

1

Antriebsregelung für CNC-Werkzeug- maschinen

Hans B. Kief, Jan Meyer

Die exakte Führung der von einer CNC berechneten Werkzeugbahn in Kombination mit der Spindeldrehzahl sind die wichtigsten Funktionen zur Erzeugung maßhaltiger Werkstücke. Dazu muss auch bei simultaner Bewegung von 2, 3 oder mehr NC-Achsen die programmierte Schnittgeschwindigkeit am Werkstück exakt eingehalten werden. Die während der Bearbeitung oft wechselnden Schnittkräfte sind Störeinflüsse, die schnell ausgegletzt werden müssen. Dieses exakte und stabile Einhalten der programmierten Positions- und Geschwindigkeitswerte ist Aufgabe einer präzisen und dynamischen Regelung der Antriebe.

1.1 Definition

Die Begriffe Steuerung und Regelung werden fälschlicherweise oft synonym verwendet. Eine **Steuerung** gibt lediglich Werte vor, ohne den Ist-Zustand zu prüfen. Beim Einwirken von Störungen werden diese nicht erkannt und es entstehen Abweichungen von der gewünschten Sollgröße. Daraus würden bei der NC-Bearbeitung Ungenauigkeiten am Werkstück entstehen. Da aber die vorgegebenen Werte möglichst exakt eingehalten werden müssen, ist die Regelung von Vorschubgeschwindigkeit und Spindeldrehzahl bei CNC-Maschinen unverzichtbar.

Regelung bezeichnet explizit einen geschlossenen Informationskreislauf, bei dem der Istwert der Regelgröße zurückgeführt und mit dem Sollwert verglichen wird. Aus der Regeldifferenz und der Reglerverstärkung ergibt sich die Stellgröße, mit dessen Hilfe die Regelgröße (z. B. Drehzahl oder Position) erreicht bzw. eingehalten werden soll.

Regelungstechnik ist eine Ingenieurwissenschaft, die für viele technische Prozessabläufe benötigt wird. Das besagt bereits, dass dieses Thema mit Mathematik und Formeln verbunden ist. In diesem Kapitel sollen jedoch nur die funktionellen Zusammenhänge der Regelungstechnik erläutert werden. In der CNC-Technik handelt es sich dabei in erster Linie um die Regelung von Spindeldrehzahl und Bewegungen der NC-Achsen.

Die prinzipielle Grundstruktur eines Standard-Regelkreises zeigt *Bild 1.1*.

Bild 1.2 zeigt die **Sprungantwort**, d. h. die Reaktion der Spindeldrehzahl auf eine sprungförmige Sollwertänderung, und zwar links einer nicht optimierten und rechts einer optimierten Reglereinstellung. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Kurve der optimierten Reglereinstellung dem Sollwert (blau) wesentlich schneller und genauer folgt als die der nicht optimierten Einstellung.

Beim Abgleich der Reglereinstellung widersprechen sich meistens zwei Forde-

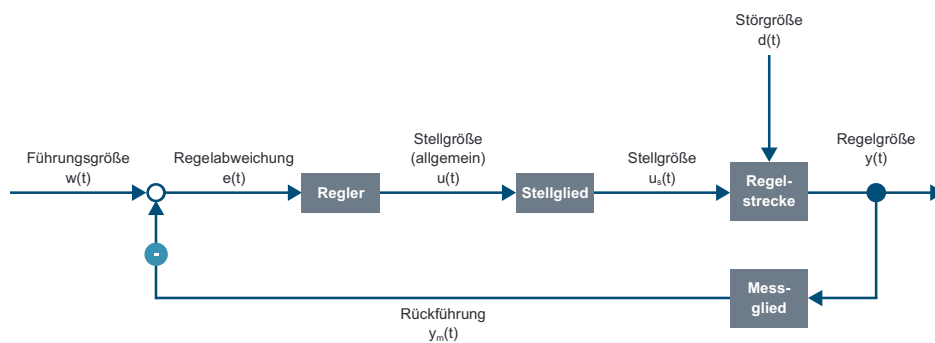


Bild 1.1: Standard-Blockdiagramm. In einem Drehzahl-Regelkreis bedeuten die Bezeichnungen:

- Führungsgröße = Drehzahl-Sollwert
- Regelabweichung = Soll-Istwert-Differenz
- Stellgröße = Sollwert für das Stellglied (Verstärker)
- Regelstrecke = Servomotor + Mechanik
- Störgröße = z. B. Belastungsänderungen
- Regelgröße = Drehzahl
- Messglied = Drehzahlmessgerät
- Rückführung = Drehzahl-Istwert

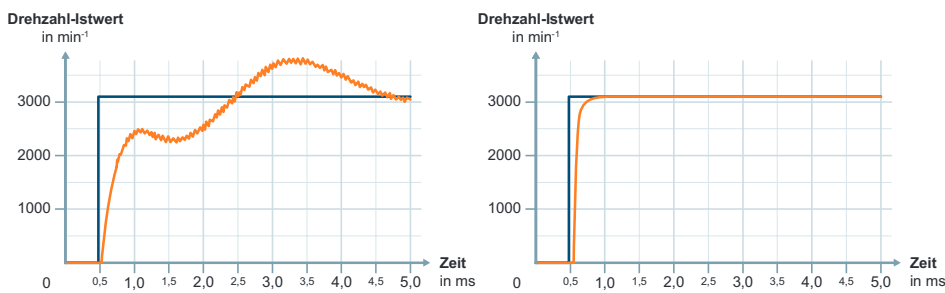


Bild 1.2: Sprungantworten (dynamisches Verhalten) einer drehzahlgeregelten Hauptspindel, links mit Regler-Standardwerten, rechts mit optimierten Reglereinstellungen.

Blau: Sollwert, rot: Istwert.

rungen, nämlich die Solldrehzahl **in kürzester Zeit** zu erreichen, jedoch **ohne** Überschwingen. Dies könnte bei einer spanenden Bearbeitung zu unerwünschtem Materialabtrag und Fehlern am Werkstück führen.

1.2 Achsmechanik

Um die Funktionsweise der Antriebsregelung **einer NC-Achse** zu erläutern betrachten wir zunächst die Achs-Mechanik. Vereinfacht ergibt sich der mechanische Aufbau einer Achse wie in *Bild 1.3* dargestellt.

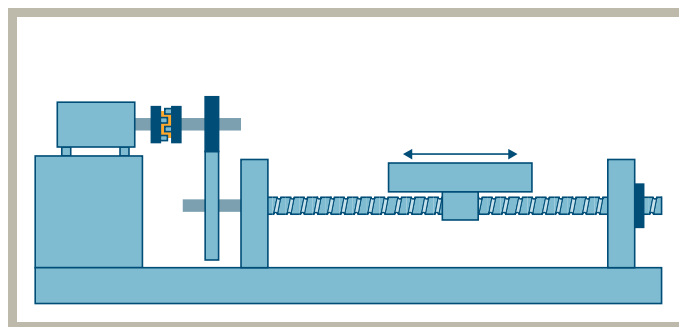


Bild 1.3: Vereinfachter mechanischer Aufbau einer Maschinenachse.

Jede NC-Achse ist aus verschiedenen Komponenten aufgebaut, wie z. B. Motor, Kupplung, Getriebe, Kugelumlaufspindel. Diese haben bei unterschiedlichen Maschinen unterschiedliche mechanische Eigenschaften, die wiederum im Zusammenspiel das dynamische Verhalten der Achse (Trägheitsmoment, Resonanzen, Reibung ...) bestimmen.

Um eine bestmögliche Bewegungsführung zu erreichen, d. h. die Achse bei hoher Dynamik präzise entlang einer programmierten Werkstückkontur zu führen, ist es erforderlich, die Regler der Steuerung an die aktuelle Mechanik anzupassen und die Reglereinstellung anlagenspezifisch zu optimieren.

Als nächstes soll die Erzeugung der **Sollwerte**, d. h. die von der CNC vorgegebenen Positionswerte, betrachtet werden. Diese werden durch das NC-Programm bestimmt, denn dort werden Bahn-Vorschübe und die Kontur des Werkstücks definiert. Hieraus errechnet die CNC fortlaufend Positions-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte für jede der beteiligten Achsen. Zusätzlich wird die Einhaltung gewisser Grenzen sichergestellt: Stellglied und Motor sind für eine begrenzte Stromstärke ausgelegt, die Mechanik für eine Belastung mit einer maximal zulässigen Kraft bzw. Drehmoment. Diese Grenzwerte bestimmen die

zulässige Beschleunigung. Damit soll sichergestellt werden, dass weniger Schwingungen der Mechanik entstehen und das Ruckverhalten, d. h. die Beschleunigungsänderung, begrenzt wird. Die von der CNC errechneten Positions- und Geschwindigkeitswerte werden unter Beachtung dieser Grenzwerte in Form von fortlaufenden Sollwerten als **Führungsgröße** an die Antriebs-Regelung ausgegeben.

1.3 Analoge Regelung

Um eine hochdynamische, präzise Bewegungsregelung bei CNC-Maschinen zu realisieren ist eine relativ komplexe Reglerstruktur erforderlich, die im Folgenden vereinfacht erläutert werden soll (Bild 1.4).

Wichtigste Aufgabe der **Positionsregelung** ist, mit einer entsprechenden Motordrehzahl eine **programmierte Position** möglichst schnell zu erreichen und zu stabilisieren, oder einer **berechneten Bahnkurve** präzise zu folgen. Die erreichten Lage-Istwerte werden ständig durch ein Messsystem kontrolliert. In der CNC wird die tatsächliche Position (**Istwert**) mit der errechneten Position (**Sollwert**) verglichen. Aus der Differenz ergibt sich der Drehzahlsollwert. Der **Drehzahl-Regler** „regelt“ diesen Vorgang ständig, um alle Drehzahl-Sollwerte genau einzuhalten.

Um für alle Servomotoren **Position und Drehzahl gleichzeitig** zu regeln, bedient man sich des Konzepts geschachtelter Regelschleifen, auch als **kaskadierte Regelkreise** bezeichnet (Bild 1.4). Somit ist es einfacher, die Sollwerte und die Regler der einzelnen Regelkreise getrennt voneinander optimal einzustellen.

Bei CNC-Maschinen ist der **Lageregelkreis** die wichtigste, äußerste Struktur. Die Drehzahlregelschleife folgt als nächstes, sie wird vom Ausgang des Lagereglers (= Regelabweichung) der CNC gespeist. Das bedeutet, dass der Stromregler seinen Sollwert vom Drehzahlregler erhält. Somit lässt sich eine Drehzahl einstellen, ohne dabei explizit den Strom vorher berechnen zu müssen. Die erforderliche Stromstärke ergibt sich dann aus den kaskadierten Regelkreisen. Die Rückführung des Stromwertes übernimmt hierbei auch die wichtige Aufgabe der **Strombegrenzung** für den Motor, um die vorgegebenen Grenzwerte für Drehmoment und Erwärmung nicht zu überschreiten.

Die beschriebenen Strukturen eines kaskadierten Regelkreises sind deutlich erkennbar: Lageregler, Drehzahlregler, Stromregler.

1.4 Analoge vs. Digitale Regelung

Bild 1.5 zeigt die vereinfachte Struktur eines **digitalen** Regelkreises. Am Beginn der Wirkkette steht wieder die CNC. In deren Interpolator wird die Geometrie des zu fertigenden Werkstücks in einzelne mathematisch definierte Abschnitte bzw. in lineare Polygonzüge pro Achse zerlegt und einzuhaltende Begrenzungen bei der Sollwertberechnung berücksichtigt. Vom Interpolator werden in der numerischen Steuerung zyklisch und in gleichbleibenden, kurzen Zeitabständen die Lagesollwerte für jede Maschinenachse errechnet.

Es folgen noch Filter für die Einhaltung von Toleranzen, Maximalgeschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck, sowie einige Lagesollwert-Filter, die u. a. der Minimierung des **Schleppabstands** der an einer Bahn beteiligten Achsen dienen (Bild 1.9). Der sich daraus ergebende fortlaufende Lagesollwert wird ständig in den Regelkreis eingespeist.

Numerische Steuerungen und Antriebstechnik haben in den vergangenen Jahren einen hohen Leistungsstandard erreicht. Lange Zeit stand nur eine international ge-

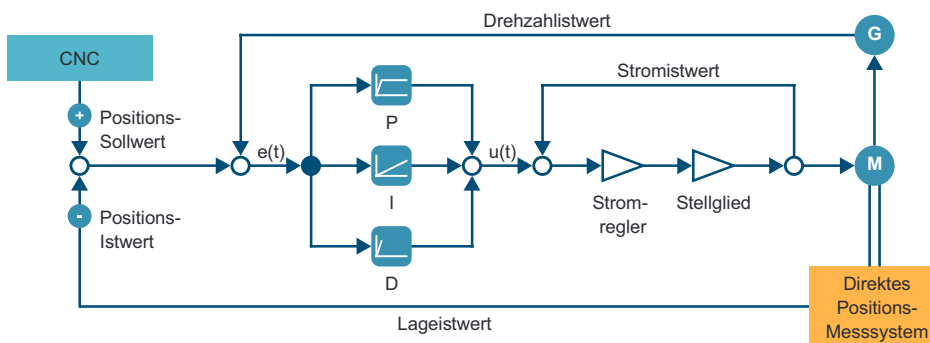
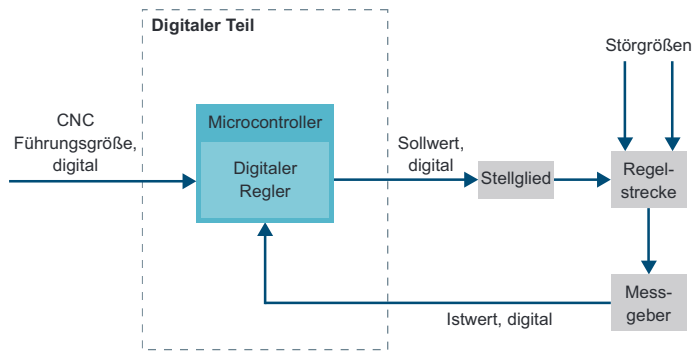


Bild 1.4: Analoge Positionsregelung eines Servoantriebs mit überlagerten (kaskadierten) Regelkreisen für Motorstrom, Drehzahl und Position. Für einen Synchron-Motor käme noch ein weiterer Regelkreis für die „elektronische Kommutierung“ hinzu.

Bild 1.5: Vereinfachte Reglerstruktur eines digitalen Achsantriebs. Der digitale Teil des Reglers befindet sich innerhalb der gestrichelt umrandeten Fläche. Alle anderen Teile funktionieren weiterhin analog oder in neueren Regelkreisen ebenfalls digital.



normte, analoge ± 10 Volt Antriebsschnittstelle zur Steuerung der Antriebe zur Verfügung. Deshalb wurden noch bis vor einigen Jahren Antriebsregelungen vorwiegend mittels der analogen Schnittstellen realisiert. Heute geschieht dies vorzugsweise digital. Hierbei übernimmt ein Mikrocontroller die Aufgaben des digitalen Reglers. Dies bringt den Vorteil mit sich, dass die Regler sehr viel flexibler konfigurierbar und weniger anfällig für Störungen sind. Zudem lassen sich die einzelnen Regelkreise automatisch aufeinander abstimmen. Auch die Istwerte werden heute digital zurückgeführt und direkt verarbeitet, sodass D/A-Umsetzer entfallen.

Der **theoretische Nachteil** digitaler Regelkreise ist, dass kein kontinuierlicher Signalfluss mehr erfolgt, sondern alle Messwerte gleichzeitig „abgetastet“ werden müssen. Die Häufigkeit der Abtastung, d. h. die **Abtastfrequenz** bestimmt hierbei die Reglerdynamik. Je höher die Abtastfrequenz, desto präziser ist die Regelgüte. Durch die hohe Leistungsfähigkeit der Prozessoren lässt sich ein insgesamt sehr viel besseres Regelkreisverhalten erzielen als bei analogen Antrieben.

Aus dem Wirkschaltbild (Bild 1.5) eines typischen digitalen Regelkreises geht hervor, dass das Leistungs-Stellglied und die Regelstrecke (der AC-Servomotor) weiter-

hin mit analogen Signalen arbeiten könnten. Lediglich der **Mikrocontroller** übernimmt die Aufgabe eines digitalen Reglers, indem er einen programmierten Regelalgorithmus ausführt. Dazu gehören auch Anweisungen, die das Einlesen der Messwerte steuern und die berechneten Stellgrößen wieder ausgeben. Das alles kann nur periodisch mit der Abtastfrequenz und gleichzeitig für alle Messwerte wiederholt werden.

1.5 Digitale intelligente Antriebstechnik

Die gesamte Signalverarbeitung eines digitalen intelligenten Antriebs kann heute mit einem Mikrocontroller erfolgen (Bild 1.6). Dieser kann nicht nur die herkömmliche Drehmoment- und Geschwindigkeitsregelung übernehmen. Ohne zusätzlichen Aufwand können auch die **Feininterpolation** und die **Lageregelung** mit extrem kurzen Zykluszeiten und mit höchster Präzision im digitalen Regler erfolgen. Im Vergleich zur herkömmlichen analogen Lageregelung in der CNC werden dabei deutlich höhere Genauigkeiten erzielt, insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten. Die Feininterpolation sichert dagegen bei niedrigen Vorschüben eine ruckfreie, gleichmäßige Bewegung. Die Nutzung dieser Möglichkei-

ten bringt außerdem Kostenreduzierungen durch Vereinfachung der CNC-Hardware und Einsparung von Verkabelung.

Diese Vorteile lassen sich allerdings nur über eine geeignete **digitale Schnittstelle** zur Steuerung erreichen. Da CNC-Maschinen meistens über mehrere Regelkreise für die NC-Achsen und die Hauptspindel verfügen, ist eine Anbindung **aller Regler** über ein leistungsfähiges Bussystem unumgänglich (Bild 1.6). Beispielhaft seien hier SERCOSinterface oder ProfiNet erwähnt. Sercos III, die dritte Generation, und ProfiNet können fast beliebig viele Antriebe mit der Steuerung verbinden.

Digitale Antriebe arbeiten **zyklisch** bei der Soll- und Istwert-Übertragung. Diese Daten müssen in jedem Interpolationszyklus der Steuerung mit allen Antrieben **gleichzeitig aktualisiert** werden, um eine

präzise aufeinander abgestimmte Drehzahlregelung mehrerer NC-Achsen zu ermöglichen. Diese ist erforderlich, um z. B. beim Fräsen komplexer Bahnen oder Flächen die vorgegebenen Toleranzen einzuhalten. Die Zeitpunkte, zu denen die Lage-Istwerte erfasst werden und die Zeitpunkte, zu denen die Sollwerte im Antrieb wirksam werden, sind für die präzise Koordination der Achsen ebenso bedeutend wie die Genauigkeit der interpolierten Lagesollwerte und die Messgenauigkeit.

1.6 Reglertypen und Regelverhalten

(Bild 1.7 und 1.8)

Grundsätzlich werden bei Servoantrieben drei verschiedene Reglertypen mit unterschiedlichen Regelverhalten eingesetzt:

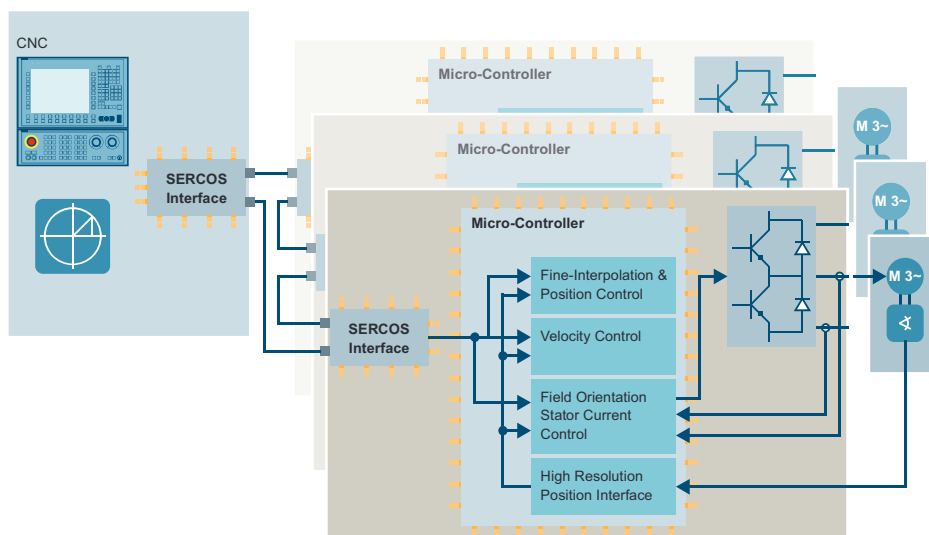
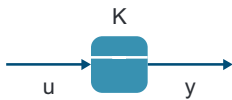


Bild 1.6: Anbindung mehrerer digitaler Regelkreise über SERCOSinterface an die CNC. Die Antriebsregler (Drive Micro Controller) übernehmen die Funktionen Geschwindigkeitsregelung mit Feininterpolation bei niedrigen Geschwindigkeiten, Feldschwächungsbereich des Stators (bei Asynchron-Motoren) und die hochauflösende Positionsmessung für die Feininterpolation. (Quelle: Sercos)

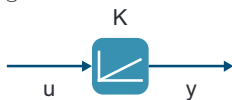
- **P-Regler**, auch **Proportionalregler** genannt. Der Eingang dieses Reglers wird mit der konstanten Reglerverstärkung (KP) multipliziert und am Ausgang ausgegeben, d.h. die Ausgangsgröße y folgt der Eingangsgröße u proportional.



Vorteil: Sehr schnelle Reaktion auf die am Eingang anliegende Regeldifferenz aus Ist- und Sollwert.

Nachteil: Kaum Einfluss auf sehr kleine Regeldifferenzen, d.h. es muss rein physikalisch immer ein Regelfehler bestehen bleiben, da bei einer Regeldifferenz „Null“ kein Ausgangssignal mehr vorhanden wäre.

- **I-Regler**, auch **integrierender Regler** genannt. Der Eingang wird über die Zeit interpoliert und mit der Nachstellzeit (T_N) gewichtet am Ausgang ausgegeben. Je länger eine Regeldifferenz anliegt, umso höher steigt der Ausgangswert. Damit erfasst der Regler auch den zurückliegenden Verlauf der Regeldifferenz.

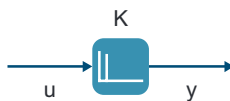


Vorteil: Kein bleibender Regelfehler, d.h. der I-Regler sichert eine stationäre Genauigkeit.

Nachteile: Kann Überschwingen der Regelgröße auslösen. Wegen seiner vergleichsweise langsamen Reaktion wird der I-Regler nie alleine verwendet.

- **D-Regler, Differentialregler**

Dieser Regler wird nur in Verbindung mit P- und I-Reglern eingesetzt. Er reagiert nicht auf die Höhe der Regelabweichung, sondern nur auf deren Änderungsgeschwindigkeit und kann deshalb nicht alleine regeln. D-Regler geben bei Sollwert-Sprüngen einen kurzen Impuls, um Reaktions- und Ausregelzeit zu verkürzen.



Vorteil: Verkürzt die Ausregelzeit

Nachteil: Führt bei falscher Parametrierung zu Schwingungsverhalten.

- Ein **PID-Regler** besteht aus einer Parallelschaltung eines P-, I- und D-Reglers und kombiniert als „Universalregler“ die Funktionen von P-, I- und D-Regler. Der P-Anteil „übernimmt“ das Ausregeln großer Abweichungen, der I-Anteil domi-

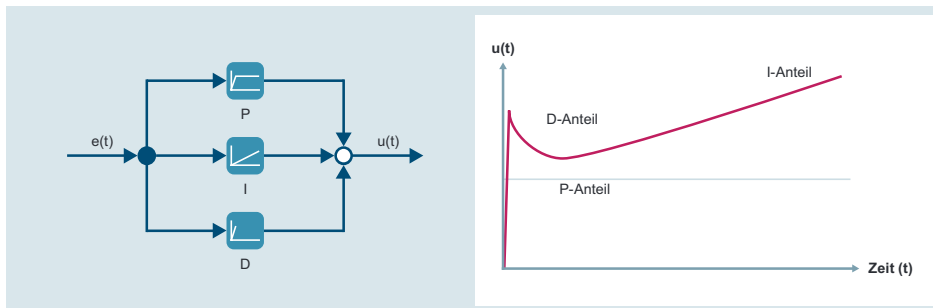


Bild 1.7: Links Parallelschaltung von P-, I- und D-Regler und rechts die Sprungantwort eines PID-Reglers

niert bei kleinen, noch bestehenden Abweichungen und garantiert, dass keine dauerhafte Regelabweichung bestehen bleibt. Der D-Regler sorgt für eine kürzere Reaktionszeit.

Aus den Prinzip-Darstellungen geht **nicht** hervor, dass die Kennlinien jedes Reglers nicht nur bei positiven Sollwertsprüngen, sondern auch beim Abbremsen oder bei Drehrichtungsumkehr, d.h. bei negativen Sollwertsprüngen in gleicher Weise funktionieren müssen.

Zum Abgleich der 3 Reglertypen auf die Regelstrecke werden folgende **Parameterwerte** optimiert (Bild 1.8):

P-Regler: Der **Verstärkungsfaktor** p , d.h. U_a/U_e bis zum Grenzwert von U_a

(± 10 Volt). Die Parametrierung dieses Reglers bestimmt maßgeblich den K_v -Faktor des Regelkreises und damit dessen Stabilität.

I-Regler: Die **Nachstell- oder Integrationszeit**, d.h. je größer diese Zeit, umso langsamer ändert sich der Ausgangswert U_a bis zum Grenzwert.

D-Regler: **Höhe bzw. Dauer des Impulses** (= Vorhaltezeit) in Abhängigkeit von der Änderungsgeschwindigkeit der Regelabweichung. Dies bedeutet, dass langsame Sprünge von U_e einen niedrigen, kurzen Ausgangsimpuls U_a erzeugen, schnelle Eingangssprünge einen hohen, evtl. auch länger dauernden D-Impuls.

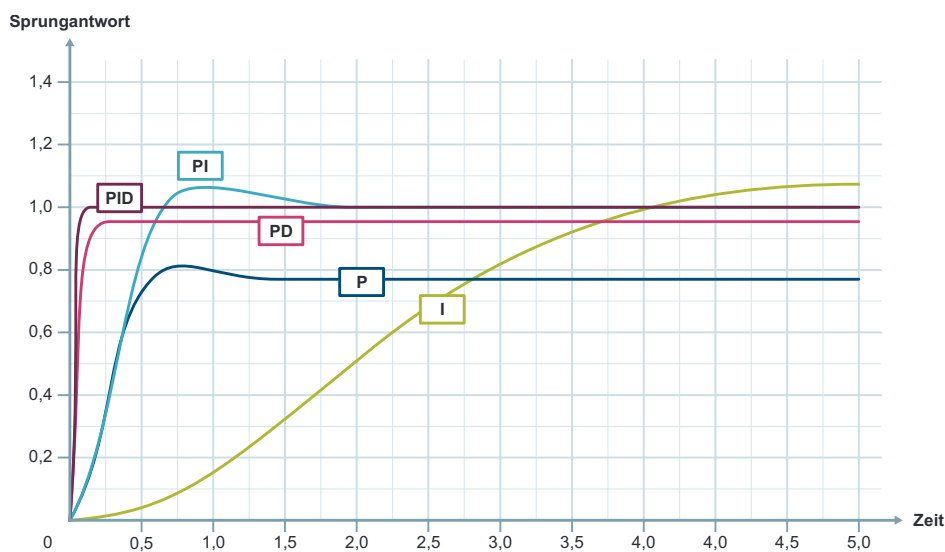
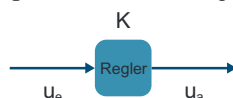


Bild 1.8: Drehzahlregelung; Vergleich des zeitlichen Verhaltens mit verschiedenen Reglertypen. Bei einer sprunghaften Änderung der Eingangsspannung (Sollwert-Sprung) erzeugen die unterschiedlichen Regler das jeweils dargestellte Verhalten der Drehzahl (= Sprungantwort der Regelstrecke).

Der richtig parametrierte PID-Regler zeigt hierbei das ideale Ergebnis: Kürzeste Zeit ohne Überschwingen.

Regler ohne I-Anteil weisen eine bleibende Regelabweichung auf.

(Quelle: Regelungstechnik - rn-wissen.de)

1.7 Kreisverstärkung und K_v -Faktor

Die **Kreisverstärkung** definiert in einem Standard-Regelkreis den **Verstärkungsfaktor**, wie z. B. bei der Drehzahlregelung. Der Verstärkungsfaktor ist dimensionslos und wird definiert durch das Verhältnis $U_{\text{ist}}/U_{\text{soll}}$ bei geöffnetem Regelkreis am Soll-/Istwert-Vergleichspunkt.

Der **K_v -Faktor** dagegen definiert bei CNC-Maschinen die Vorschubgeschwindigkeit in m/min, bei der das Werkzeug einen Schleppabstand von 1 mm hat. Es ist im Prinzip ein Kennwert der dynamischen Genauigkeit einer NC-Achse und wird insbesondere durch die proportionale Regelkreisverstärkung bestimmt.

Der K_v -Faktor ist folglich ein Maß für die Verstärkung im **Positions-Regelkreis**. Damit ist er auch ein **Maß für die Steifigkeit des Antriebs und die dynamische Genauigkeit** der Maschine. Je genauer eine Kontur abgefahren werden soll, desto langsamer muss bei gleichem K_v -Faktor die Bewegung erfolgen. Soll bei gleicher Genauigkeit die Kontur schneller abgefahren werden, muss der K_v -Faktor erhöht werden. Dazu muss die mechanische Belastbarkeit der Maschine bekannt sein, da ein zu großer K_v -Faktor zu Schwingungen im Regelkreis und Instabilität des Antriebssystems führt, was sich wiederum negativ auf die Maschine und das Bearbeitungsergebnis auswirkt.

Deutlicher als bei der Kreisverstärkung zeigt der K_v -Faktor einer NC-Achse direkt den Einfluss des Verstärkungsfaktors auf das Verhalten der NC-Achse.

Die Einheit ist:

$$K_v = \frac{\text{Verfahrgeschwindigkeit in m/min}}{\text{Schleppabstand in mm}}$$

Mithilfe des ermittelten K_v -Faktors lässt sich auch berechnen, wie groß die **Positionsabweichung bei einer bestimmten Geschwindigkeit** ist. Darf ein bestimmter Schleppabstand nicht überschritten werden, um die vorgegebenen Toleranzwerte bei der Bearbeitung des Werkstücks einzuhalten, dann kann über den bekannten K_v -Faktor die maximal zulässige Verfahrgeschwindigkeit berechnet werden.

Je größer der K_v -Faktor, desto schneller kann die CNC-Maschine Teile bearbeiten und die geforderten Genauigkeiten einhalten. Dies lässt sich am sichersten mit direkten Linearantrieben erreichen.

Durchschnittliche **K_v -Werte** bei CNC-Maschinen liegen bei 1 bis 5 m/(min mm). In Verbindung mit direkten Linearantrieben können die Maximalwerte je nach Maschine bis 10 m/(min mm) erhöht werden.

Mit dem sog. **Kreisformtest** lässt sich die Bahngenauigkeit einer Werkzeugmaschine überprüfen, der K_v -Faktor messen und falsch eingestellte K_v -Faktoren einzelner NC-Achsen erkennen und korrigieren.

1.8 Vorsteuerung

Da durch die Berechnungen des Bahn-Interpolators der CNC bereits bekannt ist, mit welcher Drehzahl und mit welchem Drehmoment die Positionen angefahren werden sollen, ist es möglich, den jeweils überlagerten Regler für diese Größen zu umgehen. Die berechneten Werte werden dann direkt auf den Ausgang der vorhergehenden Regler aufaddiert und somit als Sollwert für den nächsten Regler vorgegeben. Dies bezeichnet man als Vorsteuerung. Durch das Umgehen des überlagerten Reglers wird die Zeit, die dieser für die Berechnung benötigt, eingespart. Somit wird der Sollwert früher an die Achse weitergegeben und der Schleppabstand schneller reduziert (*Bild 1.9*).

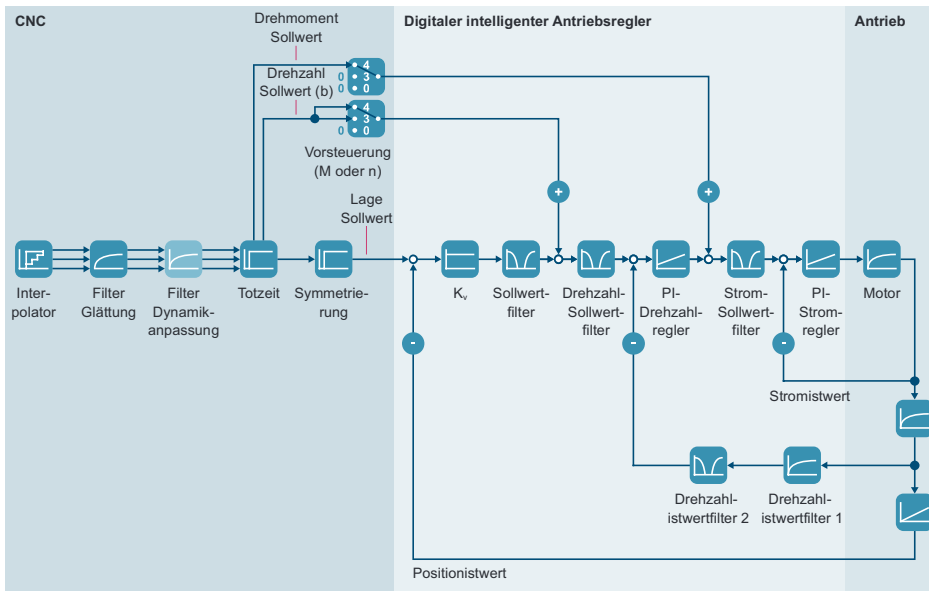


Bild 1.9: Digitaler intelligenter AC-Antriebsregler mit Profinet am Beispiel Sinumerik und Sinamics-Antriebssystem, mit Vorsteuerung für Drehmoment (M) und Drehzahl (n). Quelle: Siemens.

Zudem werden die Regler durch die Vorsteuerung entlastet, da sie nur noch Störungen (d.h. nicht vermeidbare Einflüsse wie Reibung, Differenzen in den Werkstückmassen, unterschiedliche Spannelemente, etc.) ausregeln müssen. Damit ist eine Optimierung des Reglers auf die Beseitigung von Störungen möglich, wodurch diese schneller ausgeglichen werden können. Dadurch wird das Positionierverhalten genauer.

In modernen Werkzeugmaschinen werden sowohl Drehzahl, als auch Drehmoment vorgesteuert.

1.9 Frequenzumrichter

Heutige CNC-Maschinen werden vorzugsweise mit **regelbaren Drehstrommotoren** ausgerüstet, die im Vergleich mit anderen Servomotoren mehrere Vorteile bieten (siehe nachfolgende Kapitel).

Am normalen Drehstromnetz betriebene Synchron- und Asynchron-Motoren laufen nur mit ihrer Nenndrehzahl, d.h. bei 50 Hz Netzfrequenz je nach Ständerwicklung mit 3000, 1500 oder 1000 Umdrehungen pro Minute. Bei Asynchronmaschinen abzüglich der Schlupfdrehzahl. Eine Drehzahlregelung ist nicht möglich. Das gelingt nur durch Änderung der Netzfrequenz und ist Aufgabe eines Frequenzumrichters.

Frequenzumrichter sind rein elektronische Geräte, die in sehr aufwändigen Schaltungen und unter Einsatz moderner Hochspannungselektronik funktionieren. Ihre Aufgabe ist es, aus der 400/230 Volt Netzspannung mit 50 Hz Netzfrequenz eine in der **Frequenz und Amplitude regulierbare Wechselspannung** zu erzeugen. Bei CNC-Maschinen dient diese Ausgangsspannung des Frequenzumrichters zur Drehzahlregelung eines Drehstrom-Servo-

antriebs einer NC-Achse oder der Hauptspindel. Dazu müssen Frequenz und Amplitude dieser Spannung je nach Drehzahl und Last präzise gesteuert bzw. geregelt werden.

Zum Betrieb von **Synchron-Servomotoren** ist noch ein zusätzlicher Feedback-Eingang zur Erfassung der momentanen Winkelposition des Rotors mittels eines Drehgebers erforderlich. Mit diesem Feedback wird die elektronische „Kommütierung“, d.h. die Weiterschaltung des Drehfeldes, kontrolliert gesteuert. Gleichzeitig wird auch verhindert, dass durch eine zu hohe Beschleunigung oder Überlast die Drehzahl „kippt“ und der Motor „außer Tritt fällt“, d.h. stehen bleibt.

Aufbau (Bild 1.10)

Im Prinzip bestehen Frequenzumrichter aus **4 Komponenten**:

1. Einem **Gleichrichter**, der einen „Zwischenkreis“ mittels einer Gleichrichterbrücke mit Gleichstrom versorgt. Dazu werden Dioden, Thyristoren oder Transistoren eingesetzt, die wegen ihrer hochfrequenten Schaltfähigkeit die Anforderungen einer Rückspeisung am besten erfüllen.
2. Dem **Zwischenkreis**, bestehend aus einem hochspannungsfesten **Kondensator**, dessen Kapazität an die Ausgangsleistung des Wechselrichters angepasst sein muss. Seine Aufgabe ist die Glättung der vom Gleichrichter erzeugten Gleichspannung. Mit Transistoren lässt sich auch eine variable Zwischenkreispannung erzeugen.
3. Einem **Wechselrichter**, der aus der Gleichspannung die dreiphasige Ausgangsspannung in erforderlicher Höhe und Frequenz zur Drehzahlregelung des angeschlossenen Motors liefert. Dies ist das elektrotechnisch anspruchsvollste Teil, denn es muss den zu regelnden Motor mit einem möglichst sinusförmigen Drehstrom versorgen und bei Synchronmotoren zusätzlich die momentane Winkelstellung des Rotors exakt kennen und bei der Taktung berücksichtigen.
4. Der rechnergestützten **Regelelektronik** zur präzisen Steuerung der gesamten Umrichterelektronik, um die zur Drehzahlregelung des Servomotors erforderliche Spannung und Frequenz so zu generieren, dass die von der CNC vorgegebenen Drehzahl- oder Positionswerte exakt ausgeführt werden.

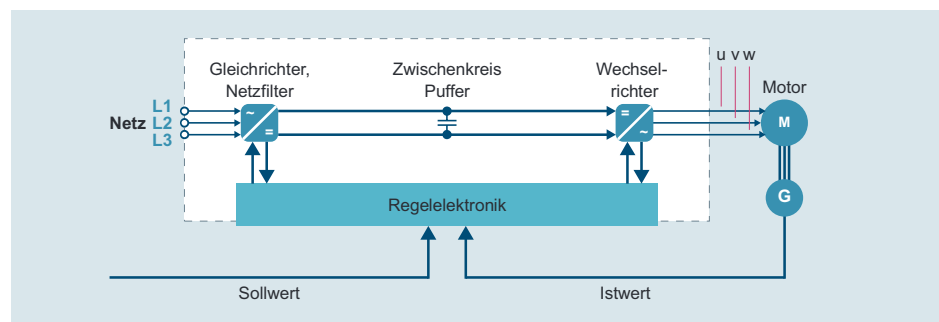


Bild 1.10: Schematischer, prinzipieller Aufbau eines Frequenzumrichters zur Drehzahlregelung von Drehstromsynchron- oder -asynchron-Motoren.

Stichwortverzeichnis

A

Ablaufsprache 190
Abrasiv-Schneiden 349
Abrichten von Schleifscheiben 304
Abrichtgerät 305
Abrichtwerkzeuge 304, 316
Abrichtzyklen 305
ABS-Kupplung 487, 491
absolute Messung 76
Absolutmaße 573
Absolutmaßprogrammierung 573
abstandscodierte Referenzmarken 77
Achsantriebe 465
Achsenbezeichnung 63
Achsen, asynchrone 119
Achsen sperren 119
Achsen, synchrone 122
Achsen tauschen 124
Achsmechanik 212
Achsregelung 445
Achsrückführung, positive 66
Adaptive Control (AC) 143
Adaptive Feed Control 143
Adaptives Bearbeiten 637
Adaptive Vorschubregelung 143
Additive Fertigungsverfahren 373
Additive Manufacturing 712
AGV (Automated Guided Vehicles) 413
angetriebene Werkzeuge 488
angetriebene Werkzeugspindeln 354
Ankratzen 583
Anpassprogramm 117
Anpass-Steuerungen 180
Anpassteil 47
Antriebe, analog/digital 240
Antriebsleistung 259

Antriebsregelung 211
Antriebsregler 228
Antriebstechnik 215
Anweisungsliste 190
Anzeigen in CNC 160
Apps 164
Äquidistantenkorrektur 593
Arbeiten von der Stange 107
Arbeitsfeldbegrenzung 124
AS 190
Asynchrone Unterprogramme 124
Asynchronmotor 233, 247, 249
Aufspannplanung 644
Ausbildung und Schulung 661
Auslegerbohrmaschinen 326
Ausspindelwerkzeuge 491
Auswerteinheit 525
Automated Guided Vehicles (AGV) 415
Automatische Systemdiagnosen 125
Automatisierung 48, 64
- flexible 458
- gleitende 448
AWL 189, 190

B

Bahnsteuerung 43, 284
Bandsägen 328
BDE/MDE 118
Bearbeitungsstrategien 636
Bearbeitungszentrum 101, 203, 279
- mehrspindliges 288
Bedienung 52, 328
Bedienungspersonal 345
Betriebssystem 42, 117
Bezugspunkte 581
Bildschirm 160

Big Data 159, 730
 Blindleistung 469
 Blindstrom 468, 469
 Blindstromanteil 466
 Blockzykluszeit 125, 150, 290
 Bohr-Gewindefräsvorverfahren 497
 Bohrmaschinen 202, 326
 Bohrstangen mit Feindreheinsätzen 492
 Bohrwerk 327
 Bohrzentren 326
 Bohrzyklen 284, 577
 Bohrzyklen G80 – G89 578
 Brennschneiden 334
 Bridge 696
 Bussysteme 459
 Busverbindungen 181

C

C-Achsbetrieb 251, 271
 C-Achse 297
 CAD 704
 CAD/CAM 566
 CAD/CAM-Systeme 717
 CAD-Daten 615
 CAE-Software 708
 CAM (Computer Aided Manufacturing) 704, 707, 718
 CAM-orientierte Geometrie-Manipulation 635
 CAP (Computer Aided Process Planning) 709
 CAPTO-Aufnahmen 487
 CA-Systeme 706
 CBN 484
 CFK-Werkstoffe 288
 Chip 525
 CIM 704
 Closed Loop-Technologie 69
 CNC 117
 – Definition 117
 – für Drehmaschinen 297
 – für Messmaschinen 368
 – für Sägemaschinen 329
 – für Schleifmaschinen 304
 – Grundfunktionen 117
 – offene 166

– Preisentwicklung 170
 – Software 117
 – Sonderfunktionen 123
 – Werkzeugmaschinen 279
 CO₂-Laser 331
 Codeträger 525
 Computer Aided Engineering 708
 Computer und NC 47
 Computerunterstützte Programmierung 613
 Containermanagement 743
 Cyber-Physical Systems (CPS) 730, 741

D

D-Regler 218
 Datenanreicherung 735
 Datenbus und Feldbus 181
 Dateneingabe 51
 Datenkommunikation mit CNC-Steuerungen 671
 Datenmodelle 635
 Datenschnittstellen 119
 Datenumwandlung 150
 Daten und Schnittstellen 646
 Diagnosefunktion 242
 Diagnose-Software 119
 Dialogführung 298
 Diamant 484
 Diamantrollenabrichtgerät 306
 Differentialregler 217
 Digitale Fertigung 715
 Digitale Produktentwicklung 710
 Digitalisierte Fertigung 49
 Digital Light Processing (DLP) 389
 Dimensionierung von Antrieben 254
 DIN 66025 565, 569, 571
 DIN 66217 64
 DIN/ISO-Programmierung 565
 Diodenlaser 333
 Direktantriebe 235
 direktes Messsystem 242
 DNC – Direct Numerical Control 669
 DNC – Distributed Numerical Control 52
 DNC-Schnittstelle 126
 DNC-System 49
 Doppelgreifer 105

Doppelspindel-Bearbeitungszentren 283
 Drahtelektrode 345
 Dreh-Fräszentren 354, 486
 Drehgeber 70, 71
 Drehmaschinen 290
 Drehmoment 246, 258
 Dreh-Schleifzentren 359
 Drehspindel 270
 Drehstrom Synchronmotoren 251
 Dreh-Wälzfräszentren 361
 Drehzahlen 246
 Drehzahlregelung 222
 Drehzahlvorsteuerung 95
 Drehzahlwechsel 110
 Drehzentrum 356
 Drehzyklen 581
 3D-Bearbeitung 632
 3D-Drucken (3DP) 385
 3D-Messmaschine 366
 3D-Modelle 638
 3D-Simulation 599
 3-Finger-Regel 64
 Dry Run 127
 Durchhangfehlerkompensation 88
 DXF 514, 598, 634
 DXF-Konverter 598
 Dynamische Vorsteuerung 85

E

EBM (Electron Beam Melting) 382
 EB-Schweißen 348
 Echtzeit-Ethernet und SERCOS III 183
 Eckenverzögerung 141
 Effektivmoment 259
 Effektor 443
 Einbaumotoren 264
 Einfahren neuer Programme 659
 Einfluss der CNC 201
 Eingabegrafik 621
 Einrichtfunktionen 127
 Einsatz der CNC-Werkzeugmaschinen 52
 Einstechschleifprozess 307
 einstellbare Werkzeuge 491
 Einzelsatzbetrieb 129
 Elektronenstrahl-Maschinen 347
 Elektronischer Gewichtsausgleich 85, 95

elektronische Werkzeug-Identifikation 522
 Energiebilanz 466
 Energieeffizienz 119, 462
 Energiemanagement 746
 Energieverbrauch 464
 Erodiermaschine 345
 ERP 678, 734
 ERP-Lösung 521
 Erzeugungsrad 317
 Ethernet 181, 183, 240, 676
 Evolvente 310

F

F-Adresse 111
 Fabriknetz 404
 Fahrständerbauweise 281, 283
 Fahrständermaschine 328
 Faserlaser 332
 Fast-Ethernet 184
 Feature-Technik 639
 Feinbearbeitung von Bohrungen 491
 Feinverstellköpfe 493
 Feldschwächbereich 250
 Ferndiagnose 154
 Fernzugriff 158
 Fertigungsflexibilität 429
 Fertigungsplanung 434
 Fertigungsprinzipien 408
 Fertigungssimulation 648
 Fertigungssystem (FFS) 110
 FFS-Leitrechner 420
 Flachbettdrehmaschinen 290
 Flachsleifmaschine 299
 flexible Bearbeitungszelle 339
 flexible Fertigungslinien 401
 Flexible Fertigungssysteme 396
 flexible Fertigungszellen 110, 399
 Flurförderzeuge 415
 Formfräsen 310
 Formschleifen 310
 Formverfahren 310
 FRAME 141
 Fräs-Dreh-Bearbeitungszentrum 352
 Fräserradiuskorrektur 593
 Fräs-Laserzentrum 357
 Fräsmaschinen 203, 279

Frässpindel 268, 486
 Fräszyklen 581
 Freiformflächen 632
 Freischneiden 120
 Frequenzumrichter 220, 224, 246
 Führungen 204, 300
 5-Achs-Maschinen 284
 5-Seiten-Bearbeitung 285
 Funkenerosionsmaschinen 344
 Funktionen der NC 117
 Funktionsplan 190
 FUP 189, 190
 Fused Deposition Modeling (FDM) 386

G

G54 ... sG57 585
 Gantry-Achsen 65
 Gantrybauweise 279
 Gateway 696
 generative Fertigungsverfahren 378
 Geometriedaten 290
 geometrische Zuverlässigkeit eines
 Werkzeugs 478
 Gewindebohren 144
 Gewindebohren ohne Ausgleichsfutter
 144
 Gewindefräsen 144, 495
 Gewindeschneiden 298
 G-Funktionen 574
 G-Funktionen nach DIN 66025, Bl. 2 575
 Gleichrichter 221
 Gleichstrom-Servomotoren 232
 Gleitführungen 204
 Grafik 621
 Greifer 443
 Greifer-Wechselsysteme 443

H

Hakenmaschine 206
 Handeingabe 120
 Handeingabe-Steuerungen 613
 Handhabung 438
 Handshake 699
 Hardware 40
 Hardware-Schnittstellen 699

Hartfeinbearbeitung 315
 Hartfeinbearbeitungsmaschine 310
 Hart-Zerspanung 288
 Hauptantriebe 248
 Hauptspindel 264
 Hauptspindelantriebe 246, 260
 High-Performance-Cutting 288
 High Speed Cutting (HSC) 267, 486, 566
 Hilfsachsen 148
 Hilfsgrafik 621
 HMI (Human Machine Interface) 162
 Hobelkamm 312
 Hochgantrybauweise 281
 Hochgeschwindigkeits-Bearbeitungszentrum
 288, 289
 Hochleistungsbearbeitung 288
 Hochsprachenelemente 121
 Hohlschaftkegel 267, 486
 Honen 315
 HPC 288
 HSC 486, 616
 HSC-Bearbeitung 494
 HSK-Aufnahmen 486
 HUB 734
 Hüllschnittverfahren 310
 Human-Machine-Interface 403
 Hydraulik 465

I

IGES 377, 635
 Inbetriebnahme 241
 indirektes Messsystem 242
 Industrie 4.0 725, 739
 Industrieroboter 107, 438, 439, 441
 – Aufbau 440
 – Einsatzkriterien 458
 Informationen 687
 inkrementale Messung 76
 Innengewindefräsen 495
 In-Prozess-Messen 146
 Integrierte Simulations-Systeme 659
 integrierte Werkzeugkataloge 515
 Interdisziplinarität 727
 Internet der Dinge 729, 741
 Interpolation 147, 246
 Interpolator 43

IPC 179
I-Regler 217

J

JT-Modell 639

K

Kalkulation 744
Kanalstruktur 146
Kantentaster 584
Karussell-Drehmaschine 328
Kassettenmagazine 102
Kegelräder 316
Kegelradfräsmaschinen 317
Kegelradherstellung 310
Keramik 484
Kettenmagazin 102
Kippmoment 250
Kollisionserkennung, automatische 657
Kollisionüberwachung, dynamische 130
Kollisionsvermeidung 127
Kompensation 84
- beschleunigungsabhängiger Positions-
abweichungen 97
- dynamischer Abweichungen 85, 95
- von Durchhang- und Winkligkeitsfehlern
85
Komplettbearbeitung 357
Komplettwerkzeuge 481, 515
Konsolbettbauweise 280
Konsolständerbauweise 280, 282, 283
Kontaktplan 190
Koordinatenachsen 64
Koordinatentransformation 354
KOP 189, 190
Körperschallaufnahme 305
Körperschallmessung 308
Korrekturwerte 121
Korrekturwerttabelle 286
Kosten und Wirtschaftlichkeit von DNC 682
Kreissägen 328
Kreisverstärkung 219
Kreuzbettbauweise 282
Kreuzgittermessgerät 75
Kreuztischbauweise 280, 282

Kugelgewindetriebe 70, 231
Kühlmittel 207
Kühlung/Schmierung 478
Kurzklemmhalter 492
K_v-Faktor 67, 219, 231, 242, 244, 262

L

Laderoboter 297
Lageregelkreis 66, 68, 204, 214, 242
Lageregelung 67
Lageregler 67
Lagersysteme 521
Laminated Object Manufacturing (LOM) 389
Langdrehmaschinen 291
Längenmessgeräte 70, 76
Längenmesssystem 231
LAN - Local Area Networks 686
Laserauftragschweißen 390
Laserbearbeitungsanlagen 330
Laserbearbeitungsköpfe 334
Laserbearbeitungsmaschine 341
Lasersintern (LS) 381, 383
Leistungsteile 228, 445
Lesestation 525
Lichtleitfaser 334
Linearantriebe 239
Linearinterpolation 151
Linearmagazine 102
Linearmaßstab 242
Linearmotoren 81, 235, 237
Linear- oder Geradeninterpolation 44
Logbuch 678
Look-Ahead-Funktion 290
Losekompensation 85

M

M-Funktionen 570
Makros 121
Mantelfläche 488
manuelle Betriebsart 133
Maschinendatenerfassung 154
Maschinenauswahl 408
Maschinengestelle 203
Maschinenmodell 652
Maschinennullpunkt 583

Maschinen-Parameterwerte 42
 maschinenseitige Aufnahmen 484
 Maschinenverkleidung 206
 Masken-Sintern (MS) 389
 Maßstabfaktor 146
 Maßstabfehler-Kompensation 146
 Master-Slave-Verfahren 693
 Materialanforderung 742
 MDE/BDE 684
 Mehrfach-Spannbrücke 285
 Mehrspindelautomaten 292
 MES (Manufacturing Execution System)
 734, 735
 MES Pyramide 405
 Messen 364
 Messgeber 242
 messgesteuertes Schleifen 309
 Messköpfe 543
 Messmaschinen 364
 Messprotokoll 365, 540
 Messsteuergeräte 307
 Messsystem, direktes 468
 Messsystem, indirektes 231
 Messtaster 147, 365, 369, 535, 584
 Messuhr 584
 Messzyklen 146, 364, 539, 584
 Minimalmengenschmierung 266
 Mobile Computing 728
 Mockup 712
 modulare Werkzeugsysteme 490
 Montageroboter 442
 Motor 228, 232
 Motorgeber 231, 233
 Motorspindeln 249, 253, 265
 Multitasking-Maschinen 351, 370

N

Nachlauffehler 68, 153
 Nano- und Pico-Interpolation 147
 NC-Achsen 44
 NC-Hilfsachsen 148
 NC-Kern, virtueller 152
 NC-Programm 40, 49, 565
 NC-Programmiersysteme 630
 NC-Programmierung 47, 610
 NC-Programmverwaltung 677

NC-Simulation 655
 NC-Teileprogramm 567
 Nd:YAG-Laser 331
 Netzwerktechnik für DNC 675
 Nibbel-Prinzip 338
 Nick und Gear-Kompensation 85
 Nullpunkte 538, 581, 582
 Nullpunktverschiebung 545, 584
 NURBS 148, 290
 Nur-Lese-System 523

O

Offene Steuerungen 166
 Offenheit einer CNC 166
 Offset 121
 Open System Architecture 168

P

Palette 107
 Palettenpool 110
 Palettenspeicher 110
 Paletten-Umlaufsysteme 414
 Palettenwechsel 284
 Parallel-Achsen 65
 Parallelkinematik 203
 Parametrierung 222
 PDM (Product Data Management/Produkt-
 datenmanagement) 710, 713
 PDM-Systeme 707
 Pick-Up-Drehmaschinen 290
 Pick-up-Verfahren 107, 309
 PID-Regler 217
 Planungsphase in der Serienfertigung 661
 Platzcodierung 106
 - variable 106, 118
 PLC 178
 PLM (Product Lifecycle Management) 704,
 710
 PMI (Product Manufacturing Information) 707
 Pneumatik 465
 Polarkoordinaten 121
 Portalfräsmaschinen 281
 Portalroboter 401
 Portal-Tischbauweise 281
 Position setzen 121

Positionsregelung 213
 Postprozessor 49, 287, 614, 615, 645, 649
 Post Prozessor (PP) 566
 Preisbetrachtung 169
 Prismen-Aufnahme 487
 Probelauf 127
 Product Data Management 710, 713
 Product Lifecycle Management 710, 715
 Produktbaukasten 315
 Produktdatenmanagement 713
 Produktionsleitsysteme 396
 Produktionsnetzwerk 404
 Produktionsplanungssysteme 432
 Produktionsprozess 660
 Produkt-Lebenszyklusverwaltung 710
 Profilieren von Schleifscheiben 305
 Profilschleifen 315
 Profilschleifmaschine 306
 Programmänderung im laufenden Betrieb 660
 Programmgenerierung, automatische 451
 Programmieren von Drehmaschinen 298
 Programmieren von Messmaschinen 365
 Programmieren von Robotern 444, 449
 Programmieren von Schleifprozessen 305
 Programmier-Software 123
 Programmiersysteme 284, 305, 626
 Programmierung 49, 284
 - werkstatororientierte 284, 298
 Programmnullpunkt 582
 Programmspeicher 191
 Programmtest 121, 128
 Programmverwaltung 677
 Proportionalregler 217
 Protokoll 694
 prozessnahe Messung 539
 Prozessregelung 535
 Prozesssteuerung 743
 Prozessüberwachung 179
 Prüfschärfensteuerung 746
 Pulsweiten-Modulation 224
 Punktsteuerungen 42

Q

Quadrantenfehler-Kompensation 85, 86

R

Rahmenständerbauweise 283
 Rapid Manufacturing 375
 Rapid Prototyping 374, 712
 Rapid Tooling 375
 Rattern 95
 Ratterunterdrückung 96
 Räumen 310
 Rechneinheit 445
 Referenzpunkt 582
 Regeldifferenz 244
 Regelkreis 81
 Regelung 211
 Regelungstechnik 211
 Reglertypen 216
 Reibkompensation 85, 86
 Relativmaße 573
 Reset 122
 Revolver 101, 293, 487, 586
 RFID 525, 526
 RFID-Systeme 522, 527
 Roboter 107
 Roboterarm 441
 Robotersteuerung 443
 Rohrbiegemaschinen 343
 Rollenförderer 415
 rotierende Werkzeuge 480, 484
 Ruckbegrenzung (Slope) 122
 Rückzugsbolzen 486
 Rund- oder Schwenkachsen 65

S

Sachmerkmaliste 482
 Safe Handling 447
 Safe Operation 446
 Safe Robot Technology 446
 Sägemaschinen 328
 Satz ausblenden 122
 Satz Vorlauf 122
 Säulenbohrmaschinen 326
 Scannen auf Messmaschinen 368
 Schälrad 312
 Schaltbefehle 40
 Schaltbefehle (M-Funktionen) 570
 Schaltfunktionen 100
 Scheibenlaser 331

- Scheinleistung 469
- Schleifbänder 303
- Schleifen 268
 - unrunder Formen 306
- Schleifmaschinen 203, 298
- Schleifscheiben 303
- Schleifschnecken 316
- Schleifspindeln 269, 354
- Schleifwerkzeuge 303
- Schleifzyklen 305
- Schleppabstand 68
- Schleppfehler 68, 153
- Schleppfehler-Kompensation 94
- Schmelzschnelden 334
- Schneiderodieren 344, 345
- Schneidplatten 481
- Schneidrad 312
- Schneidstoff 483
- Schnittdaten 478
- Schnittgeschwindigkeit 288, 297, 478
- Schnittstellen 698
- Schnittwerte 516
- Schrägbett Drehmaschinen 290
- Schrägverzahnung 311, 313
- Schreib-Lese-System 523
- Schrittmotoren 233
- Schutzbereiche 129
- Schwenkachsen 286
- Schwenkbarer Drehtisch 285
- Semi Closed Loop 79
- Semi-Closed-Loop-Betrieb 75
- Senkerodieren 344, 346
- Sensoren 451
- SERCOS-Bus 181
- SERCOS III 185
- SERCOS interface 240
- Servoantriebe 465
- Servomotor 228, 230, 232
- Shiften 314
- Sicherheitsfunktionen bei Robotern 446
- Sicherheitskonzepte, integrierte 136
- Sicherheitstechnik 136
- Simulation 122, 127, 128, 644, 648, 662, 712
 - der Bearbeitung 284
 - des Bearbeitungsablaufs 719
- Simulationsgrafik 621
- Simulation von FFS 429
- Sinterverfahren 378
- Smart Data 159
- Smarte Objekte 728
- Smart Factory 732, 739
- Social Media 727
- Software 42
- Software-Schnittstelle 123, 700
- Sonderwerkzeuge 497
- Späneförderer 207
- Spannfutter 269
- Spannmittel 653
- Spannvorrichtungen 411
- speicherprogrammierbare Anpassteuerung 117
- speicherprogrammierbare Steuerung 177
- Spiegeln, Drehen, Verschieben 122
- Spindelantriebe 289
- Spindeldrehzahl 110
- Spindelmesstaster 541, 543, 544
- Spindelsteigungsfehlerkompensation 85, 243
- Spindelsteigungskompensation 86
- Spline 148, 151
- Spline-Interpolation 148, 151
- Splines 290
- Sprachumschaltung 151
- SPS 177, 179, 196, 369
- SPS, PLC 45
- Stangenbearbeitungszentrum 352
- Stanzkopf 339
- Stanz-Laser-Maschine 340
- Stanz- und Nibbelmaschinen 337
- stehende Werkzeuge 480, 486
- Steigungsfehler 70
- Steilkegel 486
- Steilkegelaufnahmen 267
- STEP 377, 634, 635
- STEP (ISO/IEC 10303) 150
- Stereolithografie (STL) 386
- Sternrevolver 488
- Steuerungen, offene 166
- Steuerungsarten 42
- Steuerungsnachbildung 650
- Stirnräder 310
- Stirnseitenbearbeitung 355
- STL 377

Strahlführung 333
 Strahlquellen 330
 Strahlschmelzen 380, 382
 Streckensteuerungen 43
 Sublimierschneiden 334
 Swiss type Lathe 291
 Synchron-Linearmotoren 236
 Synchronmotoren 251, 252
 Synchron-Servoantriebe 233
 Synchron-Servomotor 225, 233
 Syntax und Semantik 570
 Systemdiagnosen 125

T

Tapping-Center 326
 Taster, messender 368
 Tastkopf 366
 Tauchfräsen (Plunging) 616
 Teach-In/Playback-Verfahren 611
 Teileprogramme 117
 Teilverfahren 310
 Temperaturfehler-Kompensation 118
 Temperaturkompensation 85, 89
 Tiefbohrmaschinen 326
 Token Passing 693
 Token-Prinzip 693
 Torquemotoren 81
 Touchbedientafeln 164
 Touch-Bedienung 161
 Trägheitsmoment 231
 Transferstraßen 400
 Transformation 587
 Transponder 527
 Transportsysteme 414
 trochoidale Bearbeitung 616
 Trockenbearbeitung 207, 288, 315
 Trockenlauf 127

U

Übertragungsgeschwindigkeit 695
 Übertragung von Daten 173
 Überwachung der Werkzeuge im Arbeits-
 raum 522
 Umkehrspanne 69
 Umlenkspiegel 333

Umschlingungswinkel 616
 Universal-Rundschleifmaschine 299
 Unterprogramme 122

V

V.24-Schnittstelle 699
 VDI-Halter 487
 Verschleißkompensation 492
 Verstellkopf 492
 Vertikaldrehmaschinen 290, 291
 Vertikalmaschinen 279
 Verzahnmaschinen 203, 310
 Verzahnverfahren 310
 Vierquadrantenbetrieb 222
 Virtualisierung 728
 Virtuelle Maschine 651
 Voll Hartmetall 484
 Volumenkompensation (VCS) 85, 89
 Voreinstellgeräte 519
 Vorschub 478
 Vorschubantriebe 67, 228, 230, 251, 300,
 369
 Vorschubbegrenzung 153
 Vorschubgeschwindigkeit 111
 Vorsteuerung 153, 219

W

Wälzfräsen 310
 - von Zahnrädern 312
 Wälzfräser 312
 Wälzfräsmaschinen 310, 313, 314
 Wälzführungen 204
 Wälzhobeln 313
 Wälz- oder Hülschnittverfahren 310
 Wälzschleifen 310
 Wälzstoßen 310, 313
 Wartung 746
 Wasserstrahl-Schneidmaschinen 349
 Wechselrichter 221, 229
 Wegbedingungen (G-Funktionen) 574
 Weginformationen 63, 572
 Wegmesssysteme 369
 Weichvorbearbeitung 312
 Weltwirtschaftskrise 2009 31
 Wendeplatten 481, 484

- Wendeschneidplatten-Feinverstellung 492
 - Wendespanner 285
 - Werkrad 317
 - Werkstatororientierte Programmierung (WOP) 48
 - Werkstückmesstaster 537
 - Werkstückmessung 535
 - Werkstücknullpunkt 582
 - Werkstücktransportsysteme 410
 - Werkstück- und Werkzeugwechsel 309
 - Werkstückwechsel 107, 284
 - Werkstück-Wechseleinrichtung 284
 - Werkzeugaufnahmen 267, 503
 - Werkzeugausgabe 744
 - Werkzeugblatt 511
 - Werkzeugbruch-Kontrolle 297
 - Werkzeugbruch- und Standzeitüberwachung 118
 - Werkzeuge 477, 643, 654
 - angetriebene 105, 119
 - Werkzeugerkennung 525
 - Werkzeugidentifikation 105, 510
 - Werkzeugklassifikation 483, 513
 - Werkzeugkomponenten 513
 - Werkzeugkorrektur 545, 591, 745
 - Werkzeugkorrektur, 3-D 153
 - Werkzeugkorrekturwerte 297
 - Werkzeuglängenkorrektur 592
 - Werkzeuglängenmessung 124
 - Werkzeuglisten 517
 - Werkzeuglogistik 520
 - Werkzeugmaschine 155
 - Werkzeugradiuskorrektur 592
 - Werkzeugrechner 525
 - Werkzeugrevolver 101, 487
 - Werkzeugschleifmaschine 299, 309
 - Werkzeugspeicher 284
 - Werkzeug-Standzeitüberwachung 297
 - Werkzeugträgerbezugspunkt 586
 - Werkzeugverwaltung (Tool Management) 286, 506
 - Werkzeugvoreinstellung 518
 - Werkzeugwechsel 101, 103, 130
 - Werkzeugwechsellpunkt 586
 - Werkzeugwechsler 466
 - Wiederanfahen an die Kontur 123
 - Winkelkopf 489
 - Winkligkeitsfehlerkompensation 88
 - Wirbelfräsen (Trochoidales Fräsen) 143, 616
 - Wirkleistung 469
 - WLAN – Wireless Local Area Network 675
 - WOP – Werkstatororientierte Programmierung 284, 298
 - Wuchtausgleich, dynamischer 494
 - WZ-Ident-System 525
- Z**
- Zirkular- oder Kreisinterpolation 44
 - Zustandsüberwachung 154
 - Zustellung 478
 - Zwischenkreis 229
 - Zwischenkreisspannung 249
 - Zyklen 327, 565, 577
 - Zykluszeit 185, 191
 - Zylindermantelflächen 285