unter Nenndrehzahl können auch Einspannfehler erkannt und somit die effektiven Längen und Radiuskorrekturwerte ermittelt werden *(Bild 3.7)*.

Bruchüberwachung

Eine klassische Methode der Bruchüberwachung ist die Kontrolle der Werkzeuggeometrie. Die seit längerem verfügbaren mechanischen Messtaster, oft als „Messdosen“ bezeichnet, haben einige Nachteile,

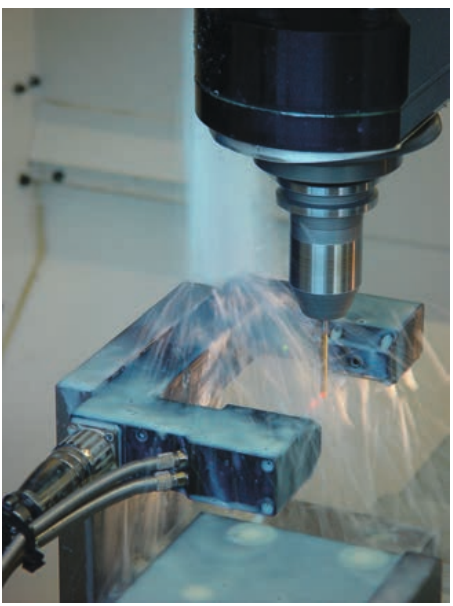


Bild 3.7: Messung eines Bohrers mit dem System „LaserControl“. Dank intelligenter Elektronik und Messsoftware sind Messungen heute auch problemlos im Kühlmittel möglich. (Blum)

welche ein universelles Lasersystem vermeiden muss, um seinen Anwendungsbereich deutlich zu erweitern.

Die Hauptanforderungen sind:

1. Überprüfung drehender Werkzeuge
2. Vermeidung mechanischer Berührung beim Messen
3. Messung auch kleinster Werkzeuge und
4. Reduzierung der Messzeit.

Als optimale Lösung ergab sich folglich eine Lichtschranke, die im Arbeitsraum der Maschine so zu installieren ist, dass sie in Reichweite aller CNC-Achsen liegt. Vorteilhaft ist hierbei wiederum ein Lasersystem, bei dem sichtbares Laserlicht verwendet wird.

Die **Werkzeugbruchüberwachung** von Bohrern, Senkern, Reibahlen, Gewindebohrern usw. stellt eine reine Längenkontrolle dar. Diese kann bei orientiertem oder drehendem Werkzeug erfolgen. Hierfür bietet das System folgende Möglichkeiten:

- Durchfahren des Laserstrahls quer zur Werkzeugachse; ein intaktes Werkzeug unterbricht den Strahl und löst ein Signal aus.
- Durchfahren des Laserstrahls in Werkzeuglängsrichtung. Bei dieser Methode ist es möglich, Werkzeuge auch unter extremen Umgebungsbedingungen zu überwachen, wie beispielsweise bei nachlaufendem Innenkühlmittel. Hierfür muss die genaue Lage des Laserstrahls bekannt sein.

Einzelschneidenkontrolle *(Bild 3.8)*

Außer zur relativ einfachen Längenüberwachung kann das Lasersystem dank seiner Präzision auch kleinste Schneidendefekte bis hin zur Verschleißdimension erkennen. Bei der Einzelschneidenkontrolle wird überprüft, ob sich jede einzelne Schneide innerhalb eines vorgegebenen Toleranz-



Bild 3.8: Kontrolle eines Fräsers mit dem System „LaserControl Mini“. Jede einzelne Schneide wird in kürzester Zeit auf Bruch oder Verschleiß kontrolliert.

wertes befindet. Bei einer hohen Abtastrate des Systems kann diese Kontrolle nahezu bei Nenndrehzahl ausgeführt werden. Mit dieser Methode lassen sich vier verschiedene Fehlersituationen erfassen:

- Schneidenbruch
- Werkzeugverschleiß
- Aufbauschneide und
- Einspannfehler.

Werkzeugmessung im Arbeitsraum

Mit einer hohen Schaltpunktwiederholgenauigkeit des Lasersystems kann beim Einsatz in modernen CNC-Werkzeugmaschinen eine Werkzeugeinstellgenauigkeit innerhalb weniger µm erreicht werden. Werkzeuge, deren Länge und Durchmesser unbekannt sind, können über einen Messzyklus bei Nenndrehzahl der Spindel hochgenau vermessen werden. Der gesuchte Messwert (Werkzeuglänge, Durchmesser) wird unter der aktuellen Werkzeugnummer im Werkzeugkorrekturspeicher abgelegt.

Temperaturkompensation

Um die Maßhaltigkeit der Werkstücke über einen längeren Zeitraum zu gewährleisten, kann auch die thermisch bedingte Längenänderung der CNC-Achsen sehr schnell ermittelt und kompensiert werden.

HSC-Bearbeitung

Die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung (High Speed Cutting = HSC) zeichnet sich neben anderen Faktoren hauptsächlich durch hohe Spindeldrehzahlen und hochdynamische Antriebe aus. Spindeldrehzahlen von bis zu 60.000 min^{-1} erfordern neben ausgewuchteten Werkzeughaltern perfekt in die Spindel eingewechselte Werkzeuge. Spannfehler bewirken exzentrisch rotierende Werkzeuge mit folgenden Konsequenzen:

1. Die von der längsten Schneide beschriebene Kreisbahn vergrößert ihren Radius und folglich auch den effektiven Durchmesser des Werkzeuges.
2. Die anderen Schneiden kommen aufgrund der geringen spezifischen Spandicke nicht oder nur teilweise zum Eingriff, wodurch sich der Werkzeugverschleiß drastisch erhöht.
3. Die durch ein exzentrisch rotierendes Werkzeug verursachten Querkräfte können das Werkzeug und die Spindellagerung zerstören.

Spezielle Messzyklen für schnelle Laser-Messsysteme ermöglichen die Erfassung der längsten Schneide bei Nenndrehzahl und somit die Ermittlung der effektiven Längen- und Radiuskorrektur. Außerdem kann die Exzentrizität auf Einhaltung eines

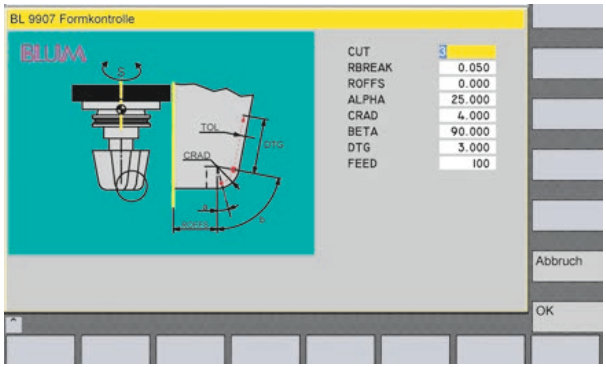


Bild 3.9: Eingabemenue zur Formkontrolle von Fräsern mit gerundeter Schneidkante am Beispiel einer Siemens 840D. (Bilder 5.1 – 5.3: Blum-Novotest) www.blum-novotest.com

programmierbaren Toleranzwertes überprüft werden.

Zusätzliche Möglichkeiten *(Bild 3.9)*

Das Laser-Messverfahren bietet darüber hinaus weitere Optionen, wie z. B. bei Kugelfräsern die Bestimmung von Radius und Mittelpunkt, oder bei Formfräsern eine Kontrolle der Radien und Schrägen. Alle Funktionen setzen voraus, dass die CNC mit der entsprechenden Software ausgerüstet ist.

3.7 Zusammenfassung

Werkzeuge für CNC-Maschinen sind in das System von Werkzeugmaschine, Werkstück und numerischer Steuerung eingebunden. Sie müssen so genau gefertigt sein, dass ihre Austauschbarkeit gewährleistet ist. Zum anderen müssen ihre optimalen Leistungsmerkmale, d. h. Schnittwerte und Standzeit, vorherbestimmbar sein. Schließlich muss der ablauf- und verschleißbedingte Werkzeugwechsel durch schnelle und präzise Handhabung durchführbar sein. Diese Merkmale eines guten CNC-Werkzeugsystems kommen aber nur zum Tragen, wenn die Werkzeugauswahl und -bereitstellung sorgfältig und systematisch erfolgen. Hierfür sind im Allgemeinen die Voreinstellung außerhalb der Maschine und die Katalogisierung der Werkzeuge Voraussetzung. Im Zweifelsfall und bei mangelnder Erfahrung sollte die Beratung durch einen namhaften Werkzeughersteller oder einen erfahrenen Anwender erfolgen.

Elektronische Werkzeug-Identifikation



Das sollte man sich merken:

1. Die früher verwendeten mechanischen **Codierringe** oder **Barcode**-Etiketten erfüllen nicht die Anforderungen der digitalen Fertigung.
2. Neue Werkzeuge werden als **Komponenten** mit den **Grunddaten** angeliefert (Geometrie, Schnittdaten, Standzeiten usw.) und diese per Katalog oder digital zur Verfügung gestellt.
3. Dann erfolgt der Zusammenbau zu **Komplett-Werkzeugen,** so wie sie an den verschiedenen CNC-Maschinen zum Einsatz kommen.
4. Bei dem Zusammenbau ergeben sich **neue Kenndaten,** die das Komplett-Werkzeug beschreiben.
5. Die Daten der Komplett-Werkzeuge werden im Werkzeugrechner gespeichert und können auf einen **Speicherchip** übertragen werden, der sich z. B. in der Werkzeugaufnahme befindet.
6. Dieser Speicherchip bildet zusammen mit den dazu passenden Lese-Einheiten das **RFID-System.**
7. Beim **Herausnehmen** eines Werkzeugs aus der CNC-Maschine werden die evtl. geänderten Korrekturwerte und die Reststandzeit automatisch auf den Datenchip übertragen und stehen aktualisiert für den nächsten Einsatz zur Verfügung.
8. Dieser **geschlossene Datenkreislauf** lässt sich auch mit einem „Nur-Lese-System“ erreichen, wobei der Datenchip nur die Werkzeugnummer enthält und die aktualisierten Werkzeugdaten per DNC auf den externen Werkzeugrechner übertragen werden.
9. Mit speziellen **Laser-Systemen** lassen sich Zustand, Länge und Durchmesser der Werkzeuge im Arbeitsraum der Maschine messen und überprüfen.
10. Die Werkzeugüberwachung in der Maschine ersetzt nicht die externe Messung bzw. Einstellung der Werkzeuge.

4 Prozessnahe Fertigungsmesstechnik

Dipl.-Ing. Alexander Blum, Dipl.-Ing. Jacek Kruszynski

Prozessnahe Messtechnik, Werkzeugmessungen und mechatronische Werkzeuge sind neue Verfahren zur „Präventiven Qualitätssicherung" während des Fertigungsprozesses.

4.1 Einführung

In modernen Fertigungsprozessen mit CNC-Maschinen sind Werkzeugmessungen und Werkzeugüberwachungen für die **präventive Qualitätssicherung** unverzichtbar. Die Werkzeugmessdaten oder die gemessenen Ergebnisse am Werkstück werden zur automatischen Berechnung von Kompensationswerten für die laufende Bearbeitung benutzt. Durch diese automatische Werkzeugkompensationen oder gegebenenfalls einen Werkzeugwechsel bleiben die Bearbeitungsergebnissen stabil.

Je nach Anforderung sind intelligente Messstrategien erforderlich, wobei auch neue **Werkzeugmesssysteme** zum Einsatz kommen können. Erfahrungsgemäß liefern Messungen am Werkstück die wichtigsten Daten für notwendige Korrekturen der laufenden Bearbeitungsprozesse. Generell bieten diese „Inprozess-", „Postprozess-" oder „Prozessnahe Messtechniken" unterschiedliche Möglichkeiten, um prozessrelevante Qualitätsdaten zu erfassen.

4.2 Parallele Messtechniken

Die „**Inprozess-Messtechnik**" arbeitet parallel zur Hauptzeit in der Maschine und erlaubt die kürzesten Reaktionszeiten. Sie ist jedoch prinzipbedingt wegen eingeschränkter Zugängigkeit und Störanfälligkeit stark begrenzt. Bekannte Varianten sind Leistungsüberwachungen in Spindelantrieben oder Durchmesserüberwachungen mit Messtastern. Ebenfalls hauptzeitparallel, allerdings außerhalb der Maschine, arbeitet die „**Postprozess-Messtechnik**". Sie kann mit verschiedensten Sensortechniken nahezu jede Messaufgabe lösen. Verkettung sowie Werkstück- und Messwerkzeughandhabung verursachen jedoch zusammen mit Umrüstaufwendungen entsprechende Kosten.

4.3 Prozessnahes Messen in Nebenzeiten

Bei der „**prozessnahen Messtechnik**" sind die Messsensoren in die Maschine integriert und übernehmen Aufgaben zur Werkzeug- und Werkstücküberwachung/-messung. Beispiele sind aus dem Magazin einwechselbare Werkstückmesstaster oder Bohrungsmessköpfe und im Arbeitsraum montierte Werkzeugmesssysteme. Bei der werkstückbezogenen „Prozessnahen Messtechnik" findet quasi Postprozessmessen innerhalb der Bearbeitungsmaschine statt. Weil während der Zeit des Messens ver-

schiedene Maschinenkomponenten wie Achsen und Spanneinrichtungen genutzt werden, verursacht sie zwar Nebenzeiten, spart dafür aber Investitionen für separate Anlagen. Ein wesentlicher Vorteil im Sinne höherer Genauigkeit ist allerdings, dass die Spannsituation aus dem Prozess unverändert erhalten bleibt. Außerdem wird die Zeitdifferenz zwischen Bearbeiten und Messen auf ein Minimum reduziert, d. h. Messungen erfolgen auch thermisch annähernd im Zustand der Bearbeitung. So entsteht durch prozessnahes Messen eine geschlossene Prozesskette in der Bearbeitungsmaschine, was bei hoher Flexibilität eine einfache und zeitnahe Korrektur der Prozessparameter erlaubt und damit den Prozess stabilisiert.

Findet die Fertigungsmesstechnik prozessnah innerhalb der Bearbeitungsmaschine statt, z. B. durch **Messtaster** in der Spindel, dann bleiben theoretisch potenzielle Unsicherheitsfaktoren bestehen, da die Achs-Messsysteme sowohl zur Bearbeitung, als auch für die Kontrollmessungen verwendet werden. Systembedingte Messfehler bleiben folglich unerkannt.

Um diese Fehlerquellen zu vermeiden, werden deshalb beispielsweise spezielle **Bohrungsmessköpfe** mit einem integrierten, separaten, also maschinenunabhängigen Messsystem eingesetzt. Diese bringen die erwünschte „Objektivität“ externer Postprozess-Messstationen in die Bearbeitungsmaschine, indem sie unabhängig vom Achsen-Messsystem der Maschine arbeiten.

4.4 Mit Bohrungsmessköpfen nah am Prozess *(Bild 4.1)*

Bohrungsmessköpfe, z. B. die kompakten BG40 von BLUM, befinden sich wie jedes andere Werkzeug im Werkzeugmagazin. Sie werden zum **maschinenunabhängigen Messen im Arbeitsbereich** in die Spindel eingewechselt. Die Messzeit von deutlich unter 0,5 Sekunden machen diese Messmittel jedem konventionellen Werkstückmesstaster überlegen. Ihre Funktionsweise basiert auf schwimmend gelagerten Messkontakten, durch deren Auslenkung eine Triebnadel einfedert und dabei eine Miniaturlichtschranke im inneren des Messkopfes mehr oder weniger stark schattiert und auf diese Weise als Messsystem funktioniert *(Bild 4.2)*.

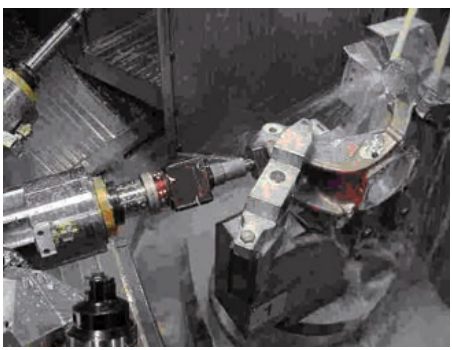


Bild 4.1: Bohrungsmesskopf BG 40 im Einsatz

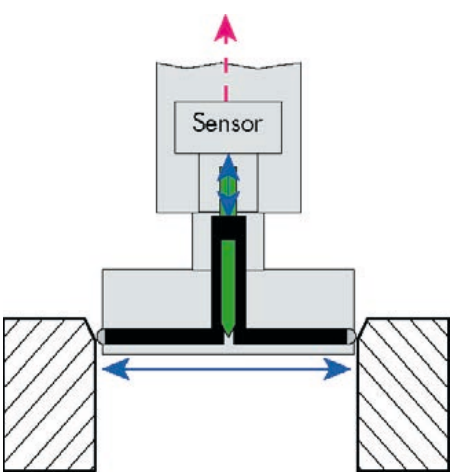


Bild 4.2: Messwerk mit schwimmenden Messkontakten

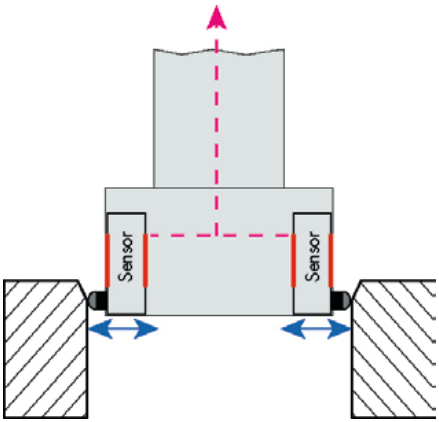


Bild 4.3: Messwerk mit Einzelmesselementen

Mit solchen Messwerken lassen sich Bohrungsdurchmesser lageunabhängig von der Spindelposition messen. Eine andere Gerätevariante (BG41-Serie) ist mit Einzelelementen ausgestattet und ermöglicht die Durchmesser-, Form- und Lagebestimmung *(Bild 4.3)*. Die durchmesserspezifischen Messköpfe garantieren eine Wiederholgenauigkeit von unter 1 µm bei einem Messbereich von bis zu 400 µm und einer Auflösung von 0,15 µm. Die Datenübertragung der maximal acht Messelemente pro Messkopf erfolgt mittels Infrarotlicht über einen Empfänger zu einem mit der Maschinensteuerung verbundenen, einfachen Interface. Zur Stromversorgung dient eine 9-V-Lithiumbatterie mit einer Kapazität für bis zu 150.000 Messungen.

4.5 Aktorische Werkzeugsysteme schließen den Regelkreis

Ergeben sich nach Verifikation des Bearbeitungsergebnisses durch Werkstückvermessung Maßabweichungen, können Werkzeugwechselprozeduren ausgelöst oder automatische Werkzeugkorrekturen durchgeführt werden. Hier schließen heute immer häufiger so genannte aktorische Werkzeugsysteme, wie das Kom-Tronic® Feinbohrsystem M042 (KOMET) oder das KomTronic® U-Achssystem den Regelkreis im Fertigungsprozess *(Bild 4.4)*.

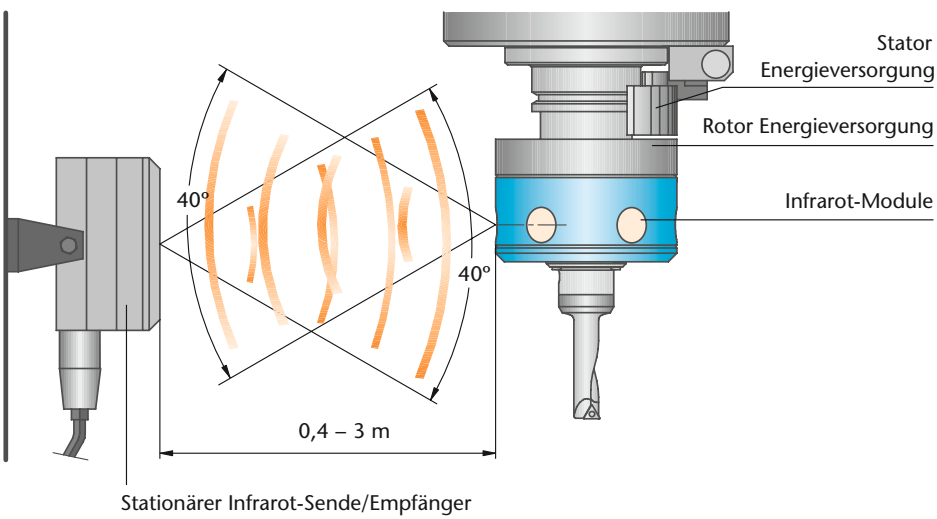


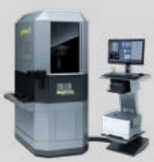
Bild 4.4: Prinzip aktorisches KomTronic® Feinbohrsystem M042



Give me Five!

Weltweit steht »Give me Five« als Zeichen für den Erfolg. Mit den fünf ZOLLER Vorteilen Qualität, Erfahrung, Präzision, Innovation und Ergonomie ist es auch ein perfektes Symbol für den weltweiten Erfolg mit ZOLLER beim Einstellen, Messen, Prüfen und Verwalten von Werkzeugen.

Alle ZOLLER Vorteile präsentieren sich in Perfektion in unseren Einstell- und Messgeräten und Softwarelösungen. Sprechen Sie uns an. Wir freuen uns auf Sie.


»genius«


»venturion«



ZOLLER TMS Tool Management Solutions

Neugierig?
Erfahren Sie mehr!
www.zoller.info

ZOLLER
Erfolg ist messbar®

HANSER





Alles, was der Konstrukteur benötigt!

- Enthält die gesamte Bandbreite zum Thema Konstruktion: Materialien, Maschinenelemente, das Entwickeln und Konstruieren sowie Verfahren und Methoden
- Lässt keine Fragen offen: Das Buch behandelt neben klassischen Themen auch top-aktuelle Aspekte wie etwa Modularisierung, Leichtbau, Umweltgerechtes Konstruieren und gewerblicher Rechtsschutz
- Konsequent praxisorientiert: Mit zahlreichen Beispielen, Hinweisen und Empfehlungen zur direkten Umsetzung in Ihren betrieblichen Alltag
- Optimale Visualisierung: Zahlreiche farbige Abbildungen, übersichtliche Tabellen, beispielhafte Konstruktionszeichnungen und anschauliche Fotos von Produktbeispielen
- Kompakte Aufbereitung des Fachwissens: Ideal auch als kompetentes Nachschlagewerk für einzelne Fragestellungen

Profitieren Sie von diesem einzigartigen Praktikerbuch!

Frank Rieg, Rolf Steinhilper
Handbuch Konstruktion
1.200 Seiten, vierfarbig. ISBN 978-3-446-43000-6 · € 249,-

4.6 Mechatronische Werkzeugsysteme *(Bilder 4.5 – 4.8)*

Mechatronische Werkzeugsysteme bieten die Möglichkeit der automatischen Schneideneinstellung. Die Schneidenaufnahmen sind sensorüberwacht und im Werkzeugkopf mit eigenem Antrieb ausgestattet. Schneidenverstellungen können statisch vor der Bearbeitung (M042) oder dynamisch während der Bearbeitung (U-Achs-Werkzeugsystem) erfolgen. Die Energie wird induktiv und somit berührungslos übertragen. Dabei wird die auf der Maschinenseite befindliche Statorspule über eine Leitung mit Energie versorgt. Gegenüberliegend am Werkzeugkopf befindet sich eine Rotorspule, die eine stabile Gleichspannung liefert. Die Versorgung mit Energie kann sowohl stehend als auch rotierend erfolgen. Gleiches gilt für die Datenübertragung, bei der Infrarotlicht höchste Übertragungsgeschwindigkeit- und -sicherheit garantiert. Als Pendant zu den am Umfang des Werkzeugkopfes angebrachten Sende- und Empfangsmodulen ist im Maschinenraum ein Infrarot-Sende-/Empfangsmodul montiert. Haupteinsatzgebiet der Feinverstellköpfe ist die Kompensation des Schneidenverschleißes. Eine erweiterte Form stellen die U-Achs-Werkzeugsysteme dar. Konzipiert zur Herstellung frei programmierbarer Geometrien erlauben sie sogar die Schneideneinstellung unmittelbar während der Bearbeitung.

4.7 Geschlossene Prozesskette *(Bild 4.9)*

Eine beispielhafte geschlossene Prozesskette unter Einsatz der vorgenannten Komponenten beginnt nach dem Schruppen mit dem Einsatz des aktorischen Werkzeugs. Nach dem Ausspindeln aller Bohrungen wird das Werkzeug gegen den Bohrungsmesskopf ausgetauscht.

Das Bohrungsmaß wird schnell und maschinenunabhängig an der zuletzt bearbeiteten Bohrung in der Bearbeitungsaufspannung überprüft.

Wird die Eingriffsgrenze (UCL oder LCL) dabei überschritten, wird beim nächsten Werkstück zusätzlich eine Verschleißkompensation berücksichtigt *(Bild 4.10)*.

Diese Kompensation ist nach den bekannten Regeln zu ermitteln, nämlich aus dem rollierenden Mittelwert mit Dämpfungsfaktor. Ist der aus Erfahrungswerten ermittelte Höchstwert der Verschleißkompensation erreicht, wird das Werkzeug getauscht.

Das wieder eingewechselte aktorische Werkzeug wird mit dem kompensierten Wert eingestellt. Etwaige Werkzeugwechselfehler können unter Einsatz eines Lasersystems zur Werkzeugmessung kompensiert werden.

Zeigt eine Messung Sprünge, die über der normalen Streuung liegen, ist es zweckmäßig, die Produktion zu unterbrechen und das Bedienpersonal zu alarmieren. Liegt nur ein einfacher Schneidenbruch vor, kann die Produktion mit einem neuen Werkzeug sofort wieder aufgenommen werden.

4.8 Ausblick

Ist eine Bearbeitungsmaschine mit einem Bohrungsmesskopf BG 41, mit mehreren Sensoren zur Erfassung von Zylindrizität und Rundheit einer Bohrung sowie einem KomTronic© U-Achssystem ausgestattet, lassen sich heute sogar Werkzeug-Abdrängungen schon während der Bearbeitung in geschlossener Prozesskette kompensieren.

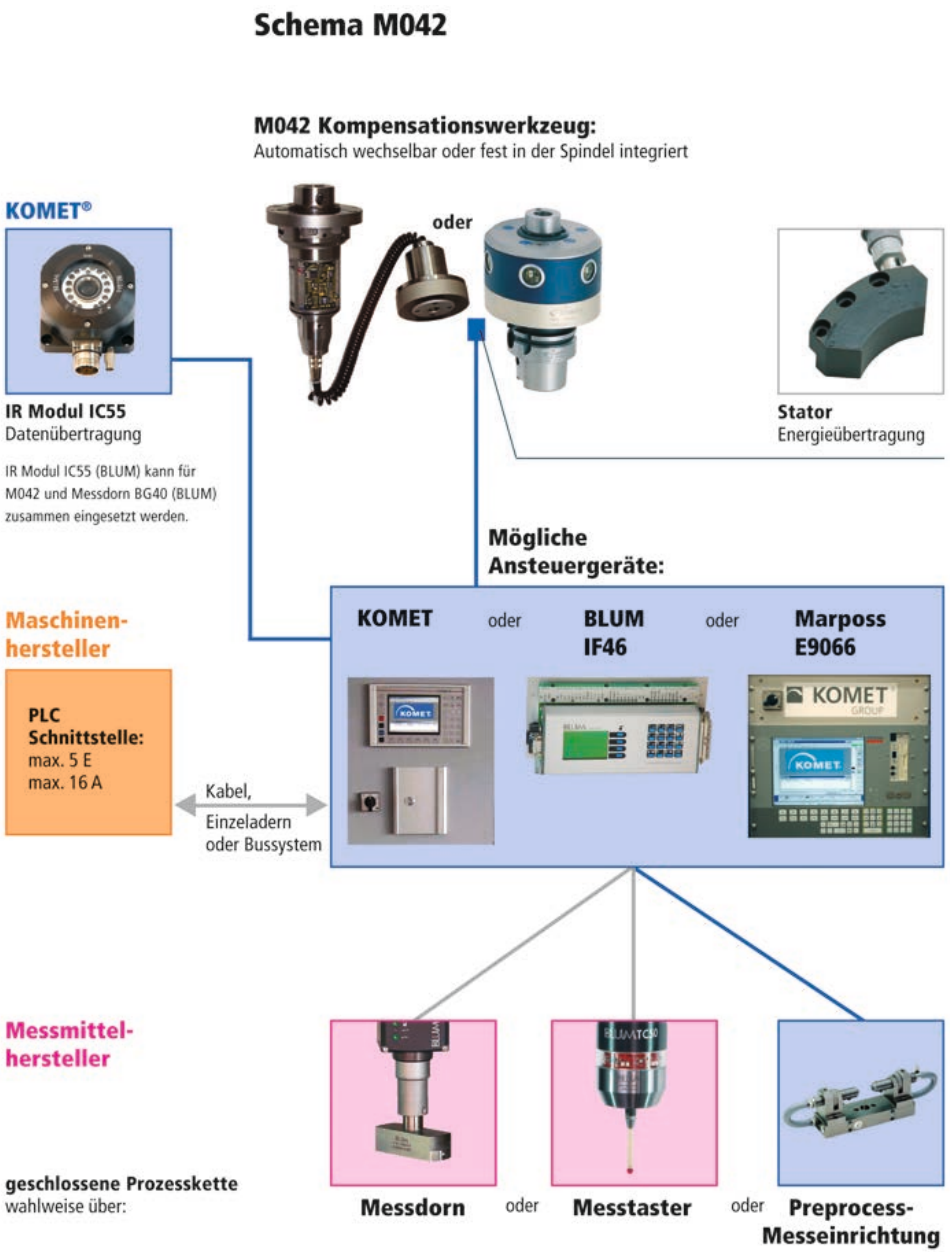


Bild 4.5: KomTronic® Feinbohrsystem M042 Anbindung an die Maschinensteuerung von Bearbeitungszentren

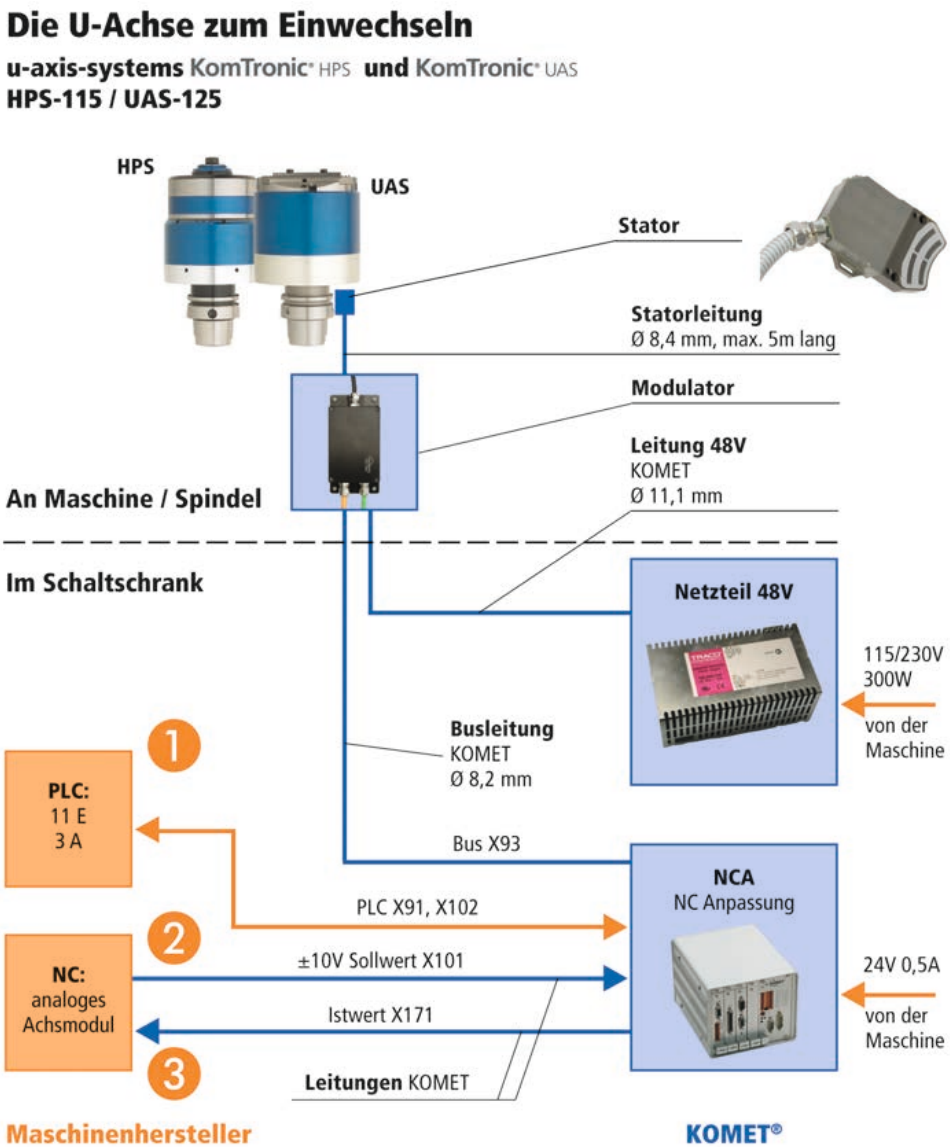


Bild 4.6: Komponenten eines KomTronic® U-Achssystems und Schnittstellen zur Maschinensteuerung

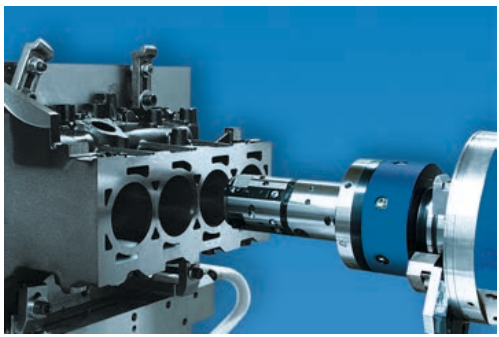


Bild 4.7: Zylinderkopfbearbeitung auf einem BAZ mit einem KomTronic® Feinbohrsystem M042

Energie- und Datenübertragung
im Arbeitsraum

Der Stator bedeckt ca. 90° des Spindelflansches. Die Anbringung des Statorelements ist anhand von Spindelzeichnungen zu klären.

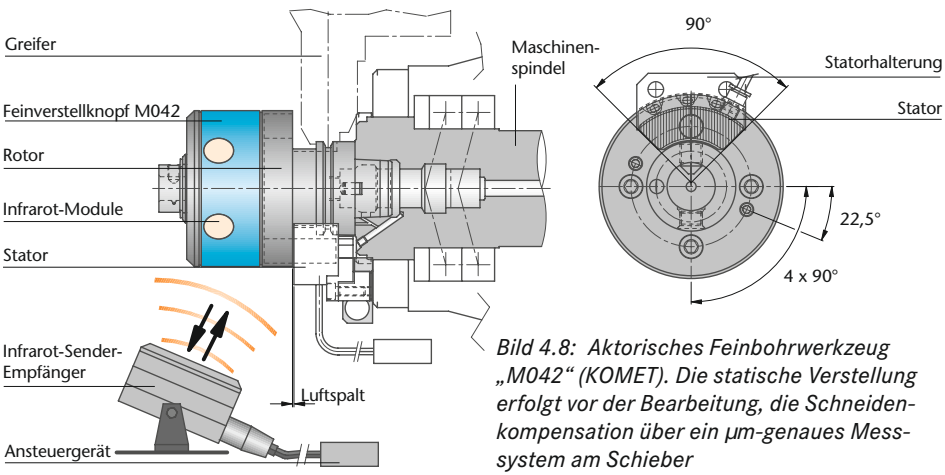


Bild 4.8: Aktorisches Feinbohrwerkzeug „M042“ (KOMET). Die statische Verstellung erfolgt vor der Bearbeitung, die Schneidenkompensation über ein µm-genaues Messsystem am Schieber

4.9 Zusammenfassung

Aufgrund von Kostendruck und der Forderung nach kürzeren Stückzeiten zeichnet sich in heutigen Fertigungsprozessen ein deutlicher Trend zum prozessnahen Messen in der Bearbeitungsaufspannung ab. In Bearbeitungszentren erfolgt dies werkstattorientiert durch Einsatz von Messtaster und entsprechender Mess-Software. Dazu werden vorbereitete und in der CNC abgespeicherte Messzyklen aufgerufen, mit denen ein Soll-Istwert-Vergleich stattfindet. Aufgrund der Ergebnisse wird automatisch geprüft, ob die Toleranzgrenzen eingehalten sind und weiterbearbeitet werden kann, ob Werkzeugkorrekturen nachjustiert werden müssen, oder ob eine Fehlermeldung erfolgt.

Vorreiter beim Einsatz prozessnaher Fertigungsmesstechnik ist insbesondere der hochproduktive Bereich, z. B. bei Einsatz von verketteten Produktionslinien. Hier würden sich Unterbrechungen des Fertigungsvorganges wegen externer Messvor-

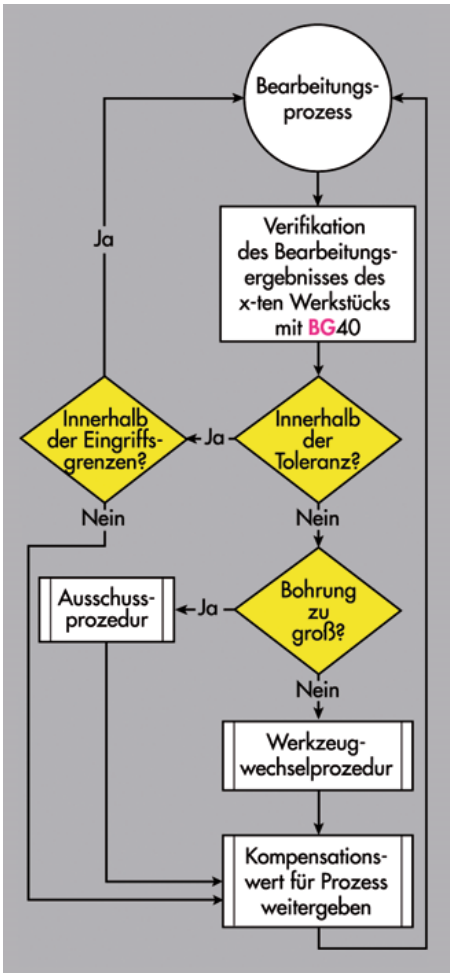


Bild 4.9: Geschlossene Prozesskette

gänge auf alle vor- und nachgelagerten Bearbeitungen zeitverzögernd auswirken. Aber auch in Fertigungssituationen, bei denen eine Post-Prozess-Messung mit anschließender Fertigbearbeitung aufgrund von Genauigkeits- und Wirtschaftlichkeitsgründen nicht lohnend erscheint, wird die prozessintegrierte Messtechnik zunehmend für Kontrollmessungen eingesetzt. Hierbei bevorzugt die Industrie entweder die Fertigungsmesstechnik durch Einsatz von Bohrungsmessköpfen im Verbund mit justierbaren, aktorischen Werkzeugsystemen oder anderen, automatisch nachstellbaren Werkzeugkorrekturen in der CNC.

Mit beiden Techniken lassen sich über einen Algorithmus systematische Störeinflüsse prozessnah eliminieren, ohne zusätzlichen zeitlichen Aufwand für innerbetrieblichen Transport zum Messen und erneute Aufspann- und Ausrichtvorgänge. Der Anwender muss, je nach Fertigungssituation, Werkstück und wirtschaftlichen Voraussetzungen entscheiden, welche der aufgezeigten Methoden zum Einsatz kommen soll.

Das Messen in der Maschine ist jedoch kein Ersatz für hochpräzise Messmaschinen im Messraum, wenn aufgrund von Genauigkeitsforderungen oder späteren Qualitätsnachweisen die Fertigungsdaten pro Werkstück oder pro Fertigungslos (z. B. bei Mehrfachspannungen) verlangt werden.

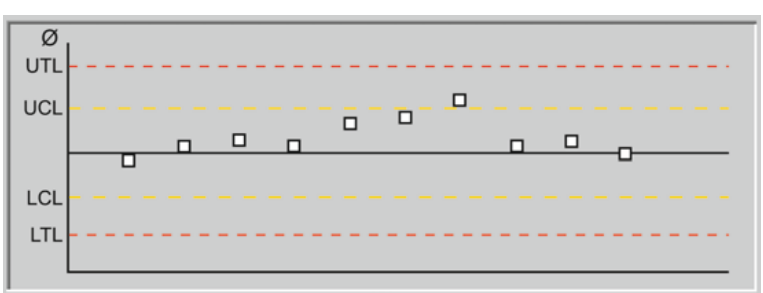


Bild 4.10: Verschleißkompensation nach Übersteigen der oberen Eingriffsgrenze

Prozessnahe Fertigungsmesstechnik



Das sollte man sich merken:

1. Die Erfassung prozessrelevanter Qualitätsdaten kann durch **Inprozess-, Postprozess- oder prozessnahe Messtechniken** erfolgen.
   - „Inprozess-Messtechnik“ und „Postprozess-Messtechnik“ arbeiten hauptzeitparallel, „Prozessnahes Messen“ erfolgt in Nebenzeiten.
2. Innerhalb der „Prozessnahen Fertigungsmesstechnik“ unterscheidet man nach **„werkstückbezogener“** und **„werkzeugbezogener“** Messtechnik. Die Messung und Überwachung erfolgt innerhalb des Bearbeitungsraumes.
   - Bei der **werkzeugbezogenen** Messtechnik werden die zerspanenden **Werkzeuge** vor und/oder nach dem Bearbeitungsprozess durch berührungslose Laser-Systeme oder taktile Mess-Systeme überwacht.
   - Bei der **werkstückbezogenen** Messtechnik wird das **Werkstück** in der Originalaufspannung innerhalb der Bearbeitungsmaschine vermessen.
   - Ist-Werte und Soll-Werte werden verglichen. Bei Abweichungen, die außerhalb der Toleranzgrenzen liegen, erfolgt eine automatische Korrektur der gespeicherten Werkzeugparameter (Werkzeugversatz in X-, Y- oder Z-Achse, Werkzeuglänge).
3. Bei der **werkstückbezogenen, prozessnahen Messtechnik** dominieren zwei Arten von Mess-Systemen:
   - **Werkzeug-Messtaster** in Verbindung mit entsprechender Mess-Software
   - **Bohrungsmessköpfe** zum maschinenunabhängigen Messen im Arbeitsbereich
4. Mit **Bohrungsmessköpfen** können folgende Werte maschinenunabhängig überprüft werden:
   - **Bohrungsdurchmesser**, lageunabhängig von der Spindelposition
   - **Form und Position** von Bohrungen (z. B. Rundheit, Zylindrizität)
5. Ergeben sich nach der Überprüfung der Messmerkmale mit Hilfe des Bohrungsmesskopfes Maßabweichungen, können bei Einsatz von **aktorischen Werkzeugsystemen automatische Werkzeugkorrekturen** durchgeführt werden.
6. **Bohrungsmessköpfe in Kombination mit aktorischen Werkzeugsystemen** ermöglichen folglich die Fertigung in einer regelbaren, geschlossenen Prozesskette.
7. Das **Messen in der Maschine** erfordert auch entsprechende Software in der CNC, und zwar
   - zur Ausführung der unterschiedlichen Messzyklen und
   - zur Auswertung, Anzeige, Speicherung und Ausgabe der Messdaten.
8. Das Messen in der Maschine ist **kein Ersatz für die Postprozess-Messung** auf hochpräzisen Messmaschinen im Messraum, wenn dies aufgrund der Genauigkeitsanforderungen oder für Qualitätsnachweise notwendig ist.

TEIL 5

NC-Programm und Programmierung

1 NC-Programm

Kenntnisse über den Aufbau und die Struktur von NC-Programmen sind zum besseren Verständnis der numerischen Steuerung vorteilhaft. Für manuelle Programm-Korrekturen an der CNC-Maschine sind sie unerlässlich.

Vor einer intensiven Einarbeitung in die abstrakte manuelle NC-Programmierung soll auf den heutigen Stand der Technik hingewiesen werden:

1. Kein Anwender von NC-Maschinen programmiert heute noch manuell im Maschinen-/Steuerungscode. Dafür stehen sehr intelligente und einfach zu bedienende NC-Programmiersysteme zur Auswahl. Diese sind entweder in die CNC integriert und damit maschinenspezifisch ausgelegt (WOP), oder auf einem externen PC lauffähig und universell für mehrere Maschinen- und Steuerungsfabrikate verwendbar. Selbst geometrische und technologische Änderungen an fertigen Programmen lassen sich damit auch nachträglich noch viel schneller einfügen als im DIN-Code. Dieser ist noch immer das genormte Daten-Eingabeformat und wird von fast allen CNC-Fabrikaten benutzt. Deshalb kann es vorteilhaft sein, über den Aufbau und die einzelnen Befehle Bescheid zu wissen.

2. Ausgelöst durch High-Speed-Cutting-Maschinen bzw. deren enorm hohen und schnellen Datenbedarf, sowie dem verstärkten Einsatz von CAD-Systemen zeichnet sich ein neuer Trend ab: Die direkte Verwendung der vom CAD-System erzeugten Datenformate. Dabei handelt es sich entweder um NURBS- oder BEZIER-Formeln. Damit lassen sich mehrere Vorteile erreichen:

- wesentliche Reduzierung der Datenmenge,
- besseres, ruhigeres Maschinenverhalten,
- höhere Geschwindigkeiten,
- höhere Genauigkeiten,
- keine Umsetzung der Geometriedaten durch Postprozessoren
- u. a. mehr.

Aber in diese Geometrie-Formate können nachträglich **keine manuellen Änderungen** oder Ergänzungen eingefügt werden.

Nähere Erläuterungen siehe Kapitel CNC unter „Spline-Interpolation – NURBS“.

1.1 Definition

Ein **Programm** besteht aus einer Folge von Anweisungen, die einen Rechner oder eine NC-Maschine veranlassen, eine bestimmte Bearbeitungsaufgabe durchzuführen. Bei der NC-Maschine versteht man darunter die Herstellung eines bestimmten Werkstückes durch Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück, wobei die Maßeingaben direkt in mm- bzw. inch-Werten erfolgen. Ein solches **NC-Teileprogramm**

enthält neben den für die Bearbeitung erforderlichen Weginformationen auch alle zusätzlichen Schaltinformationen und Hilfsbefehle, sodass nacheinander alle Daten zur vollautomatischen Herstellung des Werkstückes zur Verfügung stehen.

1.2 Struktur der NC-Programme

Den prinzipiellen Aufbau eines NC-Programmes zeigt *Bild 1.1*. Der Programminhalt besteht aus einer beliebigen Anzahl von **Sätzen,** die den gesamten Arbeitsablauf der Maschine schrittweise beschreiben. Jeder Satz entspricht einer Zeile in dem NC-Programm. Die einzelnen Sätze können nummeriert werden. Das erleichtert die Suche (bspw. bei Fehlermeldungen) und kann als Sprungmarke dienen. Jeder Satz besteht wiederum aus einzelnen Wörtern, die sich bei der heute üblichen Adress-Schreibweise aus Adressbuchstaben und den Zahlenwerten zusammensetzen. Die **Adresse** *(Tabelle 1.1)* legt fest, für welchen Speicher der nachfolgende Zahlenwert bestimmt ist, d. h. welche Funktionsgruppe angesprochen werden soll. Grundsätzlich darf in einem Satz jede Adresse nur einmal erscheinen, die meisten Steuerungen lassen jedoch mehrere G- oder

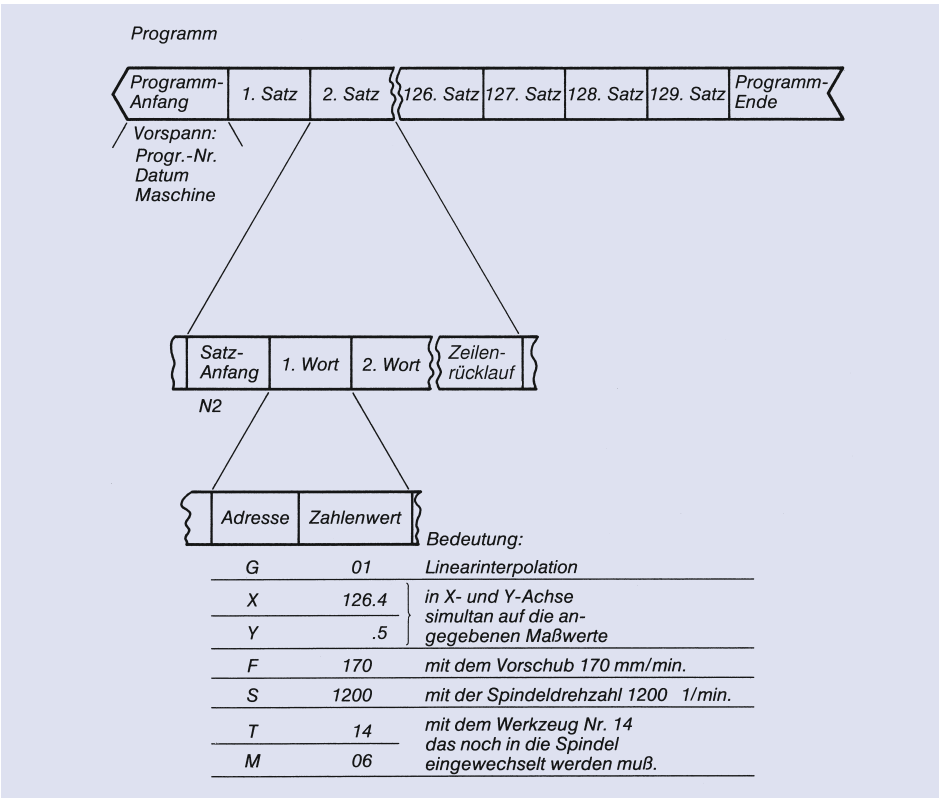


Bild 1.1: Prinzipieller Aufbau eines NC-Programmes in Adressen-Schreibweise

Tabelle 1.1: Adressen-Zuordnung nach DIN 66025

Buchstabe	engl. Bezeichnung	Adresse für
A		Winkelmaß um X-Achse
B		Winkelmaß um Y-Achse
C		Winkelmaß um Z-Achse
D		Winkelmaß um Zusatzachse oder frei verfügbar
E		Winkelmaß um Zusatzachse oder frei verfügbar (Error-Code o. Ä.)
F	Feedrate	Vorschubgeschwindigkeit
G	Go	Vorbereitende Wegbedingung
H	High	Werkzeuglängenkorrektur
I		Hilfsparameter für Kreisinterpolation oder Gewindesteigung parallel zur X-Achse
J		Hilfsparameter für Kreisinterpolation oder Gewindesteigung parallel zur Y-Achse
K		Hilfsparameter für Kreisinterpolation oder Gewindesteigung parallel zur Z-Achse
L		frei verfügbar
M	Miscellaneous	Maschinenbefehle, Schaltfunktionen
N	Number	Satznummer
O	Offset	Achsparalleler Werkzeugversatz möglichst nicht verwenden
P		Dritte Eilgangbegrenzung
Q		Zweite Eilgangbegrenzung
R	Reference	Erste Eilgangbegrenzung oder Referenzebene
S	Spindle Rev.	Hauptspindeldrehzahl
T	Tool Number	Werkzeugnummer, evtl. mit Korrekturwert
U		Zweite Achse parallel zur X-Achse
V		Zweite Achse parallel zur Y-Achse
W		Zweite Achse parallel zur Z-Achse
X		Erste Hauptachse
Y		Zweite Hauptachse
Z		Dritte Hauptachse

M-Befehle pro Satz zu, sofern sie sich nicht widersprechen oder gegenseitig aufheben.

Ein Satz kann unterschiedliche **Anweisungen** enthalten. Man unterscheidet dabei

- **geometrische Anweisungen,** mit denen die Relativbewegungen zwischen Werkzeug und Werkstück gesteuert werden (Adressen X, Y, Z, A, B, C, W …),
- **technologische Anweisungen,** mit denen Vorschubgeschwindigkeit (F), Spindeldrehzahl (S) und Werkzeuge (T) festgelegt werden,
- **Fahranweisungen,** die die Art der Bewegung bestimmen (G), wie z. B. Eilgang, Lineainterpolation, Zirkularinterpolation, Ebenenauswahl,
- **Schaltbefehlen** zur Auswahl der Werkzeuge (T), Schalttischstellungen (M), Kühlmittelzufuhr Ein/Aus (M),
- **Korrekturaufrufe** (H), z. B. für Werkzeuglängenkorrektur, Fräserdurchmesserkorrektur, Schneidenradiuskorrektur, Nullpunktverschiebungen (G),
- **Zyklen- oder Unterprogrammaufrufe** für häufig wiederkehrende Programmabschnitte (P, Q).

Die **Zahlenwerte** der Weginformationen definieren die anzufahrende Position und sollten in der **Dezimalpunkt-Schreibweise** eingegeben werden können, d. h. alle führenden oder nachfolgenden Nullen werden nicht geschrieben. Dies verkürzt die Programmlänge erheblich und vermeidet Fehler. Alle Zahlenwerte ohne Punkt stehen vor dem Dezimalpunkt, nach dem Punkt folgen Dezimalbruch-Werte.

Beispiel:	X400	=	X 400,00 mm
	X.23	=	X 0,230 mm
	Z14.165	=	Z 14,165 mm

Schließlich unterscheidet man noch zwischen Haupt- und Nebensätzen:

- **Hauptsätze** sind dadurch gekennzeichnet, dass alle Adressen mit den aktuellen Zahlenwerten vorhanden sind, was bei langen Programmen den Wiedereintritt in den unterbrochenen Programmablauf vereinfacht. Zur Kennzeichnung von Hauptsätzen wird vor die N-Adresse ein Doppelpunkt geschrieben oder es werden grundsätzlich alle Sätze mit geraden 100er oder 1.000er Nummern zu Hauptsätzen gemacht.
- **Nebensätze** enthalten nur solche Worte, deren Werte sich gegenüber dem bisherigen Stand ändern.

Bedeutung der Befehle

Die Bedeutung der Basisbefehle, ihre Syntax sowie der Programmaufbau sind durch die DIN 66025 festgelegt. Darüber hinaus bieten nahezu alle Steuerungshersteller nicht genormte, spezifische Befehle in einer eigenen Syntax an. Das Spektrum dieser Zusatzfunktionen reicht von Funktionen für den Programmablauf (Berechnungen, Schleifen, Verzweigungen) bis Sonderfunktionen (Arbeitsfeldbegrenzung, Hinweisprogrammierung, Konfigurationsbefehle) *(Tabelle 1.3)*. Im Allgemeinen sind der Umfang sowie die Möglichkeiten dieser spezifischen Befehle deutlich größer als bei den Befehlen der DIN-Norm. Die Programmieranleitungen der CNC-Hersteller geben darüber Auskunft.

1.3 Programmaufbau, Syntax und Semantik

Unter **Syntax** versteht man formelle Regeln, die den Aufbau von Anweisungen in einer Programmiersprache bestimmen, ohne auf die Bedeutung der Wörter Bezug zu nehmen. Die Bedeutung der Wörter ist in der **Semantik** festgelegt.

Beide zusammen bestimmen den **Pro-**

grammaufbau, bestehend aus Zeichen, Wörtern und Sätzen, sowie die Anordnung dieser Informationen auf dem Datenträger.

Eine typische NC-Programmstruktur für eine 3-Achsen Bahnsteuerung lautet nach EIA RS 274 B:

N4, G2, X±4.3, Y±4.3, Z±4.3, I4.3, J4.3, K4.3, F7, S4, T8, M2, $.

Hierin bedeutet:

N4
die vierstellige Satznummer. Jedes Programm kann in max. 9.999 Sätze unterteilt werden.

G2
die zweistelligen vorbereitenden Wegbedingungen, die z. B. die Interpolationsart, den Zyklus, die Richtung der Werkzeugradiuskorrektur oder die Wegmaßeingabe festlegen.

X±4.3, Y±4.3 und Z±4.3
sind die Weginformationen mit 4 Stellen vor und 3 Stellen nach dem Komma, d. h. die max. programmierbare Länge ist 9999,999 mm. Das Komma wird nicht oder als Punkt geschrieben (Dezimalpunkt-Programmierung).

I4.3, J4.3 und K4.3
sind die Hilfsparameter des Kreismittelpunktes bei Kreisinterpolation, wobei in einem Satz nur IJ oder JK oder IK entsprechend der Interpolationsebene XY, YZ oder XZ auftreten dürfen.

F7
F6.1 G94 = Vorschub in mm/min
F4.3 G95 = Vorschub in mm/U
F5.2 G04 = Verweilzeit in s
F7 G104 = Verweilzeit in U

S4
die vierstellige Spindeldrehzahl direkt in Umdrehungen pro Minute.

T8
die 8-stellige Werkzeugnummer, mit oder ohne die zu diesem Werkzeug aufgerufene Korrekturnummer. Es können auch 5- oder 6-stellige Werkzeugnummern programmiert werden.

M2
die zweistelligen (max. 99) Hilfsfunktionen für Schaltbefehle, wie z. B. Kühlmittel Ein/Aus, Werkzeugwechsel oder Spindeldrehrichtung.

$
das Satzendezeichen.

1.4 Schaltbefehle (M-Funktionen) *(Tabelle 1.2)*

Zum Ein- und Ausschalten der Maschinenfunktionen gibt es keine Schalter an der Maschine. Man muss alles programmieren. Dazu dienen die Schaltbefehle mit den Adressen:

- **S** für die Spindeldrehzahl (Spindle Speed)
- **T** für die Werkzeugauswahl (Tool-No)
- **M** für alle Hilfsfunktionen (Miscellaneous Functions)
- **F** für die Vorschubgeschwindigkeit (Feedrate)

Sätze mit solchen Schaltbefehlen lauten z. B.:

N 10 S 1460 M 13 $
Schritt 10: Spindeldrehzahl 1.460 Umdrehungen pro Minute, Rechtslauf der Spindel und Kühlmittel EIN.
N 60 G 95 F 0.15 $
Schritt 60: Vorschub 0,15 mm pro Umdrehung
N 140 T 17 M 06 $
Schritt 140: Werkzeugnummer 17 in die Spindel wechseln

Tabelle 1.2: Schaltfunktionen nach DIN 66025, Bl. 2

Code	Funktion
M00	Programm Halt. Spindel, Kühlmittel und Vorschub aus. Erneuter Start über Taste „START“
M01	Wahlweiser Halt. Wirkt wie M00, wenn Schalter „WAHLWEISER HALT“ auf EIN steht.
M02	Programm ENDE.
M03	Spindel EIN, Rechtslauf.
M04	Spindel EIN, Linkslauf.
M05	Spindel STOP.
M06	Werkzeugwechsel ausführen.
M07	Kühlmittel 2 EIN.
M08	Kühlmittel 1 EIN.
M09	Kühlmittel AUS.
M10	Klemmung EIN.
M11	Klemmung AUS.
M13	Spindel EIN, Rechtslauf und Kühlmittel EIN.
M14	Spindel EIN, Linkslauf und Kühlmittel EIN.
M19	Spindel STOP in bestimmter Winkellage.
M30	Programm-Ende und Zurücksetzen auf Programm-Anfang
M31	Verriegelung aufheben
M40 – M45	Getriebestufen-Umschaltung.
M50	Kühlmittel 3 EIN.
M51	Kühlmittel 4 EIN.
M60	Werkstückwechsel.
M68	Werkstück spannen.
M69	Werkstück entspannen.
Alle nicht genannten M-Funktionen sind nicht belegt oder frei verfügbar.	

N 320 M 00 $
Schritt 320: Programmunterbrechung bis zu einem erneuten START-Signal
N 410 M 30 $
Schritt 410: Programmende, Spindel STOP, Kühlmittel AUS, Lochstreifen zum Programmanfang zurückspulen.

Schaltbefehle bleiben so gespeichert, als hätten wir sie mit einem Schalter eingeschaltet. Man kann sie durch das sogenannte **Überschreiben** per Programm ändern oder ausschalten. Sofern sinnvoll, kann man auch mehrere Schaltbefehle in einem Satz kombinieren.

Bei den M-Befehlen ist zu beachten, dass einige M-Befehle sofort, d. h. am Anfang eines Satzes wirksam werden, andere erst

später, d. h. am Ende eines ausgeführten Satzes. Die Festlegung geht aus der Programmieranleitung jeder Maschine hervor.

Nun sehen Sie sich bitte die Tabelle der M-Funktionen genauer an und üben Sie das Programmieren einiger Befehle.

1.5 Weginformationen

Die **Weginformationen** haben für die Maschine 3 Bedeutungen:

1. Ihr **Wert** bestimmt die anzufahrende Zielposition,
2. ihr **Vorzeichen** gibt die Fahrrichtung an oder definiert den Quadranten,
3. ihre **Reihenfolge** bestimmt den Programmablauf, d. h. die Bewegungsfolge.

Zu den Weginformationen zählen die Achsadressen X, Y, Z, A, B, C, U, V, W, I, J, K, R.

In neueren CNCs können auch Achsadressen mit mehreren Zeichen vergeben werden. In diesem Fall werden dann die Weginformationen nach einem = programmiert. Das bietet den Vorteil, dass Programme an Maschinen mit vielen Achsen

Tabelle 1.3: Beispiel für Achsadressen mit mehreren Zeichen und zusätzlichen Erläuterungen, die z. T. auch auf dem Bildschirm der CNC erscheinen.

```
N1000 ZOTSEL (GT300-NPV.zot) ;Anwahl und Pfad zur NPV-Tabelle
;---------------------- Bearbeitung mit rechter Spindel ----------------------
N1010 MainSp(S2)             ;Vorschub soll auf Spindel 2 wirken
N1020 SMX(S2=3000)           ;Maximale Drehzahl bei G96 2. Spindel
N1030 G8(SHAPE80)
;------------------ Futter in Ausgangsposition bringen (Notwendig für SPS)
N1040 S2CLOSE=66             ;Futter S2 schließen, 66 == Innen-Außen-Spannung
;-------------------------------------------------------------------------------
; Nullpunkt G59 1mm rechts der linken Stirnfläche
N1060 G0 G90 DIA G18(X,,Z) G53 G48 G90 X=260 Z=300 Z2=1 M205
1070  IF TARTTYPE$ = "GUSSTEIL" THEN
N1070 (MSG T3 Schruppstahl rechts)
N1080 M6 T3                  ;Werkzeugwechsel
N1090 G0 G47 G96 G59 X100 Z-10 Z2=1 S2=200 M204 ED1
N1100 (MSG Plandrehen an Spindel 2)
N1110 G0 X45 Z0 M8
N1120 G1 X10 F.17
N1130 X8 Z.2 F.1
N1140 X-.5
N1150 G0 X45 Z-10
N1160 G0 G53 G48 X=260 Z=300 ;Wegfahren zur Wechselposition
1180  ENDIF
;-------------------------------------------------------------------------------
N1170 (MSG T4 Schlichtstahl rechts)
N1180 M6 T4                  ;Werkzeugwechsel
N1190 G0 G47 G59 G96 X=45 Z=-10 Z2=1 S2=220 M204 ED1 M8
N1200 (MSG erste Seite an Spindel 2 drehen)
; Konturdrehen mit Standard Abspanzyklus
N1210 G171 (P DameKontur, CD2, LD1, CR0.5, CA0, CES1, UCV0)
N1220 G0 G53 G48 X=260 Z=300 Z2=1 M9
N1230 M30
```

deutlich einfacher zu lesen sind. (Beispiel: X1 = 123,000 X2 = 234,500 X3 = …)

Weginformationen können als **Absolutmaße** und/oder als **Relativmaße** in den Zeichnungen angegeben sein *(Bild 1.2)*. Beide Maßangaben sollten deshalb auch im NC-Programm zulässig sein, um die Zeichnungsmaße direkt verwenden zu können.

Das Absolutmaß gibt die Entfernung einer Position zum Programmnullpunkt an, die relative Maßeingabe definiert die Wegdifferenz zur vorhergehenden Position. Durch **G91/G92** lässt sich beliebig zwischen Absolut- und Relativmaßeingabe umschalten, ohne den Programmnullpunkt zu verlieren.

Soll ein Werkzeug die in *Bild 1.3* angegebenen sieben Positionen nacheinander anfahren und wieder zum Nullpunkt zurückkehren, so ergeben sich in Abhängigkeit von der Vermaßungsart unterschiedliche Eingaben *(Tabelle 1.4)*.

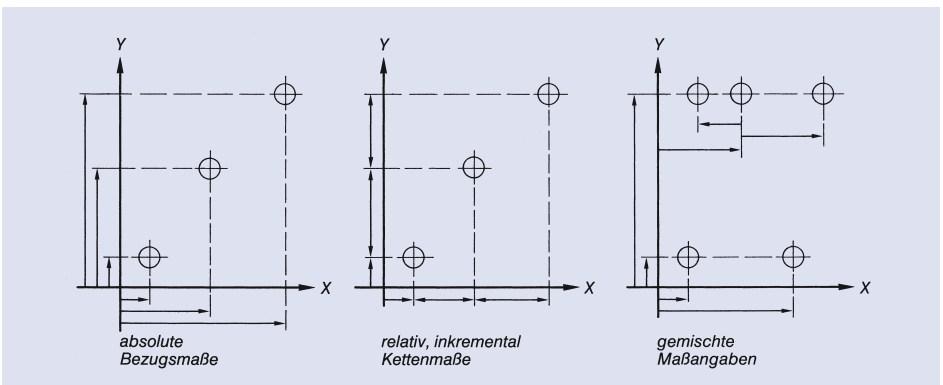


Bild 1.2: Bemaßung von Zeichnungen in Absolut- und Relativmaßen

Tabelle 1.4: Wegmaßtabelle für das in Bild 1.3 dargestellte Bohrbild bei Absolut- und Relativmaß-Programmierung

PT.	Absolutmaßprogrammierung		Relativmaßprogrammierung	
	X	Y	X	Y
1	4	2	+4	+2
2	6	7	+2	+5
3	4	–3	–2	–10
4	8	–6	+4	–3
5	–8	–5	–16	+1
6	–6	–3	+2	+2
7	–6	+5	0	+8
0	0	0	+6	–5
			Σ = 0	Σ = 0

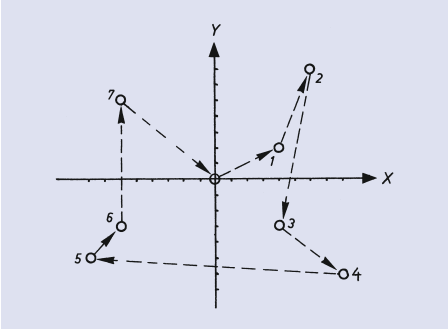


Bild 1.3: Bohrbild

Der **Vorteil der Absolutmaßprogrammierung** ist, dass die nachträgliche Änderung einer Position alle anderen Wegmaße nicht beeinflusst. Bei der Relativmaßprogrammierung muss in diesem Falle auch die Programmierung der folgenden Position korrigiert werden. Auch der Wiedereintritt in ein unterbrochenes Programm ist bei der Absolutwertprogrammierung einfacher.

Als **Vorteile der Relativmaßprogrammierung** können angesehen werden,

1. dass die Summe aller X-Maße und die Summe aller Y-Maße Null sein muss, wenn die Startposition wieder erreicht ist, wodurch eine einfache Kontrolle auf Programmierfehler möglich ist. Bei der gemischt absolut/relativen Programmierung ist diese Kontrollmöglichkeit jedoch nicht mehr gegeben.
2. Dass Unterprogramme wie Bohrbilder, Einstiche, Freistiche und Fräszyklen sehr einfach kopiert und an andere Positionen transferiert werden können.

1.6 Wegbedingungen (G-Funktionen) *(Tabelle 1.5)*

Die 2-stelligen Wegbedingungen (G = go) und die Weginformationen (X, Y, Z, R, A …) gehören zusammen. Die **G-Funktionen** legen fest, nach welchem Rechenprogramm die nachfolgenden Weginformationen in der Steuerung zu verarbeiten sind. Die Weginformationen sagen **wohin,** die Wegbedingungen **wie** gefahren werden soll. Meistens sind sogar mehrere G-Funktionen erforderlich, um die numerische Steuerung auf die Bedeutung der Weginformationen vorzubereiten. Deshalb wird auch die Bezeichnung „vorbereitende Wegbedingungen“ verwendet. Dazu ist es erforderlich, mehrere G-Funktionen zu speichern und aktiv zu halten. Je nach Steuerung muss die Programmierung dieser G-Funktionen entweder in mehreren Sätzen nacheinander erfolgen oder alle G-Funktionen können gemeinsam in einem Satz stehen.

Zwecks einer besseren Übersichtlichkeit teilt man deshalb alle G-Befehle in 3 Arten und mehrere Gruppen ein. Nur G-Befehle aus der gleichen Gruppe können sich gegenseitig überschreiben oder, anders ausgedrückt, aus jeder Gruppe ist immer nur 1 G-Befehl wirksam.

Man unterscheidet **3 Arten von Wegbedingungen.** Die fett gedruckten kennzeichnen den Einschaltzustand und müssen nicht zusätzlich programmiert werden (steuerungsabhängig!).

- **Modal, d. h. über mehrere Sätze wirkende G-Funktionen** für die Interpolationsart
  G00, G01, G02, G03, G06

die Ebenenauswahl
G17, G18, G19

die Werkzeugkorrektur
G40, G41, G42, G43, G44

die Nullpunktverschiebung
G92, **G53** – G59

das Einfahrverhalten
G08, G09, G60, G61, G62

den Arbeitszyklus
G80 – G89

die Maßangaben
G90, G91

die Vorschubfestlegung
G93, **G94,** G95

die Spindeldrehzahleingabe
G96, G97

- **Wegbedingungen, die nur in 1 Satz wirken,** sind

Verweilzeit
G04 (in Verbindung mit F für die Zeitangabe)

Geschwindigkeitszu- und -abnahme
G08, G09

Gewindebohren
G63

Bezugspunktverschiebung
G92

Beispiel für die Funktion der G-Bedingungen *(Bild 1.4)*

Es gibt mehrere Möglichkeiten um vom Startpunkt S zum Endpunkt E zu kommen. Die Auswahl erfolgt durch die G-Funktion:

1. Möglichkeit:
N100 G00 X200 Y140 $
Von S nach E im Eilgang, 140 mm unter einem Winkel von 45 °, den restlichen Betrag in X achsparallel.

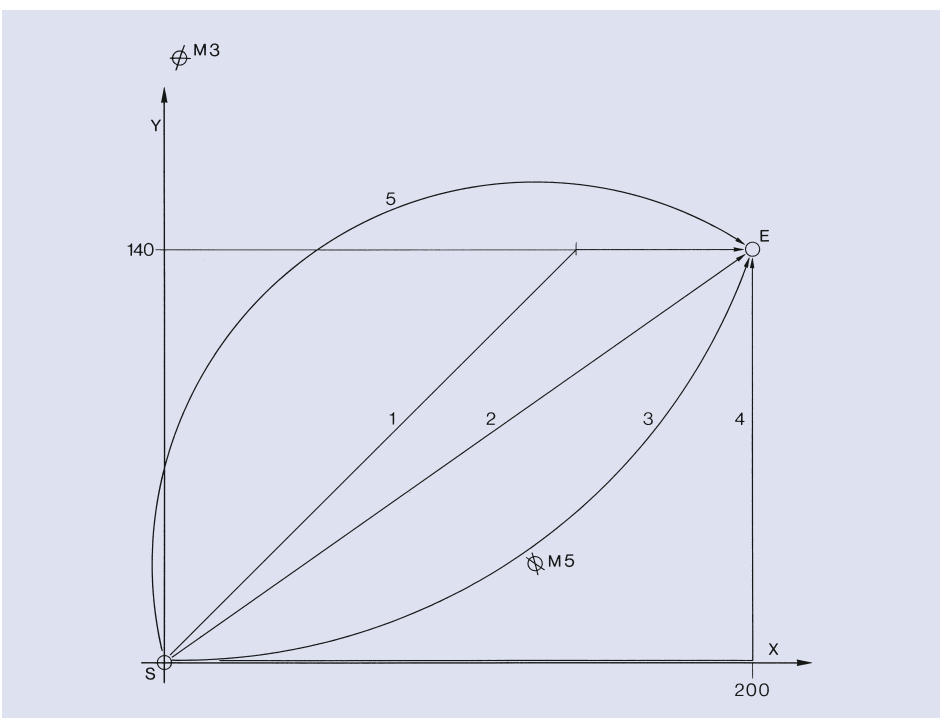


Bild 1.4: Durch unterschiedliche G-Funktionen auf unterschiedlichen Wegen vom Startpunkt S zum Endpunkt E

Tabelle 1.5: G-Funktionen nach DIN 66 025, Bl. 2

Code	Funktion
G00	Positionieren im Eilgang, Punktsteuerung
G01	Lineare Interpolation
G02	Kreisinterpolation, im Uhrzeigersinn
G03	Kreisinterpolation, gegen Uhrzeigersinn
G04	Verweilzeit
G06	Parabel-Interpolation
G09	Genauhalt
G17	Ebenenauswahl XY } Interpolationsparameter zur Kreisprogrammierung
G18	Ebenenauswahl XZ
G19	Ebenenauswahl YZ
G33	Gewindeschneiden mit konstanter Steigung
G34	Gewindeschneiden mit zunehmender Steigung
G35	Gewindeschneiden mit abnehmender Steigung
G40	Löschen aller abgerufenen Werkzeugkorrekturen
G41	Werkzeugradiuskorrektur, Versatz nach links
G42	Werkzeugradiuskorrektur, Versatz nach rechts
G43	Werkzeugkorrektur, positiv
G44	Werkzeugkorrektur, negativ
G53	Löschen der abgerufenen Nullpunktverschiebung
G54 – G59	Nullpunktverschiebung 1 – 6
G60*	Einfahrtoleranz 1
G61*	Einfahrtoleranz 2, auch Schleife fahren
G62*	Schnelles Positionieren, nur Eilgang
G63	Vorschub 100 % setzen, z. B. Gewindebohren
G70	Maßeingabe in inch
G71	Maßeingabe in mm
G73*	Programmierter Vorschub = Achsvorschub
G74*	Referenzpunkt anfahren der 1. und 2. Achse
G75*	Referenzpunkt anfahren der 3. und 4. Achse
G80	Löschen der abgerufenen Zyklen
G81 – G89	Festgelegte Bohrzyklen
G90	Absolutmaßeingabe (Bezugsmaß)
G91	Relativmaßeingabe (Inkrementalmaß)
G92	Programmierte Bezugspunktverschiebung/Speicher setzen
G94	Vorschub in mm/min (oder inch/min)
G95	Vorschub in mm/Umdrehung (oder inch/Umdr.)
G96	Konstante Schnittgeschwindigkeit
G97	Spindeldrehzahl in 1/min

* und alle hier nicht aufgeführten G-Funktionen sind nicht fest belegt und frei verfügbar.

2. Möglichkeit:
N200 G01 X200 Y140 F400 $
Auf einer Geraden (Linearinterpolation) mit dem Vorschub 400 mm pro Minute.

3. Möglichkeit:
N300 G03 G17 X200 Y140 R205 F120 $
Auf einer Kreisbahn, links drehend um den Mittelpunkt M_3, mit dem Radius R 205 mm.

4. Möglichkeit:
N 400 G00 X200 $
N401 Y140 $
Durch achsparalleles Zustellen im Eilgang, zuerst in der X-Achse, dann in der Y-Achse.

5. Möglichkeit:
N500 G02 X200 Y140 R –130 $
Auf einer Kreisbahn, rechts drehend um den Mittelpunkt M5, mit dem Radius R130.

- **Wegbedingungen, denen lt. Norm keine feste Bedeutung zugeordnet ist**

Die Bedeutung der G-Funktionen ist in den DIN 66025, Blatt 2 festgelegt und sollte für alle NC-Fabrikate einheitlich sein.

Beispiele:
N 10 G81 $
ab Schritt 10 gilt:
Aufruf des Bohrzyklus G81, d. h. alle Z-Maße sind relative Maße, die Zustellung in X und Y erfolgt im Eilgang, der Bohrvorschub ist in Millimeter pro Minute angegeben.

N 40 G02 G17 X460 Y125 I116 J –84 $
Satz 40:
Kreisbewegung im Uhrzeigersinn bis zum Endpunkt X460 Y125

N70 G04 F10 $
Satz 70:
10 Sekunden Verweilzeit, d. h. die Spindel dreht sich weiter, die Vorschubbewegung der Achsen bleibt 10 Sekunden unterbrochen.

N 100 G17 G41 H11 T11 $
ab Satz 100:
der mit Speicherplatz H11 aufgerufene und dort eingegebene Korrekturwert wirkt in der XY-Ebene und zwar in Fahrtrichtung gesehen Versatz nach links.

N 160 G54 $
Satz 160:
Aufruf der 1. Gruppe Nullpunktverschiebung für alle Achsen.

1.7 Zyklen

Für häufig wiederkehrende Arbeitsvorgänge sind in den meisten numerischen Steuerungen feste Zyklen in einer Art Unterprogramm vorprogrammiert. Zyklen sollen zur Vereinfachung der Programmierung beitragen und zudem die Programmlänge reduzieren, indem immer wiederkehrende, gleiche Abläufe nur einmal aufgerufen und mit Parameterwerten ergänzt werden.

Man unterscheidet bei den Zyklen

Bohrzyklen: *(Tabelle 1.6 und Bild 1.5)*
zum Bohren, Reiben, Senken, Gewindebohren, festgelegt lt. DIN 66025 (G80 – G89) (Beispiel *Bild 1.6)*.

Fräszyklen:
zum Nutenfräsen, Taschenfräsen, Bohrungsausfräsen, Gewindefräsen, Zapfenfräsen usw. Nicht genormt und pro Steuerungsfabrikat individuell ausgelegt.

Drehzyklen: *(Bild 1.7)*
zum Abspanen längs und plan, Gewindedrehen achsparallel oder konisch mit automatischer Zustellung, sowie Zyklen für Freistiche und Einstiche mit automatischer Schnittaufteilung. Auch Drehzyklen sind nicht genormt und vom Steuerungsfabrikat abhängig.

Tabelle 1.6: Bohrzyklen G80 – G89
Bei unverändertem Bohrzyklus werden nur die X/Y-Positionen programmiert. An jeder Position folgt dann automatisch der aufgerufene (aktive) Bohrzyklus, bis er durch G80 wieder gelöscht oder durch einen anderen G-Zyklus überschrieben wird.

Zyklus	Z-Bewegung ab R-Ebene	Auf Tiefe		Rückzugs-bewegung bis R-Ebene	Anwendungs-beispiel
		verweilen	Spindel		
G81	Vorschub	–	–	Eilgang	Bohren, Zentrieren
G82	Vorschub	ja	–	Eilgang	Bohren, Plansenken
G83	unterbro-chener Vor-schub	–	–	Eilgang	Tieflochbohr-en, mit Späne brechen
G84	Vorschub	–	umkehren	Vorschub	Gewinde-bohren
G85	Vorschub	–	–	Vorschub	Ausbohren 1
G86	Vorschub	–	Halt	Eilgang	Ausbohren 2
G87	Vorschub	–	Halt	manuell	Ausbohren 3
G88	Vorschub	ja	Halt	manuell	Ausbohren 4
G89	Vorschub	ja	–	Vorschub	Ausbohren 5

Ablaufprogramme der Bohrzyklen nach DIN 66025, Blatt 2

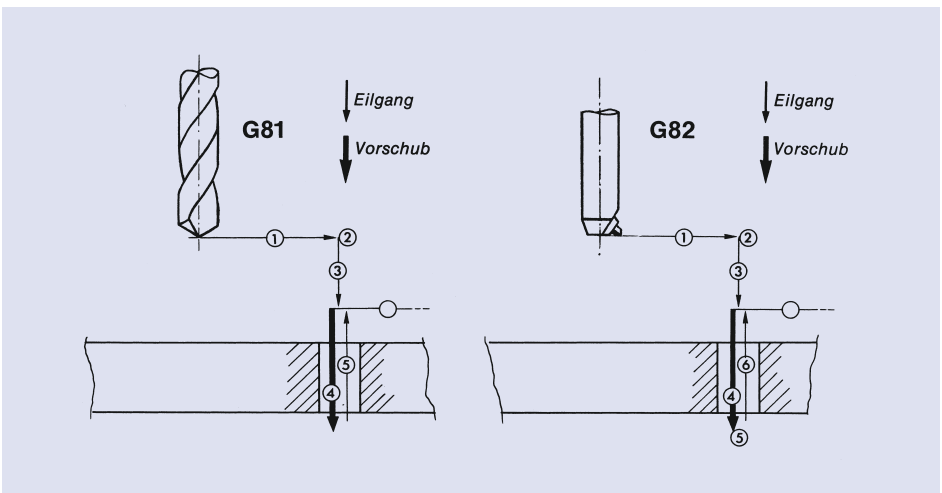


Bild 1.5: Bohrzyklen nach DIN 66025, Blatt 2

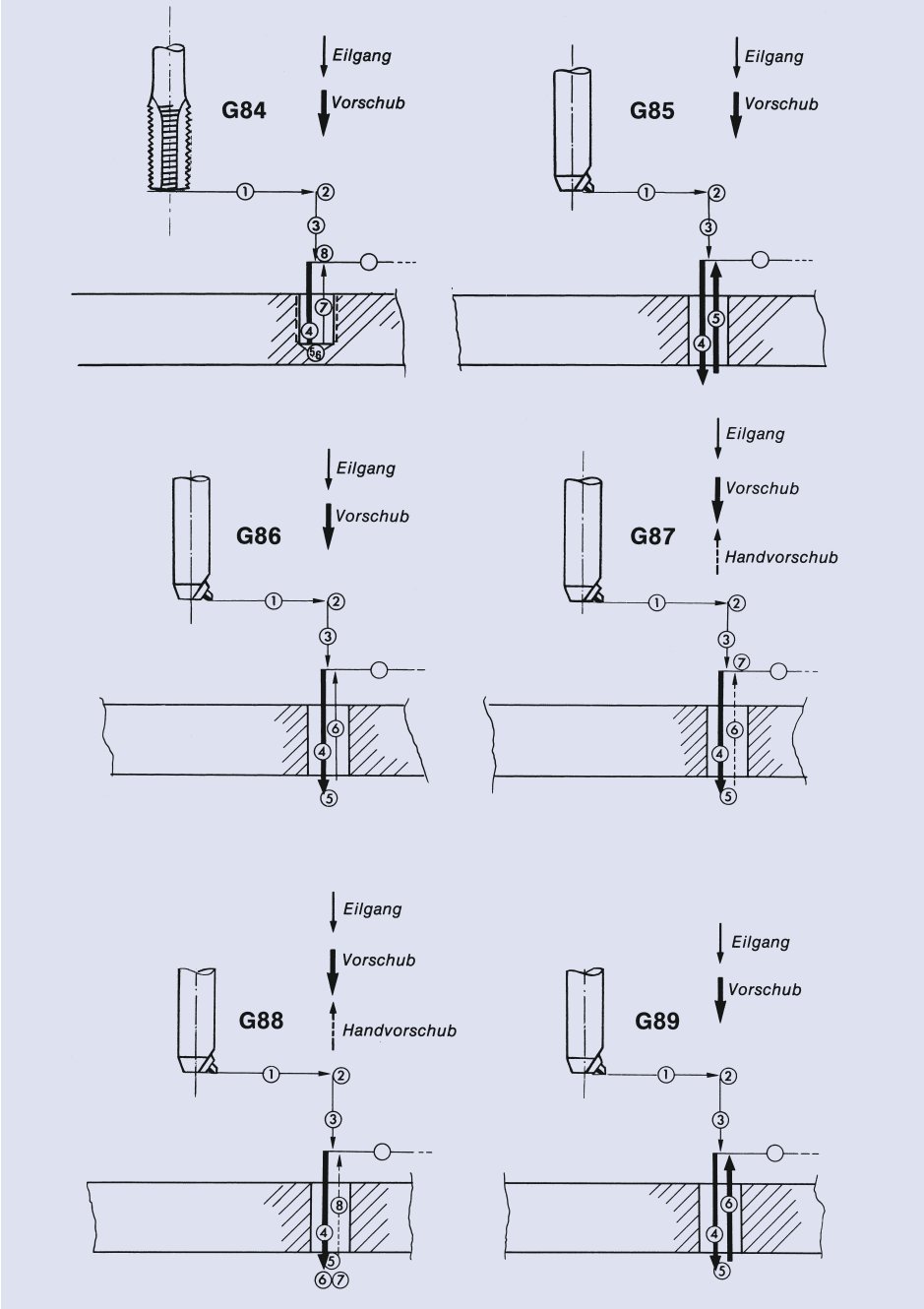
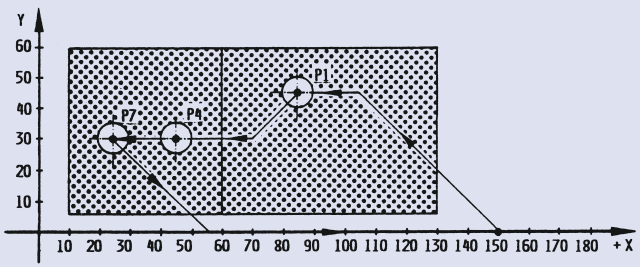
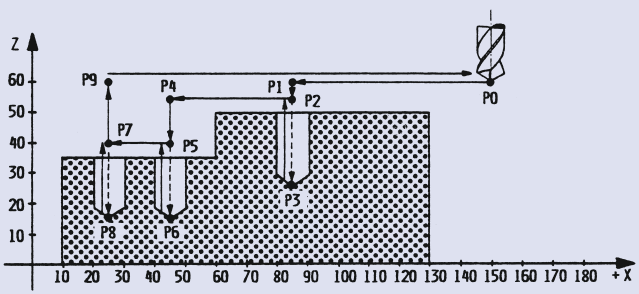


Bild 1.5: Bohrzyklen nach DIN 66025, Blatt 2. (Fortsetzung)

```
N10  G90  S1000  M42
N20  G81  X85  Y45   Z 25   R 55  F300    M3
N30       X45  Y30   Z 15   R 40
N40       X25
N50  G80  Z 60 H0
N60  G0   X150 Y0    M30
```





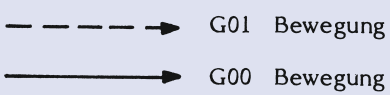


Bild 1.6: Beispiel G81: Bohrzyklus

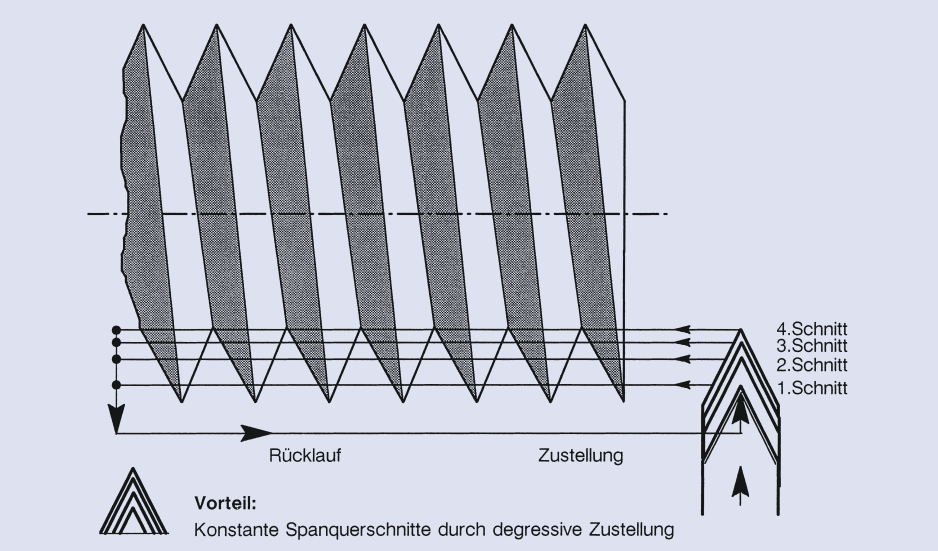


Bild 1.7: Gewindeschneiden mit degressiver Zustellung, um bei jedem Schnitt die Spanquerschnitte konstant zu halten oder zu reduzieren

Freie Zyklen:
auch als Unterprogramme bezeichnet und für jede Art von Maschine speziell ausgelegt, wie z. B. der Werkzeugwechselzyklus (M06) oder geometrische Zyklen für Lochkreise, Lochreihen, Tieflochbohrungen, Kreissegmentfräsen, Taschenfräsen usw.

1.8 Nullpunkte und Bezugspunkte *(Bild 1.8 und Bild 1.9)*

An jeder numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine werden die Nullpunkte und verschiedene Referenzpunkte definiert, die einfach anzufahren sind und auf die sich die Programmierung der Werkstück-Bemaßung bezieht.

Maschinen-Nullpunkt

Der Maschinen-Nullpunkt liegt im Ursprung des Maschinenkoordinatensystems unveränderlich fest und kann nicht verschoben werden. Eine werkstattgerechte NC-Maschine verlangt, dass dieser Nullpunkt, z. B. nach dem Einschalten, rasch und einfach aufgenommen werden kann. Vorteilhaft ist, wenn die Steuerung diese Position in jeder Achse automatisch anfahren kann und der Befehl dazu wahlweise durch Betätigen einer entsprechenden Taste, oder durch das Programm ausgelöst werden kann.

Das Aufnehmen dieses Nullpunktes muss dabei mit einer Genauigkeit von ±1 Weginkrementen erfolgen. Bei Resolvern und Inductosynmaßstäben wird hierzu einer der **elektrischen Nulldurchgänge** der Messsysteme benutzt, inkrementale Geber verfügen über einen speziellen **Nullreferenzimpuls.** Die Abstimmung des System-Nullpunktes auf den Maschinennullpunkt erfolgt entweder mechanisch durch Verdrehen des Gebergehäuses oder elektronisch in der CNC.

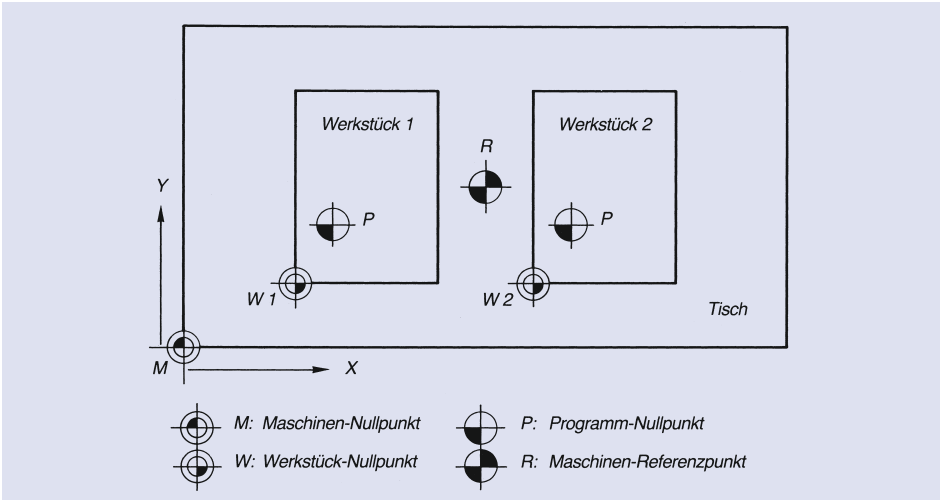


Bild 1.8: Nullpunkte und Referenzpunkte bei Bohr- und Fräsmaschinen.
M = wird vom Maschinenhersteller festgelegt

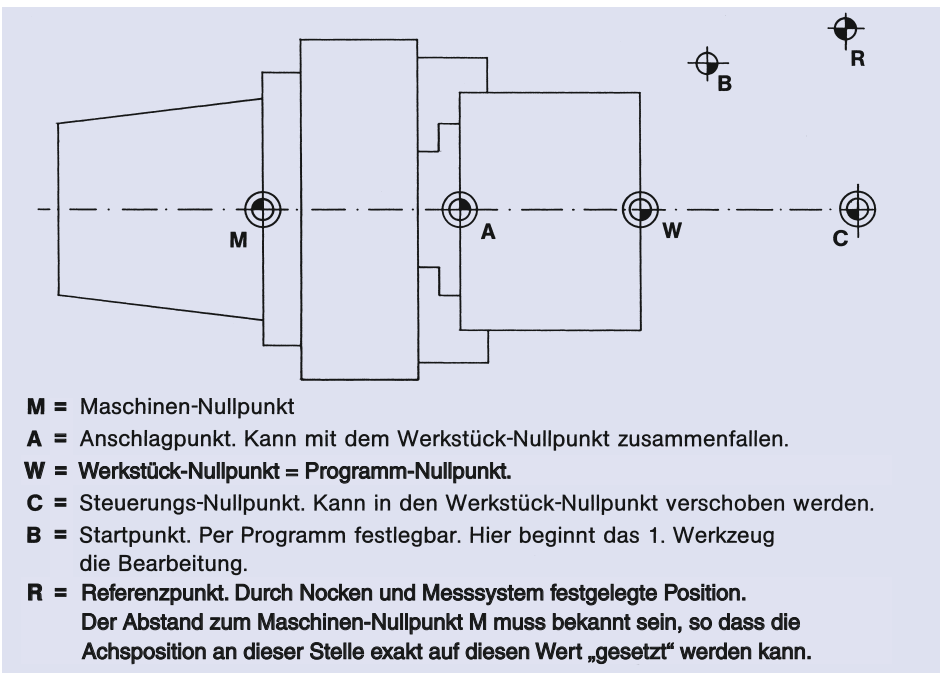


Bild 1.9: Nullpunkte und Referenzpunkte bei Drehmaschinen.
M = wird vom Maschinenhersteller festgelegt

Maschinen-Referenzpunkt

Es gibt Fälle, bei denen man den Maschinen-Nullpunkt einer Achse nicht anfahren kann, wie z. B.:

- bei Portalfräsmaschinen, wenn der Spindelstock nicht bis zur Tischoberfläche gefahren werden kann,
- bei sehr langen Maschinen, wo es zumindest zeitraubend wäre, den Maschinen-Nullpunkt öfter anzufahren,
- in Fällen, wo das Anfahren des Maschinen-Nullpunktes durch das aufgespannte Werkstück oder eine Spannvorrichtung vereitelt wird,
- bei Maschinen mit aufgesetztem Rundteiltisch oder einer Wendespannvorrichtung.

In diesen Fällen ist es vorteilhaft, einen anderen, festgelegten Punkt auf der Achse in gleicher Weise als Referenzpunkt anzufahren. Statt Nullsetzen der Achsenposition wird diese auf den Wert gesetzt, der die Differenz zwischen Maschinen-Nullpunkt und Referenzpunkt entspricht.

Die Begriffe Nullpunkt und Referenzpunkt werden in der Praxis nicht immer exakt voneinander unterschieden. So wird z. B. bei Maschinen, die zum Werkzeugwechsel, oder zum Palettenwechsel einen festgelegten Punkt anfahren müssen, dieser ebenfalls als Referenzpunkt bezeichnet.

Werkstück-Nullpunkt, Programm-Nullpunkt

Der Werkstück-Nullpunkt ist der Ursprung des Werkstückkoordinaten-Systems. Er kann vom Programmierer frei gewählt werden, liegt aber z. B. bei der Drehmaschine auf dem Schnittpunkt der Rotationsachse mit der Bezugskante der Längenvermaßung. Die Achsbezeichnung und positive Achsrichtung wird mit der des Maschinen-Koordinatensystems übereinstimmend gewählt und richtet sich nach der verwendeten Maschine.

Auf den Maschinen-Nullpunkt bezogene Koordinaten-Werte sind jedoch zur Programmierung ungeeignet, da sie bei mehrachsigen Maschinen die Lage des Werkstückes zum Maschinen-Nullpunkt nicht berücksichtigen. Deshalb legt der Programmierer einen werkstückbezogenen Programm-Nullpunkt fest, auf den er seine geometrischen Werte bezieht und den er nach dem Aufspannen des Werkstückes auf der Maschine rasch anfahren und aufnehmen kann. Anschließend werden die Achsen genullt, d. h. der Nullpunkt wurde vom Maschinen-Nullpunkt zum Programm-Nullpunkt verschoben.

Nullpunkt-Verschiebung

Die Möglichkeit der Nullpunkt-Verschiebung erleichtert dem Programmierer die Arbeit, besonders dann, wenn der Programm-Nullpunkt auch programmierbar um beliebige Werte in jede Achse verschoben werden kann. So lassen sich, z. B. gleichbleibende Bohrbilder an beliebige Stellen transferieren und die einmal berechneten Koordinatenwerte bleiben erhalten. Bei Werkzeugmaschinen mit Palettenwechsel verwendet der Programmierer die Nullpunkt-Verschiebung in Verbindung mit einem manuell änderbaren Korrekturwert, um Aufspannungenauigkeiten auszugleichen.

Die Programmierung einer Nullpunktverschiebung erfolgt z. B. durch „Ist-Wert-Setzen“:

```
N122   G92   X140,5   X 0    $
N123   G92   Y0       Y100   $
```

Dies bedeutet:

Die X-Achse fährt nach 140,5 und wird dort zu 0 gesetzt,

die Y-Achse fährt auf 0,0 und wird dort auf das Maß 100 gesetzt.

Eine weitere Möglichkeit der Nullpunktverschiebung ist der Aufruf eines gespeicherten Verschiebungswertes:

```
N345    G54
N346    G 0      X20      Y20
```

Dies bedeutet:

Das Maß der Verschiebung wird durch den im Speicher G54 abgespeicherten Wert pro Achse bestimmt.

1.9 Transformation

Unter Transformation versteht man generell die Umsetzung von einem Koordinatensystem in ein anderes. Diese Funktion dient vorwiegend der Programmiervereinfachung.

Man unterscheidet mehrere Möglichkeiten der Transformation:

Koordinatentransformation

Diese wird z. B. benötigt zur Umsetzung eines NC-Programms, das in kartesischen Koordinaten geschrieben ist, in Polarkoordinaten oder die Kinematik eines Roboters oder eines Hexapoden (Raumkoordinaten in Maschinenkoordinaten umsetzen).

Transformation von Punktmustern

Vereinfachung beim Programmieren, um definierte und programmierte Punktmuster oder Einzelpunkte (Bohrbilder) durch einfache Anweisungen zu verschieben, zu drehen, zu kippen, zu verketten oder zu spiegeln.

Hierzu zählt auch die **Schräglagen-Kompensation,** d. h. das Werkstück liegt nicht achsparallel auf dem Maschinentisch, sodass das auf die Maschinenkoordinaten bezogene NC-Programm auf die Achskoordinaten umgerechnet werden muss.

Welt- oder Benutzerkoordinaten

Die z. B. bei CAD-Systemen verwendeten geräteunabhängigen kartesischen Koordinaten, die dem Programmierer als Bezugssystem dienen, werden über Koordinatentransformation in Gerätekoordinaten (z. B. Bildschirm-, Maschinen- oder Roboterkoordinaten) umgewandelt.

Siehe hierzu auch „FRAME“ im Kapitel CNC.

1.10 Werkzeugkorrekturen

Selbst bei einwandfreier Vorbereitung der Teileprogramme, Vorrichtungen und Werkzeuge ist es erforderlich, Werkzeugkorrekturen einzufügen. Diese ergeben sich durch Abweichungen der Werkzeuge selbst, aber auch durch Spanntoleranzen, Maschinenfehler oder Werkzeugabnutzung. Sie lassen sich oft erst nach der Kontrollmessung am Werkstück bestimmen.

Beispiele:

Eine **Werkzeuglängenkorrektur** *(Bild 1.10)* ermöglicht den Ausgleich zwischen der vorgegebenen (beim Programmieren angenommenen) und der tatsächlichen Werkzeuglänge, die z. B. durch Nachschleifen entsteht. Das Differenzmaß oder die absolute Werkzeuglänge werden in den Korrekturwertspeicher eingegeben. Im Programm erfolgt der Abruf über die Adresse H oder zusammen mit dem Werkzeug T und die Korrektur-Nummer. Gleiches gilt für die **Fräserversatz-Korrektur.** Über G43/G44 erfolgt die Bestimmung der Korrekturrichtung, unabhängig vom Quadranten, in dem die Bearbeitung erfolgt *(Bild 1.11 oben)*.

Aufgabe der **Fräserradius**- bzw. **Fräserbahn-Korrektur** ist es, zu jeder programmierten Werkstück-Kontur die erforderliche äquidistante Werkzeugmittelpunktbahn zu berechnen. Dies gilt sowohl beim Drehen, als auch beim Fräsen *(Bild 1.12 bis 1.14)*.

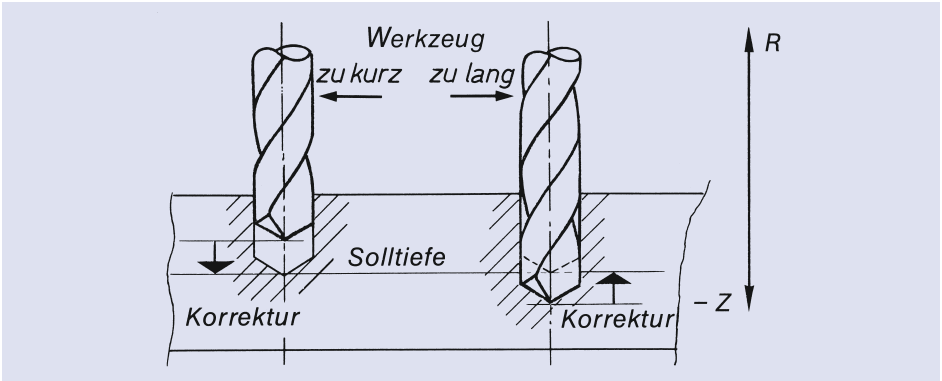


Bild 1.10: Werkzeuglängenkorrektur bei Bohrwerkzeugen

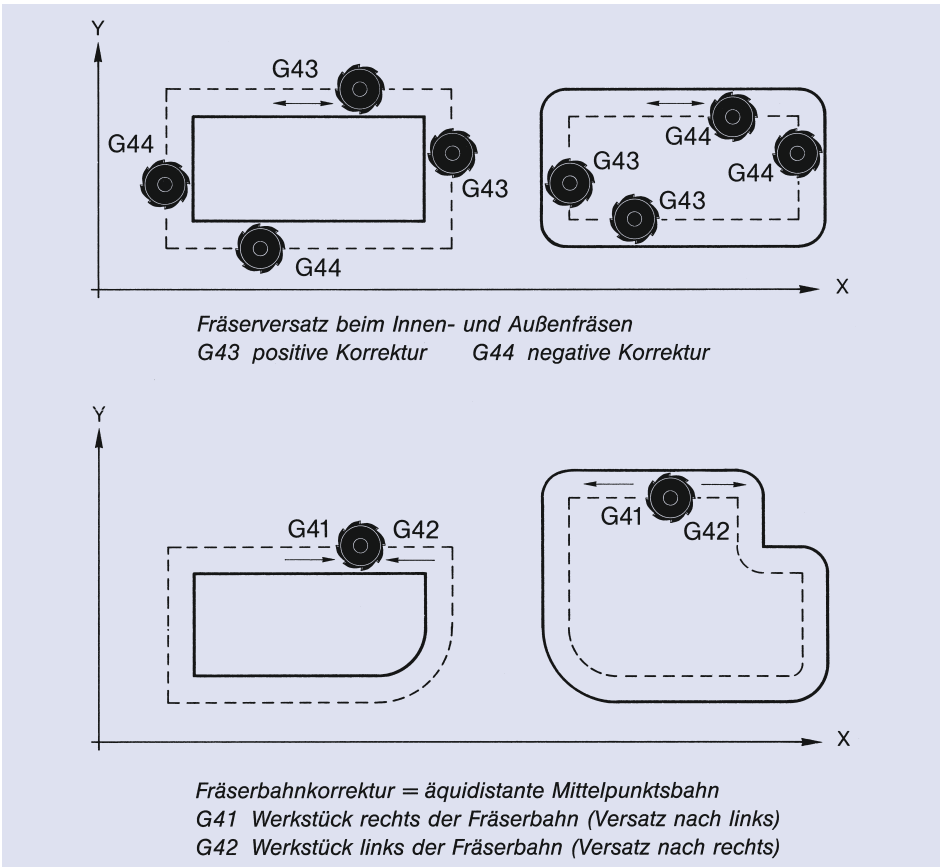
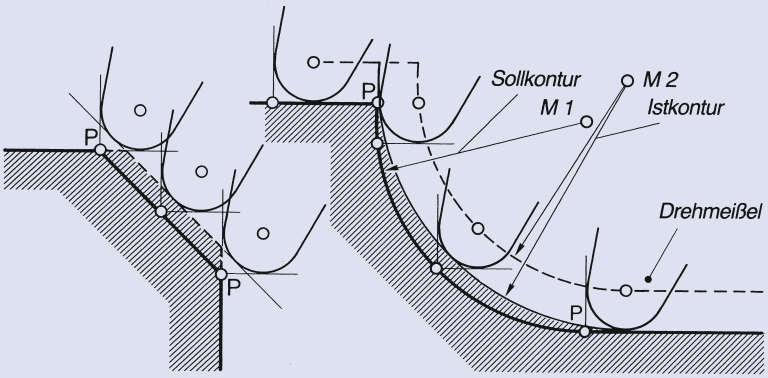
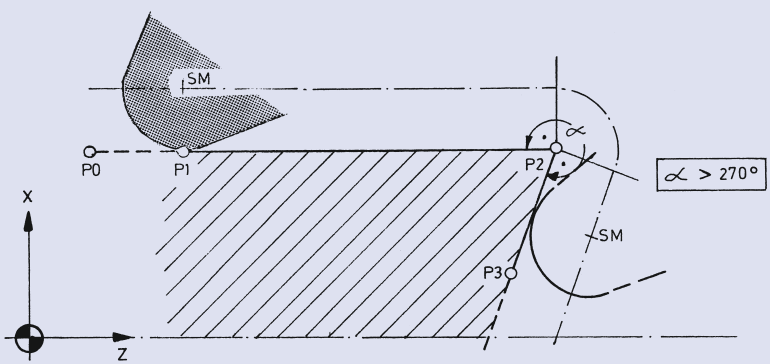


Bild 1.11: Fräserversatz und Fräserradiuskorrektur

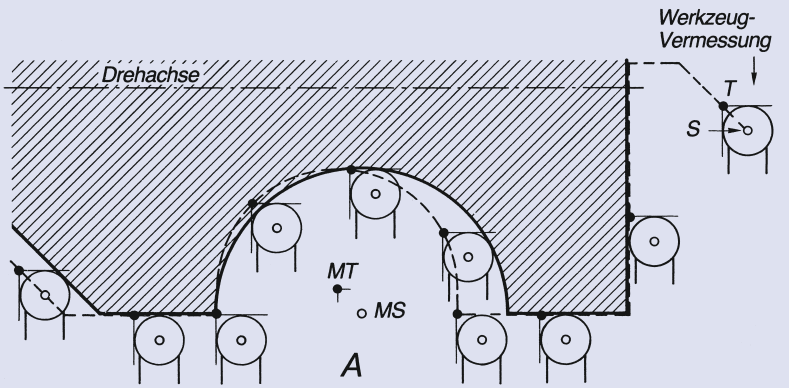


Formfehler durch den Schneidenradius am Drehmeißel ohne äquidistante Bahnkorrektur.
Wenn die Bahn des Punktes P programmiert wird, die formgebenden Tangenten der Schneide aber nicht durch P laufen, so entstehen Konturverzerrungen, d. h. die erzeugte Kontur stimmt nicht mit der verlangten Werkstückkontur überein.



Äquidistante mit automatischem Übergangskreis bei α.

Bild 1.12: Schneidenradiuskorrektur bei Drehmaschinen



Aufgrund der Werkzeugvermessung bei Drehmaschinen liegen Schneidenmittelpunkt S = Werkzeugnullpunkt und die formgebenden Tangenten T nicht deckungsgleich. Damit S auf der erforderlichen äquidistanten Bahn fährt, muss T auf einer nicht äquidistanten Bahn zur Soll-Kontur geführt werden. Bezogen au den Punkt S ergibt sich die gleiche Äquidistante wie im Fall B.

Bei Fräsmaschinen liegen Fräsermittelpunkt und Werkzeugnullpunkt deckungsgleich. Daher ergibt sich als Fräsermittelpunktsbahn eine Äquidistante

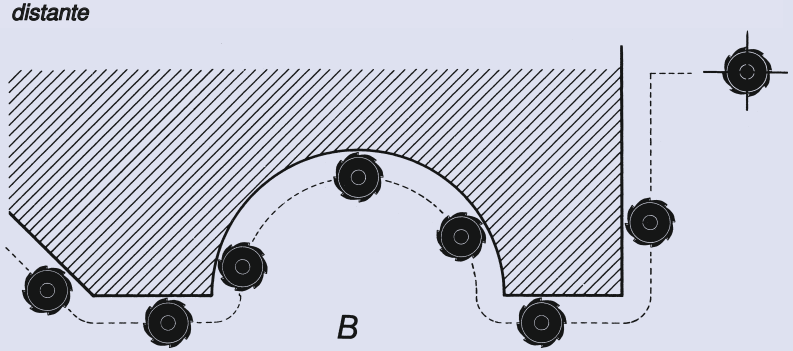


Bild 1.13: Unterschied zwischen
A Schneidenradiuskompensation bei Drehmaschinen und
B Fräserradiuskorrektur bei Fräsmaschinen.
Programmiert ist die Werkstückkontur, die Übergangsradien und Äquidistanten werden automatisch von der CNC erzeugt.

```
● N010   G17
  N020   G41   D2
  N030   G1    X125   Y50    F3000   ──►P1
  N040         X105   Y40            ──►P2
  N050         X90                   ──►P3
  N060   G3    X75    Y25    J-15    ──►P4
  N070   G1    Y20                   ──►P5
  N080         X25                   ──►P6
  N090         Y60                   ──►P7
  N100         X45    Y80            ──►P8
  N110         X70                   ──►P9
  N120   G3    X100   I15            ──►P10
  N130   G1    X125   Y60            ──►P11
  N140         Y50                   ──►P1
  N150         Y30                   ──►P12
  N160   G40   Y20    M30            ──►P13
```

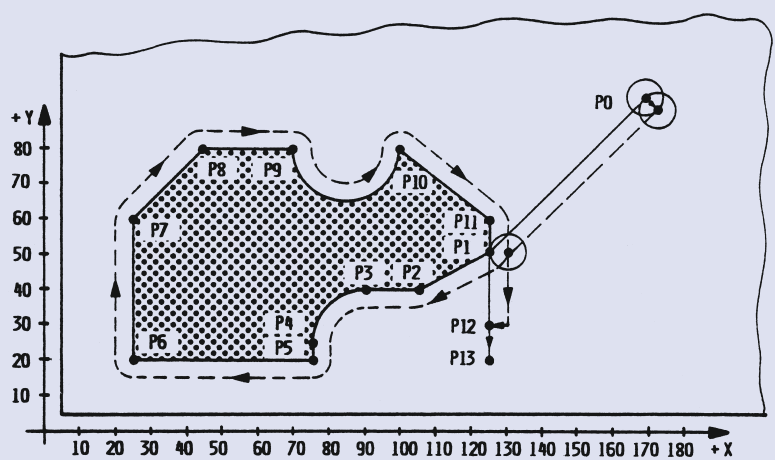


Bild 1.14: Programmierbeispiel für G41: Werkzeugradius-Versatz nach links

Bei Maschinen mit Palettenwechsel muss mit einem achsparallelen **Versatz** der einzelnen Werkstücke gerechnet werden. Beim Schwenken des Rundtisches entstehen dadurch Abweichungen gegenüber der Null-Lage, die zu korrigieren sind. Dabei ist von Vorteil, wenn die Steuerung den einmal gemessenen Versatz in X- und Y-Achse entsprechend der Tischstellung selbsttätig umrechnet und berücksichtigt.

1.11 Zusammenfassung

Das NC-Programm ist ein nach bestimmten Regeln und speziellen Vorschriften (Programmieranleitung) zusammengestelltes Programm, das den Ablauf und die Bearbeitungsschritte für die Fertigung eines bestimmten Werkstückes auf einer bestimmten NC-Maschine steuert. Ein solches Programm ist im Allgemeinen nicht für andere Maschinen oder Steuerungen verwendbar, da es deren Programmiervorschrift nicht einhält. Trotzdem ist es für jeden Maschinenbediener und -programmierer unerlässlich, die generelle Programmstruktur zu kennen, um Korrekturen und kleinere Änderungen an der Maschine durchführen zu können.

In der Praxis ist auch darauf zu achten, wie die einzelnen Funktionen ablaufen, d. h. ob sie am Beginn des Satzes oder erst am Ende des Satzes wirksam werden. Darüber gibt die jeweilige Programmieranleitung Auskunft.

Die allgemein gültigen Regeln für den Aufbau von NC-Programmen sind in der DIN 66 025, Blatt 1 – 3 festgelegt. Die Unterteilung der einzelnen Befehle (Wörter) in Adresse und Zahlenwert macht selbst umfangreiche und komplizierte Programme übersichtlich, was manchmal erforderliche manuelle Korrektur-Eingriffe in der Werkstatt erleichtert.

Häufig wiederkehrende Programmabläufe, wie z. B. Bohr-, Dreh- oder Fräszyklen, sind als abrufbare Unterprogramme gespeichert, die mit den jeweils erforderlichen Parameterwerten (Bohrtiefe, Rückzugsebene, Werkzeugnummer) zu ergänzen sind. Dies reduziert die Programmlänge und vereinfacht nachträgliche Korrekturen.

Ein wesentlicher Bestandteil aller NC-Programme sind die gespeicherten und frei abrufbaren Korrekturwerte für Fräserradius, Werkzeuglänge, Schneidenradius, Nullpunktverschiebung und andere, maschinenspezifische Daten.

Die Möglichkeiten zur Erstellung von NC-Programmen werden im folgenden Kapitel erläutert.

NC-Programm

Das sollte man sich merken:

1. Ein NC-Programm besteht aus einer **Folge von Instruktionen,** mit denen die Maschinenbewegungen und automatischen Abläufe einer NC-Maschine gesteuert werden.
2. Die Programmierbarkeit der direkten **Weginformationen** (Maße) und der **Fahrbedingungen** (G-Funktionen) sind das wesentliche Kennzeichen eines NC-Programms.
3. Wesentliches **Kennzeichen eines NC-Programms** ist, dass es sämtliche Weg- und Schaltinformationen enthält und sehr einfach zu ändern oder austauschbar ist.
4. NC-Programme werden auf elektronischen, automatisch lesbaren Datenträgern gespeichert oder per DNC direkt vom Rechner in die CNC übertragen.
5. Der **Programmaufbau,** die Adressenbelegung, die Eingabe der Wegmaße, die Definition der Wegbedingungen und der Hilfsfunktionen sind in DIN 66025 festgelegt.
6. **Schaltbefehle** dienen zum automatischen Ein- und Ausschalten von Maschinen- und Automatisierungsfunktionen, wie Drehzahl, Werkzeugwechsel, Werkstückwechsel u. a.
7. Unter **modal wirkenden Funktionen** versteht man solche Befehle, die solange aktiv bleiben, bis sie durch einen entsprechenden Gegenbefehl im Programm wieder ausgeschaltet werden.
8. Die **Weginformationen** legen fest, **wohin** die programmierten Achsen fahren sollen, die **Wegbedingungen** bestimmen, **wie** sie dahin kommen.
9. **Zyklen** sind gespeicherte **Unterprogramme,** deren prinzipieller Ablauf feststeht, deren Wegmaße jedoch frei programmierbar sind (Beispiele: Bohrzyklen, Fräszyklen, Drehzyklen).
10. Die **Nutzung der Zyklen** macht NC-Programme kürzer und sicherer, die manuelle Programmierung wird einfacher.
11. Unter **Maschinen-Nullpunkt** versteht man die unveränderlich festgelegten, maschinenbezogenen Nullpunkte der NC-Achsen einer Maschine. Ihre physikalische Festlegung erfolgt durch eine Referenzmarke des Messsystems in Kombination mit einem Nullpunkt-Endtaster.
12. Der **Maschinen-Nullpunkt**, auch als **„home position“** bezeichnet, wird vom Maschinen-Hersteller bestimmt und über das Positionsmesssystem präzise festgelegt.
13. Eine **Referenzposition** ist ein festgelegter Punkt auf einer Achse, der in einem bestimmten Bezug zum Maschinen-Nullpunkt steht. Er wird beispielsweise zum Werkstückwechsel, Werkzeugwechsel oder als Startposition verwendet.
14. **Referenzpunkt-Anfahren** ist eine Steuerungsfunktion, die das automatische Anfahren der Referenzposition bewirkt. Sie kann entweder vom Bediener oder über das Einschalt-Programm ausgelöst werden.

2 Programmierung von CNC-Maschinen

Die Wirtschaftlichkeit von CNC-Maschinen ist weitgehend von der Programmiermethode und der Leistungsfähigkeit des verwendeten Programmiersystems abhängig. Je schneller fehlerfreie Programme an der Maschine zur Verfügung stehen, desto effektiver und flexibler ist die NC-Fertigung.

2.1 Definition der NC-Programmierung

Unter NC-Programmierung, auch als Teileprogrammierung bezeichnet, versteht man die Herstellung der Steuerinformationen zur Bearbeitung eines Werkstückes auf einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine. Diese Tätigkeit erfolgt heute fast ausschließlich mittels Computerunterstützung. Dazu bedarf es einer speziellen Programmiersoftware, die eine schrittweise Bedienerführung über Dialog und grafische Anzeige der eingegebenen Werte bietet. Die abschließende grafisch-dynamische Simulation der Bearbeitung am Bildschirm ist eine realitätsnahe, visuelle Kontrollmöglichkeit, bevor das Programm zur Bearbeitung freigegeben wird.

2.2 Programmiermethoden

(Bild 2.1 bis 2.4)

Wo und wie programmiert werden soll, beginnt mit der Entscheidung über den **Programmierort:** Büro oder Werkstatt.

Beiden Bereichen stehen unterschiedliche **Programmier-Hilfsmittel** und -Verfahren zur Verfügung: Die vorwiegend maschinenspezifische Programmerstellung oder ein universelles Programmiersystem, bis zur durchgängigen Nutzung im CAD-System erzeugter Werkstückdaten zur NC-Programmierung. Auch der Bearbeitungsablauf, d. h. Reihenfolge der Zerspanung, Einsatz der Werkzeuge und die Auswahl der Bearbeitungsparameter übernimmt das NC-Programmiersystem.

Die Festlegung auf eine der zur Auswahl stehenden Programmiermethoden bestimmt automatisch die dafür verwendeten **Programmiermittel.**

Je nach den gestellten Anforderungen lässt sich für jeden Anwender das passende Programmierverfahren ermitteln. Eine Zusammenstellung der prinzipiellen Möglichkeiten zeigen *Bild 2.1 und 2.2*, deren Kennzeichen und Merkmale sind in *Bild 2.3* zusammengefasst.

Manuelle Programmierung

Dieses Verfahren verwendet keine Computerunterstützung. Der Programmierer beschreibt die Bearbeitungsaufgabe im steuerungsspezifischen NC-Code, vorwiegend nach DIN 66 025. Vor Beginn der Programmierung ist zuerst ein Werkzeug-, Arbeits- und Aufspannplan zu erstellen *(Bild 2.4).*

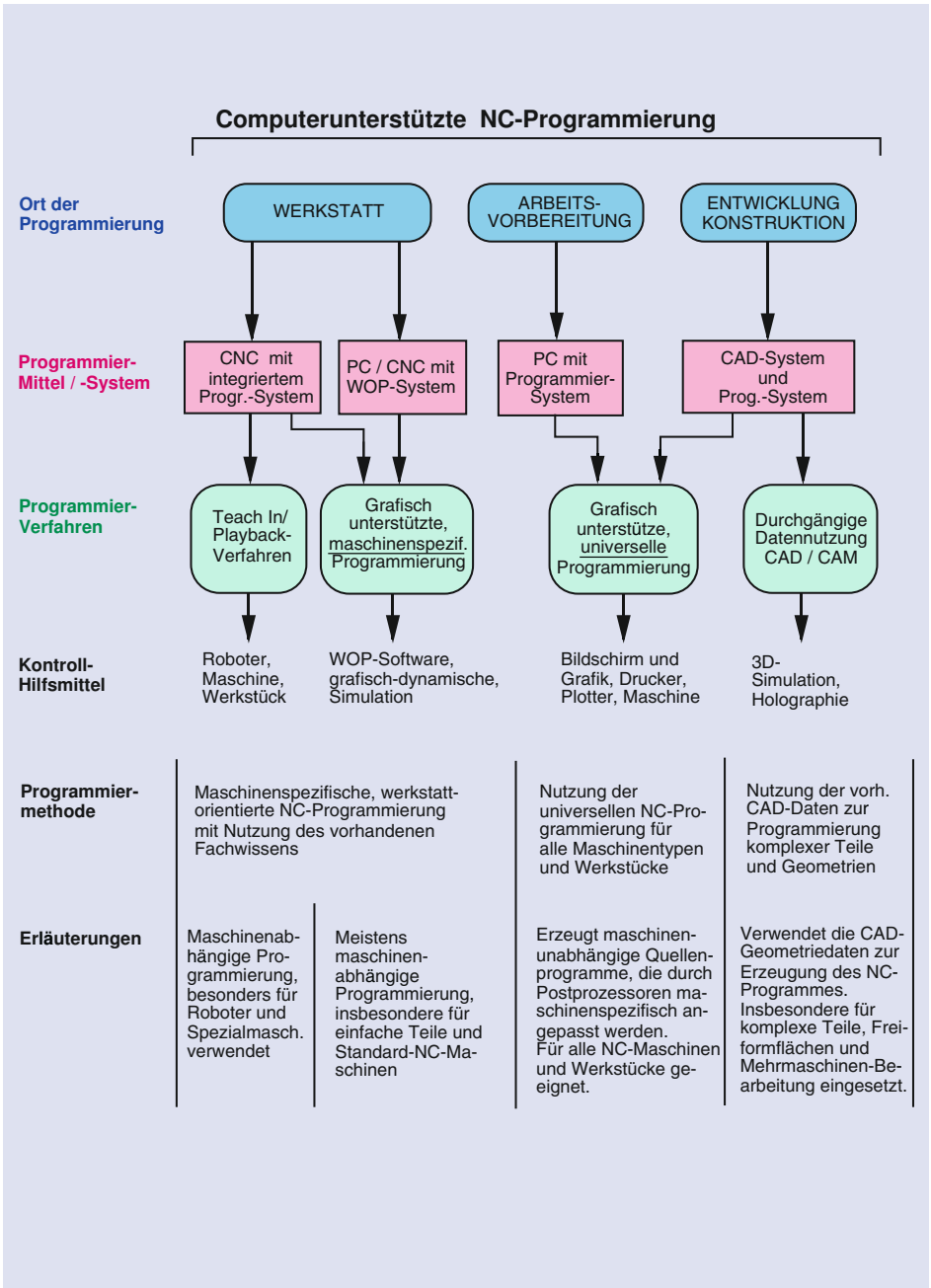


Bild 2.1: Zusammenhang von Programmiermittel, Programmierverfahren und Programmier-methode bei der computergestützten Programmierung

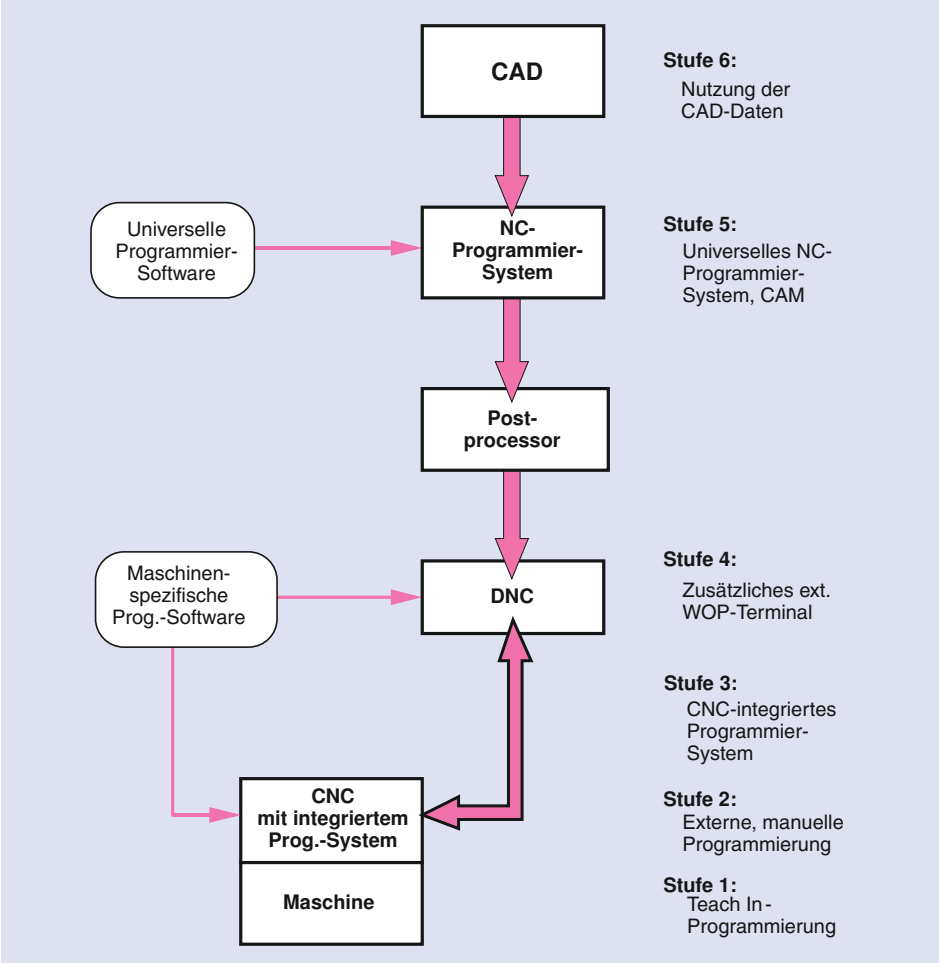


Bild 2.2: Möglichkeiten der NC-Programmierung, ein 6-Stufen-Konzept

Als **Hilfsmittel** stehen dem manuell arbeitenden Programmierer außer Bleistift und Papier lediglich seine Erfahrung, Tabellen, Taschenrechner, die Programmieranleitung und eine Codiereinrichtung zur Erstellung eines automatisch lesbaren Datenträgers zur Verfügung. Fehlt auch diese Einrichtung, dann muss das erstellte Programm in den Speicher der CNC eingetippt werden. Für dreidimensionale und sehr komplexe Bearbeitungen scheidet die manuelle Programmierung deshalb von vornherein aus.

Wesentliches **Kennzeichen der manuellen Programmierung** ist, dass hierbei die einzelnen **Werkzeugbewegungen** programmiert werden, ohne Überwachung von falsch eingegebenen Werten, Werkzeugen oder Bearbeitungen. Waren alle Werkzeuge im Einsatz, müsste das Werk-

Stufe	Programmiersystem	Kennzeichen, Merkmale
6	CAD-System CAD/CAM	Verwendung rechnerintern vorhandener Werkstückgeometrien zur Erstellung des NC-Programmes oder Weiterbearbeitung der Geometrie in einem nachgeschalteten Programmiersystem
5	Universelles Programmiersystem CAM	Problemorientierte, maschinen-unabhängige Programmierung mittels Programmiersprache oder Grafik zur Unterstützung bei Geometrie- und Technologieerstellung
4	Externes CNC-Panel zur Programmierung	Spezielles, maschinenspezifisches, werkstatt-geeignetes Programmiergerät mit Symbol-/ Funktionstastatur und grafischer **Unterstützung, mit Anschluss an den CNC-**internen Rechner
3	Handeingabe-Steuerung WOP	Maschinengebundene Programmierung mit geometrischer und technologischer Grafik-Unterstützung durch separaten oder CNC-internen Rechner. Maschinenspezifische und deshalb sehr leistungsfähige Programmierung und Simulation
2	Manuelle Programmierung im DIN-Format	Maschinenbezogene Programmierung im Lochstreifenformat ohne Rechnerunterstützung
1	Teach-In-Programmierung	Manuelles Anfahren der Positionen mit der Maschine und Abspeichern der Positionen in der CNC. (Vorwiegend bei Robotern verwendet) (Bei der vergleichbaren Digitalisierung fährt die Maschine automatisch die Oberfläche eines Modells ab und speichert viele Einzelpunkte in der CNC.)

Bild 2.3: Generelle Kennzeichen und Merkmale von NC-Programmierverfahren

stück den Zeichnungsvorgaben entsprechen. Dies lässt sich erst durch eine Probebearbeitung an der Maschine kontrollieren und für nachfolgende Werkstücke im Programm korrigieren. Einige CNCs bieten die Möglichkeit, fertige Teileprogramme im DIN-Code vor der Abarbeitung grafisch zu testen. Ein zeitaufwändiges, umständliches und teures Verfahren.

Anwendung findet dieses Verfahren heute nur noch bei Spezialmaschinen, wo durch Eingabe weniger Parameterwerte in eine Spezialsteuerung die gesamte Bearbeitung definiert werden kann.

Teach-In /Playback-Verfahren

Darunter versteht man das manuelle Anfahren der Positionen mit der Maschine und Abspeichern der angezeigten Posi-

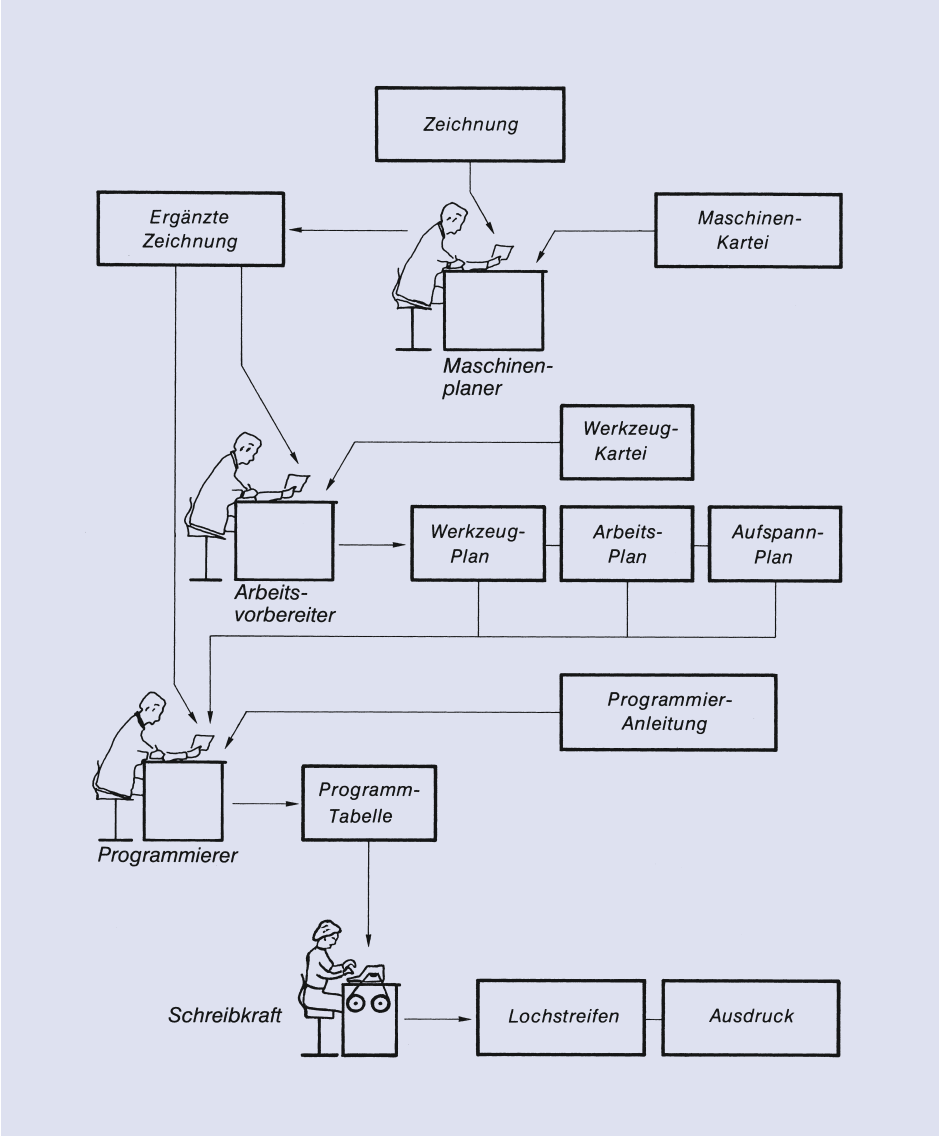


Bild 2.4: Prinzip der manuellen NC-Programmierung.
Alle Fertigungsunterlagen, die Werkstückzeichnung und Programmieranleitung werden benötigt, um das NC-Programm zu erstellen und satzweise in eine Liste einzutragen. Mit dem (Ab-)Schreiben der Programmliste entsteht das NC-Programm, das auf Datenträger gespeichert wird.

Die rein manuelle Programmierung war umständlich, zeitraubend, fehlerbehaftet und wird nicht mehr genutzt. Heute programmiert man mit Computerunterstützung und überträgt das grafisch-dynamisch getestete NC-Programm nicht auf einen Lochstreifen, sondern auf einen modernen Datenträger oder mittels DNC-Verbindung direkt in die CNC.

tions-Endwerte auf Tastendruck, oder die Speicherung des gesamten Bewegungsablaufes. Dieses Verfahren wird vorwiegend bei Lackier-Robotern eingesetzt. Bei Werkzeugmaschinen wird es nur dort angewandt, wo eine exakte Maßbestimmung erst am Werkstück möglich ist, wie z. B. zur Bearbeitung von Bohrbildern an Großwerkstücken auf Bohrwerken. Hierbei spielt auch die zur Programmeingabe verwendete Zeit im Verhältnis zur Bearbeitungszeit eine untergeordnete Rolle.

Beim Fräsen hat sich mehr das **Digitalisieren (Scannen)** durchgesetzt, wobei die Werkzeugmaschine oder eine Messmaschine die Oberfläche eines Werkstückmodells zeilenweise abtastet und die Positionen fortlaufend abspeichert. Diese Daten dienen später zum Fräsen einer identischen Oberfläche **(Playback).** Einige dafür ausgelegte Steuerungen ermöglichen auch maßstäbliche Veränderungen des digitalisierten Modells und die Eingabe von Werkzeugkorrekturwerten.

Handeingabe-Steuerungen

Die Rechnerleistung moderner CNCs erlaubt es, ein **maschinenspezifisches NC-Programmiersystem** mit Grafik und interaktivem Bediener-Dialog zu integrieren. Damit wird die CNC zur leistungsfähigen Handeingabesteuerung und kann in der Werkstatt vom Bediener programmiert werden.

Handeingabesteuerungen haben den **Vorteil,** dass sie durch ihre **spezielle Auslegung** für eine bestimmte Maschine bezüglich Funktionalität und Leistungsfähigkeit optimal an deren konstruktive Gegebenheiten und Möglichkeiten angepasst sind. Nur so lassen sich sogar Drehmaschinen mit zwei Supporten, C-Achse und angetriebenen Werkzeugen mit Handeingabesteuerungen programmieren. Kollisionsbetrachtungen, Wartebedingungen und die Verteilung der Aufgaben auf beide Supporte ermittelt die Steuerung maschinenspezifisch viel schneller und berücksichtigt sie im Programmaufbau wesentlich systematischer als ein universelles Programmiersystem.

Die **Werkstattprogrammierung** hat sich insbesondere für das Drehen, Fräsen und Nibbeln/Stanzen durchgesetzt.

Maschinengebundene Handeingabesteuerungen haben den **Nachteil,** dass mit jedem neuen Maschinen-Fabrikat auch ein anderes Programmiersystem in die Werkstatt einzieht. Dies erschwert den Personal- und den Programmaustausch zwischen den Maschinen und ist auf Dauer nicht tragbar.

Die erzeugten NC-Programme sind zudem nicht für andere, bereits vorhandene Maschinen verwendbar. Dafür müsste dann noch ein weiteres Programmiersystem investiert werden, sodass AV und Werkstatt mit unterschiedlichen Systemen arbeiten. Dieser Nachteil ist für fortschrittliche Werkstattkonzepte nicht akzeptabel.

Aufgrund der maschinenspezifischen Programmiersoftware ist es nicht möglich, größere Maschinenparks mit einheitlichen Handeingabe-Steuerungen auszurüsten. Deshalb lehnen viele Großanwender Handeingabe-Steuerungen ab. Sie bevorzugen die universelle, identische Lösung für **Werkstatt und Programmierbüro**. So lassen sich kleinere Änderungen oder Modifikationen schnell und problemlos in der Werkstatt programmieren.

Erfahrene Anwender behaupten, erst seit Einführung der Programmierung in der Werkstatt hätte sich die Rentabilität ihrer CNC-Maschinen nachweislich verbessert.

WOP – Werkstattorientierte Programmierung

Dieses Projekt wurde gegen Ende der 70er-Jahre von der Uni Stuttgart, der IG Metall und einem WOP-Arbeitskreis gefördert. Ziel war die Entwicklung einer einheitlichen Programmier-Oberfläche für Handeingabe-Steuerungen. Unabhängig vom CNC-Fabrikat und von der Fertigungstechnologie sollte die Programmierung mit einer weitestgehend identischen Eingabe-Prozedur erfolgen. Einheitliche Dialoge und grafisch-interaktive Programmierung ohne abstrakte Programmiersprache sollten auch den Bediener-Austausch erleichtern. Diese hoch gesteckten Ziele wurden jedoch aus zwei Hauptgründen nie erreicht:

- Jeder CNC-Hersteller beharrte auf seinem eigenen Programmierprinzip und
- die Programmierung für die unterschiedlichen Fertigungstechnologien sind sehr typspezifisch und lassen sich nicht standardisieren.

Vergleicht man beispielsweise die Programmierung von Drehteilen mit Innen- und Außenbearbeitung und evtl. noch mit Stirnseiten- und Mantelflächen-Bearbeitung mit der Programmeingabe zum Fräsen und Bohren prismatischer Teile, dann erkennt man die unterschiedlichen Anforderungen sehr schnell. So entstanden mehrere unterschiedliche WOP-Systeme, von denen jedes für einen speziellen Maschinentyp ausgelegt war.

Durch die unterschiedlichen WOP-Systeme konnte das Problem der Systemvielfalt in den Werkstätten nicht beseitigt werden. Dies führte bei Unternehmen mit vielen NC-Maschinen zu der Überlegung, AV-Programmiersysteme werkstatttauglich zu machen. Mit dieser Lösung lassen sich dann auch die älteren NC-Maschinen ohne integrierte WOP einheitlich programmieren, was unbestreitbare Vorteile bietet.

Als nächste Stufe realisierte man die Integration von **Expertensystemen,** die in der Lage sind, nach abgeschlossener Geometrieeingabe den Arbeitsplan automatisch und ohne manuelle Hilfen zu erstellen.

Hinzu kam die Forderung, bei kleineren geometrischen oder technologischen Änderungen nicht die gesamte Eingabe wiederholen zu müssen. Der bereits erstellte Arbeitsplan muss sich beispielsweise geometrischen Korrekturen automatisch anpassen.

Viele der WOP-Zielvorgaben waren jedoch praxisgerecht und sind in den heutigen Programmiersystemen enthalten.

CAM – Computerunterstützte Programmierung *(Bild 2.5 und 2.6)*

Ein Programmiersystem ermittelt aus wenigen geometrischen Eingabedaten die komplette **Fertigteil-Geometrie** und alle Schnittpunkte, Übergänge, Aufmaße, Fasen und Rundungen. Anschließend erstellt das System den gesamten Bearbeitungsablauf incl. Schnittaufteilung, Werkzeugauswahl, Spindeldrehzahl, Vorschubgeschwindigkeit und Korrekturwertaufrufe.

Mit den **universellen Programmiersystemen** auf PC-Basis ist eine schnelle, einfache und zuverlässige Programmierung aller NC-Maschinen möglich. Zudem lässt sich der notwendige Geräteaufwand sowohl in der Arbeitsvorbereitung, als auch in der Werkstatt installieren. Dies erleichtert die Kommunikation zwischen Maschinenbediener und Programmierer und bietet viele Vorteile.

Im Rechner des Programmiersystems sind außer der eigentlichen Programmier-Software auch alle erforderlichen Karteien verfügbar, wie Maschinen-, Werkzeug- und Vorrichtungskartei, sowie die erforderlichen Postprozessoren.

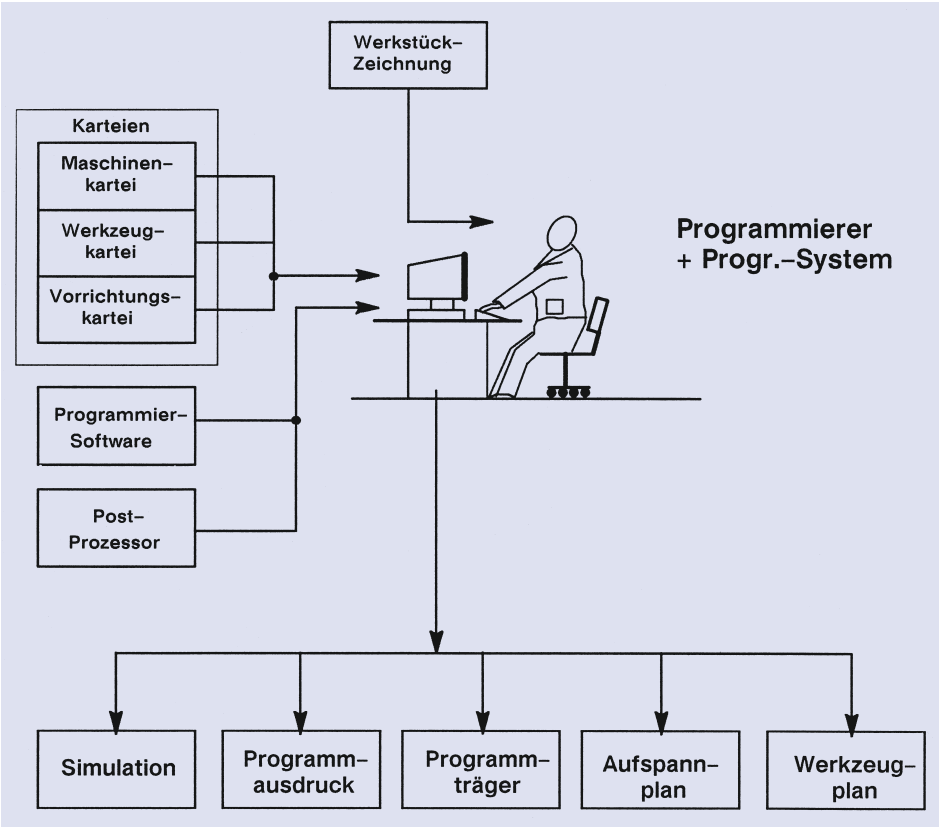


Bild 2.5: Das Prinzip der maschinellen NC-Programmierung.
Alle Fertigungsunterlagen und das NC-Programm werden mit dem Rechner erstellt, kontrolliert und abgespeichert.

Nach beendeter Programmierung und Simulation der Bearbeitung lassen sich alle Fertigungsunterlagen für die Werkstatt ausgeben, wie Programmliste, Programmträger, Aufspannplan und Werkzeugplan *(Bild 2.5)*. Das Prinzip und den Informationsfluss bei der computerunterstützten Programmierung zeigt *Bild 2.6*.

Kennzeichen aller rechnergestützten Programmiersysteme ist, dass **nicht die Werkzeugbewegungen** programmiert werden, sondern die exakten **Konturen und Formen des Werkstückes nach Zeichnung.** Die Auswahl der erforderlichen Werkzeuge und den Zerspanungsablauf generiert das System weitgehend automatisch, bis zum fertigen Werkstück. Trigonometrische Nebenrechnungen und das Blättern in Tabellen entfallen. Die Anzahl lauffähiger NC-Programme pro Zeiteinheit wird dadurch wesentlich größer, die Programmierung effektiver. Trotz der zusätzlichen Kosten für das Programmiersystem ist dieses Verfahren im Endeffekt wirtschaftlicher als die manuelle Programmierung.

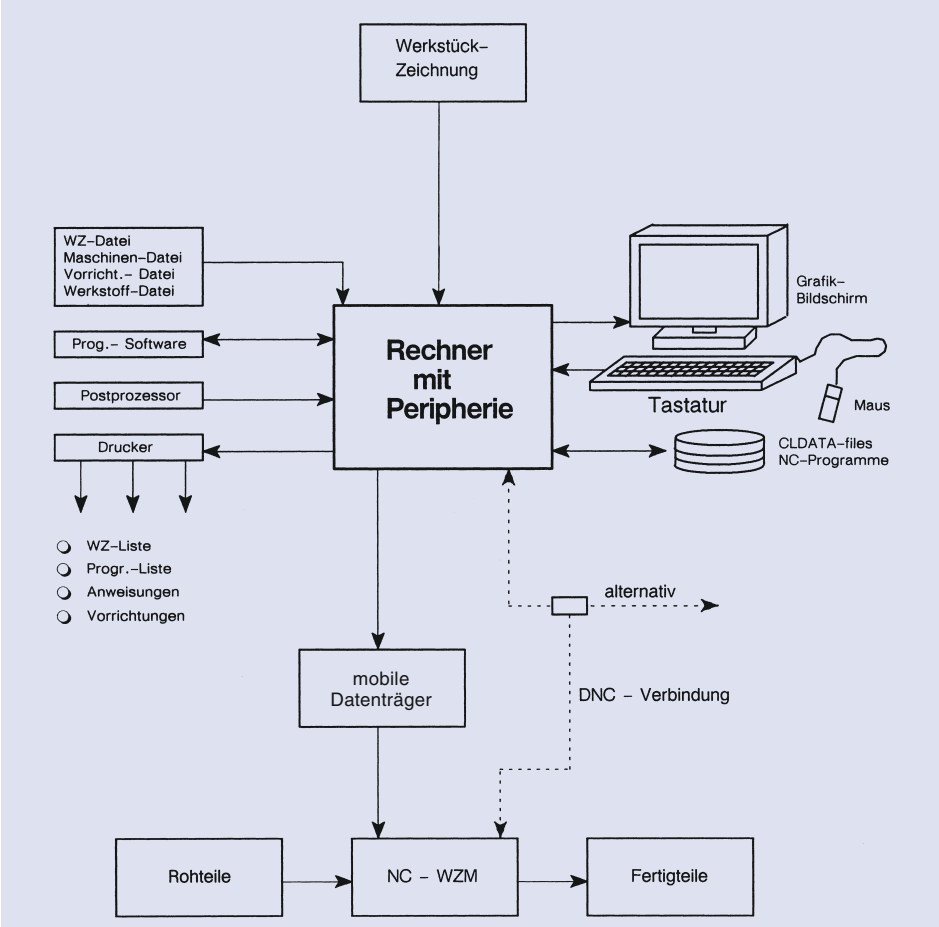


Bild 2.6: Informationsfluss bei der rechnerunterstützten (maschinellen) NC-Programmierung

Postprozessoren

Ist die Programmierung beendet, dann erzeugt das System ein generalisiertes Teileprogramm, auch als **Quellenprogramm** oder **CLDATA-File** bezeichnet. Dies lässt sich für jede geeignete NC-Maschine umsetzen. Dazu muss es noch im Rechner durch ein Anpassungsprogramm, den **Postprozessor,** an die Werkzeugmaschine angepasst werden, auf der es bearbeitet werden soll. Für jede Maschinen-/Steuerungskombination ist ein spezieller Postprozessor erforderlich, um das Teileprogramm in dem vorgeschriebenen Format ausgeben zu können. Einige Systeme verfügen über einen **generalisierten Postprozessor,** den der Anwender für jede Maschine selbst modifizieren kann. Andere Systeme kommen ohne Postprozessoren aus.

Hat der Programmierer vorgegebene Grenzwerte nicht eingehalten oder **Einga-**

befehler gemacht, die vom Programmiersystem nicht bemerkt wurden, so werden diese spätestens beim Postprocessing erkannt und mit Hinweis auf die Fehlerursache gemeldet. So berücksichtigt der Postprozessor beispielsweise Größe und Kinematik der Maschine, Grenzwerte für Vorschubgeschwindigkeit, Drehzahl und Werkzeuge, gibt die richtigen M-Befehle aus und ordnet Werkzeuge, Korrekturwerte und Referenzpunkte einander zu. Das Ergebnis ist ein sofort lauffähiges NC-Programm für eine bestimmte Maschine.

Die NC-Programmierung mittels einer **abstrakten „NC-Programmier-Sprache“** ohne Bedienerführung und ohne grafische Unterstützung, wie dies ursprünglich bei allen Programmiersprachen der Fall war, ist technisch überholt und heute nicht mehr anzutreffen.

Verwendung von CAD-Daten

Die NC-Programmierung muss auch im Hinblick auf den verstärkten Einsatz von **CAD-Systemen** betrachtet werden. Zeit und Aufwand für die Erstellung der Fertigungsunterlagen sowie die Fehlermöglichkeiten bei der Geometriedefinition lassen sich wesentlich reduzieren, wenn die im CAD-System ohnehin vorhandenen, geometrischen Werkstückdaten direkt zur NC-Programmierung verwendet werden können.

Voraussetzung für diese Datenkopplung sind einheitliche **Datenschnittstellen** am CAD- und am Programmiersystem, um die CAD-Geometriedaten problemlos in das NC-Programmiersystem übertragen zu können. Dort werden dann noch evtl. erforderliche Korrekturen durchgeführt, die Werkzeuge ausgewählt, die technologischen Daten hinzugefügt und das NC-Programm ausgegeben.

Man muss in diesem Zusammenhang darauf hinweisen, dass CAD-Systeme aufgrund ihrer hohen Leistungsfähigkeit für wesentlich höhere Aufgaben ausgelegt sind als zur NC-Programmierung. Nur mit dem Einsatz zur Teileprogrammierung lässt sich die Einführung eines CAD-Systems nicht rechtfertigen!

(→ Kapitel CAD – CAM – PLM)

2.3 NC-Programmierer

Erfahrungsgemäß eignen sich Facharbeiter und Techniker mit einigen Jahren Berufserfahrung an konventionellen Maschinen am besten für die Aufgabe als NC-Programmierer. Sie verfügen über das **notwendige Fachwissen** und können

- technische Zeichnungen lesen und daraus die Bearbeitung ableiten,
- die erforderlichen Arbeitsgänge festlegen, sowie
- technologische Kenntnisse über Werkzeuge, Werkstoffe, Schneidstoffe und Schnittwerte richtig einsetzen.

Zusätzlich bedarf es einiger Kenntnisse über

- die Maschine und ihre Möglichkeiten,
- die Programmieranleitung der Maschine,
- die Funktion der Befehle,
- die Achsbezeichnung und Fahranweisungen,
- die vorhandenen Automatisierungseinrichtungen, wie Werkzeugwechsel, Palettenwechsel, sowie
- die Lage der einzelnen Null- und Referenzpunkte.

Die **manuelle Programmierung** *(Bild 2.4)* stellt die höchsten Anforderungen an den Programmierer. Er muss diese Einzelheiten nicht nur von jeder Maschine und jeder Steuerung kennen, sondern noch mehrere trigonometrische Rechenoperationen be-

herrschen und fehlerfrei anwenden können. Hierin liegt die Problematik des manuellen Programmierens. Mehr als vier bis fünf NC-Maschinen kann der manuelle Programmierer deshalb auch nicht versorgen.

Die Arbeit des Programmierers wird dagegen wesentlich effektiver, wenn ihm ein geeignetes, universelles, leistungsfähiges **Programmiersystem** zur Verfügung steht *(Bild 2.5)*. Mit dessen Hilfe und nach entsprechender Einarbeitung sollte er in der Lage sein, mehrere Bearbeitungsverfahren, z. B. Drehen, Fräsen, Nibbeln/Stanzen und Drahterodieren zu programmieren. Auch wenn mehrere unterschiedliche Maschinen- und Steuerungsfabrikate mit NC-Programmen zu versorgen sind, ist dies kein Problem, da die Programmierung stets „neutral" erfolgt.

2.4 Arbeitserleichternde Grafik

(Bild 2.7 und 2.8)

Wesentlicher Bestandteil der computerunterstützten Programmierung ist die Bildschirm-Grafik. Zuerst bei den Programmiersystemen und dann auch in die CNCs integriert, erwiesen sie sich als der wesentliche Faktor für eine schnellere Akzeptanz und Verbreitung der NC-Technik.

Bei den grafischen Hilfen unterscheidet man nach

- **Eingabegrafik** für Geometrie und Technologie, die dem Programmierer Rohteil, Fertigteil und die zum Einsatz kommenden Werkzeuge und den Bearbeitungsverlauf sichtbar macht,
- **Hilfsgrafik** zur Anzeige von Bohrbildern, Fräs- und Drehzyklen, Spannmittel, Werkzeug-Geometrien und anderen, bearbeitungsspezifischen Funktionen, und
- **Simulationsgrafik,** die spätestens nach abgeschlossener Eingabe den Arbeitsablauf dynamisch darstellt und evtl. Eingabe- oder Ablauffehler gut erkennbar zeigt. Sie muss so gut sein, dass der Programmierer auf die Maschine als weiteres Kontrollmittel verzichten kann.

Diese Art der umfassenden grafischen Unterstützung gefällt dem NC-Programmierer am besten, da sie der Werkstattpraxis am nächsten kommt. Die Möglichkeit, den Programmaufbau Schritt für Schritt visuell verfolgen zu können, entspricht exakt der Tätigkeit an einer konventionellen Maschine. Auch dort ist die Übereinstimmung des Werkstückes mit der Zeichnung jederzeit kontrollierbar, wenn auch wesentlich zeitaufwändiger. Diese Methode „führt" den Programmierer im Fachdialog und gibt ihm ständige Sicherheit während der fortschreitenden Programmierung, was bei umfangreichen Programmen zu wesentlich kürzeren Programmierzeiten führt.

Der Vorteil der Grafikunterstützung zeigt sich ganz deutlich bei der **Eingabe von komplizierten Konturen und beim Bearbeiten nach dem Umspannen.** Sie ersetzt das sonst erforderliche abstrakte Denken in Achsen und Bewegungsabläufen.

Während der Eingabe wird auch mehrmals auf die **Hilfsgrafik** zugegriffen: Bei der Werkzeugauswahl, zur Definition der Sicherheitszonen, bei der Programmierung von Bohr- und Fräszyklen u. a. m.

Nach der Eingabe ermöglicht die **Simulationsgrafik** die Darstellung der Bearbeitung, meistens noch in mehreren Ansichten *(Bild 2.7)*. Bei einigen Systemen kann der Programmierer jederzeit, bei anderen erst nach abgeschlossener Programmierung kontrollieren, ob er einen Programmierfehler gemacht hat. Bei der **Echtzeit-Simulation** lässt sich gleichzeitig die Bearbeitungszeit ermitteln, jedoch mit dem

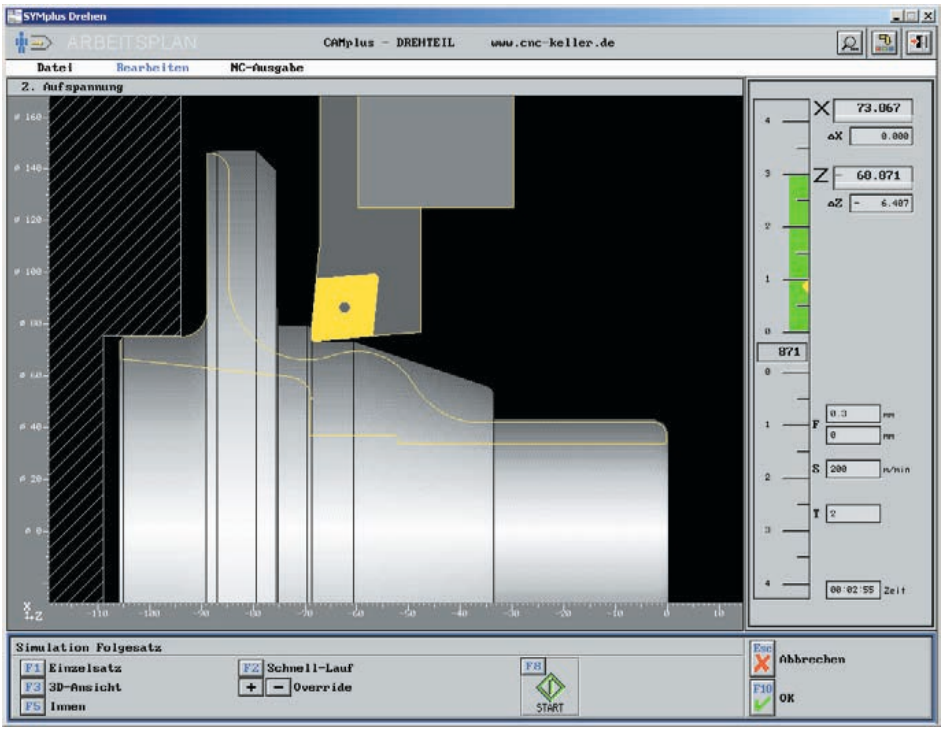


Bild 2.7: Echtzeit-Simulation einer Drehbearbeitung (Spannung 2. Seite). (CAMplus Drehen, Werkfoto Fa. Keller)

Nachteil, dass der ganze Vorgang zu lange dauert und deshalb nicht immer genutzt wird. Deshalb lässt sich die Bearbeitung auch im Zeitraffer-Tempo darstellen.

Bei der **Parallel-Simulation,** die am CNC-Bildschirm zeitgleich (synchron) zur Bearbeitung abläuft, kann der Bediener jederzeit die Bearbeitung des Werkstückes in der Maschine verfolgen. Dies ist von Vorteil, wenn z.B. eine direkte Beobachtung wegen des Kühlmittels nicht möglich ist.

Fast alle Systeme zeigen während der Simulation auch die einzelnen Werkzeuge im richtigen Maßstab zum Werkstück, und zwar sowohl bei der Außen-, als auch bei der Innenbearbeitung. Der Beobachter kann erkennen, wie das Teil seine Form verändert, ob das Werkzeug evtl. mit der Rückseite oder dem Schaft mit dem Werkstück kollidiert und ob alle Stellen einwandfrei bearbeitet werden. Dazu ist Voraussetzung, dass der Anwender seine Werkzeuge mit allen Daten auch selbst grafisch eingeben und verändern kann.

Die **Simulationsgrafik** ist ohne Zweifel der bedeutendste Schritt in Richtung höherer Sicherheit. Kollisionen zwischen Werkzeug, Werkstück und Spannvorrichtung oder Geometriefehler sind leicht zu erkennen und lassen sich korrigieren, bevor es kracht. Dadurch lässt sich die Ausschussquote bei einmaligen, großen oder teueren Werkstücken deutlich reduzieren.

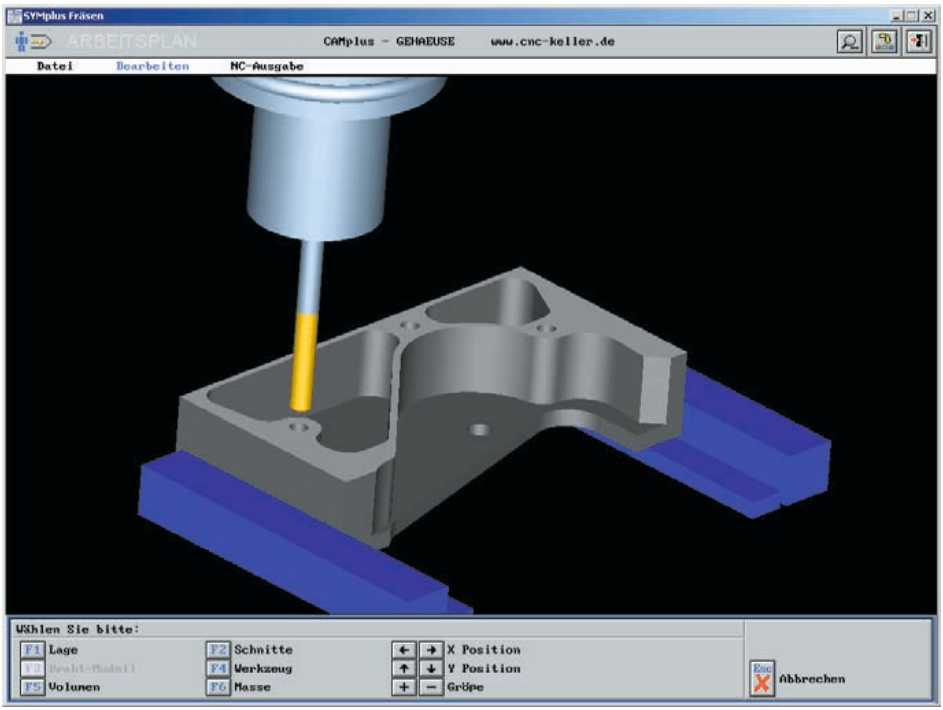


Bild 2.8: 3D-Ansicht eines Frästeils während der Simulation. (CAMplus Fräsen, Werkfoto Fa. Keller)

2.5 Verteilte Intelligenz *(Bild 2.9)*

Untersuchungen haben bewiesen, dass der Schwierigkeitsgrad beim NC-Programmieren nur durch die Komplexität der Werkstücke und nicht durch den verwendeten Maschinentyp, das Bearbeitungsverfahren oder die numerische Steuerung bestimmt wird.

Je komplizierter die Werkstücke bezüglich Formen, Übergängen, Flächen und Nachbearbeitungen sind, desto höher ist die zum Programmieren erforderliche Intelligenz.

Diese Intelligenz sollte im richtigen Verhältnis auf drei Bereiche verteilt sein *(Bild 2.9)*:

1. Den Programmierer,
2. das Programmiersystem,
3. die CNC, die heute meistens über ein integriertes Programmier-System verfügen.

Jeder dieser drei Bereiche bietet bei entsprechender Auslegung spezifische Vorteile, um eine wirtschaftliche Programmierung zu ermöglichen.

Der **Programmierer** muss gut geschult sein und sollte sich mit seiner Erfahrung auf die Programmierung der herzustellenden Werkstückgeometrie konzentrieren können. Dafür muss er das Programmiersystem sehr gut kennen, um alle vom System angebotenen Programmierhilfen und -erleichterungen voll nutzen zu können.

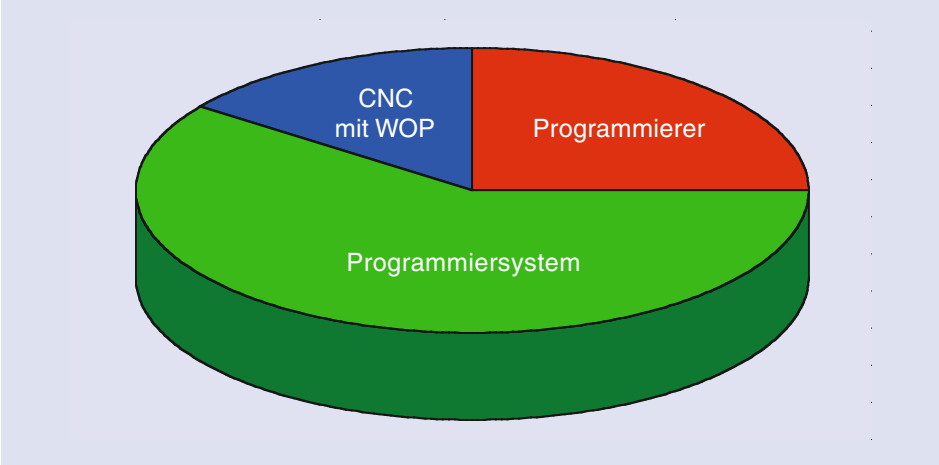


Bild 2.9: Prinzip der verteilten Intelligenz auf die drei an der Programmerstellung beteiligten Bereiche

Das **Programmiersystem** sollte mit Bedacht und nach seiner Leistungsfähigkeit für die zu programmierenden Bearbeitungsverfahren ausgewählt werden und keinen finanziellen Kompromiss darstellen. Wichtigstes Ziel: Es müssen auf Anhieb fehlerfreie, lauffähige Programme an die Maschine gegeben werden können. Dies lässt sich weitgehend anhand der Bearbeitungs-Simulation überprüfen. Bei größeren Stückzahlen ist mit jedem System eine Programm-Optimierung möglich.

Schließlich sollten auch die eingesetzten **numerischen Steuerungen** entsprechend leistungsfähig sein. Kleinere Korrekturen müssen problemlos eingefügt werden können, um die Wartezeiten auf geänderte Programme zu verkürzen.

2.6 Auswahl des geeigneten Programmiersystems

Fehlerfreie Teileprogramme sind eine wesentliche Voraussetzung für den rentablen Betrieb von NC-Maschinen. Zudem müssen die Programme schnell und mit geringsten Kosten hergestellt werden können. **Je flexibler der Einsatz der NC-Maschinen sein soll, umso wichtiger ist eine leistungsfähige Programmierung.**

Die Entscheidung für eines der am Markt verfügbaren NC-Programmiersysteme ist schon deshalb nicht sehr einfach, da jedes Fabrikat spezielle Vorteile bietet, dafür aber an anderen Stellen kleinere oder größere Kompromisse verlangt.

Als **Entscheidungsgrundlage** sollte man deshalb zuerst folgende Einflussgrößen untersuchen:

- **Werkstück-Spektrum**
  Teilefamilien
  Größe, Gewicht
  Ähnlichkeitsgrad
  Rohteilgeometrie
  Kompliziertheit der Werkstückgeometrie
  Anzahl der erforderlichen Werkzeuge
  Aufwand zur Technologie-Ermittlung.

- **NC-Maschinenpark**
  Anzahl der NC-Maschinen
  Bearbeitungsverfahren

Typenvielfalt der NC-Maschinen (Maschinengröße)
Typenvielfalt der NCs
Automatisierungsgrad
Werkstück- und Werkzeugwechsel.

- **Planungskennzahlen**

Anzahl neuer NC-Programme pro Woche/Monat/Jahr
Anzahl archivierter Programme
Wiederholhäufigkeit
Losgröße.

- **Organisationsfragen**

Verfügbare Rechner
Neu zu installierende Rechner
Vorhandenes bzw. geplantes Datennetz
DNC-System
CAD/CAM-Kopplung
Personal-Qualifikation
NC- und Programmier-Erfahrung.

Während der NC-Anfänger bei der Auswahl einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine meist noch über eigene Erfahrungen verfügt, steht er bei der Frage der Programmierung einem großen Angebot gegenüber, deren Vor- und Nachteile er nicht kennt. Die Furcht, falsch zu kaufen, darf jedoch nicht zur Zurückhaltung führen! Leistungsfähige Programmiersysteme auf PC-Basis inclusive der erforderlichen Postprozessoren sind heute absolut erschwinglich und müssen deshalb von Anfang an in die Planung und Finanzierung einer NC-Fertigung mit einbezogen werden.

Einflussfaktoren, die eindeutig für die maschinelle, d. h. computerunterstützte Programmierung sprechen, sind:

- Ein hoher Rechenaufwand, selbst bei einfachen Werkstück-Geometrien
- Ein umfangreiches Werkstück-Spektrum,
- Komplexe Werkstück-Geometrien und -Oberflächen,
- Werkstätten mit einer großen Typenvielfalt bezüglich Maschinen und Steuerungen,
- Maschinen mit hohem Automatisierungsgrad,
- Flexible Fertigungssysteme für große Werkstück-Spektren,
- Viele neue NC-Programme pro Jahr mit geringer Wiederholrate,
- Sowie noch NC-unerfahrene Programmierer.

Alle Verkäufer von Programmiersystemen sind davon überzeugt, dass ihr System das beste für jeden Anwendungsfall ist. Deshalb muss der Käufer anhand einiger Kriterien schon selbst prüfen, welchem System er den Vorzug gibt. Um die eigenen Forderungen mit den Leistungsmerkmalen der einzelnen Systeme zu vergleichen, ist das **Nutzwert-Analyseverfahren** bestens geeignet, denn die Prioritäten sind bei fast jedem Anwender anders verteilt. Schließlich sollte noch ein Besuch bei einem oder mehreren Anwendern des ins Auge gefassten Systems erfolgen, um letzte Erkenntnisse bezüglich Handhabung, Beurteilung, Zufriedenheit und Service zu erhalten. Diese lassen sich nicht in Zahlen ausdrücken, höchstens in Kosten.

Auf jeden Fall müssen folgende Merkmale unter die Lupe genommen werden:

- Die **Rechnerhardware** und das **Betriebssystem**
- vorhandene Daten-**Schnittstellen** zu DNC- und CAD-Systemen
- die **geometrische Leistungsfähigkeit** anhand einfacher und komplizierter Werkstück-Geometrien, unterschiedlicher Bemaßung etc.
- nachträgliche Korrekturmöglichkeiten von Geometrie und Technologie
- die **technologische Leistungsfähigkeit**

bei der Auswahl der Werkzeuge, Schnittdaten, Bearbeitungsfolgen, Zyklenaufruf
- die grafisch-dynamische **Simulation** mit **Kollisionsüberwachung** zwischen Werkzeugen und Maschine, Spannvorrichtung und Werkstück
- die **Universalität**, d. h. die Programmierung unterschiedlicher Maschinentypen mit 2 bis 5 NC-Achsen, 3D-Betrieb, Drehmaschinen mit angetriebenen Werkzeugen, und die vorhandenen **Postprozessoren** (sofern erforderlich)
- der **Programmierkomfort,** incl. Bedienerfreundlichkeit und Anzeigen
- die angebotenen **Schulungen, Dokumentation, Anlaufhilfen**
- der **Einführungs- und Betriebsaufwand**
- vorgesehene **Weiterentwicklungen**
- sowie der **Bekanntheits- und Verbreitungsgrad** im In- und Ausland.

Anhand dieser Kriterien wird sich zeigen, ob man das richtige System ins Auge gefasst hat. Zusagen des Verkäufers, die evtl. kaufentscheidend sind, sollte man sich unbedingt schriftlich bestätigen lassen. Und vor allem: **Lassen Sie unbedingt den Programmierer mitentscheiden, der später mit dem System arbeiten soll!**

Natürlich besteht auch die Möglichkeit, für die einzelnen Bearbeitungsverfahren unterschiedliche Programmiersoftware zu verwenden – was jedoch mit höheren Kosten und zusätzlichen Problemen verbunden ist.

2.7 Zusammenfassung

Die NC-Programmierung hat einen ganz entscheidenden Einfluss auf Wirtschaftlichkeit und Rentabilität der NC-Fertigung. Deshalb muss die Auswahl des Programmiersystems und die Schulung des Personals zumindest mit der gleichen Sorgfalt vorbereitet werden wie die Maschinenbeschaffung. Im späteren täglichen Einsatz wird sich sehr bald zeigen, dass es nicht ausreicht, die NC-Maschinen lediglich „zum Laufen zu bringen“.

Bis auf wenige Ausnahmen, wie z. B. Zahnradfräsmaschinen oder Rohrbiegemaschinen, die durch Eingabe von wenigen Parameterwerten für einen mehrstündigen Betrieb zu programmieren sind, sollten rechnergestützte Programmiersysteme bevorzugt werden. Sie ersparen dem NC-Programmierer umfangreiche Rechenarbeit, ermöglichen einen realitätsnahen grafisch-dynamischen Programmtest am Bildschirm und führen in kürzester Zeit zu fehlerfreien NC-Programmen. Zudem lassen sich im Notfall die gespeicherten Quellenprogramme schnell und problemlos für Ersatzmaschinen umsetzen.

Bei komplizierten Werkstückformen und -oberflächen, aber auch bei großen, teuren und komplexen Maschinen, sowie bei teuren Werkstücken sind leistungsfähige Programmiersysteme unverzichtbar. Diese ersetzen jedoch keineswegs die intensive Schulung und praktische Ausbildung des Programmierers. Nach dem Prinzip der verteilten Intelligenz müssen Programmierer, Programmiersystem und CNC über eine ausreichende Leistungsfähigkeit verfügen.

Die **Auswahl** des Programmiersystems richtet sich im Wesentlichen nach der für den Anwendungsfall geeigneten, verfügbaren und möglichst universellen Software. Von Speziallösungen sollte man Abstand nehmen, da diese erfahrungsgemäß früher oder später zu unlösbaren Problemen führen.

Auch die Verwendung von **zwei oder mehr Programmiersystemen** kann im einen oder anderen Falle durchaus sinnvoll und wirtschaftlich sein. Das gilt auch beim

Einsatz von Handeingabe-CNCs in Kombination mit einer zentralen Programmierabteilung. Beide können sich im praktischen Alltag sehr gut ergänzen.

Wichtigste Forderung ist, die Produktivität und Flexibilität der NC-Maschinen durch eine problemlose Programmierung nutzen zu können.

Programmierung von CNC-Maschinen

Das sollte man sich merken:

1. Unter **NC-Programmierung** versteht man generell das Erstellen der Steuerinformationen zur Bearbeitung von Werkstücken auf CNC-Maschinen.
2. Unter **manueller Programmierung** versteht man das Schreiben und Abspeichern eines Teileprogramms im Satzformat nach DIN 66 025 für eine bestimmte Maschine/Steuerung. Hierbei muss der Programmierer die erforderlichen **Werkzeugbewegungen** Schritt für Schritt festlegen.
3. Die **manuelle Programmierung** setzt Kenntnisse in Mathematik und Trigonometrie voraus und erfordert viel Zeit für Nebenrechnungen. Programmierfehler werden erst an der Maschine erkannt.
4. Neben den geometrischen Daten muss der Programmierer auch die **technologischen Werte** ermitteln und eingeben: Drehzahl, Vorschub, Spantiefe, Korrekturen usw.
5. Unter **maschineller Programmierung** versteht man das Erstellen eines Teileprogramms mit Rechner-Unterstützung. Die Ausgabe erfolgt zunächst in einem allgemein gültigen Ausgabe-Format (CLDATA-File). Dessen Anpassung an eine bestimmte Maschinen-/Steuerungs-Kombination erfolgt durch den **Postprozessor.**
6. Bei der **grafisch unterstützten Programmierung** werden das zu fertigende Werkstück und das Rohteil programmiert. Die erforderliche Werkzeug-Reihenfolge, die technologischen Werte und die auszuführenden Bewegungen ermittelt das Rechnerprogramm weitgehend automatisch.
7. Die heute verfügbaren **Programmiersysteme** bieten farbige Grafik-Bildschirme, Interaktive Dialoge zur Bedienerführung, die grafisch-dynamische Simulation der programmierten Bearbeitung und Ausbau zum DNC-Betrieb.
8. Die Übernahme von **Werkstück-Geometriedaten aus einem CAD-System** erfordert einheitliche Daten-Schnittstellen.
9. Die **Werkstatt-Programmierung** kann mittels CNC-integriertem Programmiersystem an der Maschine **oder** im maschinennahen Bereich erfolgen, beispielsweise auf einem PC.
10. Wichtigstes Ziel der NC-Programmierung ist, **auf Anhieb lauffähige, fehlerfreie Programme** zu erzeugen, die ohne langwierige Probeläufe und Programmkorrekturen das gewünschte Werkstück erzeugen. Die Zeitoptimierung kommt erst an zweiter Stelle, wenn in großen Stückzahlen produziert werden soll.
11. Die **Wirtschaftlichkeit** jeder NC-Fertigung ist in hohem Maße von der Programmierung abhängig. Je leistungsfähiger das Programmiersystem ist, umso schneller stehen fehlerfreie Programme an der Maschine zur Verfügung.
12. Unter **„NC-Programmierung“** sollte man **nicht** das mühselige, langwierige und fehlerbehaftete Lösen komplizierter trigonometrischer Rechenaufgaben verstehen, sondern die systematische, einfache Beschreibung des Werkstückes im interaktiven Dialog und mit grafischer Sofortkontrolle des erzeugten Programms.

3 NC-Programmier-systeme

Dipl.-Inform. (FH) Ralf Weissinger, Dipl.-Inform. Roland Aukschlat, Ing. Franz Imhof

Multifunktionsmaschinen und komplexe Werkstücke erfordern eine leistungsfähige NC-Programmierung. Je nach Art der Fertigung sind dabei die Prioritäten unterschiedlich. Oft kommen die Daten der zu fertigenden Werkstücke aus verschiedenen Quellen. Vor der Festlegung auf ein bestimmtes Programmiersystem sollte deshalb der Anwender die Kriterien genau kennen.

3.1 Einleitung *(Bild 3.1)*

Die Anforderungen an die NC-Programmierung unterliegen den anspruchsvollen Anforderungen der Fertigungsindustrie und sind somit ständigen Veränderungen unterworfen. Hohe Produktvielfalt und immer kürzere Produktlebenszyklen prägen die Produktionslandschaft. So kommt es, dass immer komplexere Bauteile in immer kleineren Losgrößen zu fertigen sind. Als Reaktion darauf werden die CNC-Werkzeugmaschinen immer leistungsfähiger und multifunktionaler. Die geforderte Flexibi-

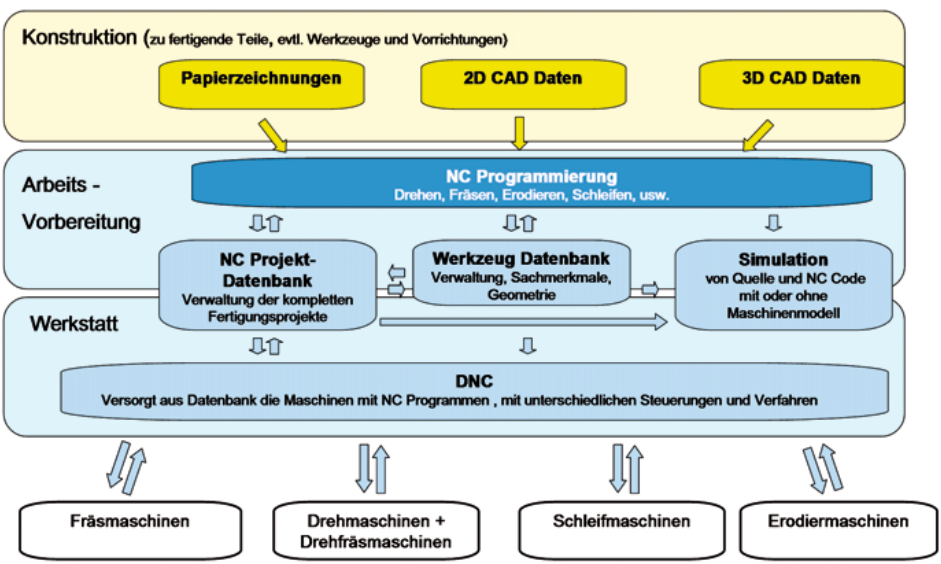


Bild 3.1: Übersicht der Software-Module und Schnittstellen zwischen Konstruktion und Fertigung

lität schlägt sich in einer vermehrten Installation von „fast universellen“ Bearbeitungsanlagen nieder.

Dadurch ist in den letzten Jahren der Anspruch an die CAM-Systeme enorm gestiegen. Dabei wird es immer wichtiger, die teilweise sehr unterschiedlichen und zahlreicher werdenden Bearbeitungsverfahren einer Komplettbearbeitung mit demselben CAM-System zu beherrschen.

3.2 Bearbeitungsverfahren im Wandel

Für die unterschiedlichen Bearbeitungsverfahren wie Drehen, Fräsen, Brennschneiden, Schleifen, Erodieren, Blechdrücken oder Steinbearbeitung *(Bild 3.2)* und für jedes Material (verschiedene Metalle, Guss, Kunststoff, Holz, Glas usw.) sind auch spezifische Bearbeitungsstrategien erforderlich.

Mittlerweile werden Drehmaschinen zu Universalmaschinen erweitert, mit denen auch Bohr- und Fräsaufgaben ausgeführt werden können. Und es existieren Fräsmaschinen, mit denen auch gedreht werden kann. Solche universelle CNC-Maschinen für kombinierte Bearbeitungsverfahren werden zunehmend eingesetzt, um höhere Genauigkeiten und kürzere Bearbeitungszeiten zu erreichen. Allerdings stellen solche Maschinen auch höhere Anforderungen an die Programmierung.



Bild 3.2: NC-gesteuerte Steinsäge mit Sägeblatt D 1,5 m (Robert Schlatter GmbH).

Moderne NC-Programmiersysteme müssen den Wechsel zwischen den unterschiedlichen Bearbeitungsverfahren voll beherrschen. Die Anwender fordern, alle Verfahren im beliebigen Mix mit demselben Programmiersystem und derselben Benutzeroberfläche programmieren zu können *(Bild 3.3 und 3.4)*.

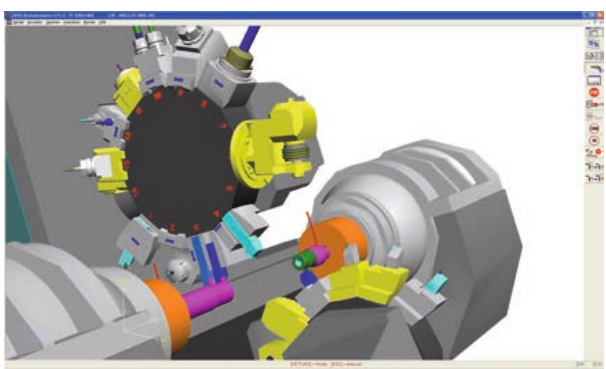


Bild 3.3: INDEX Dreh-Fräszentrum in der Simulation

Mit dem Mix von 3D-Freiformflächen-Bearbeitung und 2½-D Fräsen/Bohren setzt sich dieser Trend zur Verfahrenskombination fort. In Zukunft wird auch die reine 3D-Bearbeitung nicht mehr akzeptiert werden können. Es wird immer mehr gefordert, auch hier die Mischprogrammierung für beide Anforderungen mit nur einem System bewerkstelligen zu können *(Bild 3.5 und Bild 3.6).*

3.3 Der Einsatzbereich setzt die Prioritäten

Betrachtet man die Einsatzbereiche Musterbau bzw. Einzelteilfertigung, Kleinserienfertigung und die eigentliche Produktion detaillierter, so wird der Bedarf der Anpassbarkeit sehr deutlich. Hier werden völlig unterschiedliche Anforderungen sowohl an das Programmiersystem, als auch an die erzeugten NC-Programme gestellt.



Bild 3.4: Dreh-Fräs- oder Fräs-Dreh-Maschine (Mori Seiki)

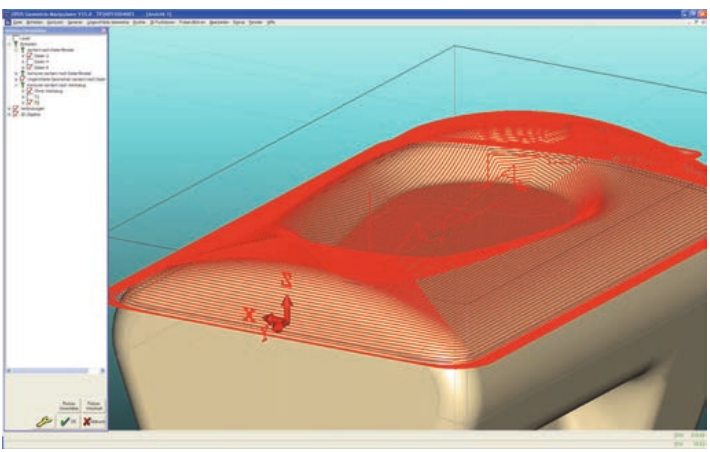
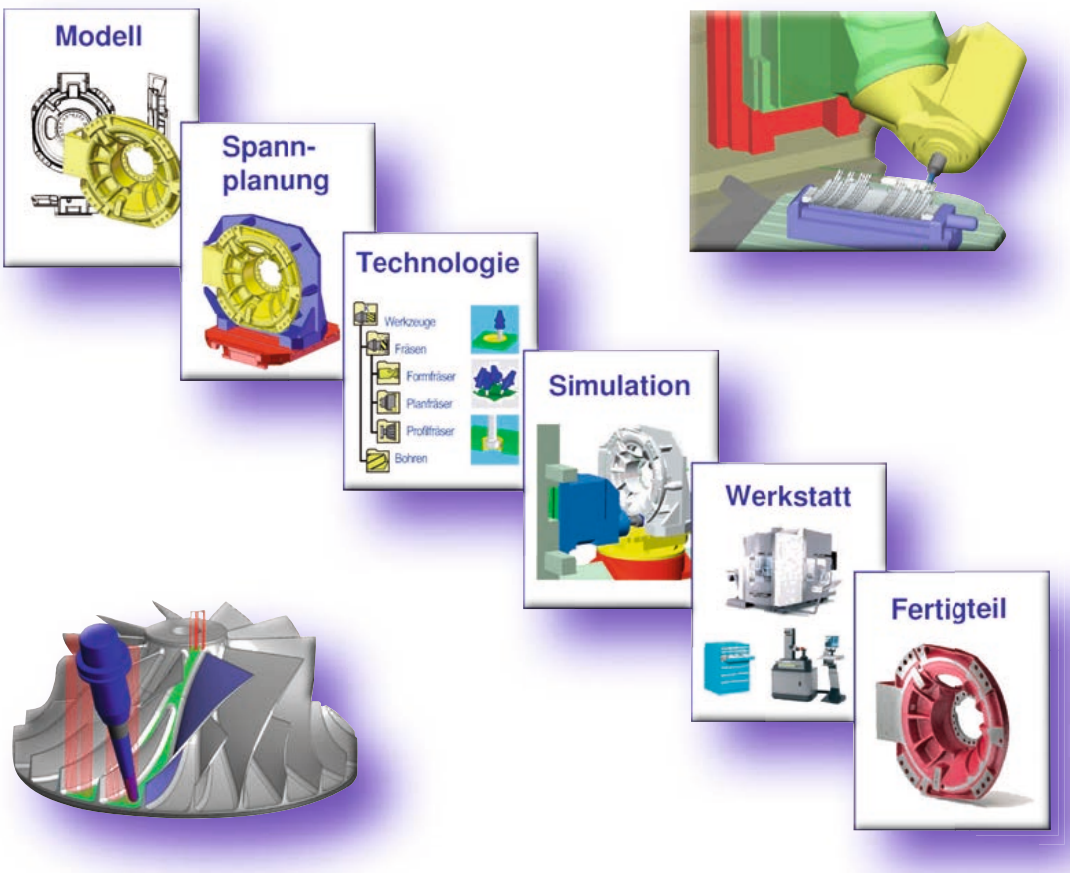


Bild 3.5: Darstellung von Freiformflächen (3D-Bearbeitung). Die Geometrie wird durch gleichzeitige Werkzeugbewegung in allen Achsen erzeugt.

EXAPT

CAD/CAM-Lösungen für Fertigung und Organisation

NC-Programmierung – Simulation – DNC
Produktionsdaten- und Toolmanagement



EXAPT – bewährter Partner der Industrie

EXAPT Systemtechnik GmbH Postfach 10 06 49 · D-52006 Aachen · Tel.: +49 241 477940 · Fax: +49 241 47794299
Geschäftsstelle Gießen Philipp-Reis-Straße 5 · D-35440 Linden · Tel.: 06403/90930 · Fax: 06403/909333
www.exapt.de · info@exapt.de

FACHZEITSCHRIFTEN | FACHBÜCHER | ONLINE-SERVICES | SEMINARE

HANSER

Informativ, exklusiv, industrienah.

Jetzt auch als Digitale Ausgabe!

www.werkstatt-betrieb.de



WB WERKSTATT+BETRIEB bietet Ihnen in 10 Ausgaben pro Jahr Expertenwissen für den wirtschaftlichen Zerspanungsprozess – informativ, exklusiv und industrienah.

IM ONLINE-PORTAL WERKSTATT-BETRIEB.DE finden Sie nicht nur das Zeitschriften-Archiv mit Artikeln ab Mitte 2002, sondern auch zahlreiche weiterführende Informationen und News.

Es gibt zwei verschiedene Versionen von **WB WERKSTATT+BETRIEB:**

- **NEU! DIGITALE AUSGABE** (für PC, MAC, Tablets und Smartphones)
- **PRINT PLUS DIGITALE AUSGABE**

Mehr Informationen und Bestellformulare für Ihre kostenlosen Ausgaben unter **www.werkstatt-betrieb.de**





Ihr direkter Weg zu WB WERKSTATT + BETRIEB

Carl Hanser Verlag · Kolbergerstr. 22 · 81679 München · Tel.: +49 89 99830-303 · Fax: +49 89 984809 · abo-service@hanser.de · www.werkstatt-betrieb.de

Kennzeichnend für den **Musterbau** ist die Anforderung, schnell zu zuverlässigen, kollisionsfreien Programmen zu kommen. Dabei ist die größte Priorität eine möglichst kurzen Programmierzeit, sowie die Möglichkeit, Änderungen schnell einfügen zu können. Ziel ist eine kurze Einfahrzeit neuer Programme auf der Maschine. Die Optimierung der Prozesszeit ist hier eher zweitrangig.

Diese ist bei **Einzelfertigung** oder wenigen Teilen nicht das wirtschaftliche Kriterium. Da das Arbeiten mit völlig neuen NC-Programmen möglicherweise mehrmals täglich vorkommt, müssen diese schnell und fehlerfrei zu den Maschinen kommen. Hier liegt das größere Einsparpotenzial in der Vermeidung von Wartezeiten auf neue NC-Programme. Diese müssen auch, z. B. durch eine vorhergehende, qualifizierte grafisch-dynamische Simulation fehlerfrei sein, damit Kollisionen zwischen Maschine/Werkzeug/Werkstück absolut ausgeschlossen werden können.

Bei der Einzelfertigung ist in bestimmten Fällen bereits der Rohling sehr teuer und Ersatz nicht einfach zu beschaffen. Deshalb wird schon beim Einfahren neuer Programme die „Null-Fehler-Bearbeitung“ gefordert *(Bild 3.7)*.

Völlig andere Kriterien werden in der **Serienproduktion** angesetzt. Hier kommt es vor allem auf die eigentliche Prozesszeit an. Die Zeit für die Planung und Programmierung verteilt sich auf sehr viele zu fertigende Teile und ist eher zweitrangig. Für die Serienfertigung sind Möglichkeiten zum Optimieren der Bearbeitung sogar auf Sekundenbruchteile gefragt. Diese liegen vorwiegend in der Optimierung der Bearbeitungsreihenfolge, der Optimierung der Werkzeugwege und in der Nutzung von Mehrfach-Spannvorrichtungen. Nicht weniger wichtig sind maschinenspezifisch optimierte Postprozessoren, die beispielsweise in der CNC gespeicherte Bearbeitungszyklen nutzen.

Zusätzlich muss auch hier die Kollisionsgefahr durch qualifizierte Simulationen zuverlässig vermieden werden. Sonst verlängern sich die unproduktiven Einfahr-

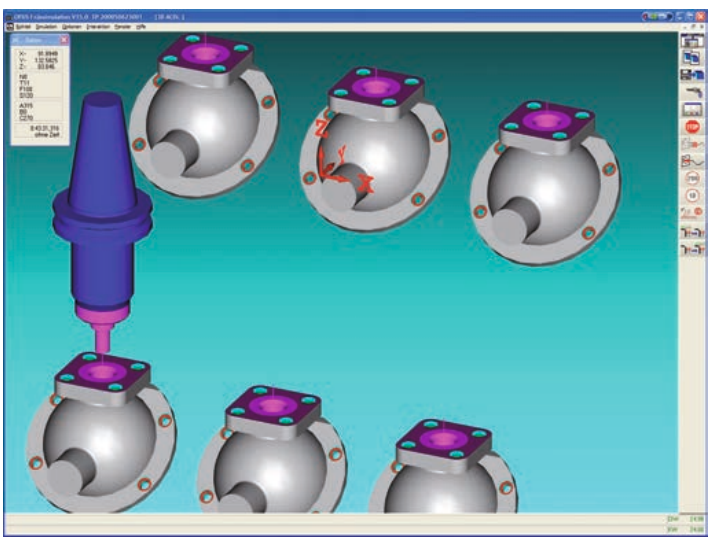


Bild 3.6: 2 ½-D-Bearbeitung. Formabbildendes Werkzeug erzeugt Ergebnisgeometrie durch Z-Zustellung.

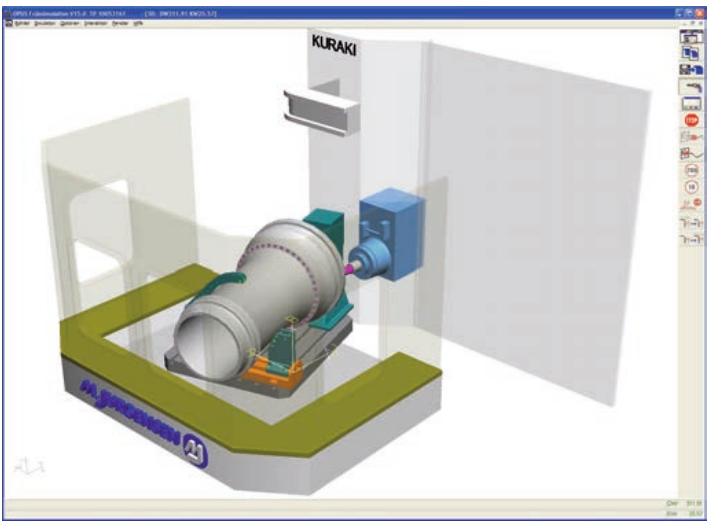


Bild 3.7: Zylinderlaufbuchse (Länge ca. 1.500 mm) Beispiel für sehr teuren Rohling in der Einzelteilfertigung.

zeiten infolge zu großer Vorsichtsmaßnahmen des Personals.

3.4 Eingabedaten aus unterschiedlichen Quellen

Mit den Anforderungen an die NC-Programmiersysteme hat sich auch das Spektrum der Eingabemöglichkeiten erweitert. Waren es zunächst nur die reinen Geometriedaten der zu fertigenden Teile, so kommen mittlerweile auch 3D-Daten der Werkzeuge und Spannmittel sowie die spezifischen Technologiedaten der einzelnen Bearbeitungsverfahren hinzu. Den Standard bilden hier generell 2D-Daten verschiedener Schnittstellenformate und zunehmend 3D-CAD-Daten (meist STEP). Ergänzend stehen Daten über vorhandene Werkzeuge, Maschinen (für die Simulation) wissensbasierte Technologiedaten sowie in letzter Zeit vereinzelt auch Featuredaten zur Verfügung. Trotzdem gibt es noch immer auch die Konstruktionszeichnung auf Papier. Das CAM-System muss auch in derartigen Fällen manuelle Eingabemöglichkeiten bieten.

3.5 Leistungsumfang eines modernen NC-Programmiersystems (CAM)

Die Aufgaben eines NC-Programmiersystems liegen in der effizienten Unterstützung des Programmierers und gehen dabei weit über die eigentliche Erstellung eines NC-Programms hinaus. Sie betreffen sowohl das Handling der Geometriedaten für das zu fertigende Teil, als auch die Handhabung und Neuerfassung von Werkzeugen, sowie deren Bereitstellung im Datenpool. Mit systeminternen Funktionen muss ein Datenmodell geschaffen werden, welches als eindeutige Basis zur automatischen Generierung geeigneter Bearbeitungsstrategien dienen kann. Hierzu gehört auch die Bereitstellung der zugehörigen Technologiedaten, wie Werkzeug, Vorschub, Drehzahl, Schnittgeschwindigkeit, Schnitttiefe usw. Durch Einsatz entsprechender Simulationstools können die Bearbeitungsstrategien verifiziert und optimiert werden.

Trotz aller Automatismen, die bei Rou-

tineaufgaben zu einem hohen Zeitgewinn beitragen, empfiehlt es sich darauf zu achten, ob das System über eine offene Systemstruktur und einen Editor für NC-Programme verfügt. Mit einem derartigen Systemkonzept wird nicht nur dem NC-Programmierer, sondern auch der Arbeitsvorbereitung bzw. dem Fertigungsplaner die Möglichkeit geboten, das System individuell unter seinen Aspekten auszugestalten und ebenfalls zu nutzen. Diese kurz umrissene Aufgabenvielfalt der NC-Programmiersysteme macht deutlich, wie hoch die Anforderungen an ein leistungsfähiges CAM-System heute sind.

3.6 Datenmodelle auf hohem Niveau

Um ein exaktes Datenmodell im System zu erhalten, muss das CAM-System die eingebrachten Geometriedaten (2D- oder 3D-CAD-Daten) auf Vollständigkeit und Konsistenz prüfen, sowie auf ein einheitliches „Niveau“ bringen. Liegt eine Konstruktionszeichnung auf Papier vor, so ist ein 2D-Konstruktionstool im System erforderlich, damit der Benutzer die Informationen der Zeichnung in eine systeminterne 2D-Darstellung übertragen kann.

Bei der automatischen Übernahme von fertigen 2D- oder 3D-CAD-Daten mit unterschiedlichen Formaten (STEP, IGES und CAD-eigene Formate) gilt es, diese Formate lesen zu können und in das interne Format zu konvertieren, sodass die Weiterverarbeitung der Geometrie in gleichartiger Weise erfolgen kann. CAD-Zeichnungen enthalten eine Menge von Daten, die für die Programmierung völlig irrelevant sind. Diese sind z. B. Schraffuren, Zeichnungsrahmen, Textangaben, Maßlinien und vieles andere mehr. Hier gilt es, durch einen integrierten Datenfilter bereits beim Einlesen die richtigen Elemente komfortabel selektieren zu können.

3.7 CAM-orientierte Geometrie-Manipulation

Sind zur Darstellung einer Zeichnung einzelne Linien und Kreise bzw. Kreissegmente völlig ausreichend, so werden für deren Weiterverarbeitung zu einem NC-Programm zwingend zusammenhängende Konturzüge benötigt. Da die übernommenen Daten diese im Normalfall nicht in der benötigten Qualität aufweisen, muss das CAM-System in der Lage sein, diese zu sortieren, zu korrigieren und in den richtigen Konturzusammenhang zu bringen. Dies betrifft z. B.

- Verlängern oder Trimmen von Konturelementen
- Vereinfachen von Konturen
- Auftrennen, Verbinden, Schneiden,
- Einfügen und Ändern von Radien, Fasen und Einstichen
- Verschieben, Drehen, Strecken, Kopieren und Spiegeln
- Generierung äquidistanter Konturen
- …

Notwendig ist es auch, Elemente mit nicht mittig liegenden Toleranzen unter Beachtung der Anschlusselemente korrigieren zu können. In jedem Fall ist es erforderlich, dem System Informationen über die Höhe des jeweiligen Körpers bzw. die Tiefe einer Tasche zu vermitteln. Gelingt dies nicht über die Geometriedaten, so hat es später umständlich über die Tiefenzustellung der Werkzeuge zu erfolgen.

Die Konstruktionslage entspricht in den seltensten Fällen der Lage bei der NC-Programmierung bzw. auf der Maschine. Deshalb besteht die Anforderung, die Geometrien auf einfache Weise im Raum ausrichten zu können. Unterschiedlichen Seiten müssen unterschiedliche Nullpunkte (auf der Maschine) zugeordnet werden können.

Sind 3D-Modelle der Werkstücke verfügbar, lassen sich mit modernen Systemen auch diese zur Generierung von 2½-D-Programmen heranziehen. Aus den exakten 3D-Daten im System können 2D-Geometrien wie Ebenen, Zylinderflächen, Schnitte durch Volumina oder Projektionen von Flächen als Kontur mit ergänzenden Informationen zur Lage im Raum abgeleitet werden.

Sind keine CAD-Daten vorhanden, muss der Programmierer in der Lage sein, ohne Zuhilfenahme eines CAD-Systems mit den verfügbaren Funktionen im CAM-System die komplette, notwendige Geometrie zur Programmerstellung selbst zu generieren.

Komplexe Werkstücke beinhalten eine derartige Menge von Geometriedaten, dass es dem Programmierer teilweise schwer fällt, den Überblick zu behalten. Es ist daher zwingend notwendig, ihn mit geeigneten Hilfsmitteln und Verwaltungsfunktionen zu unterstützen. Hierbei ist es sinnvoll, mit Farben, Transparenz, Strichstärken, Stricharten und speziellen Kantenausprägungen die Darstellung von Elementen, Konturen, Körpern und Flächen hervorzuheben. Ebenso empfehlen sich die Vergabe von Namen und Layern, sowie Techniken zum komfortablen Ein- und Ausblenden von relevanten bzw. irrelevanten Objekten. Eine hervorragende Möglichkeit ist beispielsweise, bearbeitete Flächen automatisch ausblenden zu können.

3.8 Nur leistungsfähige Bearbeitungsstrategien zählen

Die „Königsdisziplin“ im CAM-System bildet die Generierung der Bearbeitungsstrategien. Hier gilt es, den Geometriedaten des zu fertigenden Teils das geeignete Werkzeug, die zugehörigen Technologiedaten und die einzelnen Bearbeitungsschritte zu einer leistungsfähigen Bearbeitungsstrategie zusammenzuführen.

Für normale Bearbeitungen wie beim Fräsen oder Drehen sind abrufbare, standardisierte Strategien üblich, z. B.:

- Fräsen
  - Umfahren von Konturen bzw. Konturbereichen
  - Ausräumen von Taschen mit und ohne Inseln
  - Gewindefräsen
  - Schlitzfräsen
  - Gravieren
  - Bohrzyklen
- Drehen
  - Vorbearbeiten
  - Schruppen mit Schnittaufteilung
  - Schlichten
  - Stechen *(Bild 3.8)*

Derartige Bearbeitungsstrategien lassen sich quasi auf Knopfdruck automatisch generieren *(Bild 3.9)*.

Doch die eigentlichen Anforderungen bestehen darin,

- dem Anwender einen konfigurierbaren, anwendungsspezifischen Standard zur Verfügung zu stellen
- abweichende und neue Werkzeuge, Technologien und Parameter problemlos zu integrieren
- anwenderspezifische Belange, wie z. B. Werkzeugkatalog oder spezielle wissensbasierte Datenbanken in das System einzubringen
- vorhandene Bearbeitungsstrategien auch auf andere Geometrien zu übertragen
- einen direkten Zusammenhang zwischen Geometrie und Bearbeitung herzustellen, sodass bei einer Geometrie-Änderung automatisch, die Änderung der entsprechenden Bearbeitungen erfolgt.

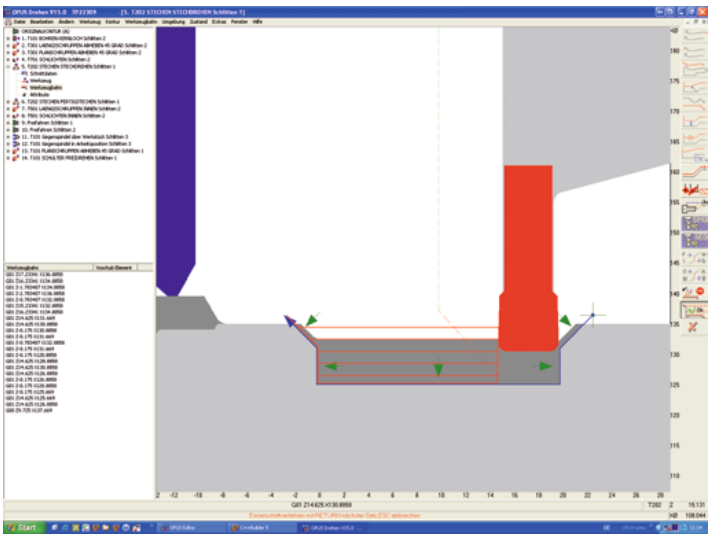


Bild 3.8: Bahnberechnung für Stechdrehen

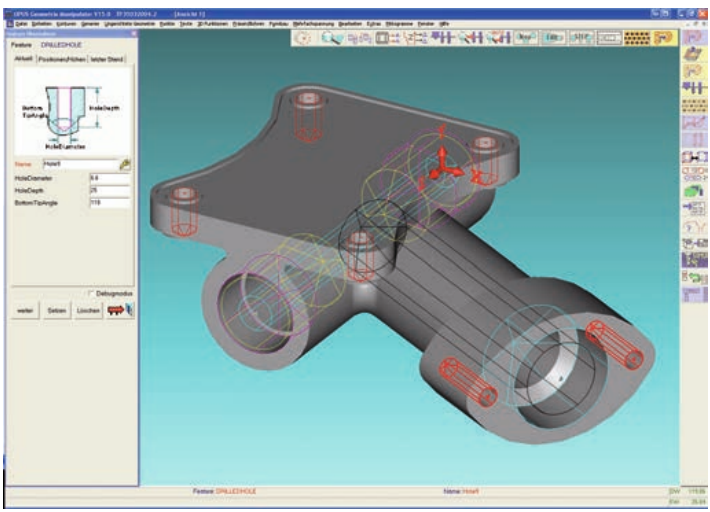


Bild 3.9: Aus dem CAD ins CAM übernommen und in Bearbeitungsfolgen umgesetzt (automatisch).

3.9 3D-Modelle bieten mehr

Bereits heute zeichnen sich CAM-Systeme ab, die 3D-Modelldaten direkt zur 2½-D-Programmgenerierung nutzen können. Die Übernahme von Modelldaten aus den unterschiedlichen CAD-Systemen stellt dabei kein Problem mehr dar. Früher waren die Schnittstellen oft ein Problem für die Konsistenz und Vollständigkeit der Daten. Heute bieten diese teilweise sogar die Möglichkeit, Fehler bei der Konsistenz des Ursprungsmodells zu erkennen und gegebenenfalls zu reparieren. Denn auch hier gilt dasselbe wie bei der Zeichnung; das gute Aussehen alleine genügt nicht. Das Modell

muss logisch einwandfrei sein und darf z. B. keine offenen Kanten aufweisen. Darüber hinaus müssen neben diesen automatischen Korrekturschritten dem Benutzer auch Möglichkeiten zur manuellen Modellvereinfachung an die Hand gegeben werden. Im einfachsten Fall kann sich das auf das Ausblenden von Löchern, Fasen und Taschen beziehen, um sich gegebenenfalls ein geeignetes Modell des Rohteils selbst zu generieren. Für den Programmierer ist es wichtig, aus fertigungstechnischer Sicht notwendige Manipulationen im gewohnten Umfeld, d. h. im CAM-System, abwickeln zu können. Direkte, konstruktive Änderungen haben auch in Zukunft nur durch den Konstrukteur zu erfolgen. Bei ihm muss die Hoheit und die Verantwortung für das Produktdesign bleiben.

Auf der 3D-Basis ist es möglich, für die Verfahrwege (bis 5-Achs-Bahnen) die entsprechenden Kanten und Flächen abzuleiten *(Bild 3.10)* und damit eindeutig die Positionen und Normalen zu definieren.

3.10 Innovativ mit Feature-Technik

Definition nach VDI 2218:
Features sind informationstechnische Elemente, die Bereiche von besonderem (technischem) Interesse von einzelnen oder mehreren Produkten darstellen.

Wenn das verwendete 3D-CAD-System in der Lage ist, Geometrieelementen erweiterte Informationen anzuhängen, kann ein modernes CAM-System daraus alle benötigten Werkzeuge und Bearbeitungsreihenfolgen ableiten. Dabei ist zu beachten, dass im 3D-Modell nur geometrische und konstruktiv relevante Informationen benötigt werden.

Einzelne Systeme versuchen, durch Anhängen von Werkzeug- und Technologieinformationen an CAD-Objekte zu einer automatischen Programmgenerierung zu gelangen. Dies ist natürlich der völlig falsche Weg. Der Entwickler muss bei seiner Kernkompetenz – der Konstruktion – blei-

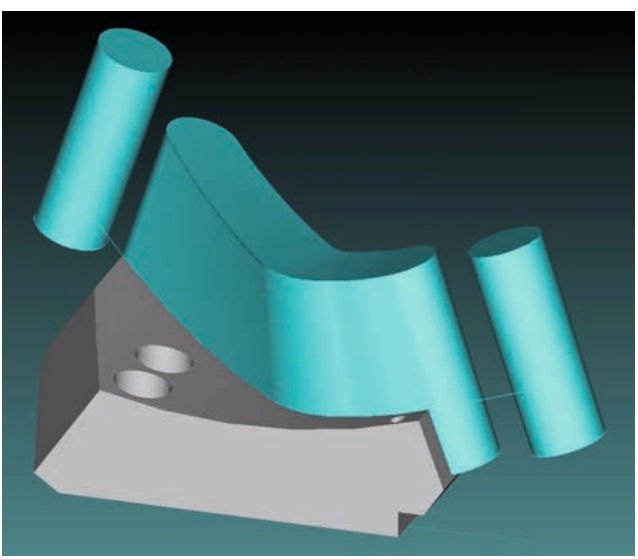
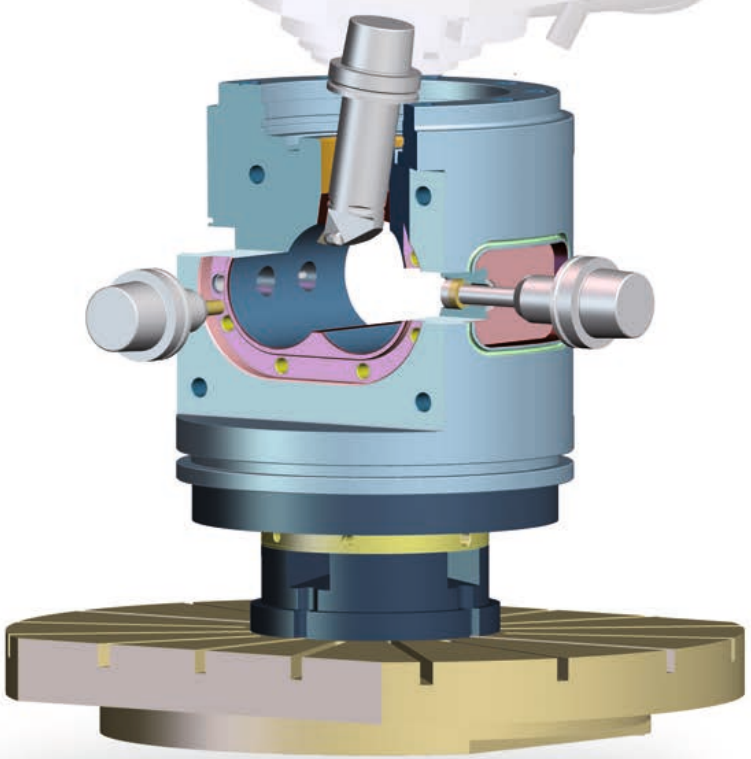


Bild 3.10: 5-Achsbahn, abgeleitet durch Fläche und Kante

TEBIS VORSPRUNG ▸▸ KOMPLETTBEARBEITUNG

Drehen, Fräsen, Bohren – jetzt ist alles eins.



Mit dem neuen Tebis Modul zur Drehbearbeitung meistern Sie die Komplettbearbeitung Ihrer Bauteile perfekt – und das in ein und derselben Umgebung. Dafür bildet Tebis in den virtuellen Modellen Ihrer Bearbeitungszentren nicht nur Geometrie und Kinematik, sondern auch die Werkzeugbestückung der Maschinen realitätsgetreu ab. Die Tebis Werkzeugverwaltung stellt dabei die Werkzeuge und Technologiewerte für alle bei Ihnen benötigten Bearbeitungsarten in einer gemeinsamen Datenbank zur Verfügung. Und in den Tebis Automill®-NC-Schablonen speichern Ihre NC-Programmierer erprobtes Fertigungswissen und erstellen damit NC-Programme auf Knopfdruck. Schließlich prüft der Tebis Simulator vor der Bearbeitung alle Bewegungen der Maschinen auf Kollision und Einhaltung des Bearbeitungsraums. Fazit: Mit der Tebis Komplettbearbeitung läuft die NC-Bearbeitung fürs Bohren, Fräsen und Drehen störungsfrei – bis zum Abspannen des fertigen Bauteils.

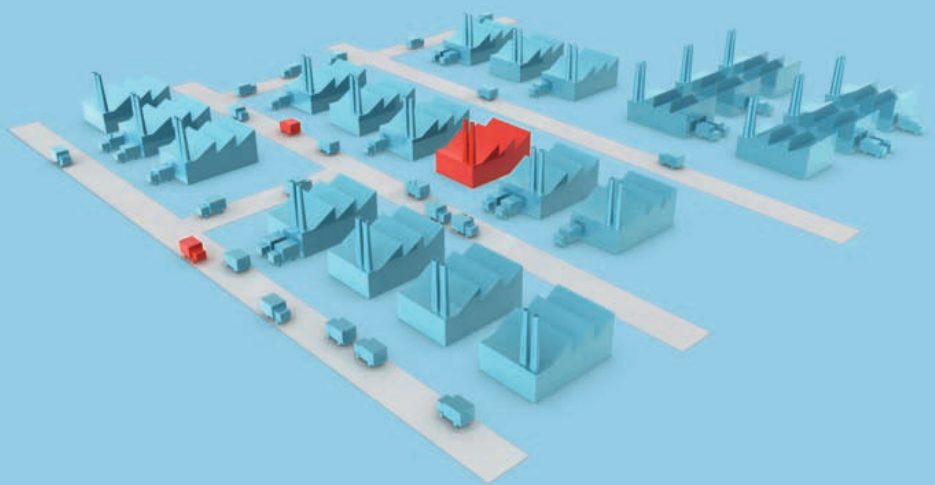
Mehr Informationen unter www.tebis.com

tebis
DIE CAD/CAM EXPERTEN

Tebis Technische Informationssysteme AG, Einsteinstr. 39, 82152 Martinsried/Planegg, Telefon 089 / 81 803-0, info@tebis.com, www.tebis.com

HANSER

Immer einen Schritt voraus



DIE ZWF ZEITSCHRIFT FÜR WIRTSCHAFTLICHEN FABRIKBETRIEB vermittelt Ihnen in 10 Ausgaben pro Jahr neue Technologien, innovative Prozessketten und zukunftsorientiertes Qualitätsmanagement – also das Wichtigste für den Fabrikbetrieb von morgen.

IM ONLINE-PORTAL ZWF-ONLINE.DE finden Sie nicht nur das für Abonnenten kostenfreie Zeitschriften-Archiv mit Artikeln ab 2001, sondern auch weitere topaktuelle News, Tipps und Informationen.

SICHERN SIE SICH JETZT IHR KOSTENLOSES PROBEHEFT!
Einfach online anfordern unter **WWW.ZWF-ONLINE.DE**



ben und darf nicht mit Themen der Fertigung belastet werden. Zudem liegt während der Konstruktionsphase in den seltensten Fällen bereits fest, auf welcher Anlage und mit welchen Werkzeugen das Teil später gefertigt wird. Somit besteht die Anforderung, eine klare Trennung zwischen Geometrie und Technologie zu ziehen.

Dabei wird klar, dass die Modellgenerierung nicht nur unter optischen Gesichtspunkten betrachtet werden darf. Informationen zu Toleranzen, Gewinde, Oberflächenqualität und vieles mehr müssen konsistent und im richtigen logischen Zusammenhang mit dem Modell verknüpft sein.

Das CAM-System, ob integriert oder als eigenständiges System genutzt, hat dann die verfügbaren Informationen zu nutzen um daraus die optimalen Bearbeitungen abzuleiten.

3.11 Automatische Objekterkennung

Leider ist die Verfügbarkeit solcher Feature-Daten sowohl von dem verwendeten CAD-System (und dessen Konfiguration) als auch von dem jeweiligen Entwickler bzw. Konstrukteur abhängig. Es ist deshalb vorteilhaft, wenn das CAM-System zusätzlich in der Lage ist, beispielsweise Bohrungsdaten aus dem CAD-Modell abzuleiten. In diesem Fall muss der Programmierer fehlende Informationen, wie z. B. Passungsdaten, manuell ergänzen können. Gemeinsam mit diesen Informationen können dann dieselben Bearbeitungen und Werkzeuge wie bei vollwertigen Featuremodellen abgeleitet werden *(Bild 3.11 und 3.12)*.

3.12 Bearbeitungsdatenbank

Höhere Transparenz und beschleunigte Abläufe können mit der Einrichtung einer Bearbeitungsdatenbank erzielt werden. Es empfiehlt sich, die Ausgestaltung einer derartigen Datenbank an der anwender-

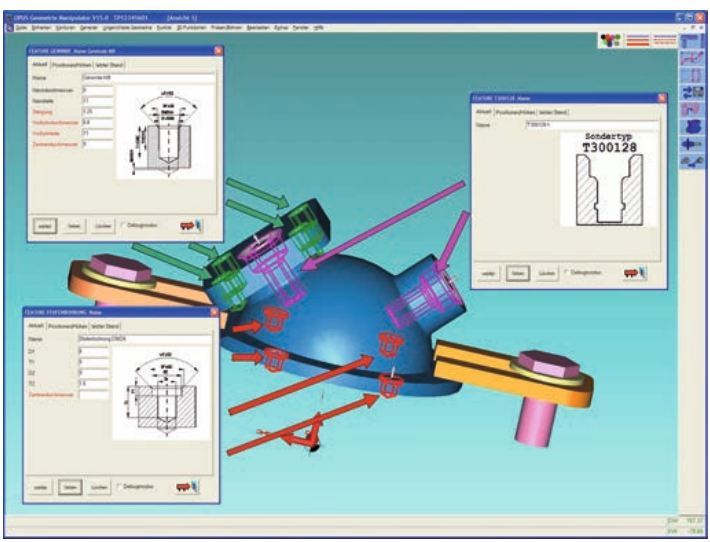


Bild 3.11: Teil mit erkannten Features, u. a. Sonderbohrung mit Spezialwerkzeug

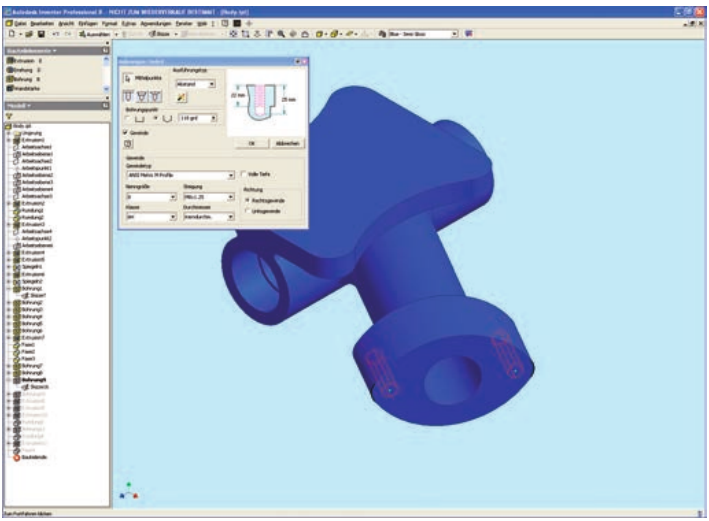


Bild 3.12: Features im CAD-System (Autodesk Inventor)

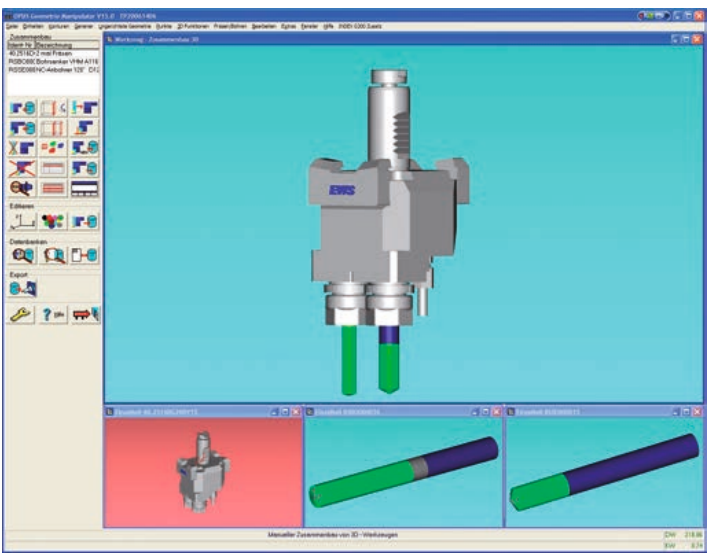


Bild 3.13: EWS Werkzeug für Dreh-Fräszentren; Darstellung von Komponenten und Zusammenbau

spezifischen Infrastruktur auszurichten. Zu beachten ist dabei die jeweilige spezielle Einsatz-Charakteristik, die durch bestimmte Merkmale, beispielsweise immer wieder verwendeter Bearbeitungsstrategien, bestimmt wird. Gängige Datenstrukturen bestehen einerseits darin, dass die Datensätze im Verhältnis 1 : 1, also Geometrie und die zugehörige komplette Bearbeitungsstrategie abgelegt werden. Andererseits können vordefinierte Bearbeitungen auch anderen Geometrien zugeordnet werden.

3.13 Werkzeuge

In dieser Prozesskette sind die Werkzeuge von zentraler Bedeutung. Sowohl die automatische Programmgenerierung als auch eine qualifizierte Simulation sind ohne vollständige und konsistente Werkzeugmodelle nicht denkbar. Werkzeugverwaltung aus fertigungstechnischer Sicht kann nicht bei der Erfassung und dem Speichern von Werkzeugdaten stehen bleiben. Vielmehr müssen sowohl die geometrischen als auch die technologischen Ausprägungen derart verfügbar sein, dass das CAM-System möglichst automatisch darauf zugreifen kann *(Bild 3.13)*. So wird es möglich, zusammen mit den Feature-Informationen z. B. für eine Stufenbohrung die richtigen Werkzeuge automatisch zu ermitteln. Auf diese Art und Weise kann auch gewährleistet werden, dass bei einer Änderung z. B. einer Gewindebohrung von M8 nach M10 sowohl die Bearbeitung als auch die Werkzeugauswahl automatisch nachgezogen wird. Auch das Einpflegen von neuen, technologisch besseren Werkzeugen hat so automatisch Auswirkungen auf die zukünftige Auswahl des optimalen Werkzeuges.

3.14 Aufspannplanung und Definition der Reihenfolge

Am Ende der Programmierung sollte das CAM-System die Werkzeug- und Bearbeitungsreihenfolge automatisch optimieren können. Dabei müssen z. B. die Anbohr-Operationen aller Bohrungen zusammengefasst und die neu entstandenen Verfahrwege optimiert werden. Kollisionsgeometrien am Modell oder durch die Aufspannung sind dabei zu berücksichtigen. Die endgültige Reihenfolge muss selbstverständlich noch durch den Benutzer geändert werden können. Auch hier sollte größtmöglicher Komfort durch sofortige Visualisierung aller Aktionen selbstverständlich sein *(Bild 3.14 und 3.15)*.

Dabei sollte die Planung der Bearbeitung zunächst Maschinen unabhängig erfolgen können. Ein Teil muss nicht zwingend in der Lage gefertigt werden, in der es zunächst programmiert wird. Verschiebungen und Lageänderungen durch das Spannen können von den Postprozessoren automatisch berücksichtigt werden. Damit gestaltet sich das Umspannen eines Teils in eine andere Aufspannung/Lage sehr einfach. Bei der Serienproduktion trägt die Mehrfachaufspannung zu einer beachtlichen Verkürzung der Stückzeit bei. Die Bearbeitungen können an nur *einem* Teil definiert werden. Bei der Mehrfachaufspannung dieses Teiles werden diese Bearbeitungen an die neue Lage „vererbt“, sodass im Prozessablauf mehrere Teile in verschiedenen Lagen abgearbeitet werden können. Auch hier greift die Reihenfolge-Optimierung ein und kann die Werkzeugfolge und Bearbeitungswege bezogen auf das Gesamtszenario neu berechnen. Bei den Verfahrbewegungen werden prinzipiell möglichst kurze und schnelle Bewegungen angestrebt. Das wird in der Regel durch geringe Rückzugswege erreicht. Die eigentliche Problematik liegt hier in der Kollisionsgefahr bewegter Maschinenteile mit dem eingespannten Teil oder mit den Spannmitteln. Ein genereller Rückzug auf eine stets sichere Position ist unter Serienbedingungen nicht akzeptabel.

3.15 Die Simulation bringt es auf den Punkt

In diesem Zusammenhang kommt der Simulation als wichtiges, zusätzliches Hilfsmittel der NC-Programmierung eine immer größere Bedeutung zu.

Sie erstreckt sich über die Betrachtung

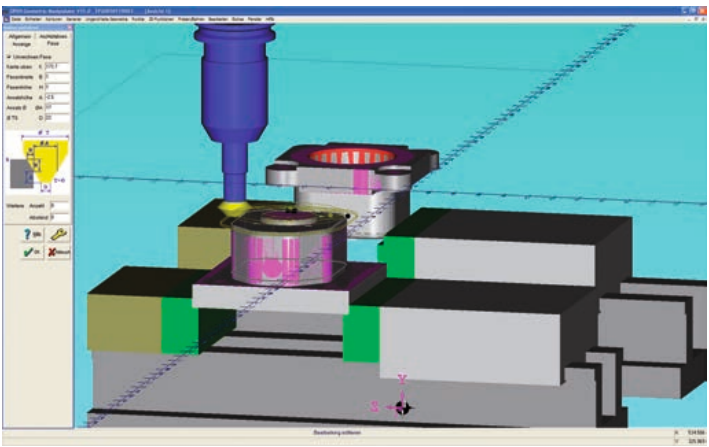


Bild 3.14: Planung der Bearbeitung des gleichen Teils von zwei Seiten

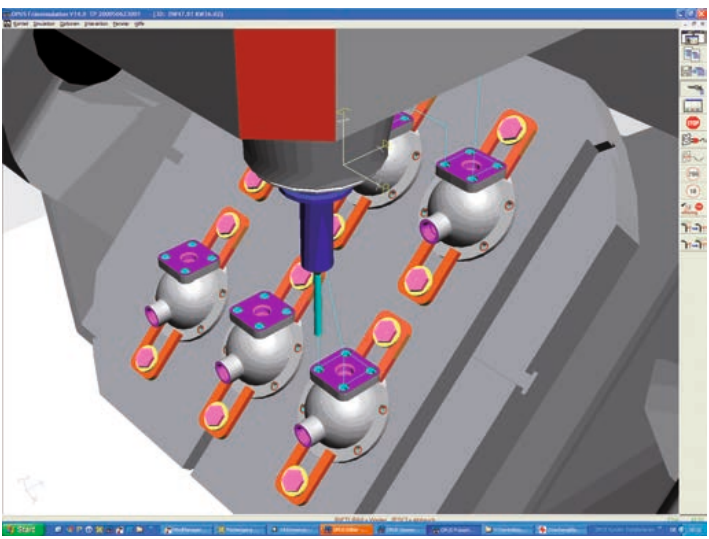


Bild 3.15: Simulation einer Mehrfachaufspannung

der Werkzeugwege am Werkstück bis hin zum Gesamtszenario auf der kompletten Maschine. Dabei sollte es sich um Quellen- und NC-Code-Simulation unter Einbeziehung des jeweiligen Maschinenmodells handeln. Besonders wichtig ist die dynamische Verfolgung des Bearbeitungsfortschritts, sodass der Materialabtrag nach jeder Bearbeitung, sowie der Zustand des bearbeiteten Teils sichtbar werden (Rohteilaktualisierung). So wird es möglich, komplexeste Bearbeitungsfolgen am Ende der Programmierung ablaufen zu lassen um die Kollisionsfreiheit zu garantieren.

Bevor das Programm auf die Maschine kommt, sollte deshalb die Simulation des Gesamtszenarios mit einer möglichst genauen Abbildung des Maschinenmodells stehen.

(Siehe Kapitel „Fertigungssimulation“)

3.16 Postprozessor

Unabhängig davon, wie komfortabel die Daten bisher generiert wurden, die Steuerung der NC-Maschine benötigt in jedem Fall ihren speziellen NC-Code. Dieser weicht mittlerweile bei jedem Steuerungstyp mehr oder weniger stark von der in DIN 66025 festgelegten Syntax ab. Es ist nun die Aufgabe des Postprozessors, eines zum CAM-System gehörenden Programmteiles, die bisher entstandenen Daten in genau die benötigte Syntax der jeweiligen Steuerung/Maschine-Kombination zu übersetzen. Gute Systeme sind modular aufgebaut, sodass der Postprozessor nicht im allgemeinen Systemcode verborgen ist. Trotzdem sollte sich das CAM-Systemhaus auch um diesen letzten Schritt kümmern, hat doch der Postprozessor einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis der gesamten Programmierarbeit. Hier wird festgelegt, ob Steuerungszyklen und Unterprogramme genutzt werden können. Ebenso ob die Fräserradius bzw. Schneidenradiuskompensation in vollem Umfang ansprechbar sind. Nicht zuletzt ist der Postprozessor auch für die Generierung weiterer Daten wie Werkzeuglisten, Aufspannpläne und Hilfsprogramme z. B. für das Werkzeug-Voreinstellgerät zuständig. Er übernimmt auch die Zuordnung von Fräsbearbeitungen auf der Drehmaschine oder die Aufteilung der gesamten Bearbeitungsaufgabe auf mehrere Einzelmaschinen.

3.17 Erzeugte Daten und Schnittstellen zu den Werkzeugmaschinen

Bei der Anbindung des NC-Programmiersystems an den Maschinenpark sollte nach Möglichkeit auch die Erwartungshaltung der Anwender Berücksichtigung finden. Sie stellen oft zusätzliche fertigungsspezifische Anforderungen, wie z. B.

- Zuordnen von NC-Programmen zu bestimmten Maschinen/Gruppen
- Freigeben/Sperren einzelner NC-Programme (auch Gruppen)
- Zurückschicken von optimierten Programmen
- Vergleichen von Original und zurückgeschicktem Programm
- Protokollieren der Datenübertragungen, Einsätze, u. a.

Um dieses Anforderungsspektrum erfüllen zu können, ist eine über DNC verbundene NC-Programmverwaltung erforderlich.

(Siehe Kapitel DNC)

3.18 Zusammenfassung

Die Wirtschaftlichkeit einer CNC-Fertigung ist sehr stark von der Leistungsfähigkeit des NC-Programmiersystems abhängig. Programmieren besteht nicht nur aus der Eingabe der Werkstückabmessungen, es muss der gesamte Fertigungsablauf für jede Maschine passend vorgegeben und alles, was dafür erforderlich ist, mit berücksichtigt werden. Deshalb ist es vor der Festlegung auf ein bestimmtes Fabrikat unbedingt erforderlich, dass sich der Käufer umfassend informiert und Systemvergleiche vornimmt.

Es sind nicht nur die zu programmierenden unterschiedlichen Bearbeitungsverfahren und CNC-Maschinen zu betrachten, sondern auch die Anforderungen bezüglich

- der Teilevielfalt mit 2½-D- und 3D-Bearbeitungen,
- einer qualifizierten Simulation des fertigen NC-Programms,
- der Möglichkeit einer Datenübernahme von einem CAD-System,

- einer arbeitserleichternden Feature-Programmierung, und
- einer einfachen Erfassung von Werkzeugdaten bzw. ganzer Werkzeugkataloge.

Hinzu kommen die automatische Bereitstellung der zugehörigen Technologiedaten, wie Vorschub, Drehzahl, Schnitttiefe usw., und zwar je nach dem zu zerspanenden Material. Hohe Priorität kommt auch der Möglichkeit zu, in fertigen Programmen schnell Änderungen oder Modifikationen zu realisieren, ohne wieder ganz von vorne beginnen zu müssen. Eine wichtige Disziplin ist schließlich die Generierung der fehlerfreien Bearbeitungsstrategien.

NC-Programmiersysteme



Das sollte man sich merken:

1. **CAM** ist die Abkürzung für **C**omputer **A**ided **M**anufacturing, auch als Maschinelles Programmieren bezeichnet. Man versteht darunter die Programmierung mit Rechnerunterstützung. Dabei gibt es in CAD integrierte und eigenständige CAM-Systeme. Alle CAM-Systeme arbeiten heute mit Grafikunterstützung.
2. Der Unterschied zwischen **2 ½-D und 3D-Programmierung** bezieht sich nicht auf die Art der grafischen Unterstützung. Auch 2½-D-Programme werden mit leistungsfähigen Systemen am 3D-Modell generiert
3. Bei **3D**-Programmen wird das Werkzeug während der Bearbeitung unter gleichzeitiger Beteiligung von mindestens 3 Achsen einer CNC-Werkzeugmaschine am Werkstück entlang bewegt. Die Form des Werkstücks entsteht dabei direkt durch die Werkzeugbahn (typisch für den Formenbau).
4. **2½-D**-Programme werden für alle Verfahren benötigt, bei denen sich während der Bearbeitung max. 2 Achsen gleichzeitig interpoliert bewegen. Typisch ist diese Art der Bearbeitung für Bohrbearbeitungen und für Fräsoperationen wie Flächen-, Konturen- und Taschenfräsen.
5. Ein **Verfahrensmix** z. B. Drehen und Bohren/Fräsen sollte von einem CAM-System ohne Modulwechsel beherrscht werden.
6. Mit heutigen **Schnittstellen** können Modelle aus unterschiedlichen CAD-Systemen ohne Datenverlust in externe CAM-Systeme übertragen werden.
7. In der CAD-CAM-Prozesskette ist die **Werkzeug-Datenbank** von zentraler Bedeutung. Sowohl bei der Programmgenerierung als auch für die Simulation muss neben den numerischen Daten auch auf realistische Modelldaten zur Laufzeit zugegriffen werden können.
8. Die **Simulation** ist heute ein unverzichtbares Hilfsmittel bei der NC-Programmierung. Sie ist zur Kollisionsvermeidung unverzichtbar. Auch hier gilt: Je besser die Modelldaten desto qualifizierter die Simulationsaussage.
9. Erst der **Postprozessor (PP)** generiert das eigentliche NC-Programm für die individuelle Steuerung/Maschine-Kombination. Zusätzlich kann er weitere Daten wie Werkzeuglisten, Aufspannpläne und Programme für das Werkzeug-Voreinstellgerät liefern. Ein CAM-System ist erst nutzbar, wenn auch der PP die richtigen Ausgaben liefert.
10. Es ist von Vorteil, wenn CAM-Systeme über „Feature"-Funktionen verfügen, um programmierte Bearbeitungen bei kleineren geometrischen Korrekturen direkt übernehmen zu können
11. Da während der Konstruktionsphase meistens noch nicht feststeht, auf welcher CNC-Maschine die Bearbeitung erfolgt, sollte das CAM-System Geometrie- und Technologie-Eingabe streng trennen.

4 Fertigungs-Simulation

Dipl.-Ing. Karl-Josef Amthor, Ing. Franz Imhof, Dr.-Ing. Karsten Kreusch, Dipl.-Ing. Stefan Großmann

Die Simulation technischer Systeme und Prozesse gilt als eine der Schlüsseltechnologien für die computerunterstützte Produktentwicklung und Produktionstechnik. Ziel der Fertigungs-Simulation sind fehlerfreie Fertigungsabläufe, Optimierung der Bearbeitungszeiten und insgesamt eine verbesserte Sicherheit und Wirtschaftlichkeit der gesamten Fertigung.

4.1 Einleitung

Die Simulation von CNC-Maschinen hat sich im Lauf der vergangenen Jahre mehr und mehr als Standardverfahren zur Verifikation komplexer spanender Bearbeitungsprozesse etabliert. Bei modernen NC-Simulationssystemen wird eine reale Fertigungsanlage in einer dreidimensionalen Grafikumgebung realitätsgetreu nachgebildet. Bearbeitungsprozesse können aus beliebigen Blickwinkeln betrachtet und nachvollzogen werden *(Bild 4.1 und 4.2)*.

Im Gegensatz dazu ist die visuelle Erfassung der Bewegungen und Abläufe in NC-gesteuerten Fertigungsanlagen nur in sehr

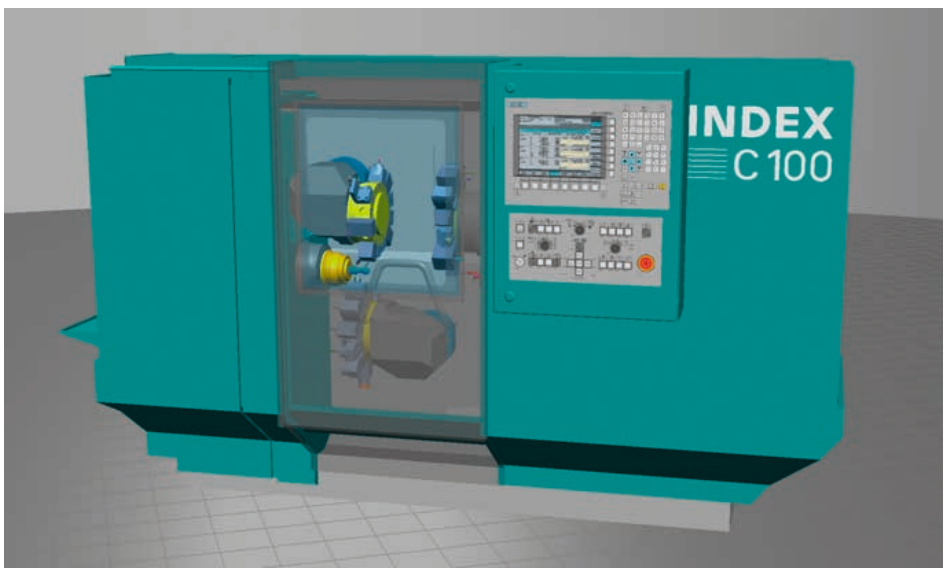


Bild 4.1: Maschinenmodell einer INDEX C100. Simulation am Bildschirm.

eingeschränktem Umfang möglich. Wenn die Verkleidung einer NC-Maschine überhaupt einen Einblick gewährt, dann meist aus nur einem ungünstigen Blickwinkel. Aufspannsituation und Kühlmittel behindern den Blick auf die Bearbeitung zusätzlich und erschweren so das Einfahren neuer oder geänderter Programme.

4.2 Qualitative Abgrenzung der Systeme *(Tabelle 4.1)*

In NC-Programmiersystemen werden häufig Simulationskomponenten angeboten, die auf Basis der NC-Quelle (vor Postprozessor) die Bewegungen zwischen Werkzeug und Werkstück zeigen. Diese Methode ist gut geeignet, um eine erste Kontrolle des Programmierergebnisses durchzuführen. Für exakte geometrische Untersuchungen und Analysen der Laufzeit sind Systeme auf Basis des endgültigen NC-Codes vorzuziehen, da

- Fehler im Postprozessor vom Simulationssystem nicht erkannt werden, sondern erst beim Einfahren an der Maschine auftauchen
- erst mit dem Postprozessorlauf festgelegt wird, auf welcher Maschine ein Programm verarbeitet wird, womit Arbeitsraum und Maschinenparametersatz definiert werden.

Bei Programmen, die mit manueller Programmierung im Editor, also ohne NC-Programmiersystem, erstellt wurden, scheidet die Simulation „vor Postprozessor“ von vornherein aus. Dabei ist in diesem Fall eine Überprüfung des Programmierergebnisses besonders wichtig, da gerade bei dieser Programmiermethode häufig Fehler entstehen.

Wirklich aussagekräftige Simulationsuntersuchungen sind nur auf Basis des realen NC-Programms möglich, d. h. exakt der Programmtext wird simuliert, der auch auf der realen Maschine verarbeitet wird. Dazu gehören nicht nur das Programm selbst, sondern alle vom Programm aufgerufenen Unterprogramme, Zyklen und Parametertabellen wie z. B. Nullpunktverschiebungen, Werkzeugkorrekturen etc.

Im Folgenden wird der Stand der Technik moderner NC-Simulationssysteme dargestellt. Die beschriebenen Funktionalitäten und Einsatzmöglichkeiten beziehen sich auf die leistungsfähigsten der verfügbaren Systeme. Je nach Anbieter können funktionale Einschränkungen bestehen.

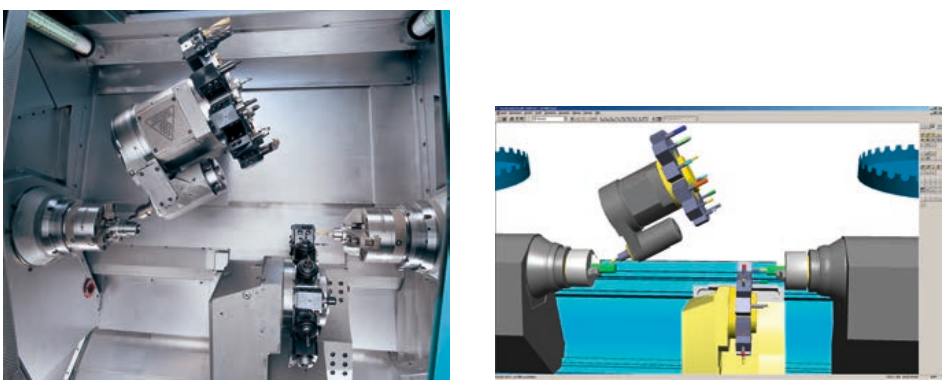


Bild 4.2: Vergleich des Arbeitsraums einer Drehmaschine in Realität und in der Simulation

Tabelle 4.1: Vergleich der unterschiedlichen Simulationsansätze

Simulation „vor Postprozessor“	Simulation mit Steuerungsnachbildung	Simulation mit virtueller Maschine
+ in frühem Stadium möglich. + keine Festlegung auf eine Maschine erforderlich – Kinematische Randbedingungen bleiben unberücksichtigt – Fehler des Postprozessors werden nicht erkannt. – Keine Simulation von freiem NC-Code	+ Eine Plattform-Lösung für viele unterschiedliche Maschinen + Steuerungen, für die es keine virtuelle Variante gibt, können simuliert werden – Steuerungsnachbildungen sind bei komplexen Maschinen oft nicht ausreichend	+ Voller Funktionsumfang der Steuerung + Bedienung und Programmierung identisch zwischen realer und virtueller Maschine – Performance meist schlechter als bei Steuerungsnachbildungen

NC-Simulation mit Steuerungsnachbildung *(Tabelle 4.1)*

Viele Jahre lang war die erforderliche Rechnerleistung für 3D-Darstellungen, Kollisionskontrollen oder Zerspanungssimulation ein beschränkender Faktor. Mittlerweile laufen auch die hochwertigsten Systeme auf handelsüblichen PCs bzw. Laptops.

Moderne Systeme stellen alle Bewegungen an einem **dreidimensionalen** Maschinenmodell dar. Störende Elemente des Arbeitsraums können transparent dargestellt oder ganz ausgeblendet werden. Sie werden dennoch bei der im Hintergrund arbeitenden automatischen Kollisionserkennung berücksichtigt, sodass keine Kollisionen ‚übersehen‘ werden können. Die Blickwinkelnavigation im Simulationssystem erlaubt eine sehr detaillierte Betrachtung aller Bearbeitungssituationen. Die früher übliche reine 2D-Darstellung von Arbeitsraumkomponenten (Strichgrafik) wird mittlerweile kaum noch verwendet.

Neben der rein visuellen Darstellung bieten leistungsfähige NC-Simulationssysteme Funktionen wie:

- Weitgehend vollständige Nachbildung unterschiedlichster Steuerungen
- Darstellung des Materialabtrags
- Automatische Kollisionserkennung
- Syntaxüberprüfung des NC-Programms
- Exakte Zeitanalysen
- Darstellung von Systemvariablen, Achswerten und sonstiger Prozessparameter
- Protokollfunktionen zur Dokumentation aufgetretener Fehler und Kollisionen.

Zur Abgrenzung der am Markt verfügbaren Systeme ist eine Betrachtung hinsichtlich der zu simulierenden Bearbeitungsverfahren notwendig. Grundsätzlich können spanende Fertigungsverfahren in 3D-Bearbeitung und 2 ½ D-Bearbeitung unterschieden werden.

In einem 3D-Bearbeitungsprogramm bewegt sich das Werkzeug im Vorschub in mindestens 3 Achsen gleichzeitig. Die Form des Werkstücks entsteht direkt durch die Werkzeugbahn. (Beispiel: 5-Achs-Fräsbearbeitung)

In 2 ½ D-Programmen werden 2 Achsen interpoliert verfahren. Bei diesen Bearbeitungen handelt es sich typischerweise um Bohr- oder Drehoperationen.

In modernen Dreh-/Fräszentren können

sowohl 2 ½ D- als auch 3D-Bearbeitungen parallel erfolgen. Durch die Integration von verschiedenen Technologien in eine Werkzeugmaschine kann heute nicht mehr streng zwischen Dreh- und Fräsmaschinen unterschieden werden. Ein modernes Simulationssystem muss daher nicht nur alle Arten der Bearbeitung unterstützen, sondern muss auch in der Lage sein, die verschiedenen Bearbeitungen an ein und demselben Teil nacheinander durchzuführen.

Virtuelle Maschine *(Tabelle 4.1)*

Da der Funktionsumfang und die Komplexität von CNC-Steuerungen in den letzten Jahren stark gestiegen sind, wird es zunehmend schwieriger, alle Funktionen in einer Steuerungsnachbildung hinreichend abzubilden.

Bei komplexen, mehrkanaligen Maschinen ist der Aufwand für die Programmierung von Steuerungsnachbildungen so massiv gestiegen, dass eine vollständige Abbildung der Maschine nicht mehr möglich ist.

Als Ausweg aus dieser Situation hat sich der Ansatz der **virtuellen NC-Steuerung** herausgestellt. Im Gegensatz zur Simulation mit Steuerungsnachbildung wird das Verhalten der Steuerung nicht mehr nachgebildet. Der Steuerungshersteller liefert stattdessen eine Softwarekomponente, die das komplette Verhalten der Steuerung beinhaltet. Vorteilhaft für diese Entwicklung war sicher, dass die Funktionalität einer NC-Steuerung heute nicht mehr in Hardware, sondern in Software realisiert ist.

Das hat es den Steuerungsherstellern möglich gemacht, für die Simulation eine virtuelle Steuerung zu liefern, die in ihrer Funktionalität mit der realen Steuerung identisch ist.

Eine virtuelle NC-Steuerung ist üblicherweise die Software einer realen NC-Steuerung, die so gekapselt wurde, dass sie auf einem handelsüblichen PC läuft und mit Simulationssystemen kommunizieren kann.

Diese virtuelle Steuerung wird mit den Daten einer realen Maschine in Betrieb genommen. Damit stellt sie eine exakte Kopie der Steuerung der realen Maschine dar.

Das Wort „**Nachbildung**“ entfällt damit aus der Simulation.

Die Verwendung der virtuellen NC-Steuerung ermöglicht es nun, der Simulation auch noch die Bedienoberfläche der realen Maschine mitzugeben. Da es sich bei der Bedienoberfläche ebenfalls um eine Software handelt, lässt sich diese mit der virtuellen NC genauso betreiben, wie an der realen Maschine *(Bild 4.3)*.

An dieser Stelle wurde inzwischen im Markt der Begriff „**Virtuelle Maschine**“ geprägt.

Im Gegensatz zur NC-Simulation mit Steuerungsnachbildung verfügt die virtuelle Maschine über folgende Eigenschaften:

- Materialabtrag, 3D-Darstellung und Kollisionsrechnung entsprechend NC-Simulation mit Steuerungsnachbildung
- Einsatz von virtuellen NC-Steuerungen mit vollständigem Funktionsumfang (Syntaxprüfung, Laufzeitanalyse, Einstellungen und Parameter wie an der realen Maschine)
- Einsatz von Maschinenbedienfeld in virtuellem Umfeld.
- Die Simulation soll sich in möglichst allen Bereichen wie die reale Maschine verhalten.

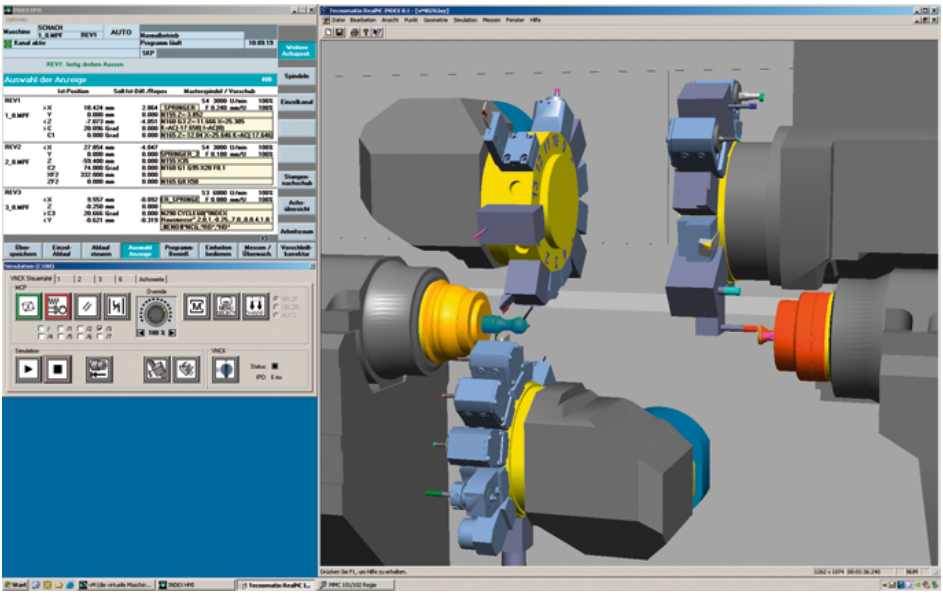


Bild 4.3: Virtuelle Maschine mit Maschinenbedienfeld und 3D-Maschinenmodell mit Werkzeugen

4.3 Komponenten eines Simulationsszenarios

Maschinenmodell

Unter **Maschinenmodell** versteht man die originalgetreue Nachbildung der physikalischen Maschine am Rechner. Ein Maschinenmodell besteht mindestens aus den folgenden Komponenten:

- Geometriemodelle von Maschinenelementen wie Gestell, Führungen, Abdeckbleche
- Kinematische Struktur
- Steuerungsmodell oder virtuelle NC-Steuerung

Die **geometrischen Elemente** des Maschinenmodells müssen zumindest den Arbeitsraum genau beschreiben. Weitere Maschinenelemente wie Teile der Verkleidung können kollisionsrelevant sein, dienen aber auch dem Wiedererkennungswert. Sie können für die Simulation transparent geschaltet oder ganz ausgeblendet werden *(Bild 4.1 und 4.2)*.

In der **kinematischen Struktur** sind alle realen Maschinenachsen als virtuelle Achsen hinterlegt. Reihenfolge der Achsen und Achsabstände entsprechen den realen Verhältnissen. Als Achsen sind nicht ausschließlich NC-Achsen definiert, auch SPS-gesteuerte Achsen wie Revolverachsen und hydraulisch bewegte Spannelemente können Teil der kinematischen Struktur sein.

Im **Steuerungsmodell** sind die wichtigsten Eigenschaften der realen Steuerung nachgebildet. Dabei können leistungsfähige Steuerungsmodelle nahezu den kompletten Befehlssatz der Originalsteuerung verarbeiten. Unumgänglich ist dies für Funktionen wie Bewegungsplanung, Interpolation, Fräserradiuskorrektur usw. Ebenso sollten Hochsprachenelemente wie Sprunganwei-

sungen, bedingte Sprünge, Schleifen und Variablen- bzw. Parameterprogrammierung unterstützt werden.

Statt des Steuerungsmodells kommt bei einer virtuellen Maschine eine **virtuelle CNC-Steuerung** zum Einsatz. Die virtuelle CNC wird mit den Daten der realen Maschine in Betrieb genommen und entspricht somit funktional exakt der realen Maschine.

Damit wird erreicht, dass alle Funktionen der Steuerung in der virtuellen Maschine und der realen Maschine identisch sind.

Bei der virtuellen Maschine kommt zusätzlich das **Maschinenbedienfeld** zum Einsatz. Alle Eingaben und Anzeigen, die an der realen Maschine vorhanden sind, stehen dem Benutzer der virtuellen Maschinen identisch zur Verfügung. Dadurch kann die virtuelle Maschine sowohl in einem AV-Umfeld, als auch werkstattnah eingesetzt werden.

Werkstückgeometrie und Spannmittel

Werkstücke werden heute meist in 3D-CAD-Systemen als Roh- und Fertigteil konstruiert. Die für den Simulationslauf benötigte Rohteilgeometrie gelangt über CAD-Schnittstellen des CAD- oder des Simulationssystems in das Simulationssystem. Gleiches gilt für die benötigten Spannmittel. Für den Fall, dass keine CAD-Daten vorliegen, bieten einige Simulationssysteme einfach handhabbare CAD-Funktionen, mit denen aus Regelgeometrien wie Quadern und Zylindern sogar komplexe Spannkinematiken erstellbar sind *(Bild 4.4)*.

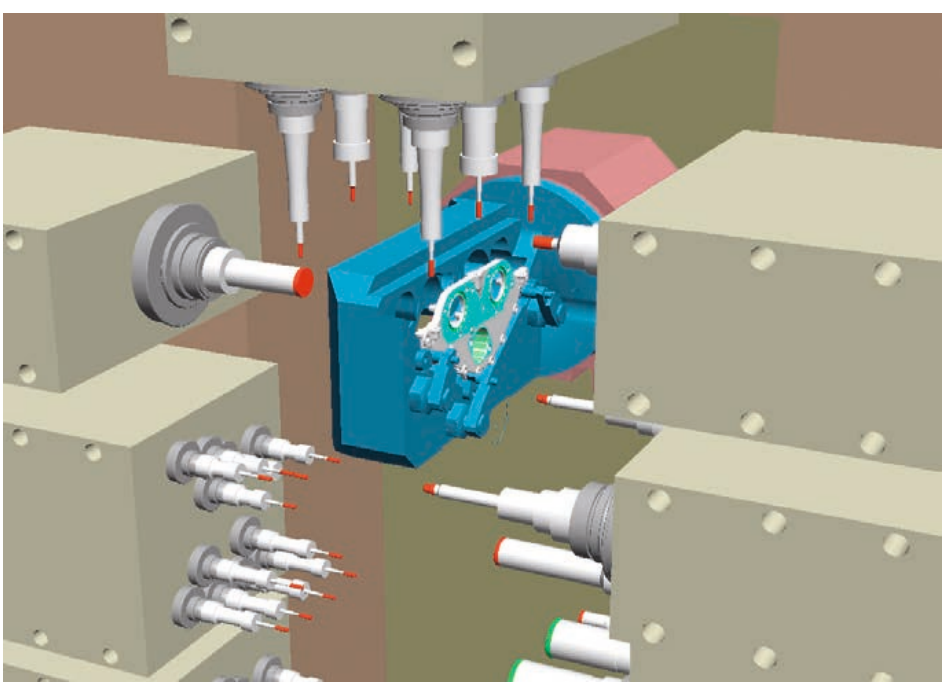


Bild 4.4: Arbeitsraum einer ELHA-Vertikalmaschine mit Spannvorrichtung und Werkstück

Leistungsfähige Systeme unterstützen typische Methoden der Serienfertigung wie Mehrfachaufspannung bei Bearbeitungszentren und Mehrspindelbearbeitung an Drehmaschinen.

Werkzeuge

Werkzeuge werden in folgende Klassen eingeteilt:

- Rotationssymmetrische Werkzeuge (Bohrer, Fräser)
- Nicht-rotationssymmetrische Werkzeuge (Drehwerkzeuge, einschneidige Werkzeuge)
- Komplexe Werkzeuge (Winkelbohrköpfe, Bohrköpfe mit mehr als einem Werkzeug)

Rotationssymmetrische Werkzeuge sind im Allgemeinen einfach zu zeichnen, weil sie aus einer einfachen 2D-Kontur durch Rotation erstellt werden können. Nicht-rotationssymmetrische Werkzeuge sind entsprechend aufwändiger zu modellieren.

Beim Erzeugen von Werkzeugen für NC-Simulationen gibt es zwei unterschiedliche Ansätze. Werkzeuge können *(Bild 4.5)* entweder generiert oder zusammengesetzt werden.

Bei **generierten Werkzeugen** definiert der Benutzer über eine Anzahl von festgelegten Parametern die geometrischen Eigenschaften des Werkzeugs. Das System erzeugt dann ein komplettes 3D-Modell, das aus einer Haltergeometrie und einer Schneide besteht *(Bild 4.5)*.

Werkzeugssysteme, die Werkzeuge generieren haben folgende Vor- und Nachteile:

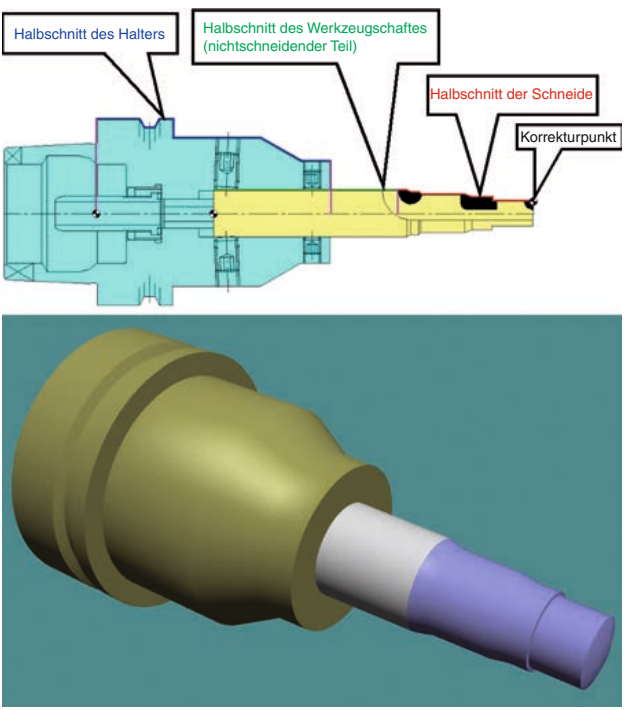


Bild 4.5: Generiertes Werkzeug. 2D-Außenkontur und 3D-Werkzeug in Simulation

- Sehr einfache Bedienung
- Kein CAD-Wissen erforderlich
- Für viele Simulationsanwendungen ausreichend
- Nur vordefinierte Werkzeuge möglich

Bei **zusammengesetzten Werkzeugen** werden 3D-Geometrien von Werkzeugeinzelteilen in einer Datenbank gespeichert. Die Geometrien werden von den Werkzeugherstellern bereitgestellt. Aus dem gespeicherten Vorrat von 3D-Einzelteilen kann der Benutzer nun Teile auswählen und diese zu kompletten Werkzeugen zusammensetzen *(Bild 4.6 und 4.7)*.

Werkzeugsysteme, die Werkzeuge aus Einzelteilen zusammensetzen, haben folgende Vor- und Nachteile:

- Beliebige 3D-Geometrien
- Exakte Abbildung der Werkzeuggeometrie
- Aufwand für die Pflege der Datenbank und das Erstellen von Werkzeugen

In manchen Simulationsystemen kommen beide Arten der Werkzeugerstellung zum Einsatz, sodass der Benutzer von Fall zu Fall entscheiden kann, welcher Ansatz für die entsprechende Anwendung der richtige ist.

Peripherie der Maschine

Periphere Automatisierungskomponenten, wie Einrichtungen zum Palettenwechsel, Handhabungsgeräte und Magazine, können bei Bedarf mit den oben beschriebenen Methoden abgebildet und in die Simulation einbezogen werden.

4.4 Ablauf der NC-Simulation

Grafische Darstellung

In der untersten Detaillierungsstufe werden während der Simulation Werkstück und Werkzeug dargestellt. Die nächste Stufe stellt darüber hinaus Spannvorrich-

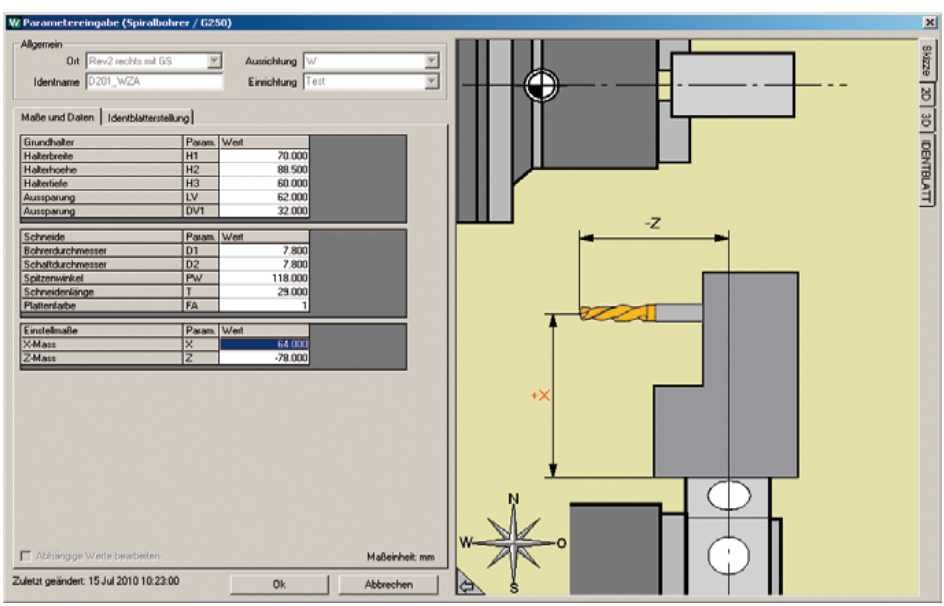


Bild 4.6: Werkzeugassistent zum Generieren von 3D-Werkzeugen

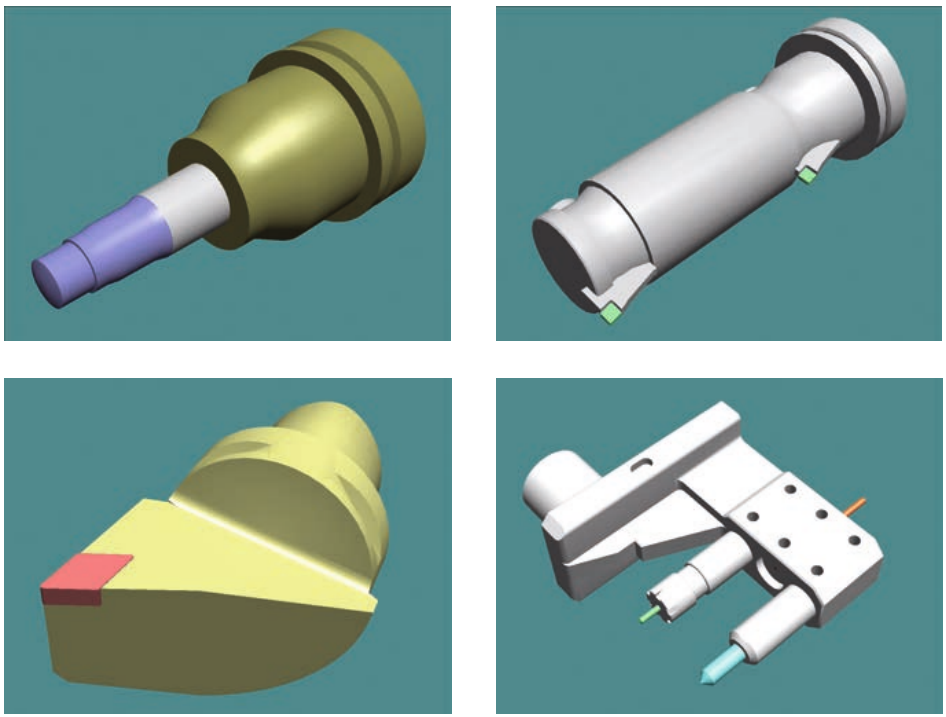


Bild 4.7: Beispiele für einfache und komplexe, zusammengesetzte Simulationswerkzeuge

tungen und die werkzeugtragenden Komponenten dar (Winkelkopf, Revolver, Werkzeugspindel). Die komplette grafische Abbildung umfasst die Gesamtmaschine mit allen, den Arbeitsraum begrenzenden Verkleidungsblechen, Werkzeugwechseleinrichtungen, Messeinrichtungen usw. *(Bild 4.8).*

Nach Start des Simulationslaufs findet die Abarbeitung des NC-Programms wie an einer realen Maschine statt. Die NC-Sätze werden aufbereitet und in Bewegungen der virtuellen Maschinenachsen umgesetzt. Es erfolgt eine visuelle Darstellung des Bearbeitungsfortschritts am Werkstück in Form eines Materialabtrags. Die am Werkstück neu entstehenden Flächen erhalten die Farbe der bearbeitenden Werkzeugschneide.

Optional wird während der Bearbeitung die Werkzeugbahn angezeigt. Die Bearbeitungsreihenfolge, z. B. bei Bohrbildern, ist auf diese Weise einfach nachzuvollziehen *(Bild 4.9).*

Automatische Kollisionserkennung

Die Komponenten des Arbeitsraums werden während der Simulation auf unerlaubte Kollisionen bzw. Berührungen überprüft. Treten diese auf, wird der Simulationslauf angehalten und eine entsprechende Meldung wird ausgegeben. Zusätzlich werden die kollidierenden Komponenten farblich gekennzeichnet *(Bild 4.10).*

Einige Simulationssysteme decken auch Fehler technologischer Natur auf. Eine Bearbeitung mit deaktivierter Kühlmittel-

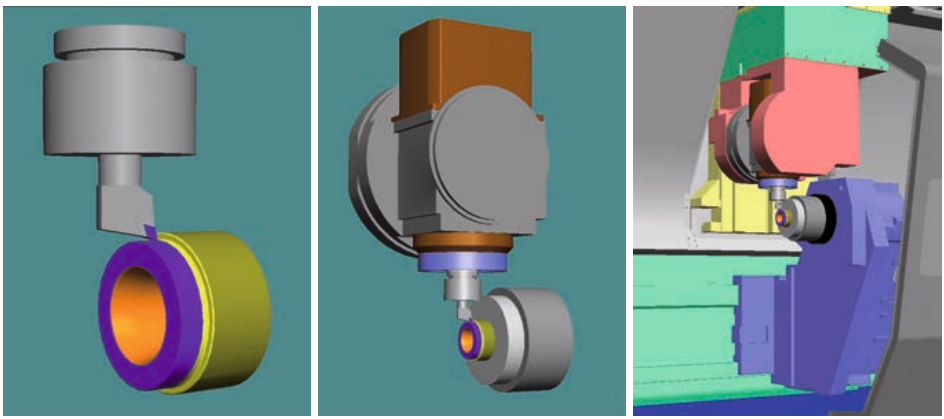


Bild 4.8: Detaillierungsstufen in der Simulationsansicht

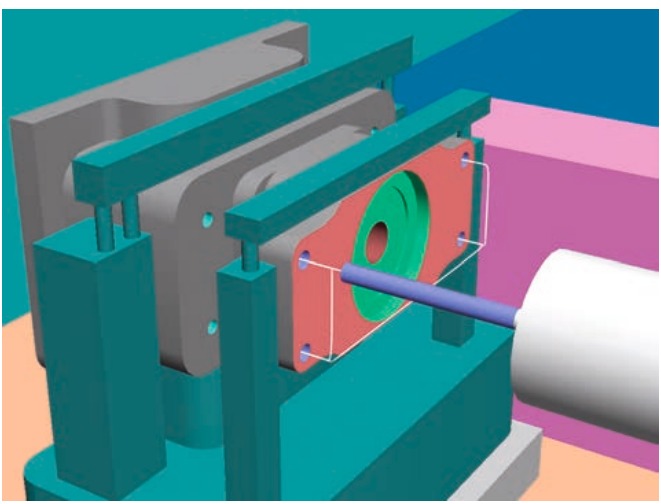


Bild 4.9: Materialabtrag mit Übernahme der Werkzeugschneidenfarbe und Darstellung der Werkzeugbahn

zufuhr oder eine Überschreitung von maximal zulässigen Spindeldrehzahlen und Vorschüben werden mit entsprechenden Warnmeldungen quittiert.

Editiermöglichkeiten und Analysemethoden

Während eines Simulationslaufs wird stets die aktuell auszuführende Zeile des NC-Programms bzw. des momentan geladenen Unterprogramms dargestellt. In einigen Simulationssystemen ist es jederzeit möglich, den Programmtext zu editieren und die Änderungen sofort zu testen.

Bei NC-Simulationen mit Steuerungsnachbildung kann, ähnlich wie an einer Maschine, das Programm im Einzelsatz- oder im Automatikmodus ausgeführt werden. Darüber hinaus sollte die Möglichkeit bestehen, die Abläufe zu jedem Interpolationstakt einzeln zu simulieren. Der An-

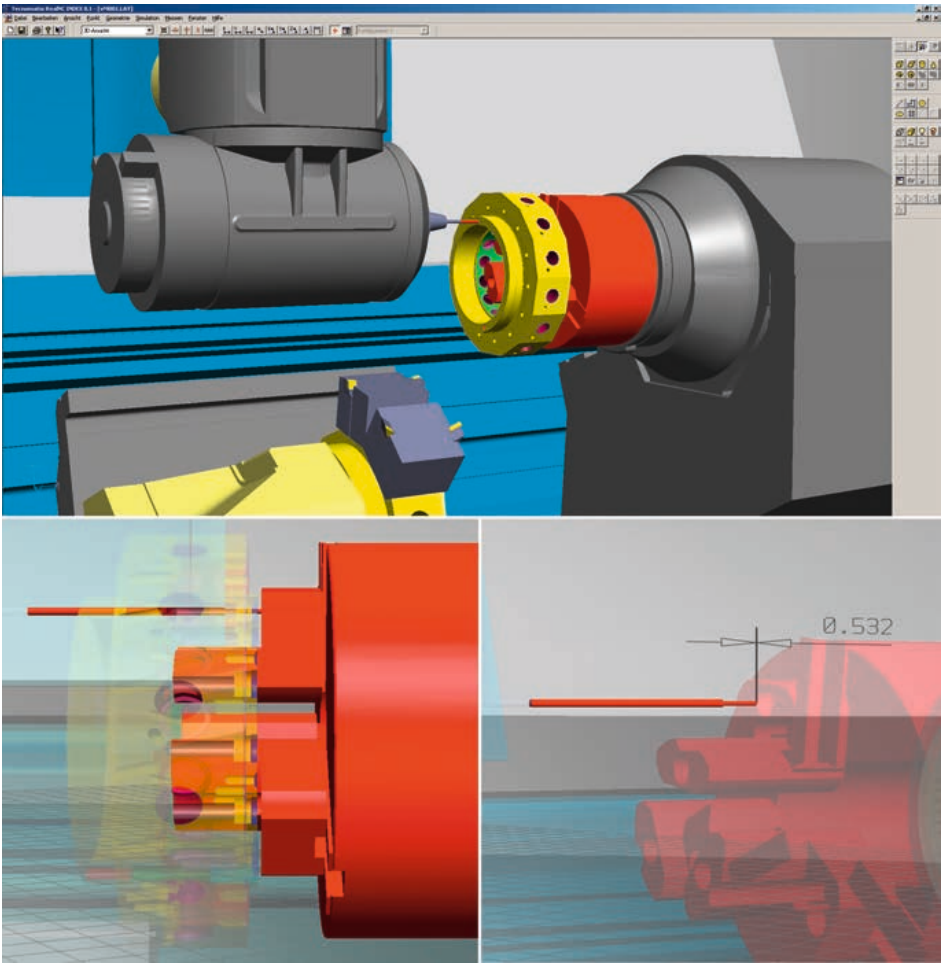


Bild 4.10: Darstellung einer Kollision. Der Bohrer dringt durch das Werkstück und bohrt in das Spannfutter.

wender kann so Bewegungsabläufe millisekundengenau verfolgen, analysieren und optimieren.

4.5 Einsatzfelder

Einfahren neuer Programme

Der Einsatz der NC-Simulation **vor** dem Einfahren neuer Programme erfolgt vorrangig mit folgenden Zielen:

- Verlagerung der Einfahrvorgänge von der teuren Maschine auf den wesentlich günstigeren Computerarbeitsplatz
- Parallelisierung des Einrichtvorgangs. Während das Teil virtuell eingefahren wird, kann die Maschine noch produzieren
- Reduzierung der Einfahrzeit an der realen Maschine auf ein Minimum (um bis zu 80 %)

- Drastische Reduzierung des Kollisionsrisikos
- Reduzierung des Risikos von Ausschussproduktion durch fehlerhafte Bearbeitung teurer Rohteile (speziell in der Einzel- und Kleinserienfertigung)
- Reduzierung von Ausfallzeiten und Kosten für Reparaturen
- Einhaltung von engen Terminplänen durch verkürzte Einfahrzeiten.

Durch Einsatz der Simulation können bereits im Vorfeld unterschiedlichste Fehler aufgedeckt und behoben werden. Darunter fallen sowohl Syntaxfehler als auch fehlerhafte Koordinaten, falsche Werkzeugkorrekturschalter oder auch fehlende oder falsche Nullpunktverschiebungen. Neben Fehlern im NC-Programm kann auch das Zusammenspiel von Spannvorrichtung und Werkzeugen analysiert werden. Durch Variation der Aufspannposition entstehende Überschreitungen der Achsgrenzen werden automatisch erkannt. Die Korrektur der beschriebenen Fehler findet statt, bevor das NC-Programm auf der Maschine eingespielt wird. Dadurch verringert sich die Einfahrzeit beträchtlich, da die Fehlerbehebung an der Maschine ein sehr zeitaufwändiger Prozess ist.

Das tatsächlich vorhandene Einsparpotenzial hängt natürlich in hohem Maß von den jeweiligen betrieblichen Gegebenheiten ab. Vor der Entscheidung für den Einsatz der NC-Simulation sollte sich der potenzielle Anwender folgende Fragen stellen:

- Inwieweit lässt sich die Programmierzeit für neue NC-Programme durch Einsatz der NC-Simulation verringern? Diese Frage spielt vor allem eine Rolle, wenn kein NC-Programmiersystem zum Einsatz gelangt.
- Welche zusätzliche Wertschöpfung lässt sich aus der gewonnenen Maschinenkapazität generieren?

Programmänderung im laufenden Betrieb

Speziell in der Serienfertigung finden in der Betriebsphase einer Fertigungsanlage immer wieder Änderungen am NC-Programm statt. Mögliche Ursachen dafür können sein:

- Änderungen von Geometrie und Toleranzen am Werkstück
- Erweitertes Teilespektrum (neue Varianten)
- Einsatz anderer Werkzeuge (z. B. Kombiwerkzeug)

Solche Änderungen wirken sich in erster Linie auf das NC-Programm und die Werkzeuge aus; teilweise müssen Änderungen an der Spannsituation vorgenommen werden. Änderungen bzw. Erweiterungen im NC-Programm erfolgen entweder in der Arbeitsvorbereitung über einen Editor oder direkt an der Maschine über das Bedienpult.

Auch hier bietet die NC-Simulation die Möglichkeit, anstehende Änderungen im Vorfeld am PC durchzuführen, während die Fertigungsanlage weiterhin produziert. Erst wenn die notwendigen Änderungen durch Simulation überprüft und abgenommen sind, wird das geänderte NC-Programm in die Steuerung übertragen. Die Stillstandszeit der Maschine bleibt so minimal.

Optimierung des Produktionsprozesses

NC-Simulation wird in der Serienfertigung neben der Überprüfung von NC-Programmen auch zur Taktzeitoptimierung eingesetzt. Die exakte geometrische und zeitliche Abbildung des Bearbeitungsprozesses im Simulationssystem gibt dem Anwender die Möglichkeit, Bewegungsabläufe in der

Maschine bzw. der Maschinenperipherie durch Methoden zu optimieren, die ohne Einsatz der NC-Simulation zu riskant oder zu aufwändig wären. Hochgerechnet auf die Lebensdauer eines Produktionsprozesses, die bei einigen Jahren liegen kann, ergeben bereits Taktzeitreduzierungen im einstelligen Prozentbereich ein Einsparpotenzial, das den Optimierungsaufwand bei weitem übersteigt.

Folgende Methoden kommen bei der Optimierung u. a. zum Einsatz:

- Minimierung von Sicherheitsabständen
- Parallelisierung von Bewegungen (z. B. Werkzeugpositionierung parallel zu Tischdrehung)
- Reduzierung von Werkzeugwechseln durch Änderung der Bearbeitungsfolge
- Optimierung der Auslastung verketteter Anlagen.

Planungsphase in der Serienfertigung

In der Serienfertigung werden vom Anlagenhersteller nicht nur die physikalischen Komponenten der Produktionsanlage, d. h. CNC-Maschinen, Verkettungs- und Transportmedien, sondern die Realisierung des gesamten Produktionsprozesses mit allen NC-Programmen gefordert. Die Aufgabe des Anlagenherstellers ist dabei unter anderem die erfolgreiche Inbetriebnahme der Anlage und die Erfüllung vorher definierter Abnahmekriterien wie gefertigte Stückzahlen pro Zeiteinheit und Einhaltung der Produktqualität.

Die NC-Simulation wird heute bereits in der Entwicklungs- und Planungsphase bei vielen Anlagenherstellern eingesetzt. Einsatzschwerpunkte sind dabei einerseits die Entwicklung und Verifikation von Maschinenkonzepten und andererseits die Absicherung und Optimierung der Fertigungsprozesse vor der Inbetriebnahme der Maschine.

Ausbildung und Schulung

Die heutige und zukünftige Bedeutung der CNC-Maschinen für unsere Industrie wird allgemein sehr unterschätzt. Deshalb ist es durchaus sinnvoll, Schülern und Auszubildenden sehr frühzeitig eine Einführung in die CNC-Technik anzubieten.

Meistens verfügen aber weder die Schulen, noch die Ausbildungsbetriebe über die Möglichkeiten, moderne CNC-Maschinen für die Ausbildung bereitzustellen. Sind Ausbildungsmaschinen vorhanden, können Fehlbedienungen zu Ausfallzeiten und hohen Reparaturkosten führen.

Mit einem NC-Simulationssystem können Auszubildende gefahrlos die Grundlagen über den Umgang mit NC-Maschinen auf einfache Art und Weise lernen. Programmierfehler und eventuelle Kollisionen stellen bei Einsatz der Simulation kein Problem dar. Dadurch werden Lehrer und Auszubildende entlastet und können sich ganz auf die Vermittlung der Lerninhalte konzentrieren.

Gleichzeitig kann jeder Schüler oder Auszubildende an seiner ‚eigenen' Maschine arbeiten. Die Ausbildung wird auch vielseitiger und realitätsnäher, da Maschinen und Steuerungen simuliert werden können, die in Lehrbetrieben in der Regel nicht zur Verfügung stehen.

Wenn man bedenkt, wie viele technisch veraltete NC-Maschinen heute in Schulungswerkstätten ungenutzt stehen, die wegen der genannten Probleme überhaupt nicht mehr zum Einsatz kommen, ist die Simulationstechnik der wesentlich bessere und wirtschaftlichere Weg. Zudem stehen für fast alle CNC-Maschinentypen solche Simulationssysteme zur Verfügung.

Die meisten Hersteller sind heute in der Lage, PC-geeignete Schulungssysteme zu akzeptablen Preisen zu liefern und für die Lehrer eine Einführung anzubieten.

Auch später, in der Fertigungspraxis, kommt die NC-Simulation zunehmend zum Einsatz. Speziell für komplexe Bearbeitungen oder ganze Fertigungsanlagen können Anlagenbediener anhand der Simulation über die Vorgänge in der Anlage genauestens instruiert werden.

Durch die Nutzung von **virtuellen CNC-Maschinen** kommen noch weitere Vorteile hinzu. Wenn diese zusätzlich über das Original-Bedienfeld der Maschine verfügen, kann nicht nur die NC-Programmierung, sondern auch die Bedienung der Maschine realitätsgetreu erlernt und geübt werden. Somit können beim Kauf einer neuen Maschine die Programmierer und Einrichter geschult werden, bevor die reale Maschine zur Verfügung steht. Die neue Maschine kann dann nach Lieferung schneller in Produktion gehen, da die Bediener den Umgang gelernt und die ersten Werkstücke schon programmiert haben.

Die grafisch-dynamische Simulation per Computer-Display ist demnach aus verschiedenen Gründen sehr gut geeignet, Schülern von Gesamt- und Realschulen bis zu Studenten und Facharbeitern eine angemessene **Einführung in die CNC-Technik** zu geben. Der grundsätzliche Unterschied zur Schulung an CNC-Maschinen liegt darin, dass keine Maschinen, Werkzeuge, Spannmittel, Werkstücke und technologische Kenntnisse notwendig sind. Stattdessen werden grafisch-dynamische 3D-Simulationssysteme verwendet, wie sie heute in der Industrie bereits vielfach eingesetzt werden. Diese Software ermöglicht eine sehr realitätsnahe Darstellung der Maschine, meistens mit der Draufsicht auf Maschine und Werkstück von allen Seiten. So lässt sich der programmierte Bearbeitungsablauf wesentlich detaillierter beobachten als an einer reellen Maschine, weil wichtige Bearbeitungsdetails durch die Verkleidung oder die Kühlmittelzufuhr verdeckt werden. Kollisionen zwischen Werkzeug, Werkstück, Spannvorrichtung und Maschine werden grafisch angezeigt, ohne irgendwelche Schäden zu verursachen.

Unter diesen Voraussetzungen sind entsprechend geschulte Lehrer sehr gut in der Lage, Aufgaben und Möglichkeiten der CNC-Technik verständlich und umfassend zu erläutern, und zwar oft besser als mit Hilfe einer realistischen Maschine. Zudem lassen sich unterschiedliche Maschinentypen darstellen, wie z.B. Fräs- oder Drehmaschinen, sowie die komplexe Mehrseiten-Bearbeitung prismatischer Werkstücke.

Die **Vorteile der Simulation** im Vergleich zur Nutzung von CNC-Maschinen im Schulbereich lassen sich zusammenfassend darstellen wie folgt:

- Zur Aufstellung der Maschine ist keine Werkstatt mit den dafür vorgeschriebenen Öl-Auffangwanne erforderlich
- Es entstehen keine Reinigungs- und Wartungskosten
- Wesentlich geringere Investitionskosten
- Werkstücke, Werkzeuge, Spannvorrichtungen etc. sind nicht erforderlich
- Keine Gefahrensituationen durch Fehlbedienung oder Kollisionen
- Keine Ausfallzeiten wegen erforderlicher Wartungsarbeiten und Reparaturen der CNC-Maschine
- Wesentlich bessere Darstellung der Bearbeitungsabläufe und den Folgen von Programmierfehlern
- Die Auswirkung von Korrekturen in NC-Programmen ist sofort sichtbar
- Die „Röntgendarstellung“ der Bearbeitung zeigt den Blick in das Werkstück hinein, um z. B. beim Bohren von mehreren Seiten festzustellen, ob diese exakt ausgeführt werden
- Nicht bearbeitete Flächen und Restmaterial werden angezeigt

- Der Bearbeitungsablauf ist in Zeitraffer- oder Zeitlupentempo darstellbar
- Möglichkeit der zeitgleichen Mehrplatz-Nutzung (auf mehreren PCs)
- Möglichkeit der späteren Software-Aktualisierung
- Geringere Aktualisierungskosten
- Bei Bedarf Erweiterung auf andere Maschinentypen (Drehen/Fräsen/Laserbearbeiten)

Gleichzeitig erleben die Schüler den **Nutzen heutiger Simulationssysteme** sehr eindrucksvoll. Die Bedeutung der Simulation in der Industrie und im Handwerk ist unumstritten und wird zunehmend eingesetzt. Investoren (Käufer) verlangen heute vom Maschinenlieferanten die Vorab-Lieferung der Simulations-Software, um die Inbetriebnahmezeit insgesamt abzukürzen und die NC-Programme vorab auf Fehler oder Verbesserungsmöglichkeiten zu prüfen.

Die Schüler sollen durch die Nutzung eines solchen Systems gleichzeitig erfahren und verstehen, welche Vorteile Simulationssysteme generell bieten. Zudem wird die anfängliche Furcht vor einer aufwändigen, komplexen und komplizierten Programmierung beseitigt.

Ein verfrühter Einstieg in die NC-Programmierung wäre für die genannte Zielgruppe ohnehin völlig falsch. Dazu sind Fachkenntnisse bezüglich Maschinen, Werkstoffe, Werkzeuge, Schnittwerte, Spannmittel und Zerspanung erforderlich. Dies wird in der Praxis von speziell geschulten und erfahrenen Facharbeitern übernommen. Schüler wären damit überfordert.

4.6 Zusammenfassung

Komponenten eines Simulationsszenarios
Ein Simulationsszenario stellt die gesamte Fertigungsanlage dar. Dazu gehören:

- Das Maschinenmodell mit allen geometrischen Elementen und Achsen.
- Die Steuerungsnachbildung oder virtuelle Steuerung mit Maschinenbedienfeld
- Alle Werkstücke und zugehörigen Spannvorrichtungen
- Werkzeuge, Bohrköpfe, Vorsatzköpfe.

Ablauf der NC-Simulation
Alle Maschinenbewegungen werden realitätsgetreu dreidimensional dargestellt.

Die Materialabtragssimulation zeigt, wie sich die Werkstücke während der Bearbeitung verändern.

Die automatische Kollisionserkennung meldet alle unerlaubten Berührungen der im Arbeitsraum befindlichen Komponenten.

Die simulierten NC-Programme werden im Einzelsatz- oder Automatikmodus durchlaufen und können jederzeit leicht editiert werden.

Weitere Optionen sind:

- Darstellung der Werkzeugspur
- Erkennung technologischer Fehler
- Simulation im Interpolationstakt.

Einsatzfelder und Nutzenpotenziale:
Der Großteil der Arbeiten beim Einfahren neuer Programme findet am günstigen PC-Arbeitsplatz statt. Auf diese Weise werden bis zu 80 % der Einfahrzeit eingespart und die Maschinenverfügbarkeit wird entsprechend erhöht. Reparaturkosten und Ausfallzeiten durch Kollisionen beim Einfahren entfallen fast vollständig.

Programmänderungen werden während des laufenden Betriebs im Simulationssys-

tem vorgenommen und getestet. Die Übernahme der Änderungen auf die Fertigungsanlage erfordert nur kurze Stillstandzeiten der Maschinen.

In der Serienfertigung kommt NC-Simulation unter anderem bei der Taktzeitoptimierung zum Einsatz. Im Simulationsszenario werden Sicherheitsabstände minimiert, Zustellbewegungen parallelisiert und die Bearbeitungsreihenfolge der Werkzeuge getauscht. Voraussetzung dafür ist die exakte Abbildung des realen Steuerungsverhaltens hinsichtlich Bewegungsführung und zeitlichem Verhalten.

Einsatzschwerpunkte in der Planungsphase sind einerseits die Entwicklung und Verifikation von Maschinenkonzepten und andererseits die Absicherung und Optimierung der Fertigungsprozesse vor der Inbetriebnahme der Maschine.

In der Ausbildung wird in NC-Simulationssystemen auf einfache Art und Weise der Umgang mit NC-Maschinen vermittelt. Programmierfehler und Kollisionen sind unkritisch. Ausbilder und Auszubildende werden entlastet und können sich auf die Vermittlung der Lerninhalte konzentrieren.

Bildnachweis:
SIEMENS AG, Industry Sector.
INDEX-Werke.

Fertigungs-Simulation

Das sollte man sich merken:

1. **Simulation**
   ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind (VDI Richtlinie 3633).
2. **Fertigungssimulation** (1)
   ist das grafisch-dynamische Abbilden eines wirklichen Systems durch ein Modell, z. B. für
   - die Konstruktion von Bauteilen und deren Montage
   - die Arbeitsplanung, Handhabung, Aufspannung und Fertigung von Werkstücken
   - die Strukturanalyse und das Verhalten von Bauteilen
   - die Untersuchung des kinematischen und dynam. Verhaltens von Körpern (FEM)
   - die optimale Auslegung von FFS (Materialfluss, Maschinenanordnung)
3. **Fertigungssimulation** (2)
   ist für den Fertigungstechniker
   - die grafisch-dynamische Ablaufsimulation von NC-Programmen auf einer bestimmten Maschine,
   - mit Darstellung der Maschine, Werkstücke und Werkzeuge im richtigen Größenverhältnis zur Untersuchung des Bewegungsverhaltens während der Bearbeitung
   - in Echtzeit, Zeitraffer oder Zeitlupe mit wahlweisem Stillstand zur Erkennung von Problemen
   - incl. Ablauf von Werkzeug- u. Werkstückwechsel
   - zwecks Erkennung und Beseitigung von Leerfahrten, Sicherheitsreserven, Kollisionen, Programmierfehlern etc.
4. **Simulation von NC-Programmen**
   Ziele:
   - Hilfe bei der Zeitoptimierung von NC-Programmen
   - Erkennung/Vermeidung von Kollisionen
   - Reduzierung der Testphase neuer Programme
   - Erhöhung der Maschinen-Laufzeiten
   - Taktzeitoptimierung von FFS durch Abstimmung der Bearbeitungszeiten bei Mehrmaschinen-Bearbeitung
   - GENERELL: Präventive Schadensvermeidung und Produktivitätssteigerung
5. **Man unterscheidet:**
   - Bei der **Ablaufsimulation** werden komplexe Produktionsanlagen nachgebildet, sodass eine Optimierung hinsichtlich der Anordnung der Maschinen, der Auslegung des Gesamtsystems und der Abläufe erfolgen kann,
   - Die grafische **3D-Kinematik-Simulation** zur Untersuchung des Bewegungsverhaltens von Systemen, wie z. B. Robotern, Maschinen oder auch Menschen,
   - Die **FEM-Simulation** zur Modellierung und Untersuchung des physikalischen Verhaltens von Werkstoffen und komplexen Strukturen.

TEIL 6

Einbindung der CNC-Technik in die betriebliche Informations-verarbeitung

1 DNC – Direct Numerical Control oder Distributed Numerical Control

Edgardo Mantovani

Die Vernetzung von Computern zählt heute zum allgemeinen Standard. Die gleiche Vernetzungstechnik ist auch für NC-Maschinen nutzbar und bietet so viele Vorteile, dass kein Fertigungsbetrieb darauf verzichten sollte.

1.1 Definition

DNC ist die ursprüngliche Abkürzung für **Direct Numerical Control.** In neuerer Zeit werden auch Begriffe wie „Distributed Numerical Control“ oder „Distributive Numerical Control“ verwendet. Darunter versteht man eine Betriebsart, bei der mehrere NC- oder CNC-Maschinen und andere Fertigungseinrichtungen wie Werkzeugeinstellgeräte, Messmaschinen und Roboter per Kabelverbindung an einen Rechner angeschlossen sind. Durch die **direkte Datenübertragung** entfallen die früher üblichen Datenträger wie Lochstreifen, Magnetbänder oder Disketten samt der dafür erforderlichen Schreib- und Lese-Geräte. Damit erreicht man mehrere technische und kostenmäßige Vorteile.

Nach VDI 3424 ist das wesentliche **DNC-Merkmal** die „Verwaltung und zeitgerechte Verteilung von Steuerinformationen an mehrere NC-Maschinen, wobei Funktionen der numerischen Steuerung vom Rechner wahrgenommen werden können“. Letzteres trifft jedoch bei den heutigen DNC-Systemen nicht mehr zu: Die Steuerungsfunktionen für die Maschine verbleiben in der CNC.

Durch die Daten-Netzwerke und leistungsfähige DNC-Software können alle am Netzwerk (LAN) angeschlossenen Systeme miteinander kommunizieren.

1.2 Aufgaben von DNC

Obwohl sich die Techniken in den vergangenen Jahren stark verändert haben, sind die Grundfunktionen der DNC-Systeme bis heute gleich geblieben. Es sind zwei grundsätzliche Aufgaben, die ein DNC-System zu erfüllen hat:

- **Garantieren einer sicheren, zeitgerechten Datenübertragung von und zu den CNC-Steuerungen**
- **Verwaltung der vielen tausend NC-Programme**.

Während die erste Aufgabe, die sichere Datenübertragung, das Unternehmen vor möglichen teuren Schäden an Maschinen und Werkstücken bewahrt, dient die NC-Programmverwaltung der Ordnung und Sicherung der meist großen Datenbestände, die einen beträchtlichen Wert verkörpern. Beide Aufgaben, mit einem modernen System gelöst, sind ein wertvoller Beitrag zur Produktivitätssteigerung und Qualitätssicherung in der Fertigung.

Bereits in der 1972 erschienenen VDE-Richtlinie wird zwischen Grundfunktionen und erweiterten Funktionen von DNC-Systemen unterschieden, wie z. B. die Werkzeug- und Werkstückverwaltung bei hochautomatisierten Fertigungssystemen. Darauf wird noch näher eingegangen.

1.3 Einsatzkriterien für DNC-Systeme

Die Forderung eines Betriebes zur Einführung eines DNC-Systems ergeben sich aus mehreren Kriterien. Dazu zählen:

Häufiger Programmwechsel

Je kleiner die Losgröße, umso größer wird das Problem, immer die richtigen NC-Programme zum richtigen Zeitpunkt an der richtigen Maschine zur Verfügung zu haben. Bei DNC-Betrieb steht das NC-Programm nach dem Aufruf sofort in der Maschine bereit, bei erweiterten Systemen auch mit allen zusätzlichen Daten, Korrekturwerten und Bedienerinformationen.

Anzahl der NC- und CNC-Maschinen

Ein rentabler DNC-Betrieb kann schon bei 2 bis 3 NC-Maschinen beginnen, wenn pro Tag mehrere Programmwechsel notwendig sind. Mit jeder weiteren Maschine nehmen die Argumente für DNC zu. Bestimmte Fertigungsverfahren setzen die Datenversorgung über ein DNC-System sogar voraus.

Anzahl der NC-Programme

Die Probleme bei der Verwaltung von mehreren tausend NC-Programmen mit hinzukommenden Modifikationen, Aktualisierungen und Änderungen lassen sich ohne Rechnerhilfe kaum bewältigen. Ein DNC-System erleichtert diese Arbeit und minimiert die Gefahr menschlicher Fehler.

Programmlänge

Sind die Programme so groß, dass dafür mehrere mobile Datenträger erforderlich wären, dann besteht die Gefahr der Verwechslung mit teuren Folgen. Sind die Programme größer als die Speicherkapazität der CNC, kann ein DNC-System schon bei einer Maschine unverzichtbar sein, um ohne Unterbrechung auch über mehrere Stunden arbeiten zu können.

Viele neue Programme

Lebt ein Betrieb von vielen neuen Programmen oder häufigen Programm-Modifikationen, dann ist die direkte Programmübertragung vom CAD/CAM-System in die CNC unverzichtbar. Gerade bei werkstattorientierter Programmierung, d.h. Programmierung an den Maschinen durch die Maschinenbediener, ist die Sicherung der erzeugten Programme von großer Bedeutung.

Hohe Übertragungsraten

Insbesondere HSC-Maschinen und Lasertechnologien erfordern einen extrem hohen Datendurchsatz. Deshalb besteht die Forderung, die NC-Programmdaten mit sehr hoher Geschwindigkeit in die CNC zu übertragen, damit die Bearbeitung nicht wegen Datenmangel ins Stocken gerät. Diese Forderung lässt sich nur mit einem DNC-System erfüllen.

Computerunterstützte Werkzeugverwaltung

Die durchgängige Verwaltung der Werkzeuge und Werkzeugdaten kann zu enormen Einsparungen führen. Werkzeugstandzeiten lassen sich besser nutzen, unnötiges Zerlegen und Montieren wird vermieden. Die zusammengefasste Übertragung der Werkzeugnummern mit allen Werkzeugdaten in die CNCs reduziert den Zeitaufwand und erhöht die Sicherheit.

Flexible Fertigungssysteme

Flexible Fertigungssysteme stellen eine eigene Kategorie dar, die dadurch gekennzeichnet ist, dass sowohl die DNC-Grundfunktionen, als auch die Erfassung, Speicherung und Verwaltung der Paletten, Korrekturwerte, Messdaten usw. von einem speziellen **Leitrechner** übernommen werden. Dieser wird in der Regel durch den Lieferanten des Gesamtsystems gestellt und mit einer speziell angepassten und erweiterten Software ausgerüstet.

Hier stellt der DNC-Rechner nicht nur NC-Programme, Unterprogramme und Zyklen, sondern auch aktuelle Werkzeugdaten, Nullpunktverschiebungen und Korrekturwerte zur Verfügung. Bei FFS mit sich ergänzenden Bearbeitungen müssen für jedes Werkstück immer mehrere Maschinen mit den zusammengehörenden Programmteilen versorgt werden.

Bei entsprechender Software-Erweiterung könnte der FFS/DNC-Rechner auch die Sicherung der aktuellen Zustandsdaten jeder Maschine übernehmen, wie z. B. die Platzierung der Werkzeuge im Magazin, den Unterbrechungspunkt der Bearbeitung, Korrekturwerte oder andere Daten. Dies verkürzt bei einem eventuellen Datenverlust im Speicher der CNC das Wiederanfahren der Maschinen erheblich.

Generell

Grundsätzlich kann man feststellen, dass DNC ein Bestandteil der computergestützten Fertigung ist und von Anfang an in das Gesamtkonzept miteinbezogen werden sollte. Geht man davon aus, dass durch den zunehmenden Einsatz von CAD/CAM-Systemen, Werkzeugverwaltungs-Systemen und Voreinstellgeräten immer mehr Daten in immer kürzerer Zeit verarbeitet und bereitgestellt werden müssen, dann sind DNC-Systeme unverzichtbar.

1.4 Datenkommunikation mit CNC-Steuerungen

Ursprüngliche Überlegungen zielten darauf ab, NC-Bahnsteuerungen durch Verwendung zentraler Rechner zu verbilligen und die verbleibenden **Rumpfsteuerungen** mit vorberechneten Daten zu versorgen. Rumpfsteuerungen waren jedoch nicht mehr autonom funktionsfähig, was zu großen Inbetriebnahme-Problemen beim Maschinenhersteller und bei Rechnerausfall geführt hätte. Zudem musste man feststellen, dass schon bei der Datenversorgung von wenigen Steuerungen unerwartete Engpässe auftraten. Die rasche Verbilligung der CNC-Preise hat das DNC-Prinzip mit Rumpfsteuerungen endgültig zu Fall gebracht.

Bevor standardisierte serielle Schnittstellen zur Verfügung standen, waren die NC-Steuerungen mit Lochstreifenlesern ausgerüstet und die NC-Programme wurden mittels Lochstreifen in die Steuerungen geladen. Später, nachdem sich die serielle Schnittstelle RS232 (V.24) als Standard durchgesetzt hatte, wurde generell diese Schnittstelle verwendet, da sie bidirektional ausgelegt, auch zum Sichern oder Auslesen der Programme verwendet werden konnte. Die frühen DNC-Systeme auf Basis der damaligen – im Vergleich zu heutigen PCs sehr teuren – Minicomputer waren bereits multitaskingfähig und mit mehreren seriellen Schnittstellen ausgerüstet. Sie konnten also gleichzeitig mehrere Übertragungen meistern und wurden von einem Terminal aus bedient. Diese Minicomputer wurden auch zur Speicherung der NC-Programme eingesetzt. Alle diese Systeme arbeiteten mit Versendetechnik, d. h. die Steuerung wurde auf Betriebsart „Einlesen“ gestellt, dann konnte vom Terminal aus die Datenübertragung an die Maschine angestoßen werden.

Da die serielle Datenübertragung sehr störanfällig ist – RS232 garantiert lediglich eine sichere Datenübertragung über 15 m und verfügt nur über eine rudimentäre Datenprüfung – hatten die Hersteller der sog. „Formenbauersteuerungen“ (z.B. Bosch, Heidenhain, Fidia, u.a.) rasch erkannt, dass die Übertragung durch ein Protokoll abgesichert werden musste. Daher übertragen die älteren Steuerungen dieser Hersteller blockweise, d.h. jeder Datenblock wird mit einer Prüfsumme versehen, die von der Steuerung nachgerechnet und dem Rechner gegenüber quittiert wird. Wird eine Abweichung festgestellt, so verlangt die Steuerung automatisch die Wiederholung des Paketes. Diese Protokolle (FE1, FE2, LSV-2, usw.) verlangsamen zwar die Übertragungsgeschwindigkeit, stellen aber eine fehlerfreie Übertragung sicher. Außerdem erlauben sie das Einlesen von überlangen Programmen, die größer sind als die Speicherkapazität der Steuerung.

Aufgrund der Langlebigkeit der NC-Werkzeugmaschinen sind heute in den Werkstätten noch fast alle Übertragungsarten anzutreffen, die bei den älteren NC-Maschinen verwendet wurden, wie z.B.:

- BTR-Schnittstelle (BTR = Behind Tape Reader, Parallelschnittstelle für Lochstreifenleser/-stanzer),
- RS232 (V.24), serielle Schnittstelle für die Datenein- und -ausgabe,
- Ethernet-Schnittstelle (wenn die CNC-Steuerung auf PC-Basis aufgebaut ist).

Bei CNC-Maschinen, die in einem Netzwerk integriert sind, d.h. die Steuerungen verfügen über einen Ethernetanschluss, ist das ganze Spektrum von Betriebssystemen und Übertragungsprotokollen anzutreffen. So gibt es Steuerungen auf Unix- oder Linux-Basis, sowie DOS- oder Windowsbasierte Steuerungen. Während die japanischen Steuerungshersteller sich mehrheitlich für FTP als Übertragungsprotokoll entschieden haben, verwenden die europäischen Hersteller alle übrigen Protokolle (Netbios, Netbeui, NFS). Dieser Vielfalt ist bei der Auswahl des geeigneten DNC-Systems Rechnung zu tragen.

1.5 Technik des Programmanforderns

Während früher mit Lochstreifen, Kassetten oder Disketten hantiert wurde, können die NC-Programme heute ohne großes Datenträgerhandling direkt in die Steuerung eingelesen werden, sofern diese auf Betriebsart „Einlesen“ steht. Zum Laden der Programme in den Programmspeicher der Maschinen mit serieller Schnittstelle werden heute zweierlei Techniken eingesetzt:

Die Versendetechnik

Hierbei werden die Programme vom Rechner aus (oder dem Terminal, das der Maschine zugeordnet ist) verschickt. D.h. die Steuerung muss erst auf „Einlesen“ umgeschaltet werden, dann wird vom externen DNC-Rechner das zu ladende Programm an die Maschine geschickt.

Die Abruftechnik

Bei dieser Methode, die bei terminallosen Systemen zum Einsatz kommt, wird mittels eines Abrufprogramms (auch Dummy-Programm oder Runner-Programm genannt) ein zu ladendes Programm angefordert. Der DNC-Rechner stellt das im Anforderungsprogramm in einem Kommentar spezifizierte Programm zur Verfügung und wartet auf den Bediener, der die Steuerung noch auf „Einlesen“ umschalten muss. Diese Technik hat sich mittlerweile zum Standard entwickelt und ist weit verbreitet.

Netzwerkmaschinen mit CNCs auf PC-Basis haben über das Netzwerk direkten Zugriff auf den Server und erlauben das Laden und Sichern direkt von der Steuerung aus, unterstützt durch wenige Soft-Keys.

1.6 Heute angebotene DNC-Systeme

Alle aktuellen DNC-Systeme verbinden die CNC-Maschinen mit den Rechnern entweder mittels Standard-Netzwerk oder serieller Verkabelung. Grundsätzlich lassen sich drei verschiedene Konzepte unterscheiden, die nachstehend kurz beschrieben sind.

DNC-Systeme mit serieller Verkabelung *(Bild 1.1)*

Diese Systeme, die vor allem in kleinen Installationen mit wenigen Maschinen anzutreffen sind, verwenden in der Regel einen PC als zentralen Rechner für die Programmspeicherung und als Kommunikationsgerät. Dieser Rechner ist häufig mit einer seriellen Mehrfach-Schnittstellenkarte ausgerüstet und verbindet die CNC-Steuerungen mittels der RS232. Bei Verwendung von Kupferkabeln wird meist die Übertragungsrate gedrosselt, um die Übertragungssicherheit zu erhöhen, was zu längeren Standzeiten der Maschinen führt. Deshalb werden auch Glasfiberkabel anstelle der Kupferkabel verwendet, um die Störfaktoren auszuschalten.

Nachteilig wirkt sich die fixe Verkabelung besonders dann aus, wenn der DNC-Rechner an einen anderen Standort versetzt werden sollte.

Diese Art DNC-Systeme eignet sich für kleine Betriebe mit wenigen Maschinen, wo der Rechner auf kurzer Distanz zu den Maschinen steht (optimal <15 m). Sowohl die Versendetechnik, als auch die Abruftechnik ist bei diesen Systemen anzutreffen.

DNC-Systeme mit Terminals *(Bild 1.2)*

Diese DNC-Systeme, die besonders in den Neunziger Jahren anzutreffen waren, verwenden ein Terminal (IPC = Industrial PC) für die Datenkommunikation zwischen Server und den Maschinen. Für die sogenannte „Papierlose Fertigung“ eingesetzt, bringen sie alle Fertigungsinformationen an die Maschine. Der Bediener kann alle fertigungsrelevanten Daten und Dokumente einsehen und das Terminal zum Laden

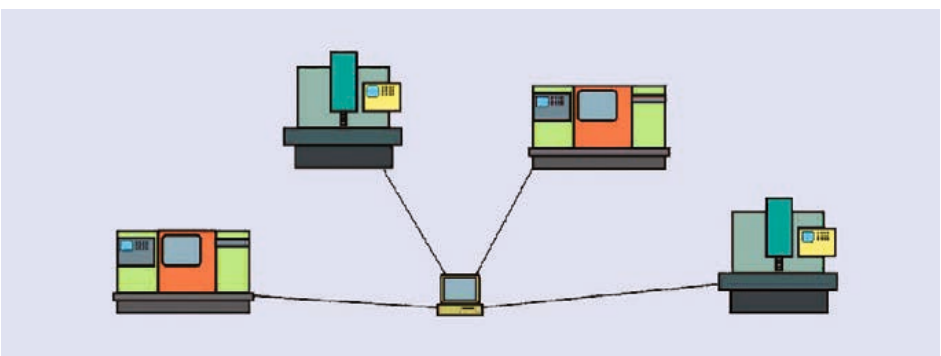


Bild 1.1: DNC-System mit serieller Verkabelung

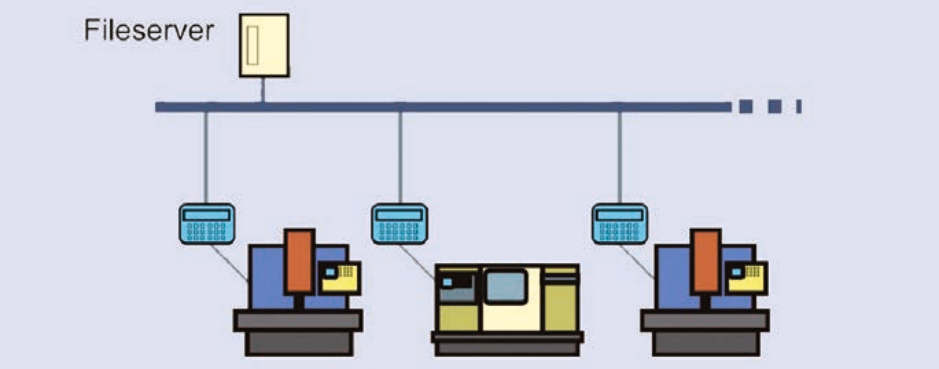


Bild 1.2: Terminal-DNC-System

der NC-Programme verwenden. Häufig sind diese Systeme auch mit MDE/BDE (Maschinen-Daten-Erfassung/Betriebs-Daten-Erfassung) ergänzt, greifen die relevanten Signale der SPS ab und ermöglichen die Rückmeldung von Stillstandsgründen von der Maschine an die Zentrale.

Diese Art von DNC-Systemen waren lange Zeit die einzigen, welche die Nachteile der langen seriellen Kabel vermieden, da sie von Anbeginn auf der Netzwerktechnik aufbauten. Diese Terminal-DNC-Systeme bieten ein Höchstmaß an Komfort, verlangen aber eine gute Schulung des Personals und sind entsprechend kostenintensiv in der Anschaffung.

Netzwerk-DNC-Systeme *(Bild 1.3)*

Diese Systeme verwenden Netzwerkadapter für die Datenübertragung, d. h. eine Steuerung wird mit der seriellen Schnittstelle mittels eines Netzwerkadapters (auch Device Server, Com-Server oder Terminal Server genannt) ins betriebsinterne Ethernet integriert. Dabei ist es möglich, direkt von der Steuerung aus – ohne zwischengeschaltete Terminals – die NC-Programme anzufordern. Diese Systeme überwinden die üblichen Probleme der Datenübertragung über große Distanzen, da durch die Netzwerktechnik eine einwandfreie Datenübertragung sichergestellt ist. Die relativ kostengünstigen Systeme eignen sich für kleine bis große Unternehmen gleicher-

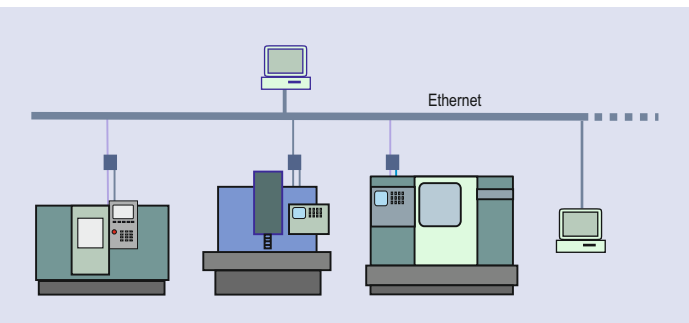


Bild 1.3: Netzwerk-DNC-System

maßen. Anstelle der klassischen Ethernetverkabelung wird heute auch oft WLAN (Wireless LAN) eingesetzt. Die modernen Betriebssysteme der Rechner (meist Windows, selten Linux oder Unix) lassen eine simultane Übertragung von oder zu vielen Maschinen zu.

1.7 Netzwerktechnik für DNC

(Bild 1.4)

Protokolle sichern auch bei Standard-Netzwerken (heute praktisch ausschließlich Ethernet) die fehlerfreie Übertragung großer Datenmengen über weite Distanzen. Das heute den Netzwerken zugrunde liegende TCP/IP-Protokoll sichert die Übertragung auch im industriellen, von Störfeldern aller Art durchsetzten Umfeld und garantiert absolut fehlerfreie Übermittlung.

Bei heutigen DNC-Systemen werden fast ausschließlich Windows-Rechner und Standard-Netzwerke (LAN = Local Area Network) verwendet. Zum Anschluss der CNC-Maschinen, die nur eine serielle Kommunikationsschnittstelle haben, werden Netzwerkadapter (Com-Server, Device Server) als Mediawandler eingesetzt, welche die Datentransformation von seriell auf Ethernet und umgekehrt vornehmen. Hochspezialisierte Netzwerkadapter beinhalten die eigentlichen DNC-Funktionen und arbeiten wie selbstständige Computer mit eigenem Datentransferprogramm und implementierten Filterfunktionen.

WLAN – Wireless Local Area Network

(Bild 1.5)

Zu den Standardnetzwerken gehört heute auch das WLAN, manchmal auch Funk-LAN genannt. Drahtlose Netzwerke gehören zu den Ethernet-Netzwerken welche mit TCP/IP-Protokoll den Datenverkehr prüfen. Sie arbeiten im Gigahertzbereich und übertragen die Daten ohne direkte Kabelverbindung. Dazu wird ein Access Point verwendet, der die Brücke zwischen Kabelnetz und drahtlosem Netz bildet. Der Access Point hat Sender- und Empfängerfunktionen und kann auch zur Verbindung von



Device Server mit WLAN Schnittstelle (Lantronix)



Intelligenter Netzwerk-Adapter mit DNC-Funktionen, WLAN Karte und digitalen Ein-/Ausgängen für MDE/BDE (Quinx)

Bild 1.4: Moderne Geräte für den Aufbau eines DNC-Systems

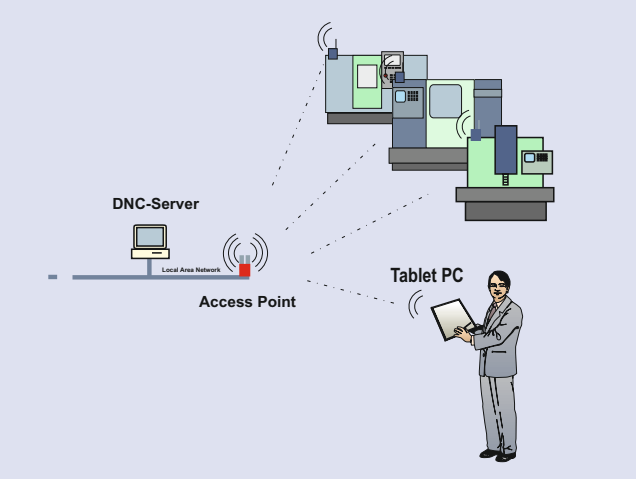


Bild 1.5: WLAN, kabellose Datenübertragung zu den Maschinen

zwei Kabelnetzwerken eingesetzt werden. Auf der Empfängerseite, bei den CNC-Maschinen, kommen entweder Netzwerkadapter mit eingebauter Antenne zum Einsatz oder die herkömmlichen Ethernetadapter, wie oben beschrieben, zusammen mit WLAN-Ethernet Bridges, welche die Wandlung von WLAN zum kabelgebundenen Ethernet vornehmen.

Nutzen und Risiken von WLAN

Der Einsatz eines WLAN, d.h. eines drahtlosen Netzwerks, bringt insbesondere Kostenvorteile. Statt aufwändiger Erweiterung des Netzwerks in den Fertigungsbereich, was das Verlegen von Kabeln und den Einsatz von Switches bedingt, genügt in vielen Fällen ein Access Point. Dieser, etwas erhöht installiert, bedient die Empfänger über Distanzen bis zu 100 m Entfernung. Bei herkömmlicher Ethernet-Verkabelung liegen die durchschnittlichen Kosten bei 300 bis 600 Euro pro Anschluss. Demgegenüber sind die Kosten für WLAN nur halb so hoch.

Die **Risiken** sollten jedoch nicht unterschätzt werden. Nachdem sich die Computer-Fachzeitschriften bemühen, die neuesten „Knackverfahren“ für die verschiedenen Verschlüsselungsmethoden zu veröffentlichen, ist wohl keine Verschlüsselung auf Dauer sicher. Das bedeutet, dass der Werkspionage Tür und Tor geöffnet werden. Außerdem können sich verschiedene WLANs in dicht besiedelten Gebieten überschneiden und gegenseitig stören. Das kann zu Produktionsausfällen führen, wenn keine Notfallstrategie vorhanden ist. Und letztlich kann dieser Umstand auch in böswilliger Absicht genutzt werden, um die Produktion eines Konkurrenten zumindest für einige Zeit lahm zu legen.

DNC für Steuerungen mit Ethernetanschluss

Bei Maschinen mit Ethernetschnittstelle wird häufig die Frage gestellt, ob DNC überhaupt notwendig sei, da der Rechnerzugriff zum Laden und Sichern der Programme leicht zu realisieren ist. Sicherlich ist eine schnelle und fehlerfreie Datenübertragung bei dieser Art von Maschinen kein Problem mehr, doch sind in der Praxis oft folgende Probleme anzutreffen:

- Da der Datenspeicher sehr groß ist, wird die Datensicherung nicht regelmäßig durchgeführt. Eine defekte Harddisk kann zu teuren Programmverlusten führen.
- Dem Maschinenbediener werden alle Rechte über die Programmverzeichnisse übertragen; er kann auf dem Zentralrechner von der Steuerung aus Programme löschen, überschreiben oder unauffindbar verschieben. Das kann ein Sicherheitsrisiko sein.
- PC-Steuerungen sind – wie alle PCs im Unternehmen – der Virengefährdung ausgesetzt.
- Ohne DNC-System ist die Rückverfolgbarkeit der Transfers nicht mehr gewährleistet. Es wird kein Logbuch geführt.

Während die ersten drei Probleme zu teuren Verlusten führen können, ist der letzte Punkt bei ISO 9001 zu berücksichtigen. Es gibt daher viele Unternehmen, die alle Maschinenprogramme über das DNC-System verwalten und, um der Virengefahr zu entgehen, verlangen andere generell den Anschluss via serielle Schnittstelle.

1.8 Vorteile beim Einsatz von Netzwerken

Die Verwendung von **Standard-Netzwerken** (Ethernet), bietet mehrere **Vorteile:**

- Absolut fehlerfreie Datenübertragung dank automatischer Fehlererkennung und -korrektur.
- Zentralisierte Verwaltung aller NC-Programme und Produktionsdaten.
- Unbegrenzte Anzahl anschließbarer Teilnehmer.
- Vernetzung der Maschinen und Teilnehmer auch über größere Entfernungen.
- Nutzung der Maximalübertragungsrate der seriellen Schnittstelle der Steuerung.
- Problemlose Erweiterung des Systems, den Bedürfnissen des Unternehmens entsprechend.
- Direkte Kommunikation zwischen mehreren Rechnern, wie CAD/CAM Systeme, NC-Programmier-, PPS-, Werkstatt-, DNC-Rechner und den CNCs.
- Vereinfachte und zentralisierte Verwaltung aller Daten und Netzwerkteilnehmer im Unternehmen (Rechner, Maschinen, usw.).

1.9 NC-Programmverwaltung

Der Datenverwaltung der Programme wird häufig zu wenig Aufmerksamkeit gewidmet. Da ältere Steuerungen nur mit vierstelligen NC-Programmnummern arbeiteten, wurde früher die Datenverwaltung den beschränkten Möglichkeiten der Steuerungen angepasst, was erheblichen organisatorischen Aufwand in der Arbeitsvorbereitung mit sich brachte. Vierstellige Nummern lassen es in der Regel nicht zu, die Artikel- oder Teilenummern zu verwenden, die meist viel mehr Stellen aufweisen. Das hat dazu geführt, dass mit Vergleichslisten gearbeitet werden musste oder komplizierte Verwaltungssysteme entwickelt wurden, um dem Artikel das passende Teileprogramm zuzuordnen. Diese alten Gewohnheiten haben sich bis heute vielerorts erhalten.

Moderne DNC-Verwaltungssysteme überwinden die Einschränkung der vierstelligen NC-Programmnummer und verwenden eine Kommentarzeile innerhalb des Programms für die eindeutige Identifikation eines NC-Programms, unabhängig von der NC-Programmnummer. Dadurch ist es möglich, mit den Informationen, die auf jedem Fertigungsauftrag stehen, das benötigte NC-Programm für das zu fertigende Teil anzufordern, ohne dass der Bediener die NC-Programmnummer kennen muss.

Moderne, netzwerkbasierte DNC-Systeme verwalten die NC-Programme weitestgehend automatisch. Neue Programme, die von den Maschinen geschickt oder vom CAM-System übergeben werden, werden automatisch in die Datenbank gestellt und sind sofort für das Laden an der Maschine bereit. Modifizierte Programme werden automatisch mit dem Original verglichen und in einem separaten Bereich abgelegt, wo sie auf Mausklick alle Änderungen anzeigen, damit der NC-Programmverantwortliche das gewünschte freigeben kann. Solange ein Duplikat besteht, sollte das Original gesperrt bleiben. Programme mit nicht vorhandener oder ungültiger Kennung sollten durch das DNC-System automatisch erkannt und ausgeschieden werden.

Moderne, effizient konzipierte DNC-Systeme reduzieren den Handlingaufwand für die NC-Programme um über 90% gegenüber der konventionellen Arbeitstechnik (Untersuchung der Quinx AG). Dadurch sind diese Systeme äußerst rasch amortisiert.

Ein detailliertes Logbuch, das alle Transaktionen listet, ist eine Notwendigkeit, insbesondere wenn die Rückverfolgbarkeit gewährleistet werden soll, was bei ISO 9001 und in der Medizinaltechnik durch DIN EN ISO 13485:2003 verlangt wird. Damit lässt sich jederzeit feststellen, wann an welcher Maschine ein Teil mit welcher Programmversion hergestellt wurde.

Anforderungen und Aufgaben *(Bild 1.6)*

Eine moderne NC-Datenverwaltung

- Verwaltet NC-Programme nach Maschinen oder Gruppen geordnet.
- Verwaltet Fertigungsinformationen (Dokumente aller Art, die zu den NC-Programmen gehören).
- Verwaltet die NC-Programme unter logischer Kennung, entsprechend den Konventionen des PPS/ERP-Systems.
- Zeigt laufende Transfers an.
- Sperrt und entsperrt automatisch Programme, die in Verwendung sind (beim Übertragen oder im Editor geöffnet).
- Ist auf Mehrbenutzerbetrieb ausgelegt.
- Erlaubt die Einbindung fremder Editoren (z. B. des CAM-Systems).
- Zeigt auf Mausklick alle Veränderungen eines modifizierten Programmes (Programmvergleich).
- Bietet Import- und Exportfunktionen für Programme und Dokumente.
- Bietet automatisierten Datenimport von CAM-Systemen, Werkzeugverwaltungssystemen und Voreinstellgeräten verschiedenster Hersteller.
- Führt ein Logbuch über alle Transfers (Aktionen der PC Benutzer, Laden und Sichern der Programme von den Maschinen aus, usw.).
- Archiviert automatisch überholte Programmversionen.
- Führt eine Statistik über Dateitransfers.

Beispiele *(Bilder 1.7 – 1.10)*

1.10 Vorteile des DNC-Betriebes

Mit der Einführung eines DNC-Systems ergeben sich folgende Vorteile:

- Höhere Produktivität durch geringere Umrüstzeiten.
- Absolute Sicherheit bei der Datenübertragung über große Distanzen.
- Einlesen der Programme mit höchster Geschwindigkeit.
- Vereinfachte Datenhaltung.
- Entlastung der Programmverantwortlichen von lästiger Routinearbeit.
- Rückverfolgbarkeit mit detailliertem

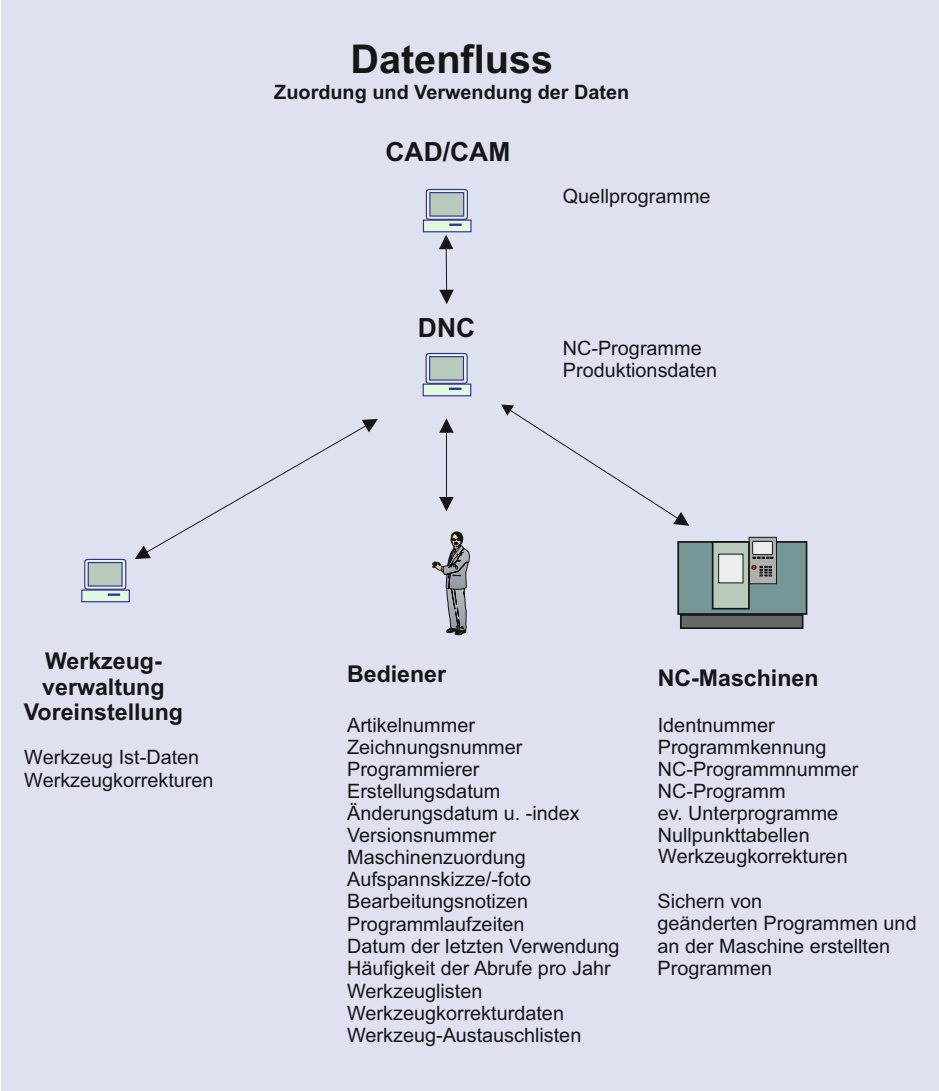


Bild 1.6: Unterscheidung der Daten nach deren Zuordnung und Verwendung in der Fertigung

Transferlog (ISO 9001, DIN EN ISO 13485:2003).

- Absolute Sicherheit gegen Verwechslung von Datenträger.
- Fehlerfreie Dateneingabe auch bei höchsten Übertragungsgeschwindigkeiten, z.B. beim Betrieb von HSC-Maschinen.
- Garantierte Verwendung der aktuellen Programme.
- Einfache, automatische und übersichtliche Programmverwaltung.

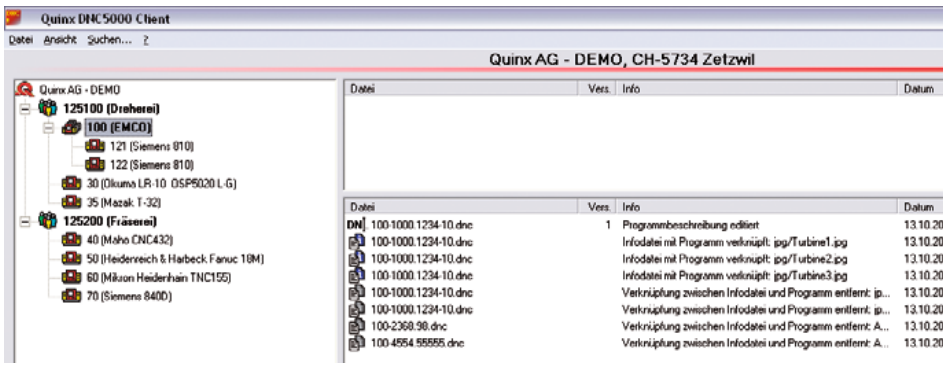


Bild 1.7: Maschinenübersicht (links) – laufende Transfers (rechts)

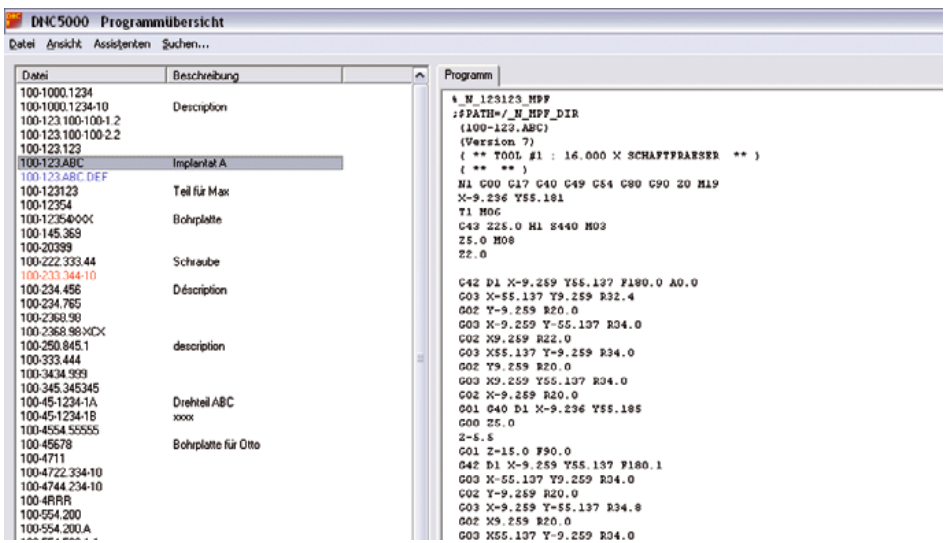


Bild 1.8: Maschinenverzeichnis und Dateidetails

- Schnellere Verfügbarkeit der Programme und Korrekturwerte.
- Keine Stillstandszeiten der Maschinen wegen fehlender Programme.
- Problemlose Bereitstellung der Werkzeugdaten und Korrekturwerte.
- Vermeidung umfangreicher Lochstreifen- oder Diskettenbibliotheken samt Schränken.

sowie bei Systemen mit erweitertem Funktionsumfang:

- Bessere Nutzung der Werkzeugstandzeiten durch einen geschlossenen Datenkreislauf.
- Minimierung des Werkzeugaustausches bei Programmwechsel.
- Bessere Informationstransparenz, insbesondere im Hinblick auf verkettete Fertigungssysteme.

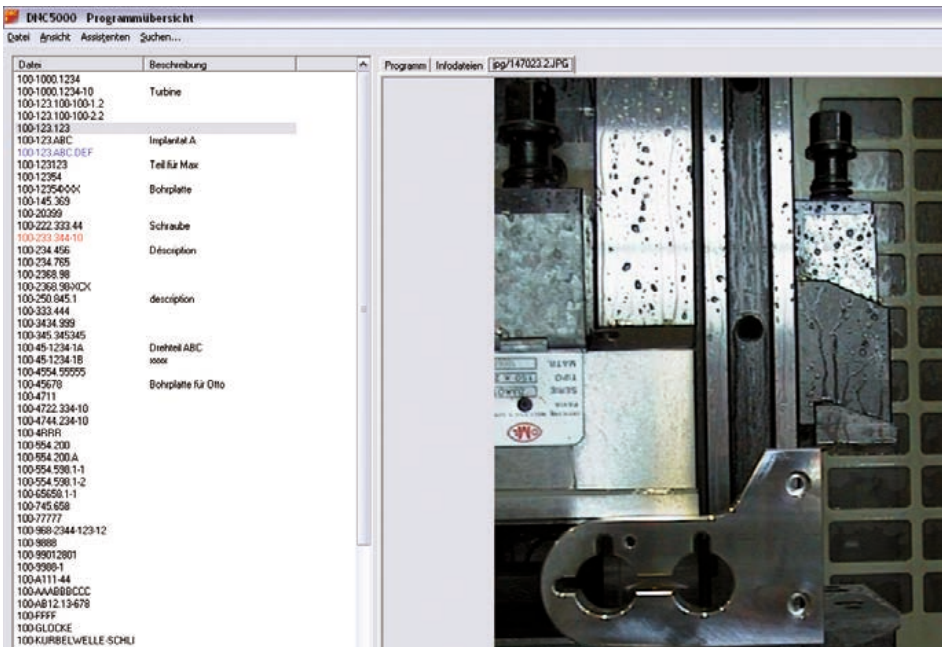


Bild 1.9: Produktionsdaten zum markierten NC-Programm (Beispiel: Digitalfoto einer Aufspannsituation)

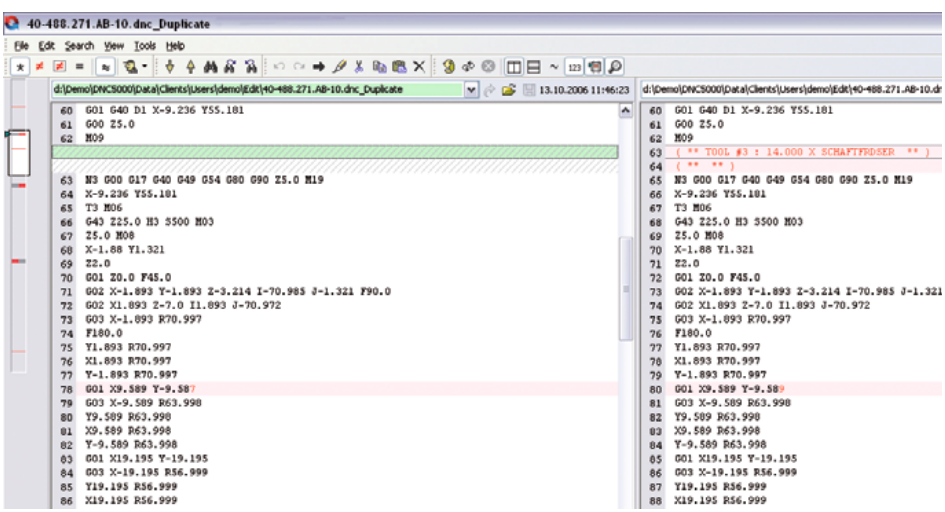


Bild 1.10: Automatischer Programmvergleich

(Alle Bilder mit freundlicher Genehmigung der Quinx AG)

- Insgesamt ein flexibler und vollautomatischer Betrieb der NC-Maschinen.
- Eine höhere Nutzungszeit der Maschinen.

1.11 Kosten und Wirtschaftlichkeit von DNC

Die Gesamtkosten für ein DNC-System liegen heute im Bereich von ca. € 1.000,– bis 5.000,– pro Maschine, abhängig vom DNC-Fabrikat und den anzuschließenden CNCs bzw. deren Schnittstellen.

Wenn bei einem Maschinenstundensatz von € 150,– die Produktivitätssteigerung nur 2 % von 2.875 h beträgt, errechnet sich bei einem Investitionsvolumen von € 15.000,– eine Amortisationszeit von nur zwei Jahren bei zweischichtigem Betrieb.

Jeder Käufer muss die Wirtschaftlichkeitsrechnung nach seinen eigenen Verhältnissen durchführen. Unerfahrene Anwender sollten darauf achten, dass ein **„DNC-Einsteigermodell“** zur Verfügung steht, welches bei positiver Erfahrung problemlos erweiterbar ist. Dazu zählen in erster Linie die Kompatibilität mit den bereits gekauften Einrichtungen und die Übertragbarkeit evtl. erstellter Spezialsoftware auf ein Nachfolge-System.

Zur **Bewertung** eines DNC-Systems sollte man folgende Kriterien heranziehen:

- **Die DNC-Hardware,** denn nicht alle Fabrikate sind den harten Werkstattanforderungen (Störsicherheit, Temperatur, Erschütterungen, Dauerbetrieb, Atmosphäre) gewachsen. Der Rechner sollte möglichst mit einem Standard-Betriebssystem auskommen und die elektronischen Geräte (Netzwerkadapter, Terminals, etc.) CE-geprüft sein.
- **Die DNC-Software,** sie sollte modular erweiterbar, erprobt und fehlerfrei sein und vor allem die schriftlich fixierten Anforderungen erfüllen.
- **Das Übertragungsmedium,** z. B. Koaxkabel, Twisted Pair, Glasfaser.
- **Das verwendete Protokoll** (möglichst ein Standard, wie z. B. Ethernet mit TCP/IP).
- Der Hersteller bzw. Lieferant, der über ausreichend Erfahrung, eigenes Entwicklungspersonal, ein intelligentes Produkt, ein Ersatzteillager und eine akzeptable Serviceunterstützung verfügen sollte.
- **Ein akzeptabler Preis** für gute Qualität, Voraussetzung für eine kurze Amortisationszeit.

Auch die **Notstrategien** bei Ausfall des DNC-Rechners, der Übertragungsstrecke oder der Anschluss-Terminals müssen in die kritische Betrachtung mit einbezogen werden.

1.12 Stand und Tendenzen

DNC-Systeme sind heute ein integraler Bestandteil der betrieblichen Informationstechnologie. Sie versorgen die NC-Maschinen und das Personal mit allen fertigungsrelevanten Daten. Sie verwenden leistungsfähige, industrietaugliche Rechner als universelles Verwaltungs- und Verteilungssystem sämtlicher Fertigungsdaten. Im Vergleich zu den früheren DNC-Systemen wurde der Funktionsumfang wesentlich erweitert, sowie Sicherheit und Schnelligkeit erhöht. Für den Einsatz in flexiblen Fertigungssystemen besteht eine Zugriffsmöglichkeit auf alle fertigungsrelevanten Datenbestände.

Die Zielvorgabe der kommenden Jahre lautet **„Digitale Fertigung“**. Darunter ist zu verstehen, dass die CAD-erzeugten Daten rechnergestützt zu NC-Programmen verarbeitet und fehlerfrei via DNC-System an die CNC-Maschinen weitergegeben werden müssen. Neue Technologien, wie High

Speed Cutting, Rapid Prototyping oder Laseranwendungen, erfordern enorme Datenmengen und sehr hohe Übertragungsgeschwindigkeiten. Lochstreifen sind dafür völlig ungeeignet. Elektronische Datenträger, wie Magnetbänder oder Disketten, sind werkstattuntauglich und unwirtschaftlich, da sie entsprechende Lesegeräte voraussetzen. Die beste Lösung sind netzwerkgestützte DNC-Systeme.

Kommende DNC-Systeme beinhalten deshalb die neuesten Entwicklungen im Kommunikationsbereich (Netzwerktechnik, Internet, Intranet, etc.), erfüllen aber auch die Anforderungen vorhandener, älterer Maschinen und Steuerungen. Bei fast allen DNC-Installationen müssen auch ältere NC-Maschinen angeschlossen werden.

Die neuen CNCs werden mit universellen Datenkommunikationsfunktionen und standardisierten LAN-Schnittstellen ausgerüstet. Damit lassen sie sich, wie alle anderen Netzwerkteilnehmer (CAD, PPS, Werkzeugverwaltung, NC-Programmierung, etc.), problemlos in den betrieblichen Informationsfluss integrieren.

Für DNC-Systeme besteht nach wie vor ein Zukunftsmarkt, da DNC-Systeme noch lange notwendig sein werden, auch wenn die neuen Maschinen einen Netzwerkanschluss mitbringen. Bei Neuinstallationen werden DNC-Systeme und das Netzwerk bereits in den Planungen vorgesehen.

In Werkstätten, wo größere NC-Maschinenparks existieren oder geplant sind, ist der Weg zu DNC vorgezeichnet. Das Gleiche gilt bei der Installation neuer Technologien, auch bei wenigen Maschinen. Bei flexiblen Fertigungssystemen sind DNC-Systeme unverzichtbar. Flexibilität lässt sich nur erreichen, wenn beim Wechsel der Bearbeitung auch die NC-Programme, Werkzeuge und Werkzeugdaten, Korrekturwerte und Nullpunkttabellen schnell zur Verfügung stehen. Auch Bilder der Werkstücke in verschiedenen Spannlagen helfen dem Bedienpersonal, mit neuen Werkstücken schneller vertraut zu werden.

1.13 Zusammenfassung

DNC-Systeme haben 3 Hauptaufgaben:

- Verwaltung der NC-Programme für alle angeschlossenen CNC-Maschinen
- Zeitgerechte Übertragung der NC-Programme an die CNC-Maschinen
- Aktivierung der Datenübertragung
  - manuell von einer Zentralstelle aus und
  - automatisch oder manuell von der CNC aus.

Dies bedeutet, dass die Datenanforderung zur Übertragung eines NC-Programmes in eine definierte CNC sowohl vom Rechner aus, als auch von jeder CNC aus möglich sein muss. Der DNC-Rechner übernimmt oder ersetzt keine Funktionen der CNC. Auch in einem Flexiblen Fertigungsystem, wo alle CNC-Maschinen per DNC mit Daten versorgt werden, bleiben die Steuerungsfunktionen in den CNCs erhalten. Für den automatischen Datenaustausch mit dem DNC-Rechner verfügt jede CNC über einen DNC-Anschluss, heute meistens eine Ethernet-Schnittstelle. Rufen mehrere Maschinen gleichzeitig Programme vom DNC-System ab, dann muss die Übertragungsreihenfolge nach vorgegebenen Prioritäten erfolgen.

Aufgrund der Leistungsfähigkeit der DNC-Rechner haben diese im Laufe der Zeit immer mehr zusätzliche Aufgaben übernommen. So müssen zusätzlich zu den NC-Programmen auch die Programme für die Werkstück-Handhabungsgeräte übertragen werden, sowie die evtl. erforder-

lichen Messprogramme für Kontrollmessungen in der Maschine. Hinzu kommen noch die aktuellen Korrekturwerte für die Längen bzw. Durchmesser der Werkzeuge, den Werkzeugverschleiß, erforderliche Nullpunktverschiebungen, sowie Bedienerhinweise und Aufspannpläne.

Zur Sicherheit gegen falsche Programmübertragungen kommen noch weitere Informationen hinzu, wie

- Freigabe-Überprüfung der Programmnummer für diese Maschine
- Bediener, Zeit und Datum des Abrufes
- Freigabe des neuen Programmes zur Aktivierung und Bearbeitung der Teile
- Vergleich der erforderlichen Werkzeuge mit den im Werkzeugmagazin vorhandenen Werkzeugen und Ausgabe einer Meldung „Werkzeug XXX fehlt“ an den Bediener.

Eine weitere, sehr wichtige Aufgabe ist noch die automatische Übertragung der MDE/BDE-Daten (Maschinendaten- und Betriebsdaten-Erfassung) von der CNC an die Zentrale. Darunter versteht man

- die Laufzeiten und Stillstandszeiten der Maschine,
- Fertigungsstückzahlen, Ausschussmeldungen,
- Unterbrechungen der Fertigung mit Ursache
- Maschinen-Stillstandszeiten mit Ursache
- aufgetretene Fehlermeldungen zur statistischen Auswertung
- Wartungshinweise und Kontrolle der Ausführung.

Weiterhin ist für die Bedienung wichtig, ob die Kommunikation der CNC mit dem DNC-Rechner über die CNC-integrierte Tastatur erfolgt oder ob ein zusätzliches DNC-Terminal erforderlich ist. Heute ist die Nutzung des CNC-Bedienfeldes zwar preiswerter und üblich, erfordert aber für jedes CNC-Fabrikat eine Schnittstellen-Anpassung, evtl. mit unterschiedlicher Bedienung. Bei Verwendung von DNC-Terminals an den Maschinen ist die weitgehend identische Bedienungsweise von Vorteil.

Nicht zuletzt ist die Art und Geschwindigkeit der Datenübertragung von Bedeutung. Damit die Übertragung nicht zum Engpass wird, muss die Übertragungsgeschwindigkeit möglichst hoch sein. Zudem ist die absolut fehlerfreie Übertragung wichtig. Beide Forderungen werden heute durch die Ethernet-Verbindung erfüllt. Es stehen auch Systeme mit kabelloser Funkübertragung zur Auswahl.

DNC – Direct Numerical Control oder Distributed Numerical Control



Das sollte man sich merken:

1. Die heutige Auslegung als **„Distributed Numerical Control“** drückt aus, dass der DNC-Funktionsumfang auf mehrere Rechner verteilt sein kann, die über ein LAN kommunizieren
2. Heutige DNC-Systeme haben klar definierte **Aufgaben**, wie z. B.
   - Zeitgerechte Versorgung der angeschlossenen Maschinen und Automatisierungseinrichtungen mit NC-Teileprogrammen und anderen fertigungsrelevanten Daten.
   - Reduzierung der Wartezeiten auf NC-Programme und weitere Fertigungsdaten.
   - Einführung einer Datenorganisation mit sprechenden Programmkennungen.
   - Ersatz der mobilen Datenträger mit all ihren Nachteilen wie Lagerung und Verwaltung, Beschädigung, Datenverlust und umständliches Handling an den Maschinen.
   - Verwaltung von beliebig vielen NC-Teileprogrammen und Fertigungsinformationen im DNC-Rechner.
   - Zurückgabe korrigierter NC-Programme von den Maschinen an das DNC-System mit Kennzeichnung der Änderungen.
   - Bessere Information der Bediener an den Maschinen.
3. Zur **bidirektionalen Datenübertragung** stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung:
   - Sternverbindungen vom Rechner über Mehrfach-Schnittstellenkarte zu jedem Teilnehmer.
   - Ein lokales Netzwerk (LAN) mit den Vorteilen absoluter Datensicherheit und höherer Übertragungsgeschwindigkeit.
   - Auch die **Übertragung per Funk** zu und von den Maschinen ist möglich.
4. Die an DNC angeschlossenen CNCs benötigen **keine Datenlesegeräte.** Dadurch entfallen Stillstandszeiten für Wartungsarbeit und teure Ersatzhaltung.
5. Als Übertragungsmedium stehen verschiedene Systeme zur Auswahl. Empfehlenswert sind **LAN-Schnittstellen,** wie z. B. für Ethernet mit TCP/IP-Protokoll.
6. Heutige CNCs sollten unbedingt über einen Daten-Anschluss verfügen.
7. Bei NC-Programmen mit Überlänge ist der ununterbrochene Betrieb durch **automatisches Nachladen** von mehreren Programmabschnitten möglich.
8. Die **„Stamm- oder Kopfdaten“** der NC-Programme dienen
   - zur besseren Verwaltung, Identifizierung und Kennzeichnung
   - zur Sicherheit gegen unsachgemäße Verwendung
   - zur Information der Bediener
9. **MDE/BDE** sind keine DNC-Ausbaustufen, sondern separate Funktionsbausteine, die die vorhandene DNC-Hard- und Software nutzen.
10. DNC-Systeme haben einen klar abgegrenzten Aufgabenbereich und beinhalten z. B. keine FFS-Leitfunktionen.
11. Die Wirtschaftlichkeit von DNC-Systemen ist unbestritten.

2 LAN – Local Area Networks

Informationen im Betrieb werden immer wichtiger und gelten als wesentlicher Produktionsfaktor. Dafür ist es notwendig, dass alle erforderlichen Informationen auch zum richtigen Zeitpunkt bei den angeschlossenen Benutzern zur Verfügung stehen. Diese Aufgabe übernimmt das innerbetriebliche Datennetz.

2.1 Einleitung

Die in den verschiedenen CA-Bereichen (CAD, CAM, CAQ, CAR, CAI, CAE) eingesetzten Computer und CNCs sind **Daten erzeugende und Daten verarbeitende Systeme.** Je mehr dieser Geräte in einem Betrieb installiert werden, umso wichtiger ist es, dass sie auch Daten untereinander austauschen können. Dies ist die **Aufgabe des innerbetrieblichen Datennetzes** *(Bild 2.1)*.

Breitband-Kabel und -Netzwerke übertragen mehrere Informationen gleichzeitig von verschiedenen „Sendern" zu verschiedenen „Empfängern". Solche Breitband-Netzwerke sind vergleichbar mit den bekannten Fernsehkabelnetzen. Auf diesen Kabeln befinden sich ebenfalls mehrere Fernseh- und Radioprogramme gleichzeitig, sowie zusätzliche Videotexte. Jeder Empfänger entnimmt dieser Vielfalt von Informationen nur das Programm, auf das er eingestellt ist. Dazu ist allerdings ein **Kabeltuner** erforderlich, der die Programme von der Kabelfrequenz auf die normale Eingangsfrequenz der Geräte umsetzt.

Zwar erfolgt die Übertragung im **Simplexbetrieb,** d.h. nur in einer Richtung vom Sender zum Empfänger, aber es wäre technisch durchaus realisierbar, Daten auch zurückzuübertragen. Dies bezeichnet man als **Duplexbetrieb,** d. h. während der Sendungen könnten Informationen vom Fernsehteilnehmer zur Zentrale gesendet werden.

Daneben gibt es noch eine dritte Möglichkeit, der **Halb-Duplexbetrieb,** wobei immer nur ein Teilnehmer senden kann *(Bild 2.2)*.

Im Vergleich zu LANs besteht allerdings der gravierende Unterschied, dass die einzelnen Teilnehmer an einem Fernseh-Kabelnetz nicht untereinander kommunizieren können.

2.2 Local Area Network (LAN)

LANs sind Datennetze, die auf einen bestimmten Bereich begrenzt sind. Die Ausdehnung von LANs ist immer auf den Grundstücksbereich eines Unternehmens beschränkt und unterliegt damit keiner Regulierung durch öffentliche Ämter.

Einen Überblick über die Breite der Kommunikationsmöglichkeiten gibt *Bild 2.3*. Rechnerverbindungen über **große Entfernungen** werden als **Wide Area Network (WAN)** bezeichnet und benötigen öffentliche Einrichtungen, wie z. B. Telefonleitungen, ISDN oder DATEX-P, DSL.

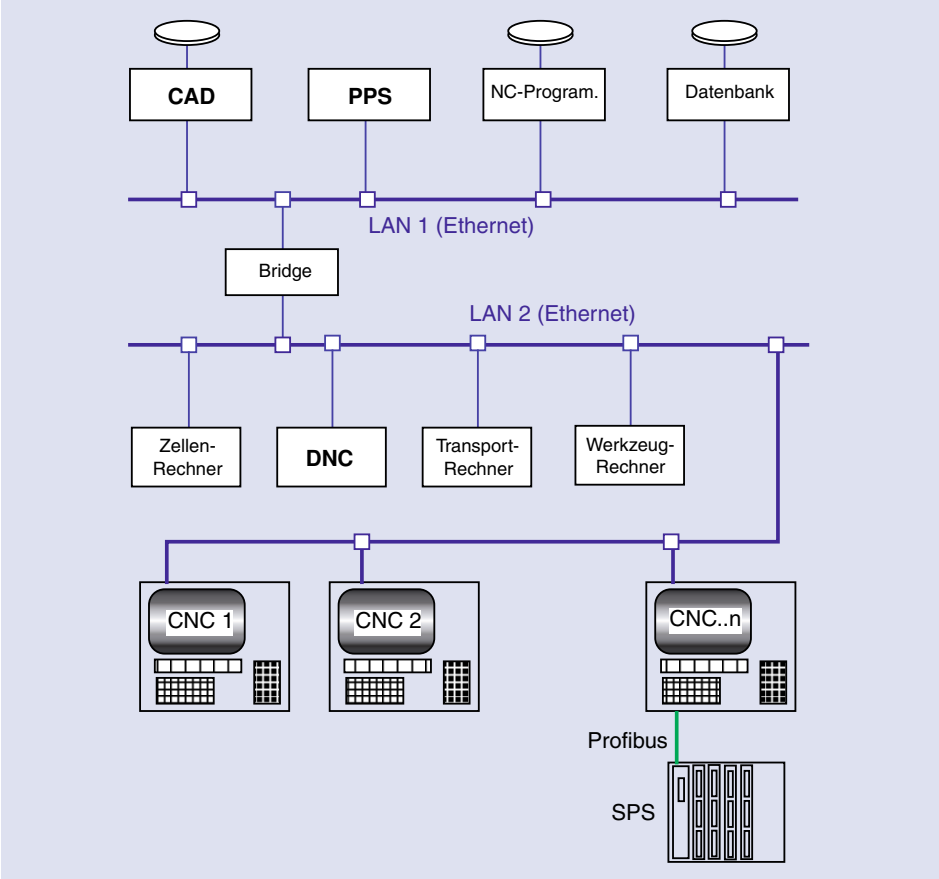


Bild 2.1: Kommunikation mehrerer Rechner und CNCs über zwei identische Ethernet-Netzwerke, die über eine „Bridge" gekoppelt sind.
Dies ermöglicht den freien Zugriff und Datenaustausch zwischen ausgewählten Teilnehmern in Netz 1 und Netz 2.

2.3 Was sind Informationen?

Informationen können Daten, Bilder, Zeichnungen oder Steuerungsprogramme sein. Die Informationsverarbeitung steuert und dokumentiert Prozesse und Zusammenhänge in mehreren Bereichen eines Unternehmens. Informationen regeln Lagerhaltung und Produktion (PPS), steuern NC-Maschinen und Roboter (DNC, CNC), protokollieren Produktionsdaten und Ausfälle (MDE/BDE), verringern unnötige Stillstandszeiten (CAQ, Diagnose, Wartung) und erhöhen somit die Wirtschaftlichkeit eines Betriebes. Daher das zunehmende Interesse an der Vernetzung.

Vor welchen Aufgaben stehen Unternehmen, die Informationen schneller erfassen, verteilen und gezielt zur Steuerung der Fertigung nutzen möchten?

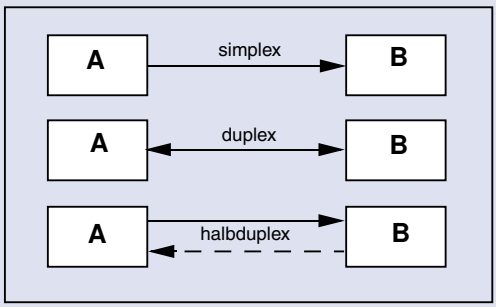


Bild 2.2: Simplex-, Duplex- und Halbduplex-Übertragungsprinzip

- Wichtigste Voraussetzung ist **der Einsatz von Rechnern samt Peripherie, Datenbanken und geeigneter Software,** um Informationen erzeugen, speichern und verteilen zu können.
- Es ist unumgänglich, ein **Informationsnetz** aufzubauen. Dieses soll allen Benutzern ermöglichen, auf alle Informationen zuzugreifen, die sie brauchen. Da mit zunehmender Automatisierung immer mehr Stellen im Betrieb diese Informationen nutzen und Ergebnisse zurückmelden, müssen diese Datennetze auch zuverlässig, schnell, ausbaufähig und sicher sein.
- Um über das Datennetz miteinander kommunizieren zu können müssen die anzuschließenden Geräte über eine einheitliche **Daten-Schnittstelle** verfügen. Diese muss hard- und softwaremäßig für das gemeinsame Datennetz ausgelegt sein.

2.4 Kennzeichen und Merkmale von LAN

Es gibt heute mehrere unterschiedliche LAN-Systeme. Obwohl deren grundsätzliche Aufgabe immer gleich ist, bestehen doch wesentliche technische Unterschiede, deren Merkmale in folgenden sieben Bereichen liegen:

- **Übertragungstechnik**
- **Übertragungsmedium**
- **Netz-Topologie**
- **Zugriffsverfahren**
- **Protokoll**
- **Übertragungsgeschwindigkeit**
- **max. Anzahl der Teilnehmer.**

Übertragungstechnik

Bei lokalen Datennetzen nutzt man, je nach Anforderungen, zwei unterschiedliche Übertragungstechniken:

- **das Basisbandverfahren und**
- **das Breitbandverfahren.**

Die **Basisbandtechnik** verwendet einen einzigen Übertragungskanal, der den Kommunikationspartnern jeweils nur für kurze Zeit zur Verfügung gestellt wird. Dieses Verfahren bezeichnet man als **„Zeitmultiplex“.** Da keine aufwändigen Modulations- und Demodulationsgeräte erforderlich sind, ist dieses Prinzip preisgünstiger als die Breitbandtechnik.

Bei der **Breitbandtechnik** nutzt jeder Kanal nur einen begrenzten, unterschiedlichen Bereich des zur Verfügung stehenden,

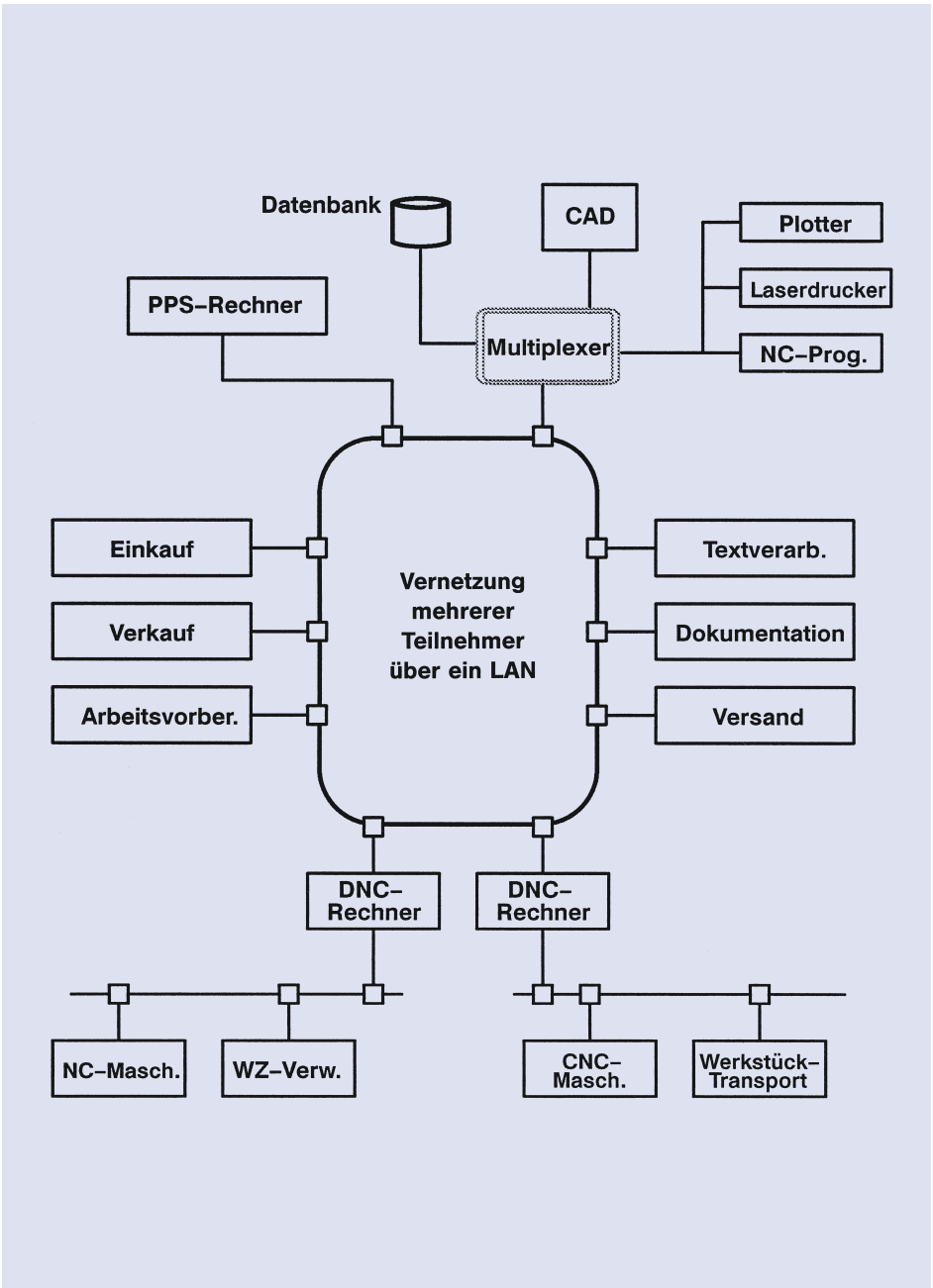


Bild 2.3: Schematische Darstellung der Kommunikationsmöglichkeiten in einem Lokalen Netzwerk (LAN)

breiten Frequenzbandes, weshalb man dieses Verfahren auch als **„Frequenzmultiplex“** bezeichnet. Beide Verfahren haben ihre speziellen Vor- und Nachteile.

Die mit einer dieser Techniken übertragenen Informationen sind wegen der Übertragungssicherheit elektronisch „verpackt“ und so schnell, dass sie nicht direkt, sondern nur über einen so genannten **„Umsetzer“** für den Empfänger lesbar gemacht werden können.

Übertragungsmedium

In der Kommunikationstechnik ist der Begriff **Übertragungsmedium** spezifiziert als

- **leitungsgebundene Übertragung** (z. B. LAN oder WAN):
  - Twisted-Pair-Kabel (verdrillte Kabel) als Unshielded Twisted Pair (ohne Schirm) oder als Shielded Twisted Pair mit Abschirmung der einzelnen Adernpaare in einer Leitung
  - Koaxialkabel, zweipolige Kabel mit konzentrischem Aufbau.
  - Lichtwellenleiter (LWL) wie Glasfasern, Polymere optische Fasern (POF) oder Polymer-Clad Silica Fasern (PCS-Faser).
- **nicht-leitungsgebundene Übertragung** (z. B. WLAN):
  - Funktechnik,
  - Infrarot,
  - Bluetooth.

Abhängig von den zu übertragenden Frequenzen, die von 500 kHz bis 10 GHz reichen, können einfach verdrillte Leiter, abgeschirmte mehrfach verdrillte Leiter, Koaxialkabel oder Glasfaserkabel dienen. Glasfaserkabel bietet die höchste Sicherheit gegen Störeinflüsse auf der Leitung, verlangt aber entsprechend teure „MODEMs“ zur Modulation und Demodulation der zu übertragenden Daten *(Bild 2.4).*

Kabellängen

Die **möglichen Kabellängen** für eine Ethernet-LAN kann man nicht pauschalieren. Bis zu 1 GBit/s kann man 100 m an-

Übertragungsmedium	Kapazität	Bemerkung
Symmetrische Kabel (Twisted Pair)		**Telefon**
– <CAT3	bis 500 MHz	Ethernet 10 Base T
– CAT3	10 MHz	Ethernet 100 Base T
– CAT5	100 MHz	Ethernet 1 G Base T
– CA 6	250 MHz	
– CAT7	600 MHz	
Koaxialkabel		
– Ethernet	10 MHz	Ethernet 10 Base 2
– Funk- + Fernsehtechnik	2 GHz	z.B. Satellitenempfangsanlage
Lichtleiter	>10 GHz	störungsunempfindlich

Bild 2.4: Übertragungsmedien und deren Kapazitäten

nehmen, wobei allerdings auch die Patchkabel und Stecker/Dosen gezählt werden. Dabei geht man von einer Netzkabellänge von 90 m aus plus 10 m Patchkabel als Verbindung zwischen Anschlussdose in der Wand und Computer.

Bei 10 GBit/s Netzwerken hängt die Länge stark von den verwendeten Kabeln ab. Um 100 m zu erreichen, müssen bestimmte Kategorien (Cat-6 geschirmt, Cat-6A) verwendet werden, sonst sind nur 45 m oder sogar weniger erreichbar. Der Verlegeaufwand ist deutlich höher und eignet sich nicht für die gängige Arbeitsplatzvernetzung.

Bei 40 oder 100 GBit/s stößt Kupfer an seine Grenzen. Das ist bisher nicht praktikabel machbar.

Bei Glasfaser hängt viel vom Standard ab, maximal machbar sind 40 km bei 100 GBit/s, 10 km bei 40 GBit/s. Der Verlegeaufwand ist dabei sehr viel höher als bei Kupferkabel.

Netz-Topologie

Die derzeit bestehenden LAN-Standards sehen Bus-, Ring-, Stern- oder Baumstrukturen vor *(Bild 2.5 und 2.6)*.

Bei **Busnetzen** sind alle Teilnehmer an einer gemeinsamen Leitung angeschlossen. Busnetze zeichnen sich durch kurze, einfache Leitungsführungen für das Gesamtnetz aus. Die Übertragung erfolgt immer auf direktem Wege zwischen Absender und Empfänger.

Bei **Ringnetzen** sind alle Teilnehmer an einem Leitungsring angeschlossen, d.h. jede Station ist mit mindestens zwei benachbarten Stationen verbunden. Die Daten durchlaufen den Ring in einer fest vorgegebenen Richtung und kommen dann wieder zum Anfangspunkt zurück.

Damit eine Unterbrechung des Ringes nicht zum Totalausfall der Informationsübertragung führt, nutzt der **TOKEN-Ring** eine doppelte Leitungsführung durch Verwendung verdrillter Doppeladern. Durch einen automatischen oder manuell herbeigeführten Kurzschluss der Hin- und Rückleitungen können fehlerhafte Leitungen oder Geräte umgangen werden.

Die einfachste Datenübertragung, z.B. vom DNC-Rechner zu den CNCs, erfolgt über direkte Kabelverbindungen. Bei dieser **Sternverbindung** sind alle Teilnehmer an einer zentralen Station angeschlossen und können deshalb nicht direkt miteinander kommunizieren, sondern nur über die Zentralstation. Weil jeder Anschluss eine Schnittstelle am Rechner belegt, ist diese Verbindung nur für den Anschluss weniger Teilnehmer geeignet.

Die **Baumstruktur** ist eine gemischte Struktur aus den oben genannten Topologien.

Zugriffsverfahren

Das **Zugriffsverfahren** regelt, welcher Teilnehmer Informationen auf dem Datenbus senden darf und wie der Empfänger die ihn betreffende Nachricht erkennt. Dabei unterscheidet man nach Verfahren mit kollisionsfreiem Zugriff und Verfahren mit kollisionsbehaftetem Zugriff auf das Datennetz.

Prinzipiell werden folgende Zugriffsverfahren eingesetzt:

- Master-Slave-Verfahren (Interbus-S)
- Token-Ring (Token-Ring-Prinzip)
- Token-Passing (Profi-Bus)

Wichtig ist das Prinzip, Kollisionen zu erkennen und zu verhindern. Als **Kollision** bezeichnet man, wenn sich zwei (oder mehr) Signale gleichzeitig auf einer gemeinsamen Leitung befinden. Dabei überlagern sich die beiden elektrischen Signale zu einem gemeinsamen Spannungspegel.

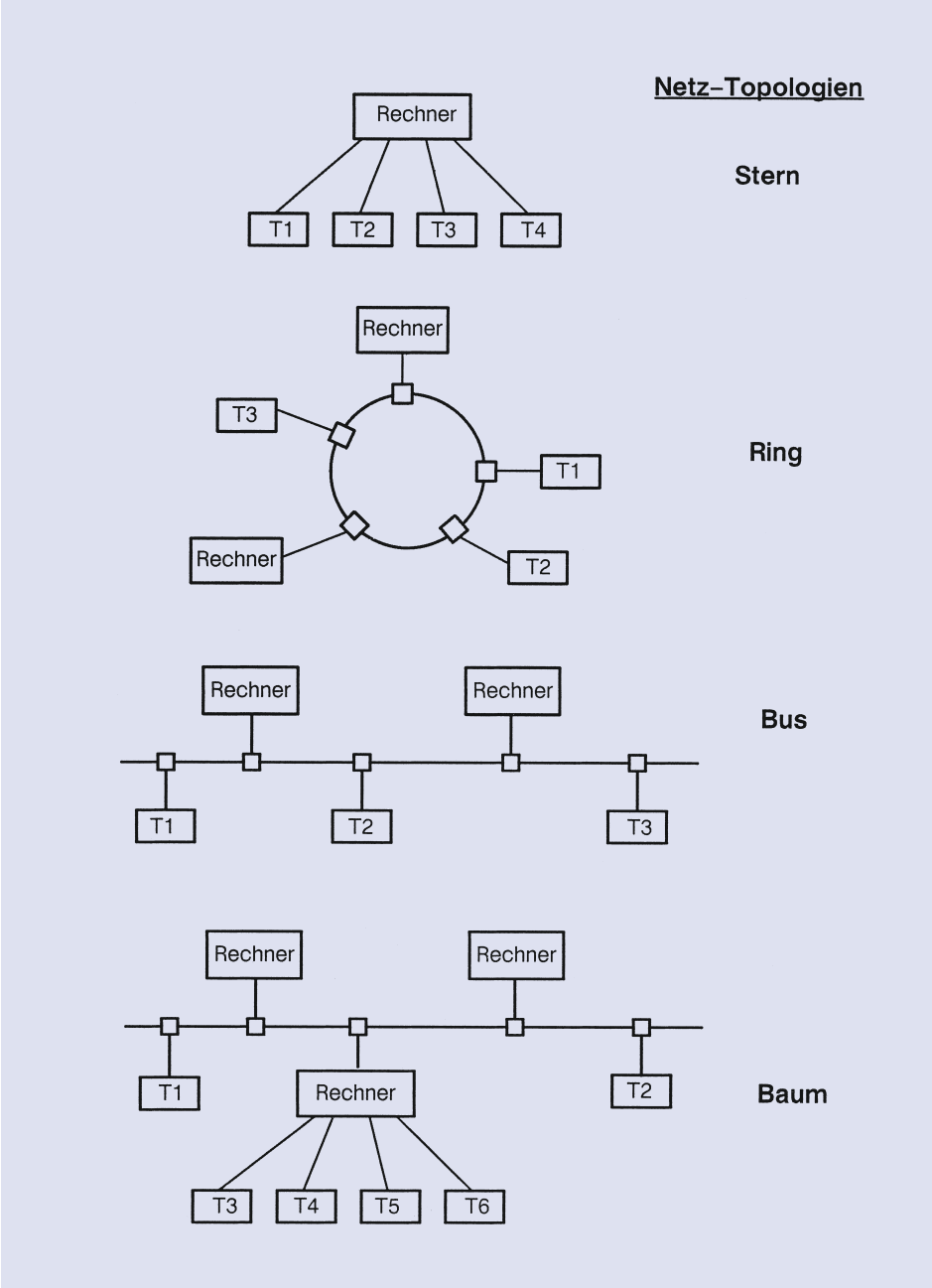


Bild 2.5: Stern-, Ring-, Bus- und Baumstruktur lokaler Netzwerke.
(T1 ... T6 = Teilnehmer 1 bis 6)

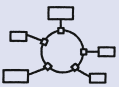
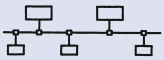
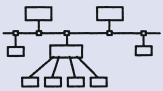
Stern	Ring	Bus	Baum
			
verbreitete Struktur	jede Station benötigt aktiven Sender und Empfänger	Koaxialkabel als passives Medium	vom Hauptstrang zweigen Äste ab
VORTEILE: Ausfall einer Einheit hat keinen Einfluss auf das Netz	einfache Anschlussmöglichkeit neuer Teilnehmer	Stationen beliebig an- und abschaltbar	bei getrennten Netzen oder späteren Erweiterungen
NACHTEILE: Hohe Leitungskosten bei größeren Entfernungen	2 Doppeladern erforderlich zur Sicherheit bei Ausfall einer Station	Ausfall bei Kabelschaden	Aufwändige Erweiterung, teuer bei unterschiedl. Netzen

Bild 2.6: Topologische Strukturen von Netzwerken und ihre Vor-/Nachteile

Die Folge ist, dass der Empfänger das elektrische Signal nicht mehr nach den einzelnen logischen Signale (Bits) unterscheiden kann.

- CSMA/CD *(Carrier Sense Multiple Access* mit Collision Detection),
- CSMA/CA *(Carrier Sense Multiple Access* mit Collision Avoidance)

  (CAMA/CD mit Arbitrierung im Kollisionsfall, d. h. der Teilnehmer mit der höheren Priorität sendet weiter, der Teilnehmer mit der niederen Adresse hat die höhere Priorität. Dies bedeutet, dass der Teilnehmer mit der niedersten Adresse **die höchste Priorität und damit Echtzeitfähigkeit besitzt.**

Beim **Master-Slave-Verfahren** ist ein Teilnehmer der *Master,* alle anderen sind die *Slaves*. Der Master hat als einziger das Recht, unaufgefordert auf die gemeinsame Ressource zuzugreifen. Der Slave kann von sich aus nicht auf den Bus zugreifen; er muss warten, bis er vom Master gefragt wird (Polling).

Hauptvorteil ist, dass nur der Master den Zugriff steuert, was Kollisionen verhindert.

Nachteilig ist, dass die Kommunikation zwischen Slaves nicht möglich ist. Zudem ist das Abfragen (Polling) der Slaves durch den Master ineffizient.

Das Problem der Kommunikation zwischen Slaves kann durch das Verfahren

des „Beschleunigten Datenaustausches“ verringert werden. Hierbei überträgt der Master an Slave 1 den Befehl „Empfange Daten“. Slave 2 erhält vom Master den Befehl „Sende Daten“, woraufhin dieser mit der Datenübertragung beginnt.

Empfängt Slave 1 die Daten inklusive einer „Endemeldung“ korrekt, sendet er wiederum eine „Endemeldung“ an den Master. Dies erfordert von den Slaves eine etwas höhere Intelligenz, was sich allerdings auch auf den Preis auswirkt.

Master-Slave-Architekturen können auch mit dem Token Bus kombiniert werden, wobei dann nur die Master den Token weitergeben.

Beim **Token-Prinzip** *(Bild 2.7)* zirkuliert dazu ständig ein spezielles Bitmuster, der „TOKEN“, auf dem Ring. Er wird wie ein Stafettenholz von einem aktiven Gerät zum nächsten weitergegeben und nur wer den TOKEN hat, darf senden. Dazu wartet die sendebereite Station, bis der vorbeikommende Token den „FREI“-Zustand signalisiert, setzt ihn gewissermaßen im Flug auf „BESETZT“, fügt Absender- und Zieladresse hinzu und hängt die zu übertragenden Daten an. Die Zielstation erkennt ihre Adresse, kopiert die Daten in den Eingangspuffer und setzt das „KOPIERT“-Bit. Der gesamte Datenstrom gelangt schließlich wieder zur Sendestation, die die Daten zur Sicherheit mit den gesendeten Daten vergleicht, entfernt und einen „FREI“-Token auf den Ring schickt. Datenkollisionen werden damit verhindert.

Token Passing ist ein hybrides Zugriffsverfahren aus Token-Ring und Master-Slave. Grundlage von Token Passing ist das Token, das im Netzwerk von einer Master-Station zur benachbarten Master-Station in einer logischen Ring-Topologie weitergeleitet wird.

Der Begriff **Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection (CSMA/CD)** („Mehrfachzugriff mit Trägerprüfung und Kollisionserkennung“) bezeichnet ein asynchrones Medienzugriffsverfahren (Protokoll), das den Zugriff verschiedener Stationen auf ein gemeinsames Übertragungsmedium regelt. Wenn mehrere Stationen den Bus zeitgleich verwenden wollen, können **Kollisionen** entstehen, welche die übertragenen Signale unbrauchbar machen. Um dies wirkungsvoll zu unterbinden, wird das CSMA/CD-Verfahren eingesetzt, um auftretende Kollisionen zu erkennen, zu reagieren und zu verhindern, dass sich diese wiederholen.

Carrier Sense Multiple Access/Colli-

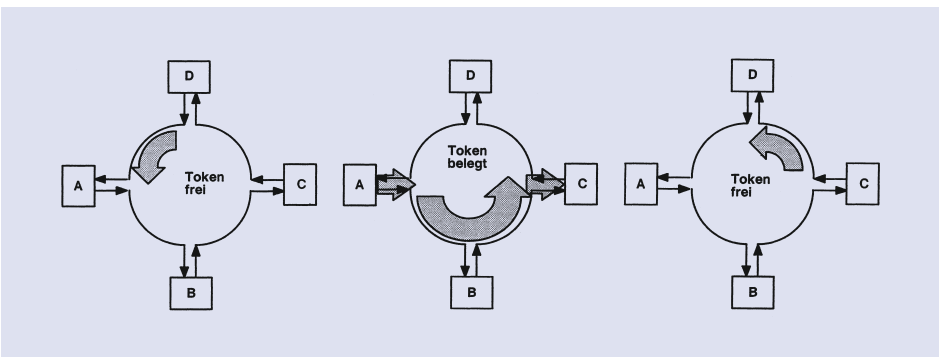


Bild 2.7: Token Ring Prinzip (Senden von A nach C)

sion Avoidance (CSMA/CA) („Mehrfachzugriff mit Trägerprüfung und Kollisionsvermeidung“) bezeichnet ein Prinzip für die **Kollisionsvermeidung** bei Zugriff mehrerer Teilnehmer auf denselben Bus. Es findet abgewandelt auch bei Kommunikationsverfahren wie ISDN Anwendung, oder in vielen Kommunikationsnetzen, bei denen mehrere Clients Daten auf einen Bus legen und es nicht zu Kollisionen kommen darf. In zentral koordinierten Kommunikationsnetzen tritt dieses Problem nicht auf.

Bei Verfahren mit **kollisionsbehaftetem Zugriff** kann jede Station zu jedem Zeitpunkt senden. Mögliche Datenkollisionen werden bewusst in Kauf genommen und führen sofort zum Abbruch der begonnenen Übertragung. Nach Ablauf einer zufallsbedingten Wartezeit beginnt die Übertragung wieder und die zuerst sendende Station sperrt den Zugriff für alle anderen Stationen.

Dieses Verfahren ist unter der Abkürzung **CSMA/CD** (Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection) bekannt und unter der Handelsbezeichnung **ETHERNET** verfügbar. Dieses Verfahren ist heute das am weitesten verbreitete LAN-Netzwerk.

Protokoll

Unter einem Protokoll versteht man festgelegte Bedingungen, Regeln und Vereinbarungen, die den **gesicherten Informationsaustausch** von zwei oder mehr miteinander kommunizierenden Systemen oder Systemkomponenten ermöglichen sollen.

Ein Protokoll ist die Vorschrift, nach der die Kommunikation in einem Datenübertragungssystem abläuft. Das Protokoll legt Code, Übertragungsart, Übertragungsrichtung, Übertragungsformat, Verbindungsaufbau und Verbindungsauflösung fest.

Beispiel: Die menschliche Sprache und deren Regeln. Personen, die sich in der gleichen Sprache unterhalten, können mittels Mund und Ohren (= SCHNITTSTELLE) wechselseitig Informationen austauschen. Das Kommunikationsmittel Sprache ist festgelegt durch Worte, deren Bedeutung, eine Grammatik und die Aussprache (= PROTOKOLL).

Versteht dagegen jede Person nur die eigene, von den anderen unterschiedliche Sprache, dann ist keine Kommunikation möglich, obwohl alle sowohl sprechen (senden) als auch hören (empfangen) können.

Damit die Datenübertragung auch funktioniert, müssen die Schnittstellen und Protokolle aller Teilnehmer identisch sein oder über Umsetzer identisch gemacht werden. (Sie müssen sozusagen die gleiche Sprache sprechen und verstehen oder sie benötigen einen Dolmetscher.) Weiterhin ist wichtig, dass auch die Sende- und Empfangsgeschwindigkeiten übereinstimmen.

Übertragungsgeschwindigkeit

(Tabelle 2.1)

Die Übertragungsgeschwindigkeit in einem Datennetz muss möglichst hoch sein, damit möglichst viele Daten pro Sekunde transportiert werden können und keine Wartezeiten entstehen.

Übertragungsgeschwindigkeit und **Datenrate** bezeichnen ein und dasselbe. Im Zusammenhang mit digitalen Signalen spricht man auch von Bandbreite, also die zur Verfügung stehende Kapazität pro Übertragungsschritt. Sie wird in der Regel in Bit/s, kBit/s, MBit/s oder GBit/s angegeben. Angaben in Byte/s, kByte/s, MByte/s oder GByte/s sind dagegen unüblich. **Eine Angabe in Baud ist meistens falsch,** da dies als Einheit für die Schrittgeschwindigkeit definiert ist (Baudrate). Arbeitet man mit nur zwei verschiedenen Spannungen

Tabelle 2.1: Übertragungsgeschwindigkeiten im Vergleich
Quelle: http://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/0212095.htm

Bezeichnung	theoretisches Maximum	realistisches Maximum
USB 3.0	5 GBit/s	200 MByte/s
USB 2.0	480 MBit/s	36 MByte/s
Gigabit Ethernet	1 GBit/s	117 MByte/s
Fast Ethernet	100 MBit/s	11,8 MByte/s
DSL mit 16 MBit/s (Downstream)	16 MBit/s	1,9 MByte/s
DSL mit 6 MBit/s (Downstream)	6 MBit/s	0,7 MByte/s
UMTS/HSDPA mit 7,2 MBit/s	7,2 MBit/s	0,8 MByte/s
UMTS/HSDPA mit 3,2 MBit/s	3,2 MBit/s	0,4 MByte/s

(wie z. B. RS-232 mit 0 und 1), dann wird mit einem Schritt ein Bit übertragen, d. h. bei 9600 Baud auch 9600 bps. Werden aber mehrere unterschiedliche Spannungspegel benutzt, dann werden damit auch mehrere Bit pro Baud übertragen.

Verfügen die an ein Datennetz angeschlossenen NC oder CNC über eine begrenzte Download-Geschwindigkeit, dann muss zwischen LAN und Steuerung ein „Umsetzer" geschaltet werden. Dieser übernimmt die auf dem LAN mit höherer Geschwindigkeit ankommenden Daten in einen Datenpuffer *(buffer)* und gibt sie mit der richtigen Lesegeschwindigkeit in die CNC ab.

Da CNCs Computerbasis nutzen, verfügen sie auch meistens über schnelle Datenschnittstellen.

Die ständig an allen Teilnehmern vorbeifließenden Daten dürfen nur zum richtigen, in der „Adresse" angesprochenen Teilnehmer gelangen. Deshalb übernimmt der Umsetzer auch das „Ausfiltern und Auspacken" der Informationen.

Max. Anzahl der Teilnehmer

An einem Ethernet-Netz sind max. 1.024 Stationen anschließbar und die Länge des Netzwerkes darf 2.500 m betragen, ohne Gateways oder Router. Das Standard-Ethernet hat eine Übertragungsgeschwindigkeit von 10 MBit/s, Fast-Ethernet von 100 MBit/s und Gigabit-Ethernet von 1.000 MBit/s. Für Fast-Ethernet und Gigabit-Ethernet ist twisted-pair oder Glasfaserverkabelung notwendig, da Koaxialkabel diese hohen Frequenzen nicht zulassen.

Da die Feldbusse CAN, InterBus-S und -Profibus physikalisch auf seriellen Schnittstellen vom Typ RS485 basieren, sind die Leistungsdaten auch nahezu identisch. Unterschiede bestehen dagegen bei den Buszugriffsverfahren, den Sicherungsmechanismen und den Übertragungsprotokollen

Der **CAN-Bus** arbeitet mit CSMA/CA, dadurch ist die max. Leitungslänge komplex zu berechnen. Sie beträgt etwa 1 km bei einer Übertragungsrate von 50 KBit/s. Die max. Teilnehmerzahl ist auf 64, mit Einschränkungen auf 128 begrenzt.

Der **Interbus-S** überträgt bis 40 m zwischen zwei Teilnehmern 500 KBit/s an max. 256 Teilnehmer.

Beim **Profibus** sind 32 Teilnehmer, mit Repeatern bis 127 Teilnehmer möglich, wobei zwischen zwei Teilnehmern, die miteinander kommunizieren sollen, max. drei Repeater liegen dürfen. Die Übertragungsrate beträgt bei 200 m Ausdehnung 500 KBit/s, bei 1.200 m nur noch 93 KBit/s.

2.5 Gateway und Bridge

Zweck der Datenkommunikation ist es, Informationen ortsunabhängig zur Verfügung zu stellen. Diesem Ziel widersprechen eigentlich Lokale Netzwerke, wenn sie, wie eingangs erwähnt, auf ein bestimmtes Gebäude oder einen Abteilungsbereich begrenzt sind und deshalb in einem Unternehmen auch mehrere LANs existieren können. Deshalb braucht man Einrichtungen, die Informationen von einem LAN heraus in ein anderes Netz transportieren. Solche Einrichtungen nennt man **Bridges oder Gateways** *(Bild 2.8).*

Unter **Bridge** versteht man eine Einrichtung, meist ein Computer mit dazugehöriger Software, die die **Kopplung gleichartiger LANs** erlaubt und eine Kommunikation der Teilnehmer aus einem Netz mit Teilnehmern aus dem anderen gleichartigen

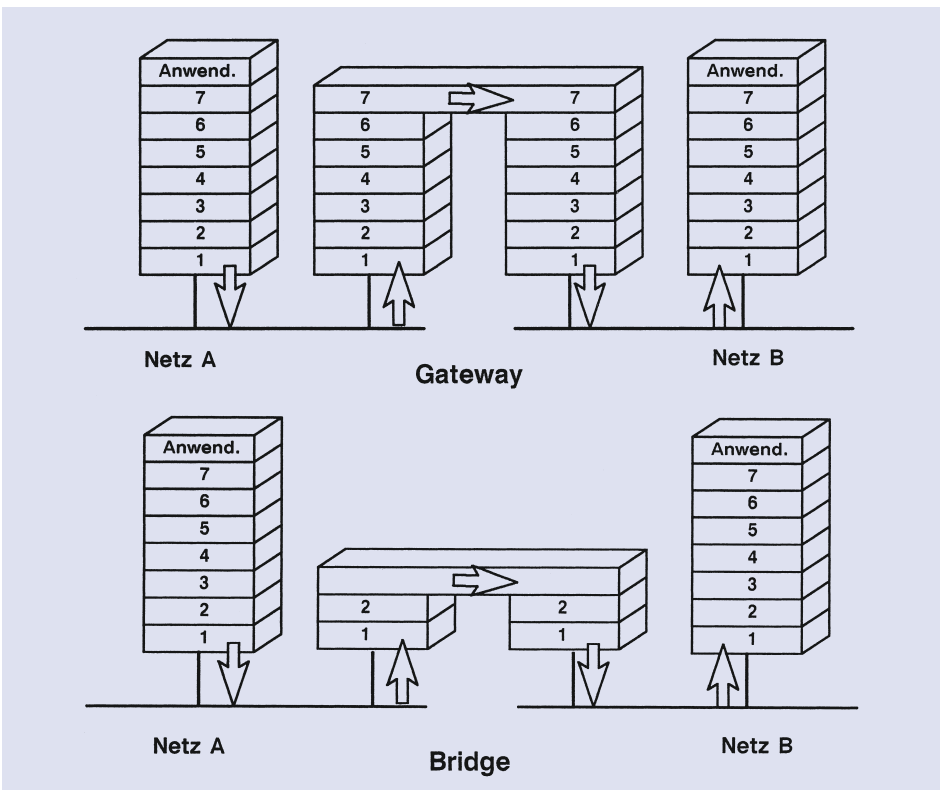


Bild 2.8: Gateway zur Kopplung von ungleichen Datennetzen, Bridge zur Kopplung von gleichen Datennetzen

Netz ermöglicht. Da definitionsgemäß die zu verbindenden Netzwerke identisch sind, findet in der Bridge keine Protokollumsetzung statt. Die Bridge muss jedoch die Adressen der vorbeikommenden Datenpakete erkennen und prüfen, ob dessen Empfänger im anderen Netz liegt. Nur wenn dies der Fall ist, leitet die Bridge dieses Datenpaket ins andere Netz und vermeidet dadurch eine unnötige Überlastung der Netze.

Bridges nutzt man auch als Verstärker, um die begrenzte Länge eines Netzes zu vergrößern.

Gateways dagegen dienen zur Verbindung **unterschiedlicher Netzwerke.** Es ist leicht einzusehen, dass Gateways relativ komplexe Gebilde sein können, da sie eine ganze Reihe zusätzlicher Aufgaben, wie Protokollwandlungs-, Formatierungs- und Anpassungsarbeiten, übernehmen müssen.

2.6 Auswahlkriterien eines geeigneten LANs

Für die Auswahl eines LANs sind 12 wesentliche Kriterien maßgebend, mit denen sich ein Käufer auseinander setzen muss:

1. Die max. **Übertragungsgeschwindigkeit** in Bit/s,
2. Die max. **zu erwartende Datenmenge,** die übertragen werden muss,
3. Die max. **Anzahl der anschließbaren Teilnehmer,** die ohne Probleme möglich ist,
4. Die Frage der **Datenübertragung** im Simplex-, Duplex- oder Halbduplexbetrieb zu allen Teilnehmern,
5. Die **Sicherheit bei Ausfall** eines Teilnehmers oder eines Abzweigknotens. Dabei darf die Datenübertragung nicht ausfallen,
6. Die max. zulässige **Leitungslänge** ohne Zwischenverstärker,
7. **Anzahl der Leitungen** im Kabel und **Kabelart** (abgeschirmt, verdrillt, Koaxial- oder Glasfaserkabel),
8. **Kleinster Biegeradius** des Kabels, wegen deren Verlegung in Kabelkanälen,
9. Die **Verlegungsbedingungen,** z.B. zusammen mit Leistungskabeln, in elektromagnetisch verseuchter Umgebung oder bei sehr starken Netzstörungen,
10. Der **Preis,** unterteilt nach
    a) Grundpreis für das LAN und
    b) Preis pro Teilnehmeranschluss.

2.7 Schnittstellen

Die übertragenen Daten müssen in jedes der angeschlossenen Systeme eingegeben werden können. Dazu dient die Geräte-Schnittstelle.

Eine Schnittstelle, auch als **Interface** bezeichnet, ist die exakt definierte Grenze zwischen zwei Hardware-Systemen, wie Computer, Drucker, CNC oder zwei Software-Programmen innerhalb eines Rechners. Von der Telekom auch im weiteren Sinne als Übergabestelle von Verantwortlichkeiten definiert, z.B. von Fernsehkabelnetz auf den Hausanschluss.

Eine Schnittstelle kann zur Verbindung von zwei gleichen oder zwei ungleichen Systemen dienen.

Beispiele: Zwei identische Computer, zwei nicht identische Computer, Computer/Drucker, Computer/CNC, DNC/CNC oder Mensch/Computer (= Tastatur und Bildschirm).

Hier sollen nur solche Schnittstellen betrachtet werden, die einen direkten Bezug zur Steuerung von CNC-Maschinen haben (Computer Aided Manufacturing = CAM). Dies sind in erster Linie die Schnittstellen für die Datenübertragung zu den CNC-Maschinen, Robotern, Transportsystemen, Werkzeugverwaltung, Messmaschinen und ähnlichen Einrichtungen.

Die Klassifizierung von Schnittstellen zeigt *Bild 2.9*.

Hardware-Schnittstellen

Hierunter versteht man die hardwareseitige Festlegung einer Geräteschnittstelle. Es wird beispielsweise definiert, wie viele Drähte zum Senden, Empfangen, Steuern, Melden, für den Takt usw. zum Einsatz kommen, wie der zu verwendende Stecker aussieht und wie dieser belegt sein soll.

Man bezeichnet sie auch als die Geräte-Anschlussschnittstellen, über die alle Informationen in ein Gerät hinein und von einem Gerät nach außen gegeben werden. Hierbei unterscheidet man nach **bit-seriellen** und **bit-parallelen** Schnittstellen.

Bei den bit-seriellen Schnittstellen werden die zu übertragenden Informationen in einer zeitlichen Reihenfolge auf der gleichen Leitung gesendet. Deshalb ist die Übertragungsgeschwindigkeit langsamer als bei der bit-parallelen Übertragung, wo die einzelnen Bits eines Zeichens gleichzeitig auf mehreren Leitungen anstehen.

Die **Nachteile** der parallelen Schnittstellen sind jedoch gravierend:

- mindestens 9 Leitungen für 8-bit Zeichen
- technisch aufwändig
- Leitungslänge auf 1 – 3 Meter begrenzt.
- **Beispiele:** Centronics, IEC-Bus.

Wegen der bevorzugten Verwendung von **bit-seriellen Schnittstellen** für die Datenübertragung sehen wir uns die meistbenutzten etwas näher an.

Die **V.24-Schnittstelle** *(Bild 2.10)* ist eine Liste, die alle Leitungen, die für eine Schnittstelle sinnvoll wären, zusammenfasst und deren Funktion beschreibt. Es sind dies insgesamt 25 Leitungen für Senden, Empfangen, Steuern, Melden usw., von denen jedoch nur 7 verwendet werden.

Die **RS-232 C,** gleichwertig zu **DIN 66020,** beschreibt eine Schnittstelle we-

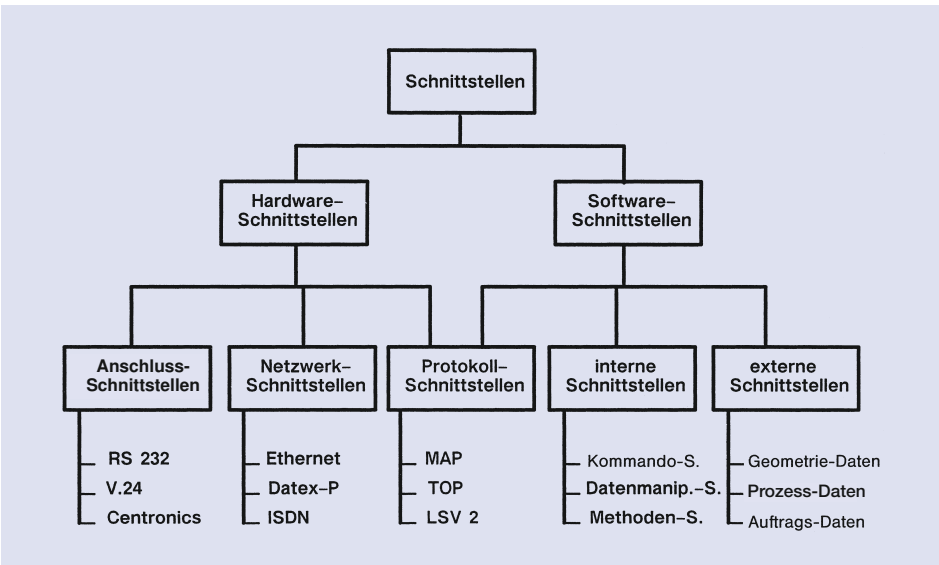


Bild 2.9: Klassifizierung von Schnittstellen

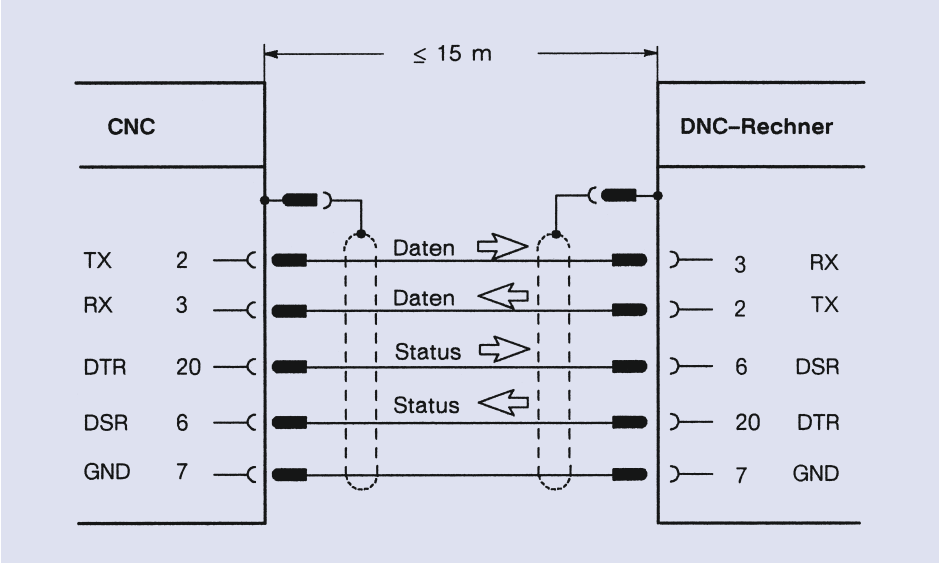


Bild 2.10: V.24-Schnittstelle

sentlich genauer als V.24, da sie die mechanischen und elektrischen Eigenschaften sowie die Belegung des 25-poligen Steckers definiert, von denen in der Praxis nur 4, 9 oder 15 belegt werden.

Die elektrischen Eigenschaften der RS-232 C sind folgendermaßen festgelegt:

+ 3 Volt bis + 15 Volt = NULL,
– 3 Volt bis – 15 Volt = EINS.

Die Übertragungsrate ist sehr gering und stark abhängig von der Leitungslänge. Sie beträgt ca. 20 kBit/s bei 900 m bis ca. 900 kBit/s bei weniger als 2 m.

Die aus dem Jahre 1962 stammende serielle, bidirektionale Spannungs-Schnittstelle RS-232 ist mittlerweile überholt, aber wegen ihrer geringen Ansprüche an Hardware und Software gelegentlich noch anzutreffen. In Verbindung mit schnellen LAN ist sie jedoch nicht mehr ausreichend.

Die **20 mA-Stromschnittstelle** verwendet zwei Drähte zum Senden und zwei Drähte zum Empfangen. Fließt ein Strom von 20 mA, dann entspricht dies der EINS, kein Strom der NULL.

Zudem fließt ein permanenter Ruhestrom von 20 mA, den ein Teilnehmer liefern muss. Dieser Teilnehmer ist **aktiv,** der andere **passiv.** Für den Anschluss wird meist ein 25-poliger Stecker verwendet, von dem nur vier Stifte für die Daten und 4 – 5 weitere für die Steuersignale belegt werden.

Die **20-mA-Stromschnittstelle** ist die älteste serielle Schnittstelle und wurde ursprünglich zur Verbindung von Fernschreibern entwickelt. Von der englischen Bezeichnung für Fernschreiber *(Teletype)* erhielt sie auch den Namen *„TTY-Schnittstelle“.*

Eine **Stromschnittstelle** wird generell zur Informationsübertragung in rauer Umgebung verwendet, wenn mit hohen Störpegeln gerechnet werden muss, sodass die sonst übliche Übertragung mittels Span-

nungspegeln nicht mit ausreichender Zuverlässigkeit arbeitet.

Grenzen: Die maximale Datenübertragungsrate beträgt 115 kBit/s, üblich sind jedoch nur 9,6 oder 19,6 kBit/s. Die maximale Entfernung wird mit 1 km bei 2.400 kBit/s angegeben.

Die **RS-422** wurde speziell für die symmetrische Datenübertragung bei Baudraten von mehr als 10 MBit/s bei 1.200 m Leitungslänge und 100 MBit/s bei 12 m Leitungslänge entwickelt. Dabei wird die Information als Differenzsignal zwischen zwei Leitungen interpretiert. Störsignale und Massepunktverschiebungen verursachen keine Störung der Übertragungssignale.

Diese Norm ist nicht für den Bus-Betrieb vorgesehen. Beim Busbetrieb liegen mehrere Treiberausgänge auf der selben Leitung, wobei immer nur ein Treiber freigegeben ist und die Leitung „treibt". Die Ausgänge der übrigen Treiber müssen dann sehr hochohmig sein, um das Übertragungssignal nicht kurz zu schließen. Eine dementsprechende Modifikation ist in der Norm **RS-485** festgelegt.

Zur Übertragung von Prozessgrößen können sowohl Strom-, als auch Spannungssignale verwendet werden.

Stromsignale nach DIN IEC 60381-1:
- 0 mA … 20 mA
- 4 mA … 20 mA (stromführender Nullpunkt , englisch „life-zero")

Spannungssignale nach DIN IEC 60381-2:
- 0 V … 10 V
- 2 V … 10 V (spannungsführender Nullpunkt, englisch „live-zero")

In fast allen industriellen Anwendungen werden die live-zero-Signale verwendet. Wenn dem Messbereichsanfang ein von „Null" verschiedenes elektrisches Signal zugeordnet wird, kann eine Drahtbruchüberwachung realisiert werden. Man bezeichnet das von „Null" abweichende Anfangssignal für 0 Prozent Messwert von 4 mA auch als „stromführender Nullpunkt". Ein Signal von 0 mA ist somit immer ein sicherer Hinweis auf eine Störung, wie z. B. Drahtbruch.

Stromsignale werden gegenüber Spannungssignalen bevorzugt, da das Stromsignal unempfindlich ist gegenüber elektromagnetischen Störungen und Spannungsverlusten durch den Leitungswiderstand.

Die max. **Länge der Signalleitung** ist nur durch den max. Widerstand, der durch die Stromquelle betrieben werden kann, begrenzt. Üblicherweise werden bis zu 1.000 m als nutzbare Leitungslänge angegeben (Kabeltyp: JYSTY 2 × 2 × 0,8)

Darüber hinaus bietet das Stromeinheitssignal 4 mA … 20 mA den großen Vorteil, dass der Signalkreis permanent mit Energie versorgt wird. Diese kann von Messumformern für die eigene Versorgung genutzt werden. In diesem Fall muss beispielsweise eine SPS den Signalkreis mit Energie versorgen („passiver Sensor"). Ein „aktiver Sensor" benötigt für den eigenen Bedarf eine Fremdspeisung

Handshake

Dies ist die Prozedur, nach der die Datenübertragung zwischen zwei Geräten gesteuert wird. Der Handshake steuert die Datenübertragung im Start/Stop-Betrieb derart, dass die empfangende Station die gesendeten Daten auch aufnehmen kann. Ist dies für eine begrenzte Zeit nicht möglich, dann stoppt der Empfänger den Sender mittels einem definierten Signal solange, bis er wieder empfangsbereit ist. Dabei unterscheidet man nach **Softwarehandshake** und **Hardwarehandshake** *(Bild 2.11)*.

Diese unterscheiden sich aufgrund ihres Funktionsprinzips nur durch

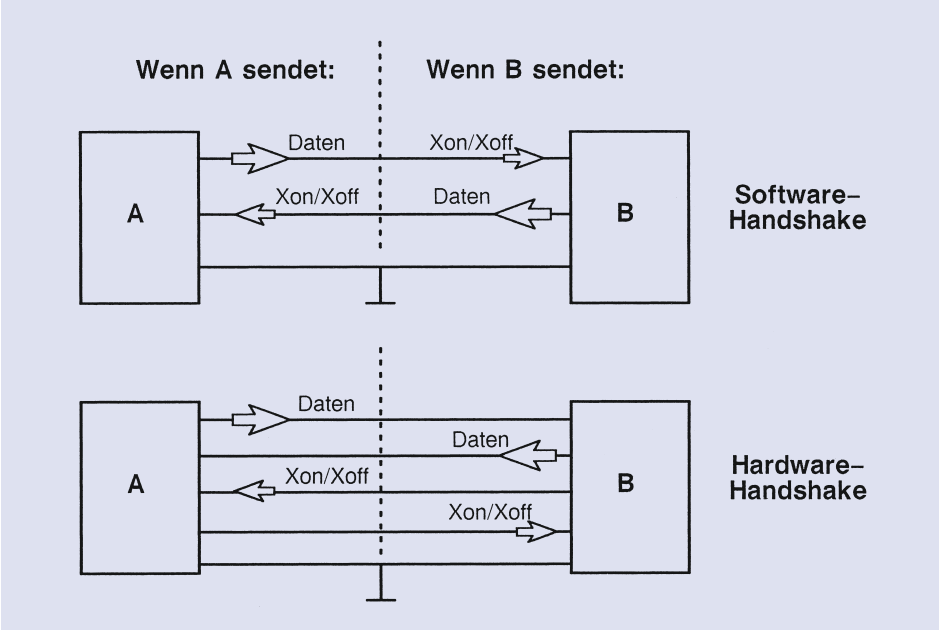


Bild 2.11: Prinzip von Software- und Hardware-Handshake

- die Anzahl der erforderlichen Leitungen und
- die Zuweisung von Datenleitungen und Steuerleitungen.

Während beim Hardwarehandshake je zwei separate Leitungen für Daten und Steuersignale festgelegt sind, kommt der Softwarehandshake mit zwei Datenleitungen aus, deren Funktion mit der Übertragungsrichtung wechselt.

Software-Schnittstelle

Eine Software-Schnittstelle ist eine definierte Datenübergabestelle von einem Software-Paket auf ein anderes, z. B. innerhalb eines Computers. Sie beschreibt, wofür die Schnittstelle vorgesehen und ausgelegt ist und welche Daten übertragen werden können, wie z. B.

- produktdefinierende Daten (CAD),
- prozessdefinierende Daten (NC-Programme),
- CL-DATA in den Postprocessor oder
- Auftragsdaten (PPS).
- **Beispiele:** IGES, LSV 2, MAP, TOP.

Synchrone und asynchrone Übertragung

Zur Übertragung der Daten müssen Sender und Empfänger bezüglich des Übertragungstaktes aufeinander abgestimmt werden. Die **synchrone** Übertragung ist ein Block-Synchronismus, d. h. Sender und Empfänger sind durch ein separates Taktsignal für die gesamte Übertragungsdauer eines Datenblockes miteinander synchronisiert. Bei der **asynchronen** Übertragung, auch als „Start/Stop-Verfahren“ bezeichnet, wird die Synchronisation über

START- und STOP-Bits nur für die Dauer eines Datenwortes hergestellt (Beispiel: V.24).

2.8 Zusammenfassung

Das Gebiet der LANs, Protokolle und Schnittstellen ist sehr weit gespannt, sehr komplex und ein typisches Arbeitsgebiet für Spezialisten. Deshalb sollte ein Unternehmen, das sich vor das Problem der vernetzten Informationsübertragung gestellt sieht, schon heute mit der Heranbildung eigener Fachleute beginnen. Auch die Beratung durch erfahrene Spezialisten ist zu empfehlen, bis man eigenes Know-how aufgebaut hat. Der Käufer sollte wenigstens in der Lage sein, seine Forderungen technisch zu spezifizieren, um späteren Überraschungen und Zusatzkosten vorzubeugen. Auch die Installation des LAN ist eine Sache für Spezialisten.

Die oft anzutreffende Meinung, ein Unternehmen müsste sich auf ein einheitliches, von oben bis unten durchgängiges LAN festlegen und damit wären alle Probleme der Informationsübertragung für die Zukunft gelöst, ist falsch, denn

- Die Anforderungen an LANs bezüglich Datenmenge und Übertragungsgeschwindigkeit sind unterschiedlich *(Bild 2.12)*.
- Die meisten Gerätehersteller bieten Ethernet-Schnittstellen standardmäßig an.
- Neben der Technik spielen auch die Kosten für das Gesamtsystem eine wesentliche Rolle.

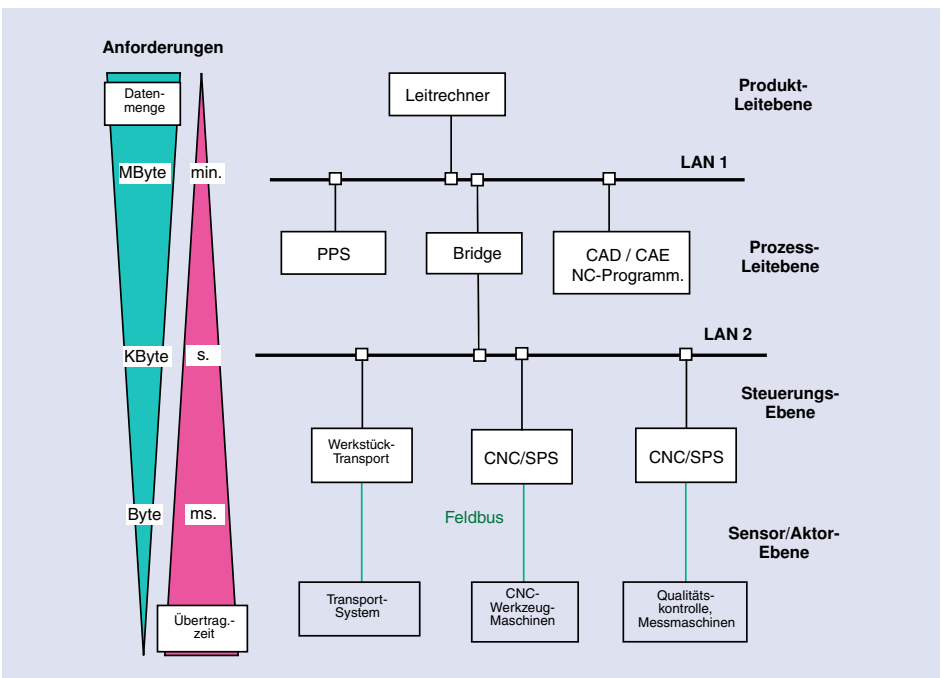


Bild 2.12: Anforderungen der Informationsvernetzung bezüglich der zu übertragenden Datenmengen und Übertragungswartezeiten in den vier Hierarchie-Ebenen eines Unternehmens

- Es sind mehrere empfehlenswerte Datenübertragungssysteme verfügbar, die heute schon problemlos einsetzbar sind. Hier sollte der Käufer dem Lieferanten die Verantwortung übertragen und dessen Empfehlung akzeptieren.
- Der Weg in die digitale Fertigung ist mit getrennten LANs nicht verbaut.
- Generelle Tendenz bei der Vernetzung könnte auch dahin gehen, mehrere kleine, in sich abgeschlossene und überschaubare Netze aufzubauen und diese durch Bridges oder Gateways zu verbinden, aber nur dann, wenn dies wirklich erforderlich ist.
- Gerade auf dem expandierenden Gebiet der Lokalen Netzwerke wird ständig weiterentwickelt. Zum heutigen Zeitpunkt dürfte **Ethernet** der am weitesten verbreitete Standard mit der größten Akzeptanz und Erfahrung sein.

Hinweis: Die in diesem Kapitel genannten Zahlenwerte können sich durch die örtlichen Gegebenheiten und infolge der Weiterentwicklungen schnell verändern. Es besteht daher keine Gewähr!

LAN – Local Area Networks



Das sollte man sich merken:

1. Mit LAN bezeichnet man **standardisierte, lokale Datenübertragungsnetze,** die eine Kommunikation zwischen unterschiedlichen Datenverarbeitungsgeräten in einem Betrieb zulassen.
2. Es sind **mehrere LAN-Fabrikate** mit speziell ausgerichteten Übertragungs- und Einsatz-Schwerpunkten verfügbar. Die Auswahl muss der Käufer treffen.
3. Obwohl die Aufgabe von LANs prinzipiell immer gleich ist, **unterscheiden sie sich** in mehreren Punkten, wie
   - Übertragungstechnik,
   - Übertragungsmedium,
   - Netz-Topologie,
   - Zugriffsverfahren,
   - Protokoll,
   - max. Teilnehmerzahl
   - Übertragungsgeschwindigkeit.
4. Die kommunikative Verbindung gleichartiger LANs erfolgt über **Bridges,** bei unterschiedlichen Netzwerken spricht man von **Gateways.**
5. Die an ein LAN **anschließbare Teilnehmerzahl** ist begrenzt. Bei vielen unterschiedlichen Teilnehmern in unterschiedlichen Hierarchien ist es empfehlenswert, das jeweils am besten geeignete LAN auszuwählen und nur bei Bedarf miteinander zu vernetzen.
6. Das am häufigsten eingesetzte LAN ist **ETHERNET.**
7. Bevor sich ein Unternehmen für ein bestimmtes LAN entscheidet, sollte auch die Frage der **verfügbaren Schnittstellen an den Geräten** untersucht werden.
8. Der Weg eines Unternehmens in die **CIM-Zukunft** ist mit getrennten, unterschiedlichen LANs nicht verbaut.
9. Die Überlegungen, ein LAN zu installieren, beginnen entweder bei der Vernetzung der **Verwaltungsrechner** oder bei der Installation des ersten **DNC-Systems.**
10. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen LANs, die nach der Basisbandtechnik arbeiten (Signalübertragung ohne Modulation) und solchen, die nach der Breitbandtechnik arbeiten (Übertragung mit modulierten Trägerfrequenzen).
11. Für die Zugriffssteuerung wird bei LANs vorwiegend das CSMA/CD-oder das Token-Passing-Verfahren verwendet.
12. Unter Protokoll versteht man die Regeln für den Austausch von Informationen zwischen Rechnern bzw. Teilnehmern in Kommunikationsnetzen.
13. „Feldbussysteme“ haben die Aufgabe, in schneller zeitlicher Folge kleine Datenmengen zwischen Steuerung und Sensorik/Aktorik zu übertragen. Beispiele: CAN, Interbus-S, Profibus-DP.

3 Digitale Produktentwicklung und Fertigung: Von CAD und CAM zu PLM

Dipl.-Ing. Niels Göttsch, Dr. Thomas Tosse

Erläutert wird, was heute in der Produktentwicklung und Fertigung mittels C-Techniken möglich ist und in Teilbereichen der Großindustrie und ihrer Zulieferer bereits erfolgreich durchgeführt wird. Die Automobilindustrie übernimmt aufgrund der hohen Produktionsstückzahlen dabei eine Vorreiterrolle. In der Praxis ist der wichtigste Informationsträger zwischen Entwicklung und Fertigung allerdings nach wie vor die technische Zeichnung, die meist von 3D-Modellen in 3D-CAD-Systemen abgeleitet wird.

3.1 Einleitung

Die Industrie, einschließlich der überwiegend metallverarbeitenden Branchen, steht unter dem Druck der Globalisierung. Dies bedeutet einerseits viele neue Wettbewerber in offenen Märkten mit anderen Rahmenbedingungen, andererseits neue Verbraucher mit ihren Produktwünschen und Konsumgewohnheiten, denen erfolgreiche Unternehmen entsprechen müssen. Zahlreiche Produktvarianten, ein ansteigendes Innovationstempo in allen Bereichen der Technik und ständige Maßnahmen zur Steigerung der Produktivität fordern Industrieunternehmen zu Höchstleistungen in der Verbesserung ihrer Prozesse, der Automatisierung ihrer Fertigung und der weltweiten Kommunikation heraus *(Bild 3.1)*.

Unter diesen Rahmenbedingungen haben sich die Bereiche Entwicklung und Konstruktion ebenso wie Arbeitsvorbereitung und Fertigung gewandelt: Die abgeschirmte Entwicklung von Neuerungen, die dargestellt und danach produziert werden mussten, ist einem Mangement von Ideen, Anforderungen, Varianten, Fertigungsmöglichkeiten und Marktchancen gewichen. Die Konstruktion von Bauteilen ist in der **Digitalen Produktdefinition** aufgegangen. Nachgelagerte Unternehmensbereiche wie Erprobung und Analyse, Fertigungsplanung und Produktion müssen möglichst frühzeitig daran beteiligt werden. Entwicklung und Fertigung können nur in ständigem Austausch mit allen Unternehmensbereichen erfolgreich bleiben *(Bild 3.2)*.

Dieser Austausch erfolgt heute elektronisch auf der Basis von Internet-Technologien. E-Mail-Programme und Browser haben frühere Konzepte von **CAD/CAM** (siehe unten) oder **CIM** (Computer Integrated Manufacturing) fast abgelöst. Die Keimzelle eines digitalen, dreidimensionalen Produktmodells bietet vielfältige Verwendungsmöglichkeiten in Simulation und Visualisierung, Fertigungsplanung und Erprobung, Produktion und Logistik,



Bild 3.1: Product Lifecycle Management bindet digitale Produktentwicklung und Fertigung in ein Gesamtkonzept für alle Unternehmensbereiche ein

Ersatzteil-Management und Service. Software-Systeme zum Product Definition Management (PDM) sorgen für eine lückenlose Verwaltung, Verteilung und Verwendung dieser Informationen. Sie speichern das Betriebskapital Wissen, das in Konzepten des Product Lifecycle Managements (PLM) aktuell gehalten und allen Unternehmensbereichen erschlossen wird.

3.2 Begriffe und Geschichte

(Bild 3.2)

CAD (Computer Aided Drafting)

wurde zunächst als rechnerunterstützte Erstellung von Konstruktionszeichnungen verstanden: Dadurch wurden dem Konstrukteur zeitraubende Tätigkeiten der Anwendung von Schablonen, Schraffuren oder die Ausfüllung von Zeichnungsköpfen erspart, die Erzeugung verschiedener Ansichten und Änderungen erleichtert. Später wandelte der Begriff sich zu **Computer Aided Design,** der rechnerunterstützten **Konstruktion**. Erste Flächenmodeller definierten unregelmäßige Flächenverläufe, die sich nicht mehr mit den Hilfsmitteln des 2D-CAD aus Punkt, Linie, Winkeln und Regelkörpern berechnen ließen. Sie bilden eine Wurzel des 3D-CAD, des dreidimensionalen Computer Aided Design. Die wichtigere entwickelte sich jedoch mit den Volumenmodellern zur Definition von Bauteilen im dreidimensionalen Raum. Sie enthalten alle geometrischen Informationen bezüglich Verschneidungen und Durchdringungen von Körpern, die sich in nachfolgenden Prozessschritten wie Visualisierung, Simulation, Baugruppendarstellung, Prototyping und Fertigung auszahlen. Die **Parametrik**, ermöglicht als weiterer Entwicklungsschritt die Beeinflussung dieser Modelle durch Zahlenwerte (Parameter) und erleichtert damit Änderungsprozesse, Variantenerstellung und wiederholte Verwendung ähnlicher Modelle. **Hybridmodeller** verbinden Funktionen zur Gestal-

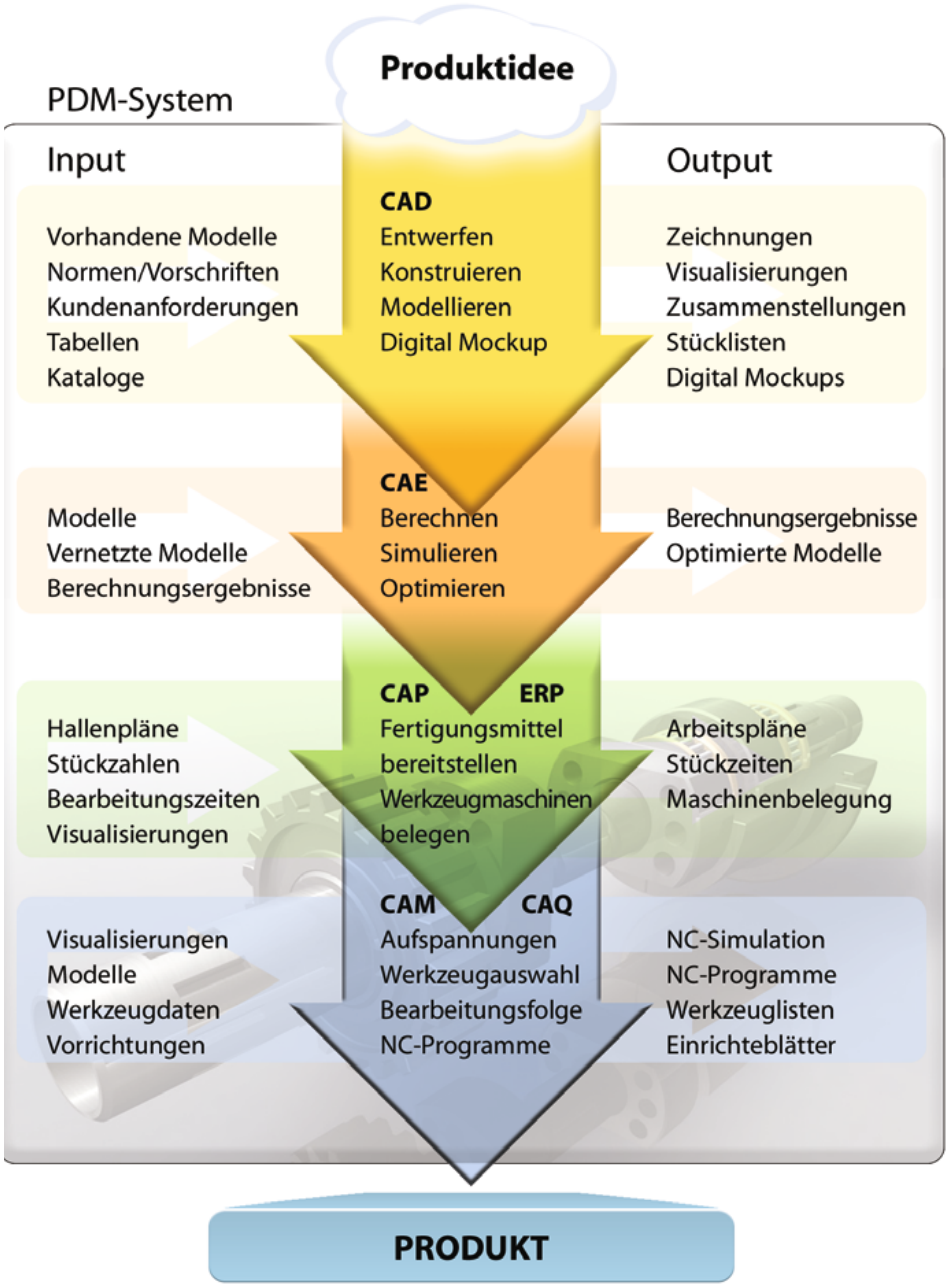


Bild 3.2: CA-Techniken im Informationsverbund. Diese Darstellung zeigt das prinzipielle Zusammenspiel der vernetzten CA-Systeme

tung komplexer Flächen mit jenen für Volumen – heute Stand der Technik. **Objektorientierte Programmiertechniken** ermöglichen automatische Prozesse zur Erstellung von Bauteilen, **Wizards** und andere Anwendungen **künstlicher Intelligenz** und **wissensbasierter Konstruktion**. Die von CAD-Systemen protokollierte Bauteilentstehung (History) eröffnete weitere Beeinflussungsmöglichkeiten, wie auch **assoziative Verknüpfungen:** Hier wird definiert, dass sich Änderungen an einem Objekt (Feature, Bauteil, Modul) auf ein anderes auswirken. Diese Eigenschaft lässt sich bei der Arbeit mit **Baugruppen** (Assemblies) ebenso nutzen wie zur CAD/CAM-Kopplung *(Bild 3.3 und 3.4)*.

CAM (Computer Aided Manufacturing)

umfasst als Computer-unterstützte Fertigung die Erstellung von Programmen für CNC-Maschinen, sei es mit oder ohne Verwendung von CAD-Daten aus 2D- oder 3D-Systemen. Eine wichtige Rolle spielt heute die grafische **Simulation** des in NC-Programmen definierten Bearbeitungsablaufs am Bildschirm. Dazu kommen das Erstellen der Bearbeitungs-, Spann- und Werkzeugpläne, die Verwaltung der Werkzeugdaten und Werkzeuge, Spannmittel und Vorrichtungen, sowie **DNC** zur direkten Übertragung von NC-Programmen über ein Netzwerk an die CNC-Steuerungen der Werkzeugmaschinen.

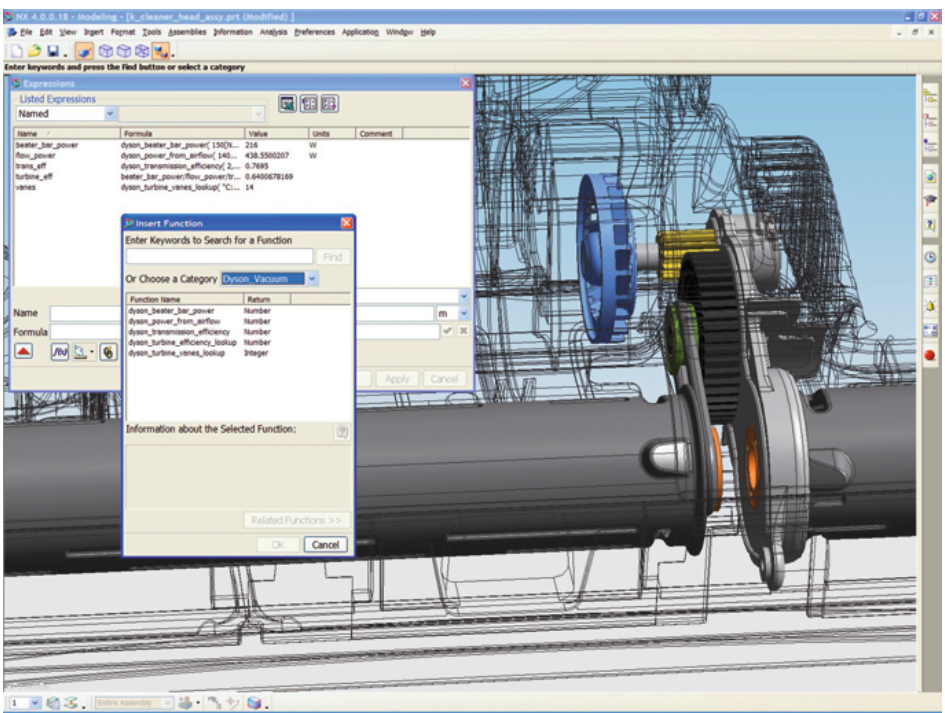


Bild 3.3: Wissensbasierte Konstruktion (Staubsauger): Die vorgelegten Formeln bestimmen die Auslegung ganzer Baugruppen – das gespeicherte Entwicklungswissen wird schnell und fehlerfrei eingesetzt.

Neben einzelnen CAD- und CAM-Systemen kamen **CAD/CAM-Systeme** auf den Markt, die durch interne Verbindungen beider Funktionsbereiche auf der Basis eines gemeinsamen Datenmodells sicherstellen sollten, dass die mit CAD-Systemen erzeugten Daten sich möglichst direkt für die NC-Programmierung nutzen lassen. Der umständliche Weg über **Schnittstellen**, häufig mit Mehrarbeiten und Datenreparaturen verbunden, sollte dadurch entfallen und durchgehende Abläufe fehlerfreie Prozesse ermöglichen. In der Praxis ließen sich diese Ziele nur sehr eingeschränkt erreichen. Häufig wurden die unterschiedlichen Anforderungen der Funktionsbereiche nicht ausreichend erfüllt. Heute gibt es leistungsfähige CAD/CAM-Systeme, unterschiedliche Möglichkeiten der CAD/CAM-Kopplung ebenso wie zahlreiche 3D-Datenformate zur reibungslosen Verwendung in CAM-Systemen, die allen unterschiedlichen Anforderungen gerecht werden – die Organisation der Abläufe übernehmen **PDM-Systeme**.

CAE-Software (Computer Aided Engineering)

wurde nach rechenintensiven Anfängen mit Berechnungen nach der **Finite Elemente-Methode** (FEM) immer praxistauglicher. Nach der Übernahme eines 3D-Modells und der Vernetzung **(Meshing)** lassen sich Bauteile und Baugruppen in einem **Solver** (Gleichungslöser) auf zahlreiche Eigenschaften in Mechanik, Akustik, Thermik und anderen Bereichen untersuchen. Durch die Rückkopplung zum CAD-Modell werden zahlreiche Optimierungsschleifen in kurzer Zeit durchgeführt – lange bevor das erste Bauteil gefertigt oder der erste Prototyp erstellt wird. Ursprünglich Spezialisten und entsprechend ausgelegten Großrechnern vorbehalten, gehören die Aufgaben der digitalen Simulation und Überprüfung heute oft zum Alltag der Entwicklungsbereiche.

Der Begriff **Digitale Produktdefinition** fasst die drei historisch geprägten Aufgabenbereiche CAD, CAM und CAE aus heutiger Sicht treffender zusammen: Der Computer ist vom „Hilfsmittel“ zum selbstverständlichen Arbeitsplatz geworden. Die Aufgabenbereiche sind zusammengewachsen und überschneiden sich. Entwicklungs- und Fertigungsprozesse lassen sich nicht linear (geradlinig) verstehen – sie verlaufen jeweils in konzentrischen Kreisen, die sich mehrmals beeinflussen.

CAP (Computer Aided Process Planning) *(Bild 3.4)*

fasst die **fertigungsbezogenen Planungsaufgaben** für neue Produktionsaufgaben in der Fertigung zusammen. Bereits während der Investitionsvorbereitung werden auf Basis des CAD-Modells Bearbeitungspläne für ein Bauteil erstellt, NC-Programmabläufe simuliert, die optimalen Arbeitsfolgen, Aufspannungen und Werkzeuge festgelegt. Flexible Fertigungszellen lassen sich schneller auf neue Bauteile umrüsten, komplette Prozesse in verketteten Fertigungsstraßen minutiös planen – ein wichtiger Schritt zu Digitalen Fabrik. Ergänzend wird der **Materialfluss** simuliert. Für die tagesaktuelle Fertigungsfeinplanung sind **MES-Systeme** (Manufacturing Execution Systems) anstelle früherer **PPS** (Production Planning Systems) das richtige Werkzeug. Sie planen Termine, Maschinenbelegung, Fertigungsmittel und Mitarbeiter und stehen im Datenaustausch mit **ERP-Systemen** (Enterprise Resource Planning).

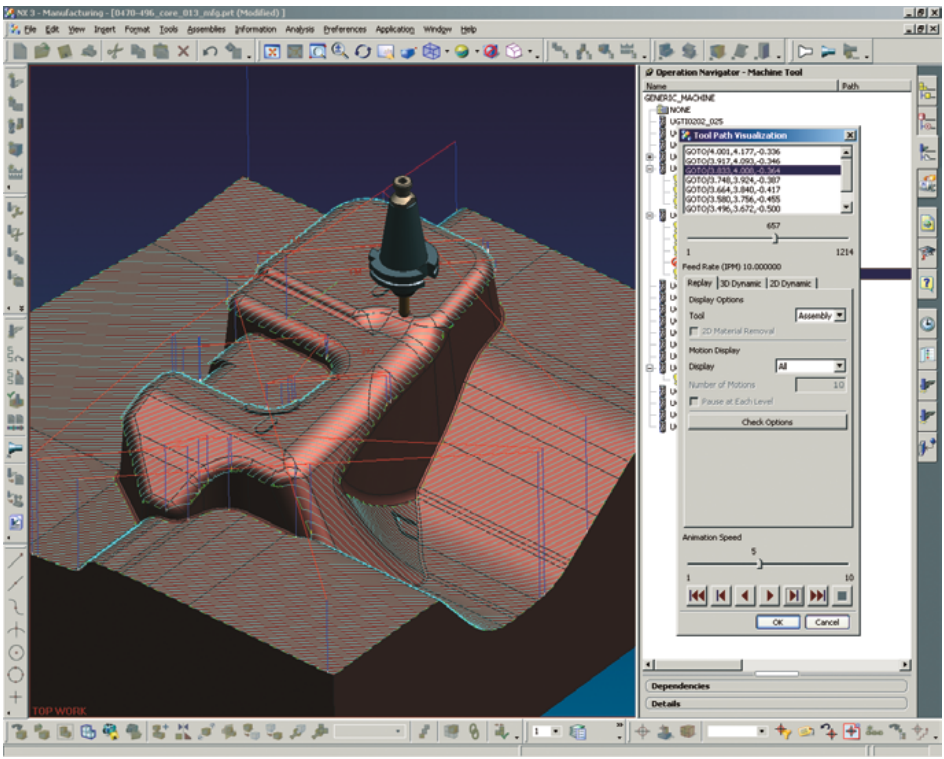


Bild 3.4: Anzeige der Werkzeugwege am 3D-Modell in einem CAM-Modul

PDM (Product Definition Management)

geht heute weit über die Ursprünge der **Zeichnungsverwaltung** oder das Produkt- und **Engineering Data Management (EDM)** hinaus. Auf Basis moderner Datenbanksysteme werden alle produktbezogenen Daten aus den unterschiedlichen Bereichen gespeichert und verwaltet. Weltweit verteilte Datenbanken mit täglicher Replikation, umfangreiche Vergabe von Zugriffsrechten und andere Sicherheitsvorkehrungen, firmen- oder auch rollenbezogene Benutzerführungen im Browser bieten nicht nur 24 Stunden am Tag Zugriff auf alle relevanten Fertigungsdaten. Sie enthalten auch branchentypische, bewährte Abläufe für die Grundroutinen aller Fertigungsunternehmen: Änderung und Freigabe, Fertigungsfreigabe und Wiederverwendung lassen sich damit schlank und schnell organisieren. Moderne Arbeitsweisen, wie **Concurrent Engineering** (gleichzeitige Entwicklung unterschiedlicher, aber zusammengehöriger Bauteile an mehreren Standorten) oder **Simultanous Engineering** (gleichzeitige Bearbeitung derselben Bauteile an verschiedenen Standorten) werden damit fehlerfrei organisiert.

PLM (Product Lifecycle Management = Produkt-Lebenszyklus Verwaltung)

beschreibt keine neue Software, sondern das Maximum an Nutzen, das ein Unternehmen aus den erwähnten Technologien

ziehen kann: Wenn von der Phase der Produktentstehung, über alle Stufen der Prozessketten in Entwicklung, Fertigung, Installation und Kundendienst auf gleicher Datenbasis in bewährten Abläufen fehlerfrei und rationell gearbeitet wird. Dies schließt alle Unternehmensbereiche ein, Marketing und Vertrieb ebenso wie Schulung und Service. Mit Konzepten des Product Lifecycle Managements begegnen produzierende Unternehmen den beschriebenen aktuellen Herausforderungen der Weltwirtschaft.

3.3 Digitale Produktentwicklung

Entwurf

Obwohl 2D-CAD-Systeme noch in der Industrie verwendet werden, verdrängt die 3D-Modellierung diese Arbeitsweise. 2D-Funktionen werden für die Zeichnungsableitung auch von 3D-CAD-Systemen erwartet und geboten. Vor allem im frühen Entwurfsstadium bieten leistungsfähige Sketcher neue Möglichkeiten, schnell Ideen festzuhalten. Dabei können vorhandene 3D-Objekte platziert und abgewandelt werden *(Bild 3.5).*

Bauteilkonstruktion

Wurden früher neue Bauteile über die Auswahl von Regelkörpern (Primitives) konstruiert, die auf Ebenen platziert, mit Maßangaben versehen, gespiegelt und gedreht, kopiert und mit Flächen oder Linien verschnitten oder verbunden werden konnten, so sind die Möglichkeiten eines leistungsfähigen 3D-CAD-Systems heute wesentlich weiter gesteckt. Die Auswahl von Normteilen aus Katalogen, die parametergesteuerte Abwandlung vorhandener Bauteile, die

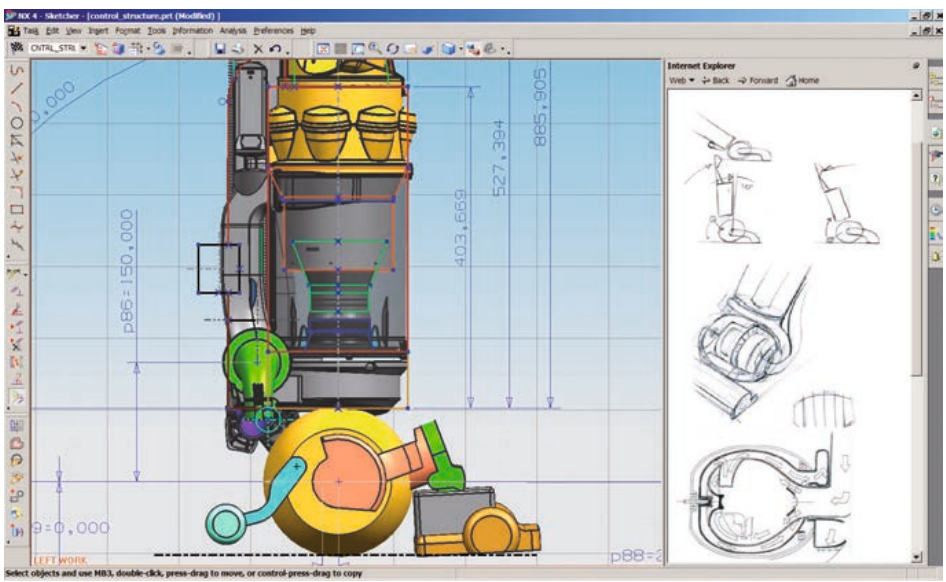


Bild 3.5: Moderne 3D-Systeme unterstützen bereits die Konzeptphase durch leistungsfähige Sketcher, die vorhandene 3D-Modelle einbeziehen

automatische Geometrie-Erzeugung aufgrund anzugebender Parameter und viele weitere Techniken bieten für jede Aufgabe eine effiziente Methode. Doch zu der rein geometrischen Beschreibung eines Bauteils werden die Modelle um viele weitere Informationen angereichert, die in zugeordneten Datensätzen gespeichert werden: Oberflächengüte, Material, Gewicht, Toleranzen, Einbaulage und viele andere Eigenschaften lassen sich hier anfügen, die in späteren Prozessstufen benötigt werden *(Bild 3.6)*.

Baugruppen

Die Leistungsfähigkeit der Systeme reicht heute in der Regel aus, um selbst größere Baugruppen (Assemblies) am Bildschirm zu bearbeiten. Zumindest Subsysteme von Produkten lassen sich im Zusammenhang der Baugruppe konstruieren, Einzelteile virtuell verbauen und damit sofort auf Passgenauigkeit, Toleranzen, Montagemöglichkeiten oder Störgeometrien überprüfen *(Bild 3.7)*.

Problematisch bleibt nach wie vor die Bearbeitung von großen Baugruppen, wie beispielsweise komplette Maschineneinheiten (z. B. komplexe Werkzeugmaschinen). Dabei können, insbesondere in Kombination mit Datenbank-Anbindungen, erhebliche Warte- und Regenerationszeiten entstehen.

Simulation

Sowohl Bauteile als auch Baugruppen können direkt im Entwicklungsprozess mit Berechnungen nach der Finite Elemente Methode (FEM) in zahlreichen Eigenschaften überprüft werden. Gewicht und Schwerpunkt gehören bereits zu den Modellinformationen aus dem CAD-System – doch Zug-

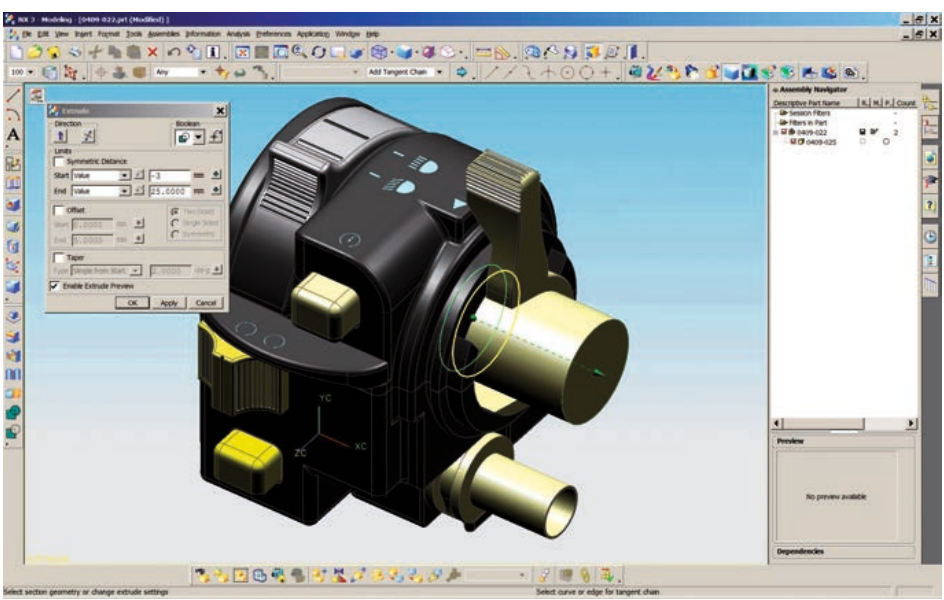


Bild 3.6: Die Werkzeuge des modernen 3D-Modelings sind vielfältig: Hier wird ein zylindrischer Körper extrudiert

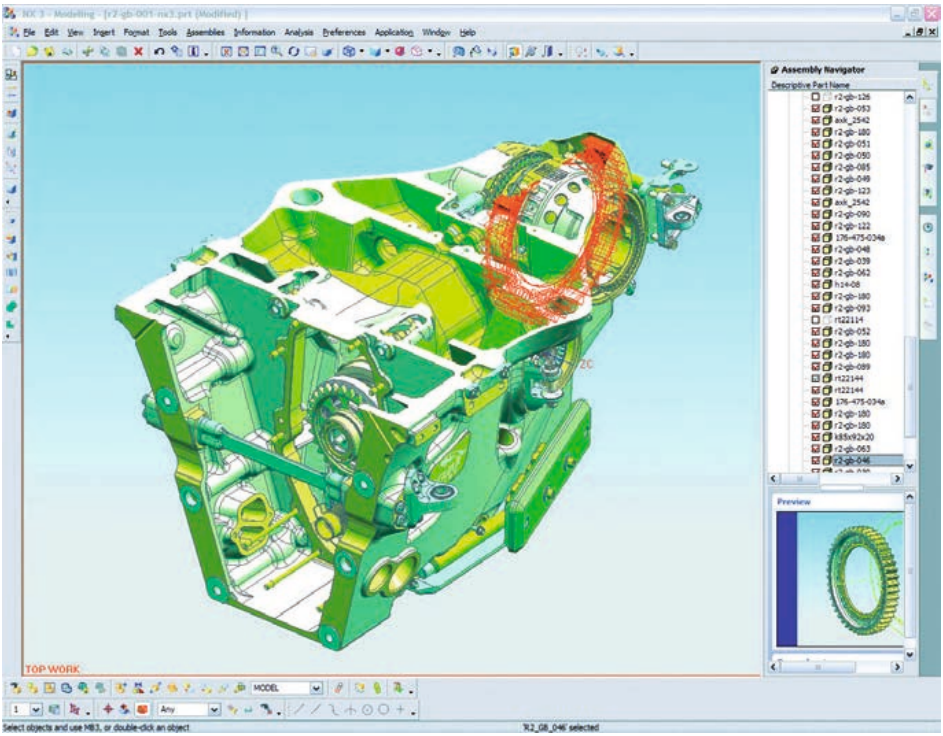


Bild 3.7: Moderne Produktentwicklung im Kontext aller Baugruppen (Jaguar-Getriebegehäuse)

festigkeit, Tragfähigkeit, thermisches und Schwingungsverhalten, akustische Auswirkungen werden mit CAE-Software ermittelt. Dazu werden Modelle aus CAD exportiert, vernetzt und den Berechnungen unterzogen. Assoziative Verknüpfungen zwischen CAD- und FEM-Modell können dafür sorgen, die Änderungsschleifen bis zum optimalen Modell abzukürzen. Die Berechnungen werden früher im Entwicklungsprozess durchgeführt, als echte Versuche und kosten weniger Zeit wie Geld. Das Entwicklungsergebnis wird frühzeitig abgesichert, sodass andere Bereiche darauf aufbauen können.

Prototyping

Dazu dienen auch die Techniken des Rapid Prototyping: Hier werden 3D-Modelle im STL-Format (Stereolithografie) ausgegeben, das den Körper in einzelne, übereinander angeordnete Schichten aufteilt, die in verschiedenen Verfahren gefertigt werden können. Funktionsmodelle aus Kunststoff lassen sich so am Konstruktionsarbeitsplatz erzeugen. Auch Modelle aus Holz, Papier und anderen Werkstoffen sind möglich und bieten spezifische Kontrollmöglichkeiten: Design, Flächenbeschaffenheit, Handling und Funktionen werden sogar in der Konsumforschung damit untersucht.

Visualisierung und Digital Mockup

Auch die Visualisierung und das Digital Mockup (DMU) von 3D-Modellen sind Möglichkeiten, Bauteile, Baugruppen wie ganze Produkte frühzeitig zu überprüfen. Die Wege dazu sind vielfältig. CAD-Systeme lesen und erzeugen komprimierte Datenformate für das Internet. Spezielle Visualisierungs-Software verdichtet Daten, liest übliche Formate und stellt Funktionen zur Revision bereit: Markieren und Kommentieren dürften die gebräuchlichsten sein. Diese Funktionalitäten werden auch von PDM-Systemen geboten. Eine wichtige Rolle bei der Darstellung und Prüfung von 3D-Daten aus unterschiedlichen CAD-Systemen spielt das Datenformat JT. Es liefert standardisiert die Bauteilinformationen aus vielen CAD-Systemen mit und entfaltet sein schlankes Datenformat bis zu Genauigkeiten, die eine exakte Prüfung von Zusammenbauten und Einbauräumen, Kollisions- und Toleranzprüfungen und andere Untersuchungen im Rahmen einer vollständigen DMU-Darstellung geometrischer Daten erlauben. Digital Mockup findet seine spektakulärste Anwendung im Automobilbau: Lange bevor das erste Modell gefertigt wird, lassen sich in einem „Cage“ (Käfig) verschiedene Projektionen zu einem dreidimensionalen Modell verdichten, das von allen Seiten betrachtet werden kann. An einem virtuellen Automobil wird nicht nur die äußere Hülle auf Formschönheit geprüft: Funktionen von Türen und Kofferraumdeckeln, aber auch Einbauten des Innenraums werden so deutlich, dass ein realistischer Gesamteindruck entsteht.

Zeichnungsableitung

Mit dem zunehmenden Einsatz von 3D-CAD löst das digitale Produktmodell im Bereich hoher Produktions-Stückzahlen die Zeichnung als zentralen Träger der Entwicklungsinformationen ab. Dennoch sind Zeichnungen nicht überflüssig geworden. Der Zeichnungssatz für die Fertigung gehört neben Einrichtungs- und Werkzeuginformationen und NC-Programmen immer noch zum Standard – auch wenn er vielerorts durch 3D-Visualisierungen ergänzt wird. Zeichnungsableitung ist eine wichtige und effiziente Funktion der 3D-CAD-Systeme, die sich weitgehend automatisieren lässt. Natürlich können Schnittaufteilungen, Ausfüllen der Zeichnungsköpfe und Auswahl der Ansichten auch manuell erfolgen. Doch häufig werden sie bei Bedarf und mit einer Zusammenstellung automatisch erzeugt, in Form von TIFF-Dateien übergeben und aus Gründen der Produkthaftung und Gewährleistung archiviert. Die Aufgabe, Zeichnungsdateien ohne viel Aufwand den jeweiligen Verwendungszwecken zuzuführen, übernehmen PDM-Systeme *(Bild 3.8)*.

PDM = Produktdaten-Management

Bereits ab fünf CAD-Arbeitsplätzen lassen sich Engineering-Daten ohne intelligente Verwaltungsfunktionen, die über die Möglichkeiten von Betriebssystemen mit ihrer Verzeichnis-Struktur herausgehen, nicht beherrschen. Doch dies ist nicht mehr der Hauptgrund für die rasche Verbreitung von PDM-Systemen am Markt: Die Leistungen selbst einfacher PDM-Lösungen gehen heute weit über die klassischen Funktionen zur strukturierten Datenablage, Vergabe von Nummernkreisen, Zusammenstellung von Stücklisten oder eine Zeichnungsverwaltung hinaus. Schon lange bieten sie neben intelligenten Referenzierungs- und Suchfunktionen auch die Chance, Prozesse und Zugriffsrechte zu definieren und verbindlich festzulegen.

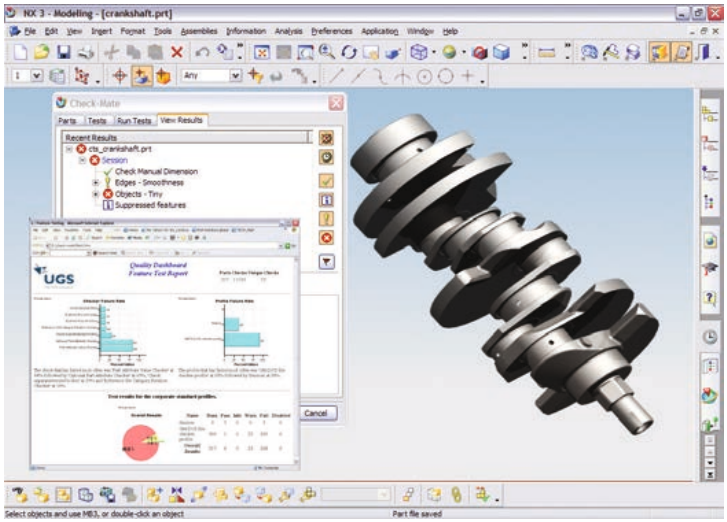


Bild 3.8: Auch Reports über bestimmte Eigenschaften lassen sich anhand von 3D-Modellen erzeugen

Insbesondere die Verwaltung von Änderungsständen, betriebsinternen Abläufen wie den Entwicklungs- und Produktionsfreigaben einschließlich der Unterstützung bei der Zusammenstellung und Übergabe aller benötigten Daten an die nachgeordneten Abteilungen und Prozesse sind Grundlage einer professionellen Arbeitsweise.

PDM als Integrationsplattform für CAD-Systeme

Wer komplexe Produkte mit zahlreichen Baugruppen entwickelt, zahlreiche Zulieferer beschäftigt oder verschiedene Kunden mit Halbfertigprodukten zu bedienen hat, wird einen aus Kostengründen wünschenswerten CAD-Standard nicht einhalten können. Gerade dann kommt PDM eine zentrale Bedeutung zu: Ohne Rücksicht auf die Datenherkunft müssen einheitliche Zugriffsregelungen, Prozesse und übergreifende Verwaltungsfunktionen eingerichtet werden. PDM-Lösungen erbringen diese Leistungen und mit MultiCAD-PDM. Systemspezifische CAD-Manager in der Benutzerführung der jeweiligen, fremden CAD-Lösung erhalten dem Anwender die gewohnte Arbeitsumgebung. Die Benutzeroberfläche wird lediglich um die PDM-Funktionen ergänzt. An die Stelle der originalen Dateiverwaltung der CAD-Anwendung tritt die zentrale Datenbank-Operation.

Auch die Verwaltung von Teilbaugruppen unterschiedlichen Ursprungs in einem gemeinsamen Gesamtprodukt wird gewährleistet. Den Geometriedaten lassen sich Attribute, Relationen und Dokumente unterschiedlicher Art zuordnen.

PDM als Schlüssel zur Informationsverteilung

Wie die Anwendung von 3D-CAD-Systemen das digitale Modell zur Keimzelle der Produktentwicklung gemacht hat, so hat die Internet-Technologie PDM-Lösungen zu Kommunikationsplattformen rund um die Produktentwicklung werden lassen. Durch die Anwendung von Internet-Technologien und Standards wie J2EE nutzen alle Stand-

orte eines Unternehmens die gleichen Daten. Weltweit verteilte Entwicklungsteams bearbeiten simultan einen gemeinsamen Datenbestand, der zentral verwaltet und gesichert wird. Dieses Single Sourcing der Produktdaten gewährleistet das einfache Auffinden des aktuellen Entwicklungsstands, auch wenn weltweit verteilte Teams die Möglichkeiten einer gleichzeitigen Zusammenarbeit (Collaboration) nutzen.

Grundlage für Product Lifecycle Management

PDM-Systeme speichern das Wissen aus den Entwicklungsabteilungen, verteilen es an alle Unternehmensbereiche und sorgen dafür, dass es noch Jahrzehnte nach dem Abschluss der eigentlichen Entwicklungsphase weiter verwendet wird. Diese Fähigkeiten nutzen Konzepte des Product Lifecycle Managements (PLM) zur konkreten Erreichung wirtschaftlicher Ziele: Kürzere Entwicklungszeiten, höhere Produktqualität, schnellere Innovationszyklen, Fertigung an weltweit verteilten Standorten. Damit leisten sie einen wichtigen Beitrag dafür, dass die Industrie ihre aktuellen Herausforderungen bestehen kann.

3.4 Digitale Fertigung

Im Zusammenspiel zwischen CAD- und CAM-Systemen haben sich in den vergangenen Jahren vor allem drei Konstellationen herausgebildet:

- Von CAD unabhängige Stand-alone CAM-Systeme,
- wahlweise in die Benutzeroberflächen von CAD-Systemen integrierbare CAM-Lösungen, und
- eine vollständige CAD/CAM-Integration.

Jede dieser Lösungen richtet sich an eine bestimmte Arbeitsorganisation in Industriebetrieben, und ein zu fertigendes Teilespektrum. Auch kommen für Zulieferer ohne Konstruktionsabteilung andere Systeme infrage, als für Hersteller mit eigener Produktentwicklung *(Bild 3.9)*.

2 ½ D-Programmiersysteme

Ein CAD-unabhängiges CAM-System war viele Jahre typisch für Zulieferbetriebe und Serienfertiger, die ein Telespektrum im 2½D-Bereich, also Bauteile aus Regelflächen und -körpern herzustellen hatten. Die Datenübernahme aus 2D-CAD-Systemen über DXF, IGES und andere Standardschnittstellen war in der Praxis meist aufwändiger und umständlicher, als die gewünschten Bauteile mit den Möglichkeiten des NC-Programmiersystems erneut zu erstellen: Ausgehend von den Fertigungszeichnungen, Maßen und Materialeigenschaften wurden das Bauteil und ein fiktiver Rohling voneinander abgezogen. Die Kompetenz der 2½D-Programmiersysteme lag in der schwierigen Kommunikation mit den CNC-Steuerungen der Werkzeugmaschinen. CNC-Maschinen der Bearbeitungsarten Drehen, Fräsen, Erodieren und Laserschneiden erfordern unterschiedliche Datenformate und gehen im Befehlsumfang über die nach DIN 66025 genormte Standardsprache hinaus, die nur einen Grundwortschatz der benötigten Arbeitsanweisungen normiert.

3D-CAM-Systeme

Neben dieser geschilderten Hauptrichtung existieren 3D-CAM-Systeme für den Einzelbetrieb im werkstattnahen Bereich, insbesondere für anspruchsvolle Fertigungsaufgaben in der Einzel- und Kleinserienfertigung, zum Beispiel im Werkzeug- und

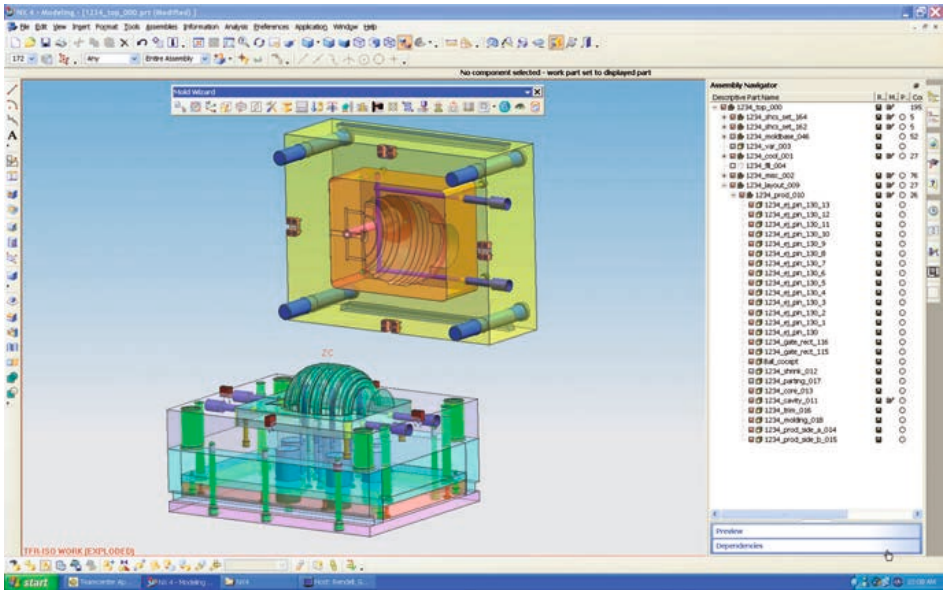


Bild 3.9: Der Formaufbau wurde mit wissensbasierten Konstruktionstechniken weitgehend automatisiert

Formenbau. Natürlich übernehmen diese Systeme Daten in den gängigen 3D-Formaten, erlauben die Definition der Rohteilkonturen und schlagen anschließend vordefinierte Strategien für Schruppen, Schlichten, Taschenfräsen und viele weitere, spezielle Bearbeitungsmöglichkeiten vor. Sie geben sehr komplexe NC-Programme für verschiedene, oft von einander abhängige Bearbeitungsfolgen wie 3D-Fräsen und Senkerodieren aus. Doch in aller Regel gibt es für das Ergebnis dieser Prozesse kein Zurück in das 3D-CAD-System. Häufig stellt sich bei der Datenübernahme heraus, dass die gelieferten Modelle nicht den Anforderungen der 3D-Fräsbearbeitung entsprechen. Flächen müssen repariert, Fasen und Verrundungen nachgearbeitet oder geflickt werden *(Bild 3.10)*.

3D-CAM-Systeme als Plug-In

CAM-Lösungen können als eigenständiges Programmiersystem erworben werden – oder auch als Plug-In in ein oder mehrere 3D-CAD-Systeme. Vorteile dieser Variante, die sich eng an 3D-CAD-Systeme der Mittelklasse ankoppelt, liegen in einer einheitlichen Benutzerführung und einer optimierten Datenübernahme. Der Aufwand für Schulung und Einarbeitung verringert sich und die Datenkonsistenz wird automatisch erhöht. Denn die verwendeten Geometrien beruhen auf einem der gängigen Kernel und werden nicht durch einen „Übersetzer“ eines Großteils ihrer Informationen beraubt. Die errechneten Werkzeugwege werden zusammen mit dem 3D-Modell in einer Bauteildatei gespeichert. Sämtliche Fertigungsinformationen werden automatisch dem Solid Model entnommen, Eingabefehler damit weitgehend

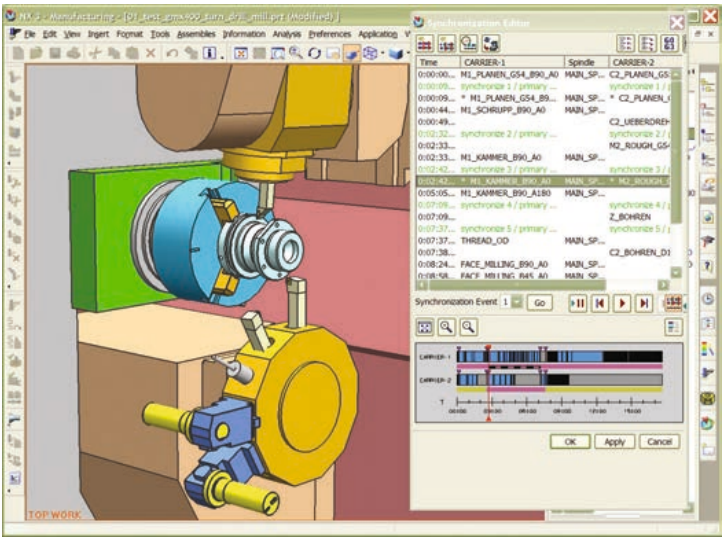


Bild 3.10: Moderne CNC-Maschinen mit angetriebenen Werkzeugen stellen hohe Anforderungen an Programmierung und Simulation

ausgeschlossen. Nachdem das Bauteil in Aufspannlage gebracht wurde, können die Bearbeitungsfolgen einzelnen Features komfortabel zugeordnet werden – was die Zahl nötiger Mausklicks und Tastatureingaben reduziert. Eine vollständige Assoziativität zwischen dem Solid Model und dem Bearbeitungsverlauf sorgt für schnelle Änderungen und verhindert Fehler, wenn das Modell geändert wird. Zusätzlich können einmal definierte Bearbeitungsstrategien schnell anderen Mitgliedern parametrisch erzeugter Teilefamilien zugeordnet werden.

Integrierte CAD/CAM-Systeme

Wie bereits geschildert, speist sich der Nutzen des Solid Modeling nur zu einem geringen Teil aus der verbesserten Konstruktionstechnik. Die zeitliche Überlagerung sämtlicher Prozesse der Produktentstehung, die Zusammenarbeit verteilter Teams am gleichen Bauteil, die vollständige Dokumentation aller Prozessschritte schöpfen das Kapital der einmal geschaffenen 3D-Daten erst richtig aus. Diesem Grundgedanken entsprechen nahtlos integrierte CAD/CAM-Lösungen am besten.

Selbst das CAM-Modul eröffnet dann einen durchgängigen Zugriff auf alle Funktionen der Produktentwicklung und Fertigung. Bei der Datenübernahme und Reparatur von Modellen aus Fremdsystemen, der Entwicklung von Aufspannvorrichtungen oder neuen Werkzeugen ist dies ebenso hilfreich wie zur Optimierung von Geometrien, die sich sonst nicht fräsen lassen.

Durch eine beidseitig assoziative Verknüpfung aller Konstruktions- und Fertigungsdaten rücken die Funktionsbereiche eng zusammen: Nachträgliche Änderungen am 3D-Modell wirken sich sofort auf den CAM-Bereich aus und führen zu einer zeitnahen Aktualisierung des NC-Programms. Jeder Schritt bleibt nachvollziehbar, die Werkzeugauswahl, die Aufspannvorrichtung und die Dokumentation für den Werker werden gleich mit aktualisiert. Nachträgliche Änderungen am 3D-Modell wirken sich sofort auf den CAM-Bereich aus

und führen zu einer zeitnahen Aktualisierung des NC-Programms.

Wissensgesteuertes CAM

CAM-Systeme der neuen Generation erkennen und analysieren Formelemente im 3D-Modell und verwenden diese geometrischen Informationen zur automatisierten Fertigung. Diese Technologie des Feature Based Machining (FBM) nutzt das in Regeln und Formeln abgelegte Ingenieurwissen, auch Knowledge Based Engineering (KBE) genannt, zur Erhöhung der Prozesssicherheit und Reduzierung der Programmierzeit bis zu 90 %. Von der regelbasierten Werkzeugauswahl bis hin zur Berechnung der Fertigungsstrategie, das CAM-System übernimmt die Kontrolle und Erzeugung der NC-Wege.

Insbesondere der Bereich der Bohrbearbeitung lässt sich mit den modernen CAD/CAM-Systemen vollständig wissensgesteuert automatisieren. Das CAM-Modul erkennt Bohrungen, schlägt Prozesse wie Ansenken, Bohren und anschließendes Gewindeschneiden automatisch vor, definiert die Werkzeugwege und unterstützt bei der Werkzeugauswahl. Spezielle wissensbasierte Module, zum Beispiel für Werkzeug- und Formenbauer, erhöhen diesen Leistungsumfang noch erheblich *(Bild 3.11)*.

Simulation des Bearbeitungsablaufs

(Bild 3.10 und 3.12)

Die grafische Simulation des Bearbeitungsablaufs am Bildschirm bildet den üblichen Abschluss der NC-Programmierung im Büro. Unerwünschte Kollisionen, Beschädigungen der Werkstückkontur, der Werk-

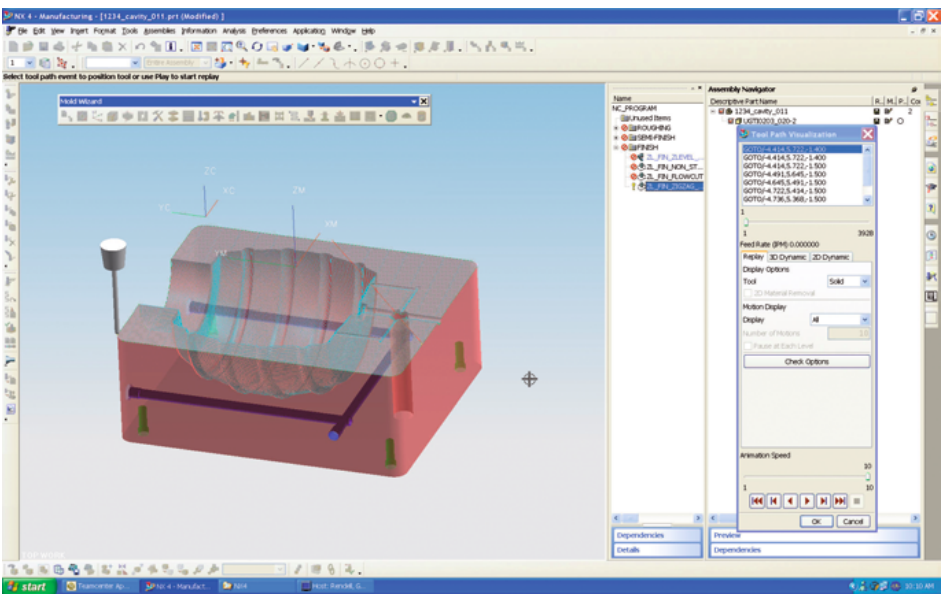


Bild 3.11: Die Formhälfte bleibt assoziativ mit dem zugrunde liegenden 3D-Modell des Kunststoffteils verknüpft – Späte Änderungen können dadurch automatisch in den CAM-Bereich übertragen werden

zeuge, Halter und Spindel werden von geeigneten Simulationslösungen frühzeitig erkannt. Komfortablere Systeme können innerhalb der Programmierumgebung die Werkzeugwege in Echtzeit simulieren. Der Benutzer wählt dabei von der satzweisen Bearbeitung bis zur kompletten 3D-Darstellung des Bearbeitungsprozesses mit allen Werkzeugen im Maschineninnenraum die gewünschten Details. Effektive Kollisionskontrolle wird in die Programmerstellung vorverlegt, bietet jedoch noch keine Sicherheitsgarantie im Falle von Fehlern im NC-Programm!

Eine weitere Entwicklungsstufe stellt die **steuerungsspezifische Simulation** dar *(Bild 3.12)*. CAM-Systeme oder spezielle Simulationsprogramme greifen dabei auf eine spezielle Version der originalen CNC-Steuerungssoftware zu, ergänzt um ein Modul, das wichtige Parameter gängiger Werkzeugmaschinen enthält – wie Massenträgheit, Achsinformationen oder Spindelkräfte. Das Simulationsergebnis kann die Überprüfung von Programmen an der Maschine erübrigen oder verkürzen. Berechnungen der Laufzeit von NC-Programmen auf der Maschine erhalten mit gewissen Einschränkungen und Toleranzen die in der Großserienfertigung geforderte Genauigkeit.

Von der NC-Programm-Simulation werden weitere Ergebnisse verlangt. Dazu zählen in erster Linie eine realistische, maßstabgerechte Darstellungen von Maschine, Werkzeug und Vorrichtung, dynamische Abläufe beim Werkzeugwechsel oder beim Drehen/Schwenken des Werkstücks mit Kollisionsanzeige, sowie die Art der fertigen Bohrungen (mit/ohne Gewinde) etc. (siehe Kapitel „Fertigungssimulation“).

3.5 Zusammenfassung

Die reale Prozesskette eines produzierenden Unternehmens von Entwurf, Entwicklung, Konstruktion und Überprüfung, Fertigung und Auslieferung wird heute wirkungsvoll von einem digitalen Rückgrat unterstützt, das Kunden, Dienstleister wie Zulieferer umfasst. An dieses Rückgrat

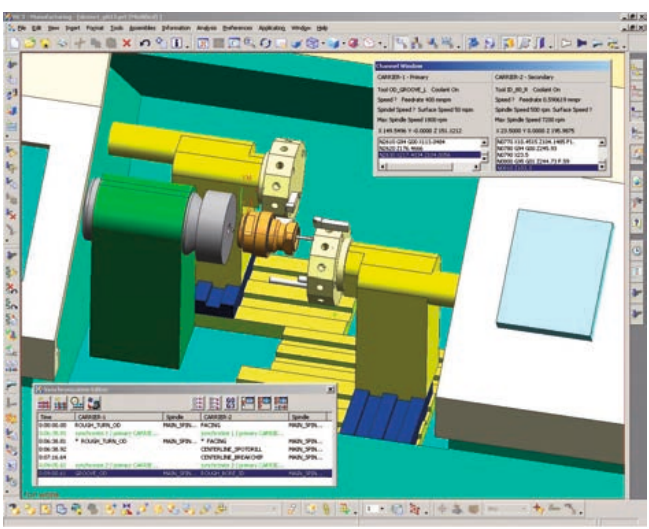


Bild 3.12: Die Kontrollfunktionen am Bildschirm können gar nicht umfangreich genug sein und sollten den gesamten Maschineninnenraum realistisch darstellen

müssen sich andere Unternehmen mit anderen Software-Lösungen andocken können. Die Hauptforderung an CAD- und CAM-Lösungen wie andere Software-Komponenten heißt daher Offenheit. Vieles hat sich hier in den vergangenen Jahren verbessert. Schnittstellen und Standards, offener Datenaustausch und Kooperationen unter Systemanbietern sind der richtige Weg zu höherem Nutzen für die Anwender.

Die Modularisierung und Spezialisierung der einzelnen Software-Lösungen entlang der Prozesskette hat viele frühere Probleme ausgeräumt und große Fortschritte mit sich gebracht. Daher kommt kaum ein CAD-System mit wesentlichen neuen Konstruktionsfunktionen auf den Markt! Das größte Rationalisierungspotenzial der Unternehmen liegt heute in ihren Prozessen.

Product Lifecycle Management (PLM) ist ein viel versprechender Ansatz, auf der Basis moderner Software-Lösungen alle Bereiche eines Unternehmens in schlanken und effizienten Prozessen zu verbinden. Mitarbeiter aus Marketing und Vertrieb wie Service und Installation werden mit Entwicklung und Fertigung vernetzt. Eine Bandbreite digitaler Informationen der verschiedensten Quellen steht strukturiert zur Verfügung, wenn man sie braucht. Engineering mit dem Lauf der Sonne, Internationale Zusammenarbeit und weltweit verteilte Fertigungsstandorte sind unter anderem auch deshalb für mittelständische Unternehmen zu einer Option geworden.

Die neue Arbeitsweise stellt auch neue Anforderungen an die Mitarbeiter. Offenheit und Verantwortungsbewusstsein sind hier ebenso gefragt wie die Fähigkeit zur Teamarbeit, zur interkulturellen Verständigung und zur Kommunikation. Produktentwicklung und Fertigung werden trotz oder gerade wegen dieser Veränderungen auch morgen interessante berufliche Herausforderungen bieten.

Digitale Produktentwicklung und Fertigung



Das sollte man sich merken:

1. Nach Arbeitsweise unterscheidet man 2D- und 3D-CAD-Systeme (Computer Aided Design). 3D-CAD-Systeme sind in der Lage, räumliche Körper umfassend und exakt zu beschreiben. Zusätzlich verfügen sie über Funktionen zur Zeichnungsableitung.
2. Der Nutzen aus 3D-CAD-Systemen kann sich nicht nur während der Konstruktionsarbeit ergeben, sondern auf allen folgenden Stufen der Prozesskette, weil mehr Informationen mit dem Modell verbunden sind.
3. Der Einsatz von CAE-Software zur Überprüfung von Bauteilen kann frühzeitig im Entwicklungsprozess erfolgen und spart dadurch Entwicklungszeit und Fehlerkosten in der Produktentwicklung. Zunehmend übernehmen Konstrukteure die Aufgabe, ihre Arbeitsergebnisse zu analysieren.
4. Die CAM-Prozesse sollten möglichst eng mit der Produktentwicklung verbunden bleiben. Hohe Datendurchgängigkeit erspart Doppelarbeiten, erleichtert Änderungen in letzter Minute und bringt Flexibilität in die Fertigung.
5. Jede NC-Programmerstellung sollte mit der dreidimensionalen Simulation des Bearbeitungsablaufs am Bildschirm abgeschlossen werden. Absolute Sicherheit bietet jedoch nur die Simulation der Bearbeitung unter realistischen Bedingungen, d. h. Einbeziehung von Maschine, Spannvorrichtung, Werkzeugen und sämtlichen Bewegungen.
6. CAD, CAE und CAM beschreiben jeweils Teilbereiche der Digitalen Produktdefinition. Sinnvollerweise sollte diese als ein durchgehender Prozess betrachtet und organisiert werden.
7. Eine gute Integrationsmöglichkeit für diesen Prozess bieten PDM-Systeme (Product Definition Management). Bereits ab fünf CAD-Arbeitsplätzen lassen sich die Daten aus der Produktentwicklung nicht mehr ausreichend in Ordnerstrukturen abbilden.
8. PDM-Systeme organisieren die Verwaltung, Verteilung und Verwendung aller Produktinformationen in modernen Datenbankstrukturen. Sie geben auch fertige Prozesse für viele Abläufe im Unternehmen vor.
9. Zeichnungen sind auch heute noch eine wichtige Informationsquelle, die vor allem bei der Übergabe an die Werkstatt, aber auch für Produkthaftung und Gewährleistung eine Rolle spielt. Bei der Arbeit mit 3D-CAD-Systemen sind Zeichnungen Ableitungen des 3D-Modells. Ausschlaggebend für Richtigkeit und Aktualität der Informationen ist das 3D-Modell.
10. Die Digitale Fertigung umfasst alle vorbereitenden Maßnahmen zu einer effektiven und produktiven Arbeit in der Werkstatt. Neben CAM-Lösungen spielen bei Produktumstellungen in der Großserienfertigung auch CAP-Lösungen sowie Software zur Materialfluss- und Anlagensimulation eine wichtige Rolle.

TEIL 7

Anhang

Richtlinien, Normen, Empfehlungen

Sehr früh wurden wesentliche Voraussetzungen für den Betrieb numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen vereinheitlicht und genormt. Der Anwender hat es der Arbeit einiger Normungsausschüsse in den USA und in Deutschland zu verdanken, dass unheilvoller Wirrwarr vermieden wurde, ohne die Leistungsfähigkeit zu begrenzen. Inzwischen wurden einige der früheren Richtlinien und Normen zurückgezogen bzw. durch andere ersetzt.

VDI-Richtlinien

Bezug durch den Beuth-Verlag, D-10772 Berlin, Tel.: (0 30) 26 01-22 60, Fax: (030) 2601-1260, (www.beuth.de)

Folgende VDI-Richtlinien wurden ersatzlos zurückgezogen:
2813, 2850, 2855, 2863, 2870, 2880, 3422, 3424, 3426, 3429

VDI 2851

1986

Beurteilung von NC-Maschinen
Bl. 1, 4 S.: Beurteilung von Bohrmaschinen durch Einfachprüfwerkstücke
Bl. 2, 6 S.: dto. für NC-Drehmaschinen
Bl. 3, 10 S.: dto. für Fräsmaschinen und Bearbeitungszentren

VDI 2852

1984

Kenngrößen numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen
Bl. 1, 4 S.: Span-zu-Span-Zeit bei automatischem Werkzeugwechsel
Bl. 2, 4 S.: Palettenwechselzeit und Werkstückfolgezeit bei automatischem Werkstück-Palettenwechsel
Bl. 3, 4 S.: Positionierzeit, Spindelbeschleunigungszeit, Wartezeit

VDI 2860

1990, 16 Seiten

Montage- und Handhabungstechnik; Begriffe, Definitionen, Symbole

VDI 2861, Bl. 1

1988, 4 Seiten

Montage- und Handhabungstechnik; Kenngrößen für Industrieroboter; Achsbezeichnungen

VDI 2861, Bl. 2

1988, 15 Seiten

Montage- und Handhabungstechnik; Kenngrößen für Industrieroboter; Einsatzspezifische Kenngrößen

VDI 2861, Bl. 3

1988, 18 Seiten

Montage- und Handhabungstechnik; Kenngrößen für Industrieroboter; Prüfung der Kenngrößen

VDI 3423

1998, 12 Seiten

Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen- Begriffe, Definitionen, Zeiterfassung und Berechnung

VDI 3427

Bl. 1, 1977, 8 S.: Dynamisches Verhalten von NC-Bahnsteuerungen an Werkzeugmaschinen; Begriffe und Merkmale.
Bl. 2, 1988, 16 S.: Kenngrößen

VDI/DGQ 3441

1977

Statistische Prüfung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen; Grundlagen
Die Nummern **3443 bis 3445** sind spezifisch für unterschiedliche Maschinentypen

VDI/VDE 3550, Bl. 2

2000, 12 Seiten

Fuzzy-Logic und Fuzzy-Control – Begriffe und Definitionen

VDI/VDE 3685, Bl. 1 – 3

1999 – 2000

Adaptive Regler; Begriffe und Eigenschaften; Erläuterungen, Beispiele; Inbetriebnahmesysteme für Regelungen

VDI/VDE 3687

1999, 95 Seiten

Auswahl von Feldbussystemen durch Bewertung ihrer Leistungseigenschaften für industrielle Anwendungsbereiche

VDI/VDE 3689 Bl. 1

1994, 46 Seiten

PROFIBUS-Profil; Drehzahlveränderbare Antriebe

VDI/VDE 3689 Bl. 2

1995, 52 Seiten

PROFIBUS-Profil; Niederspannungs-Schaltgeräte

VDI/VDE 3694

1991, 8 Seiten

Lastenheft/Pflichtenheft für den Einsatz von Automatisierungssystemen

DIN-Normen

Bezug durch den Beuth-Verlag, D-10772 Berlin, Tel.: (030) 2601-2260, Fax: (030) 2601-1260, (www.beuth.de)

DIN 8580

Juni 74, Juli 1985, Entwurf, 6 Seiten

Fertigungsverfahren, Einteilung
Diese Norm gilt für den Gesamtbereich der Fertigungsverfahren. Sie definiert bzw. erläutert Grundbegriffe, die für die Beschreibung und Einteilung der Fertigungsverfahren benötigt werden.

DIN 19226

Feb. 94, Bl. 1 – 5
Sep. 1997, Blatt 6

Leittechnik; Regelungs- und Steuerungstechnik, allg. Grundbegriffe
Das Dokument enthält die allgemeinen Grundbegriffe der Regelungs- und Steuerungstechnik und die Begriffe zur Darstellung wirkungsmäßiger Zusammenhänge.

DIN 19245, 1 – 3

September 1997

Profibus (Process Field Bus)
Übertragungstechnik, Protokoll, Dienste, Syntax, Codierung, etc.

DIN 44302

1993, 13 Seiten

Informationsverarbeitung; Datenübertragung; Begriffe
Die Norm legt Benennungen und Definitionen der Datenübertragung und -übermittlung fest.

DIN 55003, Blatt 3

Januar 1984, 12 Seiten

Bildzeichen für numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen
Diese Norm zeigt eine Reihe von Bildzeichen zur Kennzeichnung von Anzeige- und Steuerfunktionen an numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen. Diese Bildzeichen stellen die Funktionen speziell für NC-Steuerungen dar und sind in der Anwendung nur in diesem Zusammenhang zu sehen.

DIN 66016, Blatt 2

August 1974, 3 Seiten

Lochstreifen, Nennbreite 25
Diese Norm legt die Maße für 25,4 mm breite Lochstreifen fest, die für das Aufzeichnen von Informationen in höchstens 8 Spuren verwendet werden. Sie dient dazu, den Austausch von Lochstreifen zwischen verschiedenen Benutzern zu ermöglichen.

DIN 66024

Numerische Steuerungen von Arbeitsmaschinen.
Code für 8-Spur Lochstreifen
Ersatzlos zurückgezogen.

DIN 66025, Blatt 1

Jan. 83

Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen.
Allgemeines
Die Norm dient dazu, den Aufbau von Programmen für numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen festzulegen. Die Angaben dieser Norm reichen nicht aus, um Programme unmittelbar zwischen verschiedenen Arbeitsmaschinen der gleichen Gattung auszutauschen.

Insgesamt werden erläutert der Aufbau des Progarmmes, des Satzes, des Wortes, der Zeichenvorrat und die Programmierverfahren für die Interpolation.

DIN 66025, Blatt 2

September 1988

Industrielle Automation; Programmaufbau für NC-Maschinen; Wegbedingungen und Zusatzfunktionen
Die Norm enthält die Festlegung von Schlüsselzahlen für Wegbedingungen (G-Funktionen) und Zusatzfunktionen (M-Funktionen) bei der Programmierung von NC-Maschinen.

DIN 66025, Blatt 3 und 4

zurückgezogen.

DIN 66215, Blatt 1

August 1974, 12 Seiten

CLDATA
Allgemeiner Aufbau und Satztypen
CLDATA ist eine Sprache für NC-Prozessorausgabedaten, die als Eingabe für NC-Postprozessoren verwendet werden. Der Name CLDATA ist von dem englischen Ausdruck „Cutter Location Data“ (Werkzeugpositionsdaten) abgeleitet. Die Norm dient dazu, den Aufbau von CLDATA-Texten für die Verwendung im Zusammenhang mit Programmiersprachen für NC-Maschinen festzulegen. Mit jedem NC-Postprozessor soll es möglich sein, CLDATA-Texte von einem in dieser Norm festgelegten Aufbau zu erzeugen.

DIN 66215, Blatt 2

Februar 1982

CLDATA
Nebenteile des Satztyps 2000
Zu den in DIN 66215, Teil 1 festgelegten Hauptwörtern für Postprozessor-Anweisungen werden in diesem Teil der Norm die Nebenteile definiert. Der Satztyp 2000 enthält Anweisungen für den Postprozessor.

DIN 66217

Dezember 1975, 8 Seiten

Koordinatenachsen und Bewegungsrichtungen für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen
Diese Norm steht im Zusammenhang mit der internationalen Norm ISO 841-1974. Die Norm dient dazu, den Bewegungsachsen der numerisch gesteuerten Arbeitsmaschinen ein Koordinatensystem zuzuordnen. Daraus lassen sich die Bewegungsrichtungen für die Maschine herleiten. Damit wird zur Vereinheitlichung der Programmierung numerisch gesteuerter Arbeitsmaschinen beigetragen, siehe auch DIN 66025 Teil I.

- wird der Werkzeugträger bewegt, so sind Bewegungsrichtung und Achsrichtung gleichgerichtet. Die positiven Bewegungsrichtungen werden in diesem Falle wie die positiven Achsrichtungen mit +X, +Y, +Z usw. bezeichnet.
- wird der Werkstückträger bewegt, so sind Bewegungsrichtung und Achsrichtung einander entgegengerichtet. Die positiven Bewegungsrichtungen werden dann mit +X’, +Y’, +Z’ usw. bezeichnet.

DIN 66246, Blatt 1

Oktober 1983, 70 Seiten

Programmierung von NC-Maschinen; Grundlagen und mögliche Geometriedefinitionen und Ausführungsanweisungen

DIN 66267, Blatt 1

August 1984, 4 Seiten

Industrielle Automation; Datenaustausch mit NC; Schnittstelle und Übermittlungsprotokoll
Diese Norm gilt für Start-Stop-Übertragung und wechselseitige Übertragung.

DIN 66306, Blatt 1 – 6

Januar 1996, 140 Seiten

Industrielle Automation und Integration; Festlegung der Nachrichtenformate für Fertigungszwecke; technologiespezifische Ergänzung für NC
Identisch mit ISO/IEC 9506-4/1992.

DIN ISO 230, Blatt 2

Mai 2000, 10 Seiten
Abnahmeregeln für Werkzeugmaschinen; Bestimmung der Positionsunsicherheit und der Wiederholbarkeit der Positionierung von NC-Maschinen

DIN ISO 230-1

Norm, 1999-07
Werkzeugmaschinen – Prüfregeln für Werkzeugmaschinen – Teil 1: Geometrische Genauigkeit von Maschinen, die ohne Last oder unter Schlichtbedingungen arbeiten (ISO 230-1: 1996)

NCG-Empfehlungen

Zu beziehen durch die NC-Gesellschaft, 89021 Ulm und per Internet (www.ncg.de)

NCG 2001

1999, 15 Seiten

Datenmanagement für die Fertigung, DNC-Systeme
Neutrale, marktaktuelle Unterstützung zur Auswahl von DNC-Systemen. Mit Tabelle zur Wirtschaftlichkeitsrechnung, zahlreichen Diagrammen und einer Zusammenstellung der Abkürzungen und Definitionen aus dem DNC-Umfeld.

NCG 2003

1993, 18 Seiten

Werkstattorientierte Produktionskonzepte, Werkstattorientierte NC-Programmierung.
Erläuterungen zu dem WOP-Konzept, mit Literaturhinweisen, Tabellen und Grafiken.

NCG-Empfehlung 2004

2000, 30 Seiten

Prüfrichtlinien und Prüfwerkstücke für hochdynamische Bearbeitung (HSC)
Teil 1: Fräsmaschinen und Bearbeitungszentren.

Unter Leitung der Hochschule für Technik, Ulm und mehreren HSC-Experten aus NCG-Mitgliedsfirmen erstellte Empfehlung eines standardisierten Prüfwerkstückes für HSC-Maschinen. Das entsprechende NC-Programm und die detaillierte Beschreibung der Geometrieelemente sind über das Internet (www.hsc-news.de) oder als CD zu beziehen!
(Deutsch, Englisch, Französisch, Spanisch, Italienisch)

NCG-Empfehlung 2005
5-Achs-Simultan-Fräsbearbeitung

Dez. 2006, 77 Seiten

Prüfwerkstück für die 5-Achs-Simultan-Fräsbearbeitung
In diesem NCG-Prüfwerkstück sind wesentliche Geometrieelemente und Bearbeitungsstrategien definiert, die es ermöglichen, Maschinen und Steuerung, d. h. das Gesamtsystem hinsichtlich der Statik, Dynamik, Bearbeitungsgeschwindigkeit und Genauigkeit zu vergleichen, abzunehmen und zu überprüfen. Dem Anwender des Prüfwerkstückes werden Hinweise gegeben, welche Eigenschaften sich an den Geometrieelementen des Prüfstücks widerspiegeln.

Die ausführlichen Beschreibungen der einzelnen Bearbeitungsstrategien und der Ergebnisse werden anhand von 70 Bildern erläutert.

Die NCG-Empfehlung 2005 beinhaltet eine CD mit der Dokumentation in Deutsch und Englisch, sowie die NC-Programme für Siemens-, GE-Fanuc- und Heidenhain-Steuerungen.

Als Werkstückmaterial ist NECURON 800 und 1007 vorgesehen.

NCG-Empfehlung 2006
Prüfwerkstück Wasserstrahlschneiden

Ausgabe Gründruck in Vorbereitung

Beschreibung: Für Anwender und Maschinenhersteller ist zunächst ein Diskussionspapier geschaffen worden, welches auf eine breite gemeinsame Basis gestellt wurde. Das Prüfwerkstück ist aus Aluminium, besteht aus 2 × 2 identischen Hauptteilen und lässt sich mit 2 parallelen Schneidköpfen innerhalb von 20 min herstellen. Geschnitten wird mit Abrasivstrahl.

Ergebnis: Die fertigen Teile müssen ohne Nacharbeit ineinanderpassen, auch auf Umschlag. An den Schnittkanten lässt sich die Strahlleistung von Trennschnitt und Qualitätsschnitt beurteilen.

Weitere Informationen durch die NC-Gesellschaft e.V. (www.ncg.de)

Hinweis: Folgende NCG-Empfehlungen sind als VDI/NCG-Richtlinien erschienen und über den Beuth-Verlag zu beziehen:

VDI/NCG 5210:

Prüfwerkstücke für Werkzeugmaschinen: Wasserstrahlschneiden
Blatt 2: 3D/5-Achsbearbeitung.
Blatt 3: Mikrobearbeitung

VDI/NCG 5211:

Prüfwerkstücke für Werkzeugmaschinen: Fräsen
Blatt 3: Mikrobearbeitung

Weitere VDI/NCG-Richtlinien für Prüfwerkstücke sind in Bearbeitung.

NC-Fachwort-verzeichnis

In einer schnell fortschreitenden Technologie werden auch die verwendeten Fachbegriffe ständig angepasst, ergänzt und modifiziert.

Die nachstehenden Begriffe und Erläuterungen beziehen sich hauptsächlich auf das Umfeld der NC-Technik.

➔ siehe dort, **Abk.** = Abkürzung, **Alt.** = Alternative, Gegenteil.

Abschaltkreis **on/off control**
Einfacher Regelkreis, bei dem das Rückführsignal (Istwert) nur zum Ein und Ausschalten eines Vorganges benutzt wird, sobald ein vorgegebener Sollwert erreicht ist. Auch als Zweipunktregler bezeichnet. Beispiele: Kühlschranktemperatur, Füllstandsregelung, Heißwasserspeicher.

Absolutes Messsystem **absolute measuring system**
Positionsmesssystem für NC-Achsen, bei dem alle Messwerte auf einen festgelegten Nullpunkt bezogen sind. Jeder Punkt der Messstrecke ist durch ein eindeutiges Messsignal gekennzeichnet.

Vorwiegend verwendete Messsysteme: Codierte Lineale, codierte Drehgeber.

Alt.: Inkrementales Messsystem.

Abweichung **deviation**
➔ Bahnabweichung.

Achse, Achsbezeichnung **axis**
Die Richtung, in der die Relativbewegung des Werkzeugs zum Werkstück erfolgt. Bei Fräsmaschinen sind dies die drei linearen Achsen X, Y und Z, die senkrecht zueinander stehen. Dazu parallele Achsen werden mit U, V und W bezeichnet. Zusätzliche rotatorische Achsen (Dreh- und Schwenkachsen) werden mit A, B und C bezeichnet (➔ DIN 66217, ISO 841).

Bei der Festlegung der positiven Achsrichtung (+X, +Y, +C …) geht man davon aus, dass sich das Werkzeug bewegt und das Werkstück stillsteht. Bewegt sich das Werkstück, wie z. B. bei Koordinatentischen und Drehtischen, dann wird die Achsbezeichnung mit einem Apostroph gekennzeichnet: X' oder Y' oder C'. Dadurch kann die NC-Programmierung unabhängig vom konstruktiven Aufbau der Maschine erfolgen.

Achsenspiegeln **mirror image operation**
Umschalten (Vertauschen) der positiven/negativen Achsrichtungen einer NC-Achse.
➔ Spiegelbild-Bearbeitung.

Achsentauschen **axis change**
Vertauschen der Y- und Z-Achse in der NC, um NC-Programme auf Maschinen mit anderer Achsanordnung und vorgesetztem Winkelkopf verarbeiten zu können.

Adaptive Steuerung, AC **adaptive control**

Regelungssystem zur automatischen Anpassung der Schnittbedingungen an ein vorgegebenes Optimum, wie z. B. max. Spanleistung oder optimale Werkzeugnutzung. Diese Vorgaben lassen sich beispielsweise durch Vorschub-Veränderung beim Fräsen einhalten. Dazu sind spezielle Messsensoren für Spindelflexion, Motorleistung, Drehmoment, Motorerwärmung und Rattern erforderlich, die der AC-Steuerung fortlaufend die aktuellen Schnitt- und Leistungsdaten melden. Daraus werden die Führungsgrößen für Vorschubgeschwindigkeit und Spindeldrehzahl errechnet und an die Stellglieder ausgegeben.

Wegen des hohen technischen Aufwandes nur selten realisiert.

Adresse **address**

Ein Buchstabe, der in NC-Programmen die Zuordnung der nachfolgenden Zahlenwerte in einem Wort festlegt.

Beispiel: X 27,845 bedeutet das Maß 27,845 mm in der X-Achse, F125 bedeutet 125 mm/min Vorschub, usw.

➔ Alphanumerische Schreibweise.

AGV **automatic guided vehicle**

Deutsch: Gleis- und fahrerloses Flurförderfahrzeug. Die Streckenführung erfolgt induktiv durch einen im Boden der normalen Verkehrswege eingelassenen Draht.

Aktoren, Stellglieder **actuator**

Stellantrieb einer Steuerung, der Steuersignale in mechanische Bewegung umsetzt. Aktoren findet man in der Praxis u. a. in Form von (Elektro-) Motoren, Hydraulik- oder **Pneumatikzylindern**, Piezoaktoren (Translatoren), Ultraschallmotoren. In der Lineartechnik finden elektromechanische Hub- und Verstellsysteme Anwendung. Die Ansteuerung der Aktoren erfolgt in einem offenen oder geschlossenen Regelkreis.

Alphanumerische Schreibweise **alphanumeric notation**

NC-Programmschreibweise, bei der Buchstaben und Ziffern verwendet werden.

Beispiel: N123 G01 X475,5 Y-235,445 F 250 T7 M02.

Analog **analogue, analog**

Eine physikalische Variable ist analog einer anderen physikalischen Variablen, wenn sie sich in einer bestimmten Abhängigkeit von der ersten Variablen verändert. Die Beziehung kann, muss aber nicht linear sein.

Grundlegendes Merkmal: Ein analoges Signal kann zwischen den Grenzwerten jeden Zwischenwert annehmen (stufenloser Signalwert).

Beispiele:

A) Zeigeruhr, Thermometer.

B) Abbildung einer physikalischen Größe in elektrischer Spannung, z. B. Drehzahl als Tachospannung, Drehwinkel als Spannung eines Potentiometers, Temperatur als Spannung eines Thermoelements.

C) Resolver. Dieser liefert zwei Ausgangsspannungen, die sich proportional zum Sinus bzw. Cosinus des mechanischen Verdrehwinkels der Resolverachse verändern.

Alt.: Digital.

Analog-Digital-Umsetzer **analog-digital-converter**

Meistens elektronisches Gerät, das ein analoges Eingangssignal in ein digitales Ausgangssignal umsetzt.

Anpasssteuerung **machine-control interface**

Elektrische oder elektronische Steuerung zur Anpassung einer numerischen Steuerung an eine NC-Maschine. Sie hat folgende Aufgaben:

- Decodierung, Speicherung und Verstärkung der von der CNC codiert ausgegebenen Signale sowie deren Weitergabe an die Stellglieder,
- Verknüpfung der Signale mit Endschalter-Rückmeldungen von der Maschine,
- Verriegelung von Befehlen zur Vermeidung unzulässiger Schaltbefehle.

Vorwiegend Aufgabe der ➔ SPS.

Äquidistante Bahn **offset path**
Bahnkurve mit konstantem Abstand zur programmierten Werkstückkontur.

Beispiel: Fräserradius-Kompensation, die von der NC automatisch berechnet wird.

Arbeitsfeld-Begrenzung **working area limit**
Programmierbare Begrenzung des zulässigen Arbeitsbereiches einer NC-Maschine durch Eingabe der unteren und oberen Limitwerte jeder Achse. Bei Eingabe von Wegmaßnahmen, die außerhalb liegen, schaltet die Maschine sofort aus.

➔ Software-Endschalter.

ASCII **ASCII**
Abk. für „American Standard Code for Information Interchange“.

Genormter Code zur Datenspeicherung und Datenübertragung. Zur Darstellung der Zeichen werden 7 Bit benutzt, das 8. Bit für die Geradzahligkeit der Bytes. Es sind max. 2^7 = 128 Zeichen codierbar.

ASCII-Tastatur **ASCII keybord**
Alphanumerische Tastatur für die Dateneingabe von Buchstaben, Ziffern, Zeichen und Hilfsbefehlen im ASCII-Format, wie bei Personal Computern und CNCs verwendet.

Assembler **assembler**
1. Rechnerabhängige Programmiersprache mit niedrigem Niveau
2. Übersetzungsprogramm, das ein in Assemblersprache geschriebenes Programm in Maschinenbefehle umsetzt.

ASIC
Abk. für: Anwendungsspezifische Integrierte Schaltung

Eine kundenspezifische elektronische Schaltung, die als IC-Baustein realisiert wird. ASICs werden nach Kundenspezifikation gefertigt und normalerweise nur an diesen Kunden geliefert.

Asynchronbetrieb **asynchronous mode**
Betrieb- oder Übertragungsart, die nicht zeitgebunden ist und unabhängig von anderen Abläufen arbeitet.

Asynchrone Achsen **asynchronous axis**
Unabhängig von den Hauptachsen einer NC-Maschine programmierbare und gesteuerte Hilfsachsen, z. B. für einen Laderoboter.

Asynchronmotor **asynchronous motor**
Elektromotor für 3-Phasen-Drehstrom, dessen Rotor lastabhängig immer langsamer läuft (Schlupf) als das im Stator über die Wicklungen erzeugte Drehfeld.

Der Rotor des **Kurzschlussläufers** besteht aus an beiden Rotor-Enden kurzgeschlossenen Kupfer- oder Aluguss-Stäben (Käfiganker) und zählt zu den am weitesten verbreiteten Motortypen. Das Drehmoment entsteht durch die Induktionsströme, die das rotierende Drehfeld im Rotor erzeugt.

Bei **Schleifringläufern** ist der Rotor mit 3 Wicklungen ausgelegt, die über 3 Schleifringe und 3 Kohlebürsten angeschlossen sind, um bspw. „Schwerlastanlauf“ über externe elektrische Widerstände zu ermöglichen.

Beide Motortypen können direkt am Drehstromnetz angeschlossen und eingeschaltet werden. Abhängig von der Stator-

wicklung (2-, 4-, 6- oder 8-polig) ist die Bemessungsdrehzahl (= Nenndrehzahl) 3.000, 1.500, 1.000 oder 750 1/min, abzüglich „Schlupf“.

Im Normalbetrieb sind Asynchronmotoren nicht für die Drehzahlregelung ausgelegt und ungeeignet. Um trotzdem eine Drehzahlregelung zu ermöglichen, muss jedem Motor ein Frequenzumrichter vorgeschaltet werden.

In dieser Kombination werden Kurzschlussläufermotoren vorwiegend als **drehzahlgeregelte Hauptspindelantriebe** eingesetzt. Die Drehzahländerung erfolgt durch Änderung von Speisespannung und -frequenz. Heutige Asynchron-Servomotoren sind Spezialausführungen, die einen großen Regelbereich ermöglichen.

ATS **AGV = automatic guided vehicle**
Automatisches Transportsystem: Gleis- und fahrerloses Flurförderfahrzeug. Die Streckenführung erfolgt mittels verschiedener Techniken:
induktiv, mit Drahtschleifen im Boden,
optisch, mit Zeichnungen auf dem Boden,
lasergeführt, mit Reflektoren in der Umgebung,
RFID, mit Positionssensoren im Boden, oder
GPS-satellitengestützt.

Auflösung **resolution**
Die physikalisch korrekte Bezeichnung ist Messschritt.
1) Das kleinste, durch ein Messsystem erfassbare Inkrement zur Unterscheidung zweier diskreter Positionen, bei NC-Maschinen meistens 0,001 mm.
2) Pixelabstand eines Bildschirms.

Automatikbetrieb **automatic mode**
NC-Betriebsart, bei der ein Teileprogramm ohne Unterbrechung abgearbeitet wird.

Automation, Automatisierung **automation**
Automatischer Ablauf von mehreren aufeinanderfolgenden Fertigungsvorgängen, sodass der Mensch von der Ausführung ständig wiederkehrender geistiger oder manueller Tätigkeiten und von der zeitlichen Bindung an den Maschinenrhythmus befreit wird. Im Gegensatz zur Mechanisierung, wo sich der gesamte Arbeitsablauf unverändert wiederholt, arbeitet eine automatisierte Anlage nach einem von außen vorgegebenen, veränderbaren Programm. Dabei wird der gesamte Ablauf überwacht und bei Abweichungen selbstregelnd (automatisch) korrigiert.

Automatisierungsgrad **degree of automation**
Verhältniszahl der automatisierten Arbeitsabläufe im Vergleich zu dem Gesamtumfang aller Arbeitsabläufe. Mit zunehmendem Automatisierungsgrad steigen die Kosten progressiv an und erhöhen damit die Fertigungskosten. Gleichzeitig erhöht sich jedoch die Ausbringung, was wiederum die Produktivität erhöht und damit die Produktionskosten senkt.

Bahnabweichung **deviation**
Bei NC-Maschinen die Abweichung der Istbahn von der programmierten Sollbahn, auch als dynamische Bahnabweichung bezeichnet. Diese wirkt sich auf die Konturgenauigkeit des Werkstückes aus und sollte deshalb durch Maßnahmen in der NC möglichst klein gehalten werden
(➔ VDI 3427, Blatt 1).

Bahnsteuerung **continuous path control** **contouring control**
Numerische Steuerung, mit der die Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück entlang einer programmierten Bahn kontinuierlich gesteuert wird. Dies

geschieht durch die koordinierte, gleichzeitige Bewegung von zwei oder mehr Maschinenachsen. Dazu enthalten Bahnsteuerungen so genannte Interpolatoren, bei CNCs als Software. Diese berechnen nach Eingabe des Anfangs- und des Endpunktes eines definierten Bahnelements (Gerade, Kreis, Parabel o. a.) den exakten Bahnverlauf zwischen diesen Punkten.

Barcode **barcode**
Deutsch: Balken- oder Strichcode. Besteht aus einem Band von breiten und schmalen Strichen zur Darstellung alphanumerischer Zeichen. Es existieren mehrere unterschiedliche Codierungen, die visuell schwer zu entschlüsseln sind, deshalb werden meistens zusätzliche arabische Ziffern mitgedruckt. Verwendung zur Kennzeichnung und automatischen Erkennung von Werkzeugen und Werkstücken. Anstelle von Barcodes werden zunehmend **Data Matrix Codes** eingesetzt, da diese einen geringeren Platzbedarf haben (2 × 2 cm) und bis zu 200 Zeichen enthalten. Generell werden optisch lesbare Codiersysteme zunehmend durch Funkerkennung (RFID) ersetzt.

Basisband **baseband**
Der unmodulierte Frequenzbereich eines Signals, z. B. in einem LAN. Es ist nur ein Übertragungskanal vorhanden, der von den angeschlossenen Stationen nacheinander genutzt werden kann.

Alt.: Breitband

Baud **baud**
Begriff aus der Datenübertragung, mit dem die Schrittgeschwindigkeit der Übertragung definiert wird: 1 Baud entspricht 1 Symbol pro Sekunde. Wird oft mit der Datenübertragungsrate (Definition in Bit/s) verwechselt.

Baugruppenträger **cardrack**
Mechanische Aufnahme für mehrere, meist steckbare elektronische Baugruppen von Steuerungen.

BCD-Code **BCD-code**
Abk. für „Binary Coded Decimal Code", d. h. binär codierter Dezimalcode.

Eine Methode zur Codierung von Dezimalzahlen durch mehrer Binärzahlen. Dabei wird jede Ziffer durch eine Binärzahl dargestellt.

Beispiel: 0001 0010 0011 0100 1000 1001 = 123.489

Der BCD-Code ermöglicht die einfache Darstellung jedes Zahlenwerts, da die Stellenzahl unbegrenzt und die Umsetzung sehr einfach ist.

BDE **manufacturing data collection**
Abk. für Betriebsdatenerfassung, wie z. B. Stückzahlen, Ausschuss, Eingriffe, Zeiten, Mitarbeiter usw. Dient der besseren Transparenz des Betriebsablaufes und zur schnellen Analyse von Schwachstellen.

➔ MDE/BDE.

Bearbeitungszentrum (BAZ) **machining center (MC)**
Bearbeitungszentren (BAZ), auch Fertigungszentren genannt, sind CNC-Werkzeugmaschinen, die für einen automatisierten Betrieb ausgerüstet sind. Zur Erweiterung der Automatisierungsfunktionen können weitere Peripheriegeräte vorgesehen sein, wie z. B. ein Werkzeugmagazin mit Werkzeugwechsler, Werkstückwechsler oder Palettenwechsler. Die Werkzeugwechselzeiten bzw. Span-zu-Span-Zeiten liegen bei modernen Bearbeitungszentren teilweise unter 3 Sekunden, was die Taktzeiten erheblich verkürzt.

Es handelt sich demnach um CNC-Maschinen mit hohem Automatisierungsgrad zur vollautomatischen Komplettbearbeitung von Bauteilen.

BAZ werden nach der Baurichtung der Hauptspindel (horizontale BAZ oder vertikale BAZ) unterschieden. Ein weiteres Unterscheidungskriterium ist die Anzahl der NC-Achsen.

Bearbeitungszentren können zur Erweiterung der Funktionalität mit dreh- und schwenkbaren Maschinentischen ausgerüstet sein, sodass eine oder zwei zusätzliche NC-Achsen zur Verfügung stehen. Auf neuesten Maschinen lassen sich auf drehbaren Tischen sogar anspruchsvolle Dreh-, Schleif- und Verzahnarbeiten ausführen.

Aufgrund der Wirtschaftlichkeit dieser Maschinenart wurden auch weitere Maschinentypen entsprechend aufgerüstet bzw. neu konzipiert, wie z. B. Drehzentren, Schleifzentren und Bearbeitungszentren mit Laserunterstützung. Ziel ist stets die vollautomatische, numerisch gesteuerte Bearbeitung der Teile ohne manuelle Eingriffe.

(Anm.: Es existiert keine genormte BAZ-Definition)

Betriebsprogramm **executive program**
Systemsoftware für eine CNC, in der die Leistungsfähigkeit der Steuerung und der spezielle Funktionsumfang für einen bestimmten Maschinentyp enthalten ist.

➔ Offene CNC.

Betriebssystem **operating system**
Software zur automatischen Steuerung und Überwachung von Programmabläufen in einem Rechner, z. B. UNIX, Windows, Linux.

Bezugsmaß **fixed zero dimension** **absolute dimension**
Auch Absolutmaß oder absoluter Koordinatenwert. Maßangaben, bezogen auf den Koordinaten-Nullpunkt.

Alt.: ➔ Kettenmaß, Relativmaß.

Bildschirm

➔ Monitor.

Binär **binary**
Zwei einander ausschließende Zustände, z. B. ja/nein, richtig/falsch, ein/aus, 1/0. Diese sind sehr einfach digital darstellbar.

Binärcode **binary code**
Code, der für die Darstellung von Daten nur zwei unterschiedliche Elemente benutzt: 0 und 1. Besonders geeignet zur Darstellung von Daten, die in digitaler Form übertragen oder in Computern weiterverarbeitet werden sollen. Mit n Binärsignalen lassen sich 2^n Zustände definieren. Bestes Beispiel ist der Lochstreifen: Mit den 7 Spuren (die 8. Spur ist nur Prüf-Bit) lassen sich $2^7 = 128$ Zeichen darstellen.

➔ Dualsystem und BCD-Code.

Binärzahl **binary number**
Zahlensystem mit der Basis 2.

Die Dezimalzahl 51 ist in binärer Schreibweise 110011, d. h. $1 \times 2^5 + 1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 32+16+0+0+2+1 = 51$.

Bit **bit**
In der elektronischen Datenverarbeitung bezeichnet man die kleinstmögliche Speichereinheit als 1 Bit, d. h. Zustand 0 oder 1. **Übertragungsraten** werden in Bit/s angegeben.

Block **block**
Zusammengehörender Datensatz, in einem NC-Programm auch als Satz bezeichnet.

Bohrzyklen (G80 – G89) **drilling cycles**
Häufig wiederkehrende Arbeitsabläufe zum Bohren, Reiben, Senken, Gewindebohren usw. sind als Unterprogramme abgelegt und werden beim Aufruf (G81 – G89) mit Parameterwerten ergänzt (Referenz-

ebene, Bohrtiefe). Danach wird an jeder X/Y-Position die entsprechende Bearbeitung ausgeführt.

➔ Zyklus.

Breitband-Übertragung **broadband transmission**

Kennzeichen eines Datennetzes, das über mehrere Frequenzbänder zur gleichzeitigen selektiven Datenübertragung zwischen mehreren Stationen verfügt. Bestes Beispiel: Kabelfernsehen.

Brücke **bridge**

Elektronisches Gerät, das zwei gleichartige Datennetze miteinander verbindet.

➔ LAN

BTR-Eingang **btr-input**

Abk. für „Behind Tape Reader Input“. Dateneingang zur Dateneingabe in Steuerungen, die über keine DNC-Schnittstelle verfügen. Eine Datenausgabe ist nicht möglich.

Bus **bus**

Abk. für „Business line“: Eine Gruppe von Leitungen, über die mehrere parallel angeschlossene Geräte bzw. Geräteeinheiten binäre Signale austauschen. Man unterscheidet zwischen Adressbus, Datenbus und Steuerbus.

Byte **byte**

Historisch gesehen ist **1 Byte** eine Gruppe von **8 Bits** zur Kodierung eines einzelnen Text- oder Ziffer-Schriftzeichens. Es ist daher das kleinste adressierbare Element in vielen Rechnerarchitekturen, das auch als Einheit gespeichert und verarbeitet wird. In NC-Programmen können mit 1 Byte (8 Bit) die Adressen (Buchstaben), Ziffern (0 – 9) und alle Hilfszeichen dargestellt werden.

CA … **Computer Aided …**

Abkürzung des englischen Begriffes „Computer unterstützte …“ mit den Ergänzungen

A für Assembling = Montage
D für Design = Konstruktion
E für Engineering = Ingenieurwesen
M für Manufacturing = Fertigung
P für Planning = Planung, Fertigungsvorbereitung
Q für Quality Assurance = Qualitätssicherung
T für Testing = Prüfen

CAD/CAM

Rechnerunterstützte Konstruktion und Fertigung. Einbeziehung von CAD, CAP, und CAM über einheitliche Datenschnittstellen mit freiem Zugriff aller Bereiche eines Unternehmens auf die gemeinsame CAD-Datenbank. CAD/CAM nutzt die auf CAD-Systemen erstellten Werkstückdaten zur NC-Programmierung.

CAM **CAM**

Abk. für *Computer Aided Manufacturing*, d. h. „Rechnerunterstützte Fertigung“

Überbegriff für alle technischen und verwaltungstechnischen Aufgaben einer Fertigung mit Hilfe von Computern. In Verbindung mit der NC-Fertigung versteht man unter CAM insbesondere die computergestützte NC-Programmierung und Simulation des Programms.

CAN-Bus

Abk. für Controller Area Network, von BOSCH für Anwendungen im Automobil entwickelt. Zählt neben InterBus und Profibus zu den 3 wichtigsten „Feldbussen“, auch als „Sensor/Aktorbus“ bezeichnet. Geeignet zur Übertragung kleiner Datenmengen in schneller zeitlicher Folge zwischen Steuerung und Sensorik/Aktorik auf kurzem Kommunikationsweg.

CANopen/DeviceNet
CANopen und DeviceNet sind auf CAN basierende Schicht-7-Kommunikationsprotokolle, welche hauptsächlich in der Automatisierungstechnik verwendet werden.

Das Verbreitungsgebiet von CANopen ist vorwiegend Europa. Es wurde von Deutschen klein- und mittelständischen Firmen initiiert und im Rahmen eines Esprit-Projektes unter Leitung von Bosch erarbeitet. Seit 1995 wird es von der CiA gepflegt und ist inzwischen als Europäische Norm EN 50325-4 standardisiert.

DeviceNet hingegen ist mehr in Amerika verbreitet.

CIM CIM
Abk. von „Computer Integrated Manufacturing" = Computer-integrierte Fertigung. Informationsverbund von allen an der Produktion beteiligten Betriebsbereichen (CAD, CAP, CAM, CAQ, PPS) mit dem Ziel, auf Änderungen und Korrekturen flexibler reagieren zu können. Neben den technischen können auch die organisatorischen Funktionen in ein CIM-System mit eingebunden werden (Verkauf, Einkauf, Kalkulation usw.), um auch bei Angeboten, Terminaussagen und Preisgestaltung schneller zu werden.

CISC
Abk. für Complex Instruction Set Computer, ein Prozessor mit komplexem Befehlssatz.

CL-Data CLDATA
Abk. für „Cutter Line Data", d. h. die bei maschineller Programmierung vom Rechner errechneten Zwischenergebnisse der Werkzeugbahn. Diese Daten werden erst durch den Postprozessor auf das Satzformat der jeweiligen NC-Maschine gebracht.

CNC CNC
Abk. für „Computerized Numerical Control". Numerische Steuerung, die einen oder mehrere Mikroprozessoren enthält. Äußere Kennzeichen sind der Bildschirm, die Tastatur und die Möglichkeit, Programme und Korrekturdaten zu speichern, korrigieren und automatisch ein-/auslesen zu können.

Da alle heutigen NC-Systeme mindestens einen Mikroprozessor enthalten, können die Begriffe NC und CNC als Synonyme betrachtet werden.

Code, auch kodieren code
Vereinbarte Regeln, nach denen Daten aus einer Darstellung in eine andere umgesetzt werden. Eine kodierte Nachricht kann aus Daten oder einer Reihe von Ziffern, Zeichen, Buchstaben oder anderen Informationsträgern bestehen.

Bei NCs werden codierte Daten verwendet, um sie auf Datenträgern zu speichern und automatisch ein-/auslesen zu können. In der Kommunikationswissenschaft bezeichnet ein Code im weitesten Sinne auch eine Sprache.

Es gibt unterschiedliche Codes:

- Im Computer wird u. a. der ASCII *(American Standard Code for Information Interchange)* benutzt, um Buchstaben, Zahlen und Satzzeichen durch Bitfolgen darzustellen. Heute durch den Unicode erweitert auf fast alle Zeichensysteme der Welt.
- In der Computertechnik gibt es den so genannten Maschinencode. Dabei handelt es sich um einen Binärcode, der Instruktionen und Daten für den Prozessor enthält.
- In der Datenübertragung benutzt man Leitungscodes
- Im Internet findet sich der Geek-Code in E-Mails oder im Usenet
- Beim Programmieren kodiert man Algorithmen als Quellcode

Codeprüfung **code checking**
Kontrollfunktion der NC oder des Programmiersystems, um falsche Zeichen bei der Datenübertragung zu erkennen. Dazu werden z. B. die Geradzahligkeit der Bytes beim ISO-Code (Parity Check) und der Sinngehalt auf eine nach Programmiervorschrift erlaubte Information geprüft. Wertmäßig falsche Informationen werden hierbei nicht erkannt.

Codieren **encoding**
Allgemein: Verschlüsseln von Informationen unter Beachtung vorgegebener Regeln.

Bei NC: Übertragung der Steuerdaten in maschinell lesbare Codezeichen und deren Speicherung auf Datenträgern.

Codierte Drehgeber **rotary encoder**
shaft encoder
Messgerät, das die Winkelpositionen der Geberwelle in codierte, digitale Daten umsetzt. Dies geschieht mittels einer codierten Scheibe, die in eine bestimmte Anzahl diskreter Positionen unterteilt ist. Deren Abtastung erfolgt durch Fotozellen, wobei jeder Spur der Codescheibe eine eigene Messzelle zugeordnet ist. Die Positionswerte werden als Binärcode ausgegeben, wobei sich der Gray-Code am besten eignet.

Code-Umsetzer **code converter**
Dieser setzt digitale Eingangssignale eines Codes in digitale Signale eines anderen Codes um, wie z. B. den Binärcode in BCD-Code.

Compiler
(auch **Kompilierer)** **compiler**
Deutsch: Übersetzer. Ein Übersetzungsprogramm, das ein in einer höheren Programmiersprache geschriebenes Programm in den Maschinencode eines bestimmten Rechners übersetzt.

Computer **computer**
Programmgesteuerte, elektronisch arbeitende Rechenmaschinen zur Lösung mathematisch definierter Aufgaben.

Concurrent Engineering, CE
Gleichzeitige Entwicklung mehrerer Baugruppen eines Produktes an unterschiedlichen Standorten, vorzugsweise unter Verwendung eines einheitlichen CAD-Systems.

CPU **cpu**
Abk. für „Central Processing Unit“, d. h. Zentraleinheit eines Rechners, bestehend aus Rechenwerk, Steuerwerk und Registern.

CSMA/CD
Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
Zugangsverfahren für Übertragungsmedium (Bus). Durch Abhören des Übertragungsmediums prüft eine sendewillige Station, ob das Netz frei ist.

Cursor **cursor**
Beweglicher elektronischer Zeiger (Leuchtmarke) auf dem Bildschirm, meist als blinkender Punkt, Kreis oder Fadenkreuz dargestellt. Er dient der Orientierung des Bedieners, um gezielt Eingaben oder Veränderungen an einer bestimmten Stelle der bereits gespeicherten Daten vornehmen zu können.

Datei **file**
Definierter Speicherbereich im Rechner oder in der CNC, in dem bestimmte Daten für eine Wiederverwendung abgelegt sind, wie z. B. Werkzeug-Datei, Material-Datei, Schnittwert-Datei, Freistich-Datei.

Daten **data, informations**
Vorwiegend zur maschinellen Weiterverarbeitung vorgesehene Zahlenwerte.

➔ Informationen.

Datenbanken **data base**
In einem Rechner gespeicherte Daten, die von verschiedenen Quellen eingebracht wurden, nach unterschiedlichen Kriterien sortierbar sind und auf die mehrere Benutzer zugreifen können.

Datenschnittstelle **data interface**
Verbindungsstelle zwischen CNC und äußeren Systemen zur automatischen Übertragung von Daten und Steuerinformationen.

Beispiele: DNC-Schnittstelle, Antriebsschnittstelle, Rechnerschnittstelle.

➔ Schnittstelle.

Datenspeicher **data memory**
Medium zum geordneten Ablegen und Speichern von Daten, um zu einem späteren Zeitpunkt wieder darauf zurückgreifen zu können.

Datenträger **data carrier** **data storage medium**
Transportable Datenspeicher, auf denen Daten zwecks späterer Wiederverwendung gespeichert, transportiert und automatisch gelesen werden können. Heute fast ausschließlich elektronische Speichermedien, wie CDROM, DVD, USB-Stick, Speicherkarten.

Datenverarbeitung **data processing**
Durchführung von Rechnungen oder anderen logischen Operationen nach bestimmten Regeln, um dadurch neue Informationen zu gewinnen, sie in eine bestimmte Form zu bringen oder um Geräte damit zu steuern, wie z. B. NC-Maschinen.

Dedicated Computer **dedicated computer**
Zweckbestimmter Rechner, der ausschließlich für eine bestimmte Aufgabe verwendet wird, wie z. B. ein DNC-Rechner für eine begrenzte Maschinengruppe, oder ein CAD-Rechner als Arbeitsplatz nur für die mechanische Konstruktion von Maschinenteilen.

Dekade **decade**
Gruppe von 10 Einheiten, oder auch der Abstand zweier Ziffern mit einem Verhältnis von 1 : 10.

Dezimalpunkt-Programmierung **decimal point programming**
Programmierung und Eingabe der Wegmaße unter Verwendung des Dezimalpunktes anstelle vorlaufender oder nachlaufender Nullen.

Beispiele:
417 anstatt 417000 mit nachlaufenden Nullen.
.75 anstatt 750 mit nachlaufenden Nullen
.001 anstatt 000001 mit vorlaufenden Nullen

Dezimalsystem **decimal system**
Auf der Basis 10 beruhendes dekadisches Zahlensystem. Es verwendet die Ziffern 0 bis 9, wobei die Stellenwertigkeit benachbarter Ziffern ganzzahlige Potenzen von 10 sind.

Diagnose **diagnosis**
Spezieller Funktionsumfang von Computern oder CNCs, um mit Hilfe des Bildschirmes Fehlerquellen zu lokalisieren. Dazu zählen bei CNCs beispielsweise die Softwarefunktionen Logic Analyzer, SPS-Monitor, Mehrkanal-Speicheroszilloskop, Logbuch, grafische Messwertdarstellung u. v. a.

Dialogbetrieb **dialog mode**
Methode zur Dateneingabe, bei der der Bediener über Bildschirm-Masken „geführt“ wird. Dadurch werden Eingabefehler vermieden und die Eingabe erleichtert.

Digital **digital, numeric**
Zahlenmäßig, ziffernmäßig, d. h. mit diskreten Zahlenwerten oder Signalen arbeitende Informationsdarstellung.

Digital-Analog-Umsetzer
digital-analog converter
Meist elektronisch arbeitende Einheit, die digitale Eingangssignale in analoge Ausgangssignale umsetzt.

Digitale Anzeige **digital readout**
numerical display
Direkt als Dezimalzahlen angezeigte Werte, bei NCs z. B. die Achsen-Position in mm oder inch, den Vorschub in mm/min oder die Drehzahl in Umdrehungen pro Minute.

Digitales Messsystem
digital measuring system
Weg- oder Positionsmesssystem, das mit diskreten Einzelschritten entweder den zurückgelegten Weg (inkremental) misst oder die jeweilige Position (absolut) erfasst.

Digitalisieren **digitizing**
Erfassen eines körperlichen Modells oder eines mathematisch nicht definierbaren Kurvenzuges einer Zeichnung als einzelne, aufeinanderfolgende Koordinatenwerte.

Direkte Wegmessung
direct measurement
Allgemeiner Sprachgebrauch für lineare Wegmesssysteme bei NC-Maschinen, um die Bewegung des Maschinenschlittens direkt zu messen, d. h. ohne Umwandlung in eine rotatorische Bewegung zur Wegmessung über Drehgeber. Dadurch wird die Messgenauigkeit nicht durch Ungenauigkeiten der Spindel, einer Messzahnstange oder eines Messgetriebes beeinträchtigt.

DNC **DNC**
Abk. für „Direct Numerical Control“ bzw. „Distributed Numerical Control“. Ein System, bei dem ein oder mehrere Rechner alle NC-Programme speichert, verwaltet und auf Abruf per Kabel- oder Netzwerkanschluss (LAN) zu den angeschlossenen NC-Maschinen überträgt. Dazu benötigen die Steuerungen eine DNC- oder LAN-Schnittstelle (z. B. Ethernet) für bidirektionalen Datenaustausch.

DRAM **DRAM**
Abk. für „Dynamic Random Access Memory“.

Dynamischer Schreib-Lese-Speicher, dessen gespeicherte Informationen periodisch aufgefrischt werden müssen, damit sie nicht verloren gehen.

Drehfräsen
Wirtschaftliche Alternative beim Drehbearbeiten großer Werkstücke durch Einsatz rotierender Werkzeuge. Dabei unterscheidet man zwischen dem achsparallelen und dem orthogonalen Drehfräsen.

Nicht zu verwechseln mit Drehmaschinen, mit denen auch gefräst werden kann, oder Fräsmaschinen, mit denen auch gedreht werden kann! (Dreh-Fräs-Zentren)

Drehtisch (nicht Rundtisch)
rotary table
Drehbarer Aufspann- bzw. Arbeitstisch, um kubische Werkstücke von mehreren Seiten bearbeiten zu können. Bei Bearbeitungszentren **B'**-Achse, d. h. Drehung um die Y-Achse.

➔ Schwenktisch

Drehzentrum **turning center**
NC-Drehmaschine, bei der durch automatischen Werkzeugwechsel und andere Zusatzeinrichtungen erweiterte Bearbeitungsmöglichkeiten gegeben sind, wie

außermittig Bohren und Fräsen, Teil umspannen, Flächen fräsen und evtl. sogar Schleifen, Messen und Härten.

Dualsystem **dual system**
Zahlensystem mit der Grundzahl 2, d. h. alle Zahlen sind als Potenzen von 2 dargestellt: z. B.
$77 = 2^6 + 2^3 + 2^2 + 2^0 = 64 + 8 + 4 + 1$.
Die binäre Darstellung lautet:
1001101 = 77, d. h.
$\mathbf{1} \times 2^6 + \mathbf{0} \times 2^5 + \mathbf{0} \times 2^4 + \mathbf{1} \times 2^3 + \mathbf{1} \times 2^2 + \mathbf{0} \times 2^1 + \mathbf{1} \times 2^0$.
➔ Binär, BCD.

Duplexbetrieb **duplex mode**
Gleichzeitige Datenübertragung in zwei Richtungen.

Echtzeitverarbeitung
real time processing
on-line processing
Rechner-Betriebsart, bei der die errechneten Daten sofort weiterverarbeitet werden, z. B. für einen zu steuernden Prozess, eine NC-Maschine oder eine Simulation.

Eckenbremsen **corner-deceleration**
Um beim Fräsen von Innenecken eine Überlastung des Fräsers zu verhindern, wird durch eine G-Funktion der Vorschub automatisch auf vorher programmierte Werte reduziert und nach Verlassen der Ecke wieder auf 100 % gesetzt.

Eckenrunden **a) undershoot**
b) corner rounding
a) Unterwünschtes Abrunden von Ecken und anderen unsteten Übergängen am Werkstück durch das Werkzeug, verursacht durch den Nachlauf (Schleppabstand) der NC-Achsen. Vermeidung durch Programmieren von „Genau-Halt“ (G60, G61), hohen k_V-Faktor oder Eckenbremsen.
b) Automatisches Einfügen von Übergangsradien an unsteten Übergängen, um abgerundete Übergänge zu erzielen.

Editing **program edit**
Deutsch: Korrigieren. Programmkorrektur durch Einfügen, Löschen oder Ändern von Zeichen, Wörtern oder Sätzen im NC-Programm.

EIA-Code
Von der US Electronic Industries Association genormter 8-Spur-Lochstreifencode für NC-Maschinen. Der EIA 358 B entspricht dem ISO-Code, wobei die Anzahl der Löcher für jedes Zeichen geradzahlig ist.

EIA-232C, RS-232C
Genormte Schnittstelle für die serielle Datenübertragung, bei NC ursprünglich als DNC-Interface benutzt. Wird aufgrund ihrer meist nicht ausreichenden Übertragungsgeschwindigkeit durch schnellere Schnittstellen ersetzt, wie EIA-422, -423 und -449 oder LAN-Schnittstelle (Ethernet).

Einzelsatzbetrieb **single block mode**
Betriebsart einer NC, bei der die Ausführung jedes Satzes vom Bediener einzeln gestartet werden muss.

Elektronisches Handrad
electronic handwheel
Elektronischer Ersatz für die fehlenden mechanischen Handräder an NC-Maschinen. Im NC-Bedienfeld oder an der Maschine eingebautes, kleines Handrad, mit dem in der Betriebsart „EINRICHTEN“ eine manuelle Verstellung jeder Achse möglich ist. Die Feinheit der Verstellbewegung ist meistens umschaltbar.

Energieeffizienz **energy efficiency**
Bezogen auf Werkzeugmaschinen und Peripherie: Reduzierung des Energiever-

brauchs (Strom für Antriebe, Hydraulik, Pneumatik, Werkzeuge, Späneentsorgung) bei der Bearbeitung, Lagerung und Transport der Werkstücke. Aktuelle CNCs verfügen dazu über spezielle Programme zur Messung, Aufzeichnung, Analyse und Reduzierung des Energieverbrauchs der jeweiligen Maschine.

EPROM, EEPROM/FEPROM
Elektronischer Speicherbaustein, dessen Inhalt mittels UV-Licht oder elektrischer Impulse (FEPROM) gelöscht und neu programmiert werden kann.

ERP
Das ERP-System (Enterprise-Resource-Planning-System) steuert und unterstützt alle Geschäftsprozesse des Unternehmens (Materialwirtschaft, Produktion, Rechnungswesen usw.). Dazu gehören auch die Bereitstellung von Rohmaterial, Verbrauchsmaterial und Werkzeugen.

Erweiterte Einrichtfunktionen
additional machine setup functions
Das Einrichten der Maschine bzw. des Werkstücks wird durch zusätzliche Messfunktionen und Anzeigen der CNC erleichtert.

Ethernet
Ein weit verbreiteter Datenbus, der unterschiedliche Übertragungsmedien (Koaxialkabel, Twisted Pair Kabel, Glasfaserkabel) nutzt. Mit der kostengünstigen Verfügbarkeit der verschiedenen Geschwindigkeitsstufen von 10 Mbit/s bis 10 GBit/s könnte es dem Ethernet-Standard gelingen, endgültig zum vorherrschenden Netzwerk-Protokoll zu werden. Dies gilt im Bereich der lokalen Netze sowohl für die Bürokommunikation als auch in zunehmendem Maße für die Netze in der industriellen Automation. Mittelfristig kann sich Ethernet auch für regionale Netze (MAN = Metropolitan Area Network) etablieren, da ein durchgehender Standard ohne Protokollumsetzungen einfacher und kostengünstiger ist als eine Vielzahl verschiedener Systeme mit den erforderlichen Umsetzern. Ethernet ist in der Büroumgebung seit mehreren Jahren Standard und setzt sich zunehmend auch im industriellen Umfeld durch (Industrial Ethernet)
(aus www.tecchannel.de)

Expertensystem **expert system**
Ein wissensbasiertes Rechnerprogramm, das sich zur Lösung von Problemen innerhalb eines begrenzten technischen Bereiches auf gemachte Erfahrungen und vorhandenes Wissen stützt, aber auch über die Regeln der notwendigen Methodik und Vorgehensweise verfügt.

Externer Speicher **external memory**
Datenspeicher außerhalb der Zentraleinheit eines Computers (Speichererweiterung), meistens als Massenspeicher ausgelegt (Festplatte, Band, Memory Card, Flash Memory).

Feature **feature**
in technischen Beschreibungen ein oft verwendeter Begriff, der die Bedeutung von Leistungsmerkmal oder schlicht Merkmal oder Eigenschaft hat.

Feldbus **fieldbus**
Weltweit standardisierte (IEC 61158), industrielle Kommunikationssysteme, die viele „Feldgeräte“ wie Messfühler, Stellglieder und Antriebe (Aktoren) mit einem Steuergerät verbinden. Feldbussysteme wurden entwickelt, um die aufwändige Parallelverdrahtung binärer Signale sowie die analoge Signalübertragung durch digitale Übertragungstechnik zu ersetzen. Es sind mehrere Feldbussysteme mit unterschiedlichen

Eigenschaften verfügbar: Bitbus, Profibus, Interbus, ControlNet, CAN und zunehmend auch Industrial Ethernet.

Festplatte **harddisk**
Verkapseltes, magnetisches System zur Datenspeicherung, mit wesentlich höherer Speicherkapazität als Disketten. Im Gegensatz zu den Diskettenlaufwerken kann die Festplatte nicht aus dem Laufwerk entnommen und ausgetauscht werden.

Firmware **firmware**
Software, die vom Hersteller elektronischer Geräte in einem programmierbaren Chip, meistens einem Flash-Speicher, EPROM oder EEPROM, unveränderbar gespeichert ist. Der Hersteller möchte dadurch Manipulationen durch Dritte unterbinden.

Flexible Fertigungsinsel
flexible manufacturing island
Ein abgegrenzter Werkstattbereich mit mehreren Maschinen und Einrichtungen, um an einer begrenzten Auswahl von Werkstücken alle erforderlichen Arbeiten durchführen zu können. Die dort beschäftigten Menschen planen, entscheiden und kontrollieren die durchzuführenden Arbeiten selbst.

Flexibles Fertigungssystem = FFS
flexible manufacturing system = FMS
Gruppierung mehrerer Bearbeitungszentren bzw. flexibler Fertigungszellen, die eine vollautomatische Komplettbearbeitung von Teilefamilien in beliebigen Losgrößen, beliebiger Reihenfolge und ohne manuelle Eingriffe ermöglichen, da sie über ein gemeinsames, automatisches Werkstücktransport- und -wechselsystem verknüpft sind. In der Regel ist das gesamte System an einen Leitrechner angeschlossen.

Flexible Fertigungszelle
flexible manufacturing cell
Hoch automatisierte, autonome Produktionseinheit, bestehend aus einer NC-Maschine mit Werkzeug- und Werkstück-Wechseleinrichtung, zusätzlichen Überwachungseinrichtungen und DNC-Anschluss.

Flurförderzeug
automatic guided vehicle
Schienen- und fahrerlose, computergesteuerte Transportfahrzeuge für den Transport von Werkstücken und Werkzeugen.

Flüchtiger Speicher **volatile memory**
Datenspeicher, der bei Ausfall der Versorgungsspannung seinen Inhalt verliert.
Beispiel: RAM.

Fräserradius-Korrektur
cutter radius compensation
Möglichkeit der NC, die Durchmesserabweichungen von Fräswerkzeugen beim Bahnfräsen zu kompensieren. Mit den Funktionen G41 = Fräser links und G42 = Fräser rechts der Kontur verrechnet die NC den Inhalt des Korrekturspeichers beim Verfahren des Werkzeuges.
Die NC berechnet für jeden Fräserdurchmesser die äquidistante Mittelpunktsbahn zur Werkstückkontur sowie Schnittpunkte und Übergangsradien an Ecken.

Frame **frame**
Gebräuchlicher Begriff für eine Rechenvorschrift, wie z. B. Koordinaten-Translation oder -Rotation.

Freiformfläche **sculptured surface**
Komplexe, meist mehrfach gekrümmte Fläche, die sich nicht durch einfache geometrische Grundformen wie Gerade, Kreis und Kegelschnitt mathematisch definieren lässt.

Funk-Erkennung **Radio Frequency Identification (RFID)**
ist eine Methode, um Daten auf einem „Transponder“, dem Datenspeicher, berührungslos und ohne Sichtkontakt lesen und speichern zu können. Dieser Transponder kann an Objekten angebracht werden, welche dann anhand der darauf gespeicherten Daten automatisch und schnell identifiziert werden können.

RFID wird als Oberbegriff für die komplette technische Infrastruktur verwendet. Ein RFID-System umfasst

- den Transponder (auch RFID-Etikett, -Chip, -Tag, -Label oder Funketikett genannt),
- die Sende-Empfangs-Einheit (auch Reader genannt) und,
- die Integration mit Servern, Diensten und sonstigen Systemen wie z. B. Kassensystemen oder Warenwirtschaftssystemen.

Die Datenübertragung zwischen Transponder und Lese-Empfangs-Einheit findet dabei mittels elektromagnetischer Wellen statt. Bei niedrigen Frequenzen geschieht dies induktiv über ein Nahfeld, bei höheren über ein elektromagnetisches Fernfeld. Die Entfernung, über die ein RFID-Transponder ausgelesen werden kann, schwankt je nach Ausführung (passiv/aktiv), benutztem Frequenzband, Sendeleistung und Umwelteinflüssen zwischen wenigen Zentimetern und mehr als einem Kilometer.

(aus Wikipedia)

Fused Depositing Modeling **FDM**
RPD (Rapid Prototyping)-Verfahren zur schichtweisen Herstellung von Präzisions-Kunststoffteilen.

Fuzzy Logic **fuzzy logic**
Deutsch: Unscharfe Logik. Wird beispielsweise verwendet, um programmierte Bearbeitungsabläufe ohne großen steuerungstechnischen Aufwand innerhalb möglicher Grenzen zu optimieren oder zu korrigieren. Anwendungsbeispiel: Drahterodieren, Senkerodieren.

Gantry-Type-Maschine **gantry type machine**
Portalmaschine mit verfahrbarem Portal. Einsatz hauptsächlich in der Flugzeugindustrie, um mehrspindlig mehrere flache und lange Bauteile parallel zu bearbeiten. Vorteil: Im Vergleich zu Tischfräsmaschinen geringere Aufstellfläche.

G-Funktionen **G-functions**
Auch Wegbedingungen. Vorbereitende Steuerbefehle für NC-Maschinen, die z. B. festlegen, wie der programmierte Endpunkt angefahren werden soll: auf einer Geraden, einer Kreisbahn links- oder rechtsdrehend, oder in Kombination mit einem bestimmten Zyklus (G80 – G89).

Gateway
Deutsch: Brücke. Elektronische Einrichtung, meistens ein Rechner, um zwei ungleiche Datennetze mit unterschiedlichen Protokollen miteinander zu verbinden.

Geber, Messgeber **encoder**
➔ Messwertgeber

Genauigkeit **accuracy, precision**
Bei NC-Maschinen unterscheidet man zwischen statischer und dynamischer Genauigkeit.

Unter statischer Genauigkeit versteht man die absolute und die wiederholbare Positionsgenauigkeit. Sie wird von systematischen und zufälligen Fehlern beeinflusst. ➔ VDI/DGQ 3441.

Die Angaben zur dynamischen Genauigkeit berücksichtigen die durch Vorschubgeschwindigkeit und Beschleunigung entstehenden Ungenauigkeiten. ➔ VDI 3427.

Die am Werkstück erreichbare Genauigkeit ist immer niediger als die Maschinengenauigkeit, da sie noch durch andere Faktoren beeinflusst wird, wie z. B. Steifigkeit von Maschine und Spannvorrichtung, thermische Einflüsse, Werkzeugabnutzung, Werkstückgewicht und Bearbeitungsvorgang.

Generative Fertigungsverfahren **additiv manufacturing process**
Übergeordnete Bezeichnung für die bisher als Rapid Prototyping, Rapid Tooling und Rapid Manufacturing bezeichneten Verfahren zur schnellen und kostengünstigen Fertigung von Modellen, Mustern, Prototypen, Werkzeugen und Endprodukten. Diese Fertigung erfolgt schichtweise auf der Basis der CAD-internen Datenmodelle aus formlosen (Flüssigkeiten, Pulver u. a.) oder formneutralen Material (Band-, Draht, Papier oder Folie) mittels chemischer und/oder physikalischer Prozesse.

Zu diesen Verfahren zählen ➔ Stereolithografie, ➔ selektives Lasersintern, ➔ Fused Deposition Modelling, das Laminated Object Modelling und das 3D-Printing. Sie sind ökonomisch einsetzbar bei der Fertigung von Teilen mit einer hohen geometrischen Komplexität.

➔ Kap. Generative Fertigungsverfahren

Geschlossener Regelkreis **closed loop system**
Definiton nach DIN 19226: „Im Regelkreis wirkt die zu regelnde Größe über das Ergebnis des Vergleiches mit dem vorgegebenen Wert im Sinne einer Gegenkopplung wieder auf sich selbst zurück."

NC-Maschinen haben mehrere Regelkreise, wie z. B. für die Spindeldrehzahl, die Vorschubgeschwindigkeit und für die Achs-Position.

Gewindefräsen **thread milling**
➔ Schraubenlinien-Interpolation.

Grafik **graphic**
Verwendung des Bildschirmes einer CNC oder eines Programmiersystems für mehrfache, grafische Darstellungen, wie z. B. Eingabe-Grafik zum Programmieren mit Anzeige der WSt-Kontur, Simulationsgrafik zum Testen des erzeugten Programmablaufes mit dynamischer Darstellung der Werkzeugwege, Hilfsgrafik zur schnellen Information des Bedieners/Programmierers bei auftretenden Problemen, Diagnose-Grafik zur Fehlersuche u. a. m.

Gravurzyklen **engraving cycles**
Programmierung von beliebigen Texten zu Werkstück-Gravuren direkt an der Maschine, bspw. Datum, Uhrzeit, Stückzahl oder Seriennummern. Diese werden mit Laserstrahl oder speziellem Fräser auf das Werkstück übertragen.

Großrechner **mainframe computer**
Rechner mit hoher Rechenkapazität, großer Byte-Breite und sehr schnellem, simultanem Rechenbetrieb. Meist der Zentralrechner einer Firma, an den in den einzelnen Abteilungen mehrere Terminals oder separate Rechner angeschlossen sind.

Group Technology
➔ Teilefamilien.

Halbleiter-Bauelemente **semiconductor components**
Elektronische Schaltelemente, mit denen sich aufgrund ihrer besonderen Eigenschaft elektrische Ströme auslösen, erzeugen, gleichrichten, schalten und steuern lassen. Beispiele: Photowiderstände, Dioden, Transistoren, Mikroprozessoren, RAM, ROM, etc.

Handeingabe-Steuerung
manual data input control
CNC mit integriertem Programmiersystem, sodass die Programmierung kompletter Bearbeitungsabläufe direkt an der Maschine erfolgen kann.
➔ Dialogbetrieb.

Handhabungsgerät **handling unit**
Andere Bezeichnung für einen Roboter zum Beladen/Entladen einer Maschine, zum Werkzeugwechsel oder zum Montieren von Teilen.

Handshake
Deutsch: Quittungsbetrieb. Ein Verfahren bei der Datenübertragung, um die Übertragung zu koordinieren und Übertragungsfehler auszuschließen. Die Übertragung der einzelnen Datenblöcke erfolgt nur dann, wenn vom Empfänger der fehlerfreie Empfang des vorhergehenden Blocks quittiert wurde.

Hardware
alle Geräte und Bauteile eines Rechners oder einer Steuerung, aus denen eine solche Anlage besteht.
Alt.: Software.

Hardwired NC
Deutsch: Festverdrahtete numerische Steuerung (NC). Alle Funktionen und Befehle werden in fest miteinander verdrahteten Schaltkreisen und Bauteilen verarbeitet. Systemänderungen sind nur durch Verdrahtungsänderungen und evtl. Austauschen von Baugruppen möglich.
Alt.: Softwired NC = CNC.

Hauptzeit
machining time, cutting time, production time
Bei Werkzeugmaschinen: Summe aller Bearbeitungszeiten die im Vorschub gefahren werden.

Hertz **Kilo-/Mega-/Gigahertz**
Kurzzeichen Hz, KHz, MHz, GHz. SI-Einheit für die Frequenz, d. h. „Anzahl der Schwingungen pro Sekunde“.
1 kHz = 10^3 Hz, 1 MHz = 10^6 Hz, 1 GHz = 10^9 Hz

Hexadezimal **hexadecimal**
Zahlensystem mit der Basis 16, d. h. mit 16 Ziffern. Vorwiegend von Computern verwendet. Für die ersten 10 Ziffern werden 0 bis 9 verwendet, für die restlichen 6 Ziffern die ersten 6 Großbuchstaben des lateinischen Alphabetes (A bis F).

Dezimal	Binär	Hexadezimal
0	0000	0
1	0001	1
3	0011	3
7	0111	7
9	1001	9
10	1010	A
11	1011	B
12	1100	C
13	1101	D
14	1110	E
15	1111	F

Hexapode **hexapod**
Deutsch: Sechsfüßler. Kinematische Struktur einer Maschine oder eines Roboters, dadurch gekennzeichnet, dass die linearen und rotativen räumlichen Bewegungen einer Plattform durch sechs in ihrer Länge verstellbare „Streben“ (Achsen) erfolgt. Dadurch werden sechs Freiheitsgrade erreicht. Jede Position entspricht einer definierten Kombination der sechs „Achsen“. Durch simultane Steuerung aller sechs Streben ergeben sich beliebige räumliche Bewegungsabläufe der Plattform bzw. der daran befestigten Spindel + Werkzeug. Der Arbeitsraum ist nicht kubisch, sondern mehr halbkugelförmig.
➔ Parallel-Kinematische Maschinen.

high tech high tech
Abk. für high technology = Hochtechnologie.

Der nach neuesten Ergebnissen von Forschung und Entwicklung realisierte Stand der Technik, der in absehbarer Zeit aufgrund weiterer Entwicklungen überholt sein wird und dann zum normalen/alltäglichen Stand der Technik zählt.

Beispiel: Mikroprozessor, Bussysteme, CD, Datenspeicher.

Hilfsfunktionen auxiliary functions miscellaneous functions
Unter der Adresse M programmierbare Befehle zur Steuerung von Schaltfunktionen der NC-Maschine, wie z. B. Spindel EIN, Kühlmittel AUS, Werkzeugwechsel, Werkstückwechsel oder Programmende.

HSC-Maschine
Abk. für „High-Speed-Cutting-Maschine", d. h. Hochgeschwindigkeits-Fräsmaschine mit extrem hohen Drehzahlen (bis 100.000/min) und Vorschüben (bis 60 m/min). Dabei werden besonders hohe Anforderungen an Maschine und NC gestellt, wie hohe Steifigkeit, geringe Masse, kurze Blockzykluszeit, Nachlauf Null, look-ahead usw.

Hub
(deutsch: Knotenpunkt). In der Telekommunikation eingesetzte Geräte, die z. B. mehrere Computer sternförmig verbinden; auch als Bezeichnung für *Multiport-Repeater* gebraucht. Diese werden verwendet, um Netz-Knoten oder auch weitere Hubs, z. B. durch ein Ethernet, miteinander zu verbinden.

IGES
Abk. für „Initial Graphics Exchange Specification". Ein herstellerunabhängiges, genormtes Datenformat für die Übertragung von Geometriedaten zwischen unterschiedlichen CAD-Systemen. Wird auch zur Datenübertragung von CAD zu CAM-Systemen benutzt.

➔ STEP, VDA-FS.

Impulsgeber pulse generator digitizer
Messgerät, das pro Umdrehung eine definierte Anzahl von Impulsen mit sehr hoher Winkelgenauigkeit liefert. Bei NC-Maschinen werden sie als inkrementale Messgeber zur Messung von Wegen oder der Spindelposition bei Drehmaschinen verwendet. ➔ Messwertgeber.

Indirekte Wegmessung indirect measurement
Wegmessverfahren, bei dem ein rotatives Messsystem (Drehgeber, Impulsgeber) über die Vorschubspindel oder über Messzahnstange und Ritzel angetrieben wird. Die Ungenauigkeiten der Übertragungselemente beeinträchtigen die Messgenauigkeit. Moderne CNCs können systematische Messfehler kompensieren.

Alt.: Direkte Wegmessung.

Industrieroboter (IR) industrial robot
Ein in mehreren Achsen (Freiheitsgraden) freiprogrammierbares mechanisches Gerät, das mit Greifern oder Werkzeugen ausgerüstet ist und Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen kann (z.B. Werkstück- oder Werkzeugwechsel, Schweißen, Laserbearbeiten, Lackieren, Montieren).

Die Einteilung erfolgt in Abhängigkeit von

a) der **Kinematik** in kartesische, zylindrische, Kugel- oder Gelenkkoordinaten-Roboter
b) ihrer **Programmierung** in teach-in/play-back oder mit externer Dateneingabe

c) ihrer **Steuerung** in pick-and-place oder mit NC-Bahnsteuerung
d) der **Antriebsart** in hydraulisch, pneumatisch oder elektrisch
e) ihrer **Anwendung** in Universal-, Spezial- oder verfahrbare Roboter (Portal- oder Flächenportal)
f) ihrer **Belastbarkeit und Tragfähigkeit**

Informationen **information**
Daten in übersichtlicher, verständlicher Zusammenfassung, vorwiegend zur Information für den Menschen gedacht.
➔ Daten.

Inkrement **increment**
Zuwachs einer Größe in einzelnen, gleichgroßen Stufen.

Inkrementale Wegmessung **incremental measuring system**
Wegmessung durch Aufsummieren von Weginkrementen (z. B. 0,001 mm) in einem elektronischen Zähler bzw. in der NC. Der Zählerstand ist demnach ein Maß für den tatsächlichen Positions-Istwert.

Interface **interface**
Elektrische Schnittstelle, z. B. zwischen NC und Maschine bzw. Maschinensteuerung, oder das Mensch-Maschinen-Interface, d. h. Bedientafel mit Anzeigen und Eingabeelementen.
➔ Schnittstelle.

Internet **internet**
Weltweites Computernetzwerk, über das die Benutzer miteinander kommunizieren und Daten austauschen können. Dazu stehen verschiedene Protokolle zur Verfügung (TCP/IP). Wird auch zur Ferndiagnose von Störungsursachen und für Eingriffe zur Korrektur des Betriebsprogrammes von CNCs benutzt.

Interpolation **interpolation**
Berechnung von Zwischenpunkten zwischen vorgegebenen Anfangs- und Endpunkten zu einer geglätteten Kurve. Sind die verbindenden Segmente gerade Linien, dann bezeichnet man dies als lineare Interpolation, bei Kreisbögen oder Parabeln als zirkulare bzw. parabolische Interpolation. Moderne Systeme verfügen auch über die Möglichkeit der Spline-Interpolation.

Intranet **intranet**
Private Netzwerke, die z. B. innerhalb von Unternehmen bestehen und Internet-Protokolle verwenden. Hauptzweck ist es, den Mitarbeitern interne Daten und Informationen zur Verfügung zu stellen, ohne dass Außenstehende Zugriff auf diese Daten haben. Die Verbindung zum äußeren Internet erfolgt bei Bedarf über Gateway-Computer.

Interrupt **interrupt**
Die zeitweilige oder andauernde Unterbrechung eines laufenden Programms an einer Stelle, die nicht als Programmende vorgesehen ist.

ISO-Code
Genormter 8-Bit-Code mit 7 Informations- und 1 Prüfbit in Spur 8.

Istwert **actual position**
Vom Messsystem zurückgemeldeter, augenblicklicher Wert einer Regelgröße, wie z. B. Drehzahl, Vorschubgeschwindigkeit oder Position einer NC-Achse.

Kanalstruktur **channel structure**
Möglichkeit einer CNC, die insgesamt steuerbaren NC-Achsen nach Bedarf zu unterteilen in synchrone, d. h. miteinander interpolierende Hauptachsen und asynchrone, d. h. zeitunabhängig von den Hauptachsen funktionierende Hilfs- oder Nebenachsen.

Kartesische Koordinaten cartesian coordinates
Rechtwinkliges Koordinatensystem mit der Achsbezeichnung XYZ zur Positionsbestimmung eines Punktes in der Ebene oder im Raum.

KB
Abk. für „Kilo-Byte“, zur Definition der Speicherkapazität eines Rechners oder einer CNC. Sie wird mit großem K geschrieben und in Einheiten des Dualsystems angegeben:
1 KByte = 1×2^{10} Bytes = 1.024 Bytes
8 KBytes = 8×2^{10} Bytes = 8.192 Bytes

Kernel kernel
elementarer Bestandteil eines Betriebssystems mit folgenden Aufgaben:
- Schnittstelle zu Anwenderprogrammen (Starten, Beenden, Ein-/Ausgabe, Speicherzugriff)
- Kontrolle des Zugriffs auf Prozessor, Geräte, Speicher; Verteilung der Ressourcen, etwa der Prozessorzeit auf die Anwenderprogramme
- Überwachung von Zugriffsrechten auf Dateien und Geräte bei Mehrbenutzersystemen u. a. m.

Kettenmaße incremental dimensioning
Alle Maßangaben beziehen sich auf die vorhergehende Position.

Kinematik kinematics
Physikalische Bewegungslehre. Beschreibt bei Maschinen und Robotern den bewegungsmäßigen Aufbau, d. h. die Bewegungsmöglichkeiten in kartesischen, zylindrischen, Kugel- oder Gelenkkoordinaten.

Kompatibilität compatibility
Deutsch: Verträglichkeit. Zwei Systeme (Hardware oder Software) sind kompatibel, wenn sie ohne Zusatzeinrichtungen oder Änderungen miteinander arbeiten oder gegeneinander ausgetauscht werden können.

Konturzug-Programmierung contour segment programming
Programmierfunktion zur Eingabe mehrerer zusammenhängender Konturabschnitte, die nicht einzeln vermaßt sind, insgesamt jedoch einen eindeutigen Verlauf haben. Das System berechnet die einzelnen Schnittpunkte, Übergangsradien und tangentiellen Übergänge selbstständig und erzeugt das passende NC-Programm.

Koordinatensystem coordinate system
Mathematisches System, mit dem die Lage eines Punktes in einer Ebene oder im Raum durch Zahlen bestimmt werden kann. Dafür stehen Kartesische K., Zylinder-, Gelenk-, Polar- oder Kugel-Koordinaten zur Verfügung.

Koordinaten-Transformation coordinate transformation
Mathematischer Begriff für die Umrechnung von Raumkoordinaten in die Achskoordinaten einer NC-Maschine mit Schwenk- oder Drehachsen, oder eines Roboters mit nicht linearer Kinematik. Dies erleichtert die Programmierung solcher Systeme, da in Raumkoordinaten programmiert wird.

Koordinatenwerte coordinates
Numerische Werte zur Definition eines Punktes im Raum. In der NC-Technik werden vorwiegend Kartesische Koordinatensysteme und Polarkoordinaten zugrunde gelegt.

Kreisinterpolation circular interpolation
Auch Zirkular-Interpolation: Die NC-interne Berechnung der Punkte auf einem Kreis zwischen den programmierten Anfangs- und Endpunkten. Die Kreis-Interpolation ist normalerweise nur in den Ebenen XY, YZ und XZ möglich und nicht schräg im Raum.

Künstliche Intelligenz artificial intelligence
Abk. KI. Forschungsbereich der Informatik, der sich mit der Entwicklung von Computern beschäftigt, die menschliche Intelligenzleistungen nachvollziehen können. Da es keine genaue Definition von Intelligenz gibt ist der Begriff schwierig zu definieren.

Beispiele: Mustererkennung, Lernfähigkeit, Dialogfähigkeit.

Kugelumlaufspindel ball screw
Gewindespindel mit geringer Reibung zwischen Spindel und Kugelumlaufmutter, die zur Kraftübertragung bei NC-Maschinenschlitten verwendet wird. Weitere Vorteile sind hohe Steigungsgenauigkeit, weitgehende Spielfreiheit zwischen Spindel und Mutter und ein hoher Wirkungsgrad von ca. 98 %.

Kv-Faktor amplification factor
Maßzahl für die Verstärkung im Regelkreis bzw. den Nachlauf (Schleppabstand sa) einer NC-Achse in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit (v).

kv = v : sa (m/min : mm)

Je höher der kv-Wert, umso härter ist das dynamische Verhalten des Regelkreises.

Längenkorrektur tool length compensation
Besser Werkzeuglängenkorrektur. In der CNC gespeicherter Korrekturwert zum Ausgleich der tatsächlichen Werkzeuglänge gegenüber der programmierten Werkzeuglänge, z. B. von Bohrer, Senker oder Gewindebohrer.

Lageregelung position feedback control closed loop control
Geschlossener Regelkreis, der ständig die Positions-Sollwerte mit den Istwerten vergleicht und bei Abweichungen solange ein Korrektursignal ausgibt, bis die Differenz zwischen beiden Werten ausgeglichen und die gewünschte Position erreicht ist.

LAN
Abk. für „Local Area Network“, d. h. ein bezüglich Bereich und Ausdehnung begrenztes Datennetz, das keiner Regulierung durch die Post unterliegt. Es verbindet mehrere Computer und Peripheriegeräte innerhalb eines begrenzten Bereiches und ermöglicht eine direkte Kommunikation der Geräte untereinander.

Die Datenübertragung erfolgt vorwiegend über Breitbandtechnik, d. h. durch frequenzmodulierte Trägerfrequenzen über Kupferkabel, Glasfaser, Funk oder Laser.

Laserschmelzen lasercusing
Dieses RPD-Verfahren ermöglicht es, durch Verschmelzung einkomponentiger metallischer Pulverwerkstoffe Bauteile mit hoher Dichte schichtweise aufzubauen.

LED
Abk. für „Light Emiting Diode“, d. h. Leuchtdiode oder Lumineszenzdiode. Farbiges Licht ausstrahlender Halbleiter, der z. B. als Ersatz für Anzeige-Glühlämpchen verwendet wird und weniger Energie benötigt.

Leitrechner host computer
Übergeordneter Rechner z. B. in einem FFS, der die Leitfunktionen für Datenverteilung, Transportsteuerung, Werkzeugdisposition,

Materialwirtschaft und Fehlerüberwachung übernimmt, Rückmeldungen sammelt und daraus die Management Reports erstellt.

Linear-Interpolation **linear interpolation**
Die CNC-interne Berechnung der Punkte auf einer geraden Strecke zwischen dem programmierten Anfangs- und Endpunkt. Dabei unterscheidet man zwischen einfacher 2D-Interpolation, Interpolation mit Ebenen-Umschaltung (2 ½ D) und Interpolation im Raum (3D).

Linearmotoren **linear motors**
Elektrische Antriebe für lineare Bewegungen von Maschinenachsen ohne zusätzliche mechanische Übersetzungen wie bei rotierenden Motoren. Bei der linearen Direktantriebstechnik werden Elastizitäts-, Spiel- und Reibungseffekte ebenso vermieden wie Eigenschwingungen im Antriebsstrang. Das ermöglicht ein Höchstmaß an Dynamik und Präzision in der Bewegungsführung.

Logistik **logistics**
Organisation, Planung und Steuerung der gezielten Bereitstellung und des zweckgerichteten Einsatzes von Produktionsfaktoren (Arbeitskräfte, Betriebsmittel, Werkstoffe) zur Erreichung der Betriebsziele, sowie das Lager- und Transportwesen.

LOM
Abk. für „Laminated Object Manufacturing“. Generatives, CAD/CAM-basiertes Fertigungsverfahren, bei dem die Erzeugung der Bauteilgeometrie durch das Aufeinanderkleben einzelner Papierfolien und anschließendes Ausschneiden entlang der Konturzüge mittels NC-gesteuertem Laser erfolgt. So entsteht ein holzähnliches dreidimensionales Modell.

➔ RPD

Look ahead function
Vorausschauende Bahnbetrachtung der NC über mehrere Sätze, um unstetige Übergänge an Ecken und Kanten rechtzeitig zu erkennen und den Vorschub der Maschinendynamik anpassen zu können (automatisches Abbremsen vor scharfen Kurven, Eckenbremsen).

MACRO
Eine Gruppe von Instruktionen (Steuerdaten), die gespeichert und als Einheit aufgerufen werden können und den Programmieraufwand bei sich wiederholenden Aufgaben reduzieren.

➔ Unterprogramm.

Magnetband **magnetic tape**
Speichermedium, bestehend aus einem mit magnetisierbarem Material beschichteten Kunststoffband. Wird in Form von Standard- oder Minikassetten zur Dateneingabe und -ausgabe verwendet. Hat vorwiegend zur Datensicherung immer noch seine Berechtigung.

Manuelle Programmierung **manual programming**
Die Erstellung eines NC-Programms im Satzformat für eine bestimmte Maschinen-Steuerungs-Kombination ohne Verwendung eines computergestützten Programmiersystems.

Maschinelle Programmierung **computer aided programming**
Mit Maschine ist hier ein Rechner gemeint.

Erstellung eines NC-Programmes mit einem computergestützten NC-Programmiersystem. Diese bieten heute eine Dialogführung mit grafischer Unterstützung für den Programmierer. Das problemorientiert erstellte Programm (CLDATA) kann dann mit Hilfe eines Postprozessors für jede geeignete NC-Maschine ausgegeben werden.

Maschinendaten-Erfassung, MDE
Automatische Erfassung und Speicherung wesentlicher Maschinendaten während der Bearbeitungsphase, ergänzt durch manuell eingegebene Zusatzinformationen. Dient der besseren Transparenz der Fertigungsmittel und ermöglicht die schnelle Analyse technischer und organisatorischer Schwachstellen.

Erfasst werden z. B.: Maschinenlaufzeit, -stillstandszeit und -ausfallzeit sowie deren Ursachen, Fehlermeldungen und deren Ursachen, manuelle Eingriffe in den automatischen Ablauf, Korrekturwerteingaben.

MDE ist Teil einer umfassenden ➔ BDE (Betriebsdaten-Erfassung).

Maschinen-Nullpunkt **machine zero point**
Festgelegte Null-Position einer NC-Achse, meistens der vom Messsystem exakt reproduzierbare Koordinaten-Nullpunkt.

Maßstabänderung **scaling**
Auch Skalieren genannt. Mit dieser CNC-Funktion können mit dem gleichen NC-Programm maßstäblich veränderte Werkstücke hergestellt werden. Dazu wird für jede Achse ein Maßstabfaktor vorgegeben, was die programmierten Maße entsprechend verändert.

MB **MB**
Abk. für Megabyte (1 Million Bytes), tatsächlich aber 1.048.576 Bytes = (2^{20}) ➔ Byte

Mb **Mb**
Abk. für Megabit (1 Million Bits), tatsächlich aber 1.048.576 bytes = (2^{20}). ➔ bit

MDE/BDE
➔ Maschinendaten- und Betriebsdatenerfassung.

Mechatronik **mechatronic**
Interdisziplinäres Gebiet der Ingenieurwissenschaften, das auf Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik aufbaut. Im Vordergrund steht die Ergänzung und Erweiterung mechanischer Systeme durch Sensoren und Mikrorechner zur Realisierung teil-intelligenter Produkte und Systeme.

Menü **menu**
Am Bildschirm angebotene Auswahl von Möglichkeiten für den Bediener, um eine gestellte Aufgabe zu erfüllen.

Messfehlerkompensation **axis calibration**
CNC-Funktion, um systematische Messfehler der NC-Achsen zu kompensieren und somit höhere Genauigkeiten zu erreichen. Dazu werden die NC-Achsen z. B. mit einem Laser-Interferometer genau vermessen und die Maßabweichungen des Wegmesssystems als Korrekturwerte gespeichert. Beim späteren Betrieb der Maschine werden diese positions- und richtungsabhängig zu den Messwerten addiert.

Messgetriebe **measuring gear**
Feingetriebe hoher Präzision, das meistens zwischen mechanischer Maßverkörperung (Zahnstange/Ritzel oder Kugelumlaufspindel/Mutter) und Messwertgeber verwendet wird.

M-Funktionen **M functions**
Abkürzung für „Miscellaneous-functions“, deutsch: Hilfsfunktionen.

Unter der M-Adresse programmierbare Schaltfunktionen der Maschine.

Messsystem **measuring system**
➔ Messwertgeber und Wegmesssystem.

Messtaster, Messfühler **sensing probe, touch probe**
Schaltende Feintaster mit hoher Schaltgenauigkeit und Reproduzierbarkeit des Schaltpunktes. Sie werden wie ein Werkzeug in die Bearbeitungsspindel einer NC-Maschine eingesetzt und zum Messen der Werkzeuglänge, Werkstücklage oder zur Bearbeitungs- und Genauigkeitskontrolle benutzt. Die CNC muss dazu über spezielle Software-Programme verfügen, um die gemessenen Positionswerte zu speichern und daraus z. B. Korrekturwerte, Kreismittelpunkte oder Toleranzen zu berechnen.
➔ Messzyklen.

Messwertgeber **feedback device**
Auch Sensoren, d. h. Geräte, die eine physikalische Größe messen und die Messwerte in elektrisch auswertbare Ausgangssignale umwandeln. In der NC-Technik werden unterschiedliche Messwertgeber eingesetzt, um z. B. Achspositionen, Geschwindigkeiten, Drehzahlen, Drehmomente, Ströme und Temperaturen zu messen.

Messzyklen **probing cycles**
In der NC gespeicherte Unterprogramme zum automatischen Messen von Bohrungen, Nuten oder Flächen mit einem Messtaster und sofortiger Berechnung von Positionen, Genauigkeiten, Toleranzen, Kreismittelpunkten, Stichmaßen oder Schräglagen.

Methode **method, process**
Das planmäßige, durchdachte, zielsichere Vorgehen zur Erreichung eines bestimmten Zieles.

Mikroprozessor **microprocessor**
Ein LSI-Baustein, der die Zentraleinheit (CPU) eines Rechners enthält. Er besteht im Wesentlichen aus der Arithmetik-Einheit, verschiedenen Arbeitsregistern und der Ablauf-Steuerung. In dieser Konfiguration ist der Mikroprozessor aber noch nicht arbeitsfähig.
➔ Mikrocomputer.

Mikrocomputer **microcomputer**
Arbeitsfähige Einheit, bestehend aus Mikroprozessor, Programmspeicher, Arbeitsspeicher und der Ein-/Ausgabe-Einheit. Minimalkonfiguration einer arbeitsfähigen Rechnerhardware.

Mikrosystemtechnologie **MST**
Fertigung von kleinsten Präzisionsbauteilen mit Gewichten ab ca. 1 mg und entsprechend kleinsten Volumen.

MIPS
Abk. für „Millionen Instruktionen pro Sekunde“, eine Maßeinheit für die Verarbeitungsgeschwindigkeit eines Computers nach Anzahl der Arbeitsschritte pro Sekunde.

MMS **HMI**
MMS = Mensch-Maschine-Schnittstelle
Gehobene Bezeichnung für „Bedien- und Anzeigeeinrichtung einer Maschine“:
HMI = (engl.) human machine interface

modale Funktion **modal function**
Befehle eines NC-Programms, die solange wirksam bleiben, bis sie durch einen anderen Befehl gelöscht oder überschrieben werden.
Beispiel: G90/G91, G80 – G89, oder F-, S- und T-Wörter.
Nicht modale Funktionen werden dagegen nur in dem Satz wirksam, in dem sie programmiert sind, wie G04 oder M06.

MODEM
Elektronisches Gerät zur **MO**dulation/**DEM**odulation von Daten bei der Daten-

übertragung. Es setzt Daten von der einen Form in eine andere Form um, z. B. Zeichen vom 8-Spur-Code in bit-serielle Impulse zwecks Übertragung über Telefonleitung.

Modulbauweise **modular design**
Prinzip zum Aufbau komplizierter, umfangreicher, elektronischer Steuerungen aus mehreren einfachen Baugruppen (Module).

Monitor **monitor**
Bildschirm zur schriftlichen oder grafischen Anzeige von Daten, Vorgängen, Abläufen und Ergebnissen bei elektronischen Geräten und Computern.

Motorspindeln **motor spindles**
Eine Hauptspindel mit integriertem, koaxial angeordnetem Motor.

Die Vorteile sind eine hohe Regeldynamik, ein steifer, kompakter Aufbau, höchste Leistungsdichte sowie reduzierte Gesamtmasse und Reibungskräfte. Das ermöglicht eine hohe Regeldynamik. Durch die direkte Messwert-Erfassung der Spindelposition und -drehzahl bieten sie eine hohe Fertigungsgenauigkeit beim Betrieb als C-Achse.

Nachlauf **axis lag**
Nachlauffehler **following error**
Dynamischer Abstand einer NC-Achse zwischen den gerechneten Positions-Sollwerten und den tatsächlichen Positions-Istwerten während der Achsbewegung (Schleppfehler). Der Nachlaufwert ist abhängig von der Regelkreisverstärkung (kv-Faktor) des Antriebes und der Fahrgeschwindigkeit.

Nachlauf-Null, **zero lag,**
Vorsteuerung **feed forward**
Diese NC-Funktion korrigiert im Voraus die zu erwartende ➔ Bahnabweichung, d. h. die NC-Achsen fahren ohne ➔ Nachlauffehler direkt auf der Sollkontur.

Nachführsteuerung
photoelectric line tracer
Steuerung, bei der ein fotoelektrischer Lesekopf dem Linienzug einer speziellen Zeichnungsvorlage im Maßstab 1 : 1 folgt. Vorwiegend bei Brennschneidemaschinen eingesetzt, jedoch rückläufig wegen der zu großen 1 : 1-Vorlagen.

Nachrüstung **retrofitting**
Umrüstung einer NC-Maschine von einer veralteten auf eine neuere, leistungsfähigere Steuerung, meistens in Verbindung mit der Modernisierung der Antriebe und der Messsysteme, sowie dem Austausch der Steuerungselektrik gegen eine SPS. Nur wirtschaftlich bei gut erhaltenen, teuren Großmaschinen.

NC
Abk. für „Numerical Control“, d. h. ➔ Numerische Steuerung.

NC-Achse **NC axis**
Numerisch gesteuerte Maschinenachse, deren Positionen und Bewegungen durch direkte Eingabe der Maßwerte programmiert und durch eine NC gesteuert werden. Dazu benötigt jede NC-Achse ein Wegmesssystem und einen geregelten Antrieb.

NC- oder CNC-Maschinen
NC or CNC machine tools
Kurzbezeichnung für numerisch gesteuerte ➔ Werkzeugmaschinen.

NC-Programm **NC program**
Steuerprogramm zur Bearbeitung eines Werkstückes auf einer NC-Maschine. Es enthält alle erforderlichen Daten und Steuerbefehle in der richtigen Reihenfolge und wird von der NC-Maschine schrittweise abgearbeitet.

NC-Programmierung NC programming
Auch Teileprogrammierung. Die Erstellung der Steuerprogramme zur Bearbeitung von Werkstücken auf NC-Maschinen. Dabei unterscheidet man zwischen manueller NC-Programmierung, maschineller NC-Programmierung und werkstattorientierter Programmierung (WOP).

NC-Werkzeugmaschine NC machine tool
Mit einer numerischen Steuerung ausgerüstete Werkzeugmaschine.

Nebenzeiten nonproductive time
Bei Werkzeugmaschinen die Summe aller nichtproduktiven Zeiten einer Maschine, z. B. im Eilgang fahren, sowie Zeiten für Werkzeugwechsel, Werkstückwechsel, Messvorgänge u. a.

Netzwerkprotokoll protocol
(auch **Netzprotokoll, Übertragungsprotokoll**)
Eine exakte Vereinbarung für den Datenaustausch zwischen Computern bzw. Prozessen, die durch ein Datennetz miteinander verbunden sind. Es besteht aus einem Satz von Regeln und Formaten (Syntax), die den Datenverkehr der kommunizierenden Computer bestimmen (Semantik).

Nullpunkt datum point
1) Der Ursprung eines Koordinatensystems, oder
2) der Ausgangspunkt (Nullpunkt) eines Messsystems.

Nullpunktverschiebung zero offset
NC-Funktion, um den Programm-Nullpunkt manuell oder programmierbar beliebig zu verschieben. Dazu verfügen CNCs über separate Speicherbereiche für mehrere Nullpunktverschiebungen, die dann per NC-Programm abrufbar sind.

Numerische Steuerung, NC numerical control
Auch „Zahlenverstehende Steuerung", d.h. die Befehle werden als Zahlen eingegeben. Bei Werkzeugmaschinen versteht man darunter insbesondere die direkten Maßzahlen, welche die Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück steuern (Weginformationen). Hinzu kommen noch die Zahlenwerte für Drehzahl, Vorschubgeschwindigkeit, Werkzeugnummer und verschiedene Hilfsfunktionen (Schaltinformationen). Die Daten-Eingabe kann wahlweise über eine Tastatur, einen elektronischen Datenträger oder über Kabelanschluss (DNC) erfolgen.

Die heutigen Steuerungen sind ausnahmslos unter Verwendung von Mikroprozessoren aufgebaut. ➔ CNC.

NURBS NURBS
Abk. für „Nicht Uniforme Rationale B-Splines".

Verfahren zur mathematischen Beschreibung von Freiformflächen und Regelflächen, wie Zylinder, Kugel oder Torus mittels Punkten und Parametern. NURBS erlauben ein effizienteres Bearbeiten dieser Kurven und Flächen als Punktmodelle. Anderen Splines sind sie durch die Möglichkeit überlegen, alle Arten von Geometrien, selbst scharfe Ecken und Kanten, sauber darzustellen.

Neuere CAD/CAM-Systeme werden die vom CAD-System ausgegebenen NURBS direkt in der CNC verarbeiten. Vorteile: Reduzierte Datenmenge, höhere Genauigkeit und Geschwindigkeit, gleichförmige Bewegung der Maschine, längere Lebensdauer von Maschine und Werkzeug.

Offene CNC open-ended control
CNC, die einen PC enthält und ein PC-Betriebssystem verwendet (z. B. DOS, Windows, OS/2, UNIX).

Offen besagt, dass der Käufer Eingriffsmöglichkeiten in das Betriebsprogramm hat. Damit ist er selbst in der Lage, kundenspezifische Modifikationen und maschinenspezifische Funktionen einzubringen. Das Verarbeiten von älteren NC-Teileprogrammen ist nicht vorgesehen.

off-line
Deutsch: Nicht rechnergekoppelt, d. h. Betriebsart eines Rechnersystems, bei der die Peripheriegeräte selbstständig und unabhängig vom zentralen Rechner arbeiten. Dazu werden die vom Rechner erzeugten Daten auf Datenträger zwischengespeichert und erst später verarbeitet.

Alt.: On-line.

Offset **offset compensation**
Deutsch: Verschiebung, Versatz. Elektronische Kompensation von Spanntoleranzen des Werkstückes oder der Werkzeuge, die das genaue mechanische Ausrichten oder Einstellen ersparen.

➔ Nullpunktverschiebung.

online
Deutsch: rechnergekoppelt. Betriebsart eines Rechnersystems, bei der die Peripheriegeräte direkt vom zentralen Rechner gesteuert werden. Dazu sind sie per Datenleitung mit dem Rechner verbunden und die vom Rechner erzeugten Daten werden sofort verarbeitet.

OS
Abk. für „Operating System“, das Betriebssystem eines Computers.

OSACA
Abk. für „Open System Architecture for Controls within Automation Systems“.

Von der EU gefördertes Projekt zur Entwicklung einer offenen Architektur für WZM-Steuerungen. Daran beteiligten sich drei Forschungsinstitute, drei WZM-Hersteller und fünf Steuerungshersteller.

Palette **pallet**
Transportabler Werkstückspanntisch, der das Spannen/Entspannen der Werkstücke außerhalb der Maschine ermöglicht und automatisch in die Maschine zur Bearbeitung eingewechselt werden kann. Dies reduziert die Stillstandszeiten der Maschinen und ermöglicht den automatischen Transport der gespannten Werkstücke zu mehreren Maschinen (Flexible Fertigungssysteme).

Parallelachsen **parallel axis**
1) Zwei mechanisch gekoppelte NC-Achsen, z. B. Y1/Y2 einer Gantry-Maschine, die simultan angesteuert werden müssen, um ein Schrägziehen zu vermeiden.
2) Zwei in gleicher Richtung wirkende NC-Achsen, wie z. B. Traghülse und Spindel eines Bohrwerkes oder Tisch und Spindel mit gleichen Achsrichtungen.
3) Zwei voneinander unabhängige NC-Achsen, z. B. die Hauptspindeln Z1 und Z2 von zwei unterschiedlichen Spindelkästen einer Senkrecht-Fräsmaschine, die an zwei identischen Werkstücken gleichzeitig arbeiten können.

Parallele Datenübertragung **parallel data transmission**
Bei der parallelen Datenübertragung werden mehrere Bits gleichzeitig (parallel) übertragen, also auf mehreren Leitungen nebeneinander oder über mehrere logische Kanäle zur gleichen Zeit.

Die Anzahl der Datenleitungen ist nicht festgelegt, wird aber meistens als ein vielfaches von 8 gewählt, sodass volle Bytes übertragen werden können (zum Beispiel 16 Leitungen ergeben 16 Bits = 2 Byte). Häufig werden zusätzliche Leitungen zur

Übertragung von einer Prüfsumme (Paritätsbit) oder eines Taktsignals eingesetzt.

Alt.: serielle Datenübertragung

Parallelprogrammierung **parallel input mode**

Programmierung eines neuen Werkstückes mittels Handeingabesteuerung einer CNC-Maschine während der noch laufenden Bearbeitung eines anderen Werkstückes.

Parametrische Programmierung **parametric programming**

NC-Programmierung durch Eingabe der beschreibenden Parameterwerte, wie z. B. für Lochkreise den Durchmesser, die Anzahl der Löcher, Start- und Fortschaltwinkel und gewünschten Bohrzyklus. Aus diesen wenigen Eingabewerten errechnet sich das System die einzelnen Positionen und Bearbeitungsfolgen.

Paritätsprüfung **parity check**

Auch Gleichheitsprüfung. Eine Methode zur Prüfung binärer Daten auf Einfachfehler, um bei der Datenübertragung falsche Zeichen oder einfache Übertragungsfehler zu erkennen. Beispiel: Ungerade Bit-Zahl bei Zeichen im ISO-Code.

PC-Karte **PC card**

Beschreib- und löschbare Daten-Speicherkarte in Scheckkartengröße zum Einstecken in Notebooks oder Laptop Computer (PCs). Speicherkapazitäten bis 16 GB, heute hauptsächlich Flash-ROM, für CNCs als transportable Programmspeicher verwendet.

PDM, ProduktDatenManagement **product data management**

Ein Konzept, um produktdefinierende Daten und Dokumente zu speichern, zu verwalten und in späteren Phasen des Produktlebenszyklus zur Verfügung zu stellen. Grundlage ist ein integriertes Produktmodell. PDM entstand maßgeblich aus Problemen der CAD-Zeichnungsverwaltung, verursacht durch dramatische Zunahme der Produktdatenmenge im Zusammenhang mit der Einführung dieser Systeme. Für den Datenaustausch zwischen den beteiligten Systemen, sowie die Beschreibung von Produktmodellen hat sich weitestgehend die Normenreihe ISO 10 303 (STEP) als Standard etabliert

CAD-Systeme können als Ursprung des PDM angesehen werden.

PDM soll die Qualität der Produktentwicklung erhöhen sowie Zeit und Kosten der Produktentwicklung vermindern. Mit dem Ziel eines durchgehenden Informationsflusses sollen diese Vorteile an nachgelagerte, am Produktlebenszyklus beteiligte Stellen weitergereicht werden.

PDM Systeme sind generell industrie- und unternehmensspezifisch.

performance

Dieser Begriff hat je nach Fachgebiet viele unterschiedliche Bedeutungen. In technischen Bereichen ist damit die **Summe der Leistungsmerkmale** gemeint.

Peripheriegeräte **peripheral units**

Sammelbegriff für Zusatzgeräte, die an einem Rechner angeschlossen werden. Beispiele: Drucker, Datenspeicher, Plotter oder Bildschirme.

PKM

Abk. für Parallelkinematiken. Sammelbegriff für Maschinen, die alle Bewegungen über „Stabkinematiken“ erzeugen.

z. B.: Tripoden, Hexapoden

Playback-Betrieb **playback**

Vorwiegend bei Robotern verwendete Programmiermethode, wobei der Roboter manuell geführt wird und die NC den gesam-

ten Bewegungsablauf zeitgleich abspeichert (Teach-in). Anschließend lässt sich die abgespeicherte Bewegungsfolge mit veränderter Geschwindigkeit wiederholen.

PLM, ProduktLebenszyklusManagement **product lifecycle management**
bezeichnet ein IT-Lösungssystem, mit dem alle Daten einheitlich gespeichert, verwaltet und abgerufen werden, die bei der Entstehung, Lagerhaltung und dem Vertrieb eines Produkts anfallen. Dazu greifen alle Bereiche bzw. Systeme auf eine gemeinsame Datenbasis zu: Planung (PPS/ERP), Konstruktion (CAD), Fertigung (CAM, CAQ), Controlling, Vertrieb und Service.

PLM ist aufgrund der Komplexität nicht als käufliches Produkt, sondern als eine Strategie zu verstehen, die durch geeignete technische und organisatorische Maßnahmen betriebsspezifisch umgesetzt werden muss.

Plotter **plotter**
Deutsch: Koordinatenschreiber. Eine rechnergesteuerte Zeichenmaschine zur Ausgabe von grafischen Darstellungen auf Papier.

Polarachse **polar axis**
Bezeichnung für Schwenkachsen, Gelenkachsen und Drehtische von NC-Maschinen.

Polarkoordinaten **polar coordinates**
Mathematisches System zur Lagebestimmung eines Punktes in einer Ebene durch die Länge seines Radiusvektors und den Winkel dieses Vektors gegen die Null-Linie.

Polynom-Interpolation
Interpolationsverfahren, bei dem die NC-Achsen der Funktion folgen

$f(p) = a_0 + a_1p + a_2p^2 + a_3p^3$ (Pol., max. 3. Grades).

Damit können z. B. Geraden, Parabeln oder Potenzfunktionen erzeugt werden.

Positionsanzeige **position display**
Visuelle Anzeige der absoluten, vom Wegmesssystem zurückgemeldeten Position eines Maschinenschlittens, vom Achsennullpunkt oder vom Programmnullpunkt aus gemessen.

Postprozessor (PP) **postprocessor**
Für die maschinelle Programmierung erforderliches Software-Programm, das die vom Computer berechneten Standarddaten der Werkzeugbewegungen (CLDATA) in ein maschinenbezogenes NC-Programm umsetzt. Für jede Maschinen-/Steuerungskombination ist ein spezieller PP notwendig.

PPS **PPS**
Abk. für „Produktionsplanung und -steuerung“. Integrierter EDV-Einsatz in der Produktion zur organisatorischen Planung, Steuerung und Terminüberwachung der Produktionsabläufe, und zwar von der Angebotserstellung bis zum Versand. Hauptaufgaben sind die vorausschauende Planung von Maschinenbelegung, Fertigungsterminen, Materialbestandsprüfung, Montagezeiten.

preset **preset**
Deutsch: vorgeben, voreinstellen. Funktion zur Definition des Nullpunktes der Maschinenkoordinaten. Dabei findet keine Achsbewegung statt, es wird für die momentane Achsposition lediglich ein neuer Positionswert eingetragen.

Prinzip **principle**
Grundsatz oder Regel.

PROFIBUS-DP (Dezentrale Peripherie)
Zur Ansteuerung von Sensoren und Aktoren durch eine zentrale Steuerung in der Fertigungstechnik. Weitere Einsatzgebiete sind die Verbindung von „verteilter Intelligenz“, also die Vernetzung von mehre-

ren Steuerungen untereinander (ähnlich PROFIBUS-FMS). Es sind Datenraten bis zu 12 MBit/sec auf verdrillten Zweidrahtleitungen und/oder Lichtwellenleiter möglich. (aus Wikipedia)

Programm **program**
➔ NC-Programm.

Programmende **end of program (EOP)**
Programmierbare Hilfsfunktion (M00, M02, M30) zum Stillsetzen der NC-Maschine nach beendeter Bearbeitung. Es erzeugt die Befehle für Spindel Aus, Kühlmittel Aus, Werkzeug ins Magazin und alle Achsen in die Ausgangsposition fahren.

Programmformat **program format**
Regeln und Festlegungen zur Anordnung von Daten auf einem Datenträger, z. B. für den Aufbau eines NC-Programmes, bestehend aus Adressen, Zeichen, Wörtern und Sätzen mit variabler Satzlänge.

Programmiersprache **programming language**
„Kunstsprache“ zur symbolischen Beschreibung von Rechneranweisungen durch mnemotechnische Codeworte. In Verbindung mit der NC-Programmierung versteht man darunter eine problemorientierte „Sprache“ zur Erstellung eines Quellenprogrammes. Dieses wird dem Rechner eingegeben, vom „Sprachprozessor“ übersetzt und dann zu einem allgemeingültigen NC-Programm (CLDATA) verarbeitet. Danach folgt die Umsetzung durch den Postprozessor für eine spezielle NC-Maschine.
Beispiele: PP für APT, EXAPT, RADU.

Programmiersystem **programming system**
Einrichtung zur Programmierung von NC-Maschinen, bestehend aus einem Rechner mit Tastatur und Bildschirm, Programmiersoftware und den entsprechenden Peripheriegeräten.

Programmierung
➔ NC-Programmierung.

Programmunterbrechung **program interrupt**
Programmierter HALT-Befehl (M00), der den Bearbeitungsablauf unterbricht und dem Bediener erlaubt, zu kontrollieren, zu messen, Werkzeuge zu wechseln oder umzuspannen. Durch einen Startbefehl wird die Bearbeitung fortgesetzt.

PROM
Abt. für „Programmable Read Only Memory“, ein elektronischer Festwertspeicher, der nur einmal programmiert werden kann und seine Daten nicht mehr verliert.

Protokoll **protocol**
Regeln über den Datenaustausch zwischen Computern und/oder anderen elektronischen Geräten.

Prozessor **processor**
1) Spezielle Elektronik-Hardware in einem Rechner, die bestimmte Aufgaben durchführt.
2) Software zur Umsetzung eines in problemorientierter Sprache geschriebenen und vom Rechner verarbeiteten Teileprogrammes in eine allgemeine, NC-unabhängige Form (CLDATA). Diese wird durch den Postprozessor in ein NC-Programm umgesetzt.

Prüfbarer Code **error detecting code**
Einfache Möglichkeit zur Datenprüfung durch Kontrolle jedes Zeichens auf geradzahlige Bitzahl pro Zeichen (ISO-Code).
➔ Paritätsprüfung.

Pseudo-absolute Wegmessung **pseudo-absolut measuring**

1) Verwendung von zwei zyklisch absoluten Messgebern (Resolver) in Verbindung mit einem speziellen Messgetriebe und einer elektronischen Auswertung. Durch die um ca. 1 Grad/Umdr. unterschiedliche Winkelstellung beider Geber entsteht eine Phasenverschiebung, aus der die Elektronik die absolute Position errechnet. Je nach Auflösung lässt sich eine begrenzte Strecke absolut erfassen, z. B. bei 0,001 mm Auflösung ca. 5 – 8 Meter (23 Bit = 838.860.800 Schritte).
2) Impulsmaßstab, der im Abstand von 20 mm mit abstandscodierten Referenzmarken und spezieller Auswert-Elektronik versehen ist. Nach dem Überfahren von zwei Referenzmarken steht das absolute Wegmaß zur Verfügung.
3) Impulsdrehgeber mit Pufferbatterie für Geber- und Zählerelektronik, um auch im ausgeschalteten Zustand jede Maschinenbewegung zu erfassen. Nach dem Einschalten stehen die absoluten Achsenpositionen sofort zur Verfügung.

Punktsteuerung **point-to-point control**
NC, die alle programmierten Positionen auf ungesteuerter Bahn anfährt. Dabei ist kein Werkzeug im Eingriff. Erst nach erfolgter Positionierung kann die Bearbeitung beginnen. Anwendung zum Bohren, Stanzen, Punktschweißen.

Quadrant **quadrant**

1) Ein Viertelkreis bzw. die Kreisfläche eines Viertelkreises.
2) Einer der vier Teile einer Ebene, die durch zwei rechtwinklige Koordinaten geteilt wird.

Quellenprogramm **source program**
NC-Programm, das in einer problemorientierten Programmiersprache geschrieben wurde.

Radiuskorrektur **cutter compensation**
➔ Fräserradius-Korrektur, Schneidenradius-Korrektur.

RAM
Abk. für „Random Access Memory“. Elektronischer Speicher (Schreib-/Lese-Speicher) mit wahlfreiem Zugriff, d. h. jeder Speicherplatz kann direkt angesprochen, beschrieben oder ausgelesen werden.

Unterscheidung nach DRAM = Dynamischer RAM mit sehr kurzen Lesezeiten und SRAM = Statischer RAM.

Rapid Prototyping
Zählt zu den ➔ Generativen Fertigungsverfahren, einer relativ jungen Technologie zum computergestützten Bau physikalischer Prototyp-Modelle durch Anwendung spezieller Maschinen und Verfahren. Ausgangspunkt ist ein vollständiger, geschlossener Datensatz (Volumenmodell) auf einem CAD-System, welches durch eine spezielle Software in einzelne Schichten „zerlegt“ wird.

Beispiele: Stereolithografie, Laser-Sintern/Schmelzen, Schicht-(Laminat-)Verfahren, 3D-Drucken.

Rapid Tooling
Herstellung von Werkzeugen, die als Dauerformen für den Kunststoff-Spritzguss oder den Metall-Druckguss eingesetzt werden, unter Anwendung von ➔ Rapid Prototyping Technologien (Laser Sintern/Schmelzen, Abformen von RPD-Modellen durch Feinguss u. a.).

Rationalisierung **rationalization**
Technische und organisatorische Maßnahmen zur Erhöhung der Effektivität, wie z. B.

Steigerung der Leistung, Reduzierung des Aufwandes oder der Kosten. Durch Rationalisierung werden Produktionsmittel (Rohstoffe, Kapital, Arbeit) und Zeit eingespart. In der Fertigung meistens mit Automation der Abläufe und Reduzierung des Personals verbunden.

Rechner
➔ Computer.

Referenzpunkt **reference point**
Eine festgelegte Position einer NC-Achse, die in einem bestimmten Bezug zum Achsen-Nullpunkt steht. Dieser wird nach dem Einschalten der Maschine angefahren, um das Maschinen-Koordinatensystem wieder eindeutig zu nullen. Mit absoluten Gebern entfällt das Referenzpunkt-Anfahren.

Regelung, Regelkreis
closed-loop control, servo loop
Steuerungssystem mit Rückführung des Messwertes der zu regelnden Größe. Numerische Steuerungen vergleichen z. B. ständig den vorgegebenen Sollwert einer Achs-Position mit dem augenblicklich zurückgemeldeten Istwert und ermitteln daraus die notwendigen Steuerbefehle für den Antrieb, um Übereinstimmung (Ist = Soll) zu erreichen.

Relativmaß-Programmierung
incremental programming
NC-Programmierung, bei der die Koordinatenwerte als Zuwachs zur vorhergehenden Position angegeben werden (G91).

Repetiergenauigkeit **repeatability**
➔ Wiederholgenauigkeit.

Reproduzierbarkeit **reproducibility**
Grundsätzlich identisch mit der Wiederholgenauigkeit, jedoch über einen längeren Zeitraum gemessen.

reset **reset**
Deutsch: Rückstellen, Zurücksetzen.

Befehl, um ein elektronisches Gerät in einen definierten Ausgangszustand zu bringen. Nicht zu verwechseln mit dem Nullen einer NC-Achse.

Resolver **resolver**
Auf elektromagnetischer Basis arbeitendes rotatives Messsystem, das die Winkelstellung des Rotors in eine Sinus- und eine Cosinus-Komponente auflöst. Absolute Messung innerhalb einer Rotorumdrehung.

RFID
radio frequency identification device
(Identifikation per Funkfrequenz)

Elektronische Geräte, um Daten auf einem Transponder (Speicher/Übertrager) berührungslos und ohne Sichtkontakt lesen und speichern zu können.

Ein RFID-System besteht aus dem Speicherchip (Transponder), dem Schreib-Lesekopf und der Sende-Empfangs-Einheit (auch Reader genannt). Die Datenübertragung zwischen Transponder und Lese-Empfangs-Einheit findet dabei über elektromagnetische (Funk-) Wellen statt.

(➔ Funkerkennung)

RISC
Abk. für „Reduced Instruction Set Computer“. Deutsch: Rechner mit reduziertem Befehlssatz. Durch Verzicht auf komplexe, selten benötigte Befehlssätze wird der Rechner einfacher, preiswerter und schneller. Komplexe Befehle werden in mehrere einfache zerlegt und nacheinander ausgeführt.

Alt.: CISC

Roboter **robot**
Programmgesteuerte Geräte, die komplexe Bewegungsabläufe durchführen können und mit Greifern oder Werkzeugen aus-

gerüstet sind. Ihr Einsatz erfolgt vorwiegend zur Handhabung von Werkzeugen oder Werkstücken sowie in der Montage.

Beispiele: Beschichten, Schweißen, Entgraten, Gussputzen, Werkzeugwechsel.

ROM
Abk. für „Read Only Memory". Festwertspeicher, dessen Inhalt nur gelesen werden kann und nicht veränderbar ist.

RPD **Rapid Product Development**
Rapid Prototyping
Sammelbegriff für generative Herstellungsverfahren von Prototyp-Werkstücken.
➔ Rapid Prototyping.

Rückführung **feedback**
Die Übertragung eines (Mess-)Signals von einer späteren zu einer früheren Stufe innerhalb eines geschlossenen Systems (Regelkreises), z. B. Drehzahl-Istwert oder Positions-Istwert. Bei Abweichungen vom Sollwert erfolgt eine automatische Nachstellung.

Satz **block**
Gruppe von zusammengehörenden Wörtern in einem NC-Programm, die als Einheit behandelt wird. Ein NC-Satz beginnt meistens mit der Satznummer (N…) und endet mit dem Satzende-Zeichen ($). Im Allgemeinen eine Zeile im NC-Programm.

Satzende-Zeichen
end of block character
Ein festgelegtes Zeichen am Satzende ($), das die einzelnen Bearbeitungsinformationen voneinander trennt.

Satznummer **block number**
Unter der Adresse N programmierte Ordnungszahl zur Nummerierung der Sätze eines NC-Programmes. Dient vorwiegend zur Orientierung des Bedieners über den Stand der Bearbeitung.

Satzsuchen **block/sequence search**
NC-Funktion, um ein NC-Programm bis zu einer bestimmten Stelle zu überlesen, wobei alle Maschinenfunktionen gesperrt sind. Um das Programm an der gesuchten Satznummer zu starten, müssen auch Werkzeug, Drehzahl, Vorschub und Korrekturwerte aktiviert sein.

Satzüberlesen **block delete**
NC-Funktion, um durch ein Schrägstrich vor der Satzadresse (/N478) gekennzeichnete Sätze in einem NC-Programm je nach Schalterstellung wahlweise zu überlesen oder auszuführen.

Satz-Zykluszeit **block cycletime**
Zeitangabe die aussagt, wie schnell eine NC aufeinanderfolgende NC-Sätze zur Abarbeitung aufbereitet und bereitstellt.

Daraus lassen sich berechnen,

1) die max. Vorschubgeschwindigkeit bei Polygonzügen (Linearinterpolation), die aus sehr kleinen Weginkrementen bestehen, oder
2) die minimal zulässigen Weginkremente pro Satz bei vorgegebener Vorschubgeschwindigkeit.

Scanner **scanner**
Deutsch: Abtaster.

In der NC-Technik eine Einrichtung zur Digitalisierung der Koordinatenwerte eines Werkstücks und Umsetzung auf Datenträger. Im Prinzip eine Messmaschine, die mit einem Messfühler das Werkstück zeilenweise abtastet und die Messdaten speichert.

SCARA-Roboter **SCARA robot**
Abk. für „Selective Compliance Assembly Robot Arm", deutsch: Schwenkarm-Roboter.

Schaltbefehl, Schaltfunktion **M-function**
Programmierbare Befehle, die die Schaltfunktionen einer Werkzeugmaschine steu-

ern, z. B. Ein-/Ausschalten des Kühlmittels (M08/M09), der Spindel (M03/M05), oder aktivieren des Werkzeugwechsels (M06).

Schneidenradius-Korrektur **tool nose compensation**
Äquidistante Bahnkorrektur für Drehmaschinen zur Kompensation unterschiedlicher Werkzeug-Schneidenradien. Dazu ist noch die Lage des Schneidenmittelpunktes zu berücksichtigen (rechts/links schneidend, vor/hinter Drehmitte, achsparallel).

Schnittstelle **interface**
Genormte Übergangsstelle zwischen EDV-Geräten (Hardware-S.) oder Programmen (Software-S.). Dient zur Übertragung von Daten, Befehlen oder Signalen zwischen unterschiedlichen Systemen.

Beispiele: IGES, MAP, VDAFS, SERCOS, V.24, RS 232, u. a.

Schraubenlinien-Interpolation **helix interpolation**
Zusätzlich zur Kreisinterpolation in einer Ebene (X, Y) erfolgt eine Linearinterpolation in einer dritten Achse (Z), senkrecht zu dieser Ebene. Wird verwendet zur Herstellung von Innen- und Außengewinden mit Formfräsern und zum Fräsen von Schmiernuten (Gewindefräsen).

Schrittmotor **stepping motor**
Elektrischer Motor, bei dem die Rotordrehung in kleinen, einheitlichen Winkelschritten erfolgt (z. B. 400/U). Der Verstellwinkel des Rotors entspricht der Anzahl der vom Steuergerät abgegebenen Impulse und die Umdrehungsgeschwindigkeit entspricht der Impulsfrequenz.

Kein Regelkreis, da keine Rückmeldung. Es sind nur relativ niedrige Drehzahlen und Drehmomente realisierbar. Für größere Drehmomente werden hydraulische Verstärker nachgeschaltet.

Schrittvorschub **incremental jog**
Möglichkeit, um eine NC-Achse zum Einrichten in wählbaren Inkrementen zu verstellen, z. B. 1 µm, 10 µm, 0,1 mm, 1 mm usw.

Schutzzone **restricted area**
Auch ➔ Software-Endschalter. Programmierbare NC-Funktion, die das Werkzeug vorübergehend nicht aus einem bestimmten Bereich heraus oder in einen bestimmten Bereich hinein lässt, um Kollisionen zwischen Werkzeug und Werkstück aufgrund falscher Weginformationen zu vermeiden.

Schwenktisch **tilting or swivelling table**
Schräg verstellbarer (kipp-/neigbarer) Aufspann- bzw. Arbeitstisch an Werkzeugmaschinen, um an kubischen Werkstücken schräge Flächen und Bohrungen, sowie Freiformflächen bearbeiten zu können.

Bei Bearbeitungszentren A'-Achse, d. h. Schwenken um die X-Achse.

➔ Drehtisch

Schwesterwerkzeug **alternate tool**
Auch Ersatzwerkzeug. Gleichartiges Werkzeug im Werkzeugmagazin, das nach Standzeit-Ende oder Bruch des eingesetzten Werkzeuges verwendet wird.

Selektives Lasersintern (SLS)
RPD-Verfahren zur Herstellung hochbelastbarer Prototypen auf Basis von CAD-Daten durch schichtweises Verschmelzen von pulverförmigen Werkstoffen mit fokussierter Laserstrahlung. Auch aus speziellem Formsand lassen sich Formen und Kerne für den Metallguss herstellen.

Sensoren **sensors**
Elektrische Messwertgeber für nichtelektrische Größen wie Längen, Winkel, Druck,

Kraft, Temperatur. Bei Änderung der Messgröße muss der Sensor sein Ausgangssignal möglichst schnell und ohne Totzeit ändern.

SERCOS
Abk. für „**SER**ielles Echtzeit-**CO**mmunikations-**S**ystem“. Digitale Schnittstelle zwischen CNC und Antrieben, die umfassend spezifiziert ist. Sie soll es ermöglichen, CNCs und Antriebe unterschiedlicher Hersteller zu kombinieren und mit höherer Präzision als in analogen Regelkreisen zu synchronisieren.

Serielle Datenübertragung **serial data transmission**
Die zeitlich nacheinander erfolgende Übertragung von Informationen auf einem Datenkanal.

Alt.: Parallele Datenübertragung.

Server **server**
Ein Computer in einem ➔ LAN, der mittels spezieller Software die Verbindung aller angeschlossenen Geräte (Computer, Laufwerke, Drucker etc.) steuert.

Servo-Steuerung **servo control**
Regelkreis, dessen Regelgröße eine mechanische Bewegung ist, bei NC-Maschinen z. B. die Lageregelung der NC-Achsen.

➔ Regelkreis.

Servo-Abtastrate **servo cycle time**
Zeitangabe in ms die aussagt, wie oft der Positions-Istwert einer NC-Achse elektronisch abgetastet und in den Lageregelkreis zurückgeführt wird. Maßgeblich für die dynamische Genauigkeit einer NC-Maschine.

Sicherheitsabstand **safety clearance**
Mindestabstand der Z-Achse vom Werkstück zum automatischen Werkzeugwechsel ohne Kollisionsgefahr.

Sicherheitskonzepte **safety functions**
Zusätzliche Sicherheitsfunktionen erfüllen z. B. im Einrichte- und Testbetrieb bei offener Schutztür die Anforderungen nach dem Safety Integrity Level SIL 2 der IEC 61508 und nach dem Peformance Level PL d gemäß EN ISO 13849. Damit lassen sich die wesentlichen Anforderungen zur funktionalen Sicherheit einfach und wirtschaftlich umsetzen:

- Überwachen von Geschwindigkeit und Stillstand
- Sichere Abgrenzung von Arbeitsraum und Schutzraum
- Sicherheitsrelevante Signale und deren interne logische Verknüpfung

Simulation **simulation**
Möglichst naturgetreue, vom Computer erzeugte Nachbildung eines komplizierten technischen Vorganges auf einem Bildschirm zur kosten- und zeitsparenden Überprüfung des späteren Ablaufes.

Beispiele: Grafisch-dynamische Simulation einer NC-Bearbeitung oder von Roboterbewegungen zwecks Fehlererkennung. Simulation eines geplanten FFS, um Engpässe, Kapazitäten, Ausbaumöglichkeiten, Aufbau-Varianten oder Zeitprobleme bereits vor Beginn der Installation testen zu können.

Slope **slope**
Programmier- oder einstellbares sanftes Beschleunigungs- und Abbremsverhalten der NC-Achsen, um ruckartige Bewegungen zu vermeiden und die Mechanik zu schonen.

SMD
Abk. für „Surface Mounted Devices“, eine spezielle Technik zur Bestückung von Leiterplatten mit Bauteilen der Mikroelektronik.

Softkeys
➔ Software-Taster.

Software **software**
Allgemein: Programme, die für den Betrieb eines Rechners oder eines rechnerunterstützten Systems notwendig sind.

Bei CNCs: Das Systemprogramm für die Mikroprozessoren, das die NC-Funktionen ausführt sowie die Überwachungs- und Diagnoseprogramme, Anpassprogramme und maschinenspezifische Programme.

Nicht zu verwechseln mit den NC-Programmen des Anwenders.

Software-Endschalter
software limit switch
Programmierbare Achsbegrenzung für NC-Maschinen, die ein ungewolltes Überfahren verhindern. Verwendung als Ersatz für mechanische Achs-Endschalter oder zur vorübergehenden Begrenzung des Arbeitsbereiches, um Maschine und Werkstück vor Beschädigungen durch Eingabe falscher Weginformatinen zu schützen.

Software-Taster **softkeys**
Frei belegbare Funktionstasten, auch Multifunktionstasten. Meist 5 bis 8 am Rande des Bildschirmes einer CNC angebrachte mechanische oder elektronische Taster mit wechselnden Funktionen. Beim Bedienen der CNC werden diesen Tasten per Software nacheinander mehrere, unterschiedliche Funktionen zugewiesen. Ersatz für viele Hardware-Taster mit diskreten Einzelfunktionen.

Sollwert, Sollposition
command position
Programmierte Weginformation für eine NC-Achse (Maschinenschlitten).

Speicher **memory**
Elektronische Funktionseinheit, die Daten aufnehmen, speichern und wieder abgeben kann. In der NC-Technik werden unterschiedliche Speicherbausteine verwendet, wie z. B. RAM, ROM, EPROM, EEPROM.

Speicherkarte **memory card**
Transportabler, steckbarer, elektronischer Datenspeicher im Format einer Scheckkarte und ca. 3 bis 4 mm Dicke, der mit RAM, EPROM oder EEPROM bestückt sein kann. Verschiedene Ausführungen sind noch aktuell, z. B. SD, Mini-SD, Micro-SD (z. B. in Mobiltelefonen)

Speicherprogrammierbare Steuerung, SPS
programmable logic controller, PLC
➔ SPS.

Spiegelbild-Bearbeitung
mirror image operation
Durch Richtungsumkehr (vertauschen von + und –) einer NC-Achse lassen sich mit dem gleichen NC-Programm zwei spiegelbildliche Werkstücke herstellen. Beispiele: Linke und rechte Tür fräsen, Gehäuse und Deckel bohren.

Spielausgleich **backlash compensation**
CNC-Funktion bei indirekter Wegmessung mittels Kugelumlaufspindel und Drehgeber einer NC-Achse. Bewirkt eine elektronische Kompensation der Lose zwischen der mechanischen Antriebskette und dem Messgeber. Bei Richtungsumkehr beginnt die Wegmessung erst dann, wenn der in der CNC gespeicherte Kompensationswert zurückgelegt ist. Ist für jede Achse getrennt justier- und korrigierbar.

Spindelorientierung
spindle orientation
Programmierbare NC-Funktion zur Stillsetzung der Hauptspindel in einer festgelegten oder programmierbaren Winkelstellung. Erforderlich beim Zurückziehen

eines Ausdreh-Werkzeuges mit einseitiger Schneide aus einer Bohrung oder zum Werkzeugwechsel bei Werkzeugaufnahmen mit Greif- und Fixierstellung.

Spline-Funktion spline function
Mathematisches Verfahren zur Annäherung von Kurven. Es entstehen Splinekurven mit glattem, stetigem Kurvenverlauf, die vorgegebene Stützpunkte verbinden. Man unterscheidet A-, B-und C-Splines.
➔ NURBS.

Spline-Interpolation spline interpolation
Verkettung von Polynomen dritten oder höheren Grades, die an ihren Übergängen ein verbindendes Übergangsverhalten aufweisen. Dient zur Berechnung von Freiformkurven aus wenigen Stützpunkten.

SPS PLC
Abk. von „Speicherprogrammierbare Steuerung“. Diese elektronischen Steuerungen ersetzen in ihrer einfachsten Ausführung frühere Relais-Steuerungen für Verriegelungen und Verknüpfungen von Schaltbefehlen und -funktionen (Bit-Verarbeitung). Leistungsfähige Systeme sind spezielle Prozessrechner mit vielen Ein- und Ausgängen zur fortlaufenden Überwachung und Steuerung des Prozesses mit Datenrückführung (Wort-Verarbeitung).

SRAM
Abk. für „Static RAM“. Elektronischer Schreib-Lesespeicher, dessen Speicherinhalt ohne periodische Auffrischung erhalten bleibt.

Standzeit-Überwachung tool monitoring
CNC-Funktion zur Überwachung der theoretischen Standzeiten (Nutzungsdauer) jedes einzelnen Werkzeuges im Magazin der NC-Maschine. Hierzu addiert die NC die einzelnen Einsatzzeiten der Werkzeuge und vergleicht sie mit der vorgegebenen theoretischen Standzeit. Nach Standzeit-Ende wird das Werkzeug gesperrt und z. B. ein Schwesterwerkzeug aufgerufen.

Steigungsfehler-Korrektur lead error compensation
NC-Funktion zur programmierbaren Korrektur von gemessenen Steigungsfehlern einer Kugelumlaufspindel oder einer Messzahnstange mit Ritzel.

STEP
Abk. für „Standard for the Exchange of Product Model Data“.
Internationale Normung, um CAD-Daten problemlos austauschen und weiterverarbeiten zu können (ISO 10303).

Stereo-Lithografie
CAD/CAM-Verfahren zur Herstellung von Musterteilen ohne Gießform und ohne Werkzeuge. Ausgangswerkstoff ist ein Bad mit flüssigem Kunststoff, auf den ein numerisch gesteuerter Laser- oder UV-Lichtstrahl einwirkt und den Kunststoff schichtweise aushärtet. ➔ RPD.

Steuerkette open loop control
Steuerungssystem, bei dem die korrekte Ausführung eines Steuerbefehls nicht durch ein Rückführsignal kontrolliert und geregelt wird.
Alt.: Regelkreis.

Steuerung controller, machine control unit
Elektrisches oder elektronisches Gerät zur Steuerung programmierter oder durch die Verdrahtung festgelegter Funktionen einer Maschine. In der NC-Technik sind alle Steuerungsaufgaben auf NC und SPS verteilt.

Streckensteuerung **straight cut control**
Numerische Steuerung, die das Werkzeug im Vorschub nur achsparallel (X, Y, Z nacheinander) verfahren kann.

Synchronmotor **synchronous motor**
Elektromotor für 3-Phasen-Drehstrom, dessen Rotor lastunabhängig immer synchron mit dem im Stator erzeugten Drehfeld läuft. Die Statorwicklung ist identisch mit der des Asynchronmotors.

Der **Rotor** ist mit Permanentmagneten oder fremderregten Magneten bestückt, je nach Auslegung mit 1 bis mehreren Polpaaren.

Synchronmotoren können am Netz nicht direkt durch Einschalten des Drehstroms hochgefahren werden, sie benötigen dazu eine „Anlaufhilfe" bis zur Nenndrehzahl, meistens in Form eines Kurzschlusskäfigs.

Die **Drehzahlregelung** erfolgt durch Änderung der Speise-Spannung und -Frequenz über einen Frequenzumrichter. Der Drehzahl-Regelbereich reicht von Stillstand (mit Stillstandsmoment) bis zur max. zugelassenen Drehzahl. Diese ist motorabhängig und liegt bei 2.000 bis > 9.000 1/min.

Der drehzahlgeregelte Synchronmotor ist wegen seiner Vorteile derzeit der bevorzugte **Achsantrieb** für CNC-Werkzeugmaschinen. Heutige Synchron-Servomotoren sind Spezialausführungen, die einen großen Regelbereich und ein dynamisches Drehzahlverhalten ermöglichen.

Syntax **syntax**
1) Grammatik: Lehre vom Aufbau der Sätze, der Stellung und Zuordnung der einzelnen Wörter und Satzteile, Haupt- und Nebensätze usw.
2) NC-Technik: Festgelegte Regeln für den Aufbau der Anweisungen in Zeichen, Wörter und Sätze.

System **system**
Ganzheitlicher Zusammenhang von Dingen, Vorgängen, Teilen, der z. B. von Menschen hergestellt wurde. Beispiele: Periodisches System der chem. Elemente, Planetensystem, Maßsystem, kybernetisches System, Programmiersystem, Fertigungssystem.

Systematik **systematic**
Gliederung nach sachlichen und logischen Zusammenhängen.

Taschenfräsen **pocket milling**
NC- oder Programmier-Funktion, die mit wenigen Eingabebefehlen das Ausfräsen von Vertiefungen oder tiefer liegenden Werkstückflächen erlaubt.

TCP/IP
Abk. für **T**ransmission **C**ontrol **P**rotocol/**I**nternet **P**rotocol

Ein ➔ Netzwerkprotokoll, das wegen seiner großen Bedeutung für das Internet auch kurz nur als Internetprotokoll bezeichnet wird.

Teach-in **teach-in mode**
Deutsch: Lernverfahren. Programmierung durch schrittweise Positionsaufnahme. Vorwiegend für Roboter benutzt, wobei der Roboterarm im Einrichtbetrieb nacheinander in die gewünschten Positionen gebracht wird und die CNC diese Werte per Tastendruck abspeichert.

Anschließend automatisches Anfahren der einzelnen Positionen: play back.

Technologiezyklen **machining cycles**
Bearbeitungszyklen für Standardgeometrien, Kreistaschen, Gewindefreistiche, Gravurzyklen, Tieflochbohrungen etc. in der Ebene und auch auf der Stirn- oder Mantelfläche von Drehwerkstücken oder an geschwenkten Werkstücken.

Technologische Daten **technological data**
In Ergänzung zu den geometrischen Daten alle Informationen in einem NC-Programm zur Auswahl der technologischen Funktionen, wie Drehzahl, Vorschubgeschwindigkeit, Kühlmittel, Werkzeuge.

Teilefamilien **group technology**
Gruppe von geometrisch und technologisch ähnlichen Werkstücken, die mit den gleichen Maschinen und Werkzeugen ohne wesentliche Umstellungen bearbeitet werden können.

Terminal **terminal**
Geräte zur Daten-Eingabe und -Anzeige, meist bestehend aus ASCII-Tastatur und Bildschirm.

Thyristor **silicon controlled rectifier (SCR)**
Halbleiter-Bauelement, dessen Übergang vom Durchlass- in Sperrzustand (und umgekehrt) gesteuert werden kann. Großes Anwendungsgebiet in der Leistungselektronik für Drehzahl- und Frequenzregelungen.

Time sharing **time-sharing**
Rechner-Betriebsart, bei der mehrere Benutzer über Terminals den Rechner gleichzeitig für unterschiedliche Aufgaben benutzen. Dadurch ergibt sich eine wirtschaftlichere Nutzung des Rechners ohne bemerkbare Wartezeiten für die einzelnen Benutzer.

Token Ring **token ring**
Besser: Token-Zugriffsverfahren bei lokalen Netzwerken (LAN). Steuert den Zugriff der einzelnen Teilnehmer auf den Bus. Der „Token“ (ein bestimmtes Bitmuster, das die Sendeberechtigung erteilt) kann immer nur von einem Teilnehmer an einen anderen weitergegeben werden. Dadurch wird sichergestellt, dass immer nur ein Teilnehmer sendet und die Daten kollisionsfrei übertragen werden.

Topologie **structure**
Die Topologie bezeichnet bei einem Computernetz die Struktur der Verbindungen mehrerer Geräte untereinander, um einen gemeinsamen Datenaustausch zu gewährleisten. Man unterscheidet Stern-, Ring-, Bus-, Baum-, Vermaschtes-Netz- und Zell-Topologie.

Die Topologie eines Netzes ist entscheidend für seine Ausfallsicherheit: Nur wenn alternative Wege zwischen den Knoten existieren, bleibt bei Ausfällen einzelner Verbindungen die Funktionsfähigkeit erhalten. Es gibt dann neben dem Arbeitsweg einen oder mehrere Ersatzwege (oder auch Umleitungen).

Torquemotor **torque motor**
Torquemotoren *(torque (engl.) = Drehmoment)* sind getriebelose Direktantriebe mit sehr hohem Drehmoment (über 8.000 Nm) und relativ kleiner Drehzahl. Sie werden für schnelle und präzise Verfahr- und Positionieraufgaben genutzt. Aufgrund ihrer kompakten Bauweise und der geringen Anzahl an Bauteilen benötigen sie nur wenig Platz. Sie sind geeignet für den Einsatz in Drehtischen, Schwenk- und Rundachsen, Spindelmaschinen, dynamischen Werkzeugmagazinen und Drehspindeln in Fräsmaschinen.

Torquemotoren sind mit Innen- oder Außenläufer herstellbar. Als Außenläufer haben sie ein höheres Drehmoment bei gleichen Außenabmessungen.

Touch screen **touch screen**
Bildschirm mit Berührungssensoren zur Aktivierung der angebotenen Menüs durch Antippen mit dem Finger (Ersatz für Softkeys).

Transferstraße **transferline**
Gruppierung mehrerer Fertigungseinheiten in einer Fertigungslinie, wobei alle Teile die einzelnen Stationen in einer festgelegten Reihenfolge durchlaufen und mit aufeinanderfolgenden, ergänzenden Programmen bearbeitet werden. Die Bearbeitungsvorgänge können nur in Grenzen verändert werden. Dadurch sind Transferstraßen ideal für die Serienfertigung ohne große Produktvariationen. Durch die enorme Flexibilität und große Anzahl der Produktvarianten im Automobilbau haben Transferstraßen im ursprünglichen Sinne zahlenmäßig an Bedeutung verloren. Sie werden durch Flexible Fertigungssysteme ersetzt.

Ultraschall-Technologie **ultrasonic technology**
Neues Verfahren zur wirtschaftlichen spanenden Bearbeitung von Keramik, Glas, Hartmetall, Silizium und ähnlichen Werkstoffen. Hierbei wird in einer speziellen „Ultraschall-Spindel“ bei Drehzahlen von 3.000 bis 40.000 Umdrehungen/min eine mechanische Schwingung von ca. 20.000 Hertz auf das Diamantwerkzeug in Richtung der Z-Achse überlagert. Dadurch „schlägt“ das vibrierende Werkzeug pulverförmige Kleinstpartikel aus der in bester Qualität entstehenden Werkstück-Oberfläche.

Umkehrspiel **backlash**
Unerwünschtes Spiel (Lose) zwischen Spindel und Mutter bzw. zwischen Ritzel und Zahnstange eines mechanischen Antriebes.

Umsetzer **converter**
Elektronische Geräte zur Umsetzung von Daten von einer in eine andere Form. In Verbindung mit NC: Code-Umsetzer, Digital-Analog-Umsetzer, Serien-Parallel-Umsetzer.

UNIX
Ein von AT&T Bell Laboratories entwickeltes Computer-Betriebssystem für mehrere Benutzer.

Unterprogramm **subroutine, macro**
Im Speicher abgelegte, häufig wiederkehrende Programmteile, die vom Hauptprogramm aufgerufen werden können. Danach springt der Programmablauf wieder zurück ins Hauptprogramm.

USB-Stick
Transportabler Halbleiterspeicher, meist Flash-ROMs. Anders als der Arbeitsspeicher eines PCs behalten diese Speicherchips ihren Inhalt auch ohne Betriebsspannung. USB ist dafür die optimale Anschlusstechnik, weil sie mittlerweile weit verbreitet ist, gleich die nötige Stromversorgung mitbringt und ausdrücklich das Stecken und Entfernen während des Betriebes unterstützt.

V.24-Schnittstelle
Vom CCITT empfohlene und standardisierte serielle Datenschnittstelle, die weitgehend mit der EIA-232-C-Schnittstelle übereinstimmt und bei NCs zur automatischen Datenein-/-ausgabe verwendet wird.

Variable Platzcodierung **random tool access**
Methode zur Werkzeugablage und -verwaltung in einem Werkzeugmagazin. Beim Beladen des Magazins werden die Werkzeuge beliebigen freien Plätzen zugeordnet. Beim Werkzeugwechsel mittels Doppelgreifer vertauschen die Werkzeuge die Plätze, d. h. die Magazinbelegung ändert sich mit jedem Werkzeugwechsel. Die NC übernimmt die logische Verwaltung von Werkzeugen und Platznummer.

Vorteile: Verwendung uncodierter Werkzeuge, Programmieren der Werkzeugnum-

mer im NC-Programm, Suchlauf und Bereitstellen des Werkzeuges auf kürzestem Weg, kurze Wechselzeiten mit Doppelgreifer.

Variable Satzlänge **variable block format**
NC-Programmformat, bei dem die Länge jedes Satzes je nach Zahlenwerten variieren kann.

VDAFS
Abkürzung für „Verband der Automobilindustrie – FlächenSchnittstelle".

Wurde 1986 DIN-Standard (DIN 66 301). Reine Geometrieschnittstelle, speziell für den Austausch von dreidimensionalen (Freiform-) Kurven- und Flächendaten, z. B. zwischen CAD-Systemen. Merkmale sind: wenig Grundelemente, einfaches Datenformat und einfache Syntax.

Vektor-Vorschub **vector feedrate**
Resultierende Vorschubgeschwindigkeit, mit der sich ein Werkzeug an der Werkstückkontur entlang bewegt. Die beteiligten Achsen verändern ihre Geschwindigkeit so, dass die resultierende Vektor-Geschwindigkeit des Werkzeuges dem programmierten Wert entspricht und konstant bleibt.

Verfahren **procedure**
Der Ablauf bzw. die Art und Weise der Ausführung von Vorgängen zur Gewinnung, Herstellung oder Beseitigung von Produkten.

Vergleicher **comparator**
Funktionseinheit, die z. B. die Soll- mit der Istposition einer Achse vergleicht und bei Abweichungen ein Korrektursignal für den Regelkreis zur Verminderung dieser Differenz erzeugt (Regler).

Versatz
➔ Offset.

Verstärker **amplifier**
Elektronische Einheit zur Leistungsverstärkung eines Signals. In einer NC ist dies meistens ein Servo-System, das die Leistung für die geregelten Antriebe liefert.

Verweilzeit **dwell**
In Sekunden oder Spindelumdrehungen programmierbare Wartezeit nach Satzende, z. B. zum Freischneiden des Werkzeuges.

virtuelles Produkt **virtual product**
Rechnerbasierte, realistische Darstellung eines Produkts als Volumenmodell auf dem Bildschirm, mit allen geforderten Funktionen. Es ermöglicht eine realitätsnahe Beurteilung ohne vorherige Erzeugung eines körperlichen Modells.

VLSI = Very Large Scale Integration
Bezeichnet den Integrationsgrad von elektronischen Halbleiter-Bausteinen; Beisp.: VLSI-Prozessoren haben zwischen 100.000 und 1 Mio. Transistoren.

Vorausschauende Bahnbetrachtung **look ahead function**
Automatische Funktion der CNC zur vorausschauenden Betrachtung des Werkzeugweges über mehrere Sätze, um an kritischen Konturübergängen (Ecken, Radien) die Vorschubgeschwindigkeit entsprechend der Maschinenkinematik soweit zu reduzieren, dass die Konturgenauigkeit am Werkstück eingehalten wird. Ferner lassen sich drohende Konturverletzungen erkennen und vermeiden, wenn z. B. beim Eintauchen der Werkzeugdurchmesser größer ist als die Werkstück-Kontur.

Vorrichtung, Spannvorrichtung **fixture**
Mechanische Spannmittel, mit deren Hilfe gleichartige Werkstücke in einer genau fixierten Lage auf dem Maschinentisch

festgehalten werden, um sie mit hoher wiederholbarer Genauigkeit bearbeiten zu können.

Vorschub **feed**
Der Weg, den ein Werkzeug pro Minute oder pro Umdrehung zurücklegt.

(f = mm/min, mm/U). In NC-Programmen unter der Adresse F programmiert und mittels G-Adresse definiert (G94, G95).

Vorschubkorrektur **feedrate override**
Manuelle Eingriffsmöglichkeit, um den programmierten Vorschub einer NC-Maschine vorübergehend verändern und den Bearbeitungsverhältnissen anpassen zu können.

WAN
Abk. für „Wide Area Network“, eine Datenverbindung von Rechnern über große Entfernungen, die öffentliche Einrichtungen wie z. B. Telefonleitung oder ISDN der Post nutzt.

Wegbedingungen **G-functions**
Im NC-Programm die G-Funktion (G00 bis G99), mit der festgelegt wird, wie die programmierte Position anzufahren ist: Auf einer Geraden, einer Kreisbahn, im Eilgang oder z. B. mit einem Bohrzyklus.

Weginformationen **dimensional data**
In einem NC-Programm alle Sollwert-Vorgaben für die NC-Achsen unter den Adressen X Y Z A B C U V W R.

Wegmesssysteme **position measuring system**
Messgeräte mit elektrisch auswertbaren Signalen zur Erfassung der Achsenbewegungen einer NC-Maschine. Dazu stehen mehrere unterschiedliche Messsysteme und Messverfahren zur Verfügung: Linearmaßstäbe und Drehgeber, absolute und relative, analoge und digitale sowie pseudo-absolute Systeme.

Werkstattorientierte Programmierung
➔ WOP

Werkstück-Nullpunkt **part program zero**
Meistens identisch mit dem vom Programmierer festgelegten Programm-Nullpunkt in jeder Koordinate, auf den sich alle Maßangaben des NC-Programms beziehen. Der Bezug zum Maschinen-Nullpunkt wird durch die Nullpunktverschiebung berücksichtigt.

Werkstückwechsel **workpiece changer**
Der programmierbare und automatisch ablaufende Wechselvorgang, um in einer NC-Maschine mittels Palette oder Roboter ein fertig bearbeitetes gegen ein unbearbeitetes Werkstück auszutauschen.

Werkzeug-Aufruf **tool function**
Unter der T-Adresse programmierte Werkzeugnummer zum Suchen und Bereitstellen des nächsten Werkzeuges im Werkzeugmagazin. Das Einwechseln in die Spindel erfolgt dann mit dem M06-Befehl.

Werkzeugbahn **tool path**
Die von der NC errechnete Bahn, auf der sich der Werkzeug-Mittelpunkt relativ zum Werkstück bewegt, um die programmierte Werkstückkontur zu erzeugen.

Werkzeugdaten **tool data**
Die beschreibenden Daten eines Werkzeuges, wie Durchmesser, Länge und Standzeit, in manchen Fällen ergänzt durch Schnittdaten, Gewicht, Form, Typ u. a. Angaben.

Werkzeugkorrektur **tool compensation**
In der NC gespeicherte Korrekturwerte, um Abweichungen der Werkzeuglänge, unterschiedliche Werkzeugradien, die Werk-

zeuglage oder den Werkzeugverschleiss zu kompensieren.

Werkzeugmaschine machine tool
Maschinen zur spanenden oder spanlosen Bearbeitung von Werkstücken aus Metall, Holz, Kunststoff oder anderen Werkstoffen mit Werkzeugen.

Beispiele: Dreh-, Fräs-, Hobel-, Bohr-, Funkenerosions-, Schleifmaschinen, Scheren, Stanzen, Pressen, Walzen, Maschinenhämmer. Neuere Werkzeugmaschinen-Typen sind Wasserstrahlschneidmaschinen und Laserstrahlmaschinen zum Schweißen, Trennen, Abtragen oder Formen (Stereo-Lithographie). W. werden entweder manuell oder automatisch betrieben, wobei letztere wesentlich schneller und präziser arbeiten. Bei **W. mit numerischer Steuerung** läuft eine frei programmierbare Folge von Bearbeitungsvorgängen ab, sodass auch unterschiedliche Werkstücke in beliebiger Reihenfolge automatisch bearbeitet werden können.

Man unterscheidet **Einfach- oder Produktionsmaschinen** für einen oder mehrere Arbeitsgänge und **Universal-W.** für verschiedenartige Arbeitsgänge und Folgebearbeitungen.

In der Serienproduktion werden oft mehrere Bearbeitungseinheiten oder Werkzeugmaschinen in Gruppen zusammengefasst und so miteinander verbunden, dass unterschiedliche Bearbeitungen nacheinander erfolgen (Rundschalt- oder Transfer-Automaten, Taktstraßen, flexible Fertigungssysteme).

Roboter, Lackiermaschinen, Messmaschinen, Schweißgeräte und viele andere Fertigungseinrichtungen zählen **nicht** zu den Werkzeugmaschinen.

Werkzeugverwaltung tool management
1) Maschinen-intern: NC-Funktion zur Verwaltung der im Magazin befindlichen Werkzeuge nach Werkzeugnummer, Platznummer, Standzeit, Korrekturwerte, Verschleiß, Bruch und Abnutzung.
2) Maschinen-extern: Zentraler Werkzeugrechner, der alle außerhalb der NC ablaufenden Verwaltungsaufgaben übernimmt, wie z. B. Werkzeugnummer, Werkzeugdaten, Korrektur- und Einstellwerte, Verfügbarkeit, Reststandzeit usw.

Der Datenaustausch zwischen Rechner und NC erfolgt entweder über DNC oder spezielle schreib-/lesbare Datenspeicherchips im Werkzeughalter.

Die durchgängige Verwaltung und Aktualisierung von Werkzeugdaten ist für die wirtschaftliche Steuerung von Werkzeugmaschinen von zentraler Bedeutung

Werkzeug-Voreinstellung tool presetting
Das genaue Messen bzw. Einstellen der Werkzeuge auf vorgegebene Werte bezüglich Länge (Bohrer, Fräser) und Durchmesser (Ausdreh-Werkzeuge). Dazu stehen spezielle Voreinstellgeräte zur Verfügung, die mit Messuhren, Mikroskopen, Projektoren und Computern ausgerüstet sind, um die Werte exakt zu erfassen oder einzustellen und für die spätere Übertragung in eine NC-Maschine zu speichern.

Werkzeugwechsler tool changer
Mechanische Einrichtung an NC-Maschinen zum automatischen Wechseln von Werkzeugen aus dem Magazin in die Bearbeitungsspindel und umgekehrt. Der Wechselvorgang erfolgt mit Einfach- oder Doppelgreifern, oder auch direkt aus dem Magazin in die Spindel.

Wiederholgenauigkeit repeatability repetitive accuracy
Genauigkeit, die bei mehrmaligem Positionieren eines Maschinenschlittens auf die gleiche Position unter gleichen Bedingun-

gen erreicht wird. Die Abweichungen werden durch zufällige Fehler und nicht durch systematische Fehler bestimmt.

Wizard
(dt: Zauberer) Ein Software-Tool, das z. B. in CAD- und PDM-Systemen Abläufe automatisiert und Bearbeitungszeiten merklich verkürzt.

WOP – Werkstattorientierte Programmierung **shop floor programming**
Einfach zu bedienendes, werkstattgeeignetes Programmierverfahren mit Dialogführung und grafisch unterstützter Eingabe. Einheitliche Programmierung in der AV und in der Werkstatt.

WOP-Kennzeichen ist die strikte Trennung von Geometrie- und Technologie-Eingabe, d. h. mit der Eingabe der Werkstückgeometrie wird noch nicht die spätere Bearbeitungsfolge festgelegt. Programmiert werden die Werkstück-Konturen und nicht die Werkzeugbahnen!

Wort **program word**
Grundeinheit eines NC-Satzes, bestehend aus Adresse und Zahlenwert.

workstation
Deutsch: Bildschirmarbeitsplatz. Ein Terminal zur Kommunikation mit dem Computer, meistens mit eigener Rechnerkapazität ausgerüstet.

X-, Y-, Z-Achse **X-, Y-, Z-axis**
Adressen zur Kennzeichnung der 3 linearen Hauptachsen einer NC-Maschine, die-meistens rechtwinklig zueinander stehen. Hierbei ist X die horizontale Längsachse, Y eine Querbewegung und Z die Bewegung in Richtung der Spindelachse.

Zelle **cell, manufacturing cell**
➔ Flexible Fertigungszelle.

Zoom-Funktion **zooming**
Deutsch: Lupenfunktion, d. h. die stufenlose Vergrößerung bzw. Verkleinerung einer grafischen Darstellung auf dem Bildschirm zwecks besserer Erkennung von Details.

Zugriffszeit **access time**
Notwendige Zeit für den Abruf einer bestimmten Anzahl von Daten aus dem Speicher.

Zusatzfunktionen
➔ Hilfsfunktionen.

Zyklus **cycle**
Fester Ablauf von mehreren Einzelschritten, die in der NC gespeichert sind und durch eine programmierte M- oder G-Funktion aufgerufen werden können. Zyklen werden zur Anpassung an die gegebene Aufgabe mit spezifischen Parameterwerten (Rückzugsebene, Bohrtiefe, Schnittaufteilung) ergänzt. Sie vereinfachen die Programmierung und reduzieren die Programmlänge erheblich. NC-Programme mit Zyklen sind wesentlich änderungsfreudiger als solche ohne Zyklen.

Beispiele: Zyklen für Gewindebohren, Tiefbohren, Schruppen, Werkzeugwechsel, Palettenwechsel, Messvorgänge.

Zykluszeit **cycle time**
Von der NC benötigte Mindestzeit, um aufeinanderfolgende Programmsätze für die Abarbeitung aufzubereiten und bereitzustellen. Ist die zur Abarbeitung eines Satzes benötigte Zeit kürzer als die Zykluszeit, dann bleibt die Maschine kurzzeitig stehen, bis der nächste Satz zur Abarbeitung freigegeben ist. Um dies zu verhindern, muss die Vorschubgeschwindigkeit reduziert werden.

Stichwortverzeichnis

A

Abrasiv-Schneiden 250
Abrichten von Schleifscheiben 206
Abrichtgerät 207
Abrichtwerkzeuge 206, 219
ABS-Kupplung 383, 387
absolute Messgeräte 65
Absolutmaßprogrammierung 451
Abtastkopf 61
Achsbezeichnung 55
Achsen, asynchrone 108
Achsen sperren 108
Achsen, synchrone 111
Achsentauschen 113
Achspositionen 268
Achsrichtung, positive 58
Aktorische Werkzeugsysteme 432
angetriebene Werkzeugspindeln 198
angetriebene Werkzeuge 384
Anpassprogramm 106
Anpass-Steuerungen 142
Anpassteil 39
Antriebsauslegung aus Prozesskenngrößen 274
Antriebsdimensionierung 283
Antriebstechnik 264
Anzeigen in CNC 128
Arbeitsfeldbegrenzung 113
Arbeitszyklus 288
Asynchronmotor 79, 169
Aufspannplanung 501
Ausbildung und Schulung 518
Auslegung der Antriebe 279
Auswerteinheit 421
automatische Objekterkennung 499
automatische Systemdiagnosen 114
Automatisierung 40, 56
Automatisierung, flexible 365
Automatisierung, gleitende 359

B

Bahngenauigkeit 269
Bahnsteuerung 33, 184
Bandsägen 228
BDE/MDE 107, 336
Bearbeitung, ergänzende 320
Bearbeitungsdatenbank 499
Bearbeitungsstrategien 494
Bearbeitungszeiten 322
Bearbeitungszentrum 91, 165, 181
Bearbeitungszentrum, mehrspindliges 188
Bearbeitungszyklus 284
Bedienung 45, 226
Bedienungspersonal 246
Beschleunigungen 271
Betriebssystem 32, 106
bewegliches Steuergerät 187
Bildschirm 106, 128
Blockzykluszeit 114, 123, 192
Bohrmaschinen 164, 221
Bohrstangen mit Feindreheinsätzen 388
Bohrungsmessköpfe 431
Bohrwerk 225
Bohrzentren 223
Bohrzyklen 223, 185
Bohrzyklen G80 – G89 455
Brennschneiden 236
Bridge 553
Bussysteme 334, 368

C

C-Achse 196
CAD 562
CAD/CAM-Systeme 575
CAD-Daten 477
CAE-Software 566
CAM 562

CAM – Computerunterstützte Programmierung 474
CAM-orientierte Geometrie-Manipulation 493
CAP (Computer Aided Process Planning) 566
CAPTO-Aufnahmen 383
CA-Systeme 564
Chip 421
CNC 106
CNC, Definition 106
CNC, FFS-geeignet 333
CNC für Bohrmaschinen 222
CNC für Drehmaschinen 200
CNC für Messmaschinen 259
CNC für Sägemaschinen 229
CNC für Schleifmaschinen 206
CNC für Verzahnmaschinen 214
CNC-Grundfunktionen 106
CNC-Maschine 367
CNC, offene 128
CNC-Preisentwicklung 132
CNC-Software 106
CNC-Sonderfunktionen 112
CNC-Werkzeugmaschinen 181
CO_2-Laser 232
Codeträger 421
Computer und NC 39

D

Datenbus und Feldbus 143
Dateneingabe 43
Datenkommunikation mit CNC-Steuerungen 527
Datenmodelle 493
Datenschnittstellen 108, 333
Datenumwandlung 123
Daten und Schnittstellen 503
Diagnosefunktion 87
Diagnose-Software 108
Dialogführung 201
Diamantrollenabrichtgerät 208
Digitalantriebe 268
digitale Fertigung 573
digitale Produktentwicklung 568
digitalisierte Fertigung 41
Dimensionierung von Spindel- und Vorschubantrieben 274
DIN 66025 445
DIN 66025, Bl. 2 448
DIN 66217 56
Diodenlaser 234
Direktantriebe 81
DNC-Betrieb 317
DNC – Direct Numerical Control 525
DNC – Distributed Numerical Control 44
DNC-Schnittstelle 115
DNC-System 41
Doppelgreifer 95
Drahtelektrode 246
Dreh-Fräs-Zentren 198
Drehgeber 64
Drehgeber, absolute 68
Drehgeber, inkrementale 67
Drehmaschinen 195
Drehmaschinen, mehrspindlige 202
Drehstrom-Asynchronmotor 171, 269
Drehstrommotoren 79
Drehstrom-Synchronmotoren 173
Drehzahlwechsel 102
Drehzentrum 181, 200
3D-Drucken (3DP) 304
3D-Modelle 495
3-Finger-Regel 56
dynamische Auslegung von Vorschubantrieben 270
Dynamische Kollisionsüberwachung 116

E

EB-Schweißen 249
Echtzeit-Ethernet und SERCOS III 145
Eckenverzögerung 117
Effizienzsteigerung 286
Einfahren neuer Programme 516
Einfluss der CNC 163
Einflussparameter Zerspanprozess 266
Einstechschleifprozess 210
einstellbare Werkzeuge 387
Einzelschneidenkontrolle 426
Elektronenstrahl-Maschinen 248
elektronisch auswertbare Messsysteme 279
elektronisches Getriebe 214
elektronische Werkzeug-Identifikation 418
endlose Rundachsen 214
Energiebilanz 267

Energieeffizienz 108, 253, 284
Energiesparen bei Werkzeugmaschinen 286
Energieverbrauch 285
Energieverbrauch der Werkzeugmaschinen 267
ERP-Lösung 415
Erzeugungsrad 220
ETHERNET 143
Evolvente 212

F

fahrerlose Flurförderzeuge 328
Faserlaser 233
Fast-Ethernet 146
Feature-Technik 496
Feinbearbeitung von Bohrungen 387
Feinverstellköpfe 389
Fertigbearbeitung 322
Fertigungsprinzipien 320
Fertigungs-Simulation 506
Fertigungssysteme, flexible 311
Fertigungssystem (FFS) 100
FFS, Auslegung 338
FFS-Einsatzkriterien 319
FFS-Leitrechner 334
FFS, wirtschaftliche Vorteile 336
Flachschleifmaschine 203
Flexibilität 339
flexible Bearbeitungszelle 241
flexible Fertigungsinseln 314
flexible Fertigungssysteme 311
flexible Fertigungssysteme, Technische Kennzeichen 317
flexible Fertigungszellen 100, 314
Formfräsen 212
Formschleifen 212
Formverfahren 212
FRAME 117
Fräs-Dreh-Bearbeitungszentrum 189
Fräsmaschinen 181
Freischneiden 108
Frequenzumrichter 173
Führungen 166, 204
Funkenerosionsmaschinen 245
Funktionen der NC 106
Fused Deposition Modeling (FDM) 305
Fuzzy-Logic 118

G

Gantry-Achsen 57
Gantry-Fräsmaschine 189
Gateway 553
generative Fertigungsverfahren 292
Geometriedaten 195
geometrische Zuverlässigkeit eines Werkzeugs 374
Gesamtkosten einer Maschine 284
Gewichtsausgleich 270
Gewichtskräfte in Vertikalachsen 274
Gewindebohren ohne Ausgleichsfutter 119
Gewindefräsen 119
Gewindeschneiden 201
G-Funktionen nach DIN 66025, Bl. 2 453
Gleichspannungs-Zwischenkreis 268
Gleichstrommotoren 79
Grafik 478
Gray-Code 72
Greifer oder Effektor 354

H

Hakenmaschine 175
Handeingabe 108
Handeingabe-Steuerungen 473
Handhabung 349
Handshake 557
Hardware 30
Hardware-Schnittstellen 555
Hartfeinbearbeitung 219
Hartfeinbearbeitungsmaschine 212
Hart-Zerspanung 190
Hauptantriebe 168
Hauptspindel 266
Hauptspindelantriebe 264, 269
High-Performance-Cutting 191
Hobelkamm 215
Hochgeschwindigkeits-Bearbeitungszentrum 190, 194
Hochgeschwindigkeitsspindeln 277
Hochlaufzeit 277
Hochleistungsbearbeitung 191
horizontales Bearbeitungszentrum 183
HPC 191
HSC-Bearbeitung 390, 427
HSK-Aufnahmen 382

Hüllschnittverfahren 212
hybride Maschinenkonzepte 252

I

Industrieroboter 98, 349, 350, 367
Industrieroboter, Aufbau 351
Industrieroboter, Einsatzkriterien 365
Informationen 543
inkrementale Messgeräte 64
Innengewindefräsen 391
integrierte Wegmessung in Linearführungen 73
integrierte Werkzeugkataloge 409
Interpolator 33

K

Kassettenmagazin 94
Kegelräder 219
Kegelradfräsmaschinen 220
Kegelradherstellung 212
Kettenmagazin 93
Kollisionserkennung 514
Komplettbearbeitung 200
Komplett-Werkzeug 377
Komplexität 339
Koordinatentransformation 198, 461
Körperschallaufnehmer 207
Korrekturwerte 110
Korrekturwerttabelle 186
Kosten und Wirtschaftlichkeit von DNC 538
Kreissägen 228
Kugelgewindetrieb 76
Kühlung/Schmierung 374
Kurzklemmhalter 388
Kurzschlussläufer 269
Kv-Faktor 59, 77, 87

L

Laderoboter 201
Lageregelkreis 58, 60, 269
Lageregelung 59
Lagersysteme 415
Lagesollwerte 268
Längenmessgerät 66
Längenmessgeräte, absolute 71
Längenmessgeräte, inkrementale 69
LAN – Local Area Networks 542
Laser-Bearbeitungsanlagen 232
Laser-Sintern (LS) 302
Leistungsstellglied 269
Leiterplatten-Bohrmaschinen 224
Lesefehler erkennen 120
Lesestation 421
Lichtleitfaser 235
Linearantriebe 85
Lineardirektantrieb in Werkzeugmaschinen 273
Linearmotoren 81
Linear- oder Geradeninterpolation 33
Look-Ahead-Funktion 194

M

magnetoresistive Messsysteme 279
Makros 110
Maschinengestelle 165
Maschinenmodell 510
Maschinen-Nullpunkt 64, 458
Maschinen-Parameterwerte 32
maschinenseitige Aufnahmen 380
Maschinen- und Betriebsdatenerfassung 333
Maschinenverkleidung 174
Maßstab 61
Maßstabfaktor 120
Maßstabfehler-Kompensation 120
Maßverkörperung 62
MDE/BDE 333
Mechatronische Werkzeugsysteme 435
Mehrfach-Spannbrücke 184
Messen 256
Messgerät 61
Messgeräte, absolute 65
Messgeräte, inkrementale 64
Messgeräte, pseudo-absolute 67
Messgeräte, zyklisch absolute 67
messgesteuertes Schleifen 211
Messmaschinen 256
Messprotokoll 258
Messschritt 62
Messspindel 62
Messsteuergeräte 209
Messsysteme für Werkzeugmaschinenantriebe 279

Messtaster 121, 256
Messtechniken 430
Messzyklen 121
modulare Werkzeugsysteme 386
Motor 75, 79

N

Nachlauffehler 60, 126
Nano- und Pico-Interpolation 122
NC-Achsen 34
NC-Analyzer 114
NC-Hilfsachsen 122
NC-Programm 30, 42, 443
NC-Programmiersysteme 486
NC-Programmierung 40, 171, 468
NC-Programmverwaltung 533
NC-Simulation 513
NC-Wegmessgeräte 67
Nd:YAG-Laser 233
Netzwerktechnik für DNC 531
Nibbel-Prinzip 239
Nullpunkte und Bezugspunkte 458
Nullpunktverschiebung 65, 460
NURBS 123, 195
Nur-Lese-System 419

O

offene Steuerungen 128
Offset 110

P

Palette 98, 100, 323
Palettencodierung 317, 332
Palettenpool 100
Palettenspeicher 100
Paletten-Umlaufsystem 328
Palettenverwaltung 333
Palettenwechsel 100, 185
Parallel-Achsen 57
parallelkinematische Maschinen 226
PDM (Produktdaten-Management) 567, 571
Pick-up-Verfahren 211
Planungsphase in der Serienfertigung 518
Platzcodierung 95
Platzcodierung, variable 97
PLM (Product Lifecycle Management) 562, 567
Polarkoordinaten 110
Portalfräsmaschinen 187
Positionier-Steuerung 225
Position setzen 110
Positionsmessung 61
Postprozessor 43, 187, 476, 503
Preisbetrachtung 131
Prismen-Aufnahme 383
Produktbaukasten 218
Produktions-Effizienz 289
Produktionsplanungssysteme (PPS) 345
Produktionsprozess 517
Profilieren von Schleifscheiben 207
Profilschleifmaschine 208
Programmänderung im laufenden Betrieb 517
Programmgenerierung, automatische 362
Programmieren von Drehmaschinen 201
Programmieren von Messmaschinen 258
Programmieren von Robotern 359
Programmieren von Rohrbiegemaschinen 244
Programmieren von Schleifprozessen 207
Programmieren von Verzahnmaschinen 220
Programmiergerät für Roboter 355
Programmier-Software 112
Programmiersysteme 184, 207, 481
Programmierung 42, 184
Programmierung, werkstattorientierte 185, 202
Programmspeicher 153, 225
Programmtest 110
Protokoll 551
prozessadaptierte Auslegung 264
Prozesskräfte 266
prozessnahes Messen 430
Prüfzyklus 284, 288
Punktsteuerung 32, 222

R

Rapid Manufacturing 294
Rapid Prototyping 293
Rapid Tooling 294
Räumen 212
Referenzmarken 64

rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen 252
Reset 110
Revolver 91
RFID 332
RFID-System 418, 422
Ritzel-Zahnstangen-Antrieb 272
Roboter 98, 349
Robotersteuerung 354
Rohrbiegemaschinen 243
rotierende Werkzeuge 376, 380
Ruckbegrenzung (Slope) 110
Rückspeisung 269
Ruhezyklus 289

S

Sachmerkmalliste 378
SafeHandling 358
SafeRobot Technologie 357
Sägemaschinen 228
Satz ausblenden 111
Satz Vorlauf 111
Scannen auf Messmaschinen 111, 259
Schälrad 215
Schaltbefehle 30
Schaltbefehle (M-Funktionen) 447
Schaltfunktionen 90
Scheibenlaser 233
Schleifbänder 205
Schleifen unrunder Formen 209
Schleifmaschinen 165, 202
Schleifscheiben 205
Schleifschnecken 219
Schleifwerkzeuge 205
Schleifzyklen 207
Schleppfehler 60, 126
Schmelzschneiden 236
Schneiderodieren 246
Schneidrad 215
Schneidstoff 379
Schnittdaten 374
Schnittgeschwindigkeit 274, 190
Schnittstellen 554
Schnittwerte 410
Schräglagenüberwachung 187
Schrägverzahnung 214, 216
Schreib-Lese-System 419
Schrittmotoren 79
schwenkbarer Drehtisch 184
Schwerzerspanung 276
Senkerodieren 247
Sensoren 362
SERCOS-Bus 143
SERCOS III 147
SERCOS interface 85
Servomotor 76, 79
Shiften 217
Sicherheitsfunktionen bei Robotern 357
sich ersetzende Maschinen 323
Simulation 501, 569
Simulation der Bearbeitung 185
Simulation des Bearbeitungsablaufs 576
Simulationssoftware 40
Simulation von FFS 343
Software 32
Software-Schnittstelle 112, 558
Sonderwerkzeuge 393
Spannmittel 511
speicherprogrammierbare Anpasssteuerung 106
spezifische Zerspankräfte 275
Spiegeln 222
Spiegeln, Drehen, Verschieben 111
Spindelbeschleunigungszeit 281
Spindeldrehzahlen beim Fräsen 276
Spindelkennlinien 277
Spindel-Lager-Systems 276
Spline-Interpolation 123, 125
Sprachumschaltung 126
SPS, PLC 36
SPS – Speicherprogrammierbare Steuerungen 139
Stangenbearbeitungszentrum 189
Stanz- und Nibbelmaschinen 239
stationäre Auslegung 270
stehende Werkzeuge 376, 382
Steilkegel 382
STEP (ISO/IEC 10303) 123
Stereolithographie (STL) 305
Sternrevolver 384
Steuerungen, offene 128
Steuerungsarten 32
Steuerungsnachbildung 508
Stirnräder 212
Stirnseitenbearbeitung 199
Strahlführung 235

Strahlquellen 232
Streckensteuerung 32, 222
Sublimierschneiden 236
Synchron-Linearmotoren 82
Synchronmotor 79
Syntax und Semantik 446
Systembetrachtung einer Werkzeugmaschine 280

T

Taktzykluszeiten 269
Taster, messender 259
Tastkopf 258
Teach-In/Playback-Verfahren 471
Teach-in-Verfahren 224
Teilverfahren 212
Temperaturkompensation 427
Trägheitsmoment 78
Transponder 422
Transportsystem 311, 323
Transportsystem, Auswahl 328
Transportsystem, Funktionsablauf 329
Transportsystem, Steuerung 332
Tripod 226
Trockenbearbeitung 190

U

Übertragungsgeschwindigkeit 551
Übertragung von Daten 134
Überwachung der Werkzeuge im Arbeitsraum 418
Umkehrspanne 61
Universal-Rundschleifmaschine 203
universelle Auslegung von Maschinen 277
Unterprogramme 111
USB-Sticks und USB-Festplatten 43

V

VDI-Halter 383
Verschleißkompensation 388
Verstellkopf 388
verteilte Intelligenz 480
vertikales Bearbeitungszentrum 182
Verzahnmaschinen 165, 212
Verzahnmaschinen, Programmierung 220
Verzahnverfahren 212
virtuelle Maschine 509
Voreinstellgeräte 413
Vorschub 374
Vorschubantriebe 59, 74, 204
Vorschub-Begrenzung 126
Vorschubgeschwindigkeit 103
Vorsteuerung 126

W

Wälzfräsen von Zahnrädern 215
Wälzfräser 215
Wälzfräsmaschine 212
Wälzhobeln 215
Wälzmodul 214
Wälzschleifen 212
Wälzstoßen 212, 215
Wasserstrahl-Schneidmaschinen 249
Wechselrichter 269
Wegmessung 61
Wegbedingungen (G-Funktionen) 451
Weginformationen 55, 449
Wegmessung über Gewindespindel 64
Wegmessung über Linearmassstäbe 63
Weichvorbearbeitung 215
Weltwirtschaftskrise 2009 20
Wendeplatten 380
Wendeschneidplatten-Feinverstellung 388
Wendespanner 184
Werkrad 220
Werkstattorientierte Programierung (WOP) 40
Werkstück-Nullpunkt 460
Werkstückspeicher 195
Werkstück-Transportsysteme 323
Werkstück- und Werkzeugwechsel 211
Werkstückverwaltung 333
Werkstückwechsel, automatischer 98
Werkstück-Wechseleinrichtung 185
Werkzeugblatt 405
Werkzeugbruchüberwachung 426
Werkzeugcodierung 97
Werkzeuge 373, 501, 512
Werkzeuge, angetriebene 91, 108, 195
Werkzeugerkennung 422
Werkzeug-Identifikation 95, 404
Werkzeug-Klassifikation 379, 407

Werkzeug-Komponenten 407
Werkzeugkorrektur, 3-D 127
Werkzeugkorrekturen 461
Werkzeugkorrekturwerte 201
Werkzeuglängen-Korrektur 223
Werkzeuglängen-Messung 113
Werkzeuglisten 411
Werkzeug-Logistik 414
Werkzeugmagazin 195
Werkzeugmessung im Arbeitsraum 427
Werkzeug-Rechner 421
Werkzeugrevolver 91
Werkzeugschleifmaschine 212
Werkzeugspeicher 185, 314
Werkzeug-Standzeitüberwachung 201
Werkzeugüberwachung 425
Werkzeugverwaltung (Tool Management) 127, 333, 400
Werkzeug-Voreinstellung 412
Werkzeugwechsel 91, 271
Werkzeugwechselzyklus 288
Wiederanfahren an die Kontur 112
Winkelkopf 385
Winkelmessgeräte 67
WLAN – Wireless Local Area Network 531
WOP – Werkstattorientierte Programmierung 185, 202, 474
WZ-Ident-System 421

Z

Zirkular- oder Kreisinterpolation 34
Zustellung 374
Zyklen 226, 454

3 Empfohlene NC-Literatur

Fachzeitschriften:

Zur ständigen Information über das Neueste aus dem Gebiet Fertigungstechnik, Metallverarbeitung, NC-Technik und CAD/CAM/CIM empfiehlt sich ein Abonnement folgender Fachzeitschriften:

Form und Werkzeug
5-mal jährlich
Carl Hanser Verlag, Kolbergstr. 22,
81679 München, Tel. 0 89-99 83 0-6 11
redaktion@hanser.de

WB Werkstatt und Betrieb
10-mal jährlich
Carl Hanser Verlag, Kolbergstr. 22,
81679 München, Tel. 0 89-99 83 0-2 54
redaktion@hanser.de

Blech In Form
6-mal jährlich
Carl Hanser Verlag, Kolbergstr. 22,
81679 München, Tel. 0 89-99 83 0-2 54
redaktion@hanser.de

ZwF-Zeitschrift für den wirtschaftlichen Fabrikbetrieb
10-mal jährlich
Carl Hanser Verlag, Kolbergstr. 22,
81679 München, Tel. 0 30-39 00 62 26
redaktion@hanser.de

NC-Fertigung
7-mal jährlich
NC-Verlag, Büro Augsburg
86150 Augsburg, Tel. 08 21/31 98 80-10
e-mail: angeli@schluetersche.de

CAD CAM
7-mal jährlich
Carl Hanser Verlag, Kolbergstr. 22,
81679 München, Tel. 0 89-99 83 0-6 57
redaktion@hanser.de

Special Tooling
6-mal jährlich
Schluetersche Verlagsgesellschaft
Ulrichsplatz 11, 86150 Augsburg
Tel. 08 21-31 98 80-13

Werkzeug und Formenbau
5-mal jährlich
verlag moderne industrie
Justus-von-Liebig-Str. 1,
86899 Landsberg
Tel. 0 81 91-1 25-0

Fertigung
9-mal jährlich
verlag moderne industrie
Justus-von-Liebig-Str. 1,
86899 Landsberg
Tel. 0 81 91-1 25-0

VDI-Z Integrierte Produktion
14-mal jährlich (einschließlich SPECIALS)
Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG
Heinrichstr. 24, 40239 Düsseldorf
Tel. 02 11-61 03-3 77

Fachbücher:

Für das intensivere Studium der NC-Technik und deren Anwendung verweisen wir auf die am Markt erhältlichen Fachbücher, wie z. B.:

Benke/Conrad:
CNC-Technik und Qualitätsprüfung
Grundlagen und Anwendungen
Carl Hanser Verlag, München
ISBN 3-446-21243-4

Conrad:
Grundlagen der Konstruktionslehre
Carl Hanser Verlag, München
ISBN 3-446-40471-6

Conrad u. a.:
Taschenbuch der Werkzeugmaschinen
Fachbuchverlag Leipzig
ISBN 3-446-40641-7

Conrad:
Taschenbuch der Konstruktionstechnik
Fachbuchverlag Leipzig
ISBN 3-446-22743-1

Engelke:
Konstruieren mit Autodesk Inventor 11
Carl Hanser Verlag, München
ISBN 3-446-40688-3

Engelke:
Konstruieren mit Solid Edge
Der schnelle Einstieg in 3D-CAD
Carl Hanser Verlag, München
ISBN 3-446-22321-5

Gebhardt:
Rapid Prototyping, Werkzeuge für die schnelle Produktentwicklung
Carl Hanser Verlag, München
ISBN 3-446-21242-6

Hoffmann/Hack/Eickenberg:
CAD/CAM mit CATIA V5
NC-Programmierung, Postprocessing, Simulation
Carl Hanser Verlag, München
ISBN 3-446-22959-0

König:
Fertigungsverfahren, Band 1 und 2
Springer-Verlag
Band 1: Schleifen, Honen, Läppen
ISBN 3-540-23458-6
Band 2: Drehen, Fräsen, Bohren
ISBN 3-540-23496-9

Koether/Rau:
Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure, 2. A.
Carl Hanser Verlag, München
ISBN 3-446-22819-5

Krieg:
Konstruieren mit Unigraphics NX 4
Carl Hanser Verlag, München
ISBN 3-446-40618-2

Kühn:
Digitale Fabrik
Fabriksimulation für Produktionsplaner
Carl Hanser Verlag, München
ISBN 3-446-40619-0

Perovic:
Handbuch Werkzeugmaschinen
Berechnung, Auslegung, Konstruktion
Carl Hanser Verlag, München
ISBN 3-446-40602-6

Rosemann:
CAD/CAM mit Pro/Engineer
Einstieg in die NC-Programmierung
Carl Hanser Verlag, München
ISBN 3-446-22902-7

Sendler/Wawer:
CAD und PDM: Prozessoptimierung durch Integration
Carl Hanser Verlag, München
ISBN 3-446-22950-7

Tabellenbuch Metall,
Europa-Fachbuchreihe für Metallberufe,
ISBN 3808517239, EAN 9783808517239
(fragen Sie nach der aktuellen Ausgabe!)

Tschätsch:
Werkzeugmaschinen der spanlosen und spanenden Formgebung
Carl Hanser Verlag, München
ISBN 3-446-22141-7

Vogel:
Konstruieren mit SolidWorks
Carl Hanser Verlag, München
ISBN 3-446-40623-9

Vogel/Ebel:
Pro/ENGINEER und Pro/MECHANICA Konstruieren und Berechnen mit Wildfire 3
Carl Hanser Verlag, München
ISBN 3-446-40682-4

Weck/Brecher
Werkzeugmaschinen, Band 1 – 4
Springer Verlag
Band 1: Maschinenarten, Bauformen und Anwendungsbereiche
ISBN 3-540-22504-8
Band 2: Konstruktion und Berechnung
ISBN 3-540-43351-1
Band 3: Mechatronische Systeme: Vorschubantriebe, Prozessdiagnose
ISBN 3-540-67614-7
Band 4: Automatisierung von Maschinen und Anlagen
ISBN 3-540-67613-9

Zäh:
Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien
Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren
Carl Hanser Verlag, München
ISBN 3-446-22854-3

Inserentenverzeichnis

Blum-Novotest GmbH . . 11

Erowa AG. 27
Exapt 489

Fanuc FA 37

Hanser Verlag 28
Hanser Verlag 38
Hanser Verlag 52
Hanser Verlag 138
Hanser Verlag 434
Hanser Verlag 490

Hanser Verlag 498
Hanser Verlag . . . . . 645 – 648
Heidenhain . . . . . 2. Umschlagseite

IBH Automation 137

Mitsubishi Electric . . . . 4. Umschlagseite

Roschiwal + Partner . . . . 3. Umschlagseite

Siemens 51

Tebis 497

Zoller 433

Tabellen und Übersichtstafeln

Inhalt **Seite**

Adressen nach DIN 66025 445
Anzahl Transistoren pro Chip 134
Bewegungsachsen für Lasermaschinen 237
Blechdicke beim Laserschneiden 242
Blockzykluszeit und max. Vorschubgeschwindigkeit 115
Bohrzyklen 455
CA-Techniken im Informations-Verbund 564
Computer für die Automatisierung 41
Energieeffizienz 285
Festwertspeicher und deren Eigenschaften 154
FFZ-Ausbaukosten 338
G-Funktionen 453
G-Zyklen, Bohren 455
Komponenten eines Roboter-Systems 351
M-Funktionen, DIN 66025 448
Maschinenspezifische Anforderungen an CNCs 56
Metall-Tariflohn und NC-Preis 132
NC-Programmierverfahren, Gliederung 471
Netz-Topologien 549
Nullpunkte und Referenzpunkte 459
Parallelkinetische Maschinen, Definition und Einteilung 227
Preisentwicklung von NC/CNC 133
Programmierverfahren, 6-Stufen-Konzept 470, 471
RFID, Lesezeit im dynamischen Betrieb 425
Speicherbausteine, Eigenschaften 154
Technische Sensoren 362
Übertragungsmedien, Kapazitäten, Geschwindigkeiten 546, 552
Vergleich CNC/SPS 158
Visualisierung der Energie-Effizienz 254
Von der CNC-Maschine zum FFS 318
Vorschubgeschwindigkeit und Blockzykluszeit 115

HANSER

Was im »Dubbel« nicht drin steht, finden Sie hier!



Rolf Steinhilper, Frank Rieg
Handbuch Konstruktion
1218 Seiten. 1314 farbige Abbildungen.
153 farbige Tabellen.
ISBN 978-3-446-43000-6

Am Anfang steht die Produktidee oder der Kundenwunsch. Danach muss das Produkt bis ins Detail ausgearbeitet und entworfen werden: es muss konstruiert werden. Dies ist ein langwieriger und komplizierter Prozess, bei dem von sehr vielen Möglichkeiten am Ende eine übrig bleibt.

Der Konstrukteur hat ständig Entscheidungen zu treffen, die die Kosten und Gebrauchstauglichkeit des Produktes beeinflussen. Das vorliegende Handbuch wurde konzipiert, um den Konstrukteur bei diesem Auswahlprozess zu unterstützen. Es beschreibt die wichtigsten Aspekte, die der Konstrukteur im Produktentstehungsprozess beachten sollte und Technologien zur Produktrealisierung.

Mehr Informationen zu diesem Buch und zu unserem Programm unter **www.hanser-fachbuch.de**

HANSER

Die ganze Breite der Umformtechnik



Günter Spur, Reimund Neugebauer,
Hartmut Hoffmann
Handbuch Umformen
802 Seiten. Vierfarbig.
ISBN 978-3-446-42778-5

Das Handbuch der Fertigungstechnik ist die 2., vollständig neu bearbeitete Auflage des im Zeitraum von 1979 bis 1994 im Carl Hanser Verlag erschienenen mehrbändigen Werkes. Es ist ein in seiner Themenbreite und Tiefe bis heute unerreichtes Nachschlagewerk für die Ingenieure der Fertigungstechnik. In der Neuauflage wird diese Tradition fortgesetzt.

Der Band Umformen enthält die plastomechanischen und metallkundlichen Grundlagen des Fachs und alle wichtigen Fertigungsverfahren der Umformtechnik, wie Walzen, Biegen, Schmieden, Fließpressen und Zerteilen. Auch verfahrensübergeifende Themen wie Simulation, Fließkurven und Tribologie werden behandelt.

Mehr Informationen zu diesem Buch und zu unserem Programm unter **www.hanser-fachbuch.de**

HANSER

Messen ist das halbe Leben



Albert Weckenmann, Bernd Gawande
Koordinatenmesstechnik
Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen
2., vollständig überarbeitete Auflage
439 Seiten. 286 Abb. 25 Tab.
ISBN 978-3-446-40739-8

Die Koordinaten- und Formmesstechnik, ein grundlegendes Verfahren der Fertigungsmesstechnik, stellt eine geometrische Prüfung vor, während und nach der Bearbeitung eines Werkstücks sicher.

Das Buch geht besonders auf die Messstrategie ein. Dargestellt wird die Messaufgabeninterpretation auf der Basis von Normen, die Vorgehensweise des Prüfplaners und die Auswertung der Koordinatenwerte.

Mehr Informationen zu diesem Buch und zu unserem Programm unter **www.hanser-fachbuch.de**

HANSER

Auf die Formel gebracht



Klaus Lochmann
Aufgabensammlung Fertigungstechnik
Beispiele – Übungen – Anwendungen
3., aktualisierte Auflage.
480 Seiten.
ISBN 978-3-446-40739-8

Mit dieser konzentrierten Zusammenstellung von Formeln, Richtwerten und Diagrammen zu allen Verfahrenshauptgruppen werden dem Leser Bestimmungshilfen und Formeln zum Ur- und Umformen, Schneiden, Spanen, Abtragen, Generieren und in dieser Auflage auch zum Fügen, Beschichten und Ändern von Stoffeigenschaften sowie Bewertungshilfen für Zulieferungen an die Hand gegeben.

Mehr Informationen zu diesem Buch und zu unserem Programm unter **www.hanser-fachbuch.de**

MITSUBISHI ELECTRIC
Changes for the Better

MITSUBISHI CNC

Der beste Partner für Ihren Erfolg!



Atemberaubend leistungsstark, NANO- präzise, konsequent effizient und umweltfreundlich!

High-Tech mit Tradition

www.mitsubishielectric.de

MITSUBISHI ELECTRIC
Changes for the Better

for a greener tomorrow eco Changes