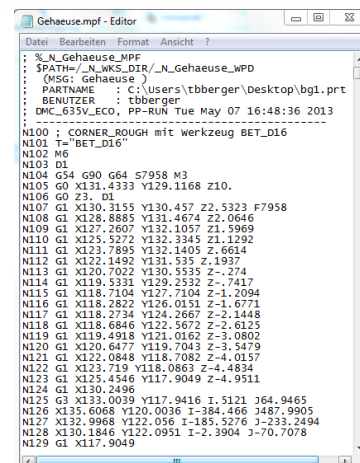
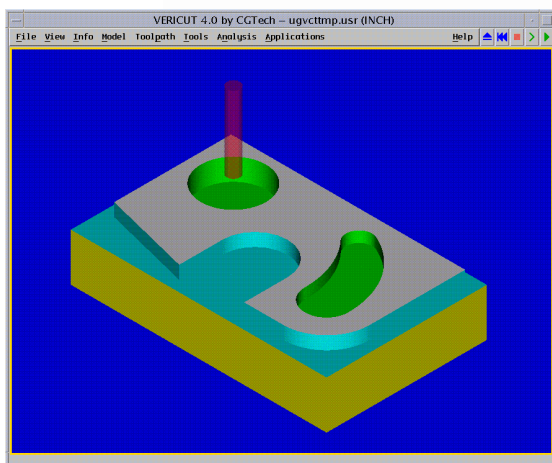


# Modul

## Produktion + Automation

### Numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen



**Prof. Jürg Habegger, Masch. Ing. FH**

# Numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen

Jürg Habegger

## Vorwort

Hervorgegangen ist die CNC (Computerized Numerical Control) aus der NC (Numerical Control), bei der die Informationen nicht als Komplettsprogramm in der Steuerung einer Maschine gehalten, sondern satzweise von einem Lochstreifen eingelesen wurde.

Das Zeitalter der CNC-Technologie setzte ungefähr Mitte der 1970er Jahre ein. Sie ermöglichte eine Rationalisierung in der Serienfertigung und Einzelfertigung durch die erheblich schnellere und dabei trotzdem sehr genaue Bewegung der Achsen und Werkzeuge. Heute sind alle neu entwickelten NC-Werkzeugmaschinen mit einer CNC-Steuerung ausgerüstet. Es gibt aber noch immer weltweit einen beachtlichen Altbestand an konventionellen Werkzeugmaschinen.

Bereits zu Beginn der 1980er Jahre gab es Ansätze, die Programmierung der CNC zu vereinfachen und die DIN/ISO-Programmierung zu verlassen. Das führte zur Entwicklung der so genannten Dialogsteuerungen, die über benutzerführende, vereinfachte CAD-ähnliche Benutzer- bzw. Programmieroberfläche verfügen. Daneben ist mit DNC (Data Numerical Control) die vernetzte Arbeitsteilung, Programmerstellung im Büro / Programm zur CNC übertragen / am Arbeitsplatz Programm einfahren und eventuell optimieren, in Gebrauch. Diese Form der Programmierung gewinnt immer mehr an Bedeutung, besonders in der Einzelteil- und Kleinserienfertigung, weil besonders hier die Stillstandszeiten zur Programmierung an der Maschine selbst stark reduziert werden können so dass die Maschinen insgesamt produktiver produzieren.

Seit einiger Zeit sind die sogenannte Soft-CNC Stand der Technik auf dem Markt der CNC-Steuerung. In der Soft-CNC laufen sämtliche Steuerungsfunktionen nicht in Hardware abgebildet als elektronisch realisierte Regelkreise, sondern als Programm in einem handelsüblichen Industrierechner (PC) ab. Solche Systeme sind grundsätzlich erheblich billiger. Weiter sind sie leichter zu warten, zu erweitern bzw. anzupassen. Die Antriebskopplung erfolgt über eine PC-Steckkarte durch ein digitales Bus-System.

Die vorliegende Vorlesung behandelt die Grundlagen der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen auf FH-Stufe. Der Autor hat bewusst auf den Versuch verzichtet, diese komplexe Thematik vollständig darzustellen. Dazu gibt es eine ausserordentlich vielschichtige Literatur.

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>4</b>
<b>1.1</b>	<b>Meilensteine der NC-Entwicklung</b>	<b>4</b>
<b>1.2</b>	<b>Kurzübersicht</b>	<b>7</b>
1.2.1	Verknüpfung von Informationsfluss und Materialfluss	8
1.2.2	Entwicklungsstufen der Fertigungssysteme	8
<b>1.3</b>	<b>Informationsarten</b>	<b>11</b>
1.3.1	Benennungen, Definitionen:	11
1.3.2	Das Speichern von Informationen:	11
<b>2</b>	<b>NUMERISCH GESTEUERTE WERKZEUGMASCHINEN</b>	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>Grundelemente einer NC-Maschine</b>	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b>Systemaufbau von Werkzeugmaschinen</b>	<b>15</b>
2.2.1	Festlegung der Bewegungsrichtungen	15
2.2.2	Der Arbeitsraum der NC-Maschine	16
2.2.3	Realisierung der Bewegungen	17
2.2.4	Elementarer Aufbau einer gesteuerten Achse	18
<b>3</b>	<b>NUMERISCHE STEUERUNGEN</b>	<b>19</b>
<b>3.1</b>	<b>Arten numerischer Steuerungen</b>	<b>19</b>
3.1.1	Punktsteuerung	19
3.1.2	Streckensteuerung	19
3.1.3	Bahnsteuerung	19
<b>3.2</b>	<b>Informationsfluss bei NC-Maschinen</b>	<b>21</b>
3.2.1	Die Informationsübermittlung	22
3.2.2	Die Informationscodierung	22
3.2.3	Code zur Informationsübertragung	23
3.2.4	Der ISO-Code	23
3.2.5	Informationsträger	24
<b>3.3</b>	<b>Der Aufbau des Informationsinhaltes</b>	<b>25</b>
3.3.1	Inhalt eines Satzes	26
3.3.2	Informationseingabe bei Off-Line-Übermittlung	30
3.3.3	Die Einlesesteuerung	31
3.3.4	NC-Programmierbeispiel	32
<b>3.4</b>	<b>Methoden der NC-Programmierung</b>	<b>33</b>
3.4.1	Manuelle Programmierung (Handeingabe)	34
3.4.2	Maschinelle Programmierung mit Programmiersprachen	34
3.4.3	Grafisch-interaktive Werkstattprogrammierung	35
3.4.4	Programmierung mit integrierten CAD/CAM-Arbeitsplätzen	36
<b>3.5</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen an NC-Maschinen</b>	<b>42</b>
3.5.1	Berechnung der Arbeitsplatz-Stundenkosten	43
3.5.2	Berechnung der Gesamtfertigungskosten eines Werkstücks	44
3.5.3	Berechnung der Amortisationszeit des investierten Kapitals	45

<b>4</b>	<b>AUFBAU VON NC-MASCHINEN</b>	<b>46</b>
<b>4.1</b>	<b>Sollwertbildung der Weginformationen</b>	<b>47</b>
4.1.1	Sollwertbildung der Weginformation bei Punktsteuerung	47
4.1.2	Sollwertbildung der Weginformation bei Streckensteuerung	47
4.1.3	Sollwertbildung der Weginformation bei Bahnsteuerung	47
<b>4.2</b>	<b>Die Lageeinstellung</b>	<b>48</b>
4.2.1	Lagesteuerung	49
4.2.2	Lageregelung	49
<b>4.3</b>	<b>Schlittenantrieb einer Achse</b>	<b>51</b>
4.3.1	Die Motoren	51
4.3.2	Der Drehzahlregler	53
4.3.3	Die kinematische Kette	54
<b>4.4</b>	<b>Wegmess-Systeme</b>	<b>57</b>
4.4.1	Wahl des Einbauortes in der kinematischen Kette	57
4.4.2	Systematik der Wegmess - Systeme	59
4.4.3	Messgeräte	64
<b>4.5</b>	<b>NC – Steuereinheit</b>	<b>73</b>
4.5.1	Hardware	74
4.5.2	Software (Interpolator)	75
<b>5</b>	<b>DIE GENAUIGKEIT DER NC-WERKZEUGMASCHINEN</b>	<b>81</b>
<b>5.1</b>	<b>Beispiel von Prüfwerkstücken</b>	<b>81</b>
<b>5.2</b>	<b>Kontrolle der Positioniergenauigkeit einer NC-Werkzeugmaschine</b>	<b>84</b>
5.2.1	Funktionsweise des Laser - Interferometers	84
5.2.2	Bestimmung des Ø Positionierfehlers und der Standardabweichung	85
5.2.3	Bestimmung der zweiseitigen Kenndaten	86
5.2.4	Graphische Darstellung der Positionierfehler	87
<b>6</b>	<b>WEITERENTWICKLUNGEN DER CNC – MASCHINEN</b>	<b>89</b>
<b>6.1</b>	<b>DNC (Direct Numerical Control)</b>	<b>89</b>
<b>6.2</b>	<b>AC (Adaptive Control)</b>	<b>91</b>
<b>6.3</b>	<b>Flexible Fertigungssysteme</b>	<b>93</b>
<b>7</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>97</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Meilensteine der NC-Entwicklung

(aus CNC-Handbuch, Hans. B. Kief / Helmut A. Roschiwal, Hanser Verlag)

- Die Idee zur Steuerung eines Gerätes durch fortlaufende Befehle, wie bei heutigen NC-Maschinen verwendet, 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 war erfunden.**
- 1863 M. Fourneaux patentierte das automatische Klavier, unter dem Namen Pianola weltbekannt, bei dem ein ca. 30cm breites Papierband durch entsprechende Lochungen die Pressluft zur Betätigung der Tastenmechanik steuerte.  
Diese Methode wurde weiterentwickelt, so dass 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, da die schnelle Berechnung und Übertragung von Daten nur in binärer Form unter Anwendung der Bool'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.**
- 1948 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.**
- 1949-52 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, so dass
  4. Servomotoren die Bewegung der Achsen steuern können.
- Mit dieser Maschine sollten die immer 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 Deutsche Hersteller zeigen ihre ersten NC-Maschinen auf der Hannover-Messe.
- 1960 NC's in Transistortechnik ersetzen Röhren- und Relais-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.
- 1970 Automatischer Palettenwechsel.
- 1972 Die ersten NCs mit einem eingebauten, serienmässigen Minicomputer eröffnen die neue Generation leistungsfähiger Computerized NCs (CNC), die sehr schnell durch Microprocessor-CNCs abgelöst wurden.
- 1976 Mikroprozessoren 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 CNCs mit grafisch unterstützter Programmierhilfe setzen neue Massstäbe bezüglich "Programmieren in der Werkstatt".
- 1986/87 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-Prozesskette durch Verwendung von NURBS als Interpolationsverfahren in CNC's.
- 1995 Erster standardmässiger Einsatz von Werkzeugmaschinen mit Parallelkinematik (Hexapod).
- 1996 Digitale Antriebsregelung und Feininterpolation mit Auflösungen im Submikronbereich ( $<0,001 \mu\text{m}$ ) und Vorschüben bis 100 m/min.
- 1998 Maschinen mit Parallelkinematiken (Hexapoden) erreichen Industriereife.
- 2000 CNC's und SPS mit Internetschnittstellen erlauben den weltweiten Datenaustausch und intelligente Fehlerdiagnose und -behebung.
- 2002 Erste hochintegrierte, universell konfigurierbare IPC-CNCs incl. Datenspeicher, SPS, digitalen Antriebsschnittstellen (z.B. SERCOS-Bus) und Feldbusschnittstellen auf einer PC-Steckkarte.
- 2003 Elektronische Kompensation mechanischer, thermischer und messtechnischer Fehlerquellen.
- 2004 Externe dynamische Prozess-Simulation der NC-Programme am PC, incl. Maschinen-, Spannvorrichtungs- und Werkstückdarstellung, zwecks Fehlererkennung und Programmoptimierung wird zunehmend wichtiger.

- 2005 CNC's mit nano- und pico-Interpolation verbessern die Werkstück-Oberflächen und Genauigkeit.
- 2007 Remote Service:  
Unterstützung des Personals über Internet bei der 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 Antriebssystemen realisiert. Zusätzliche aufwändige Softwareentwicklungen und Verdrahtungen sind nicht mehr 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 der 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 Energieeffizienz 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)
- 2013 Neben den technischen Funktionen wird den bei CNC-Maschinen zunehmend die Energieeffizienz zum wichtigen Kriterium, sowohl bei der Kaufentscheidung, wie auch beim täglichen Einsatz.
- 2014 Die Vision „Industrie 4.0“ hat mehrere Jahre die Produktionstechnik beschäftigt. Auf der Hannover Messe 2014 wurden konkrete Lösungen gezeigt, um an jedem Punkt der Wertschöpfungskette einen Informationsaustausch zu ermöglichen. Dabei werden durch multidirektionale Kommunikation der Betriebsmittel neue Systemhierarchien des industriellen Betriebsprozesses ermöglicht, welche Basis einer industriellen Revolution sein könnten.

## 1.2 Kurzübersicht

Aufgabe der Fertigungstechnik ist es, Werkstücke

- aus vorgegebenem Material
- nach vorgegebenen geometrischen Grössen herzustellen.

Dazu benötigen wir: **Fertigungssysteme**

Hierzu gehören alle Fertigungsmittel, die die Wandlung eines Werkstücks durch Einwirken von Werkzeugen auf das Stück aus dem Rohzustand in den Fertigzustand vollbringen.

Man spricht von den **drei Phasen der Fertigung**:

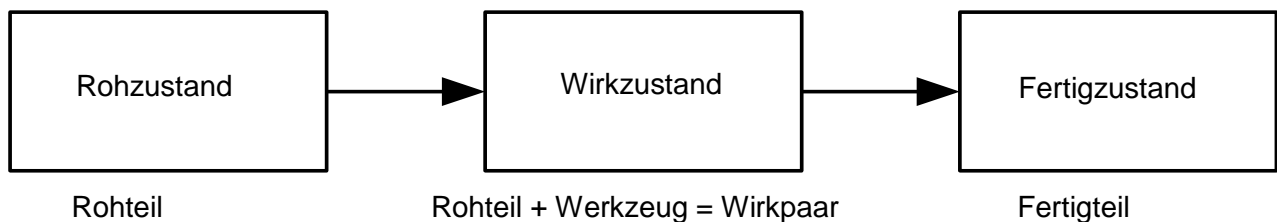


Abb. 1-1 Die drei Phasen der Fertigung

Das Wirkpaar muss bestimmte Relativbewegungen ausführen.

Um diese Bewegungen korrekt auszuführen, sind zwei Fragen (oder Informationen) zu beantworten:

- Welche Form (L, D, etc.) → **geometrische Information**
- Wie machen (v, n, s, etc.) → **technologische Information**

Es sind also Abhängigkeiten zu definieren:

- Bewegungs-Richtung / -Grösse:  
→ von der Sollform des Werkstückes abhängig
- Bewegungsgeschwindigkeit:  
→ von den technologischen Gesichtspunkten abhängig.

Der Fertigungsablauf wird in einem **Fertigungsprogramm** zusammengefasst.

Das Programm muss

- geometrische Informationen und
  - technologische Informationen
- beinhalten.



### 1.2.1 Verknüpfung von Informationsfluss und Materialfluss

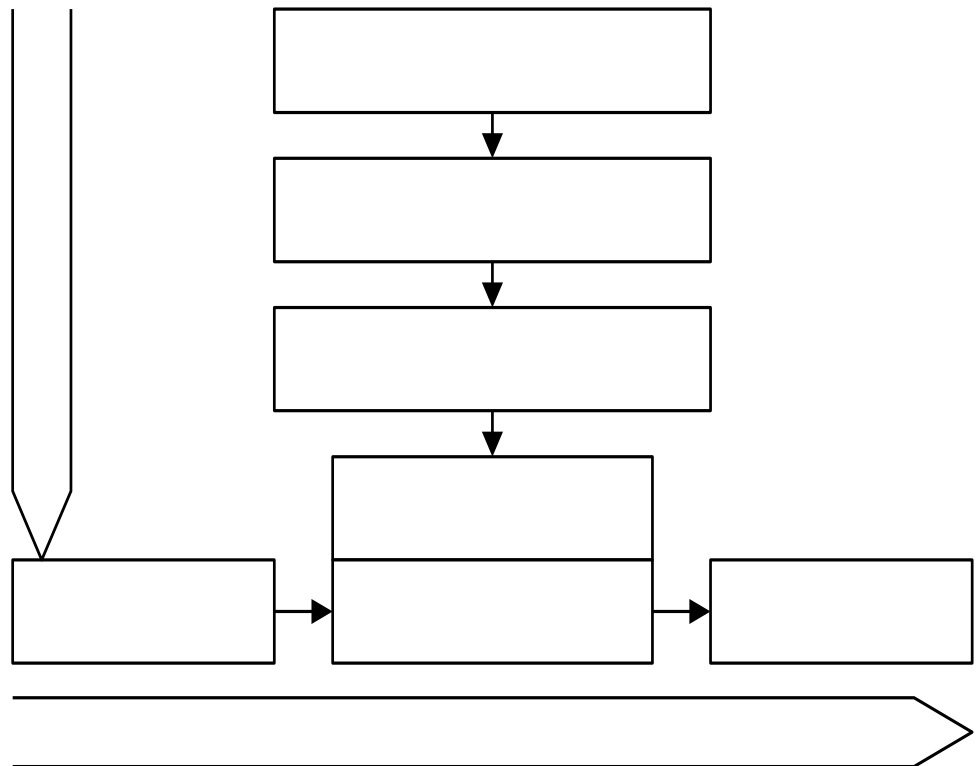


Abb. 1-2 Informations- und Materialfluss

### 1.2.2 Entwicklungsstufen der Fertigungssysteme

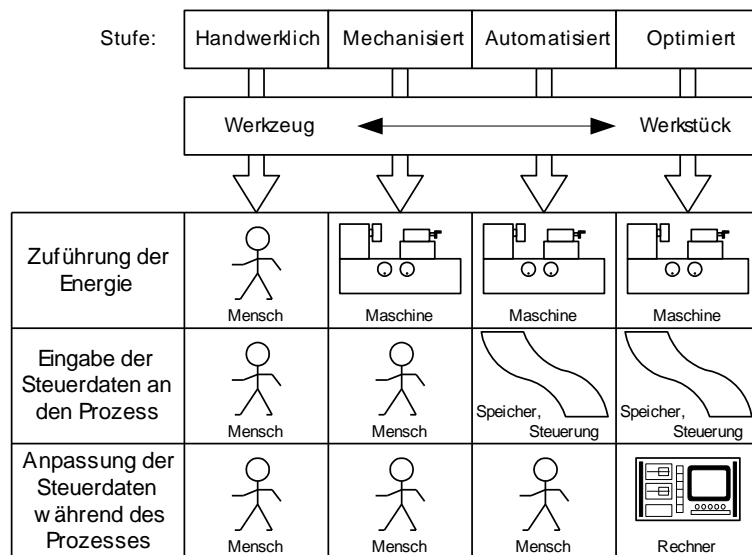


Abb. 1-3 Entwicklungsstufen des Fertigungssystems Werkzeugmaschine

**1.2.2.1 Handwerkliche Stufe:**

Besteht aus:

**1.2.2.2 Mechanisierte Stufe:**

Ziel: Den Menschen von der schweren körperlichen Arbeit zu entlasten.

Wesentlichster Teil:

**Die Werkzeugmaschine**

Der Mensch muss die Informationen der Maschine übermitteln.

Besteht aus:

Das Blockschema:

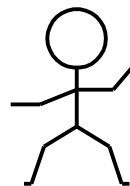
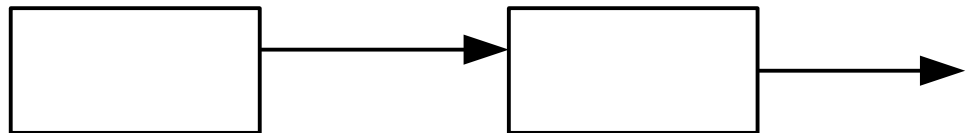


Abb. 1-4 Mechanisierte Stufe

**1.2.2.3 Automatisierte Stufe:**

Ziel: Den Menschen aus der Maschinengebundenheit herausnehmen.

Dazu braucht es:

**Informationsspeicher.**

Besteht aus:

Das Blockschema:

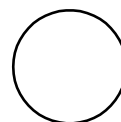
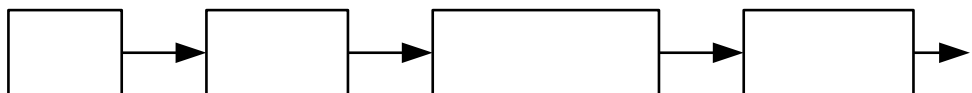


Abb. 1-5 Automatisierte Stufe

### 1.2.2.4 Optimierendes Fertigungssystem

Hier können Steuerungsparameter (n, v, s) abgeändert werden, dass der Fertigungsprozess ständig in einem optimalen Bereich geführt wird. Aufgebaut ist ein optimierendes Fertigungssystem wie ein automatisiertes, jedoch mit einem Prozessrechner ergänzt.

WAS KANN MAN ALLES AUTOMATISIEREN?

Im Prinzip alles! (siehe Abb. 1-6)

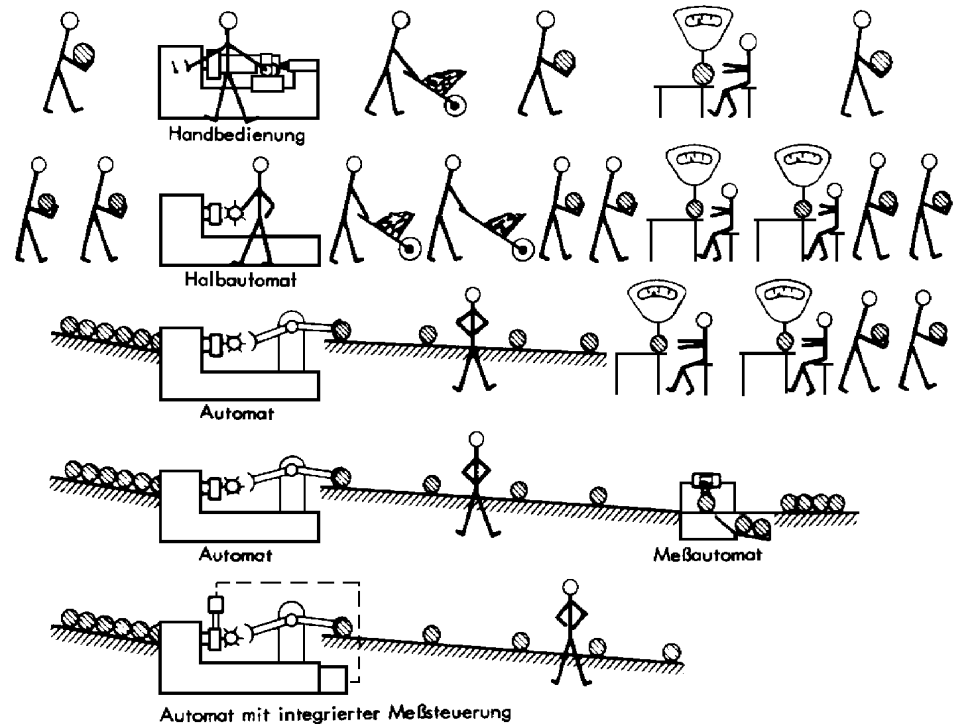


Abb. 1-6 Entwicklungsstufen der Automatisierung

Automatisierungsgrad:

$$AG \ \% = \frac{\text{Anzahl automatisierter Funktionen}}{\text{Anzahl aller Funktionen}}$$

## 1.3 Informationsarten

### 1.3.1 Benennungen, Definitionen:

*Weginformationen* (geometrische Informationen)

Die Weginformationen bestimmen die Bewegungslängen und den Bewegungscharakter der verschiedenen Maschinenteile (Tische, Schlitten usw.) im

#### **Maschinen - Werkstück - Werkzeugsystem**

und sind somit direkt für die Formgebung des Werkstückes, sowie dessen Form- und Massgenauigkeit verantwortlich.

*Schaltinformationen* (technologische Informationen)

Die Schaltinformationen lösen durch das Schalten von Drehzahlen, Drehrichtungen, Fahrgeschwindigkeiten, Weiterschalten von Werkzeughaltern usw. bestimmte technologische Grössen (Schnittgeschwindigkeit, Vorschubgeschwindigkeit, Bewegungssinn usw.) aus. Dadurch bestimmen sie die Daten des Bearbeitungsprozesses, wie z.B. Zerspanung, Abtragen (Erodieren) usw.

*Zusatzinformationen* (Hilfsfunktionen)

Ausser den Weg- und Schaltinformationen gibt es noch Hilfsfunktionen, die nicht direkt die Formgebung des Werkstücks bzw. den Bearbeitungsprozess beeinflussen, jedoch für günstige Bedingungen oder zum Fortsetzen der Bearbeitung nötig sind, wie z.B. das Klemmen von Maschinentischen, Einschalten von Kühlmittelpumpen, Werkstück- (oder Werkzeug-) Spanneinrichtungen, Beschickungsanlagen usw.

### 1.3.2 Das Speichern von Informationen:

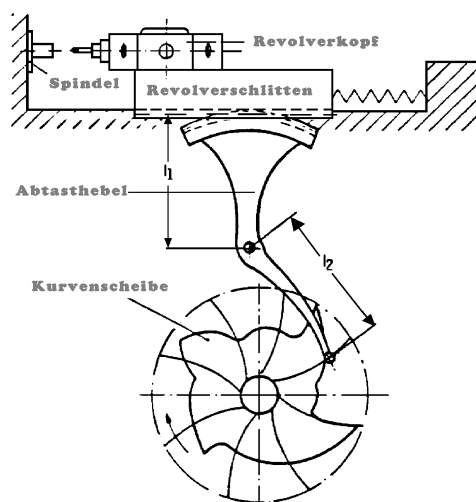
Bei automatisierten und optimierenden Systemen müssen alle Informationen gespeichert werden.

Dazu sind verschiedene Speicher gebräuchlich:

- z.B.:
- mechanisch
  - hydraulisch / pneumatisch
  - elektrisch
  - elektronisch

Das Speichern und Ausführen kann in getrennten Systemen stattfinden.

*Mechanisch speichern, mechanisch ausführen:*



Als Beispiel diene der Kurvenscheibenantrieb für einen mechanischen Drehautomaten (siehe Abb. 1-7).

Die Kurvenscheibe beinhaltet folgende Informationen:

- Arbeitsreihenfolge
- Weglängen
- Vorschubgeschwindigkeit
- Umkehrpunkt

Es findet keine Rückmeldung statt:

→ Steuerung

Abb. 1-7 Kurvenscheibenantrieb für einen Drehautomat

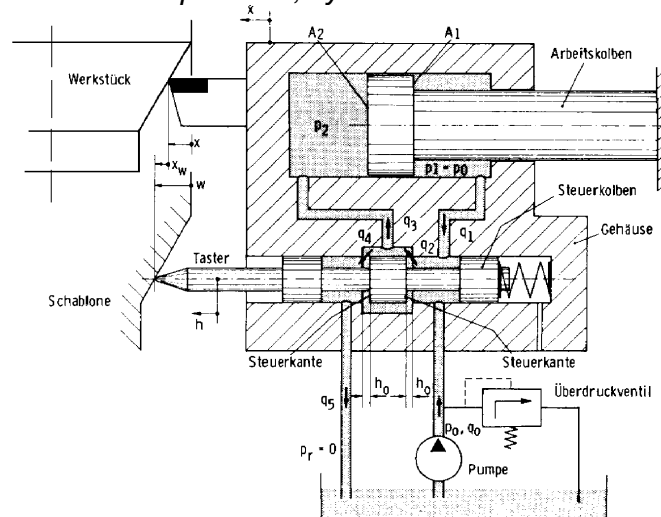
*Mechanisch speichern, hydraulisch ausführen:*

Abb. 1-8 Stetiges hydraulisches Nachformsystem

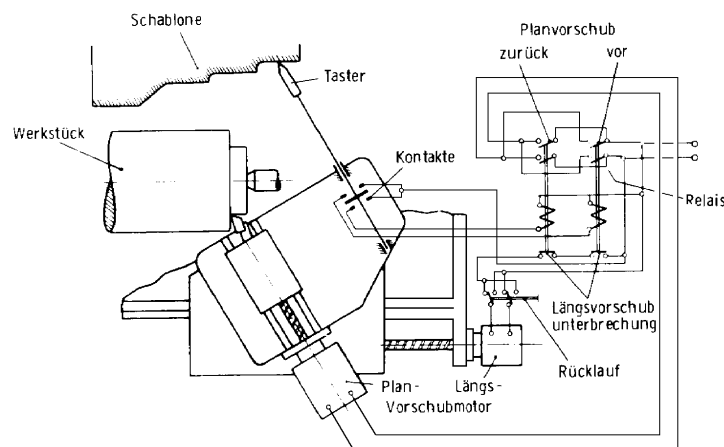
*Mechanisch speichern, elektrisch ausführen:*

Abb. 1-9 Unstetiges elektrisches Nachformsystem mit Dreistellungs-Kontaktregelung

Die Weginformationen werden in der Schablone festgehalten.

Bei den bisherigen Beispielen sind die Informationen materiell starr gespeichert. Gefordert ist aber Flexibilität, d.h. die Speicher müssen ohne bleibende Veränderung umstellbar sein.

Als Beispiel für ein flexibles System diene eine **Programmsteuerung mit Kreuzschienenverteiler**:

Definition Programmsteuerung:

**Programmsteuerungen sind selbsttätige Folgesteuern mit Programmspeichern (Nockenleisten, Kreuzschienenverteiler) die ohne bleibende Veränderung umstellbar sind. Durch die gespeicherten Informationen werden alle erforderlichen Bewegungen von Werkstück und Werkzeug in richtiger Reihenfolge, Grösse und Lage gemäss dem Arbeitsprogramm gewährleistet.**

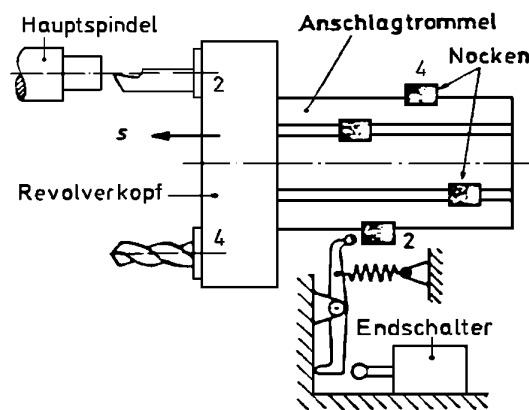


Abb. 1-10 Vorschubbegrenzung

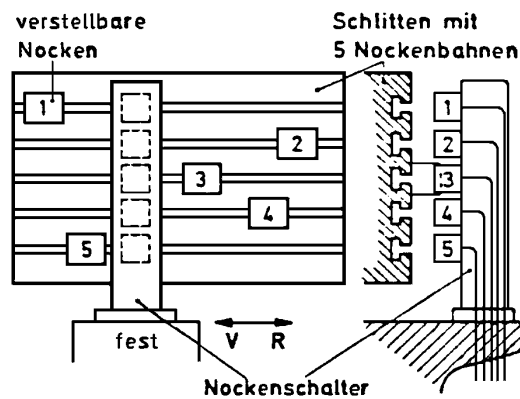


Abb. 1-11 Wegabhängige Nockensteuerung

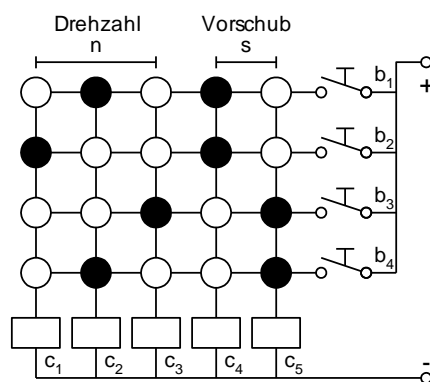


Abb. 1-12 Kreuzschienenverteiler

Die vorliegende Programmsteuerung weist zwei getrennte Systeme auf:

- Weginformationen an Anschlagtrommel (Abb. 1-10) oder Nockenleiste (Abb. 1-11)
- Schaltinformationen im Kreuzschienenverteiler (Abb. 1-12)

Bei allen bisher aufgeführten Speichern erschien die

.....

der Informationen nie

## 2 Numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen

NC: Numerical Control

Bisher war das Programm immer materialgebunden vorhanden. Bei der NC-Maschine werden alle Informationen in Form von alfanumerischen Zeichen (Zahlen, Buchstaben) in den Programmspeicher eingegeben.

Die Eingabe in den Speicher kann

- durch Handeingabe (Tastatur)
- über Informationsträger (Lochstreifen, Floppy-Disk etc.)
- direkt von einem Rechner

erfolgen.

Die gespeicherten Informationen werden von der Maschinensteuerung "verstanden" und in der vorgeschriebenen Reihenfolge und Grösse von der Maschine als Bewegungen, Schaltungen usw. ausgeführt.

**Es findet eine Datenverarbeitung statt.**

Die Maschine mit ihren gesteuerten Antrieben und die Steuerung bilden eine untrennbare Funktionseinheit, auch dann, wenn Teile von ihr räumlich getrennt aufgestellt sind.

### 2.1 Grundelemente einer NC-Maschine

(siehe Abb. 2-1 Das „NC - Maschinen – Paket“)

- Maschinenkörper
- steuer- und regelfähige Antriebe
- Steuereinrichtungen für die Ausführung der Weg- und Schaltinformationen
- Wegmess- und Rückmeldeeinrichtungen Schaltschrank und Schaltkonsole

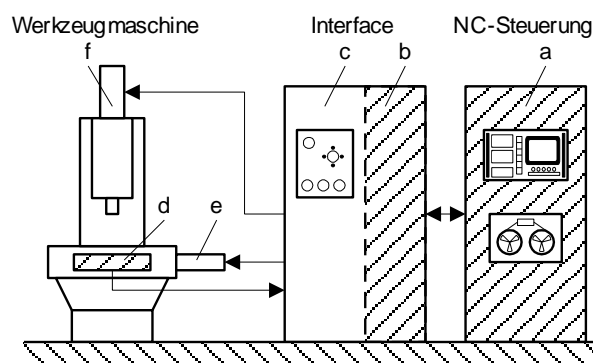


Abb. 2-1 Das „NC - Maschinen – Paket“

Schematische Darstellung eines NC-Werkzeugmaschinen-Paketes.

- a = Numerische Steuerung
- b = Steuerungsspezifischer Teil des Interface
- c = Maschinenspezifischer Teil des Interface mit Werkzeugmaschinenorientiertem Bedienteil
- d = Messsystem
- e = Vorschubmotor
- f = Hauptspindelantrieb

Die Steuerungsabhängigen Teile der Anlage sind schraffiert dargestellt.

## 2.2 Systemaufbau von Werkzeugmaschinen

### 2.2.1 Festlegung der Bewegungsrichtungen

Jede Werkzeugmaschine bildet einen geschlossenen Wirkkreis, in dem die Relativbewegungen ausgeführt werden müssen.

Werkzeug- und Werkstückkoordinatensystem **müssen** mit dem Koordinatensystem der Werkzeugmaschine **übereinstimmen**.

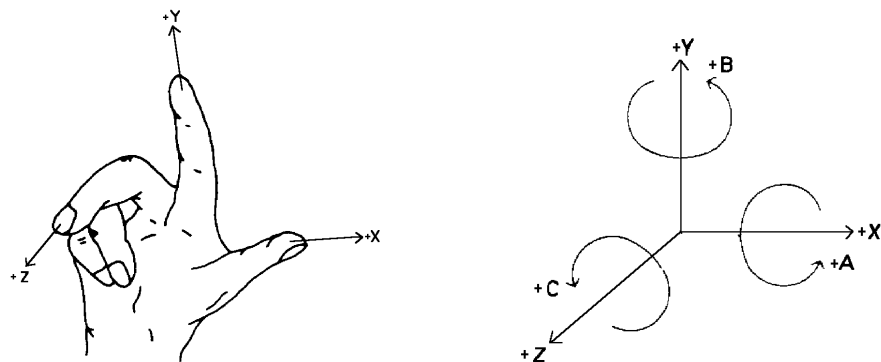


Abb. 2-2 Bezeichnung der Achsen bei NC –Maschinen

Die Bewegungszuteilung und die Bewegungsrichtungen sind genormt! (DIN 66217)

- ISO-Koordinatensystem Rechtshändiges Koordinatensystem (Abb. 2-2)
- 3 Translationen (X, Y, Z)
- 3 Rotationen (A, B, C), aus dem Ursprungspunkt betrachtet.

Die Z-Richtung ist immer in Richtung der Hauptantriebsachse. Ihre positive Richtung verläuft vom Werkstück zum Werkzeug.

X: Die längere der übrigen Bewegungen

Y: Die nächste Bewegung usw.

Mit Hilfe dieser 6 Bewegungen kann eine Bewegung eines Körpers (Werkzeug oder Werkstück) im Koordinatensystem beschrieben werden (Programmierung!).

- Das Koordinatensystem ist **immer werkstückbezogen**.
- Beim Programmieren wird das **Werkstück als stillstehend** angesehen.
- Die Bewegungen liegen beim Werkzeug.
- Macht das **Werkzeug** die Bewegung, so ist die positive Bewegungsrichtung **gleich der Werkstückkoordinatenrichtung**.
- Macht das **Werkstück** die Bewegung, so ist die positive Bewegungsrichtung der **Werkstückkoordinatenrichtung entgegengesetzt** (X', Y', Z'). Beispiele siehe Abb. 2-3.
- Gibt es **zusätzliche parallele Bewegungen** im Koordinatensystem, so werden sie mit U, V, W und P, Q, R bezeichnet.



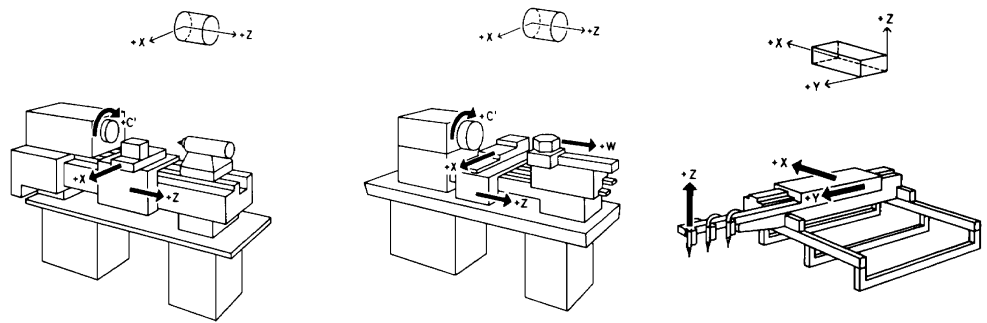
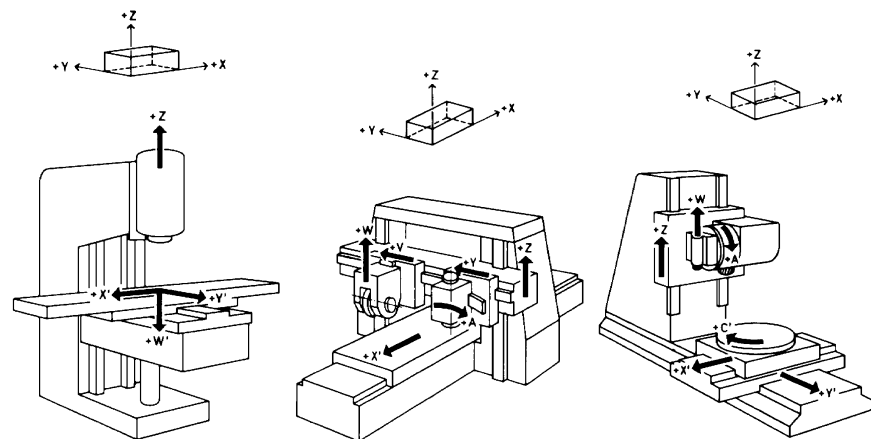


Abb. 2-3 Beispiele der Bewegungsrichtungen bei Werkzeugmaschinen (aus DIN 66217)



Senkrecht-Konsolfräsmaschine    Zweistöcker-Bettfräsmaschine    Waagrecht-Bohr-Fräsmaschine

Abb. 2-4 Beispiele der Bewegungsrichtungen bei Werkzeugmaschinen (aus DIN 66217)

### 2.2.2 Der Arbeitsraum der NC-Maschine

Um die geometrischen Verhältnisse im Arbeitsraum der Maschine und am zu bearbeitenden Werkstück eindeutig zu definieren, werden **Koordinatensysteme** (siehe oben) und **Bezugspunkte** festgelegt. Die Bezugspunkte sind die Ursprungspunkte der Maschinen-, Werkstück- bzw. Werkzeugkoordinatensysteme.

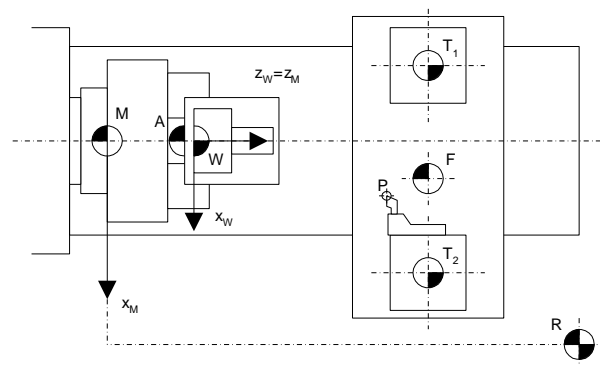


Abb. 2-5 Bezugspunkte einer Drehmaschine

- A Anschlagpunkt
- F Schlitten-Bezugspunkt
- M Maschinenkoordinaten-Nullpunkt
- N Werkzeughalter-Bezugspunkt
- P Werkzeug-Bezugspunkt
- R Referenzpunkt
- $T_{1,2}$  Werkzeugträger-Bezugspunkt
- W Werkstückkoordinaten-Nullpunkt

**Maschinennullpunkt M**

Der Maschinennullpunkt liegt im Ursprung des Maschinenkoordinatensystems **unveränderlich** fest. Er ist durch die Maschinenkonstruktion vorgegeben und kann nicht verschoben werden.

**Werkstücknullpunkt W**

Der Werkstücknullpunkt ist der Ursprung des Werkstückkoordinatensystems, auf das sich die Programmierung bezieht. W kann vom Programmierer **frei** gewählt werden.

**Anschlagpunkt A**

A ist ein **frei** wählbarer Punkt auf der Anschlagfläche des Ausgangsteiles. Falls die Fläche schon bearbeitet ist, kann A und W zusammenfallen.

**Referenzpunkt R**

R ist ein im Arbeitsraum der NC-Maschine festgelegter Punkt, dessen Abstand zum Maschinennullpunkt M der Steuerung bekannt sein muss. Der Referenzpunkt ist nur bei Steuerungen mit inkrementalen oder zyklisch absoluten Wegmesssystemen erforderlich.

**Werkzeugsbezugspunkt P**

P bestimmt die Lage des Werkzeuges im Arbeitsraum der Maschine.

Je nach Art der NC-Maschine können noch **weitere Bezugspunkte** zweckmässig sein:

**F:** Schlittenbezugspunkt

**T:** Werkzeugträgerbezugspunkt

**N:** Werkzeughalterbezugspunkt

**2.2.3 Realisierung der Bewegungen**

Die gewünschte Bewegung wird mit den Elementen:

- Antriebe
- Führungen (nur Translationen)
- Lagerungen (nur Rotationen)

verwirklicht.

Zu **jeder Bewegung** gehört bei NC-Maschinen ein **eigener Antrieb**. Ein Antrieb kann immer nur eine Bewegung kontrollieren, die Führung bzw. Lagerung muss die übrigen 5 Bewegungen verhindern.

Bei den Einrichtungen für die Verwirklichung **einer** Bewegung mit steuer- bzw. regelfähigen Antrieben, spricht man von einer **gesteuerten Achse**.

**Zu jeder** vorhandenen **Bewegungsrichtung** gehört bei NC-Maschinen **eine gesteuerte Achse**.

Die "Achsenzahl" wird nach der Anzahl der gesteuerten Bewegungen der Maschine festgelegt. Sie bezieht sich auf die **Vorschubbewegungen** (Beispiele siehe Abb. 2-3 und Abb. 2-4).

Drehmaschine: 2-achsig (nur Z und X) → 2D-Steuerung

Fräsmaschinen: 3-oder 4-achsig → 3D-Steuerung \*

Horizontal-Bohrwerk: 5-achsig → 5D-Steuerung

D steht für Richtung (Direction) und nicht für Dimension

\* Bei Fräsmaschinen trifft man oft 2 ½ D - Steuerungen an. Die Bezeichnung ½ D bedeutet: keine vollwertige Achse. Mit dieser Achse können nur Zustellbewegungen ausgeführt werden.

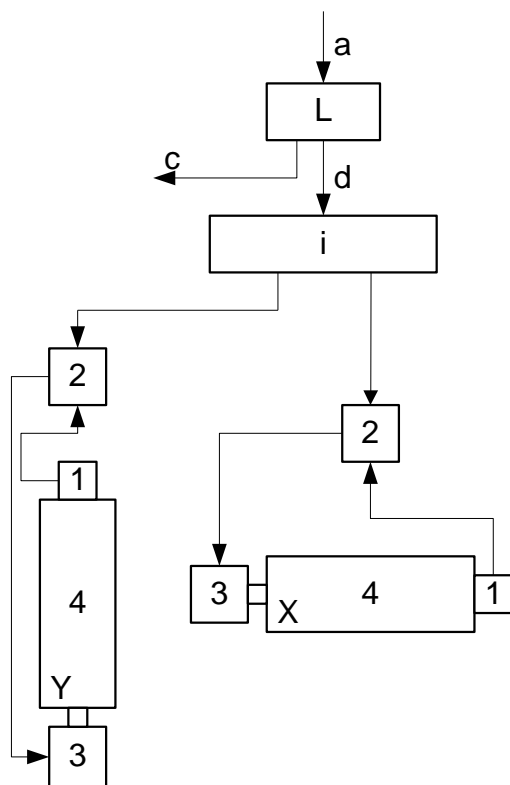
### 2.2.4 Elementarer Aufbau einer gesteuerten Achse

- 1 Wegmesssystem (Istwerterfassung)
- 2 Vergleicher (Soll - Ist - Wert)
- 3 Antrieb
- 4 Maschinentisch (Schlitten) mit Führungen und Übertragungselementen

Abb. 2-6 Grundschemata für eine gesteuerte Achse (4 Bausteine)

Da ein Antrieb immer nur eine Bewegung kontrolliert, muss für jede gesteuerte Bewegung ein eigener Regelkreis vorhanden sein (Bild 2.7).

Man beachte, dass bei "krummen Konturen" ein Interpolator notwendig ist.



#### Bahnsteuerung für zwei Achsen (x und y)

- Teile 1: Wegmesssysteme
- Teile 2: Vergleicher
- Teile 3: Antriebssysteme
- Teile 4: Maschinenschlitten usw.

- L: Lesegerät für Informationsträger
- a: In Informationsträger gespeicherte Arbeitsinformationen
- c: Schaltinformationen
- d: Weginformationen
- i: Interpolator (nur bei Bahnsteuerung)

Abb. 2-7

Grundschemata für 2 gesteuerte Achsen (X-Y- Bahnsteuerung)

### 3 Numerische Steuerungen

#### 3.1 Arten numerischer Steuerungen

##### 3.1.1 Punktsteuerung

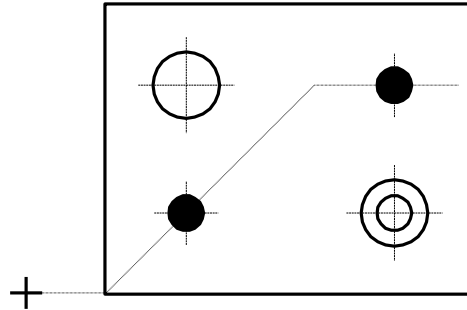


Abb. 3-1 Punkt- oder Positioniersteuerung

**Punktsteuerungen** werden für einfache Positionierungsvorgänge eingesetzt, wie z.B. Bohren oder Punktschweißen. Während der Verfahrbewegung ist das Werkzeug nicht im Eingriff, da der Verfahrweg nicht kontrolliert wird.

##### 3.1.2 Streckensteuerung

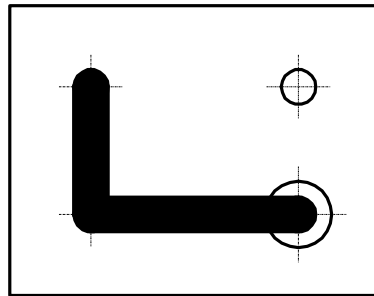


Abb. 3-2 Streckensteuerung

Bei **Streckensteuerungen** wird der Endpunkt einer Bearbeitungsstrecke auf einem geraden Weg angefahren. Es können nur achsparallele Bewegungen ausgeführt werden. Das Werkzeug kann im Eingriff stehen. Die Verfahrgeschwindigkeit kann den technologischen Gegebenheiten angepasst werden.

Bei der **erweiterten Streckensteuerung** können Geraden mit beliebiger Neigung gefahren werden. Diese Steuerung ist aus Kostengründen kaum mehr zu finden, da die gleichen Funktionen mit Bahnsteuerungen günstiger zu realisieren sind.

Anwendung finden die Streckensteuerungen für einfache Dreh- und Fräsmaschinen.

##### 3.1.3 Bahnsteuerung

Die **Bahnsteuerung** erlaubt Bewegungen von Tisch und Werkzeug nach beliebig vorgegebenen Kurven.

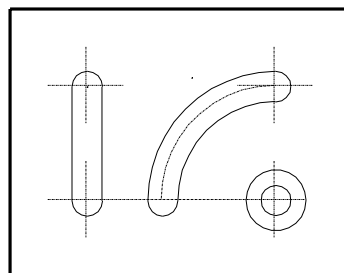


Abb. 3-3 Bahnsteuerung

Das Werkzeug kann während der Verfahrbewegung im Eingriff stehen. Zwischen den Lage- und Geschwindigkeitsgeregelten Verfahrbewegungen können unterschiedliche geometrische Funktionszusammenhänge verwirklicht werden. Dazu muss die Steuerung eine Rechenschaltung (Interpolator) haben, welcher laufend die Lagesollpositionen und die resultierenden Verfahrgeschwindigkeiten ermittelt.

Steuerungstyp	Problem	Werkzeug	Anwendung
Punktsteuerung	Interpolator nicht erforderlich	beim Verfahren nicht im Eingriff	Bohren Punktschweissen
Streckensteuerung-einfach	Interpolator nicht erforderlich	beim Verfahren im Eingriff	Drehen (zylindrisch) Fräsen (achsparell)
Streckensteuerung-erweitert	mit Getriebschaltung oder Linearinterpolator	beim Verfahren im Eingriff	Drehen (konisch) Fräsen (Geraden)
Bahnsteuerung	Bahninterpolator (nach Gleichung 2. oder höheren Grades)	beim Verfahren im Eingriff	Drehen Fräsen Brennschneiden (beliebige Konturen)

Tabelle: Zusammenfassung der Steuerungsarten

Funktionsart	Achskombinationen	Anwendungsbeispiele
Punkt-Steuerung	2 achsig	Bohrtsche Blechtafel-Stanzmaschine
Streckensteuerung	1 achsig 2 achsig 3 achsig	Bohreinheiten Drehmaschinen, Fräsmaschinen Bohr- und Fräswerke, Fräsmaschinen
Bahnsteuerung	2 D  2 ½ D (2D Bahnsteuerung + 1D Streckensteuerung)  3D  3 ½D  4D  5D  höhere Achszahlen	Drehmaschinen, Kurvenfräsmaschinen Brennschneidmaschinen, Zeichenmaschinen Drahterosionsmaschinen  Bohr- und Fräswerke Fräsmaschinen  Fräsmaschinen  Bohr- und Fräswerke mit Drehtisch  Drahterosionsmaschinen für Konisch-Schneiden  Fräsmaschinen  Industrieroboter, spezielle Werkzeugmaschinen

Tabelle: Übersicht über Funktionsarten, Achskombinationen und Anwendungen

### 3.2 Informationsfluss bei NC-Maschinen

Von der Werkstückzeichnung bis zum fertigen Werkstück.

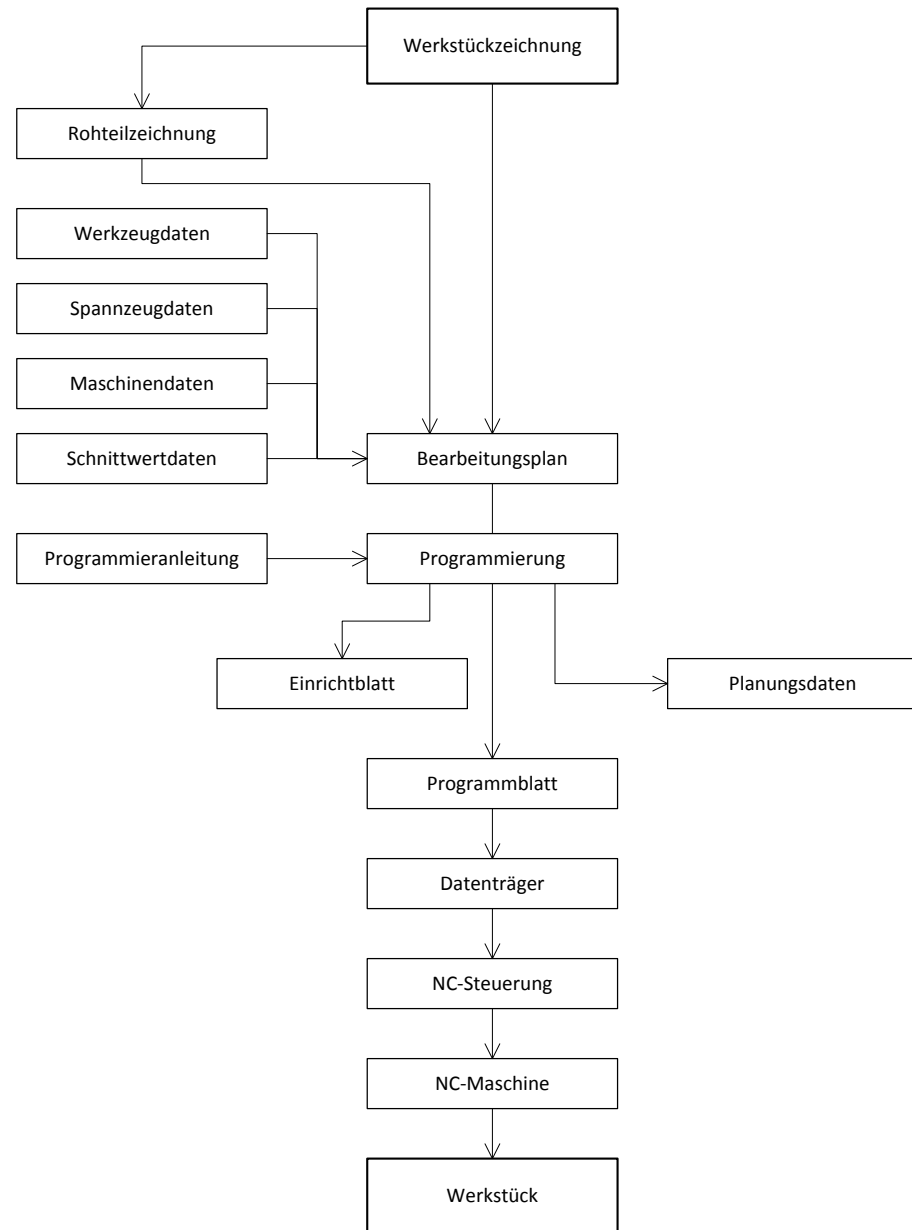


Abb. 3-4 Informationsfluss bei Fertigung auf numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen

In Abb. 3-4 sind die notwendigen Unterlagen und Hilfsmittel (Dateien) zusammengefasst. Eine straffe ORGANISATION ist unerlässlich! Die Bearbeitung der Informationen für die NC-Bearbeitung ist:

#### DAS PROGRAMMIEREN

Definition Programmieren:

**Aufgabe der Programmierung ist es, die Daten des Bearbeitungsplanes in eine für die Steuerung der Maschine verständliche Form zu bringen. Dabei müssen die in der Programmanleitung enthaltenen allgemein gültigen genormten und die steuerungsspezifischen Regeln über Programmformat, Informationsreihenfolge und Informationscodierung berücksichtigt werden.**

### 3.2.1 Die Informationsübermittlung

#### - Informationseingabe von Hand

Die im Programmblatt zusammengestellten Programmdaten werden manuell über eine Tastatur am Bedienungstableau der Steuerung eingegeben.

#### - Off-Line Informationsübermittlung

Die Programmdaten werden in einem Informationsträger (z.B. Memory Stick) abgespeichert und mit dessen Hilfe an die Maschine übermittelt.

#### - On-Line Informationsübermittlung

Die Programmdaten sind in einem Rechner abgespeichert. Dieser Rechner ist über eine Leitung (Netzwerk) direkt mit der NC-Maschine verbunden und übermittelt so die Daten an die Maschinensteuerung.

Bei Off-Line und On-Line Informationsübermittlung ist es erforderlich, die Programmdaten in eine maschinell lesbare Form zu bringen (umcodieren).

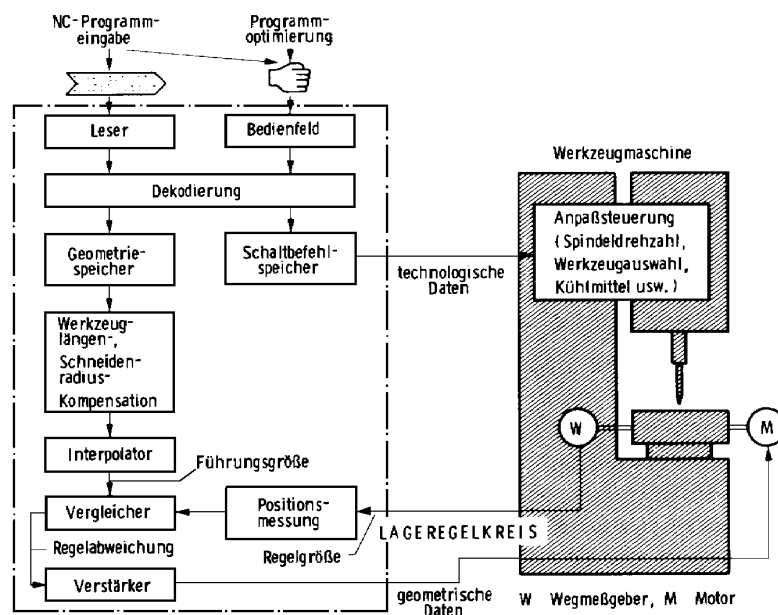


Abb. 3-5 Beispiel für den Informationsfluss in einer numerischen Steuerung

### 3.2.2 Die Informationscodierung

Angaben zu Zahlensystemen und Aufbau von Codes (z.B. BCD-Code) sind in Vorlesung "Steuerungstechnik" ausführlich zusammengefasst.

Das übliche System zur Informationsübermittlung in alphanumerischer Klarschrift umfasst eine Vielzahl von Zeichen, die sich nur durch ihre grafische Gestaltung unterscheiden. 26 Kleinbuchstaben, 26 Grossbuchstaben, 10 Ziffern, ca. 10 Satzzeichen und ca. 15 Symbole und Rechenzeichen ergeben einen Grundvorrat von rund 90 Zeichen.

Es ist leicht einzusehen, dass eine derartige Zeichenvielfalt für automatisch-maschinelle Zeichenerkennung und Zeichenverarbeitung ungeeignet ist. Die maschinelle Zeichenerkennung und Verarbeitung wird umso einfacher sein, je weniger unterschiedliche Zeichen erkannt werden müssen.

Die kleinstmögliche Zeichenzahl eines sinnvollen Informationssystems besteht aus zwei Zeichen:

0 und 1.

Diese zwei Zeichen lassen sich technisch-physikalisch durch verschiedenen Möglichkeiten realisieren:

Art der Darstellung	Zeichen 0	Zeichen 1
Mechanisch	Loch nicht vorhanden	Loch vorhanden
Elektromechanisch	Schalter offen	Schalter geschlossen
Elektronisch	Zustand leitend	Zustand nicht leitend
Magnetisch	unmagnetisiert	magnetisiert
Zeitlich	Langzeitimpuls	Kurzzeitimpuls

Tabelle: Realisierungsmöglichkeiten der Zeichen 0 und 1

### 3.2.3 Code zur Informationsübertragung

Es müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- 1) Es müssen Binärcodes sein (nur 2 Zeichen 0 und 1)
- 2) Hinreichend viele Kombinationen der Binärzeichen (Bit-Kombinationen)
- 3) So aufgebaut, dass Übertragungsfehler automatisch erkannt werden
- 4) Der Code soll mit der allgemeinen Datenverarbeitung kompatibel sein.

### 3.2.4 Der ISO-Code

EIA 244 A										ASCII, ISO, DIN 66024									
P									Paritätsspur	P									
8	7	6	5	4	T	3	2	1	Spur	8	7	6	5	4	T	3	2	1	
Lochkombination									Zeichen	Lochkombination									
									0										
					*				1					*					
					*				2					*					
					*				3					*					
					*	*			4					*					
					*	*			5					*					
					*	*	*		6					*					
					*	*	*	*	7					*					
					*	*			8					*					
					*	*			9					*					
					*	*			+					*					
					*	*			-					*					
					*	*	*		F					*					
					*	*	*	*	G					*					
					*	*	*	*	M					*	*				
					*	*	*	*	N					*	*				
					*	*			S					*					
					*	*	*	*	T					*	*				
					*	*	*	*	X					*	*				
					*	*	*	*	Y					*	*				
					*	*			Z					*	*				
					*	*			Wagenrückl.					*	*				

Bei NC-Maschinen ist der ISO-Code (siehe Abb. 3-6) Standard.

Abb. 3-6 Codes für NC - Steuerungen

Er hat 7 Bit je Byte (zur Darstellung eines Zeichens erforderliche Anzahl 0 oder 1 Bits).

→ Punkt 1 ist erfüllt!

Mit 7 Bits lassen sich 128 verschiedene Zeichen codieren

→ Punkt 2 ist erfüllt!

In der achten Spur werden die 1-er Bits auf Paarigkeit ergänzt.  
Dadurch wird eine gewisse Redundanz erreicht

→ Punkt 3 ist erfüllt!

Der ISO - Code entspricht dem ASCII-Code. Einzig die Parität kann nicht frei gewählt werden.

→ Punkt 4 ist erfüllt!



### 3.2.5 Informationsträger

Heute ist der kostengünstige und weitverbreitete Memory-Stick der Standard-Informationsträger beim Datenverkehr mit CNC-Maschinen.

Neben den in der allgemeinen Datenverwaltung gebräuchlichen Informationsträgern wurden in der NC-Technik früher Lochstreifen verwendet (siehe Bilder 3.7 und 3.8).

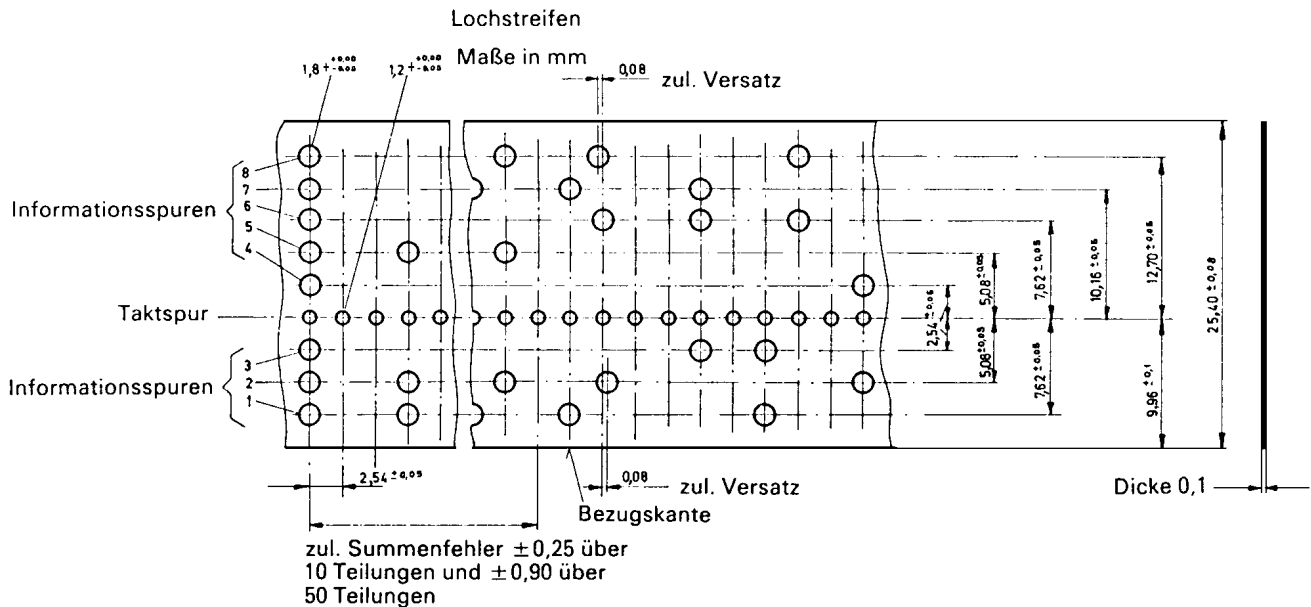


Abb. 3-7 8 - Spur - Lochstreifen nach DIN 66016

### Prinzipschema eines optischen Lochstreifenlesers (Abb. 3-8)

- 1 Lichtquelle
- 2 Optik
- 3 Lichtband
- 4 Lochstreifen
- 5 Antriebsrolle
- 6 Leser (bestückt mit fotoelektrischen Sensoren)
- 7 elektromagnetische Bremse

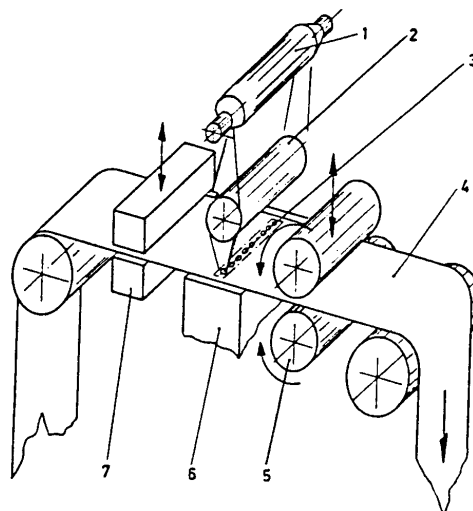


Abb. 3-8    Prinzipschema eines fotoelektrischen Lochstreifenlesers

### 3.3 Der Aufbau des Informationsinhaltes

(oder: Wie programmiert man eine NC-Maschine)

Der Informationsträger muss alle Informationen für die Bearbeitung eines Werkstücks tragen. Die Arbeitsfolge wird in elementare Bearbeitungsvorgänge, wie Werkzeugzustellung, Plandrehen, Gewindebohren etc. aufgeteilt.

**Jedem elementaren Bearbeitungsvorgang entspricht ein sogenannter "Satz" des Werkstücksprogramm.**

Der Satzaufbau ist genormt:

Ein "Satz" besteht aus "Wörtern".

Ein "Wort" besteht aus einer "Adresse" (Buchstaben) und Ziffern.

DIN 66025 sieht folgende Adressen vor:

N	Satznummern	
G	Wegbedingungen*	* G-Funktionen siehe nachfolgende Tabellen
X, Y, Z, U, V, W, P, Q, R, A, B, C	Koordinaten (Verfahrsachsen)	
I, J, K	Interpolationsparameter (Hilfsachsen)	
F	Vorschub (Feedrate)	
S	Spindeldrehzahl (Spindle)	
T	Werkzeugnummer (Tool)	
M	Zusatzfunktion**	** M-Funktionen siehe nachfolgende Tabellen

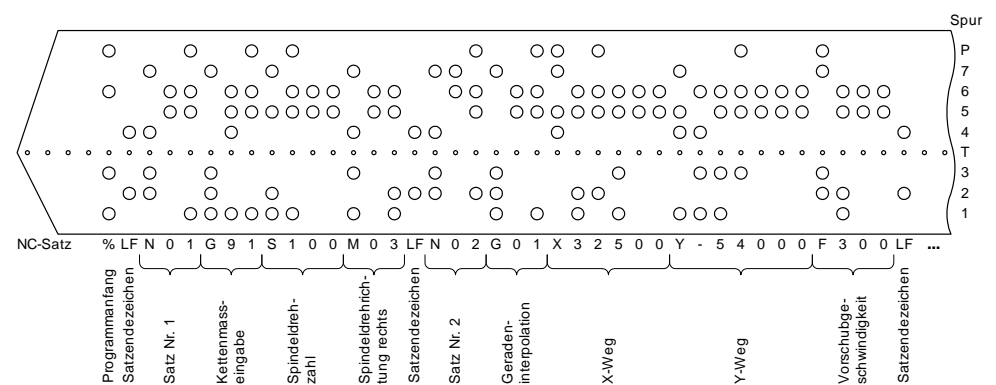


Abb. 3-9 Inhalt eines NC-Satzes

(nach DIN 66025 Teil 2: Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen)

### 3.3.1 Inhalt eines Satzes (siehe Abb. 3-9)

- Programmanfang (%)
- Satznummer (**Nxxxx**)
- Wegbedingung (**Gxx**)
- Koordinaten (**X, Y, Z, U, V, W, A, B, C** etc.)
- Vorschub (**Fxxxx**)
- Drehzahl (**Sxxxx**)
- Werkzeugnummer (**Txxx**)
- Zusatz- / Hilfsbefehle (**Mxx**)
- Satzende (**LF**) Line Feed

Im Beispiel gemäss Abb. 3-9 fehlen die Hilfskoordinaten (I, J, K), da keine entsprechende G-Funktionen aufgerufen werden (z.B. Programmierung einer Kreisbahn mit G02 oder G03, wo unter I und J die Koordinaten des Kreismittelpunktes angegeben werden).

Wegbedingung	gespeichert wirksam	Satzweise wirksam	Bedeutung
G00	a		Punktsteuerungsverhalten
G01	a		Geraden-Interpolation
G02	a		Kreis-Interpolation im Uhrzeigersinn
G03	a		Kreis-Interpolation im Gegenuhrzeigersinn
G04		x	Verweilzeit, zeitlich vorbestimmt
G05	*	*	vorläufig frei verfügbar
G06	a		Parabel-Interpolation
G07	*	*	vorläufig frei verfügbar
G08		x	Geschwindigkeitszunahme <sup>1)</sup>
G09		x	Geschwindigkeitsabnahme <sup>1)</sup>
G10 bis G16	*	*	vorläufig frei verfügbar
G17	c		Ebenenauswahl XY
G18	c		Ebenenauswahl ZX
G19	c		Ebenenauswahl YZ
G20 bis G24	*	*	vorläufig frei verfügbar
G25 bis G29	*	*	ständig frei verfügbar
G30 bis G32	*	*	vorläufig frei verfügbar
G33	a		Gewindeschneiden, gleichbleibende Steigung
G34	a		Gewindeschneiden, konstant zunehmende Steigung
G35	a		Gewindeschneiden, konstant abnehmende Steigung
G36 bis G39	*	*	ständig frei verfügbar
G40	d		Aufheben der Werkzeugkorrektur
G41	d		Werkzeugbahnkorrektur, links
G42	d		Werkzeugbahnkorrektur, rechts
G43	d		Werkzeugkorrektur, positiv <sup>1)</sup>
G44	d		Werkzeugkorrektur, negativ <sup>1)</sup>

Wegbedingung	gespeichert wirksam	Satzweise wirksam	Bedeutung
G45 bis G52	*	*	vorläufig frei verfügbar
G53	f		Aufheben der Verschiebung <sup>1)</sup>
G54	f		Verschiebung 1 <sup>1)</sup> 2)
G55	f		Verschiebung 2 <sup>1)</sup> 2)
G56	f		Verschiebung 3 <sup>1)</sup> 2)
G57	f		Verschiebung 4 <sup>1)</sup> 2)
G58	f		Verschiebung 5 <sup>1)</sup> 2)
G59	f		Verschiebung 6 <sup>1)</sup> 2)
G60 bis G62	*	*	vorläufig frei verfügbar
G63		x	Gewindebohren <sup>1)</sup>
G64 bis G69	*	*	vorläufig frei verfügbar
G70	m		Massangaben in inch <sup>1)</sup>
G71	m		Massangaben in Millimeter
G72 und G73	*	*	vorläufig frei verfügbar
G74		x	Anfahren Referenzpunkt <sup>1)</sup>
G75 bis G79	*	*	vorläufig frei verfügbar
G80	e		Aufheben Arbeitszyklus
G81	e		Arbeitszyklus 1
G82	e		Arbeitszyklus 2
G83	e		Arbeitszyklus 3
G84	e		Arbeitszyklus 4
G85	e		Arbeitszyklus 5
G86	e		Arbeitszyklus 6
G87	e		Arbeitszyklus 7
G88	e		Arbeitszyklus 8
G89	e		Arbeitszyklus 9
G90	j		absolute Massangaben
G91	j		inkrementale Massangaben
G92		x	Speicher setzen
G93	k		Zeitreziproke Vorschub-Verschlüsselung
G94	k		Angabe der Vorschubgeschwindigkeit in mm/min (in/min)
G95	k		Angabe des Vorschubes in Millimeter je Umdrehung (inch je Um-drehung)
G96	l		Konstante Schnittgeschwindigkeit
G97	l		Angabe der Spindeldrehzahl in 1/min
G98 und G99	*	*	vorläufig frei verfügbar
1) Sind diese Funktionen nicht in der Steuerung vorhanden, so sind sie vorläufig frei verfügbar und können für andere Steuerungsfunktionen verwendet werden.			
2) Diese Funktionen waren früher Verschiebungen in bestimmten Achsrichtungen zugeordnet.			

Tabelle: G-Funktionen (Auszug aus DIN 66025 Teil 2: Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen)

## Erläuterungen:

- gespeicherte Wegbedingungen:  
Diese Wegbedingungen sind in der Steuerung gespeichert und bleiben so lange wirksam, bis sie durch eine andere Wegbedingung der gleichen Gruppe oder die Ausgangsstellung überschrieben werden. Diese Wegbedingungen sind dabei in folgende Gruppen unterteilt:  

<b>a</b> : Interpolationsart	<b>c</b> : Ebenenauswahl
<b>d</b> : Werkzeugkorrektur	<b>e</b> : Arbeitszyklus
<b>f</b> : Verschiebung	<b>j</b> : Massangaben
<b>k</b> : Vorschub-Vereinbarung	<b>l</b> : Spindeldrehzahl-Vereinbarung
<b>m</b> : Masseinheiten	
- satzweise wirksame Wegbedingungen:  
Diese Wegbedingungen sind nur in dem Satz wirksam, in dem sie programmiert sind. Sie sind mit **x** gekennzeichnet.
- frei verfügbare Wegbedingungen:  
Diese Wegbedingungen sind in dieser Norm keine festen Bedeutungen zugeordnet. Sie sind mit \* gekennzeichnet. Sie können für Steuerungsfunktionen, die nicht in der Norm festgelegt sind, verwendet werden.  
Bei diesen Wegbedingungen wird unterschieden zwischen solchen, für die noch zukünftige Norm-Festlegungen möglich sind (bezeichnet mit "vorläufig frei verfügbar") und solchen, die von der Norm auch in Zukunft nicht belegt werden (bezeichnet mit "ständig frei verfügbar").

Arbeitszyklus		Einwärtsbewegung ab Vorschub- Startpunkt	Auf Tiefe		Auswärtsbewegung bis Vorschub- Startpunkt	Anwendungs- beispiel
Nr.	Wegbe- dingung		verweilen	Spindel		
1	G81	mit Arbeitsvorschub	—	—	mit Eilgang	Bohren, Zentrieren
2	G82	mit Arbeitsvorschub	ja	—	mit Eilgang	Bohren, Plansenken
3	G83	mit unterbrochenem Arbeitsvorschub	—	—	mit Eilgang	Tiefloch, Späne brechen
4	G84	Vorwärtsdrehung mit Arbeitsvorschub	—	umkehren	mit Arbeitsvorschub	Gewindebohren
5	G85	mit Arbeitsvorschub	—	—	mit Arbeitsvorschub	Ausbohren 1
6	G86	Spindel ein, mit Arbeitsvorschub	—	Halt	mit Eilgang	Ausbohren 2
7	G87	Spindel ein, mit Arbeitsvorschub	—	Halt	mit Handbedienung	Ausbohren 3
8	G88	Spindel ein, mit Arbeitsvorschub	ja	Halt	mit Handbedienung	Ausbohren 4
9	G89	mit Arbeitsvorschub	ja	—	mit Arbeitsvorschub	Ausbohren 5

Tabelle: Beispiele von Arbeitszyklen (Auszug aus DIN 66025 Teil 2)

Zusatz- funktion	sofort wirksam	später wirksam	gespeichert wirksam	satzweise wirksam	Bedeutung
M00		x		x	Programmierter Halt
M01		x		x	Wahlweiser Halt
M02		x		x	Programmende
M03	x		x		Spindel in Uhrzeigersinn
M04	x		x		Spindel in Gegenuhrzeigersinn
M05		x	x		Spindel Halt
M06	*	*		x	Werkzeugwechsel
M07	x		x		Kühl (schmier) mittel Nr.2 Ein
M08	x		x		Kühl (schmier) mittel Nr.1 Ein
M09		x	x		Kühl (schmier) mittel Aus
M10	*	*	x		Klemmen
M11	*	*	x		Lösen
M12 bis M18	*	*	*	*	vorläufig frei verfügbar
M19		x	x		Spindel-Halt mit definierter Endstellung
M20 bis M29	*	*	*	*	ständig frei verfügbar
M30		x		x	Programmende mit Rücksetzen
M31	*	*		x	Aufheben einer Verriegelung
M32 bis M39	*	*	*	*	vorläufig frei verfügbar
M40 bis M45	*	*	*	*	Getriebebeschaltung oder vorläufig frei verfügbar
M46 und M47	*	*	*	*	vorläufig frei verfügbar
M48		x	x		Überlagerungen wirksam
M49	x		x		Überlagerungen unwirksam
M50 bis M57	*	*	*	*	vorläufig frei verfügbar
M58	x		x		Konstante Spindeldrehzahl <sup>1)</sup> Aus
M59	x		x		Konstante Spindeldrehzahl <sup>1)</sup> Ein
M60		x		x	Werkstückwechsel
M61 bis M89	*	*	*	*	vorläufig frei verfügbar
M90 bis M99	*	*	*	*	ständig frei verfügbar

1) und Buchstaben siehe bei Tabelle G-Funktionen

Tabelle: M-Funktionen (Auszug aus DIN 66025 Teil 2: Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen)

Erläuterungen:

- sofort wirksam:  
Die Zusatzfunktion wird zusammen mit den übrigen Angaben des Satzes wirksam. Konkret bedeutet es zum Beispiel, dass die Spindel (M03) zuerst eingeschaltet wird und erst nachher die Wegbedingungen ausgeführt werden.
- später wirksam:  
Die Zusatzfunktion wird nach Ausführung der übrigen Angaben (meist den Wegbedingungen) des Satzes wirksam.
- gespeichert wirksam:  
Zusatzfunktionen, die gespeichert werden und so lange wirksam bleiben, bis sie durch eine artgleiche Zusatzfunktion überschrieben werden (z.B. M03 → M05).
- satzweise wirksam:  
Zusatzfunktionen, die nur in dem Satz wirksam sind, in dem sie programmiert sind.

### 3.3.1.1 Arten der Satzbildung

1. **Feste Reihenfolge:**  
Die Lage der einzelnen Zeichen im Satz muss richtig sein (veraltet)
2. **Mit Adresse:**  
Es gilt das Adresszeichen, nicht aber die Lage.

**P2 N3 G2 X±4.3 Y±4.3 Z±4.3 D±4.3 I±4.3 J±4.3 K±4.3 L2.3 F4 S4 T2 M2**

Bildung der NC-Sätze gemäss 2) am Beispiel der Steuerung POSELESTA II

### 3.3.2 Informationseingabe bei Off-Line-Übermittlung

Bei den heutigen CNC-Maschinen wird das Programm in einem Zug in den Zwischenspeicher eingelesen.

Vorteile:

- keine Freischnittmarke am Ende des Arbeitsschrittes
- Durch Zugriff zum Speicherinhalt über die Tastatur sind Änderungen (Optimierungen) am Programm möglich.

Bei sehr langen NC-Programmen (5-achsige 3-D-Bearbeitungen) reicht der Speicherplatz der CNC-Steuerung in der Regel nicht aus um diese in einem Zug in den Arbeitsspeicher zu lesen. Solche Steuerungen bieten in der Regel zusätzlich die Möglichkeit des **Nachlesebetriebs**. Es werden einige Sätze eingelesen und die Bearbeitung gestartet. Nachher wird laufend "nachgelesen", d.h. die folgenden NC-Sätze eingelesen, ohne dass die Bearbeitung unterbrochen wird. Die abgearbeiteten Sätze werden nicht gespeichert, sondern sie werden laufend überschrieben.

### 3.3.3 Die Einlesesteuerung

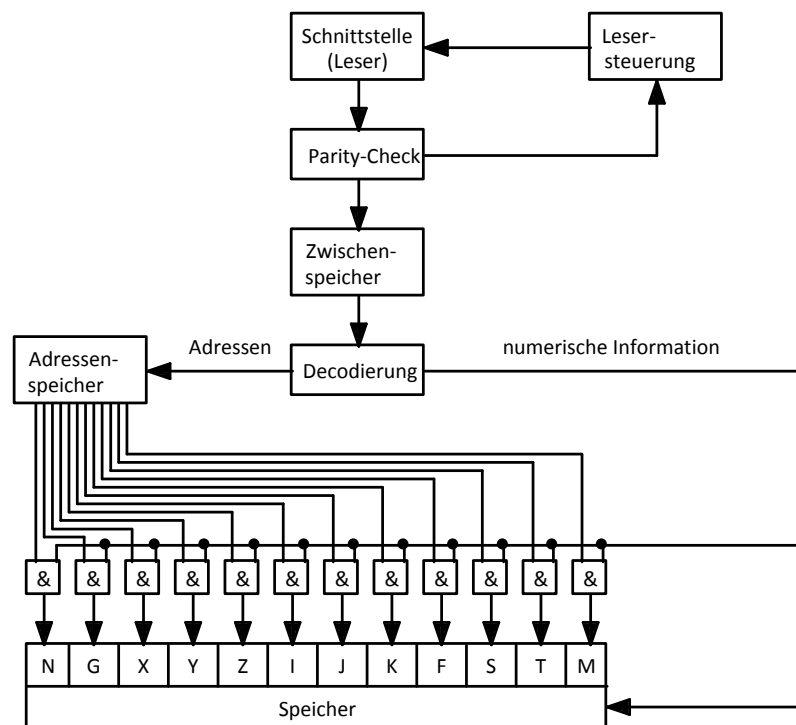


Abb. 3-10 Beispiel einer Einlesesteuerung

Aufgaben:

- 1) Parity-Check der Bytes
- 2) Abspeicherung auf Zwischenspeicher
- 3) Decodierung und Aufspalten in Adresse und numerischen Inhalt

Die Steuerung erkennt aus der Adresse der Information die Art dieser Information. Die Adresse veranlasst, dass die numerische Information an der richtigen Stelle des Zwischenspeichers abgelegt wird.



### 3.3.4 NC-Programmierbeispiel

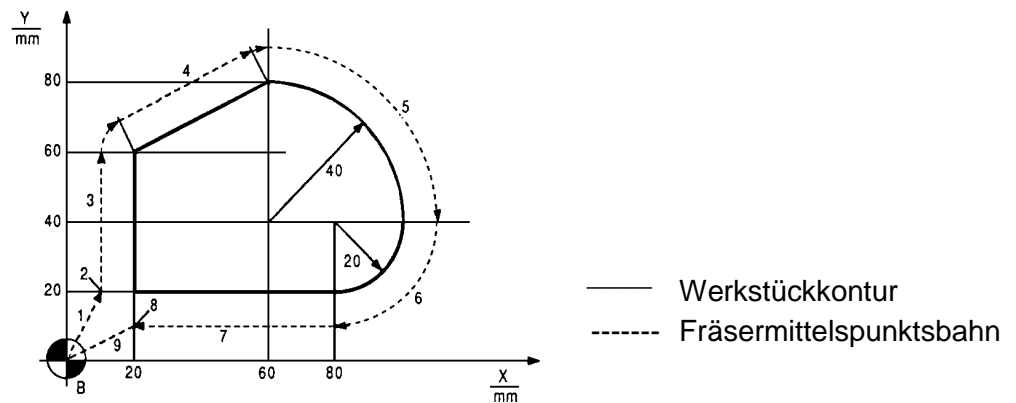


Abb. 3-11 Programmierbeispiel (Fräsbearbeitung)

```
%
N01 G90 G00 G41 X20 Y20 S1500 T01 M03
N02 G01 Z-10.0 F350
N03 G01 Y60.0
N04 G91 G01 X40.0 Y20.0
N05 G90 G02 X100.0 Y40.0 I60.0 J40.0
N06 G02 X80.0 Y20.0 I80.0 J40.0
N07 G01 X20.0
N08 G00 Z50.0 M05
N09 G00 G40 X0.0 Y0.0
N10 M02
```

Vor Beginn der Bearbeitung steht die Mittelachse des Fräasers im Startpunkt B. Im ersten Programmsatz N01 fährt der Fräser im Eilgang in der X/Y-Ebene an das Werkstück heran, wobei gleichzeitig die Frässpindel eingeschaltet wird. Beim Verfahren wird der vorher in den Korrekturspeicher (Werkzeug T01) eingegebene Fräserdurchmesser von 20 mm berücksichtigt. Die Funktion G41 gibt an, dass sich das Werkzeug links vom Werkstück befindet. Mit der Funktion G90 wird auf absolute Massangaben geschaltet.

Im Satz N02 erfolgt eine Zustellbewegung des Fräasers in Z-Richtung (senkrecht zur X/Y-Ebene) und im Satz N03 die erste Zerspanung. Die X-Koordinate muss nicht eingegeben werden, da sie nicht geändert hat.

Satz N04 wurde mit inkrementalen Massangaben (G91) programmiert.

Im Satz N05 wird wieder auf Absolutangaben umgeschaltet (G90) und ein Kreisbogen im Uhrzeigersinn (G02) programmiert. Unter X und Y sind die Zielkoordinaten und unter I und J der Mittelpunkt des Kreisbogens angegeben.

Die restlichen Bearbeitungsangaben können leicht verfolgt werden.

Im Satz N08 wird die Spindel ausgeschaltet (M05), in Satz N09 die Fräserradiuskompensation aufgehoben (G40) und im Satz N10 ist das Programmende (M02) definiert. Diese Angabe ist wichtig, da sonst die Einlesesteuerung auf weitere Eingaben wartet.

### 3.4 Methoden der NC-Programmierung

Mit der Einführung der NC Technik stellte sich die Aufgabe der Entwicklung von NC-Programmen zur Steuerung der Bearbeitungsmaschinen. Zu diesem Zweck wurden eine Reihe von Programmiermethoden entwickelt, die sich nach Kriterien wie Programmierort oder eingesetzter Programmiermethodik klassifizieren lassen

Als Programmierort kommt die Konstruktion, die zentrale Arbeitsvorbereitung oder die Werkstatt in Frage. Abb. 3-12 (Quelle: Arbeitspsychologie, Eberhard Ulich) deutet an, dass sich eine Firma mit diesen Fragen intensiv auseinandersetzen muss. Hier besteht ein erheblicher Gestaltungsspielraum, der bewusst genutzt werden soll.

Arbeitsorganisatorischer Grundtyp	I	II	III	IV	V
<div> <div>Funktionsträger</div> <div>Funktionsgruppe</div> </div>	<div> <div>Programmierer</div> <div>Einrichter, Meister, Vorarbeiter</div> <div>Maschinenbediener</div> </div>	<div> <div>Programmierer</div> <div>Einrichter, Meister, Vorarbeiter</div> <div>Maschinenbediener</div> </div>	<div> <div>Programmierer</div> <div>Einrichter, Meister, Vorarbeiter</div> <div>Maschinenbediener</div> </div>	<div> <div>Programmierer</div> <div>Einrichter, Meister, Vorarbeiter</div> <div>Maschinenbediener</div> </div>	<div> <div>Programmierer</div> <div>Einrichter, Meister, Vorarbeiter</div> <div>Maschinenbediener</div> </div>
Programmieren	•	•	•	•	•
Editing	•	•	•	•	•
Einrichten	•	•	•	•	•
Bedienen und Überwachen	•	•	•	•	•
Beschicken und Entladen	•	•	•	•	•

Abb. 3-12 Unterschiedliche Arbeitsstrukturen beim Einsatz von CNC-Werkzeugmaschinen

In Bezug auf die eingesetzte Programmiermethodik kann zwischen manueller und rechnerunterstützter Programmierung unterschieden werden (siehe Abb. 3-13).

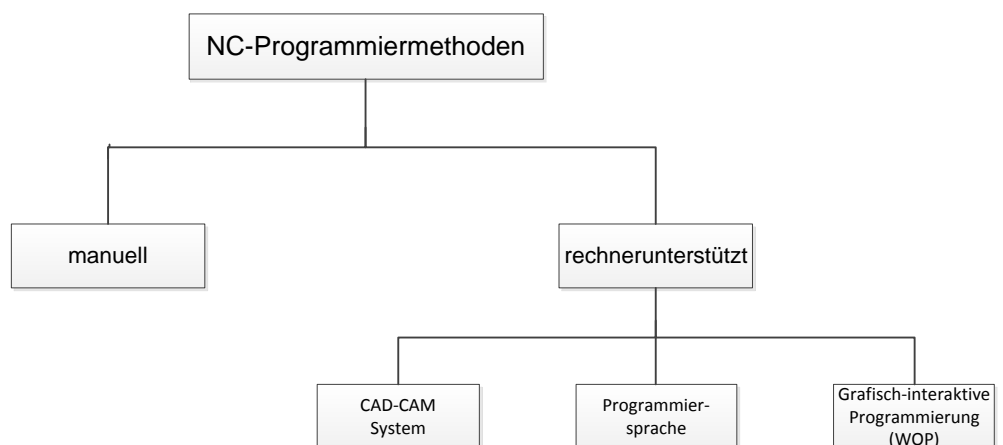


Abb. 3-13 Die verschiedenen Programmiermethoden

### 3.4.1 Manuelle Programmierung (Handeingabe)

Unter manueller Programmierung versteht man die NC-Programmerstellung unmittelbar im NC-Satzformat nach DIN 66025. Als Eingangsinformationen stehen dem Programmierer die Teilezeichnung, der Arbeitsplan und die Beschreibung des Systems Werkzeugmaschine/Steuerung zur Verfügung. Aus diesen Daten muss er alle zur Steuerung des Bearbeitungsprozesses erforderlichen Informationen "von Hand" generieren. Das erzeugte Satzformat, das von der Steuerung direkt verarbeitet werden kann, enthält je Satz einen von der Maschine auszuführenden Bearbeitungsschritt und/oder eine Maschinenfunktion. Da jede Elementaroperation der Maschine explizit codiert werden muss, ist diese Art der Programmerstellung sehr arbeits- und zeitintensiv. Schon relativ einfache Bearbeitungsaufgaben führen zu relativ langen NC-Programmen, die sehr fehleranfällig und nur schwer manuell verifizierbar sind.

Unter Berücksichtigung der uneingeschränkten Freiheitsgrade dieser Vorgehensweise erfolgt das Einfahren und Optimieren von NC-Programmen in diesem DIN-Satzformat.

### 3.4.2 Maschinelle Programmierung mit Programmiersprachen

Auf Grund des hohen Eingabeaufwands bei der manuellen Programmierung hat man unmittelbar nach Einführung der NC-Technik zur effizienten Programmerstellung problemorientierte NC-Programmiersprachen entwickelt. Diese Sprachen stellen relativ mächtige Sprachkonstrukte zur Verfügung, mit deren Hilfe der Programmierer die zu fertigende Werkstückkontur, die erforderlichen Bearbeitungsoperationen, die eingesetzten Betriebsmittel, die Technologiedaten und andere Maschinenfunktionen beschreibt. Das eigentliche NC-Programm wird dann in zwei Stufen erstellt:

- 1) Ein Prozessor übersetzt das Quellprogramm in ein maschinenneutrales Zwischenformat (CLDATA). Dabei führt der Rechner eine Syntaxkontrolle durch, übernimmt sämtliche Berechnungen und legt die Schnittaufteilung fest.
- 2) Ein maschinenspezifischer Postprozessor passt das Steuerprogramm an das Format der jeweiligen NC-Steuerung an.

Durch die Entwicklung angepasster Schnittstellen kann die Beschreibung der Werkstückkontur durch eine Kopplung zu einem CAD-System ersetzt werden.

Bei den Programmiersprachen unterscheidet man zwischen universellen und speziellen, d.h. auf ein Bearbeitungsverfahren zugeschnittene Sprachen. Heute überwiegen die universellen Sprachen, mit denen alle Maschinentypen programmiert werden können. Ein Teil der Sprachen wurde von Maschinenherstellern entwickelt und ist somit häufig herstellerspezifisch.

Die Erstellung von NC-Programmen auf der Basis von Programmiersprachen ist auf die Arbeitsvorbereitung beschränkt. Dies ist einerseits in der benötigten Rechnerkapazität begründet, andererseits erfordert die Formulierung der Bearbeitungsaufgabe in einer Hochsprache eine sehr abstrakte Denkweise. Darüber hinaus setzt die Beherrschung einer Sprache einen nicht unerheblichen Schulungsaufwand voraus.

Die Hauptvorteile der maschinellen Programmierung liegen in der sehr strukturierten und übersichtlichen Problemdefinition, der Unterstützung des Programmierpersonals durch den Rechner und der maschinenunabhängigen Vorgehensweise.

### 3.4.3 Grafisch-interaktive Werkstattprogrammierung

Bei der Werkstattprogrammierung wird die Teilezeichnung direkt an die Fertigung weitergegeben und "vor Ort" das NC-Programm erstellt. Als Hilfsmittel standen dem Programmierer zunächst lediglich einfache Editierhilfen zur Verfügung, die das Eingeben, Ändern und Löschen von Programmsätzen ermöglichten und einfache Syntax- und Plausibilitätskontrollen durchführten.

Im Zuge der Weiterentwicklung der Mikroelektronik und der damit verbundenen Leistungssteigerung der Maschinensteuerungen wurde die Voraussetzung geschaffen, leistungsfähige Programmiersysteme in die NC-Steuerung zu integrieren. Unter **Werkstattprogrammierung** versteht man heute im allgemeinen die NC-Programmierung mit Hilfe von grafisch-interaktiven Werkstattprogrammiersystemen (WOP).

Mit Hilfe grafisch-interaktiver Werkstattprogrammiersystemen wird der Maschinenbediener in die Lage versetzt, NC-Programme ohne Kenntnis einer Programmiersprache zu entwickeln. Die Bedienung erfolgt ausschliesslich im systemgeführten Dialog unter Verwendung von Interaktionstechniken wie Softkeyauswahl oder Formulareingabe.

Die auf diese Weise definierten Geometrieelemente werden grafisch dargestellt. Werkzeuge und Verfahrbahnen werden visualisiert, um eine sofortige Verifikation während der Programmerstellung zu realisieren und damit Eingabefehler zu minimieren.

Werkstattprogrammierung kann in folgenden Fällen sehr sinnvoll sein:

1. wenn ein Betrieb *noch keine NC-Maschinen hat* und in kleinen, vorsichtigen Schritten in die NC-Fertigung *einsteigen* möchte.
2. wenn ein Betrieb über so *wenige NC-Maschinen* verfügt, dass ein Programmierplatz in der AV nur ungenügend ausgelastet wäre.
3. wenn ein Betrieb über keine oder nur eine *sehr unvollkommene AV* verfügt, die gelegentlich umgangen werden soll.
4. wenn ein Betrieb nicht willens oder nicht in der Lage ist, die mit dem Programmieren in der AV erforderliche *straffe Organisation* einzuführen.
5. wenn ein Betrieb zu *hohe Anlaufkosten* vermeiden möchte, die in Verbindung mit der rechnergestützten Programmierung unvermeidbar sind, wenn man Schulung, Werkzeugkatalogisierung und Geräte zur Voreinstellung mitberücksichtigt.
6. wenn ein Betrieb gewisse Abteilungen, wie z.B. Versuch, Musterbau oder Ersatzteildienst kurzfristig und vorrangig mit Werkstücken versorgen möchte, wobei eine *kurze Lieferzeit und Flexibilität* Vorrang vor der Wirtschaftlichkeit haben.
7. wenn ein Betrieb Werkstücke in *kleinen Losgrössen oder ab Einzelteilen* fertigen muss, so dass eine Programmoptimierung entfallen kann, da der Zeitaufwand dafür teurer wäre als die zu erzielende Einsparung aufgrund kürzerer Bearbeitungszeiten.
8. wenn ein Betrieb Werkstücke in sehr *grossen Stückzahlen* fertigen muss, so dass mit wenigen, optimierten Programmen die Maschine ständig ausgelastet ist.
9. wenn ein Betrieb konventionelle oder mechanisch gesteuerte Maschinen durch *modernere CNC-Maschinen* ersetzen möchte, dabei jedoch keine grösseren Umstellungen der Betriebsorganisation entstehen dürfen.
10. wenn ein grösserer Fertigungsbetrieb durch Aufteilung seiner Struktur in kleinere Werkstatteinheiten *flexibler werden* möchte.

Die Werkstattprogrammierung erfordert allerdings den Einsatz von *erfahrenen, qualifizierten Facharbeitern mit CNC-Zusatzwissen*. Diese müssen trotz der rechnergestützten Programmierhilfen sowohl die Bearbeitungsfolge, als auch die Technologie kontrollieren und Korrekturen in das System eingeben können.

### 3.4.4 Programmierung mit integrierten CAD/CAM-Arbeitsplätzen

Die Kopplung eines maschinellen NC-Programmiersystems mit einem CAD-System (CAD/NC-Kopplung) basiert auf der Idee, ein vollständiges NC-Teilprogramm unter Nutzung der CAD-Technik zu erstellen. Man versucht demnach bei der CAD/NC-Kopplung, alle für die NC-Programmierung relevanten Informationen direkt vom CAD-System zu übernehmen. Bei der Konstruktion mit Hilfe eines CAD-Systems liegen diese Informationen in Dateiform vor, so dass eine weitere Nutzung in einem EDV-gestützten NC-Programmiersystem **prinzipiell** möglich ist. Allerdings ist bei der Datenübernahme zum Teil mit einem erheblichen **Informationsverlust** zu rechnen, da ein direkter Zugriff auf die CAD-Dateien vom NC-Programmiersystem aus nur in seltenen Fällen möglich ist und die Zwischenschaltung von Schnittstellen immer einen Informationsverlust beinhaltet.

Die Arbeitsweise von CAD- und NC-Programmiersystemen sind darüber hinaus im allgemeinen völlig verschieden: CAD-Systeme arbeiten geometrieorientiert, während NC-Programmiersysteme technologieorientiert arbeiten. Dieses äussert sich zum Beispiel darin, dass es im CAD-System zwar logische Zusammenhänge zwischen einzelnen Geometrieelementen gibt, es aber auf der anderen Seite in der Regel keine Informationen gibt, in welcher Reihenfolge die Geometrieelemente miteinander verknüpft werden müssen, damit eine geschlossene Kontur entsteht. Ausserdem liegen Technologiedetails im CAD-System in der Regel nur in Textform vor, so dass diese Texte wegen des fehlenden Konturbezugs nicht direkt im NC-Programmiersystem zur Generierung von Technologieanweisungen weiterverwendet werden können.

Bei der CAD/NC-Kopplung müssen deshalb geeignete Konventionen getroffen werden, um den Datenaustausch möglichst effektiv zu gestalten. Effektiv bedeutet dabei in diesem Zusammenhang:

- den Aufwand zur Selektion der NC-relevanten Daten im CAD-System zu minimieren
- den Nacharbeitungsaufwand im NC-Programmiersystem zu minimieren, indem zum Beispiel bereits im CAD-System eine Reihenfolge von Konturelementen festgelegt wird, so dass die Bearbeitungskontur im NC-Programmiersystem sofort vorliegt
- möglichst viele relevante Informationen die nach Möglichkeit auch über reine Geometrieinformationen hinausgehen, zu übergeben.

Heute unterscheidet man acht Varianten zur Kopplung von CAD- und NC-Programmiersystemen (Abb. 3-14). Die Varianten 1 & 2 repräsentieren die sogenannte integrierte Lösung, bei der im CAD-System auch ein NC-Modul integriert ist. Die Varianten 3 - 8 beziehen sich auf die Kopplung von isolierten CAD- und NC-Programmiersystemen, wobei hier in der Regel auf Schnittstellenkonzepte zurückgegriffen wird. Ein sehr grosser Teil der bekannten CAD/NC-Kopplungen basieren auf diesen Konzepten.

Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass in letzter Zeit zunehmend auch die Kopplung von CAD-Systemen zu Maschinensteuerungen für die Werkstattprogrammierung numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen realisiert wird.

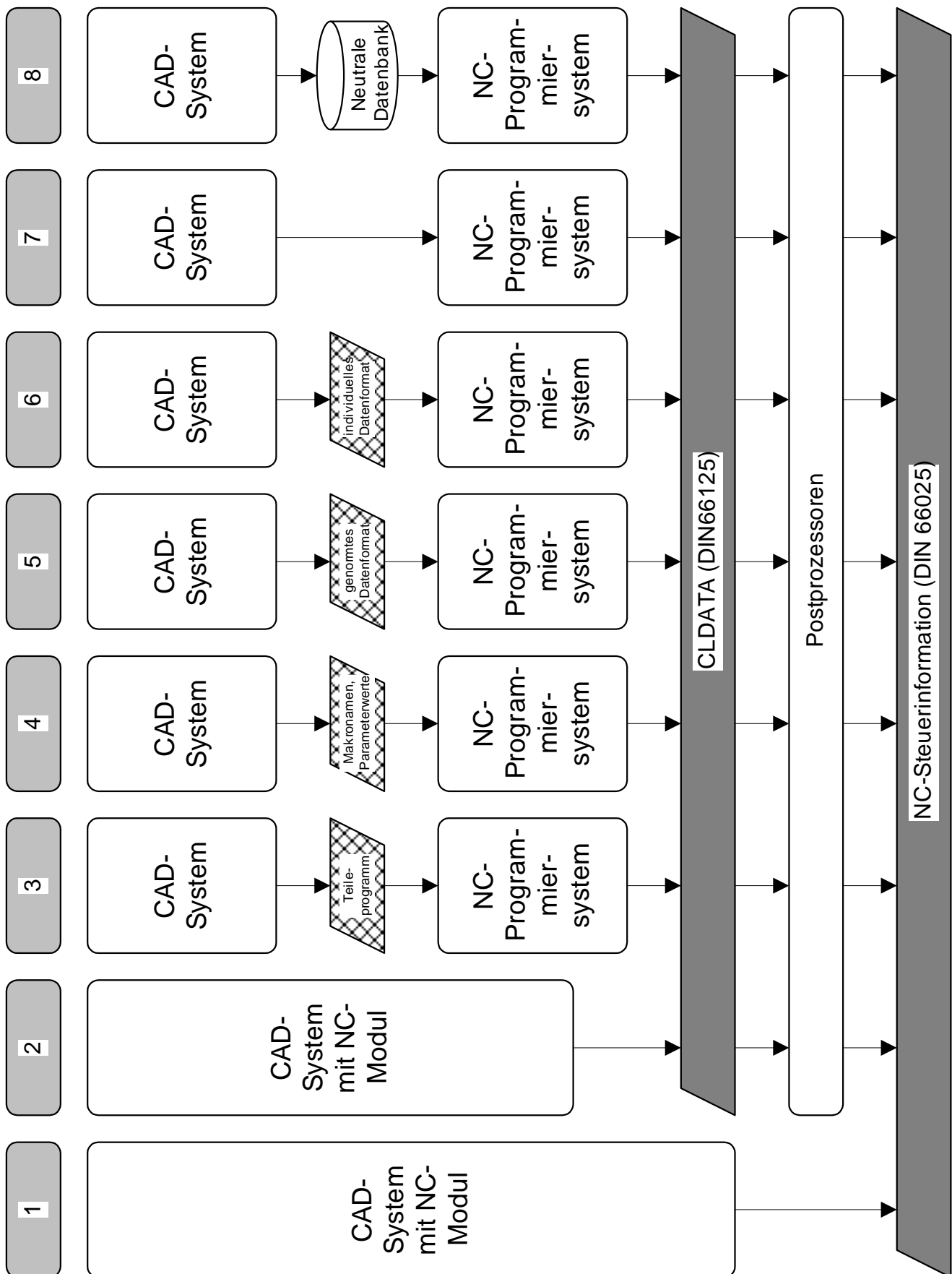


Abb. 3-14 CAD-NC-Verknüpfungsmöglichkeiten

### 3.4.4.1 Die CAD-NC-Verknüpfungsmöglichkeiten

- Variante 1:** Das CAD-System enthält ein spezielles NC-Modul, mit dem ein NC-Programm erstellt werden kann. Die Umsetzung der Daten aus dem NC-Modul in das notwendige NC-Steuerungsformat erfolgt über Postprozessoren, die in das CAD-System integriert sind. Anpassungen an weitere CNC-Steuerungen sind nur mit grossem Aufwand möglich, da diese Änderungen mit in den Code für die CAD-Software integriert werden müssen.
- Variante 2:** Im Gegensatz zur Variante 1 wird vom NC-Modul des CAD-Systems eine maschinenunabhängige Steuerinformation im CLDATA-Format nach DIN 66125 erzeugt. Die Generierung der Steuerinformationen für eine bestimmte Steuerung erfolgt über externe Postprozessoren. Die Wartung oder Erweiterung dieser Postprozessoren ist weniger aufwendig als bei Variante 1.  
Insbesondere bei der Behandlung von Freiformflächen, die eine mehr als dreiachsige NC-Bearbeitung erfordern, ist man auf diese Lösungen angewiesen, da die internen CAD-Modelle direkt zur NC-Programmierung herangezogen werden. In diesem Falle ist eine wirtschaftliche NC-Programmerstellung nur durch Nutzung des CAD-Systems möglich.
- Variante 3:** Die Kopplung zwischen CAD- und NC-Programmiersystem wird über eine Sprachschnittstelle realisiert, d. h. dass das CAD-System die Geometrieinformationen in der Syntax des NC-Programmiersystems übergibt. Die notwendigen Technologiedetails werden im NC-Programmiersystem hinzugefügt. Die Generierung der Steuerinformationen erfolgt mit den Postprozessoren des NC-Programmiersystems. Diese Variante wird häufig genutzt, wenn das NC-Programmiersystem nicht graphisch-interaktiv arbeitet, da dann die Graphikmöglichkeiten des CAD-Systems ausgenutzt werden können.  
Diese Koppelvariante hat heute keine grosse Bedeutung mehr, da die aktuellen NC-Programmiersysteme die Möglichkeit bieten, die Geometrien graphisch zu programmieren.
- Variante 4:** An das NC-Programmiersystem werden keine Geometrieinformationen übergeben, sondern nur Makronamen und die zugehörigen Parameterwerte. Dadurch ist die Werkstückgeometrie vollständig beschrieben. Wenn die Makros im NC-Programmiersystem auch Technologieanweisungen enthalten, ist in einigen Fällen eine vollautomatisierte Generierung der NC-Steuerinformation möglich.  
Voraussetzung für diese Kopplungsvariante ist, dass im CAD-System Konstruktionsmakros verwendet werden und es korrespondierende Fertigungsmakros auf Seiten des NC-Programmiersystems gibt. Die Geometrie wird demnach in beiden Systemen abgelegt und muss dementsprechend getrennt gewartet werden. Der Einsatz dieser Variante ist nur bei einem sehr stark standardisierten Werkstückspektrum sinnvoll, kann dort aber einen sehr hohen Nutzen bewirken.  
Verbreitet ist diese Koppelmöglichkeit vor allem bei der Blechbearbeitung (Stanzen).
- Variante 5:** Die Geometrieinformationen werden über genormte Schnittstellen, wie z. B. IGES (Initial Graphics Exchange Specification), VDAFS (Verband der deutschen Automobilindustrie Flächenschnittstelle) oder DXF (Data Exchange Format) übergeben. Im NC-Programmiersystem wird dieses genormte Datenformat wieder in ein Teileprogramm umgesetzt, das dann im Dialog mit technologischen Daten komplettiert wird.
- Variante 6:** Die Variante 6 unterscheidet sich von der Variante 5 dadurch, dass die Daten nicht über eine genormte Schnittstelle ausgetauscht werden, son-

dern der Datenaustausch über eine individuell festgelegte Schnittstelle vom CAD- in das NC-Programmiersystem erfolgt. Diese Schnittstelle kann optimal auf die zu koppelnden Systeme abgestimmt werden, so dass der Informationsgehalt der übergebenen Daten erhöht werden kann.

#### **Variante 7:**

Bei der Variante 7 kann das NC-Programmiersystem unter Umgehung jeglicher Schnittstellen die Daten direkt aus der CAD-Datenbank auslesen und weiterverarbeiten. Das NC-Programmiersystem greift mit einem direkten Datenbankaufruf auf die CAD-Dateien zu. Bislang haben allerdings erst wenige CAD-Systemanbieter ihre Datenbanksysteme so konzipiert, dass andere Programmsysteme direkt darauf zugreifen können. Die Möglichkeiten zur Informationsübertragung sind durch die Möglichkeit der Nutzung sämtlicher Daten aus der CAD-Datei noch besser als bei der Variante 6.

#### **Variante 8:**

Diese Variante hat vor allem im heterogen gegliederten Europa eine grosse Bedeutung. Die Norm STEP (**ST**andard for the **E**xchange of **P**roduct model data) zeichnet sich durch eine externe und neutrale Datenbank aus, die alle produktdefinierenden Daten enthält.

Sowohl das CAD- als auch das NC-Programmiersystem können Daten in das sogenannte Produktmodell einbringen, herauslesen und ändern. Dadurch sind optimale Kopplungsmöglichkeiten zwischen Konstruktion und NC-Programmierung gegeben.

Anzumerken ist noch, dass in der Literatur die CAD/NC-Kopplung häufig als CAD/CAM-Kopplung bezeichnet wird. Die AWF-Empfehlung (Ausschuss für wirtschaftliche Fertigung) definiert CAD/CAM als "die Integration der technischen Aufgaben zur Produkterstellung und umfasst die EDV-technische Verkettung von CAD, CAP, CAM und CAQ". Diese Definition reicht also weit über eine CAD/NC-Kopplung hinaus, so dass korrekterweise von einer CAD/CAP-Kopplung gesprochen werden muss, da nach AWF die NC-Programmierung ein Teilbereich des Computer Aided Planning (CAP) ist.

### **Probleme beim Einsatz der CAD-NC-Kopplung**

Aktuellen Problemstellungen bei der CAD-NC-Kopplung sind folgende Punkte:

- **In CAD-Systemen werden oft nicht NC-gerechte Bauteilgeometrien eingesetzt**
- **Die Modellbeschreibungen in CAD- und NC-Programmiersystemen sind uneinheitlich**
- **Innerhalb des CAD-Systems werden Technologieinformationen nur unzureichend abgelegt**
- **Aus der Bauteilgeometrie alleine lässt sich keine automatische Verfahrens- und Werkzeugauswahl ableiten**

Zu den einzelnen Punkten:

Die Übernahme von Daten aus einem CAD- in ein NC-Programmiersystem bedingt, dass alle für die NC-Programmierung relevanten Bauteilgeometrieinformationen in der notwendigen Genauigkeit abgelegt werden, damit der Überprüfungs- und Korrekturaufwand im NC-Programmiersystem überschaubar gehalten werden kann. Ungenaue Masse können u. a. folgende Ursachen haben:

- Die interne Modelldarstellung des CAD-Systems lässt z. B. beim Drahtmodell keine direkte Ableitung von Informationen für die NC-Programmierung zu oder beinhaltet in sich Genauigkeitsprobleme, wie z.B. bei der Facettendarstellung im Volumenmodell



- In vielen Fällen reicht auch die interne Rechengenauigkeit des CAD-Systems nicht aus. Dieses äussert sich z.B. darin, dass nach der Datenübertragung im NC-Programmiersystem keine vollständig geschlossene Kontur vorliegt
- Weiterhin können Massungenauigkeiten bei der Arbeit mit dem CAD-System selbst entstehen, wenn vom CAD-Konstrukteur die Bauteilgeometrie nicht durch Eingabe von Masszahlen oder durch die Nutzung von Parametrisierungsmodulen detailliert wird. Für die NC-Programmierung reicht eine Zeichnungsdetaillierung in der Genauigkeit der Bildschirmdarstellung nicht aus, so dass Ungenauigkeiten entstehen können, die erst im Zuge der NC-Programmierung auffallen.

Die Zielsetzungen der CAD-Konstruktion und der NC-Programmierung sind bereits von der Grundkonzeption heraus betrachtet sehr unterschiedlich, so dass auch die internen Modellbeschreibungen in CAD- und NC-Programmiersystemen Unterschiede aufweisen. CAD-Systeme sind Systeme zur Detaillierung von Konstruktionsideen und arbeiten deshalb geometrieorientiert. Dagegen werden in NC-Programmiersystemen Fertigungsprozesse bis ins Detail beschrieben. Für den Fertigungsprozess reichen Geometrieinformationen alleine in keinem Bearbeitungsverfahren aus, so dass in der Regel wesentliche Informationen auch bei Nutzung einer CAD/NC-Kopplung vom NC-Programmierer erarbeitet werden müssen.

Ausserdem liefert eine CAD/NC-Übertragung in der Regel nur die Endkontur; etwaige Zwischengeometrien oder -konturen, wie sie häufig im Zuge der NC-Programmierung benötigt werden, muss der NC-Programmierer selbst beschreiben.

Ein weiteres Problem ergibt sich aus der Tatsache, dass es in der Modelldarstellung des CAD-Systems in der Regel nur logische Zusammenhänge zwischen den einzelnen Geometrieelementen gibt; eine zeitliche Ablauffolge oder topologische Informationen, aus denen sich automatisch ein vollständiger Konturzug ergibt, gibt es nur in Ausnahmefällen.

Da es zudem keine Möglichkeit gibt, produktdefinierende Daten über standardisierte Schnittstellen auszutauschen, wie z. B. Informationen über die Koaxialität zweier Bohrungen, gehen aktuelle Entwicklungen dazu über, alle Daten in einer gemeinsamen, externen Datenbank abzulegen. Dieses Produktmodell zeichnet sich aus durch:

- gute Erweiterungsmöglichkeiten
- Nutzung der Datenbank durch beliebige andere Systeme,
- die Möglichkeit der Datenmanipulation durch andere Systeme, ohne dass die Datenkonsistenz gefährdet wird
- den Mehrbenutzerbetrieb

Letztendlich kann aufgrund der übergebenen Daten alleine nicht automatisch entschieden werden, welches Bearbeitungsverfahren anzuwenden ist und welche Werkzeuge am besten einzusetzen sind. Hier muss nach wie vor der NC-Programmierer mit seinen spezifischen Kenntnissen die notwendigen Entscheidungen treffen und diese in Form von Befehlen in das NC-Programmiersystem bzw. das NC-Modul des CAD-Systems eingeben.

Bewährt hat sich der Einsatz integrierter CAD/CAM-Systeme für die Programmierung hochkomplexer Teile. Hier ist es nicht zweckmässig, die Beschreibung von Freiformflächen auf ein NC-Programmiersystem zu übertragen und dort weiterzuverarbeiten.

Dabei sind jedoch folgende Probleme zu berücksichtigen:

- Qualifikation des Bedienpersonals:  
In der Praxis besitzt der Konstrukteur weder das zur Planung der Bearbeitung erforderliche fertigungstechnologische Know-How, noch verfügt er über ausreichende Informationen über die aktuell verfügbaren Fertigungsmittel (Maschinen, Werkzeuge).
- Maschinendisposition:  
Zum Zeitpunkt der Konstruktion steht die Maschine, auf der das Teil gefertigt werden soll, in der Regel noch nicht fest. Hierüber entscheidet die Fertigungssteuerung zu einem späteren Zeitpunkt.

### 3.5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen an NC-Maschinen

Die Entscheidung, ob eine Werkstückbearbeitung auf einer NC-Maschine erfolgen soll und insbesondere ob die entsprechende Investition lohnend ist, muss aufgrund einer genauen Wirtschaftlichkeitsstudie gefällt werden.

Beim Vergleich einer NC-Maschine mit einer konventionellen Werkzeugmaschine erkennt man folgende Vorteile:

- Wesentlich **verminderte Nebenzeiten** durch automatisches Zusammenspiel der Bewegungen, durch **hohe Geschwindigkeit der Eilgänge** und durch automatische Anpassung der Spindeldrehzahlen.
- **Kürzere Rüstzeiten** dank Reduktion der an der Maschine auszuführenden Einstellungen (z.B. Werkzeugvoreinstellungen)
- **Verkürzung der Kontroll- und Messzeiten** dank hoher Bearbeitungs-genauigkeit und der getreuen Reproduzierbarkeit.
- **Weniger Ausschuss**
- **Wegfall von bestimmten Vorrichtungen**, wie kostspielige Bohrlehren mit hohen Lagerkosten. Reduktion der Anzahl Formwerkzeuge.
- **Wegfall des Anreissens** des Werkstückes vor der Bearbeitung.
- **Weniger Wartezeiten**, denn die NC-Werkzeugmaschine führt bei gleichbleibender Werkstückaufspannung eine grössere Zahl von Bearbeitungsoperationen aus. Das führt zu geringeren Spannzeiten, zu weniger herumliegenden Werkstücken und somit zu kleineren Werkstattlagerflächen.
- **Herabsetzung des Ersatzteillagerbestandes**. Die NC-Maschine passt sich leicht einer neuen Fertigungsserie an, und somit ist die Zeitspanne vor dem Auslieferungstermin kürzer. Durch problemlose Wiederaufnahme alter Programme kann die Fertigung von Ersatzteilen kostenmässig reduziert werden.

Neben den oben genannten Vorteilen, die sich unmittelbar in einer Kostenrechnung niederschlagen, kann man bei der NC-Maschine noch weitere Vorteile nennen, die rechnerisch schwierig zu erfassen sind, aber dennoch von entscheidender Bedeutung sein können.

- **Verbesserung der Fertigungsbeweglichkeit**, also besseres Anpassungsvermögen an die Entwicklung der Technologie und kurzfristige Verkräftung der Nachfrage.
- **Wirtschaftlichere Fertigung sehr komplizierter oder anspruchsvoller Werkstücke** (z.B. Turbomaschinen, Luftfahrtindustrie)
- **Verbesserung der Fertigungsplanung**, da die Fertigungszahlen durch Einsatz der Rechner-technik in den Werkstätten regelmässiger werden.
- **Anspornung des Personals**, besonders der jungen Generation, durch die neuen Techniken wie Elektronik, Informatik usw.

Neben den vielen Vorteilen sollen auch die **Nachteile der NC-Maschinen** erwähnt werden:

- **Hohe Stundenkosten**, die auf die grossen Investitionskosten einer NC-Werkzeugmaschine zurückzuführen sind.  
→ Notwendigkeit zweischichtig zu arbeiten
- **Problematik der Programmierung**, welche oft einen Käufer abschreckt.  
In NC-Einführungskursen wird der Nachweis erbracht, dass dieses Problem zu lösen ist. Die manuelle Programmierung reicht aus, solange nur wenige Maschinen im Einsatz sind und die Konturen relativ einfach sind. Bei mehreren NC-Maschinen ist die Beschaffung eines Programmiersystems sehr rentabel.
- **Risiko der Ausfälle** und hohe Servicekosten.

Das wirtschaftlichste Fertigungssystem ist dasjenige, bei dem die niedrigsten Fertigungskosten pro Werkstück anfallen. Die Kosten können aufgrund der untenstehenden Gleichung ermittelt werden.

$$C = C_u + \frac{C_r}{L} + \frac{C_p}{Z \cdot L}$$

- C : Gesamte Fertigungskosten pro Stück  
 C<sub>u</sub> : Bearbeitungskosten pro Stück  
 C<sub>r</sub> : Wiederholkosten für eine Serie  
 C<sub>p</sub> : Einmalige Einrichtungskosten  
 L : Stückzahl der Serie  
 Z : Anzahl der Serien  
 Z\*L : Gesamtstückzahl

### 3.5.1 Berechnung der Arbeitsplatz-Stundenkosten

Dieser Wert ergibt ein erstes wesentliches Kriterium für den Vergleich einer NC-Maschine mit einer konventionellen Maschine.

		NC-Werkzeug- maschine	Herkömmliche Werkzeugmaschine
Anschaffungswert (heutige Preislage)	<b>1</b>	274'000.-	60'000.-
Abschreibungsdauer in Jahren	<b>2</b>	5	5
Jährliche Abschreibung <b>1 / 2</b>	<b>3</b>	54'800.-	12'000.-
Zinsen und Unterhalt, jährlich z = 9% u = 3% (z/2 + u) * 1/100	<b>4</b>	20'550.-	4'500.-
Jahreskosten der Arbeitsfläche S <sub>NC-WM</sub> = 20m <sup>2</sup> S <sub>WM</sub> = 16m <sup>2</sup> zu 75.-	<b>5</b>	1'500.-	1'200.-
Jährliche Energiekosten	<b>6</b>	3'550.-	2'000.-
Jährliche Maschinenkosten <b>3+4+5+6</b>	<b>7</b>	80'400.-	19'700.-
Jährliche Lohnkosten 1900 h/Schicht zu 30.- + 60% Gemeinkosten	<b>8</b>	91'200.-	91'200.-
Jahreskosten des Arbeitsplatzes <b>7+8</b>	<b>9</b>	171'600.-	110'900.-
Effektive Stundenzahl pro Jahr (für 1 Schicht)	<b>10</b>	1650	1335
Stundenkosten eines Arbeitsplatzes <b>9 / 10</b>	<b>11</b>	104.-	83.-

- z : Zinssatz des ausgeliehenen Kapitals  
 u : Prozentualer Anteil der jährlichen Unterhaltskosten

### 3.5.2 Berechnung der Gesamtfertigungskosten eines Werkstücks

Der Gestehungspreis wird mit den Maschinen des vorhergehenden Beispiels bestimmt:

		NC-Werkzeugmaschine	Herkömmliche Werkzeugmaschine
Arbeitsplatzkosten pro Std.	<b>11</b>	104.-	83.-
Vorgabezeit pro Werkstück in min	<b>12</b>	18	34
Arbeitsplatzkosten pro Werkstück $(11 \cdot 12) / 60$	<b>13</b>	31.20	47.-
Werkzeugkosten pro Werkstück	<b>14</b>	2.50	2.-
Kontroll- und Prüfkosten pro Werkstück	<b>15</b>	0.50	3.-
Gesamtbearbeitungskosten pro W-St. $C_u$ <b>13+14+15</b>	<b>16</b>	34.20	52.-
Erstellung des Fertigungsauftrages	<b>17</b>	25.-	25.-
Kosten für Voreinstellung der Werkzeuge	<b>18</b>	9.-	-
Kosten der Maschineneinstellung	<b>19</b>	32.-	49.-
Wiederholkosten Serienfertigung $C_r$ <b>17+18+19</b>	<b>20</b>	66.-	74.-
Stückzahl pro Serie L	<b>21</b>	30	30
$C_r / L$	<b>22</b>	2.20	2.50
Kosten für AVOR und Programmierung	<b>23</b>	215.-	34.-
Kosten für Lehren und Spezialspannvorrichtungen	<b>24</b>	405.-	710.-
Einmalige Vorbereitungskosten $C_p$ <b>23+24</b>	<b>25</b>	620.-	744.-
Gesamtstückzahl der Werkstücke $Z \cdot L$	<b>26</b>	240	240
$C_p / (Z \cdot L)$ <b>25/26</b>	<b>27</b>	2.60	3.10
Gesamtfertigungskosten pro W-St. $C$ <b>16+22+27</b>	<b>28</b>	39.-	57.60

Betrachtet man die Stückzahl der Serie, so liegt die Wirtschaftlichkeit der NC-Maschinen bei den Klein- und Mittelserien.

Für Gross-Serien sind Sondermaschinen mit starrer Automatisierung am wirtschaftlichsten. Dazu gehören die Transfermaschinen, die Drehautomaten mit Nockensteuerung und die Kopierfräsmaschinen.

Abb. 3-15 zeigt, wie in einer grafischen Darstellung die wirtschaftlichen Grenzen der NC-Werkzeugmaschine bestimmt werden kann.

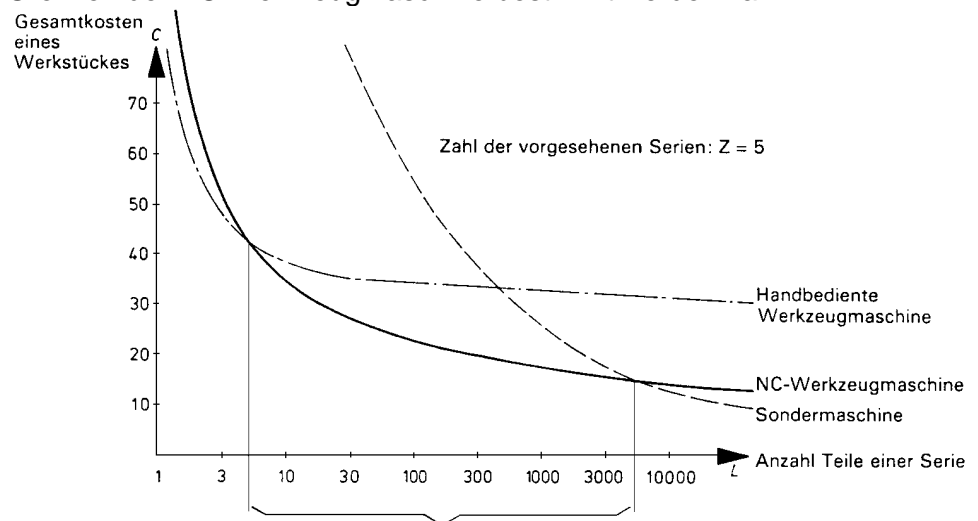


Abb. 3-15 Wirtschaftlicher Einsatzbereich einer NC - Werkzeugmaschine

Gemäss Abb. 3-15 ist die Produktion von bis zu 5 Werkstücken pro Serie auf einer konventionellen Werkzeugmaschine wirtschaftlicher als auf einer NC-Werkzeugmaschine.

Bei über 5000 Werkstücken pro Serie ist jedoch die Sondermaschine wirtschaftlicher.

### 3.5.3 Berechnung der Amortisationszeit des investierten Kapitals

Kosteneinsparung pro Werkstück	$C_{WM} - C_{NC-WM}$	<b>29</b>	18.60
Kosteneinsparung pro h	$(29 * 60) / (12_{NC-WM})$	<b>30</b>	62.-
Kosteneinsparung pro Jahr	$30 * 10_{NC-WM}$	<b>31</b>	102'300.-
Amortisationszeit in Jahren	$1 / 31$	<b>32</b>	2.7
Rendite des Kapitals in %	$(100 * 31) / 1$	<b>33</b>	37
Verhältnis der Amortisationszeiten	$2 / 32$	<b>34</b>	1.9

Abgestützt auf die Gestehungskosten eines Werkstückes, die stellvertretend für die vorgesehene Fabrikation sind, ergibt sich bei unserem Beispiel, dass die NC-Werkzeugmaschine in 2.7 Jahren abgeschrieben ist, d.h. 1.9 mal schneller als vorgesehen (5 Jahre).

## 4 Aufbau von NC-Maschinen

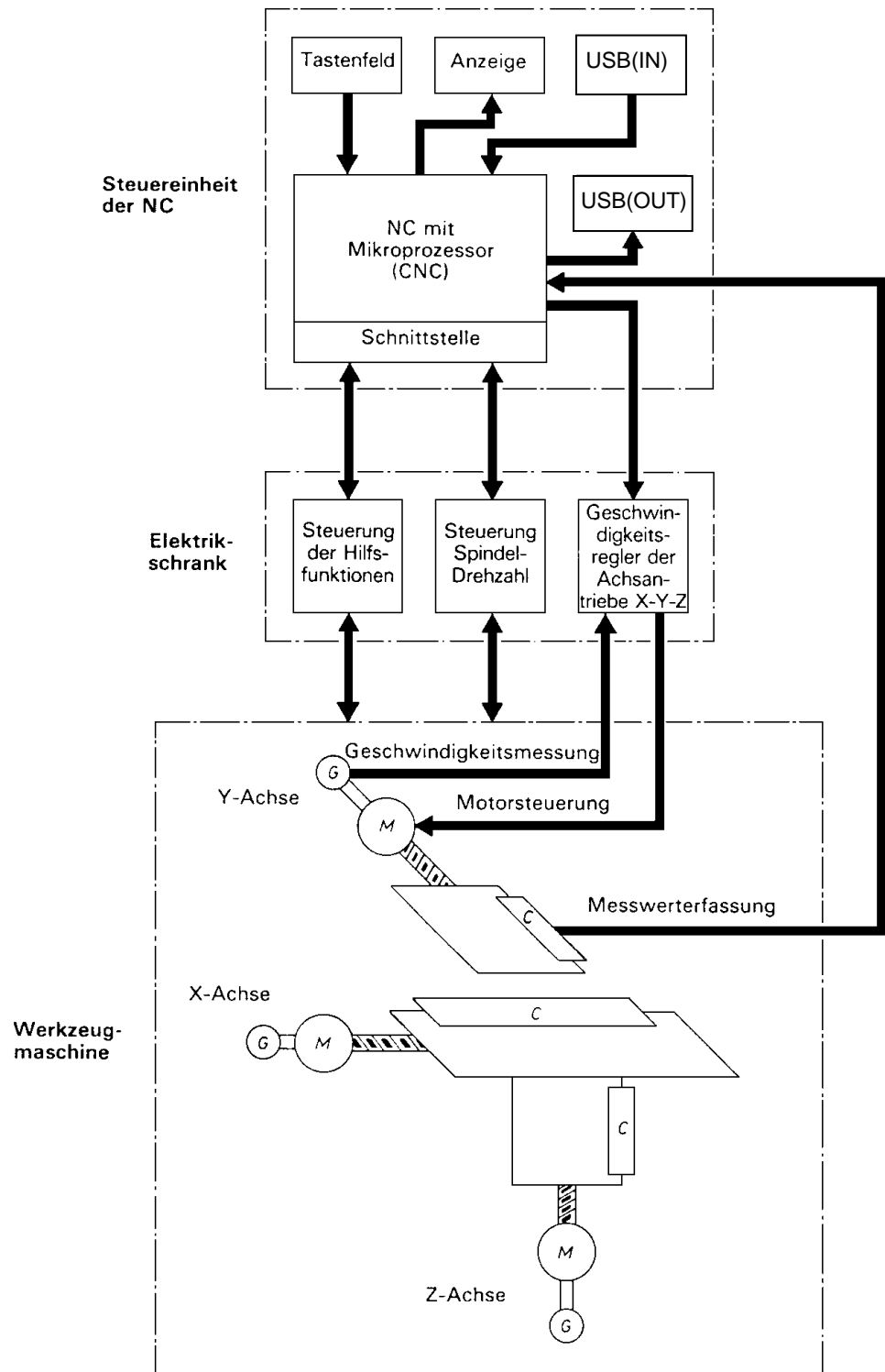


Abb. 4-1 Schematischer Aufbau einer CNC-Fräsmaschine mit 3 Achsen  
(Die Steuerverbindungen zur X- und Z-Achse sind nicht dargestellt)

M: Gleichstrommotor  
G: Tachogenerator (Drehzahlmesswertgeber)  
C: Linearer Messwertgeber (Massstab)

## 4.1 Sollwertbildung der Weginformationen

Durch das Programm werden der NC-Steuerung die Koordinaten des im jeweiligen Arbeitsschritt anzufahrenden Bewegungsendpunktes mitgeteilt. Die Koordinaten können auf 2 Arten mitgeteilt werden:

### **Absolute Masseingabe:**

Die Koordinaten des Zielpunktes werden auf einen bestimmten Koordinatenursprungspunkt bezogen angegeben.

### **Inkrementale Masseingabe:**

Bei inkrementaler Masseingabe werden die Verfahrswege in den einzelnen Achsen vom Start- zum Zielpunkt angegeben.

Diese geometrischen Daten genügen der Steuerung nicht in jedem Fall zur Bestimmung der Bahnbewegung. Es sind zusätzliche Daten erforderlich.

### 4.1.1 Sollwertbildung der Weginformation bei Punktsteuerung

Die Programmierung wird vereinfacht, wenn die Werkzeuglängen vernachlässigt werden kann. Die tatsächliche Lage im Arbeitsraum muss aber angegeben werden. Ausser den Weginformationen sind notwendig:

- Nullpunktverschiebung
- Werkzeuglängenangabe
- Spiegelung um eine Achse
- Drehung um 180° um den Koordinatenursprungspunkt W.

### 4.1.2 Sollwertbildung der Weginformation bei Streckensteuerung

Neben der Werkzeuglänge muss auch der Werkzeugradius der Steuerung bekannt sein, damit sie die zur Werkstücksollkontur äquidistante Fräsbahn berechnen kann.

Es sind also zusätzlich zu den Korrekturen der Punktsteuerung folgende Angaben notwendig:

- Werkzeugradiuskorrektur
- Angabe der Korrekturrichtung, bezogen auf die Sollkontur.  
(Bei CNC-Steuerung: G41 und G42)

### 4.1.3 Sollwertbildung der Weginformation bei Bahnsteuerung

Es können beliebige Bahnen gefahren werden. Es muss auch hier nur die Sollkontur programmiert werden und der Istradius des Werkzeuges eingegeben werden. Gegenüber der Punkt- und Streckensteuerung sind zusätzlich folgende Angaben notwendig:

- die Interpolationsart : Gerade, Kreisbogen, Parabel
- G17 - G18 - G19 : Ebenenwahl
- G02 - G03 : Interpolationsrichtung bei Kreisinterpolation

In Kenntnis des Werkzeugradius berechnet die Steuerung die Äquidistante und am Ende eines Bahnelementes ermittelt sie einen Übergangskreisbogen, auf dem das Werkzeug zum Anfang des nächsten Bahnelementes geführt wird (siehe Abb. 3-11).



## 4.2 Die Lageeinstellung (Prinzip der Schlittenservosteuerung)

Der Signalflussplan (Abb. 4-2) zeigt die drei Bereiche:

- Dateneingabe
- Führungsgrössenerzeugung
- Lageeinstellung

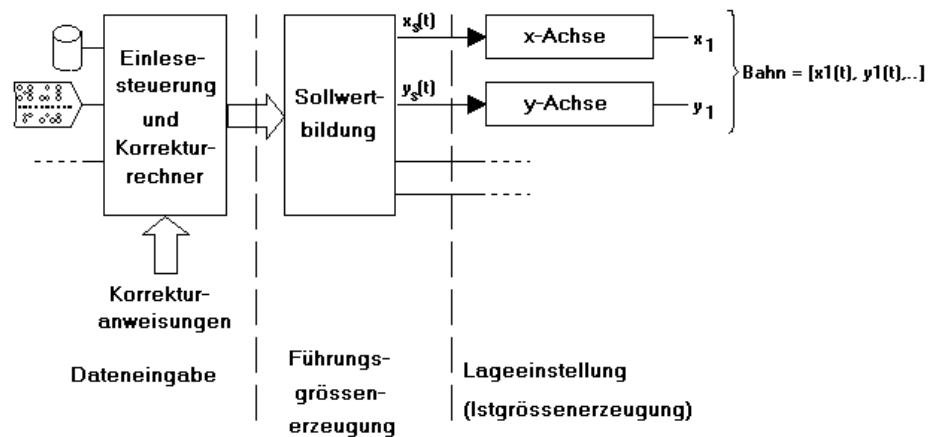


Abb. 4-2 Signalflussplan für die Verarbeitung von Weg- und Geschwindigkeitsinformationen bei CNC-Steuerungen

### Dateneingabe:

NC-Maschinen erhalten die Informationen als codierte Signale entweder durch Handeingabe oder von einem Datenträger oder direkt ab Rechner.

### Führungsgrössenerzeugung:

Die Steuereinheit wertet die Signale aus und gibt sie an die Vorschubantriebe (die Stelleinrichtung für die Relativbewegungen zwischen Werkzeug und Werkstück) als Führungsgrösse weiter.

Dadurch erfolgt eine Lageeinstellung

### Lageeinstellung:

Für **jede** Achse eine **eigene** Lageeinstellung.

Anforderungen:

Die Lage- und Geschwindigkeitswerte müssen mit:

- höchster Geschwindigkeit
- ohne Verzögerungen

in die Relativbewegungen umgesetzt werden.

Bei Bahnsteuerungen (Funktionszusammenhang zwischen den Achsen):

- Anpassung der einzelnen Achsen.

Die Lageeinstellung kann sowohl durch Lagesteuerung als auch durch Lageregelung erfolgen.

### 4.2.1 Lagesteuerung

- Signalfluss nur in einer Richtung
- offener Wirkungsablauf
- Lageistwert wird nicht zurückgemeldet

Lagesteuerungen werden nur bei NC-Maschinen mit kleiner Leistung (z.B. Leiterplattenbohrmaschinen oder Graviermaschinen) eingesetzt. In der Regel werden für die Achsbewegungen Schrittmotoren verwendet.

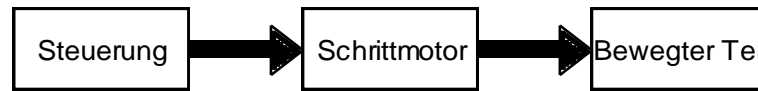


Abb. 4-3 Prinzip der Lagesteuerung

Die Steuerung enthält einen Impulsgenerator. Der Schrittmotor erhält eine gewisse Zahl von Impulsen. Jedem Schritt des Schrittmotors entspricht ein Inkrement des Schlittenvorschubes der Werkzeugmaschine.

Das Drehmoment des Schrittmotors kann einen bestimmten Wert nicht überschreiten. Sollte aus irgend einem Grund eine Überlastung des Antriebes erfolgen (zu hohe Bearbeitungslast, ungenügende Schmierung der Führungen usw.), so verliert der Motor Schritte. Das Sollmass wird nicht erreicht, und sofort entstehen Bearbeitungsfehler. Die Steuerung kann diesen Fehler nicht erkennen, da eine effektive Kontrolle der Ist-Bewegungen fehlt.

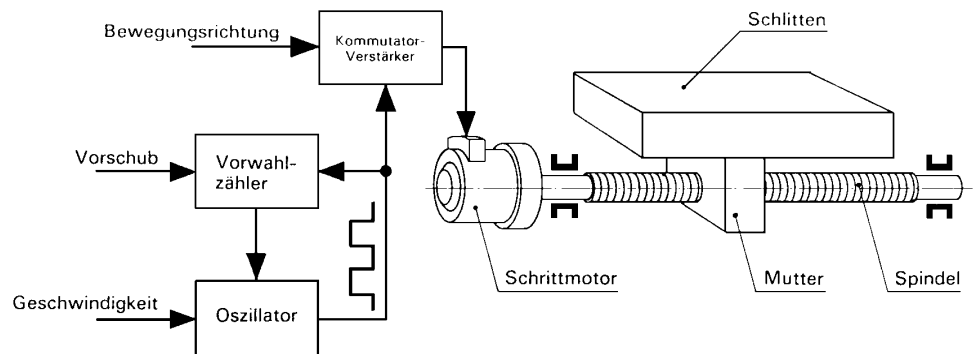


Abb. 4-4 Die numerische Steuerung mit offenem Wirkungskreis

### 4.2.2 Lageregelung

Beim Einsatz von stetigen Antrieben (z.B. Gleichstrommotor) ist ein Regelkreis erforderlich. Mit Hilfe des Lageregelkreises wird die IST-Position des Tisches der SOLL-Position nachgeführt und der Einfluss von Störkräften eliminiert (siehe Abb. 4-5).

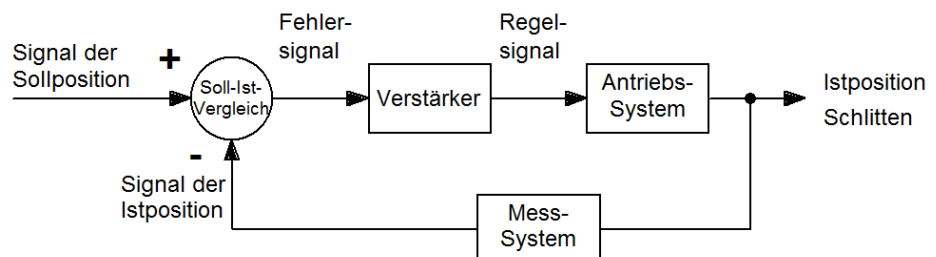


Abb. 4-5 Prinzip der Schlitten-Servosteuerung (Lageregelkreis)

Der Lageregelkreis besteht aus 3 Komponenten (siehe ):

- Regeleinrichtung
- Antriebssystem
- Wegmesssystem

#### 4.2.2.1 Die Regeleinrichtung

Hier wird der Lage-IST-Wert erfasst und zusammen mit dem Lage-Soll-Wert verarbeitet.

Die Differenz zwischen Sollwert ( $w$ ) und Istwert ( $x$ ) wird Regelabweichung ( $x_w$ ) genannt. Im Regler wird aus dieser Differenz eine zeitlich modifizierte Stellgrösse für den Antriebsmotor gebildet. Für schnelle und genaue Regelungen werden neben dem Lageistwert auch Drehzahl und Ankerstrom zurückgeführt (siehe Bild 4.7).

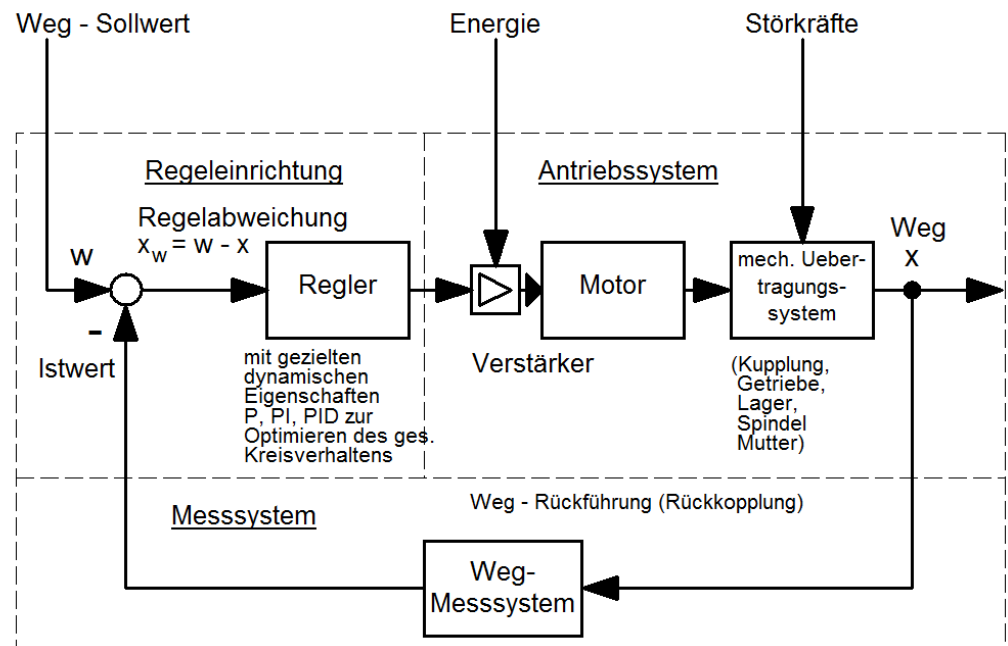


Abb. 4-6 Komponenten eines Lageregelkreises

Die Theorie der Regeltechnik besagt, dass die Genauigkeit der Schlittenpositionierung vorwiegend vom Messsystem abhängt. Die Wahl der Messwertgeber ist massgebend für die Genauigkeit der NC-Werkzeugmaschinen. Die Qualität der Führungen, die Starrheit des Antriebes und die Auflösung des Messsystems sind entscheidende Merkmale der Güte der Steuerung.

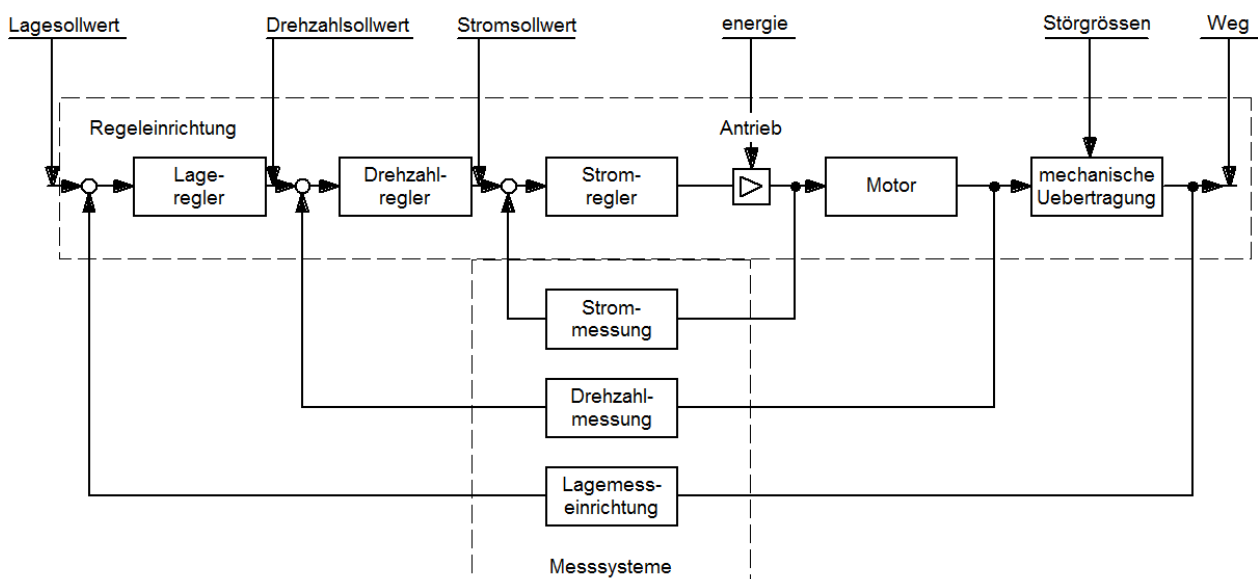


Abb. 4-7 Lageregelkreis mit unterlagerter Regelung der Verfahrgeschwindigkeit und des Motorstroms

#### 4.2.2.2 Antriebssystem

Das Antriebssystem erzeugt die erforderliche Bewegung. Es besteht aus:

- Leistungsverstärker
- Antriebsmotor
- Übertragungselementen

Die Schlittenantriebe sind im Kapitel 4.3 ausführlich beschrieben.

#### 4.2.2.3 Wegmesssystem

Im Wegmesssystem wird der Lage-Istwert erfasst. Es schliesst über die Rückführung den Regelkreis. Die Wegmess-Systeme sind im Kapitel 4.4 detailliert beschrieben.

### 4.3 Schlittenantrieb einer Achse

Zu einem Vorschubantrieb zählen alle Einrichtungen die im Wirkungsbereich zwischen der Ausgangsgrösse der Regeleinrichtung und dem Krafteingriffspunkt zwischen Werkzeug und Werkstück liegen (siehe Abb. 4-6).

Anforderungen an das Vorschubsystem:

- Einzelantrieb für **jede** Achse
- geringes Spiel (spielfrei)
- grosse Steifigkeit
- hohe mechanische Eigenfrequenz
- hohe Dämpfung
- geringe Zeitkonstante des Antriebs
- grosser Regelbereich (stufenlos)

Der erforderliche Aufwand zum Antrieb eines beweglichen Teils einer NC-Werkzeugmaschine, d.h. **eines** NC-Schlittens umfasst im allgemeinen:

- einen Motor, meist mit Tachogenerator verbunden
- einen Drehzahlregler
- eventuell ein Getriebe
- einen Spindel-Mutter-Mechanismus für den Schlittenantrieb

Grosse Werkzeugmaschinen verfügen meist an Stelle des Spindel-Mutter-Mechanismus über einen Zahnstangenantrieb.

Bei grossen Zerspanungskräften werden oft durch Servoventile gesteuerte Hydraulikmotoren verwendet.

#### 4.3.1 Die Motoren

Die Motoren müssen **rasch** und **genau** auf kleinste Veränderungen des Steuerstromes reagieren. Der Läufer muss deshalb ein **geringes Trägheitsmoment** aufweisen und auch bei geringer Drehzahl gleichmässig drehen. Ferner müssen die Motoren eine genügend grosse Maximaldrehzahl aufweisen, damit Eilanggeschwindigkeiten von 25 – 30 m/min möglich sind. Heutige moderne Antriebskonzepte (z.B. Linearmotoren) erlauben Eilanggeschwindigkeiten bis über 100 m/min.

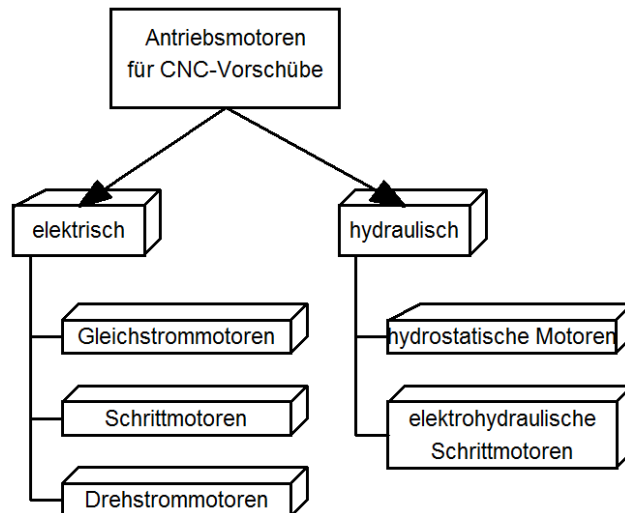


Abb. 4-8 Antriebsmotoren für Vorschübe

#### 4.3.1.1 Gleichstrommotoren

Früher, als die Kosten der Frequenzumformer für Wechselstrommotoren noch sehr hoch lagen, waren die für die Regelkreise am besten geeigneten Motoren Gleichstrommotoren mit Permanentmagneten (DC-Servomotoren). Zur Herabsetzung der Trägheit des Läufers wird dieser in Form eines länglichen Zylinders oder als dünne Scheibe gefertigt (siehe Abb. 4-9). Diese Motoren haben ein hohes Drehmoment und können Drehzahlen von  $3000\text{min}^{-1}$  erreichen. Das Gehäuse ist abgedichtet. Auch ohne Ventilation kann die massive Konstruktion die Erwärmung vertragen.

Die **Tachogeneratoren** sind oft am Motor an- oder eingebaut. Sie geben als Ausgangssignal eine Gleichspannung ab, die proportional zur Drehzahl ist.

Eigenschaften von Gleichstromservomotoren:

- grosser Drehzahlbereich (1:10000)
- Massearm, d.h. kleine Zeitkonstante (6 ms)
- hohes Dauerdrehmoment
- grosses Beschleunigungsmoment

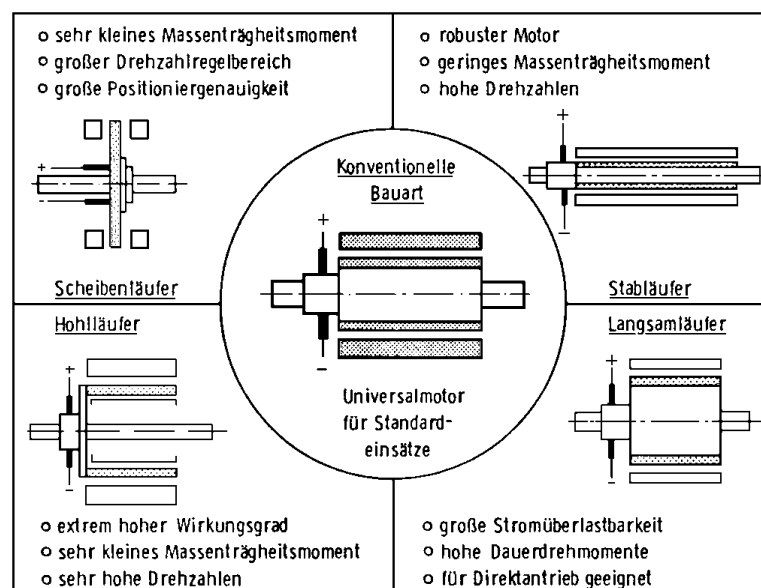


Abb. 4-9 Bauarten von Gleichstrommotoren

**Ziel:**

Mit kleiner Masse und niedrigem Trägheitsmoment eine schnelle Reaktionsfähigkeit erreichen.

**Bauarten:**

- a) Schnell-Läufer (bis ca. 6000 min<sup>-1</sup>)
  - Stabläufer
  - Hohläufer
  - Scheibenläufer
- b) Langsam-Läufer (bis ca. 3000 min<sup>-1</sup>)
  - grosses Drehmoment, auch bei niedriger Drehzahl

**4.3.1.2 Schrittmotoren**

Siehe Erklärungen zur Lagesteuerung (siehe Seite 49).

**4.3.1.3 Drehstrommotoren**

Als Vorschubantrieb sind diese Motoren heute Stand der Technik.

**Vorteile:**

- weitgehende Wartungsfreiheit (kein Kommutator)
- kleinere Baugrössen
- hohe Überlastbarkeit
- hohe Momente (auch beim Abbremsen)
- niedrige Kosten, dank preiswerten Frequenzumformern (kleiner Fr. 1000.- pro kW)

**Nachteile:**

- für variable Drehzahlen braucht man Frequenzumformer
- besondere Regelung, wegen der nichtlinearen dynamischen Struktur

**4.3.1.4 Hydraulische Antriebe****Eigenschaften:**

- schnelles Ansprechen
- stufenlose Drehzahländerung
- grosses Drehmoment
- gleichmässige Drehmomentabgabe

**Nachteile:**

- Preis (eigenes Aggregat zur Druckölerzeugung)
- Drucköl muss auf bewegliche Teile geführt werden (Aggregat steht fest, Tische bewegen sich).

**4.3.2 Der Drehzahlregler**

Dieses Element enthält: (siehe Abb. 4-6, links oben)

- den Vergleich, der die Differenz zwischen Soll- und Istwert der Geschwindigkeit erfasst
- den Regler, der die rasche und schwingungsfreie Reaktion des Motors sicherstellt
- den Verstärker, der die vom Motor benötigte Leistung abgibt.

Der Drehzahlregler arbeitet in vier Quadranten, d.h. die Beschleunigung und Verzögerung des Servomotors wird in beiden Richtungen sichergestellt.

Die trägheitslose Reaktion wird mit elektronischen Verstärkern erreicht (Transistorverstärker).

### 4.3.3 Die kinematische Kette

(mechanische Übertragungselemente)

Die Aufgabe der kinematischen Kette ist es, die vom Vorschubmotor kommende Stellbewegung proportional auf das Bewegungselement (Tisch, Schlitten) zu übertragen.

Alle Glieder dieser Kette müssen **starr** sein, denn mit torsionselastischen Elementen ist eine genaue Positionierung kaum möglich.

Aus dem gleichen Grunde müssen die gesamten Übertragungselemente **spielfrei** sein.

**Geringe Trägheit** trägt zur raschen Positionierung bei.

Da sich die erste und die dritte Forderung widersprechen, muss ein optimaler Kompromiss gesucht werden.

Die kinematische Kette muss deshalb so kurz und direkt wie möglich sein. Falls es die Eigenschaften des Motors und die Platzverhältnisse erlauben, wird auf ein Getriebe verzichtet, indem der Motor die Spindel direkt antreibt. Anderenfalls baut man eine spielfreie Untersetzungsstufe mit einem Zahnradpaar oder einem Zahnriemen ein.

Als Vorschubspindeln für NC-Werkzeugmaschinen werden Kugelumlaufspindeln, Planetenspindeln oder hydrostatische Spindelmuttern verwendet.

Die Spindel ist in einem Lager geführt, das besonders starr und spielfrei sein muss. Dazu sind folgende Gesichtspunkte zu betrachten:

- Lagergehäuse mit Flansch an Gestellwand abstützen
- Gestellwand dick und verrippt
- Achsialrollenlager statt Achsialkugellager
- evtl. Vorschubspindel beidseits in Fixlager
- über 3 m Länge keine Gewindespindel mehr benützen, sondern Zahnstangen-Ritzel-Antrieb
- hydraulisch vorgespannter Doppelritzelantrieb
- gegeneinander wirkender Doppelritzelantrieb (elektrisch)

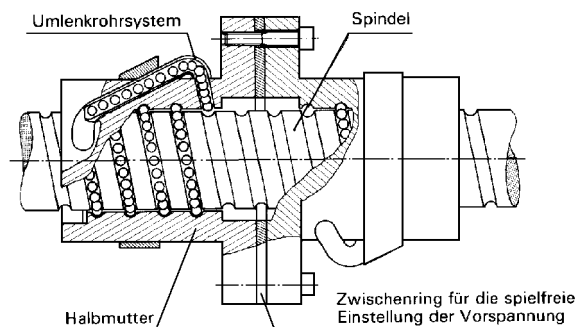


Abb. 4-10 Kugelumlaufspindel

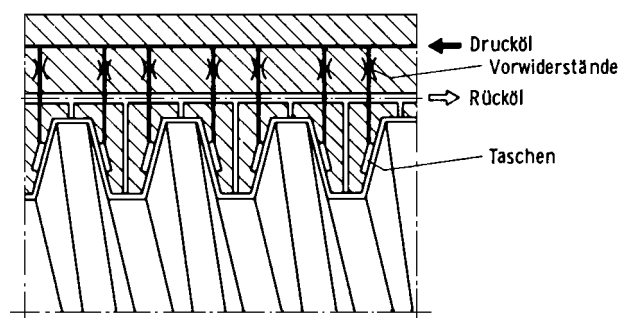


Abb. 4-11 Hydrostatische Spindelmutter

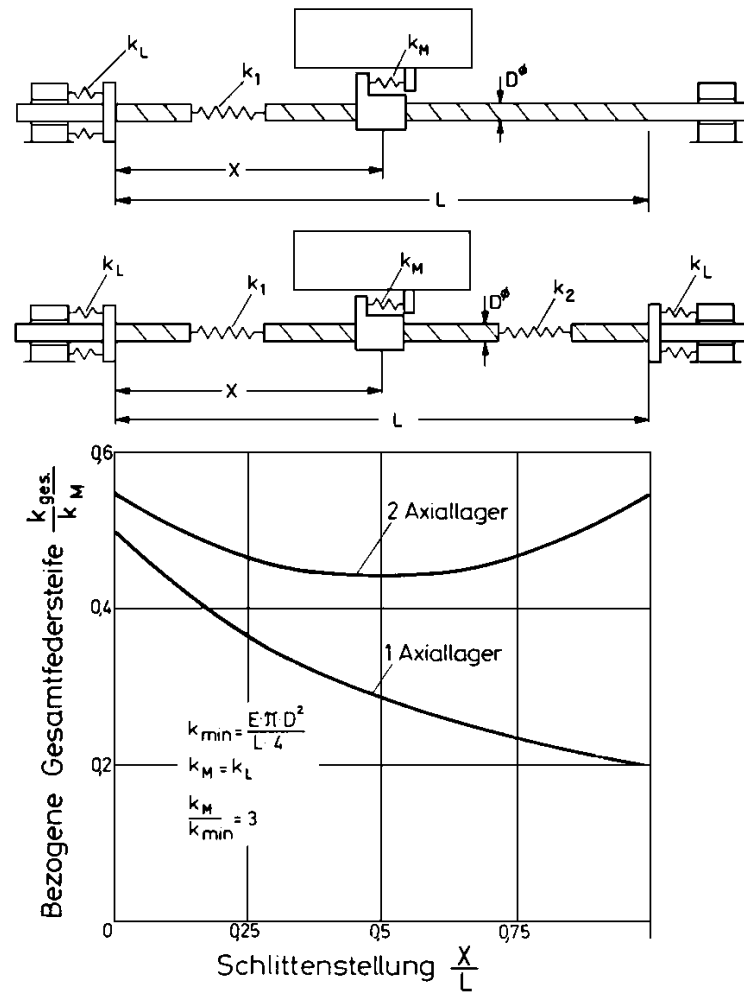


Abb. 4-12 Steifigkeitsverhalten eines Spindelantriebs mit einseitigem und doppelseitigem Axialfestlager

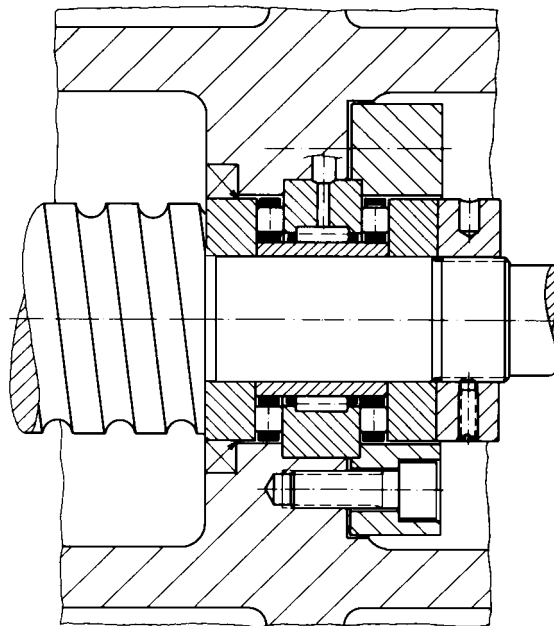


Abb. 4-13 Einbaubeispiel für kombiniertes Radial-Axial-Rollenlager für eine Kugelumlaufspindel



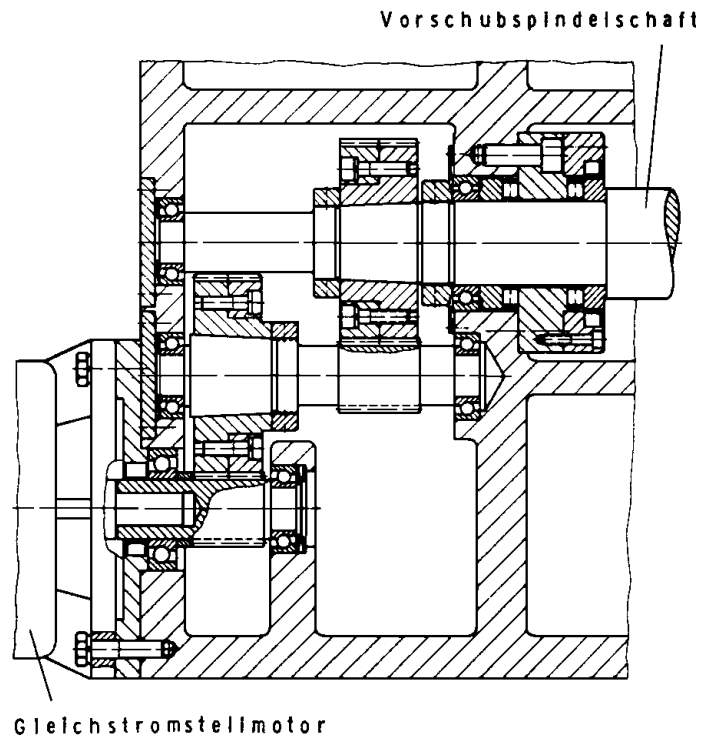


Abb. 4-14 Spielfreies Getriebe für Vorschubspindeln

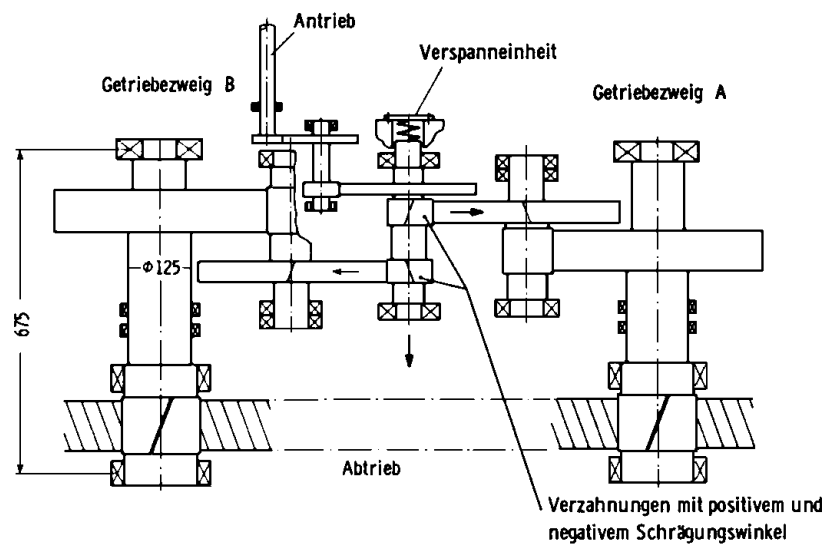


Abb. 4-15 Spielfreier Vorschubantrieb mit Zahnstange-Ritzel

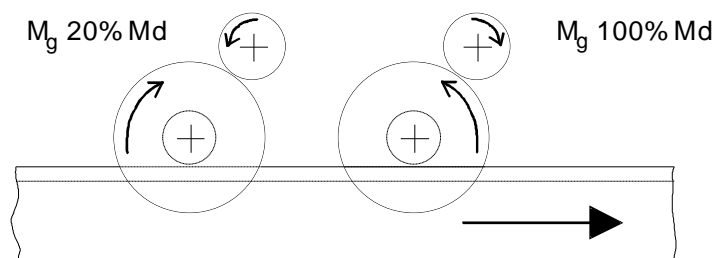


Abb. 4-16 Doppelantrieb gegeneinander wirkend

## 4.4 Wegmess-Systeme

Jede gesteuerte Achse braucht eine Information über den Lage-IST-Wert. Aufgabe der Wegmesseinrichtung ist es, den Lageistwert zu bestimmen, und durch Rückführung den Lageregelkreis zu schliessen. Die Genauigkeit des Messsystems hat einen direkten Einfluss auf die Genauigkeit der Positionierung und somit auf die Werkstückgenauigkeit.

Definitionen:

**Messgrösse:**

Grösse, deren Wert durch die Messung ermittelt werden soll (z.B. Weg, Winkel etc.)

**Messwert:**

Der ermittelte Wert der Messgrösse (z.B. 345.234 mm)

**Messaufnehmer:**

Das ist das Messgerät (Messgeber, Sensor), das an seinem Eingang die Messgrösse aufnimmt und an seinem Ausgang ein entsprechendes Mess-Signal abgibt.

**Auflösung:**

Die kleinste erfassbare Änderung der Messgrösse.

Beispiele:

- Bohrmaschine  $5\mu\text{m}$ ,
- Präzisions Bohr- und Fräswerke  $1\mu\text{m}$
- Messmaschinen  $0.5\mu\text{m}$

### 4.4.1 Wahl des Einbauortes in der kinematischen Kette

Grundsätzlich lässt sich der Messaufnehmer an 4 Orten einbauen. Für die Genauigkeit ist die Wahl dieses Ortes von grösster Bedeutung.

**a) Drehgeber an Motor (siehe Abb. 4-17)**

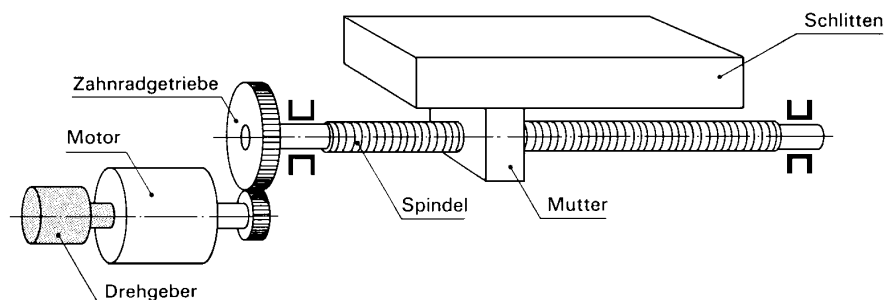


Abb. 4-17 Drehgeber an der Motorwelle eingebaut

Dieser Aufbau ist unzweckmässig, denn zwischen der gemessenen Stellung und der wirklichen Stellung treten folgende Fehler auf:

- Fehler in der Spindelsteigung / Fehler in der Getriebeverzahnung
- Verzahnungsspiel, Spindelspiel
- Thermische Ausdehnung der Spindel
- Elastizität der Zahnräder, der Lager und der Berührung zwischen Spindel und Mutter
- Elastizität der Spindel infolge Torsion und Zugkraft
- Funktion einer Rutschkupplung verfälscht Messergebnis

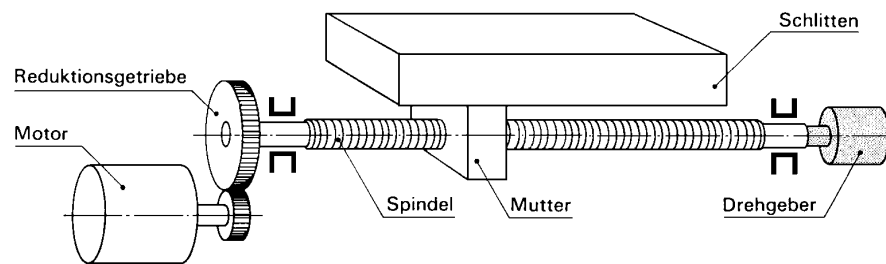
**b) Drehgeber am freien Ende der Spindel (siehe Abb. 4-18)**

Abb. 4-18 Drehgeber am freien Ende der Spindel eingebaut

In dieser Ausführung ist der Drehgeber am Ende des nicht torsionsbelasteten Spindelteils angebracht, was eine bessere Lösung ist, als in Abb. 4-17 dargestellt. Zwischen der gemessenen Position und der Istposition treten folgende Fehlereinflüsse auf:

- Fehler in der Spindelsteigung
- Spiel und Elastizität zwischen Mutter und Spindel
- Thermische Ausdehnungen der Spindel

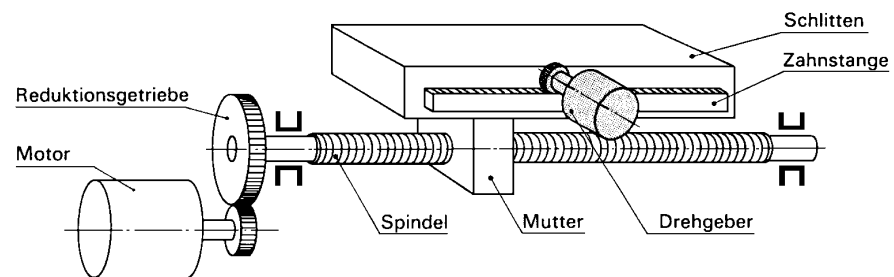
**b) Drehgeber am beweglichen Teil (siehe Abb. 4-19)**

Abb. 4-19 Drehgeber am beweglichen Teil (Schlitten, Drehtisch) eingebaut

In dieser Anordnung wird die direkte Messung der Schlittenbewegung mit einem Drehgeber ermöglicht. Diese Lösung ist kostengünstiger als die lineare Anordnung, besonders für lange Wege. Man muss allerdings die Zahnschlifffehler des Zahnrades und der Zahnstange in Betracht ziehen.

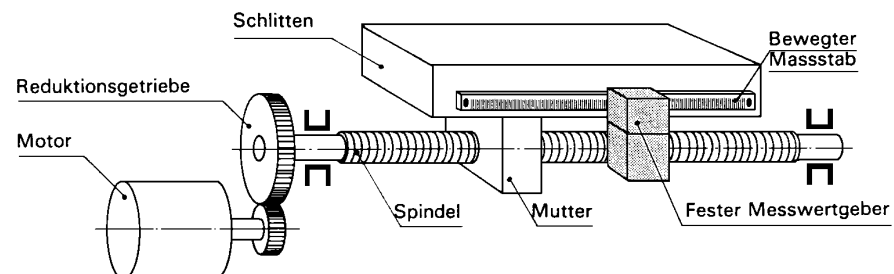
**c) Wegmessgeber am beweglichen Teil (siehe Abb. 4-20)**

Abb. 4-20 Wegmessgeber an beweglichen Teil eingebaut

Die Wegmessung mit einem Massstab, der direkt am Schlitten angebracht ist, ist bezüglich Genauigkeit die befriedigendste Lösung. Die einzige verbleibende Fehlerquelle liegt im Geber selbst. Diese Anordnung ist teurer als die andern; sie wird deshalb im Normalfall in Präzisionsmaschinen eingebaut.

#### 4.4.2 Systematik der Wegmess - Systeme

Die Wegmess-Systeme lassen sich wie folgt unterteilen:

- direkte / indirekte Wegmessung
- analoge / digitale Wegmessung
- relative / absolute Wegmessung

Ein Wegmess-System besteht zwingend aus je einer Eigenschaft der obigen drei Zeilen. Es sind nicht alle theoretisch 8 Kombinationen sinnvoll. Abb. 4-21 zeigt eine Übersicht der im Werkzeugmaschinenbau verwendeten Wegmess-Systeme.

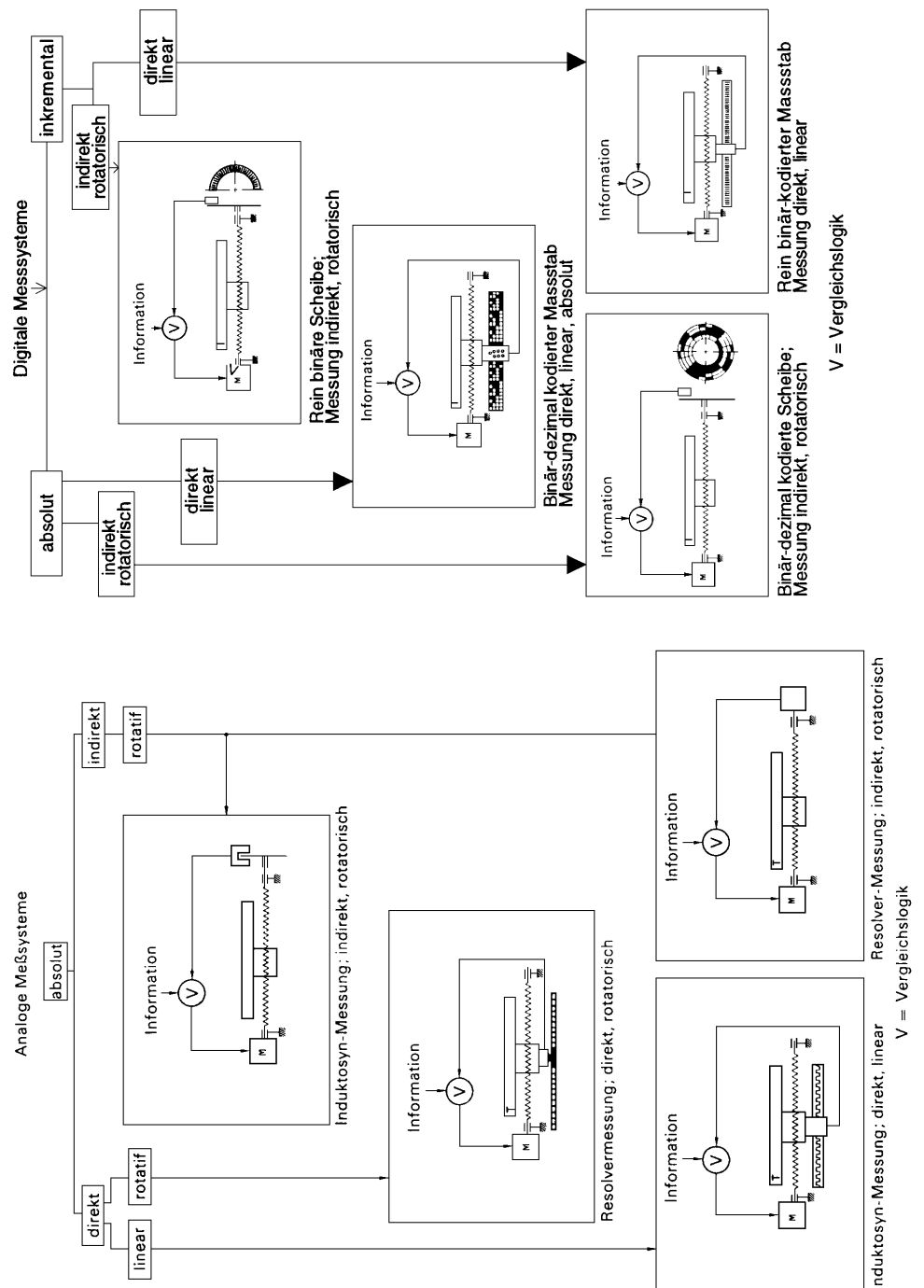


Abb. 4-21 Übersicht: Mess-Systeme und ihre Anordnung

#### 4.4.2.1 Direkte / Indirekte Wegmessung

Bei der direkten Messwerterfassung gewinnt man den Messwert durch einen unmittelbaren Vergleich zwischen der Messgrösse und der entsprechenden Bezugsgrösse. Bei der indirekten Messwerterfassung wird die gesuchte Messgrösse in eine andersartige physikalische Grösse umgewandelt und aus dieser der Messwert ermittelt.

Die indirekte Wegmessung wird rotativ durchgeführt (siehe Abb. 4-17 - Abb. 4-19).

Die direkte Wegmessung wird linear oder rotativ durchgeführt (Abb. 4-20 und Abb. 4-21).

#### 4.4.2.2 Analoge / Digitale Wegmessung

Die analoge Messwerterfassung ist dadurch gekennzeichnet, dass innerhalb des Messbereichs jedem Wert der Messgrösse stetig ein entsprechender Messwert zugeordnet werden kann. Ein Beispiel dafür ist das Schiebepotentiometer, bei dem eine stetige Zuordnung zwischen der Messgrösse (Weg  $x$ ) und der analogen Ausgangsgrösse (Spannung  $U$ ) besteht.

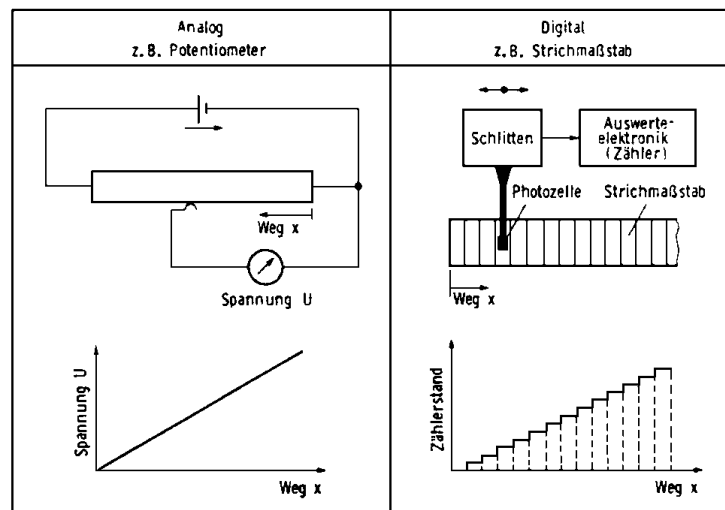


Abb. 4-22 Prinzip der analogen und digitalen Messwerterfassung

Bei der digitalen Messwerterfassung wird die zu messende Grösse in gleichmässige Abschnitte aufgeteilt und der Messwert als Vielfaches des kleinsten Abschnittes dargestellt.

Das Beispiel in Abb. 4-22 zeigt die Aufteilung des zu messenden Wegs  $x$  in gleiche Wegabschnitte (Strichabstand des Massstabs).

Der Messwert wird durch Zählen der einzelnen Wegabschnitte oder durch direktes Ablesen der Stellenwerte gewonnen und kann mit Hilfe der Auswertelektronik ausgewertet und angezeigt werden.

#### 4.4.2.3 Relative / Absolute Messwerterfassung

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Ausführungsart des verwendeten Massstabs. Die digitale Messung lässt sich unterteilen in:

- digital-relative (inkrementale) Messwerterfassung
- digital-absolute (codierte) Messwerterfassung

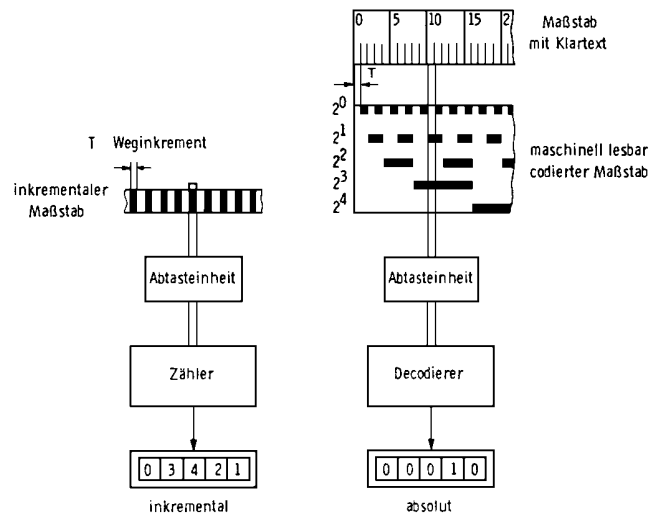


Abb. 4-23 Beispiel einer inkrementalen / absoluten Wegmessung

Bei der digital-inkrementalen Messwerterfassung werden die periodischen Mess-Signale während des Verfahrens einer Wegstrecke gezählt und zur Anzeige gebracht (siehe Abb. 4-23).

Da man mit der Impulszählung bei jeder beliebigen Position beginnen kann, wird diese Messung als relative Messung bezeichnet.

Die digital-absolute Messwerterfassung ist durch eine feste Zuordnung zwischen Messgröße und Messwert charakterisiert.

In Abb. 4-23 ist jede Position auf dem Maßstab durch eine eindeutige Kombination codierter Spuren gekennzeichnet.

Die wichtigsten Vorteile der absoluten Messwerterfassung gegenüber der inkrementalen Erfassung sind:

- Jeder Messwert ist auf einen festgelegten Nullpunkt bezogen und direkt ablesbar
- Kumulative Messfehler (Kettenmessfehler) treten nicht auf
- Der richtige Messwert bleibt auch nach Störungen (Spannungsausfall) ohne besondere Hilfsmassnahmen erhalten

Die absolut-digitale Messwerterfassung hat jedoch auch Nachteile:

- Wird eine hohe Messgenauigkeit über grössere Messbereiche verlangt, so ist der Aufwand durch die grosse Anzahl erforderlicher Codespuren sehr gross.

**Analoge Systeme** sind nach Definition (Abb. 4-22) **absolute** Messsysteme!

#### 4.4.2.4 Zyklisch-Absolute Messsysteme

Da die Auflösung der rein analogen Messwerterfassung in der Regel nicht ausreicht, wendet man häufig das sogenannte zyklisch-absolute Messverfahren an, das einer Kombination von inkrementaler mit absoluter (analoger) Messung entspricht.

Das Funktionsprinzip der zyklisch-absoluten oder halbabsoluten Messung zeigt Abb. 4-24. Innerhalb sich wiederholender Periodenlängen (Messzyklen) wird der Weg  $x$  mit Hilfe eines analogen Systems gemessen. Zusätzlich zählt man die Anzahl der im Weg  $x$  durchlaufenen Zyklen, so dass sich der aktuell gefahrene Weg wie folgt ergibt:

$$x = n(x) \tau + x^* \quad (0 \leq x^* \leq \tau \text{ und } n = 0, 1, 2, \dots) \quad x^* = \frac{h(x)}{h_0} \tau$$

mit  $h(x)$  als analoge Messgröße (z.B. Spannung  $U$ ),  $h_0$  als Maximalwert der analogen Messgröße und  $\tau$  als Messzyklus

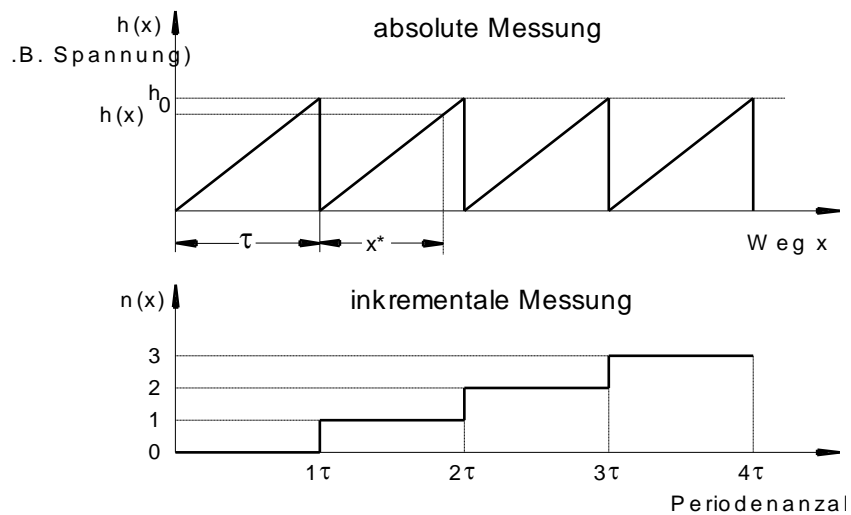


Abb. 4-24 Prinzip der zyklisch-absoluten Wegmessung

$$x = n(x) \tau + x^*$$

$$x^* = \frac{h(x)}{h_0} \tau$$

Der Anzeigemechanismus eines Dekadenpotentiometers ist ein Beispiel für die praktische Anwendung der zyklisch-absoluten Messung.

#### 4.4.2.5 Pseudo-Absolute Wegmesssysteme

Die Forderung, absolut und preiswert zu messen, hat zu Entwicklungen geführt, die man als pseudo-absolut bezeichnet:

Die Massstabteilung besteht hier aus dem inkrementalen Strichgitter und einer parallel dazu verlaufenden Referenzmarkenspur. Der Abstand zwischen den einzelnen Referenzmarken beträgt rund 10 mm, er ist jedoch nicht konstant, sondern definiert unterschiedlich. Durch Auszählen der Messschritte von einer Referenzmarke zur nächsten kann deshalb die absolute Position bestimmt werden. Bei diesem Längenmesssystem steht der absolute Positionswert nach nur max. 20 mm Verfahrstrecke zur Verfügung (Abb. 4-25).

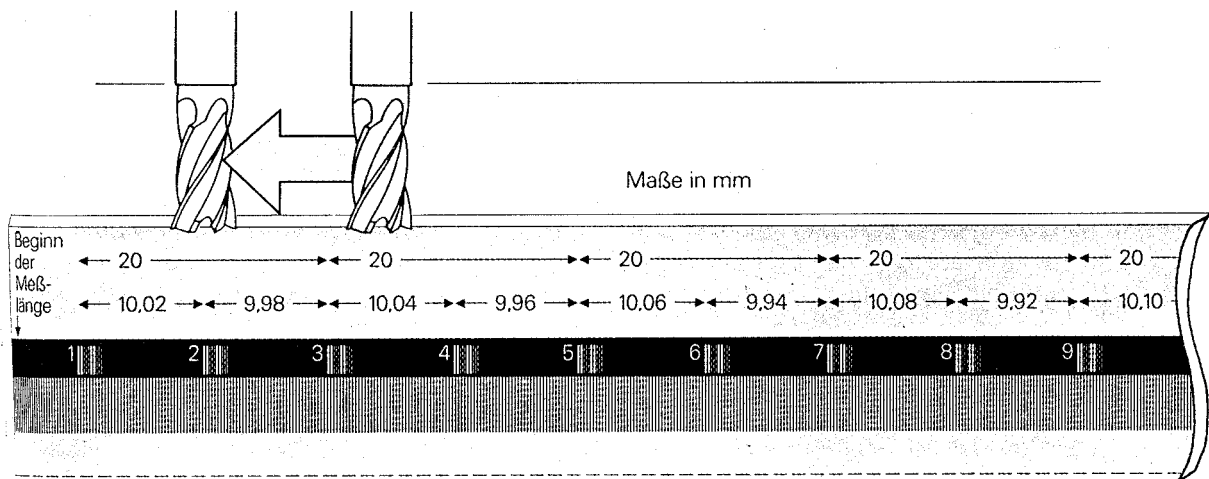


Abb. 4-25 Inkrementaler Massstab mit abstandscodierten Referenzmarken

#### 4.4.2.6 Absolute Wegmesssysteme mit seriellem Code

Da digitale absolute Wegmesssysteme schon für relativ kurze Verfahrswege viele Abtastspuren brauchen, wurde ein weiteres absolutes Messverfahren entwickelt. Die Position lässt sich (ähnlich wie beim pseudoabsoluten Messsystem in Abb. 4-25) aus nur zwei Teilungsspuren ermitteln. Neben der inkrementalen Spur mit einer feinen Teilung wird eine zweite Spur mit einem seriellen Code verwendet (Abb. 4-26).

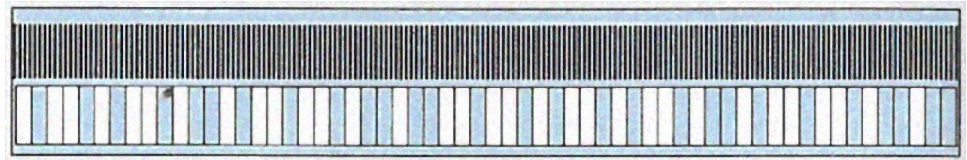


Abb. 4-26 Massstab mit seriellem Code

Der **serielle Code** – auch Pseudo-Random-Code (PRC) genannt – wird mit einem Zeilensensor bzw. einem Abtast-ASIC mehrfach abgetastet (Abb. 4-27) und die absolute Position kann eindeutig einer Signalperiode der feinen Spur zugeordnet werden.

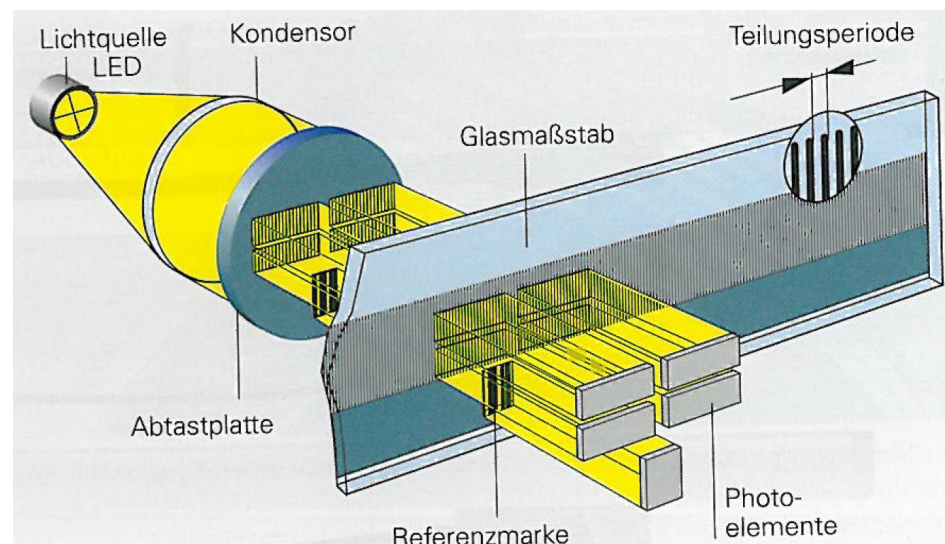


Abb. 4-27 Prinzip der photoelektrischen Abtastung eines absoluten Längenmassstabs mit 2 Spuren

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



### 4.4.3 Messgeräte

#### 4.4.3.1 Digitale Messgeräte

##### lineares inkrementales Wegmess-System: (Abb. 4-28)

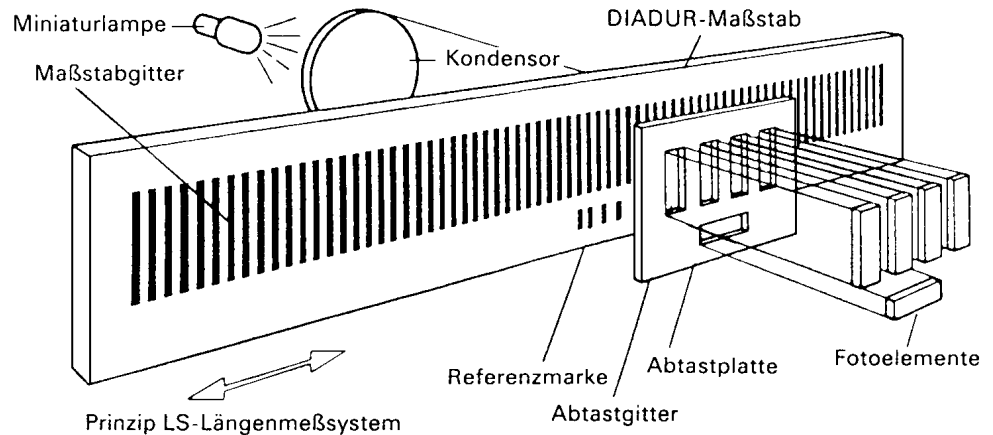


Abb. 4-28 Prinzip eines inkrementalen linearen Messsystems (Heidenhain)

Abb. 4-29 zeigt den Aufbau der photoelektrischen Abtastung bei inkrementalen Verfahren. Der Glas-Massstab ist mit einer Teilung höchster Präzision versehen, die auf einer dünnen Metallschicht von 0,001mm Dicke eingraviert ist. Beim **Durchlichtverfahren** (Abb. 4-29, rechts) befindet sich der Photoempfänger hinter dem Massstab, beim **Auflichtverfahren** (Abb. 4-29, links) vor dem Massstab, d.h. das Strichgitter muss reflektierend ausgeführt sein. Da die aktive Fläche der Photozelle mehrere Teilstriche des Massstabs überdeckt, muss ein Abtastgitter zwischen Lichtquelle und Empfänger eingebaut sein.

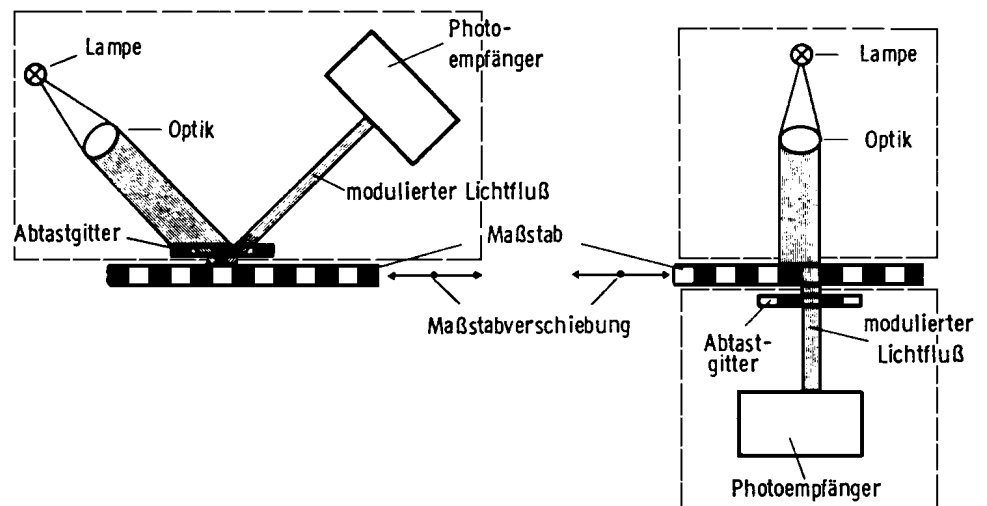
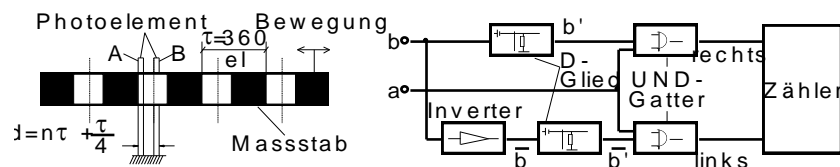


Abb. 4-29 Prinzip der photoelektrischen Abtastung bei inkrementalen Verfahren

Wird der Massstab nach links oder rechts bewegt, könnte man mit einer Einzelzelle die Bewegungsrichtung nicht erkennen, da jeder Impuls lediglich das Durchlaufen eines Striches meldet. Man muss dem Zähler mitteilen, ob der Impuls zu oder abgezählt werden soll. Aus diesem Grund besteht das Raster aus zwei gegeneinander um eine Viertelteilung versetzten Gittern. Der Massstab liefert je nach Bewegungsrichtung zwei elektrisch um  $+90^\circ$  oder  $-90^\circ$  gegeneinander verschobene Rechtecksignale.



- a: Signal des Photoelementes A  
 b: Signal des Photoelementes B  
 d: Räumliche Verschiebung zwischen den Photoelementen A und B bzw. Abtastgittern

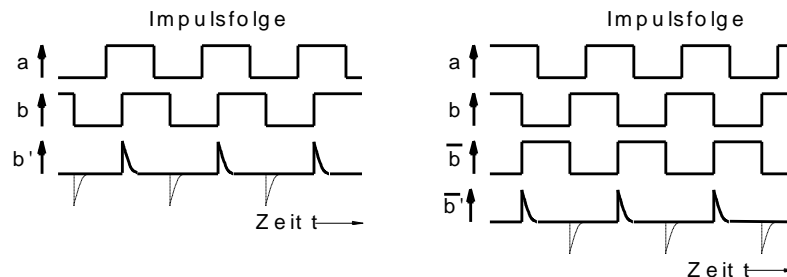


Abb. 4-30 Richtungserkennung bei inkrementalen Messsystemen

Die beiden Signale werden aufbereitet (z.B. Schmitt - Trigger) und in die Rechtecksignalfolgen a und b aufgeteilt. Abb. 4-30 zeigt, dass die beiden Signalfolgen immer noch den Phasenversatz von 90° aufweisen, wobei b einmal vor- und einmal nachläuft. In einer Auswerteschaltung wird das Signal b und das inverse Signal  $\bar{b}$  differenziert und die Signale  $b'$  und  $\bar{b}'$  gewonnen.

In Abhängigkeit der Bewegungsrichtung entscheidet die Lage der Impulse  $b'$  und  $\bar{b}'$  zur Rechteckfolge a, ob der angeschlossene Zähler aufwärts oder abwärts zählen soll.

#### inkrementaler Drehgeber: (Abb. 4-31)

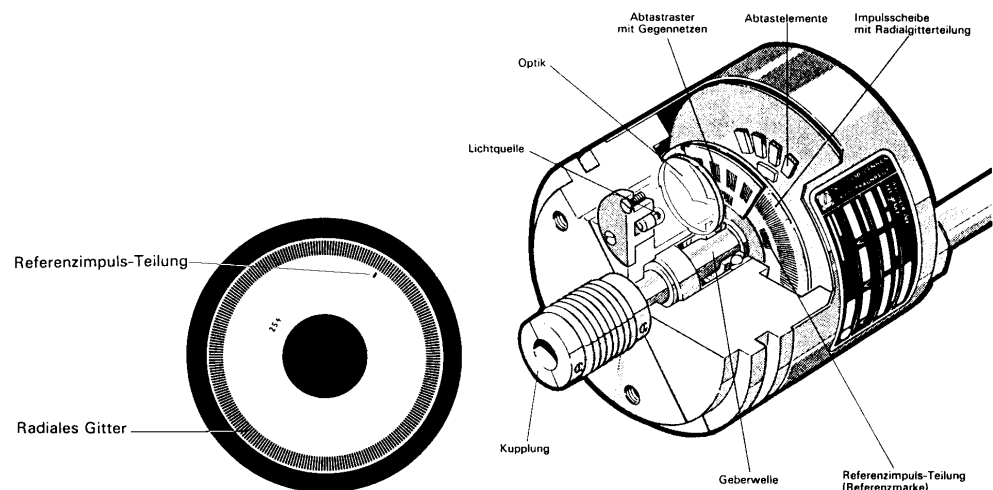


Abb. 4-31 Innerer Aufbau eines inkrementalen photoelektrischen Drehgebers (Heidenhain)

Inkrementale Drehgeber sind vom Prinzip her gleich aufgebaut, wie inkrementale lineare Wegmesssysteme. Anstelle des Glasmassstabs ist eine Impulsscheibe mit radialem Gitter eingebaut. Es wird das Durchlichtverfahren verwendet.

Übliche Gitterteilungen: bis 20'000 (für Spezialanwendungen bis 40'000)

Übliche max. Abtastfrequenz: bis rund 250 kHz.

Beispiel: Schlittenantrieb einer Fräsmaschine mit Spindelsteigung 5 mm  
 Gewünschte Auflösung : 2  $\mu\text{m}$  → Welche Gitterteilung?  
 Eilgang: 9 m/min → Welche Abtastfrequenz?

### lineares absolutes Wegmess-System: (Abb. 4-32)

Im Gegensatz zum inkrementalen Verfahren wird bei den codierten Mess-Systemen jedem Wegelement ein eindeutiger Zahlenwert zugeordnet. Abb. 4-32 zeigt die schematische Abbildung eines codierten Massstabs, der eine geringe Anzahl von Spuren aufweist. Es gibt verschiedene Möglichkeiten zur Codierung eines Massstabintervalls. Die gebräuchlichsten sind der Dual- und der Gray-Code. Diesen Binärcodes werden die Werte wie folgt zugewiesen:

- 0 durchsichtig bzw. reflektierend
- 1 nicht durchsichtig bzw. nicht reflektierend

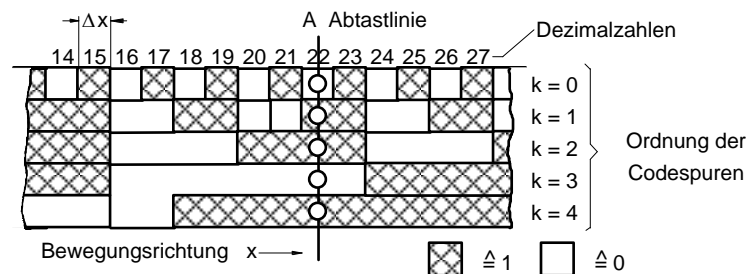


Abb. 4-32 Fünfspuriges binär-codiertes Lineal

Im Beispiel gemäss Abb. 4-32 wird entlang der Abtastlinie der duale Wert 10110 abgelesen. Dieser entspricht der Dezimalzahl 22.

Die Anzahl der erforderlichen Spuren  $n$  ist vom Messbereich  $x_{\text{ges}}$  und der Auflösung abhängig. Die entsprechende Gleichung lautet:

$$n = \frac{\log\left(\frac{x_{\text{ges}}}{\Delta x}\right)}{\log(2)}$$

Die Abtastung des Massstabs in der beschriebenen Art kann aber auch zu Fehlinformationen führen. Wenn sich auf mehreren Spuren die dualen Zustände miteinander ändern, jedoch wegen der endlichen Abmasse der Abtastelemente der Übergang nicht exakt gleichzeitig einsetzt sind falsche Dekodierungen möglich. So ist beispielsweise an der Übergangsstelle zwischen den Wegelemente 21 und 22 folgende Dekodierung möglich:

$$\begin{array}{ll} 10101 & = 21 \\ 10100 & = 20 \\ 10110 & = 22 \end{array} \quad \text{oder} \quad \begin{array}{ll} 10101 & = 21 \\ 10111 & = 23 \\ 10110 & = 22 \end{array}$$

Man beachte: Es ändern nur die zwei niederwertigsten Stellen!

Solche Fehlinterpretationen sind durch folgende Massnahmen vermeidbar:

- Codierung des Massstabs mit dem Cray-Code  
 Während des Übergangs von einem Wert zum andern tritt bei dieser Codierung nur in einer Spur eine Zustandsänderung auf.
- Abtastung jeder Spur (mit Ausnahme der feinsten) eines dualcodierten Massstabs mit zwei Abtastköpfen im Abstand  $k \cdot A/2$ . Abb. 4-33 zeigt das Prinzip dieser sogenannten V-Abtastung.

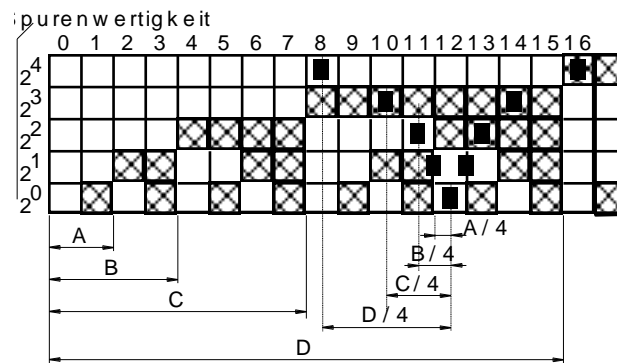


Abb. 4-33 Dual codierte Wegmassstab mit V-Abtastung

Das Prinzip besteht darin, dass jeweils beim Lesen des Wertes "0" in der niederwertigen Spur der Wert des vorausseilenden Abtasters in der nächst höherwertigen Spur Gültigkeit hat. Wird der Wert "1" gelesen, so hat der nacheilende Abtaster der höherwertigen Spur Gültigkeit. Auf diese Weise lässt sich der Messwert eindeutig ablesen. Wegen der Anordnung der Abtastköpfe bezeichnet man diesen Vorgang als **"V-Abtastung"**. Die hohe Zahl der Abtastköpfe verursacht bei dieser Lösung allerdings hohe Kosten.

Beispiel: Wie viele Spuren braucht ein digitales absolutes Wegmess-System, um einen Weg von 400mm mit einer Auflösung von 1µm abzutasten?

#### absolute Drehgeber: (Abb. 4-34)

Der Aufbau der absoluten Drehgeber gleicht stark jenem der Linear-Mess-Systeme. Anstelle des codierten Massstabs trägt die Antriebswelle eine codierte Scheibe (in der Regel aus bruchfestem Kunststoff).

Die Abtastprobleme sind dieselben und werden auf dieselbe Art gelöst.

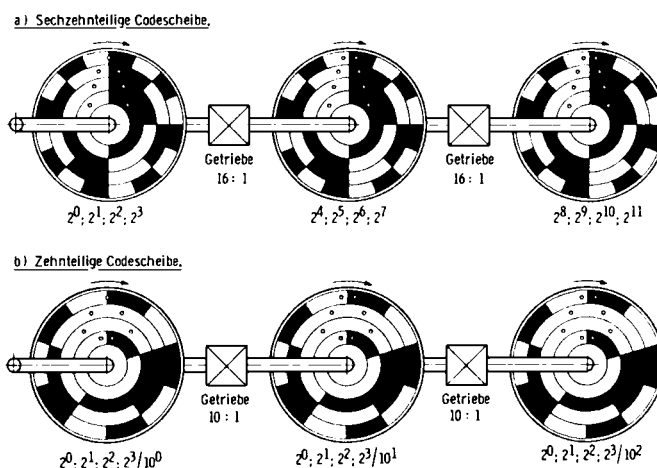


Abb. 4-34 Prinzipieller Aufbau eines binär codierten und eines binär-dezimal-codierten Winkelcodieres mit einem Messbereich von mehr als einer Umdrehung

Zur Erzielung einer höheren Auflösung können mehrere Abtastgruppen in einem Gehäuse untergebracht und über ein Präzisionsgetriebe miteinander verbunden werden. Das Flankenspiel zwischen den Abtastgruppen muss dabei ausgeschaltet werden, so dass die Messgenauigkeit im gesamten Messbereich gleichbleibend ist.

#### 4.4.3.2 Analoge Messgeräte

Ohmsche Aufnehmer (Potentiometer) und elektromagnetische Aufnehmer (Induktosyn und Resolver) gehören zu den am häufigst eingesetzten analogen Weg und Winkelmesssystemen.

##### Ohmsche Aufnehmer: (linear und rotativ) (Abb. 4-35)

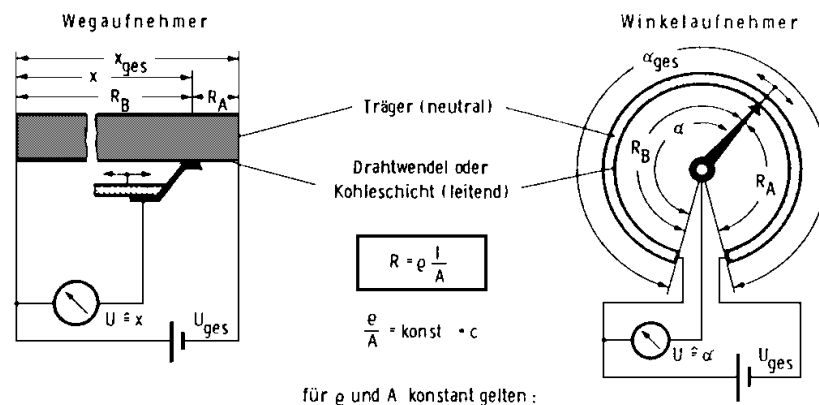


Abb. 4-35 Beispiele für ohmsche Aufnehmer

Die Messung von Weg- oder Winkeländerungen mit ohmschen Aufnehmern basiert auf dem linearen Zusammenhang zwischen dem elektrischen Widerstand des Messkörpers und dem zu messenden Weg oder Winkel.

Der Trägerkörper besteht aus isolierendem Material, auf das ein Widerstandsdraht wendelförmig aufgebracht oder eine Filmschicht (Metall, Kohle) aufgedampft wird.

Das Auflösungsvermögen ist im ersten Fall durch den Abstand zweier Wendeln gegeben. Drehwinkel bis  $10 \cdot 360^\circ$  lassen sich durch zehngängige Potentiometer messen.

Verschmutzungen (Staub, Öl) verursachen eine Erhöhung des Übergangswiderstands an der Abgriffstelle und führen zu einer Verletzung der Linearitätsbedingungen und damit zu Messfehlern. Aus diesem Grund müssen solche Messeinrichtungen gut geschützt sein.

Da die Auflösung rund  $10^{-3}$  bis  $10^{-4}$  der Massstablänge beträgt, können z.B. bei einer Auflösung von 0,01mm nur Wege bis etwa 100mm gemessen werden. Das Potentiometer als Wegmesssystem hat sich deshalb bei Werkzeugmaschinen nicht durchsetzen können, da normalerweise größere Messbereiche zu erfassen sind.

##### Elektromagnetische Aufnehmer:

Elektromagnetische Aufnehmer basieren auf dem Induktionsprinzip.

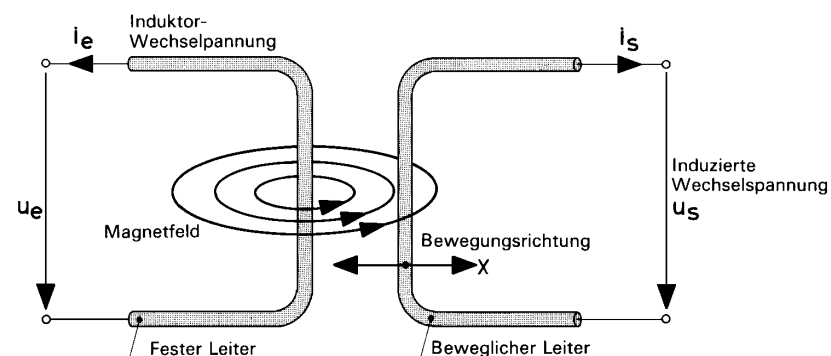


Abb. 4-36 Das Induktionsprinzip

Die Amplitude der induzierten Spannung hängt von der Position des beweglichen Leiters ab. Entfernt sich der induzierte Leiter, nimmt die induzierte Spannung ab. Man kann somit den Messwert der induzierten Spannung zur Bestimmung des Weges heranziehen.

Zwei der gebräuchlichen elektromagnetischen Messsysteme sind das **Induktosyn** und der **Resolver**.

#### Induktosyn (Abb. 4-37)

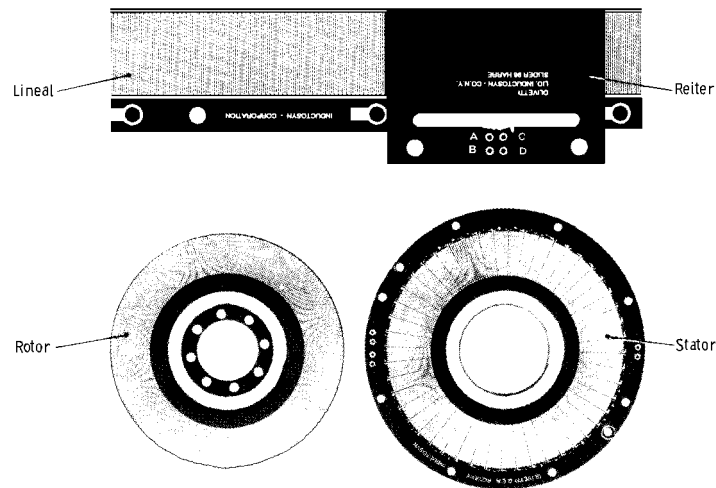


Abb. 4-37 Ausführungsbeispiele des Induktosyns

Für die Längenmessung setzt man das Linear-Induktosyn, während das Rund-Induktosyn für Winkelmessungen verwendet wird. Die Funktionsweise beider Messsysteme ist identisch, sie unterscheiden sich nur in ihrem mechanischen Aufbau (siehe Abb. 4-37). Beide zählen zu den zyklisch-absoluten Messsystemen.

Die Komponenten des Linear-Induktosyns (Lineal und Reiter) enthalten mäanderförmige Leiterwicklungen, die in Form einer gedruckten Schaltung auf dem Grundkörper, welcher unmagnetisch sein muss, angebracht sind.

Der Gleiter hat zwei kurze Wicklungen mit derselben Steigung wie der Massstab, aber sie sind ein Viertelschritt gegeneinander verschoben.

Der Massstab und der Gleiter sind am festen bzw. am beweglichen Teil des Schlittens angebracht.

Die Wicklungen befinden sich übereinander, getrennt durch einen Abstand von 0.2mm. Die Steigung beträgt in der Regel 2mm oder 1/10".

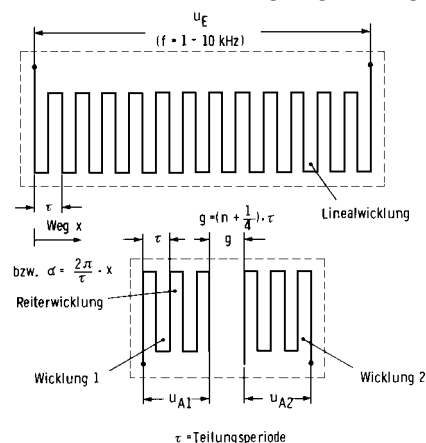


Abb. 4-38 Wicklungsanordnung des Linearinduktosyns

Abb. 4-39 zeigt, wie ein Linearinduktosyn in eine NC-Maschine eingebaut wird.

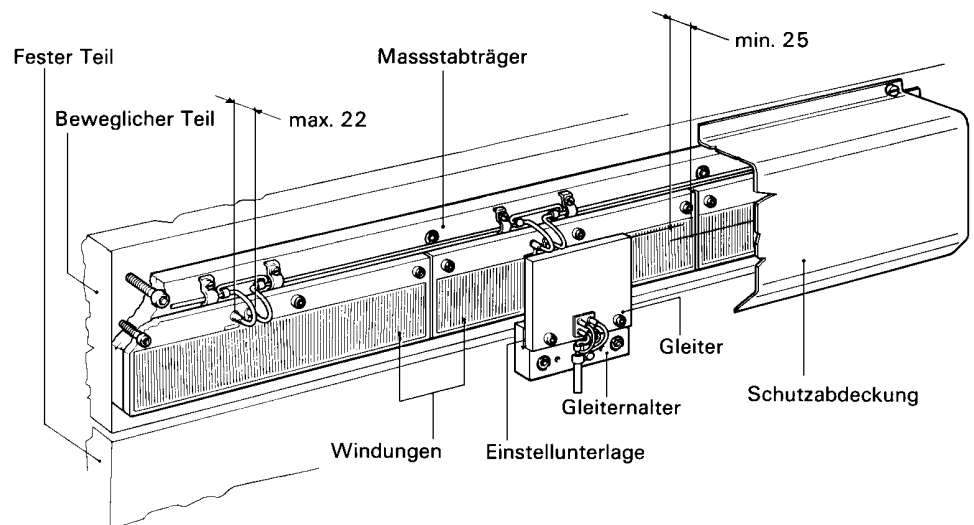


Abb. 4-39 Prinzip des Einbaus eines Induktosyn

Die Induktosyn-Massstäbe haben eine Länge von 250 mm bis 1000 mm. Bei grösseren Längen verwendet man mehrere Massstäbe, die man aneinanderfügt. Das Aneinanderreihen bedarf sehr grosser Sorgfalt, um Übergangsfehler zu vermeiden.

Die Induktosyn-Massstäbe werden in den Präzisionsklassen von  $\pm 3 \mu\text{m}$  bis  $\pm 1 \mu\text{m}$  gefertigt.

Funktionsprinzip:

Die Linealwicklung wird mit einer Wechselspannung gespeist ( $U_E$  10kHz). Diese verursacht ein magnetisches Wechselfeld, das in den beweglichen Reiterwicklungen die Wechselspannungen  $U_{A1}$  und  $U_{A2}$  induziert.

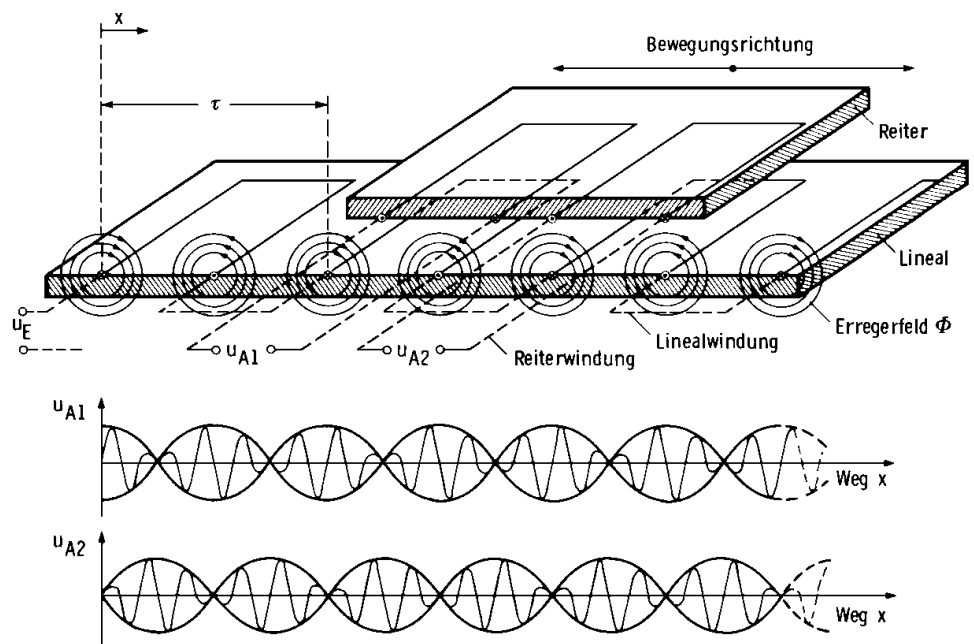


Abb. 4-40 Prinzipielle Darstellung und Funktionsweise des Linearinduktosyns

Durch die räumliche Versetzung der beiden Reiterwicklungen sind die Amplituden der beiden Wechselspannungen dem Cosinus bzw. dem Sinus des elektrischen Drehwinkels proportional.

*Anmerkung: Die umgekehrte Arbeitsweise ist auch gebräuchlich, d.h. man speist an den Reiterwicklungen zwei um  $90^\circ$  phasenverschobene Wechselspannungen ein und misst die induzierte Spannung am Lineal.*

Eine Verschiebung des Reiters auf dem Lineal führt bei den hochfrequenten Spannungsverläufen zu Phasensprüngen um  $180^\circ$ , wo der Verlauf der Einhüllenden seine Nulldurchgänge hat. Die eindeutige Bestimmung der Lage des Reiters erfolgt durch eine Auswertung der Phase über den Verlauf der einhüllenden Spannungsverläufe in den Reiterwicklungen und über das Phasenverhältnis (Gleich- oder Gegenphasigkeit) der induzierten hochfrequenten Signale.

Die Messung ist allerdings auf die Breite eines Schrittes (Steigung der Wicklung) beschränkt. Zur Messung grösserer Wege muss man das Inductosyn mit einem andern Verfahren kombinieren:

- man zählt die Schritte und hat ein absolut - zyklisches System
- man verwendet ein Mehrfachinductosyn (verschiedene Teilungen)
- man verwendet ein Grobmessverfahren mit Analog - Drehgeber (Resolver)

Zur genauen Erfassung der Drehwinkel an Drehtischen und Teilscheiben verwendet man Inductosyn-Scheiben mit 360, 720 oder 2000 Polen, die eine Genauigkeit von  $\pm 1''$  bieten können.

### Resolver (Abb. 4-41)

Der Resolver ist ein elektromagnetischer, indirekter Wegaufnehmer, bzw. ein direkter Winkelaufnehmer. In seinem Aufbau ähnelt der Resolver einem kleinen Elektromotor mit Präzisionswicklungen. Der Stator trägt zwei Wicklungsgruppen, deren Wicklungsebenen senkrecht aufeinander stehen, also um  $90^\circ$  räumlich gegeneinander versetzt. Eine weitere Wicklung befindet sich auf dem Rotor.

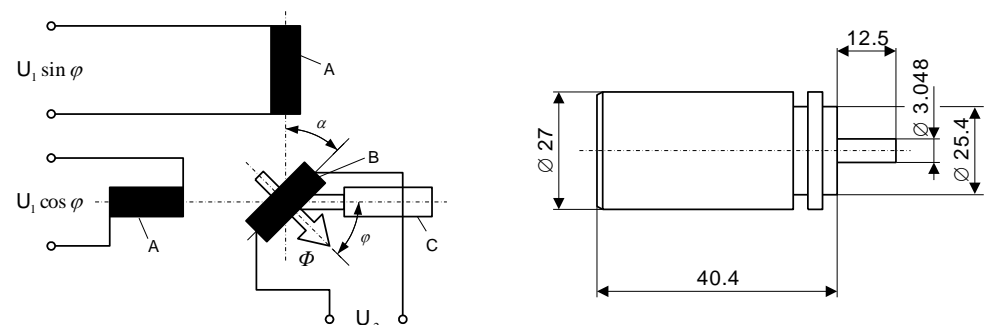


Abb. 4-41 Schema und typische Hauptabmessungen eines zweipoligen Resolvers

- A: Statorwicklungen
- B: Rotorwicklung
- C: Vorschubspindel

### Funktion:

Die Rotorwicklung B wird mit einer Wechselspannung von rund 10kHz gespeist. Das dadurch erzeugte magnetische Wechselfeld im Luftspalt zwischen Stator und Rotor induziert in den Statorwicklungen (A) zwei Wechselspannungen, die dem Cosinus bzw. dem Sinus des Drehwinkels proportional sind. Die Auswertung der in den Statorwicklungen (A) induzierten Spannungen erfolgt wie beim Inductosyn. Es sind nur eindeutige Mess-



wertzuordnungen innerhalb einer Rotorumdrehung möglich. Es handelt sich also um ein zyklisch - absolut arbeitendes Messsystem.

Auch beim Resolver ist die umgekehrte Betriebsweise möglich. Die Eingangsspannung wird an die Statorwicklungen angelegt und man misst die induzierte Spannung an der Rotorwicklung. In diesem Fall kann der Drehwinkel anhand der Nulldurchgänge der Rotorspannung ermittelt werden.

Für grössere Messbereiche werden mehrere Resolver mittels Präzisionsgetrieben hintereinandergeschaltet (siehe Abb. 4-42)

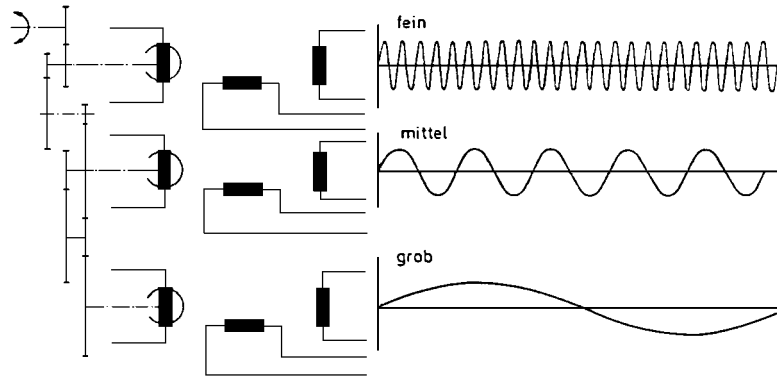
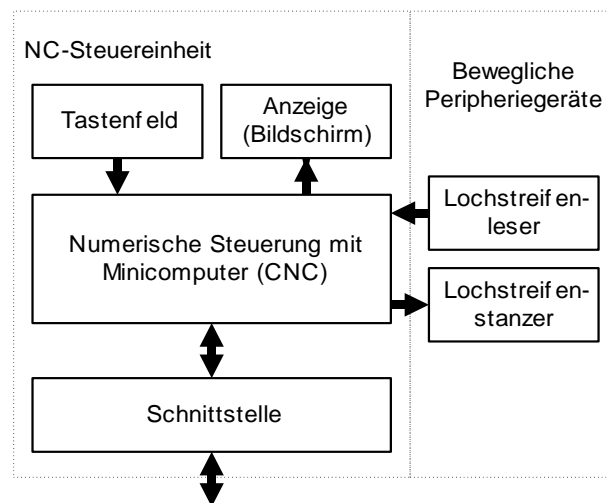


Abb. 4-42 Absolutmesswertgeber bestehend aus 3 Resolvern mit Präzisionsuntersetzungsgetrieben

## 4.5 NC – Steuereinheit



Die NC-Steuereinheit ist das Nervenzentrum der NC-Werkzeugmaschine. Sie umfasst die eigentliche numerische Steuerung die mit einem Tastenfeld, einem Bildschirm und einer Schnittstelle für die Verbindung mit der NC-Werkzeugmaschine verbunden ist.

Abb. 4-43 NC-Steuereinheit (CNC ACIERA 3000)

Die NC-Steuereinheit hat folgende Hauptfunktionen:

- Eingabemöglichkeit der Werkstückprogramme und Werkzeugkorrekturen über die Tastatur oder mittels Datenschnittstelle.
- Erstellung der Fehlerdiagnose des Werkstückprogrammes mit Möglichkeit der Modifikation und Korrektur.
- Decodierung der Werkstückprogramme, Errechnung der Bahnen mit Werkzeugkorrekturen.
- Übermittlung der Bewegungsbefehle und der Geschwindigkeiten an die gesteuerten Achsen.
- Übermittlung der Schaltbefehle an die verschiedenen zu steuernden Organe der Werkzeugmaschine und Überwachung der Spindeldrehzahl.
- Ununterbrochene Überwachung des Betriebszustandes der gesamten NC-Werkzeugmaschine und wenn nötig Ausgabe eines Alarmsignales.
- Anzeige der Teileprogramme und weiterer Informationen für den störungsfreien Lauf der NC-Werkzeugmaschine.
- Möglichkeit der manuellen Steuerung der NC-Maschine für die Inbetriebnahme einer Bearbeitung oder für die Herstellung des ersten Werkstückes.
- Ausgabe der Teileprogramme über eine Schnittstelle.

Davon sind gewisse Funktionen durch Hardware realisiert, d.h. in Form von elektronisch integrierten Schaltungen.

Der Grossteil dieser Funktionen ist jedoch durch die im Speicher abgelegte Software verwirklicht.

Es gibt in der Steuereinheit zwei Arten von Programmen:

- Die **Funktionsprogramme** oder **Maschinenprogramme**, die in einem Festwertspeicher abgelegt sind. Diese können vom Bediener weder gelöscht noch verändert werden. Das ist das Betriebsprogramm der NC-Steuereinheit.
- Die **Teileprogramme** hingegen werden vom Bediener erarbeitet und eingegeben. Sie sind auf einem löschbaren Schreib-Lesespeicher abgespeichert. Der Inhalt kann beliebig geändert werden. Eine Versorgungsspannung ermöglicht die Aufrechterhaltung des Inhalts bei Stromausfällen. Bei Stromunterbrechung hält das mittels einer Batterie gepufferte Speicherelement den Inhalt über längere Zeit aufrecht.

### 4.5.1 Hardware

Bild 4.41 zeigt, dass der Aufbau der NC - Steuereinheit demjenigen eines Minicomputers entspricht.

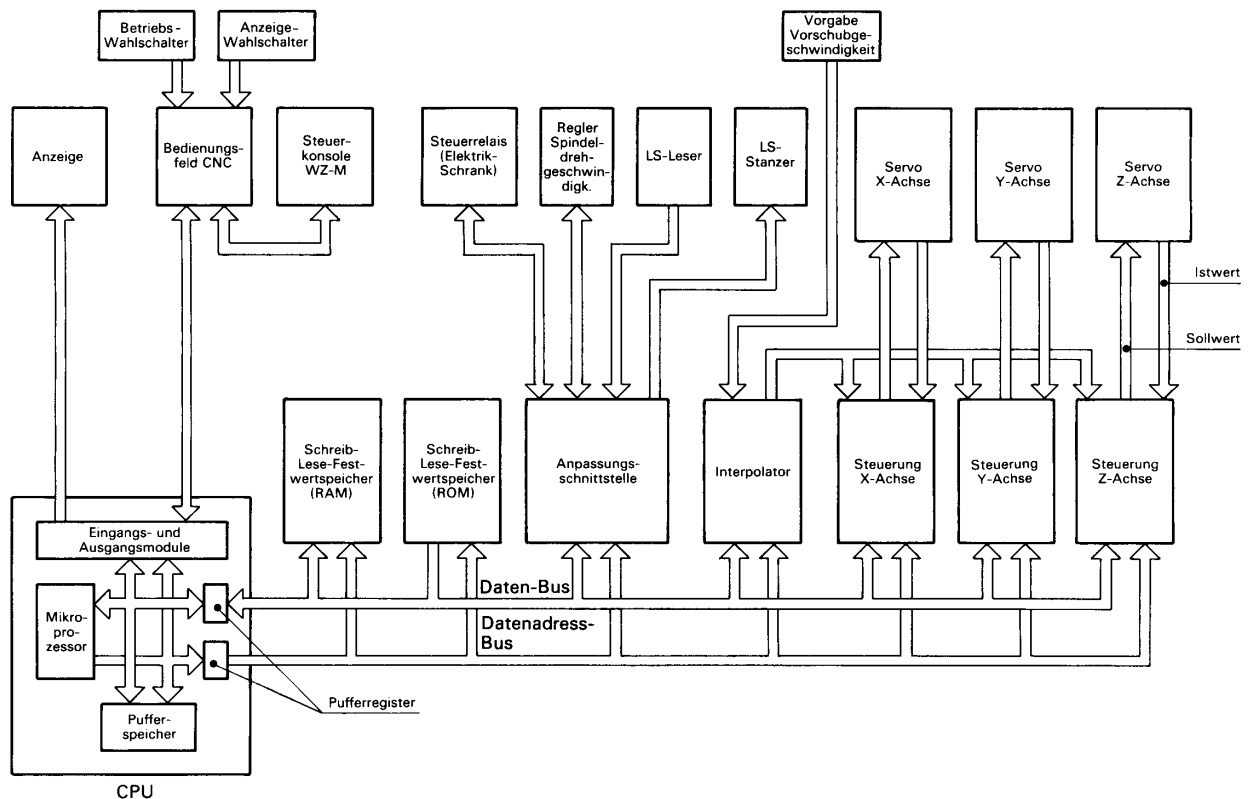


Abb. 4-44 Aufbau einer NC-Steuereinheit

#### 4.5.1.1 CPU und der Daten- und Adressbus

Die CPU und der Daten- und Adressbus ermöglichen den Austausch oder die Zuordnung der Daten zwischen dem Eingangsteil, den Speichern und dem Ausgangsteil der NC. Die Abarbeitung der verschiedenen Operationen erfolgt zyklisch (z.B. alle 2, 8 oder 16 ms), mit einer bestimmten Prioritätsordnung. So haben Diagnosefunktionen (Alarm) Vorrang gegenüber allen andern Funktionen.

#### 4.5.1.2 Bedienfeld

Das Bedienfeld der Steuereinheit enthält mit Normsymbolen beschriftete Tasten, eine alfanumerische Tastatur gemäss ISO - Regeln und evtl. Potentiometer zur Beeinflussung von Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeit (Override-Potentiometer).

#### 4.5.1.3 Bildschirm

Auf dem Bildschirm können unterschiedliche Anzeigearten gewählt werden:

- Anzeige Ist-Position (absolut oder inkremental)
- Listing des Teileprogrammes
- Hilfe-Funktionen (G- und M - Funktionen)
- Werkzeugkatalog
- Maschinenparameter

#### 4.5.2 Software (Interpolator)

Die erweiterte Streckensteuerung und die Bahnsteuerung (siehe Abschnitt: Arten numerischer Steuerungen) erfordern die Umsetzung der geometrischen Informationen in eine achsspezifische koordinierte Bewegungsfolge, so dass die Addition der Geschwindigkeitsvektoren der gesteuerten Achsen zu jedem Zeitpunkt den Konturverlauf beschreibt. Die dazu erforderliche Umsetzeinheit wird als **Geometrieprozessor** bezeichnet. Eine wesentliche Teilfunktion des Geometrieprozessors, die Berechnung einer dichten Folge von Lagestützwerten, übernimmt der Interpolator.

Die wesentlichen Forderungen an einen Interpolator sind die folgenden:

- Die vom Interpolator erzeugten Formelemente sollen die gewünschte Werkstückkontur möglichst gut annähern.
- Die häufigst verwendeten Konturelemente sind Geraden und Kreise; Interpolatoren sollen deshalb zumindest für die Linear- und Zirkularinterpolation (Kreisinterpolation) ausgelegt sein.
- Die Bahngeschwindigkeit muss aus technologischen Gründen in weiten Grenzen vorgebar sein und muss unabhängig von der Kontur eingehalten werden.
- Die numerisch vorgegebenen Endpunkte müssen exakt erreicht werden, da sich sonst interpolationsbedingte Bahnfehler (z.B. Rundungsfehler) aufsummieren.

Interpolatoren für Werkzeugmaschinen-Steuerungen arbeiten aufgrund des geforderten hohen Auflösungsvermögens ausschliesslich digital. Hinsichtlich ihrer technischen Realisierung unterscheidet man verbindungsprogrammierte Interpolatoren (Hardwareinterpolation) und speicherprogrammierte Interpolatoren (Softwareinterpolation). Häufig werden Mischformen eingesetzt, die aus einem Software- und einem Hardwareinterpolator bestehen; man spricht dann von einer zweistufigen Interpolation.

Während der einstufige Interpolator die Eingabedaten direkt in eine dichte Folge von achsspezifischen Lageführungsgrößen umrechnet, bestimmt der zweistufige Interpolator aus den Eingabedaten zuerst Zwischenwerte, sogenannte Stützpunkte (Grobinterpolation).

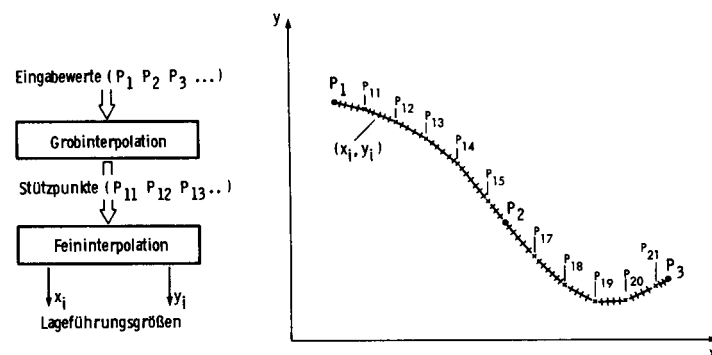


Abb. 4-45 Prinzip der zweistufigen Interpolation

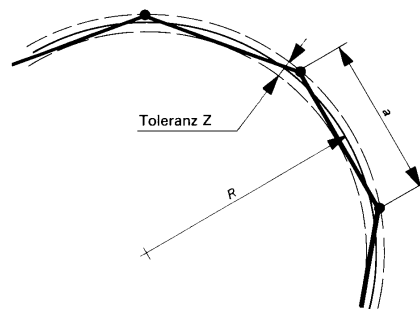
Der Konturverlauf in Abb. 4-45 sei durch die Vorgabewerte  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  bestimmt. Der Grobinterpolator berechnet aus den Vorgabewerten die in Abb. 4-45 dargestellten Stützwerte  $P_{11}$ ,  $P_{12}$ ,  $P_{13}$  usw.

Ein nachgeschalteter Feininterpolator interpoliert linear zwischen den so ermittelten Zwischenwerten  $x_i$  und  $y_i$ .

Durch entsprechende Wahl des Grobinterpolationsrasters ist es möglich, die nachgeschaltete Feininterpolation auf eine Geradeninterpolation kleiner Wegabschnitte zu beschränken. Dies erlaubt den Einsatz von Mikroprozessoren mit vergleichsweise geringen Leistungsmerkmalen zur Stützpunktberechnung.

Als Beispiel diene eine einfache Art der Kreisinterpolation:

Bei dieser Kreisinterpolation unterteilt man die Kreisbögen in Geraden-segmente, deren Länge von der einzuhaltenden Toleranz  $Z$  abhängt (siehe Bild 4.43).



Die Segmentlänge  $a$  ist eine Funktion der Toleranz  $Z$  und Des Radius  $R$ .

Die Rechnung ergibt:

$$a =$$

Abb. 4-46 Zweistufige Kreisinterpolation

Die Unterteilung der Kreisbögen in Geraden-segmente erfolgt durch das Programm (Softwareinterpolation), während die Geradeninterpolation jedes Segmentes durch eine Hardware-Schaltung erfolgt.

Eines der bekanntesten **einstufigen Interpolationsverfahrens** ist die **DDA-Interpolation** (Digital Differential Analyzer).

#### 4.5.2.1 Funktionsweise des DDA – Linearinterpolators

Ein Werkzeug soll zwischen dem Startpunkt  $P_A$  und dem Endpunkt  $P_E$  auf einer Geraden mit einer bestimmten Vorschubgeschwindigkeit  $u$  bewegt werden. In der Zeit  $T = \frac{L}{u}$  müssen die Wegkomponenten  $(x_E - x_A)$  und  $(y_E - y_A)$  durchlaufen werden. Als Lagesollwerte sind die Positionswerte als Funktion der Zeit zu bestimmen

$$x(t) = x_A + \int_0^t x' dt = x_A + \int_0^t \frac{x_E - x_A}{T} dt$$

$$y(t) = y_A + \int_0^t y' dt = y_A + \int_0^t \frac{y_E - y_A}{T} dt$$

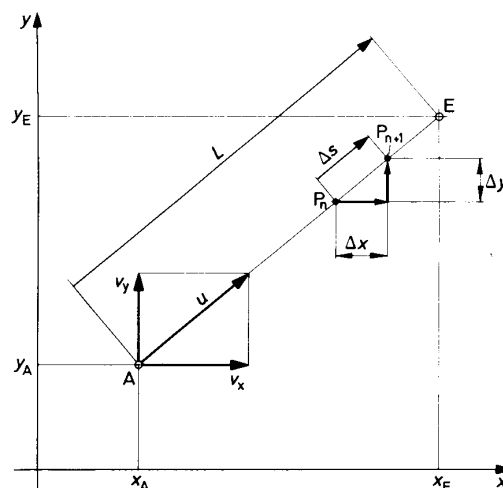


Abb. 4-47 Linearinterpolation nach dem DDA - Verfahren

Teilt man die Zeit  $T$  in hinreichend kleine Intervalle  $\Delta t = \frac{T}{N}$ , lässt sich die Integration durch digitale Addition ersetzen:

$$x(t) = x(n * \Delta t) = x_A + \frac{x_E - x_A}{N} * n$$

$$y(t) = y(n * \Delta t) = y_A + \frac{y_E - y_A}{N} * n \quad \text{mit } n = 1, 2, 3, \dots, N$$

Mit jedem Additionsschritt werden die Lagesollwerte um einen konstanten Schritt erhöht. Mit Rücksicht auf die Bahngenauigkeit müssen die Additionsschritte kleiner sein als die Ausgabeeinheit  $\Delta f$  des Vorschubantriebs.

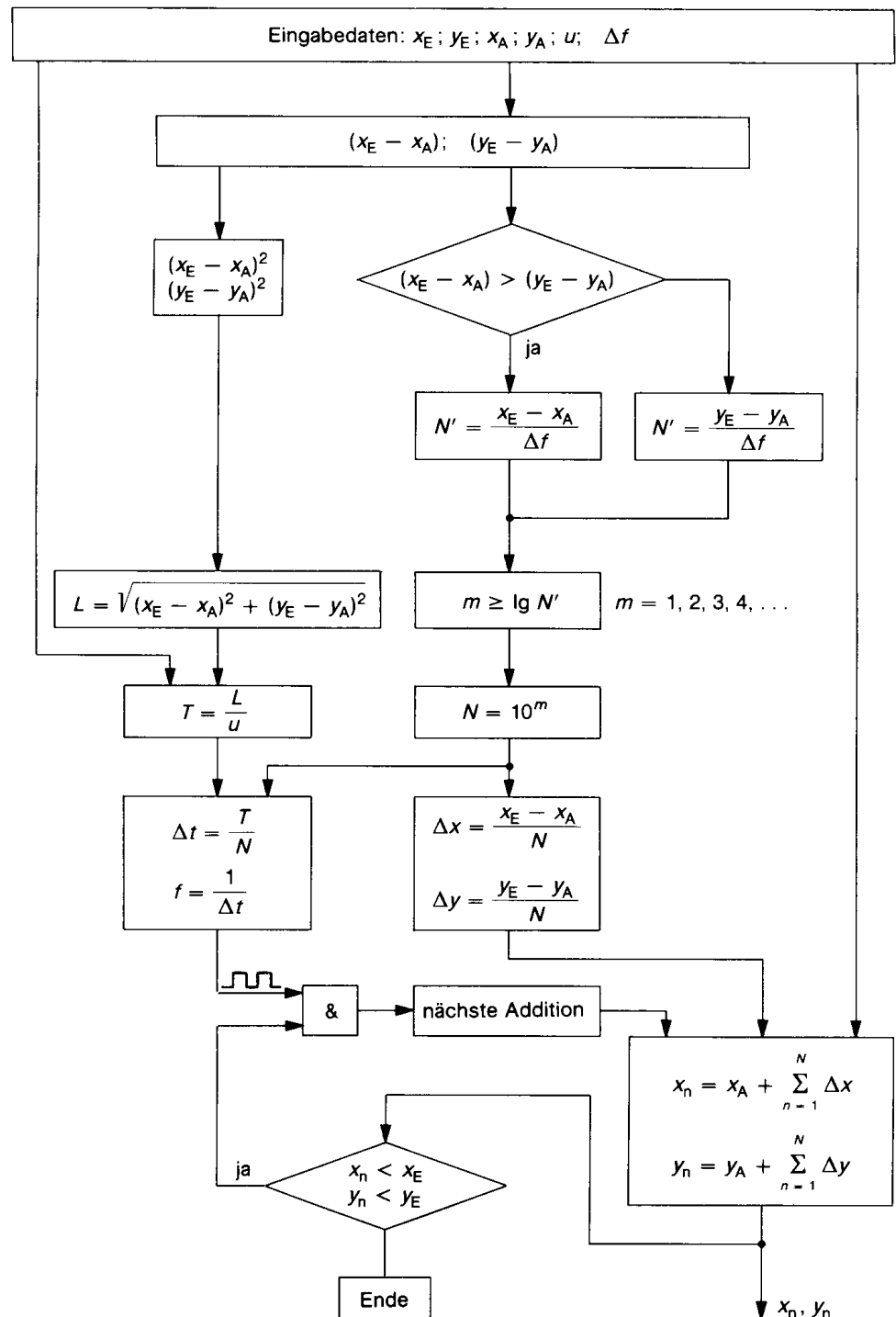


Abb. 4-48 Blockschaltbild eines DDA - Linearinterpolators

## Zahlenbeispiel:

Gegeben sei die Strecke mit den beiden Punkten (0,0) und (7,5). Die Längeneinheit ist hier das Bewegungsincrement (z.B. 1  $\mu\text{m}$ ). Die Strecke wird so in N Abschnitte unterteilt, dass die Intervalle  $\Delta x$  und  $\Delta y$  eines Abschnitts kleiner sind als das Inkrement.

Hier wählt man  $N=10$  und somit  $\Delta x=0,7$  und  $\Delta y=0,5$ .

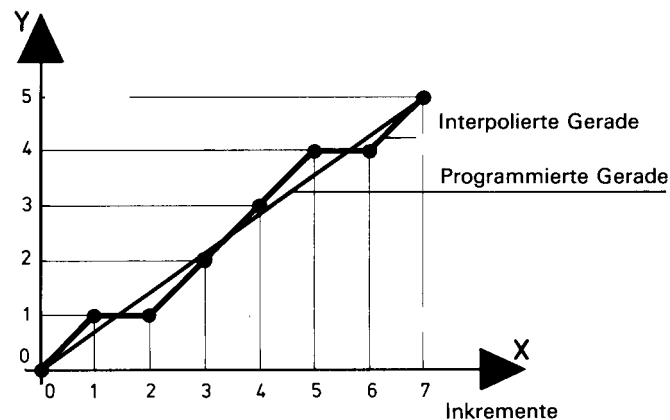


Abb. 4-49 Zahlenbeispiel einer DDA - Linearinterpolation

Bei jedem Interpolationsschritt bildet man die Summe von  $\Delta x$  und  $\Delta y$ , und sobald diese Summe 1 erreicht oder übersteigt, gibt man den Befehl zur Bewegung um ein Inkrement.

Um einen glatten Kurvenverlauf zu erzielen, werden beim DDA-Verfahren Ausgabeimpulse in den geführten Achsen (hier ist das die Y-Achse) so lange zwischengespeichert, bis in der führenden Achse ebenfalls ein Inkrement auszugeben ist. Dadurch lässt sich eine evtl. treppenförmige Kurve vermeiden. Die Abweichung von der Sollkurve ist immer kleiner als ein Inkrement. Wegen der Trägheit der Antriebselemente nähert sich der tatsächliche Kurvenverlauf durch Verschleifen der Ecken der Sollgeraden an.

Schritt	Summe von		Inkmente		Restbetrag		Position	
	$\Delta x$	$\Delta y$	x	y	x	y	x	y
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

Zahlenwerte der DDA - Interpolation gemäss Abb. 4-49

#### 4.5.2.2 Funktionsweise des DDA - Zirkularinterpolators:

Das DDA-Verfahren ist auch für die Kreisinterpolation anwendbar. Dabei müssen die Geschwindigkeitskomponenten der einzelnen Achsen jeweils in Richtung der Kreistangente erzeugt werden. Anhand von Abb. 4-50 kann die Funktion erkannt werden.

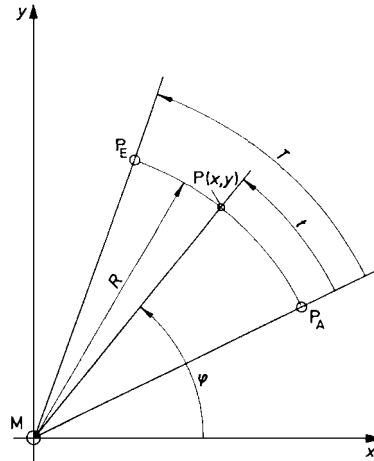


Abb. 4-50 Kreisinterpolation mit dem DDA - Verfahren

Es ist

$$x = R \cdot \cos \varphi$$

$$y = R \cdot \sin \varphi$$

und mit  $\varphi = 2 \cdot \pi \cdot \frac{t}{T}$  ( $T$  = Zeit für das Durchfahren des Vollkreises)

$$x = R \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$

$$y = R \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$

Durch Differentiation nach der Zeit erhält man die Geschwindigkeitskomponente in den einzelnen Achsrichtungen

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{2\pi R}{T} \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) = -\frac{2\pi}{T} \cdot y(t)$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{2\pi R}{T} \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) = \frac{2\pi}{T} \cdot x(t)$$

Mit hinreichender Genauigkeit kann die Integration durch eine Addition von Weginkrementen ersetzt werden.

Es ergibt sich damit

$$x(t) = x_{PA} - \frac{2\pi}{N} \cdot \sum_{i=0}^n y(i \cdot \Delta t)$$

$$y(t) = y_{PA} + \frac{2\pi}{N} \cdot \sum_{i=0}^n x(i \cdot \Delta t)$$



Von den **zweistufigen Interpolationsverfahren** wurde zu Beginn dieses Abschnittes ein Beispiel gezeigt. Dieses Verfahren wird **DFB-Interpolation** (Direkte Funktions-Berechnung) genannt.

#### 4.5.2.3 Funktionsweise des DFB - Verfahrens:

Interpolatoren, die nach dem DFB-Verfahren arbeiten, bestimmen die achsspezifischen Lagestützwerte durch direkte Berechnung der Funktionsgleichung an der Stelle  $x(t)$ ,  $y(t)$  und  $z(t)$ . Da sie nicht auf einen iterativen Lösungsansatz, wie z.B. das DDA-Verfahren, aufbauen, ist der Einsatz eines leistungsfähigen Geometrierechners (Minicomputer bzw. Mikrocomputer mit erweitertem Arithmetikumfang) erforderlich.

Man verwendet, falls möglich, eine Darstellung in Parameterform, um Geometrie und Bahngeschwindigkeit gekoppelt berechnen zu können.

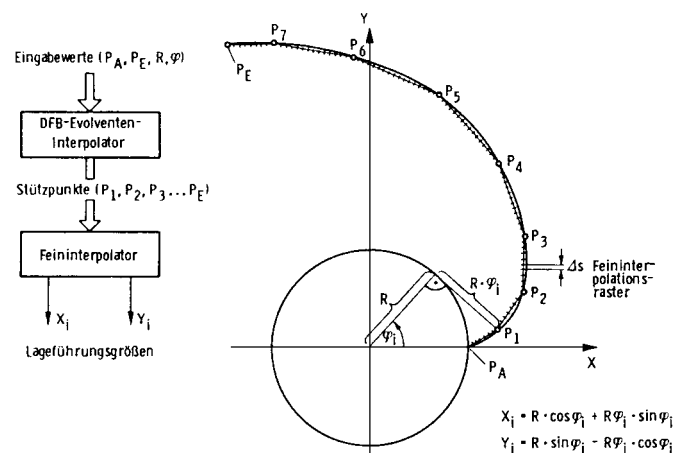


Abb. 4-51 Evolventenförmige Interpolation nach dem DFB - Verfahren

Die DFB ist auf beliebige Interpolationsarten anwendbar. Sie kommt jedoch vor allem bei der Berechnung komplexer Kurven als Grobinterpolationsverfahren in Einsatz.

Abb. 4-51 zeigt die Stützpunktberechnung für einen evolventenförmigen Konturverlauf, die eine direkte Fräsbearbeitung mit einem Fingerfräser ermöglicht. Die Feininterpolation zwischen den ermittelten Stützpunkten übernimmt ein einfacher DDA-Linearinterpolator.



Dieses Test-Teil ermöglicht die Qualitätsprüfung der Geradeninterpolation durch vier um 45 Grad verschobene Seitenflächen eines Vierecks sowie durch eine schwach geneigte Fläche.

Die Qualität der Kreisinterpolation, sowie das Fehlen einer Schwelle beim Umkehren der Bewegungsrichtung der X- und Y-Achse, werden durch das Fräsen eines Kreises geprüft.

Das Verfahren ermöglicht zudem folgende Prüfungen:

- Oberflächenbeschaffenheit
- Formgenauigkeit
- die Qualität der Steuerung

NCG-Prüfwerkstück für hochdynamische 3-Achs- Bearbeitung (NCG 2004)

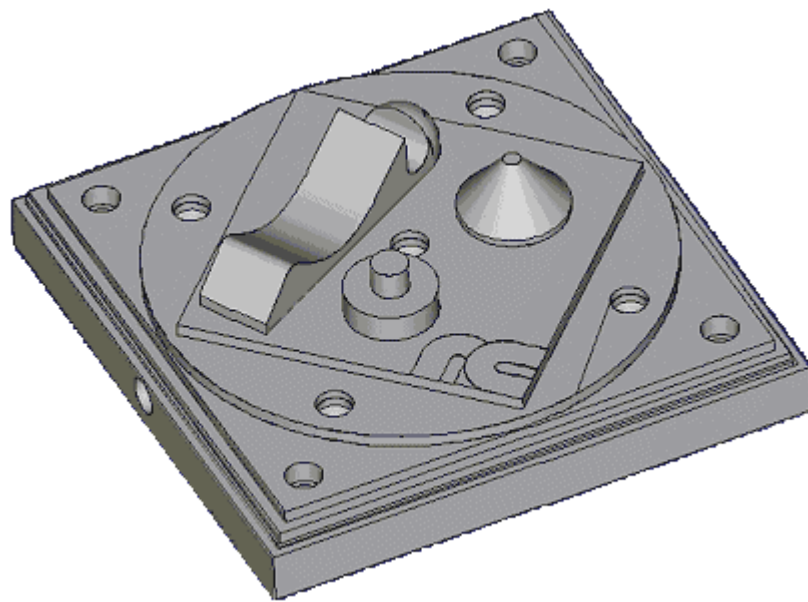


Abb. 5-3 NCG-Prüfwerkstück 2004

Anhand von 12 Formelementen kann mit diesem Prüfwerkstück eine objektive Beurteilung einer 3-Achs-HSC-Fräsmaschine vorgenommen werden.

Folgende Prüfungen werden vorgenommen:

- Element 1: Zylinderstufen  
→ Kreisform, Quadrantenüberprüfung
- Element 2: Quader 45° (□ 90 mm / □ 190 mm)  
→ Geradheit, Rechtwinkligkeit, Parallelität
- Element 3: Zylinder (Ø 140 mm / Ø 190 mm)  
→ Kreisform (vor allem Quadrantenübergänge), Konzentrität
- Element 4: Quader 90° (□ 142 mm / □ 282 mm)  
→ Geradheit bzw. Achsparallelität, Rechtwinkligkeit
- Element 5: Kantenpaar 0,5° (optional)  
→ Geradheit, Winkligkeit
- Element 6: Schrägen 0,5° (optional)  
→ Geradheit, Winkligkeit

- Element 7: Bohrbild  
→ Mittenabstände, Rundheit, Konzentrität zu Element 3
- Element 8: Kegelstumpf (nur für 3D-Prüfwerkstück)  
→ Geradheit der Mantellinien. Kreisform auf mehreren Ebenen, Zeitmessung
- Element 9: Formfläche (nur für 3D-Prüfwerkstück)  
→ Formhaltigkeit, Oberflächenrauheit  
Zeitmessung je Bahnbereich
- Element 10: Kugelsegment (nur für 3D-Prüfwerkstück)  
→ Formhaltigkeit
- Element 11: Umschlagbearbeitung (optional)  
→ Positionen der Bohrungen zum vorhandenen Fräsbild
- Element 12: Planflächen-Überlagerung  
→ Distanz der Z-Werte beider Flächen

*NCG- Prüfwerkstück für hochdynamische 5-Achs- Bearbeitung (NCG 2005)*

Auszug aus der NCG-Empfehlung:

In diesem Werkstück sind wesentliche Geometrieelemente und Bearbeitungsstrategien definiert, die es ermöglichen, Maschinen und ihre Steuerungen hinsichtlich der Statik, Dynamik, Bearbeitungsgeschwindigkeit und Genauigkeit zu vergleichen und zu überprüfen. Den Anwendern des Prüfwerkstückes werden Hinweise gegeben, welche Eigenschaften sich an den Geometrieelementen des Prüfstücks widerspiegeln.

Mit dem Prüfwerkstück Abb. 5-3 können 5-achsige Maschinen nur unzureichend beurteilt werden. Abb. 5-4 zeigt ein Prüfwerkstück, dass die Beurteilung von HSC-Fräsmaschinen mit synchroner 5-Achsen-Bearbeitung erlaubt. Insgesamt werden in rund 10 Minuten 46 Formelemente gefräst. Damit können 4 Kategorien getestet werden:

- Dressing Check  
Die Rechtwinkligkeit der Werkzeugachse/des Fräasers zur Grundfläche
- TCP Check  
Den Werkzeugmittelpunkt
- Axes Check  
Die Positionierung der Achsen
- Contour Check  
Die Bahngenauigkeit



Abb. 5-4 NCG- 2005 (Prüfwerkstück für die 5-Achs-Simultan Fräsbearbeitung)

## 5.2 Kontrolle der Positioniergenauigkeit einer NC-Werkzeugmaschine

Die Positionierfehler sind nur ein Teil der Bearbeitungsfehler. Diese beinhalten einen systematischen Anteil: Positionierfehler aufgrund der Unregelmässigkeiten der Spindel, des Messwertgebers oder der Umkehrspanne, die bei jedem Richtungswechsel entsteht. Sie enthalten auch einen zufälligen Anteil, der die Streuung der Ist-Position bei aufeinanderfolgenden Positionierungen an gleicher Stelle äussert.

Die Prüfung der Positioniergenauigkeit ist für eine NC-Maschine wichtig, denn sie gestattet die Qualität der NC und die Eigenschaften der Rückführungen der verschiedenen Achsen zu erfassen.

Die Überprüfung der Istwerte muss mit einer Messeinrichtung erfolgen, die genauer ist als jene der NC-Werkzeugmaschine. Das meist verwendete Hilfsmittel ist das **Laser - Interferometer**.

### 5.2.1 Funktionsweise des Laser - Interferometers

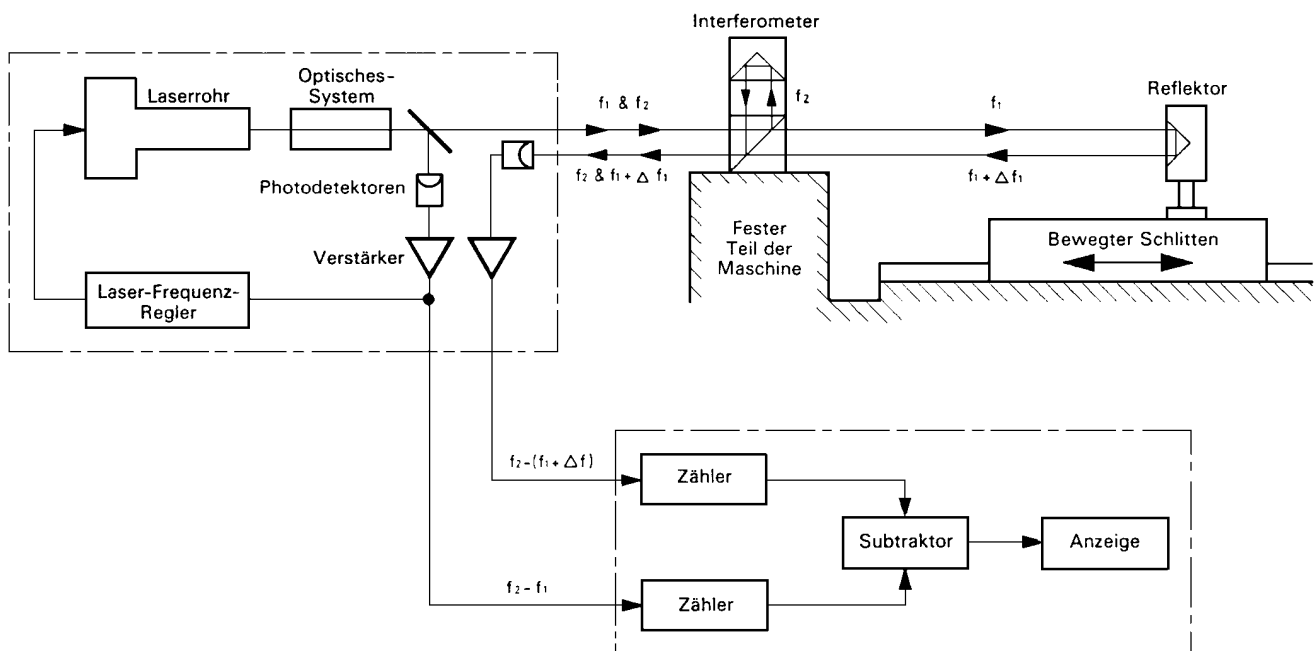


Abb. 5-5 Prinzip der Längenmessung mit einem Laser - Interferometer

Das Laser-Interferometer (Abb. 5-5) enthält eine monochromatische Lichtquelle (Helium - Neon - Laser), die einen Lichtstrahl mit zwei nahe beieinanderliegenden Frequenzen  $f_1$  und  $f_2$  ausstrahlt. Ein Teil des Strahls wird auf einen Photodetektor geführt. Dieser Strahlanteil dient zur Erzeugung der Bezugsfrequenz  $f_1 - f_2$  und zur Stabilisierung des Laserrohres. Der grössere Teil des Strahls gelangt auf ein Interferometer, das die Lichtwellen der Frequenz  $f_1$  von denjenigen der Frequenz  $f_2$  trennt. Jede dieser Wellen wird von einem Reflektor reflektiert, worauf sie gemeinsam wieder auf einen Photodetektor gelangen. Bewegt man den beweglichen Reflektor um eine halbe Wellenlänge ( $0.32 \mu\text{m}$ ), wandert das empfangene Signal von Interferenzstreifen zu Interferenzstreifen, d.h. von einem Maximum zum andern. Die beiden empfangenen Signale werden verstärkt und gelangen je an einen Zähler. Die Differenz zwischen den gezählten Impulsen entspricht der Anzahl Viertelwellenlängen, um die sich der Schlitten bewegt hat. Dieses Messverfahren ermöglicht somit, dank der Auflösung von  $0.16 \mu\text{m}$ , eine äusserst genaue Längenmessung.

Die Kontrollmethoden werden von verschiedenen Organisationen festgelegt. Nachfolgend sind einige Angaben aus der Empfehlung VDI / DGQ 3441 (Herausgegeben vom Verband Deutscher Ingenieure und von der Deutschen Gesellschaft für Qualitätsforschung) aufgeführt.

### 5.2.2 Bestimmung des Ø Positionierfehlers und der Standardabweichung

Als Beispiel soll für den Tisch einer NC-Fräsmaschine die Genauigkeit der X-Achse geprüft werden. Die Positioniergenauigkeit des programmierten Masses  $X=200\text{mm}$  wird durch Wiederholung des Anfahrens auf diesen Punkt ermittelt. Das Anfahren erfolgt immer vom gleichen Ausgangspunkt  $X=0$  aus und somit immer aus der gleichen Richtung.

Nehmen wir 25 Positionierungen an. Die Istwerte, die mit dem Laser - Interferometer registriert und auf  $0.001\text{mm}$  gerundet wurden, werden in eine Grafik (Abb. 5-6) eingetragen.

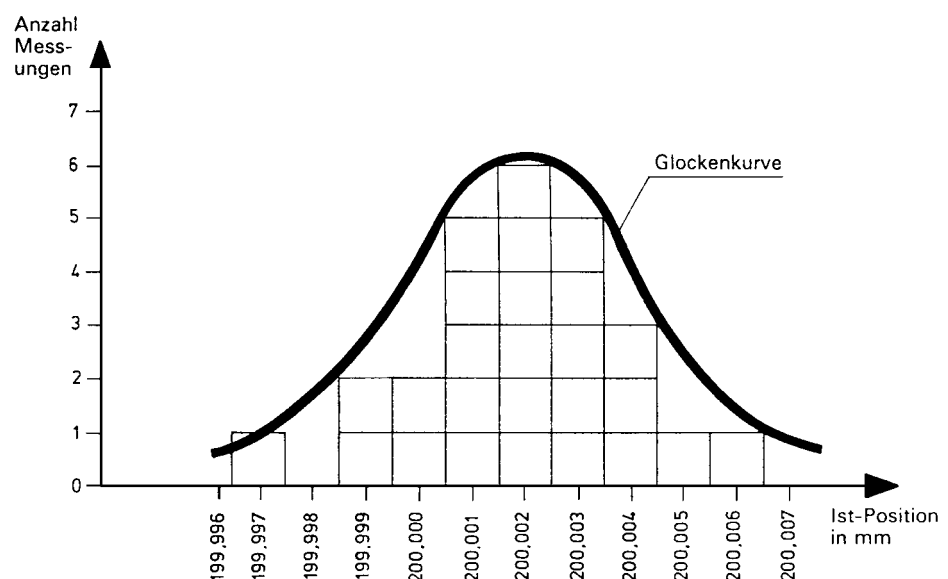


Abb. 5-6 Grafische Darstellung des Positionierfehlers bei einseitigem Anfahren

Die Wahrscheinlichkeitstheorie besagt, dass für eine Vielzahl von Versuchen mit sehr feinen Messintervallen die Verteilung gemäss einer Glockenkurve erfolgt.

Die Bestimmung des mittleren Positionierfehlers erfolgt aufgrund des arithmetischen Mittels der Fehler  $x_i$  bezogen auf  $n$  Messungen:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

In unserem Fall finden wir einen durchschnittlichen Fehler von:

$$\bar{x} = \frac{-3 - 1 \cdot 2 + 5 \cdot 1 + 6 \cdot 2 + 5 \cdot 3 + 3 \cdot 4 + 5 + 6}{25} = 2 \mu\text{m}$$

Die mittlere Position befindet sich somit auf  $200,002\text{mm}$ .

Die Streuung der Messwerte wird durch die **Standardabweichung** dargestellt:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

In unserem Beispiel:

$$s = \sqrt{\frac{(-3-2)^2 + 2(-1-2)^2 + 2(0-2)^2 + 5(1-2)^2 + 5(3-2)^2 + 3(4-2)^2 + (5-2)^2 + (6-2)^2}{24}}$$

$$s = 2,02 \mu\text{m}$$

Theoretisch liegen also die Fehler mit einer Wahrscheinlichkeit von 99.73% im Bereich von  $\pm 3s$  von  $\bar{x}$ .

In unserem Beispiel liegt die Positionierung mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,73% zwischen 199,9959 und 200,0081  $\mu\text{m}$ .

### 5.2.3 Bestimmung der zweiseitigen Kenndaten

Der Tisch der NC-Fräsmaschine aus dem vorherigen Beispiel werde auf den gleichen programmierten Wert  $X=200\text{mm}$ , aber von der entgegengesetzten Richtung z.B. ab  $X=400\text{mm}$  aus, positioniert.

Die Verteilung der Ergebnisse erfolgt ebenfalls nach einer Glockenkurve, die jedoch gegenüber der ersten verschoben ist (Abb. 5-7).

Der Abstand der Mittelwerte nennt man **Hysterese**

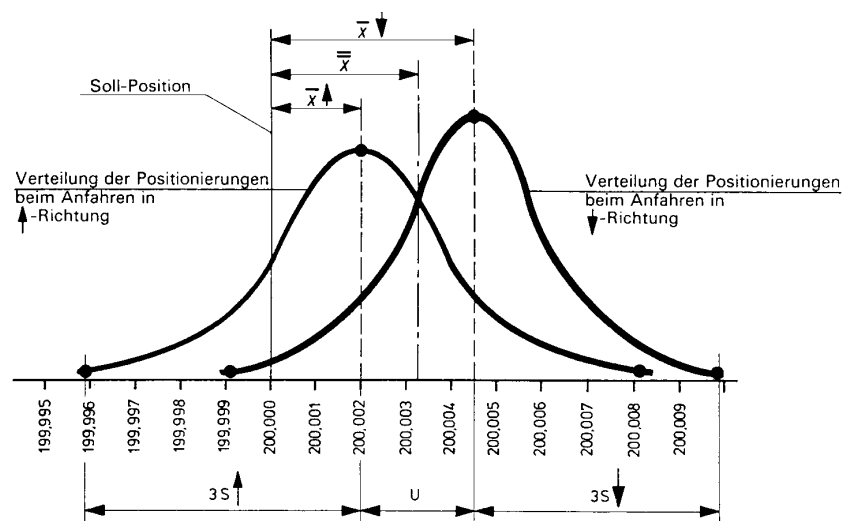


Abb. 5-7 Grafische Darstellung des Positionierfehlers bei zweiseitigem Anfahren

$$\text{Hysterese } U = | \bar{x} \downarrow - \bar{x} \uparrow |$$

$x \downarrow$  : Durchschnittlicher Positionierfehler beim Anfahren in - Richtung

$x \uparrow$  : Durchschnittlicher Positionierfehler beim Anfahren in + Richtung

Der systematische Positionierfehler für das zweiseitige Anfahren ist der arithmetische Mittelwert für jede Richtung:

$$\bar{x} = \frac{\bar{x} \uparrow + \bar{x} \downarrow}{2}$$

### 5.2.4 Graphische Darstellung der Positionierfehler

Gemäss den Empfehlungen VDI / DGQ 3441 sind pro Meter Schlittenhub mindestens 10 Messpunkte notwendig. Diese Punkte werden willkürlich über die Länge verteilt, um den Einfluss der periodischen Fehler der Antriebsspindel oder des Messsystems auszugleichen.

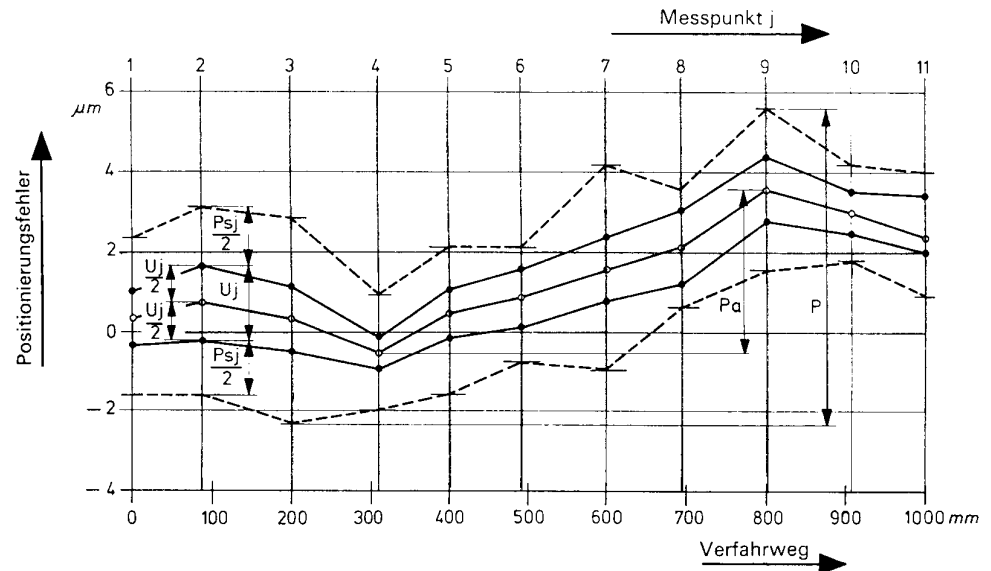


Abb. 5-8 Grafische Darstellung der Positionierfehler auf dem Verfahrensweg einer Achse

Für jeden Punkt werden mindestens 10 Positionierungen durchgeführt, wovon 5 mit Anfahen in positiver Richtung und 5 mit Anfahen in negativer Richtung. Man erhält somit für jeden Punkt  $j$   $n$  Fehlerwerte  $x_{ij}↑$  und  $n$  Fehlerwerte  $x_{ij}↓$ .

Für jeden Punkt  $j$  errechnet man nacheinander:

Den mittleren Positionierfehler beim Anfahen in positiver Richtung $\bar{x}_j↑$	$\bar{x}_j↑ = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_{ij}↑$
Den mittleren Positionierfehler beim Anfahen in negativer Richtung $\bar{x}_j↓$	$\bar{x}_j↓ = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_{ij}↓$
Den systematischen Positionierfehler beim Anfahen in beiden Richtungen $\bar{\bar{x}}_j$	$\bar{\bar{x}}_j = \frac{\bar{x}_j↑ + \bar{x}_j↓}{2}$
Die Hysterese $U_j$	$U_j =  \bar{x}_j↓ - \bar{x}_j↑ $
Die Standardabweichung für die Positionierung beim Anfahen in positiver Richtung: $s_j↑$	$s_j↑ = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij}↑ - \bar{x}_j↑)^2}$
Die Standardabweichung für die Positionierung beim Anfahen in negativer Richtung: $s_j↓$	$s_j↓ = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij}↓ - \bar{x}_j↓)^2}$
Die mittlere Standardabweichung für die Positionierung beim Anfahen aus beiden Richtungen: $\bar{s}_j$	$\bar{s}_j = \frac{s_j↑ + s_j↓}{2}$
Positionsstreuung $P_{sj}$ (willkürlicher Positionierfehler)	$P_{sj} = 6 \cdot \bar{s}_j$

Berechnungen für die ausgewählten Punkte auf dem Verfahrensweg

In der graphischen Darstellung werden die Werte  $\bar{\bar{x}}_j$ ,  $x_j↑$  und  $x_j↓$  auf der Ordinate eingetragen. Ausserhalb dieser Werte wird beidseitig die Positionierstreuung von  $P_{sj}/2$  hinzugefügt.

Nach Aufzeichnen dieser Werte für  $m$  Punkte des Verfahrensweges können die 5 Kurven aufgezeichnet werden (siehe Abb. 5-8). Daraus resultiert die Gesamtpositioniergenauigkeit.



Hierzu berechnet man die folgenden maximalen und mittleren Werte.

Maximale Positionierungstreibbreite $P_{s\max}$	$P_{s\max} = P_{sj\max}$
Mittelwert der Positionierungstreibbreite $\bar{P}_s$	$\bar{P}_s = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m P_{sj}$
Maximale Hysterese $U_{\max}$	$U_{\max} = U_{j\max}$
Mittlere Hysterese $\bar{U}$	$\bar{U} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m U_j$
Maximale Abweichung der Mittelwerte der Positionierung $P_a$	$P_a =  \bar{x}_{j\max} - \bar{x}_{j\min} $
Maximale Positionierungsunsicherheit $P$	$P = \left[ \bar{x}_j + \frac{1}{2} (U_j + P_{sj}) \right]_{\max} - \left[ \bar{x}_j - \frac{1}{2} (U_j + P_{sj}) \right]_{\min}$

Zusammenstellung der Werte der Gesamtpositioniergenauigkeit

Diese Werte ermöglichen die objektive Beurteilung der Positioniergenauigkeit einer NC-Werkzeugmaschine in einer Achse.

## 6 Weiterentwicklungen der CNC – Maschinen

Quelle: Numerische Steuerungen für Werkzeugmaschinen  
Rudolf Sautter; Vogel - Verlag Würzburg

### 6.1 DNC (Direct Numerical Control)

Die VDI-Richtlinie 3424 definiert DNC folgendermassen:

Direct Numerical Control (DNC) ist ein System zur Rechnerdirektführung von mehreren numerisch gesteuerten Arbeitsmaschinen durch Digitalrechner.

Wesentliches Kennzeichen der DNC ist die direkte Verbindung (online) der CNC-Maschine mit einem Rechner. Die Steuerungsinformationen werden vom Rechner direkt in den Speicher der CNC eingegeben. Früher wurde dies nach dem Lochstreifenleser der CNC-Maschine realisiert, deshalb der Name BTR-Betrieb (Behind Tape Reader).

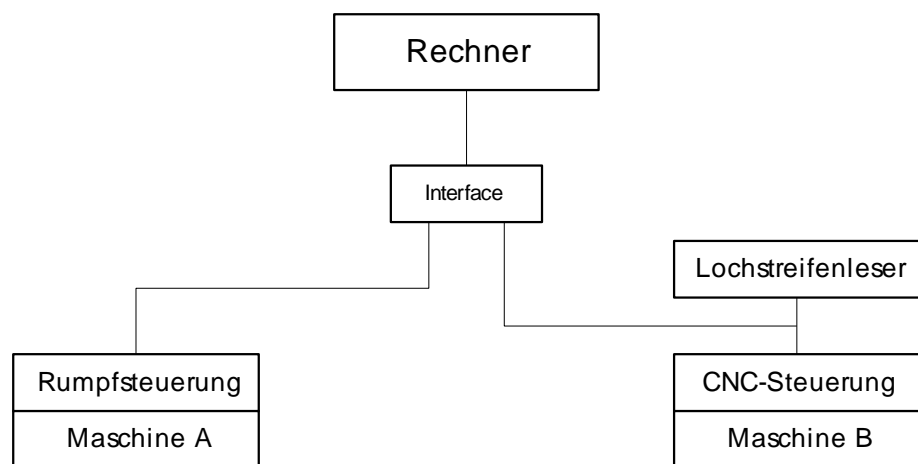


Abb. 6-1 DNC-Systeme:

- A vollständig rechnerabhängiger Betrieb
- B BTR=Behind Tape Reader: System kann auch rechnerunabhängig betrieben werden

Abb. 6-1 zeigt Aufbaualternativen von DNC-Systemen. Die Alternative Rumpfsteuerung bezieht sich dabei auf eine Variante, bei der an der Arbeitsmaschine im wesentlichen nur die Anpass-Steuerung und die Lage-regelung verblieben sind. Informationsspeicher und Interpolation sowie die CNC-Möglichkeiten liegen beim zentralen Rechner. Dieses Konzept hat den Vorteil der wesentlich billigeren Maschinensteuerung, wird wegen der vollständigen Abhängigkeit der Arbeitsmaschine vom Zentralrechner aber kaum ausgeführt. Eine Störung des Zentralrechners führt bei diesem Konzept zum völligen Stillstand aller vom Rechner versorgten Arbeitsmaschinen.

Bei der Alternative BTR-Betrieb mit autarker CNC-Steuerung an der Arbeitsmaschine besteht diese Abhängigkeit in wesentlich geringerem Masse: bei einer Störung des Zentralrechners kann die Werkzeugmaschine unabhängig vom Rechner weiterarbeiten, solange sie keine neuen Programminformationen für ihren Programmspeicher benötigt.

Hauptaufgabe des Rechners ist die Verwaltung der CNC-Teileprogramme und ihre zeitrichtige Verteilung auf die nachgeschalteten Maschinen. Die Funktionen eines DNC-Systems sind in Abb. 6-2 dargestellt.

Die Archivierung und Aktualisierung von umfangreichen CNC-Dateien lässt sich im Rechner wesentlich komfortabler, vor allem aber übersichtlicher

und wirtschaftlicher ausführen als in einer Lochstreifenbibliothek. Die Möglichkeiten der Programmverwaltung umfassen bei DNC folgende Punkte:

- führen des CNC-Programmverzeichnisses
- suchen eines CNC-Programms
- Ein- und Ausgabe von CNC-Programmen
- abspeichern von CNC-Programmen
- führen von Werkzeugdateien
- führen von Werkstoffdateien
- führen von Spannmitteldateien

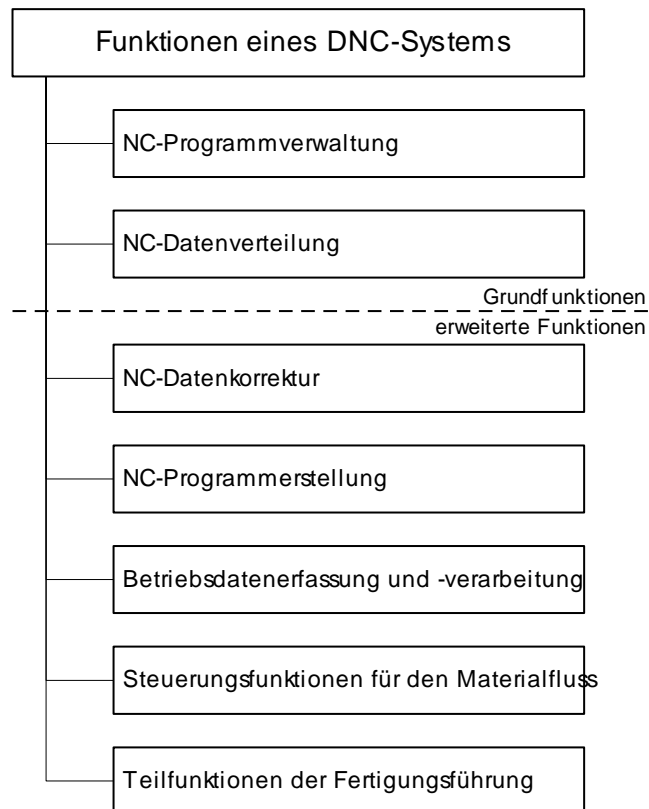


Abb. 6-2 Funktionen eines DNC-Systems (nach VDI 3424)

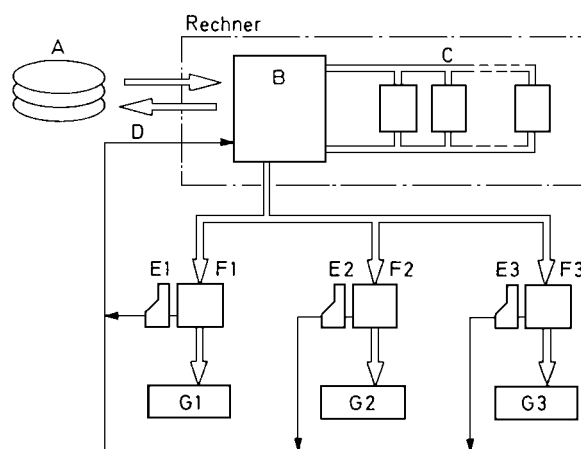


Abb. 6-3 Informationsfluss bei DNC-Systemen

In Abb. 6-3 ist der Informationsfluss eines DNC-Systems dargestellt. Der Maschinenbediener kann über ein Terminal mit dem Rechner in Verbindung treten. In der Regel teilt die Maschinenbedienung dem Rechner über

das Terminal mit, welches Programm als nächstes benötigt wird. Möglich ist aber auch die Führung der CNC-Maschine durch den Rechner, der in diesem Fall der Maschinenbedienung angibt, welches Programm als nächstes zur Ausführung ansteht. In jedem Fall veranlasst die CPU (Central Processing Unit) des Rechners den Abruf des benötigten CNC-Teilprogramms aus dem externen Arbeitsspeicher des Rechners. Von hier aus werden je nach Organisationsform an die CNC-Maschine Steuerdaten (Arbeitsmaschine mit Rumpfsteuerung), satzweise Informationen (Maschine mit konventioneller NC-Steuerung) oder die Informationen des gesamten Teilprogramms auf einmal (Maschine mit CNC-Steuerung) übermittelt.

Aus den vorliegenden Erfahrungen mit DNC-Systemen ergeben sich die folgenden Vorteile:

- keine Datenträger-Verwaltung
- sichere und schnelle Datenübertragung
- einfache und schnelle Manipulierbarkeit von NC-Teilprogrammen mit Hilfe einer Bildschirm-Dialogstation von der CNC-Maschine aus
- zentrale Betriebsdatenerfassung
- grössere Flexibilität der Fertigungssteuerung
- verbesserter Bedienungskomfort

Der wirtschaftliche Einsatz von DNC-Systemen setzt fundierte Erfahrungen im Einsatz numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen und ebenso Erfahrungen im Einsatz von Rechnersystemen zur Fertigungssteuerung voraus. Die mit der Einführung von DNC verbundene organisatorische Änderung des Fertigungsablaufs lässt sich im allgemeinen nur in kleinen Schritten durchführen. Die Umstellung einer Fertigung auf DNC ist daher ein Vorgang, der sich über längere Zeit hinzieht.

## 6.2 AC (Adaptive Control)

Unter Adaptive Control (Anpassungsregelung) versteht man die Optimierung der Technologie von Fertigungsabläufen mit regelungstechnischen Massnahmen. Während üblicherweise bei der Bearbeitung eines Werkstückes die technologischen Parameter (Schnittgeschwindigkeit, Vorschub, Spantiefe) fest vorgegeben werden, werden bei AC bestimmte Grenzwerte von Bearbeitungskennwerten, z.B. bei Schruppbearbeitung die maximal zulässige Schnittkraft vorgegeben. Die technologischen Parameter werden von der AC auf die Einhaltung dieses Vorgabewerts hin überwacht.

AC ist im Prinzip nicht an die Anwendung bei CNC-Maschinen gebunden. Einerseits ermöglicht die bei CNC-Maschinen vorhandene Datenverarbeitungseinrichtung aber leichter eine Integration der AC in dieses Steuerungskonzept, andererseits verlangen die hohen Maschinenstundenkosten der CNC-Werkzeugmaschinen eine möglichst weitgehende Maschinenausnutzung, wie sie die AC ermöglichen kann.

Bei Fertigung ohne AC müssen die Bearbeitungsparameter so ausgelegt werden, dass auch bei ungünstigen Toleranzen der Fertigungseinflussgrössen (z.B. Werkstückaufmass, Werkstoffeigenschaften, Werkzeugverschleiss, Stabilitätsbedingungen) noch einwandfreie Bearbeitung möglich ist. Da die Kennwerte der Fertigungseinflussgrössen meist auch nicht genau bekannt sind, werden die Bearbeitungsparameter zusätzlich noch mit einem Sicherheitsfaktor festgelegt. Damit wird aber die Maschine und das Werkzeug bei Vorliegen günstigerer Einflussgrössen nicht optimal ausgenutzt.

Bei AC wird der Istwert von Größen, die für den Fertigungsprozess kennzeichnend sind, mit Messgliedern (Sensoren) erfasst und zur Prozessregelung benutzt (Abb. 6-4).

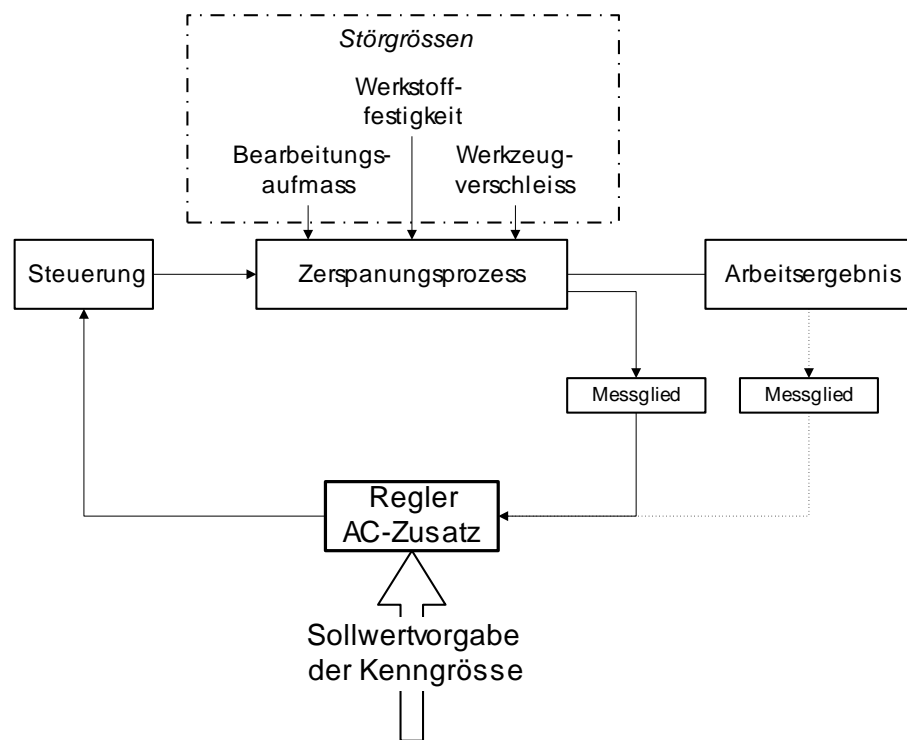


Abb. 6-4 Regelung der Technologie eines Zerspanungsprozesses (Adaptive Control)

Nach der Aufgabe, die ein AC-System erfüllen soll, kann man unterscheiden:

- Technologische AC:* Ihre Aufgabe ist die Regelung technologischer Größen des Fertigungsprozesses.
- Geometrische AC:* Ihre Aufgabe ist die Regelung geometrischer Prozessgrößen.

### ACC:

ACC (**A**daptive **C**ontrol **C**onstraint) bezeichnet die Regelung einer Zerspanungsgrösse, z.B. der Schnittkraft, auf einen vorgegebenen Grenzwert.

### ACO:

ACO (**A**daptive **C**ontrol **O**ptimization) bezeichnet die Regelung auf optimale Güte des gesamten Zerspanungsprozesses oder seines Ergebnisses durch Beeinflussung mehrerer Prozessgrößen.

Abb. 6-5 gibt einen Überblick über technologische AC-Systeme.

ACC zielt auf die konstante Ausnutzung der Leistungsfähigkeit von Werkzeug und Maschine zur Verkürzung der Bearbeitungszeit; mit ACO sollen optimale Schnittbedingungen im Hinblick auf Verkürzung der Bearbeitungszeit und Reduktion der Fertigungsgesamtkosten erreicht werden. Bei der spangebenden Fertigung werden beide Systeme bei der Schruppbearbeitung eingesetzt. Ihre Anwendung ist zurzeit noch begrenzt. Probleme treten insbesondere bei den Sensoren zur Erfassung der kennzeichnenden Prozessgrößen auf. Praktische Einsatzfälle der ACO sind bei der funkenerosiven Bearbeitung bekanntgeworden, wo die Erfassung der vorwiegend elektrischen Prozessgrößen zufriedenstellend gelöst werden konnte.

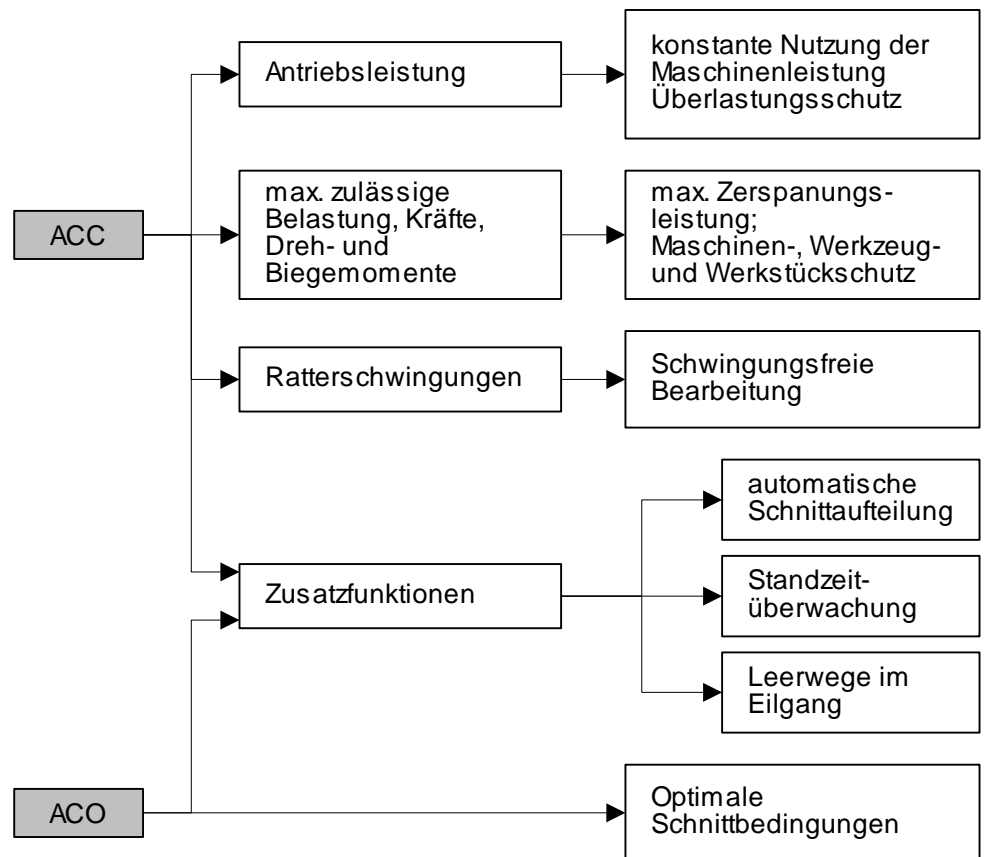


Abb. 6-5 Technologische AC-Systeme

Geometrische AC-Systeme sollen die Toleranzen des Werkstücks bei der Fertigbearbeitung garantieren bzw. verbessern. Dabei macht vor allem die direkte Erfassung der Werkstückabmessungen im Augenblick ihrer Entstehung Schwierigkeiten. Gelöst ist das Problem bei verschiedenen Schleifverfahren.

### 6.3 Flexible Fertigungssysteme

Flexible Fertigungssysteme (FFS) sind Fertigungsanlagen, die mit möglichst geringem Aufwand an Umrüstzeit für die automatische Fertigung unterschiedlichster Werkstücke eingesetzt werden können. FFS sind geeignet, auch kleinste Losgrößen, im Grenzfall auch Einzelstücke, wirtschaftlich selbständig zu bearbeiten.

FFS bestehen aus Arbeitsmaschinen, vorwiegend numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen, die über rechnergesteuerte Transportsysteme so miteinander verknüpft sind, dass innerhalb systembedingter Grenzen unterschiedliche Fertigungsabläufe an unterschiedlichen Werkstücken automatisch in wahlfreier Folge und bei unterschiedlichen Stückzahlen ausgeführt werden können.

Die einzelnen Arbeitsmaschinen sind für den automatischen Arbeitsablauf mit automatischen Werkstückwechseleinrichtungen, Werkzeugwechseleinrichtungen und automatischen Spannmittelwechseleinrichtungen ausgestattet.

Die beim Einsatz numerisch gesteuerter Organisationsformen von der Einzelmaschine über die Fertigungszelle zum Flexiblen Fertigungssystem möglichen Automatisierungsstufen sind in Abb. 6-6 zusammengestellt.

FFS sind durch Merkmale gekennzeichnet, die den vollautomatischen Fertigungsablauf ermöglichen:

### *Automatischer Werkstücktransport*

Die zu bearbeitenden Werkstück-Ausgangsteile werden auf Arbeitspaletten aufgespannt, die in einem Palettenbahnhof abgespeichert werden. Zur automatischen Werkstückerkennung werden die Paletten codiert, so dass der zentrale Systemsteuerungsrechner jederzeit über den Palettenstandort informiert ist und die Bearbeitungsstationen mit den jeweils erforderlichen Bearbeitungsprogrammen versorgen kann.

Der automatische Transport der Arbeitspaletten zwischen den Bearbeitungsstationen erfolgt je nach Art und Grösse des FFS mit Portalrobotern (Abb. 6-7) oder mit Transportwagen, die über Steuerleitungen im Boden induktiv gesteuert werden (Abb. 6-8).

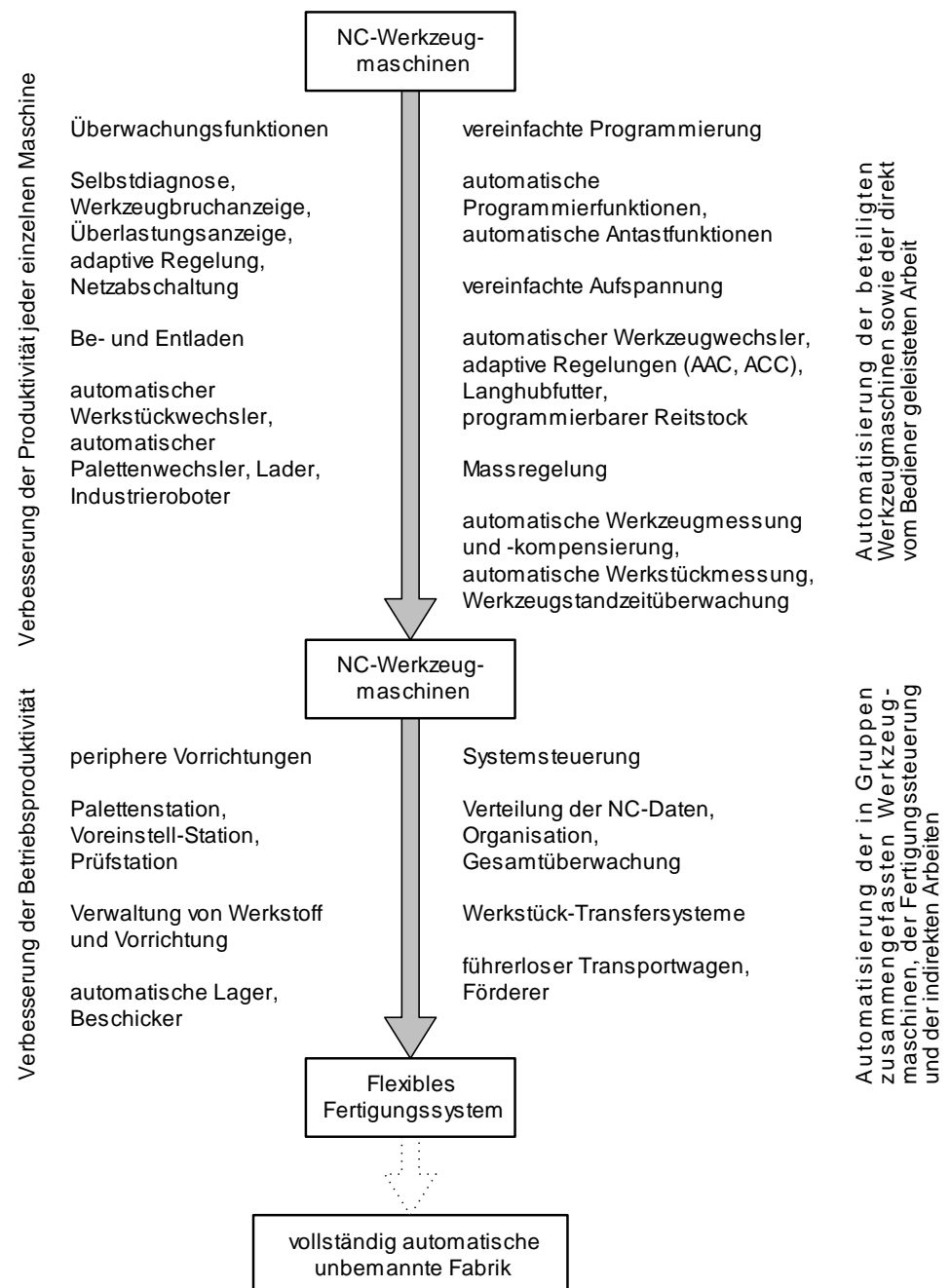


Abb. 6-6 Automatisierungsstufen von der NC-Werkzeugmaschine über die Fertigungszelle zum flexiblen Fertigungssystem

### *Integrierte Werkstückmessung für folgende Aufgaben*

- prüfen auf Vorhandensein eines Werkstücks
- festlegen des Nullpunkts eines Teileprogramms
- bestimmen von Werkstück-Ausgangsabmessungen, um überflüssige Leerwege zu vermeiden
- überprüfen kritischer Bearbeitungsmasse zur Kontrolle der Toleranzhaltigkeit der Bearbeitung
- automatische Kompensation von Werkzeugverschleiss.

### *Überwachung von Schnittkräften und Drehmomenten bei der Bearbeitung*

Diese Überwachung ermöglicht optimale Ausnutzung von Werkzeugen und Maschine bei der Zerspanung, ermöglicht aber auch das Erkennen von Werkzeugverschleiss bzw. bei Drehmomentabfall auf Null von Werkzeugbruch.

### *Autarke Arbeitsweise einzelner Systemkomponenten*

Die Steuerung von FFS ist modular aufgebaut, so dass beim Ausfall einzelner Systemkomponenten nicht die Gesamtanlage stillsteht. Die einzelnen Einrichtungen, einschliesslich aller Bearbeitungsstationen, können auch selbständig arbeiten, so dass das System bei Störungen mit verminderter Leistungsfähigkeit arbeitsfähig bleibt.

Abb. 6-7 zeigt ein flexibles Fertigungssystem für Werkstücke mit unregelmässigen Formen. Bearbeitet werden vorwiegend Turbinenschaufeln mit Längen von 250 bis 1000mm und Querschnitten von 40x60mm bis 100x100mm. Innerhalb dieses Rahmens sind beliebige Werkstückformen bearbeitbar.

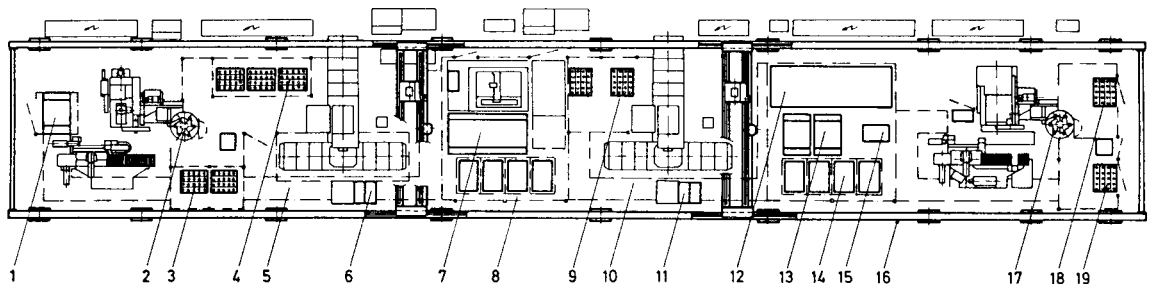


Abb. 6-7 Flexibles Fertigungssystem für Werkstücke mit unregelmässigen Formen

mit Portalroboter zum Werkstück- und Werkzeugtransport  
(Liebherr Verzahrtechnik GmbH, Kempten/KWU, Mühlheim)

- |   |  |                              |
|---|--|------------------------------|
| 1 Zwischenspeicher                        | 6 Vorablage                                | 11 Vorablage                 |
| 2 Greifarmspeicher                        | 7 Zwischenspeicher                         | 12 Zwischenspeicher          |
| 3 Werkzeugspeicher                        | 8 Roh- und Fertigteilpuffer                | 13 Zwischenpuffer            |
| 4 Werkzeugspeicher                        | 9 Werkzeugspeicher                         | 14 Vor- und Fertigteilpuffer |
| 5 Übergabestation für<br>Spannvorrichtung | 10 Übergabestation für<br>Spannvorrichtung | 15 Ausrichtstation           |
|   |  | 16 Portalroboter             |
|   |  | 17 Greifarmspeicher          |
|   |  | 18 Werkzeugspeicher          |
|   |  | 19 Werkzeugspeicher          |

Eingesetzt werden vier CNC-Bearbeitungszentren, ein Rohteilspeicher für 180 Teile, Zwischenspeicher für 450 Teile, ein Fertigteilspeicher für 180 Teile und Werkzeugspeicher für 100 Werkzeuge. Ausserdem gehören zu der Anlage eine Messmaschine und eine Waschanlage für die Fertigteile. Den Werkstücktransport zwischen den einzelnen Systemkomponenten übernimmt ein Portalroboter mit zwei Transportwagen. Bei Bedarf kann der Portalroboter selbsttätig das Greifsystem wechseln und so unterschiedlichen Transportaufgaben für Werkstücke und Werkzeuge anpassen.



In Abb. 6-8 ist ein FFS dargestellt, das aus einer Lade-, Entlade- und Pufferstation für acht Paletten, drei CNC-Bearbeitungszentren, einer rechnergesteuerten Messmaschine, einer programmierbaren Wasch- und Trockenstation sowie einem induktiv gesteuerten Transportwagen besteht.

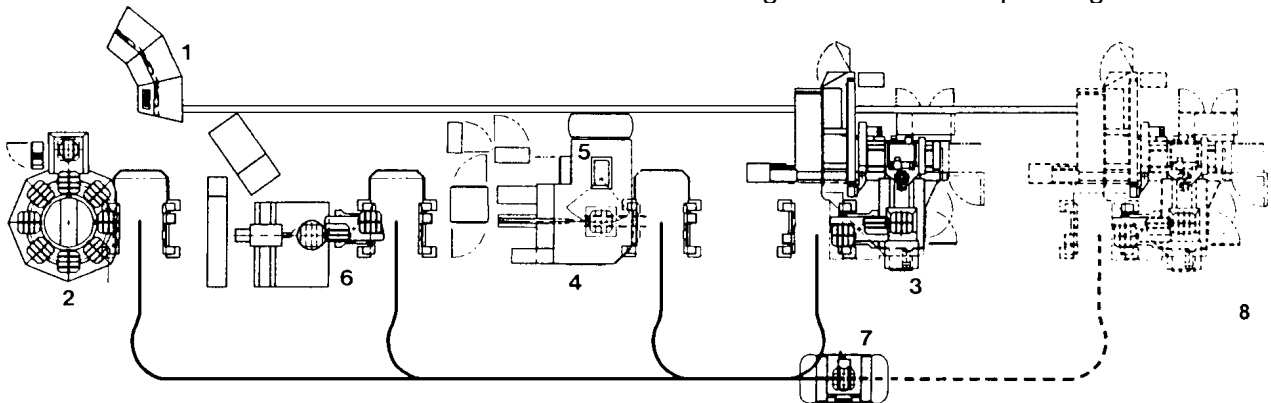


Abb. 6-8 Flexibles Fertigungssystem mit induktiv gesteuertem Transportwagen (Cincinnati Millacron)

- |                                    |                            |
|------------------------------------|----------------------------|
| 1 Steuerungssrechner               | 5 Industrieroboter         |
| 2 Lade- / Entlade- / Pufferstation | 6 Koordinaten-Messmaschine |
| 3 Bearbeitungszentrum              | 7 Transportwagen           |
| 4 Wasch- und Trockenstation        | 8 weitere Bearbeitung      |

Das Steuerungssystem eines FFS lässt sich in drei Hierarchieebenen aufgliedern:

- Die Werkstück-Bearbeitungsvorgänge auf den einzelnen CNC-Maschinen werden über DNC-fähige CNC-Steuerungen gesteuert.
- Die peripheren Steuerungsaufgaben des FFS wie Werkstücktransport, Werkstückerkennung, Steuern von Handhabungseinrichtungen, Palettenwechsel werden von speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) gesteuert und kontrolliert.
- Der Fertigungsleitreechner steuert den Informationsaustausch zwischen den einzelnen Stationen der FFS. Dieser Rechner erhält die Planungsdaten darüber, welche Werkstücke zu welchem Zeitpunkt verfügbar sein müssen. Von der FFS erhält er Rückmeldungen über den Fertigungsstand. Er überwacht die Verfügbarkeit von Werkstoff, Maschinen und Werkzeugen, führt die Feinplanung durch und entwickelt bei Abweichungen Ausweichstrategien. Der Fertigungsleitreechner kann mit den Bereichen CAD, CAM, CAP (Computer Aided Planning) und mit dem kommerziellen Bereich (Einkauf, Verkauf, Terminüberwachung, Materialwirtschaft) gekoppelt werden. Er wird damit zum Koppelpunkt einer computerintegrierten Fertigung (CIM).

## 7 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1	Die drei Phasen der Fertigung	7
Abb. 1-2	Informations- und Materialfluss	8
Abb. 1-3	Entwicklungsstufen des Fertigungssystems Werkzeugmaschine	8
Abb. 1-4	Mechanisierte Stufe	9
Abb. 1-5	Automatisierte Stufe	9
Abb. 1-6	Entwicklungsstufen der Automatisierung	10
Abb. 1-7	Kurvenscheibenantrieb für einen Drehautomat	11
Abb. 1-8	Stetiges hydraulisches Nachformsystem	12
Abb. 1-9	Unstetiges elektrisches Nachformsystem mit Dreistellungs-Kontaktregelung	12
Abb. 1-10	Vorschubbegrenzung	13
Abb. 1-11	Wegabhängige Nockensteuerung	13
Abb. 1-12	Kreuzschienenverteiler	13
Abb. 2-1	Das „NC - Maschinen – Paket“	14
Abb. 2-2	Bezeichnung der Achsen bei NC –Maschinen	15
Abb. 2-3	Beispiele der Bewegungsrichtungen bei Werkzeugmaschinen (aus DIN 66217)	16
Abb. 2-4	Beispiele der Bewegungsrichtungen bei Werkzeugmaschinen (aus DIN 66217)	16
Abb. 2-5	Bezugspunkte einer Drehmaschine	16
Abb. 2-6	Grundschema für eine gesteuerte Achse (4 Bausteine)	18
Abb. 2-7	Grundschema für 2 gesteuerte Achsen (X-Y- Bahnsteuerung)	18
Abb. 3-1	Punkt- oder Positioniersteuerung	19
Abb. 3-2	Streckensteuerung	19
Abb. 3-3	Bahnsteuerung	19
Abb. 3-4	Informationsfluss bei Fertigung auf numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen	21
Abb. 3-5	Beispiel für den Informationsfluss in einer numerischen Steuerung	22
Abb. 3-6	Codes für NC - Steuerungen	23
Abb. 3-7	8 - Spur - Lochstreifen nach DIN 66016	24
Abb. 3-8	Prinzipschema eines fotoelektrischen Lochstreifenlesers	24
Abb. 3-9	Inhalt eines NC-Satzes	25
Abb. 3-10	Beispiel einer Einlesesteuerung	31
Abb. 3-11	Programmierbeispiel (Fräsbearbeitung)	32
Abb. 3-12	Unterschiedliche Arbeitsstrukturen beim Einsatz von CNC-Werkzeugmaschinen	33
Abb. 3-13	Die verschiedenen Programmiermethoden	33
Abb. 3-14	CAD-NC-Verknüpfungsmöglichkeiten	37
Abb. 3-15	Wirtschaftlicher Einsatzbereich einer NC - Werkzeugmaschine	45
Abb. 4-1	Schematischer Aufbau einer CNC-Fräsmaschine mit 3 Achsen	46
Abb. 4-2	Signalflussplan für die Verarbeitung von Weg- und Geschwindigkeitsinformationen bei CNC-Steuerungen	48
Abb. 4-3	Prinzip der Lagesteuerung	49
Abb. 4-4	Die numerische Steuerung mit offenem Wirkungskreis	49
Abb. 4-5	Prinzip der Schlitten-Servosteuerung (Lageregelkreis)	49
Abb. 4-6	Komponenten eines Lageregelkreises	50
Abb. 4-7	Lageregelkreis mit unterlagelter Regelung der Verfahrgeschwindigkeit und des Motorstroms	50
Abb. 4-8	Antriebsmotoren für Vorschübe	52
Abb. 4-9	Bauarten von Gleichstrommotoren	52
Abb. 4-10	Kugelumlaufspindel	54
Abb. 4-11	Hydrostatische Spindelmutter	54
Abb. 4-12	Steifigkeitsverhalten eines Spindelantriebs mit einseitigem und doppelseitigem Axialfestlager	55
Abb. 4-13	Einbaubeispiel für kombiniertes Radial-Axial-Rollenlager für eine Kugelumlaufspindel	55
Abb. 4-14	Spielfreies Getriebe für Vorschubspindeln	56
Abb. 4-15	Spielfreier Vorschubantrieb mit Zahnstange-Ritzel	56
Abb. 4-16	Doppelantrieb gegeneinander wirkend	56
Abb. 4-17	Drehgeber an der Motorwelle eingebaut	57
Abb. 4-18	Drehgeber am freien Ende der Spindel eingebaut	58
Abb. 4-19	Drehgeber am beweglichen Teil (Schlitten, Drehtisch) eingebaut	58
Abb. 4-20	Wegmessgeber an beweglichen Teil eingebaut	58
Abb. 4-21	Übersicht: Mess-Systeme und ihre Anordnung	59
Abb. 4-22	Prinzip der analogen und digitalen Messwerterfassung	60
Abb. 4-23	Beispiel einer inkrementalen / absoluten Wegmessung	61
Abb. 4-24	Prinzip der zyklisch-absoluten Wegmessung	62
Abb. 4-25	Inkrementaler Massstab mit abstandscodierten Referenzmarken	62
Abb. 4-26	Massstab mit serielltem Code	63
Abb. 4-27	Prinzip der photoelektrischen Abtastung eines absoluten Längenmassstabs mit 2 Spuren	63

Abb. 4-28	Prinzip eines inkrementalen linearen Messsystems (Heidenhain)	64
Abb. 4-29	Prinzip der photoelektrischen Abtastung bei inkrementalen Verfahren	64
Abb. 4-30	Richtungserkennung bei inkrementalen Messsystemen	65
Abb. 4-31	Innerer Aufbau eines inkrementalen photoelektrischen Drehgebers (Heidenhain)	65
Abb. 4-32	Fünfspuriges binär-codiertes Lineal	66
Abb. 4-33	Dual codierte Wegmassstab mit V-Abtastung	67
Abb. 4-34	Prinzipieller Aufbau eines binär codierten und eines binär-dezimal-codierten Winkelcodieres mit einem Messbereich von mehr als einer Umdrehung	67
Abb. 4-35	Beispiele für ohmsche Aufnehmer	68
Abb. 4-36	Das Induktionsprinzip	68
Abb. 4-37	Ausführungsbeispiele des Induktosyns	69
Abb. 4-38	Wicklungsanordnung des Linearinduktosyns	69
Abb. 4-39	Prinzip des Einbaus eines Induktosyn	70
Abb. 4-40	Prinzipielle Darstellung und Funktionsweise des Linearinduktosyns	70
Abb. 4-41	Schema und typische Hauptabmessungen eines zweipoligen Resolvers	71
Abb. 4-42	Absolutmesswertgeber bestehend aus 3 Resolvern mit Präzisionsuntersetzungsgetrieben	72
Abb. 4-43	NC-Steuereinheit (CNC ACIERA 3000)	73
Abb. 4-44	Aufbau einer NC-Steuereinheit	74
Abb. 4-45	Prinzip der zweistufigen Interpolation	75
Abb. 4-46	Zweistufige Kreisinterpolation	76
Abb. 4-47	Linearinterpolation nach dem DDA - Verfahren	76
Abb. 4-48	Blockschaltbild eines DDA - Linearinterpolators	77
Abb. 4-49	Zahlenbeispiel einer DDA - Linearinterpolation	78
Abb. 4-50	Kreisinterpolation mit dem DDA - Verfahren	79
Abb. 4-51	Evolventenförmige Interpolation nach dem DFB - Verfahren	80
Abb. 5-1	Fehlerquellen einer Werkzeugmaschine	81
Abb. 5-2	Test-Teil Type NAS (National Aerospace Standard Washington)	81
Abb. 5-3	NCG-Prüfwerkstück 2004	82
Abb. 5-4	NCG- 2005 (Prüfwerkstück für die 5-Achs-Simultan Fräsbearbeitung)	83
Abb. 5-5	Prinzip der Längenmessung mit einem Laser - Interferometer	84
Abb. 5-6	Grafische Darstellung des Positionierfehlers bei einseitigem Anfahren	85
Abb. 5-7	Grafische Darstellung des Positionierfehlers bei zweiseitigem Anfahren	86
Abb. 5-8	Grafische Darstellung der Positionierfehler auf dem Fahrweg einer Achse	87
Abb. 6-1	DNC-Systeme:	89
Abb. 6-2	Funktionen eines DNC-Systems (nach VDI 3424)	90
Abb. 6-3	Informationsfluss bei DNC-Systemen	90
Abb. 6-4	Regelung der Technologie eines Zerspanungsprozesses (Adaptive Control)	92
Abb. 6-5	Technologische AC-Systeme	93
Abb. 6-6	Automatisierungsstufen von der NC-Werkzeugmaschine über die Fertigungszelle zum flexiblen Fertigungssystem	94
Abb. 6-7	Flexibles Fertigungssystem für Werkstücke mit unregelmässigen Formen	95
Abb. 6-8	Flexibles Fertigungssystem mit induktiv gesteuertem Transportwagen (Cincinnati Millacron)	96