



Bibliothek des technischen Wissens

Dietmar Schmid

Hans Kaufmann

Bernhard Zippel

Alexander Pflug

Steuern und Regeln für Maschinenbau und Mechatronik

15., überarbeitete und erweiterte Auflage

Die beigelegte CD enthält die Bilder des Buches und
die Lösungen zu den Aufgaben und ein Repetitorium.

Bearbeitet von Lehrern und Ingenieuren (s. Rückseite)

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL • Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsseldorf Straße 23 • 42781 Haan-Gruiten

Europa-Nr.: 10021

Die Verfasser des Buches

Schmid, Dietmar	Dr.-Ing., Professor	Essingen
Kaufmann, Hans	Dipl.-Ing. (FH), Studiendirektor	Aalen
Zippel, Bernhard	Dipl.-Ing., Studiendirektor	Stuttgart
Pflug, Alexander	Dipl.-Ing., Studienrat	Schwäbisch Gmünd

Lektorat und Leitung des Arbeitskreises

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Schmid, Essingen

Bildbearbeitung

Zeichenbüro des Verlags Europa-Lehrmittel, Ostfildern
Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpf

Dem Buch wurden die neuesten Ausgaben der Normen und Gesetze zu Grunde gelegt. Verbindlich sind jedoch nur die Normblätter selbst und die amtlichen Gesetzestexte. Wie in Lehrbüchern üblich werden etwa bestehende Patente, Gebrauchsmuster oder Warenzeichen meist nicht erwähnt. Das Fehlen eines solchen Hinweises bedeutet daher nicht, dass die dargestellten Produkte frei davon sind. Daten und Darstellungen, die sich auf Herstellerangaben beziehen sind gewissenhaft recherchiert. Sie sind aber mit keiner Gewährleistung irgendwelcher Art verbunden und können sich durch weiteren Fortschritt auch verändert haben. Der Verlag und die Autoren übernehmen daher keine Verantwortung oder Haftung aus der Nutzung von Daten oder Darstellungen dieses Buches. Die Bilder sind von den Autoren entworfen oder entstammen aus deren Arbeitsumfeld. Soweit Bilder, insbesondere Fotos einem Copyright Dritter unterliegen, sind diese mit dem ©-Symbol und dem Urhebername versehen.

15. Auflage 2017

Druck 5 4 3 2 1

Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Korrektur von Druckfehlern untereinander unverändert sind.

ISBN 978-3-8085-1470-2

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

© 2017 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
<http://www.europa-lehrmittel.de>

Satz: Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpf

Umschlag: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald

Umschlagfotos: Prof. Schmid und Autorenkreis

Druck: Konrad Triltsch, Print und digitale Medien GmbH, 97199 Ochsenfurt-Hohestadt

Vorwort zur 15. Auflage

Steuern und Regeln für Maschinenbau und Mechatronik führt Bausteine der Mechanik, der Pneumatik, der Hydraulik, der Elektrotechnik, der Elektronik und der Kommunikations- und Computertechnik zusammen zu einem aktuellen Wissensgebiet, nämlich dem der Mechatronik.

Die **15. Auflage** wurde in allen Kapiteln aktualisiert. Die industriellen Entwicklungsphasen bis zur 4. Industriellen Revolution mit **Industrie 4.0** werden dargestellt. In der Hydraulik und Pneumatik sind die Bauteile mit den neuen **Referenzkennzeichen nach DIN EN 81346-1,-2** versehen. Hinzu gekommen ist ferner ein Kapitel zur Anwendung und Programmierung der **Kleinsteuerung LOGO!**. Aufgenommen wurden auch Sensoren, die speziell dem Schutz und der Sicherheit dienen. Neu sind die Abschnitte zur **Schaltplanerstellung** mit Hilfe von FluidSIM® und die Simulation mit FluidSIM®. Die Feldbussysteme wurden erweitert um die **AS-i-Sicherheitstechnik** und um den **IO-Link**.

Das **praxisbezogene Lehrbuch** richtet sich an alle, die sich in der **Steuerungs- und Regelungstechnik** in Verbindung mit moderner **Informations- und Kommunikationstechnik** ausbilden und weiterbilden wollen.

Es ist geeignet sowohl für **Auszubildende** zur Vertiefung ihres Wissens als auch für **Meister- und Technikerschüler**, für den Unterricht im **Technischen Gymnasium** und im **Berufskolleg**, aber auch als praktische Ergänzung für **Studierende an Hochschulen**. Ebenso wird das Buch **Praktikern**, die sich mit Steuerungs- und Überwachungsaufgaben sowie mit Qualitätsmanagement befassen, eine wertvolle Hilfe sein.

Das Buch ist gegliedert in die Lehr- und Lernbereiche:

- **Steuern, Regeln, Leiten**
(Begriffsbestimmungen),
- **Mechanische Steuerungen,**
- **Elektrische und elektronische Steuerungen,**
- **Pneumatik,**
- **Hydraulik,**
- **Regelungstechnik,**
- **Speicherprogrammierte Steuerungen (SPS),**
- **Elektrische Antriebe,**
- **Computergesteuerte Maschinen,**
- **Montagetechnik,**
- **Qualitätsmanagement,**
- **Instandhaltung und Energieeffizienz,**
- **Geschäftsprozesse,**
- **Arbeitsgestaltung und Arbeitsschutz,**
- **Informations- und Kommunikationstechnik,**
- **Aufgaben und Übungen,**
- **Fachwörterbuch Deutsch-Englisch, Sachwortverzeichnis.**

Die einzelnen Kapitel des Buches sind weitgehend in sich abgeschlossen und können auch in anderer Reihenfolge erarbeitet bzw. unterrichtet werden. Damit ergibt sich für den Unterricht ein großer Spielraum bei der Stoffauswahl und in der inhaltlichen Schwerpunktsetzung.

Beigefügt ist dem Buch eine CD mit den meisten Bildern. Damit können Lehrende, Schüler und Studierende das Wissens- und Erfahrungsmaterial des Buches mit Beamer oder am Whiteboard gut präsentieren und in eigene Ausarbeitungen implementieren¹.

Die Autoren sind Ingenieure und Lehrer, die ihre fachlichen und methodischen Erfahrungen in das Buch eingebracht haben. Die Autoren und der Verlag sind für Anregungen und Verbesserungsvorschläge aus dem Kreis der Benutzer dieses Fachbuchs dankbar.

Sommer 2017

Dietmar Schmid

¹ Rechtliche Hinweise zur CD. Eine Weitergabe der CD-Inhalte in digitaler Form oder das Veröffentlichen im Internet oder in einem Intranet sind nicht erlaubt. Lehrer an allgemeinbildenden und beruflichen Schulen sowie Ausbilder dürfen die Inhalte der beigefügten CD für Unterrichtsmaterialien im eigenen Unterricht verwenden und in Klassenstärke in Papierform vervielfältigen. Schüler dürfen die Inhalte im Rahmen des Unterrichts für die Ausarbeitung von Referaten, Präsentationen etc. verwenden. Eine Vervielfältigung in Papierform in der für den Unterricht notwendigen Anzahl ist erlaubt. Dozenten an Fachhochschulen und Universitäten dürfen die Inhalte in einem Skript mit Beamer, Whiteboard oder Ähnlichem während einer Vorlesung verwenden. Eine Vervielfältigung in Papierform oder in digitaler Form ist ohne Genehmigung des Verlags nicht erlaubt. In allen hier aufgeführten Fällen ist eine Quellenangabe obligatorisch. Alle weiteren Nutzungen müssen beim Verlag schriftlich angefragt werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	7	3.6.3.2	Codemaßstäbe und Winkelcodierer	90
1.1	Steuern, Steuerung	7	3.6.3.3	Drehmelder (Resolver)	91
1.1.1	Analoge, binäre und digitale Steuerungen	7	3.6.4	Sensoren zur Sicherheitstechnik	92
1.1.2	Verknüpfungssteuerungen und Ablaufsteuerungen	9	3.6.5	Störungen in Sensorleitungen	95
1.1.3	Verbindungsprogrammierte Steuerungen und speicherprogrammierte Steuerungen	10	3.7	Gefährdungen und Schutzmaßnahmen	97
1.2	Regeln, Regelung	10	3.7.1	Berührungsschutz	97
1.3	Leiten, Leitung	11	3.7.2	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	98
1.4	Entwicklungsphasen industrieller Technik	12	3.7.3	Elektrostatische Entladungen (ESD)	100
1.5	Industrie 4.0	14	3.7.4	Arbeitsschutzmaßnahmen im Rahmen der Fachaufsicht	100
1.6	Cyber Physische Systeme (CPS)	15	4	Pneumatik	100
2	Mechanische Steuerungen	16	4.1	Aufbau einer Pneumatikanlage	101
2.1	Allgemeines	16	4.2	Drucklufferzeugung	104
2.2	Verstellbare Getriebe	17	4.2.1	Verdichter (Kompressoren)	104
2.2.1	Stufengetriebe	17	4.2.2	Druckluftnetze	107
2.2.2	Stufenlos verstellbare Getriebe	18	4.2.3	Druckluftaufbereitung	108
2.3	Getriebe mit ungleichmäßiger Übersetzung	21	4.3	Antriebsglieder	109
2.4	Getriebe mit aussetzender Bewegung	23	4.3.1	Druckluftmotoren	109
3	Elektrische und elektronische Steuerungen	24	4.3.2	Pneumatischer Muskel	111
3.1	Elektrische Kontaktsteuerungen	24	4.3.3	Balgantrieb	111
3.1.1	Bauelemente und Betriebsmittel	24	4.3.4	Dreh- und Schwenkantriebe	112
3.1.2	Darstellung und Schaltpläne	38	4.3.5	Druckluftzylinder	112
3.1.3	Grundsaltungen	39	4.3.5.1	Standardzylinder	112
3.2	Elektronische Bauelemente	41	4.3.5.2	Sonderbauarten	115
3.3	Binäre und digitale Steuerungen	45	4.3.5.3	Zylinderkennwerte	116
3.3.1	Codierungen	45	4.3.5.4	Zylinderberechnungen	116
3.3.1.1	Dualcode	45	4.4	Ventile und Grundsteuerungen	118
3.3.1.2	BCD-Codes	46	4.4.1	Darstellung der Ventile	118
3.3.1.3	Barcodes	46	4.4.2	Einteilung der Ventile	120
3.3.1.4	2D-Codes	46	4.4.2.1	Wegeventile	120
3.3.2	Digitale Speicher	47	4.4.2.2	Stromventile	122
3.3.3	Binäre Verknüpfungen	51	4.4.2.3	Sperrventile	123
3.3.4	Schaltalgebra	54	4.4.2.4	Druckventile und Absperrventile	125
3.3.5	Kombinatorische Steuerungen	55	4.4.2.5	Ventilinseln	126
3.3.6	Ablaufsteuerungen	60	4.5	Grafische Darstellung	127
2.3.6.1	Elektromechanische Ablaufsteuerungen	61	4.5.1	Aufbau eines Schaltplans	127
3.3.6.2	Ablaufsteuerungen mit Kippgliedern (Flipflops)	61	4.5.2	Funktionsdiagramme	129
3.3.6.3	Zähler	64	4.5.2.1	Wegdiagramm	130
3.4	GRAFCET	67	4.5.2.2	Zustandsdiagramm	130
3.4.1	Schritte	68	4.6	Proportionaltechnik	133
3.4.2	Aktionen	69	4.6.1	Proportional-Druckregelventile	133
3.4.3	Transitionen und Ablaufstrukturen	70	4.6.2	Proportional-Wegeventile	134
3.4.4	Beispiel zu GRAFCET	72	4.7	Pneumatische Positioniersysteme	134
3.5	Wegdiagramm und Zustandsdiagramm	73	4.8	Beispiele pneumatischer Steuerungen	136
3.6	Sensoren	74	4.8.1	Wegplansteuerung einer Biegevorrichtung	136
3.6.1	Allgemeines	74	4.8.2	Taktstufensteuerung	137
3.6.2	Analoge Sensoren	75	4.9	Elektropneumatische Steuerungen	139
3.6.2.1	Wege, Winkel, Abstände und Dicken	75	4.9.1	Elektropneumatische Betriebsmittel	139
3.6.2.2	Geschwindigkeiten und Drehzahlen	82	4.9.2	Direkte und indirekte Steuerung	140
3.6.2.3	Dehnungen, Kräfte, Drehmomente und Drücke	83	4.9.3	Selbsthalteschaltung	141
3.6.2.4	Beschleunigungen	84	4.9.4	Darstellung	141
3.6.2.5	Temperaturen	86	4.9.5	Stetigantrieb	142
3.6.3	Digitale Sensoren	88	4.9.6	Ablaufsteuerung	142
3.6.3.1	Inkrementale Sensoren	88	5	Hydraulik	144
			5.1	Allgemeines	144
			5.2	Physikalische Grundlagen	144
			5.2.1	Hydrostatik	144
			5.2.2	Hydrodynamik	146
			5.3	Hydraulikflüssigkeiten	147
			5.4	Aufbau hydraulischer Steuerungen	149
			5.4.1	Hydraulikpumpen	150

5.4.1.1	Zahnradpumpen	150	7.4.8	Zustandsautomaten	232
5.4.1.2	Kolbenpumpen	151	7.5	Analogwertverarbeitung	234
5.4.1.3	Flügelzellenpumpe	151	7.6	Programmieren mit strukturiertem Text (ST)	237
5.6	Hydraulikspeicher	152	7.6.1	Digitale Regelung	237
5.7	Antriebs Elemente	154	7.6.2	Zweipunktreger	238
5.7.1	Hydraulikzylinder	154	7.6.3	PID-Reglerbaustein	239
5.7.2	Hydraulikmotoren	155	7.7	Bedienen und Beobachten von Produktionsprozessen	241
5.8	Hydraulikventile	157	7.8	Schnelle Zählvorgänge	242
5.8.1	Allgemeines	157	7.9	Kleinststeuerung LOGO!	244
5.8.2	Druckventile	158			
5.8.3	Wegeventile	161			
5.8.4	Sperrventile	162			
5.8.5	Stromventile	163			
5.8.6	Ventilaufbauarten	166			
5.8.7	Stetigventile	168			
5.8.8	Proportionalventiltechnik	169			
5.8.9	Servoverventile	175			
6	Regelungstechnik	177	8	Elektrische Antriebe	248
6.1	Grundbegriffe	177	8.1	Einführung	248
6.2	Regelungsarten	178	8.2	Rechnerische Grundlagen	250
6.3	Regelkreisglieder	180	8.3	Gleichstrommotoren (DC-Motoren)	253
6.3.1	Proportionalglied ohne Verzögerung (P-Glied)	180	8.4	Drehstromasynchronmotor	255
6.3.2	Proportionalglied mit Verzögerung 1. Ordnung (P-T ₁ -Glied)	181	8.4.1	Aufbau des Kurzschlussläufers	255
6.3.3	Proportionalglied mit Verzögerung 2. Ordnung (P-T ₂ -Glied), Schwingungsglied	182	8.4.2	Das Drehfeld	256
6.3.4	Integralglied (I-Glied)	185	8.4.3	Funktionsweise	257
6.3.5	Differenzierglied (D-Glied)	186	8.4.4	Anlasssteuerungen	258
6.3.6	Totzeitglied (T _t -Glied)	186	8.4.5	Drehrichtungsumkehr	259
6.3.7	Zusammenwirken mehrerer Regelkreisglieder	188	8.4.6	Betriebsarten und Fahrprofile	259
6.4	Regler und Regelkreise	189	8.4.7	Drehzahlsteuerung und Drehzahlregelung	260
6.4.1	Schaltende Regler	189	8.4.7.1	Allgemeines und Einteilung	260
6.4.2	Analoge Regler	190	8.4.7.2	U/f-Steuerung	261
6.4.3	Digitale Regler (Software-Regler)	192	8.4.7.3	Vektorregelung	262
6.4.3.1	Digitalisierung und Signalabtastung	192	8.5	Drehstromsynchronmotor	264
6.4.3.2	Regelungsalgorithmus	193	8.5.1	Servoantriebe	264
6.4.4	Regelung von P-Strecken	196	8.5.2	Direktantriebe	265
6.4.5	Regelung von I-Strecken	197	8.5.2.1	Torquemotoren	265
6.4.6	Einstellen eines Reglers	198	8.5.2.2	Linearmotoren	267
6.4.7	Selbstoptimierende Regler	199	8.6	Schrittmotoren	267
7	Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS)	200	8.7	Lageregelung (Positionsitionierantriebe)	268
7.1	Aufbau und Funktionsweise	200	8.7.1	Kaskadenregelung	268
7.2	Programmierung	203	8.7.2	Geschwindigkeitsvorsteuerung	269
7.2.1	Programmiersprachen	203	8.7.3	Analoger und digitaler Drehzahlregelkreis	270
7.2.2	Programmaufbau	206			
7.3	Funktionen und Operationen	210	9	Computergesteuerte Maschinen	271
7.3.1	Binäre Abfragen und Verknüpfungen	210	9.1	CNC-Werkzeugmaschinen	271
7.3.2	SR/RS-Speicherfunktionen	213	9.1.1	Der Produktionsprozess	271
7.3.3	Flankenauswertung	215	9.1.2	NC-Achsen und deren Steuerung	274
7.3.4	Zeitfunktionen	216	9.1.3	CNC-Programmierung	276
7.3.5	Zählfunktionen	218	9.1.3.1	DIN-Programmierung	276
7.3.6	Arithmetische und numerische Funktionen	220	9.1.3.2	Werkstatorientiertes Produzieren (WOP)	286
7.3.7	Übertragungsfunktionen und Programmsteuerungsfunktionen	220	9.1.4	Interpolation	287
7.3.8	Digitale Operationen	221	9.1.5	Leistungsfähigkeit	290
7.4	Ablaufsteuerungen	223	9.1.6	Offene CNC-Steuerung	292
7.4.1	Gliederung und Darstellung	223	9.2	3D-Druck – Additive Fertigungsverfahren	293
7.4.2	Beispiel für eine Ablaufsteuerung	224	9.2.1	Allgemeines	293
7.4.3	Programmierung in Ablaufsprache	227	9.2.2	AM-Verfahren	294
7.4.4	Betriebsartensignale	229	9.2.3	Die Informationskette und Prozesskette	296
7.4.5	Funktionsbaustein für Betriebsarten	230	9.3	Robotertechnik	297
7.4.6	Funktionsbaustein für Schrittketten	231	9.3.1	Einteilung	297
7.4.7	Funktionsbaustein für die Befehlsausgabe	232	9.3.2	Der kinematische Aufbau	299
			9.3.3	Roboterantriebe	302
			9.3.4	Greifer	303
			9.3.5	Roboterprogrammierung	304
			9.3.5.1	Programmierverfahren	304
			9.3.5.2	Koordinatensysteme	307
			9.3.6	Robotersteuerung	309
			9.3.6.1	Die Bewegungserzeugung	309
			9.3.6.2	Achsstellungen	310
			9.3.6.3	Interpolation	311
			9.3.6.4	Überschleifen und Pendeln	312
			9.3.6.5	Robotersensorführung	313
			9.3.6.6	Kollaborierende Roboter	315
			9.3.7	Schutzmaßnahmen	316

1 Einführung

Damit Maschinen und Anlagen selbsttätig, also automatisch, arbeiten können, werden sie mit Steuerungs-, Regelungs- und Leittechniken ausgerüstet. Diese Einrichtungen sind mechanische, elektrische, pneumatische und hydraulische Antriebe und Steuerungselemente. Mit Computern steuert man komplexe Fertigungseinrichtungen und Produktionsanlagen. Mikroprozessoren und Mikrocomputer und Industrie-PC sind heute häufig Bestandteil auch kleinster Steuerungsbaugruppen. Die Begriffe der Leittechnik, Steuerungstechnik und Regelungstechnik sind in DIN IEC 60 050-351 „Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351: Leittechnik“ festgelegt (Gesamtumfang 194 Seiten).

1.1 Steuern, Steuerung

Das Steuern ist ein Vorgang, bei dem eine Anlage oder ein Gerät durch Steuersignale beeinflusst wird. Kennzeichnend für das Steuern ist der **offene Wirkungsweg** der Signale.

Die Steuersignale wirken von dem Steuergerät auf die Anlage oder Maschine ohne ein fortlaufendes Erfassen und Korrigieren des Steuerungsvorgangs (**Bild 1**). Bei einer Vorschubsteuerung wird der Maschinentisch über einen Antrieb bewegt. **Stellsignal** ist die Motorspannung U_M für den Vorschubmotor. Dieser bildet zusammen mit dem Maschinentisch die **Steuerstrecke**. **Steuergröße** ist der Vorschubweg s , den der Maschinentisch zurücklegt.

Der Begriff Steuerung wird auch für die Gesamtanlage verwendet, in der der Vorgang des Steuerns stattfindet. Im Wirkungsplan wird das Zusammenwirken der einzelnen Steuerungsbaugruppen mit **Blocksymbolen** und **Wirkungslinien** dargestellt. Die Wirkungsrichtung kennzeichnet man mit Pfeilen.

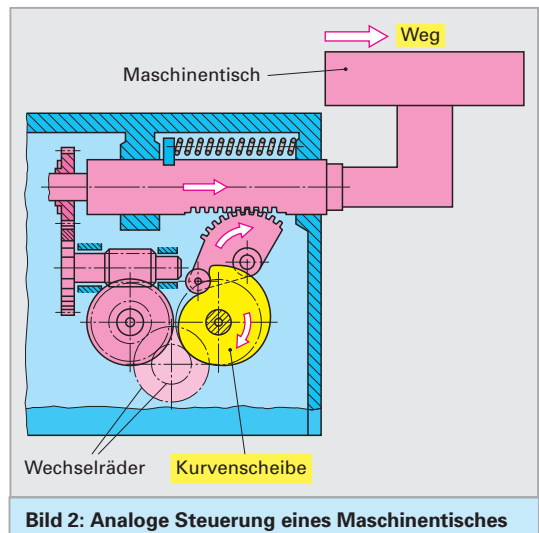
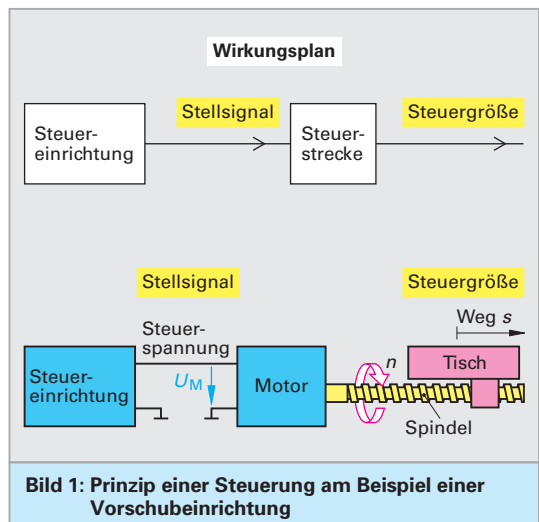
1.1.1 Analoge, binäre und digitale Steuerungen

Nach der Art der Signaldarstellung unterscheidet man analoge Steuerungen, binäre Steuerungen und digitale Steuerungen.

Bei **analogen Steuerungen** steuert man überwiegend mit stetig wirkenden Signalen, die ein analoges Abbild der Steuergröße sind.

Beispiel. Der Bewegungszyklus eines Maschinentisches soll über eine Kurvenscheibe gesteuert werden (**Bild 2**). Die zu steuernde Größe ist der Weg s des Maschinentisches. Er wird unter Berücksichtigung des Getriebes auf den entsprechenden Radius der Kurvenscheibe umgerechnet. Der Radius der Kurvenscheibe ist analog zur Steuergröße, dem Weg s . Wird die Kurvenscheibe gedreht, bewegt sich der Maschinentisch zyklisch vorwärts und rückwärts.

Die wichtigsten Bauelemente analoger Steuerungen sind **Kurvenscheiben, Getriebe, Ventile, Motoren, analoge Sensoren und Operationsverstärker**.



Bei binären Steuerungen steuert man mit binären, d. h. zweiwertigen Signalen.

Binäre Signale werden durch zwei verschiedene Werte oder Zustände dargestellt, z. B. durch EIN und AUS, durch SCHWARZ und WEISS oder STROMLEITEND und STROMNICHTLEITEND oder einfach durch 0 und 1. Die meisten Steuerungen arbeiten mit Schaltsignalen und sind somit binäre Steuerungen.

Beispiel. Der Vorschubtisch einer Schleifmaschine soll ständig hin- und herfahren (**Bild 1**). Über einen Umschalter kann durch eine positive Motorspannung der Tisch nach rechts gesteuert werden. Trifft der am Tisch befestigte Nocken 2 auf den Umschalter, wird der Tisch über die negative Motorspannung nach links bewegt, bis der Nocken 1 wieder auf die Gegenbewegung umschaltet.

Die wichtigsten Bauelemente binärer Steuerungen sind **Relais, Schaltventile, Dioden** und binäre **elektronische Schaltkreise**.

Bei **digitalen Steuerungen** steuert man mit Zahlen.

Die Steuersignale sind meist binär verschlüsselt (codiert). Die einfachste Codierung ist der **Zählcode**. Dabei werden entsprechend der darzustellenden Zahl Impulse erzeugt und beim Empfänger gezählt.

Beispiel. Ein Vorschubtisch soll um einen durch Zahlen bestimmbaren Weg zyklisch vor und zurück bewegt werden. Die digitale Steuerung erzeugt abgezählt und abwechselnd Impulse zur Rechtsdrehung und zur Linksdrehung eines Schrittmotors (**Bild 2**). Die Impulszahl und damit der Verfahrweg kann an einem Vorwahlschalter eingestellt werden (**Bild 3**). Mit jedem Impuls wird der Schrittmotor genau um einen Winkelschritt (Inkrement) gedreht und damit der Maschinentisch um einen Wegschritt weiterbewegt. Ein solcher Wegschritt ist die kleinste ausführbare Bewegung und entspricht dem niederwertigsten Ziffernschritt am Vorwahlschalter. Je nach Wahl des Getriebes, des Schrittmotors und der Spindelsteigung entspricht ein solcher Wegschritt z. B. 0,1 mm. Im Unterschied zur analogen Steuerung sind Stell- und Steuergröße unstetig.

Die wichtigsten Bausteine digitaler Steuerungen sind Mikrocontroller, programmierbare Schaltkreise (FPGAs¹, **Bild 4**), digitale Sensorsysteme und digitale Netze.

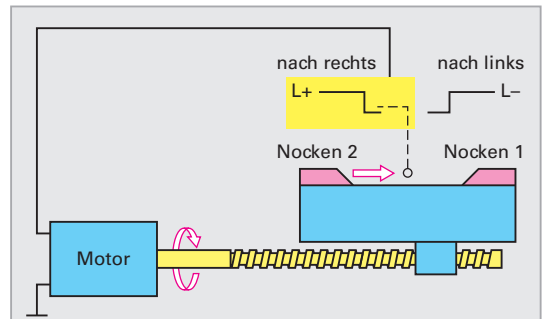


Bild 1: Binäre Steuerung eines Vorschubantriebs (Pendeln)

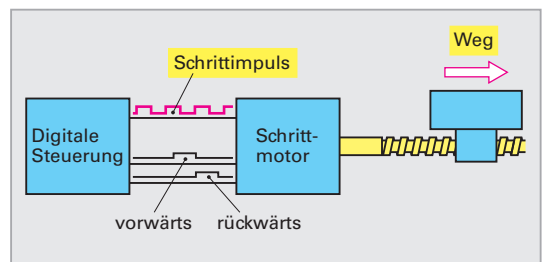


Bild 2: Digitale Vorschubsteuerung mit Schrittmotor

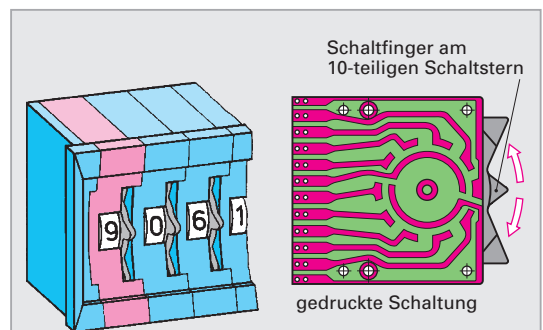


Bild 3: Vorwahlschalter

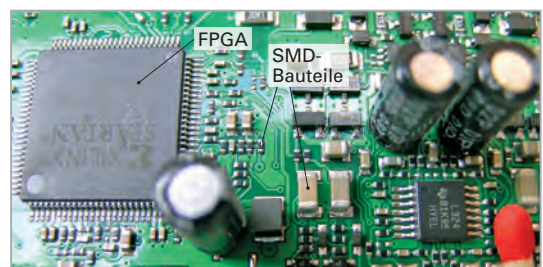


Bild 4: Digitalbaugruppe mit FPGA

¹ FPGA, Kunstwort für *Field Programmable Gate Array* = programmierbare logische Schaltung

1.1.2 Verknüpfungssteuerungen und Ablaufsteuerungen

Nach Art der Signalverarbeitung unterscheidet man Verknüpfungssteuerungen (kombinatorische Steuerungen) und Ablaufsteuerungen (sequentielle Steuerungen).

Bei **Verknüpfungssteuerungen** entsteht die Steuergröße durch Verknüpfung (Kombination) mehrerer Signale.

Z. B. darf eine Drehmaschine nur anlaufen, wenn die Schutztüre geschlossen ist UND das Werkstück im Spannfutter gespannt ist (**Bild 1**).

Verknüpfungssteuerungen sind binäre Steuerungen. Man entwickelt sie mit Hilfe der **Schaltalgebra**. Die Darstellung erfolgt durch schaltalgebraische Gleichungen, Kontaktpläne, Funktionstabellen und Funktionspläne.

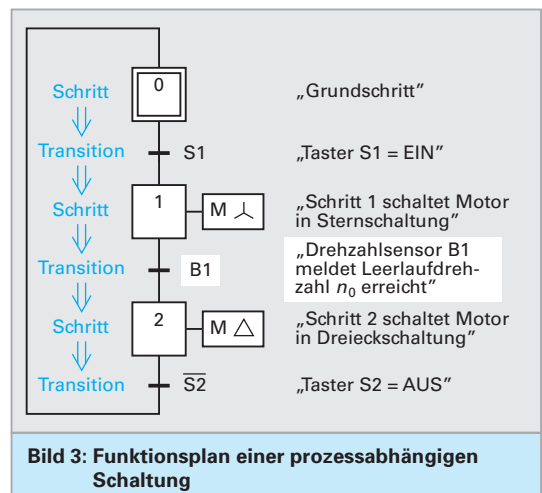
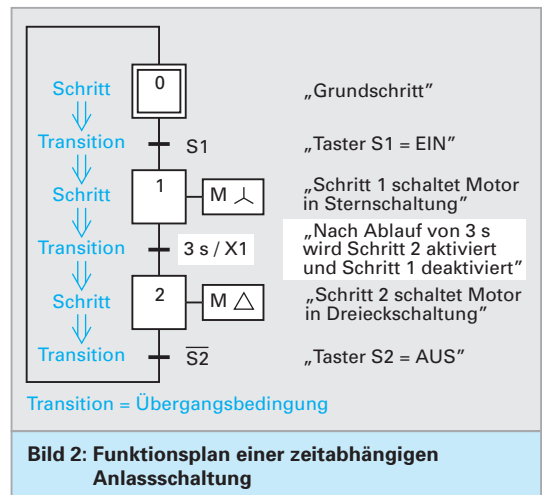
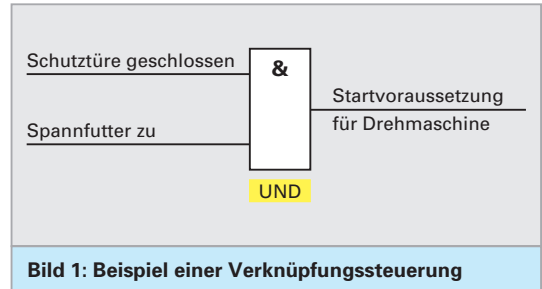
Bei **Ablaufsteuerungen** werden die Steuerungsvorgänge schrittweise ausgelöst. Das Weiterschalten von einem Schritt zum nächsten erfolgt entweder zeitabhängig oder prozessabhängig.

Bei **zeitabhängigen Ablaufsteuerungen** steuern Taktgeber, Zeitschaltuhren oder Zeitrelais den Ablauf. Ein einfaches Beispiel für eine zeitabhängige Ablaufsteuerung ist die Steuerung für den automatischen Anlauf von Drehstrommotoren über eine Stern-Dreieck-Anlassschaltung. Zunächst wird der Motor in Sternschaltung hochgefahren und nach Ablauf der geschätzten Hochlaufzeit zuzüglich einer Zeitreserve in Dreieckschaltung umgesteuert. Danach ist der Motor betriebsbereit (**Bild 2**). Dargestellt werden Ablaufsteuerungen in Form von Funktionsplänen.

Bei **prozessabhängigen Ablaufsteuerungen** wird das Weiterschalten von einem Schritt zum nächsten durch den Prozess selbst ausgelöst. Im Falle einer Anlassschaltung für Drehstrommotoren benötigt man einen Sensor für den Betriebszustand „Leerlaufdrehzahl erreicht“. Ist die Leerlaufdrehzahl erreicht, wird automatisch auf Dreieckschaltung umgeschaltet (**Bild 3**). Ablaufsteuerungen stellt man mit Funktionsplänen bzw. Programmblaufplänen (GRAFCET, EN 60848) oder aber mit Zustandsdiagrammen (VDI 3260) dar, wenn das Weiterschalten von einem Weg abhängt.

Prozessabhängige Ablaufsteuerungen sind grundsätzlich zeitabhängigen Ablaufsteuerungen vorzuziehen, da bei Störungen der Ablauf unterbrochen wird oder funktionsgerecht langsamer weiterläuft.

Bei z. B. unerwartet stark belastetem Drehstrommotor wird erst dann in die Dreieckschaltung umgeschaltet, wenn eine hinreichend hohe Drehzahl erreicht ist.



1.1.3 Verbindungsprogrammierte Steuerungen und speicherprogrammierte Steuerungen

Steuerungen werden auch nach der Art der Programmverwirklichung eingeteilt. Man unterscheidet **verbindungsprogrammierte Steuerungen (VPS)** und **speicherprogrammierte Steuerungen (SPS)** (**Tabelle 1**).

Bei **verbindungsprogrammierten Steuerungen (VPS)** bestimmen die Leitungsverbindungen, z. B. die Verdrahtung, den Programmablauf.

Wenn keine Programmänderungen vorgesehen sind, nennt man diese Steuerungen **festprogrammiert**, sonst **umprogrammierbar**. Das Umprogrammieren kann z. B. durch den Tausch von Programmsteckern (mit anderer Verdrahtung) erfolgen.

Speicherprogrammierte Steuerungen (SPS) enthalten einen elektronischen Programmspeicher, der frei programmiert werden kann.

Das Programm kann über einen PC erstellt und in die Steuerung übertragen werden. Die Programme sind austauschbar und können schnell geändert werden. SPS sind meist bei Maschinensteuerungen eingesetzt. Es werden z. B. bei Transferstraßen die Zustellbewegungen einzelner Maschinen mit SPS gesteuert. SPS sind als Mehrprozessorsteuerungen mit hochleistungsfähigen Mikroprozessoren aufgebaut. Über digitale Netze können SPS zusammengeschlossen werden und Daten austauschen. Über Kommunikationsschnittstellen können SPS aus der Ferne, z. B. über das Internet, beobachtet und mit neuer Software ausgestattet werden.

Tabelle 1: Programmverwirklichung

Art		Beispiel
Verbindungsprogrammiert VPS	festprogrammiert	Relaissteuerung
	umprogrammierbar	Programmsteuerung mit Steckerfeld
Speicherprogrammiert SPS	austauschprogrammierbar	SPS mit EPROM ¹
	freiprogrammierbar	SPS mit EEPROM ² oder RAM ³

¹ EPROM von Erasable Programmable Read Only Memory = löschbarer Nur-Lese-Speicher
² EEPROM von Electrically EPROM = elektrisch löschbarer Nur-Lese-Speicher
³ RAM von Random Access Memory = Speicher mit wahlfreiem Zugriff

1.2 Regeln, Regelung

Das Regeln bzw. die Regelung ist ein Vorgang, bei dem die zu regelnde Größe (**Regelgröße**) fortlaufend erfasst und so beeinflusst wird, dass sie sich der gewünschten Größe (**Führungsgröße**) angleicht.

Man unterscheidet **Festwertregelungen** und **Folgeregelungen**.

Beispiel für eine Festwertregelung. In einem Härteofen soll die Temperatur auf einem gleichbleibenden Wert (**Festwert**) gehalten werden (**Bild 1**). Dieser Wert ist die Führungsgröße. Die Temperatur ist die Regelgröße. Zur Regelung kann ein Dehnstab verwendet werden, der sich je nach Höhe der Ofentemperatur verlängert oder verkürzt. Dieser Dehnstab ist über eine Stellschraube mit dem Schieber fest verbunden. Mit der Stellschraube kann die Stellung des Schiebers in Bezug auf den Dehnstab verändert werden. Wird der Härteofen angefahren, verlängert sich der Dehnstab mit steigender Temperatur und der Schieber drosselt die Brenngaszufuhr. Sinkt die Ofentemperatur, verkürzt sich der Dehnstab und der Schieber öffnet die Brenngaszufuhr, damit die Ofentemperatur wieder steigt.

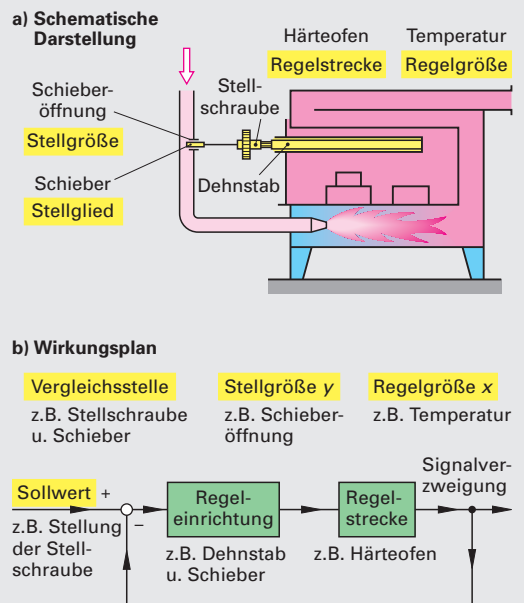


Bild 1: Historische Regelung eines Härteofens

Die Ofentemperatur, die durch diese Einrichtung konstant gehalten wird, ist die **Regelgröße**. Der Ofen selbst wird als **Regelstrecke** bezeichnet. Die Schieberöffnung, mit der die Brenngasmenge beeinflusst wird, nennt man wie bei der Steuerung **Stellgröße**.

Der Dehnstab gibt durch seine Länge die vorhandene Ofentemperatur, den Istwert der Regelgröße, an, während über die Stellschraube die gewünschte Temperatur, der Sollwert der Regelgröße, eingestellt werden kann. Bei einer Differenz des Istwertes zum Sollwert, der **Regeldifferenz**, z. B. bei einer Temperaturabsenkung öffnet der Schieber die Zuleitung und der Ofen wird beheizt, um den Sollwert wieder zu erreichen. Die Ofentemperatur sinkt immer, wenn die Ofentür zur Neubeschickung oder Entnahme der Werkstücke geöffnet wird. Die dadurch auftretende Abkühlung bezeichnet man als **Störgröße**.

Die Aufgabe der Regelung ist es, eine Größe, z. B. die Temperatur, konstant zu halten. Regelungen dieser Art nennt man **Festwertregelungen**.

Beispiel für eine Folgeregelung. Zum Härten von Stahl soll die Temperatur im Härteofen langsam bis auf etwa 700 °C erhöht und dann schnell auf Härtetemperatur gebracht werden. Die Ofentemperatur soll einem bestimmten Temperaturprofil folgen. Dabei wird die Führungsgröße für die Temperatur z. B. mit einer sich gleichmäßig drehenden, auf der Achse Dehnstab-Schieber beweglichen Kurvenscheibe vorgegeben (**Bild 1**). Schieber und Dehnstab sind mit Rollen versehen, die in der Nut der Kurvenscheibe abrollen. Durch die Form der Kurvenscheibe (Führungsgröße) wird der Werteverlauf der Härtetemperatur (Regelgröße) gesteuert.

In der gezeichneten Stellung der Kurvenscheibe (maximale Härtetemperatur) ist der Schieber (Stellglied) ganz geöffnet und die Brenngaszufuhr entsprechend erhöht. Die Temperatur (Regelgröße) steigt an. Mit zunehmender Temperatur dehnt sich der Dehnstab und schließt den Schieber wieder soweit, dass die gewünschte Härtetemperatur nicht überschritten wird. Ein solches Ausregeln des jeweiligen Temperaturbereichs geschieht bei jeder Kurvenscheibenstellung.

Regelungen unterscheidet man auch nach der Art der Signalverarbeitung: Erfolgt die Signalverarbeitung in der Regeleinrichtung überwiegend durch analoge Signale, spricht man von **analoger Regelung**, bei überwiegend binären Signalen von **binärer Regelung** und bei überwiegend digitaler Signalverarbeitung von **digitaler Regelung**.

1.3 Leiten, Leitung

Den Steuer- und Regeleinrichtungen sind bei komplexen Anlagen, z. B. bei Kraftwerken, Transferstraßen und Verkehrsanlagen, **Leiteinrichtungen** bzw. **Leitwarten** übergeordnet.

Das **Leiten** ist die Gesamtheit aller Maßnahmen, die bewirken, dass der gewünschte Prozessverlauf erreicht wird. Dabei ist meist auch eine Mitwirkung des Menschen vorgesehen.

Neben dem Messen, Steuern und Regeln sind die wichtigsten Leitaufgaben: Überwachen, Schützen vor Gefahren, Auswerten, Anzeigen, Melden, Aufzeichnen, Eingreifen, Datenerfassen, Dateneingeben, Datenverarbeiten, Datenübertragen und Datenausgeben. Leiteinrichtungen sind Computer, Betriebsdatenerfassungsgeräte und die Datenetze zur Verbindung der Leiteinrichtung mit den dezentralen Steuerungs-, Regelungs- und Messeinrichtungen einer Anlage.

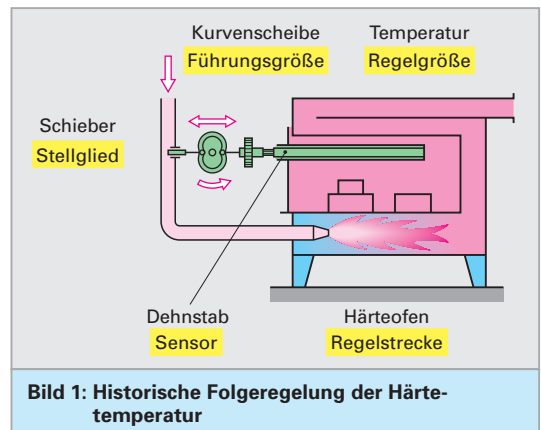


Bild 2: Leitwarte für Getriebeprüfstand

1.4 Entwicklungsphasen industrieller Technik

Erste industrielle Revolution

Die erste industrielle Revolution begann **um 1800** mit der Mechanisierung der Produktion mit Dampfkraft (**Bild 1**). Die Muskelkraft der Menschen und Tiere sowie in Teilen die Wasserkraft wurden durch Dampfmaschinen ersetzt. Zum Ende des 18. Jahrhunderts kamen als Antriebsaggregate Elektromotoren und Verbrennungsmotoren hinzu. Es entwickelten sich aus den bisherigen Manufakturen die Fabriken. Man begann *serienidentische Teile* herzustellen.

Zweite industrielle Revolution

Mit der zweiten industriellen Revolution kam die Massenproduktion, und zwar vor allem mithilfe von elektrisch angetriebenen Maschinen. So wurden mit Beginn des **20. Jahrhunderts** neben Waffen auch Kraftfahrzeuge und Haushaltsgeräte in größeren Mengen produziert (**Bild 2**).

Dritte industrielle Revolution

Die dritte industrielle Revolution begann **um 1970** mit der Verwendung von Transistoren und Dioden zur digitalen Datenverarbeitung in Maschinensteuerungen. Man begann Maschinen numerisch (digital) zu steuern. Es entstand die numerische Steuerung (Numerical Control, NC). Die **NC-Maschine (Bild 3)** verdrängte Zug um Zug handgesteuerte und mechanisch automatisierte Maschinen. Der wirkliche Durchbruch kam mit der Entwicklung der integrierten Schaltkreise und Mikroprozessoren und deren Integration in Maschinensteuerungen und in Produkte, z. B. als Mikrorechner und als speicherprogrammierte Steuerungen (SPS).

Eingeführt sind seither die **CAX-Systeme**:

- **CAD-Systeme (Design)**
für das Zeichnen und Konstruieren (**Bild 4**),
- **CAM-Systeme (Manufacturing)**
für den Herstellungsprozess,
- **CAQ-Systeme (Quality-Assurance)**
für die Qualitätsprüfung und
- **CIM (Computerintegrierte Fertigung)**
für die Gesamtheit der Produktionskette.



Bild 1: Dampfhammer (1839) von James Nasmyth¹



Bild 2: Der 10 000. Opel läuft vom Band (1931)

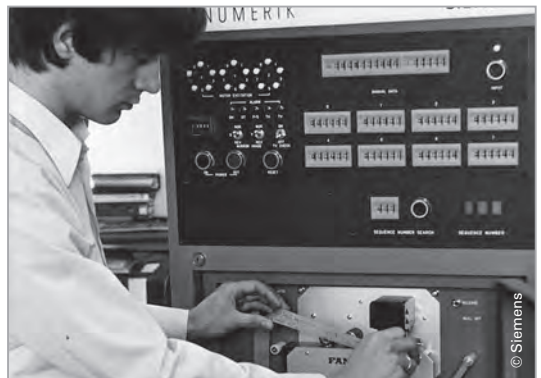


Bild 3: NC-Steuerung mit Lochstreifeneingabe (1970)

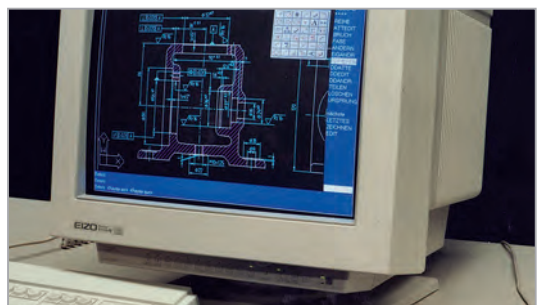


Bild 4: 2D-CAD-System (1998)

¹ James Nasmyth, 1808 bis 1890, war schottischer Kunstmaler und Ingenieur. Er gilt als Erfinder des Dampfhammers und der Dampfhammer.

Vierte industrielle Revolution

Die vierte industrielle Revolution, etwa seit dem **Jahr 2000**, wird geprägt durch die Allgegenwart des **Internets**.

Das Internet¹ wurde ab 1980 als Plattform zum Datenaustausch unter den Großrechnern der Universitäten und Forschungsinstitute eingeführt. Inzwischen ist das Internet bei jedermann angekommen, in alle Bereiche der Gesellschaft vorgedrungen und lebensbestimmend geworden. Es dient nicht mehr nur zur bloßen Übermittlung von Information, sondern wurde maßgeblicher Bestandteil zur Steuerung und Regelung von Vorgängen aller Art. Es gibt weltweit mehr als eine halbe Milliarde Webserver.

Mithilfe des Internets werden

- Bankgeschäfte abgewickelt,
- Steuererklärungen gemacht,
- telefoniert,
- Waren geordert und zum Kunden gelenkt,
- Produktionsprozesse angestoßen, gesteuert und überwacht.

Ein großflächiger und ein länger anhaltender Ausfall des Internets wäre eine große, lebensbedrohende Katastrophe.

Die Integration internetfähiger bzw. kommunikationsfähiger Elektronik in die Dinge des Alltags, z. B. in Mobiltelefone, in Kameras, in Fahrzeuge und in Maschinen und Anlagen ermöglicht eine allumfassende Information und das Ingangsetzen selbsttätig ablaufender Prozesse (**Bild 1**).

Die Vernetzung von physikalisch-technischen Systemen mit virtuellen, nämlich programmierten Prozessen wird zum „Internet der Dinge und Dienste“ und kennzeichnet die vierte industrielle Revolution.

Mit Industrie 4.0 wird die vierte industrielle Revolution, nämlich die totale digitale Vernetzung der Maschinen, Anlagen und Produkte sowie der zugehörigen Dienste eingeleitet.

Gefahren bei Industrie 4.0

Steuerungsgeräte von Produktionsmaschinen (SPS) waren lange Zeit eine eigene Welt mit eigener, firmenspezifischer Software und Hardware,

mit dem Problem, mit Konkurrenzprodukten nicht kompatibel und kommunikationsfähig zu sein. Inzwischen sind diese Geräte über IP-Standards vernetzt. Das hat Standardisierungsvorteile, hat alle Vorteile der Fernwartung und Fernsteuerung, aber es hat den entscheidenden Nachteil, üblichen Hacker-Angriffsmethoden ausgesetzt zu sein.

Gefahren gibt es durch Fehler oder Sabotage in den Netzwerken, z. B. durch Ausfall oder Fehlschaltungen von Verbindungen und von Servern für die Kommunikation, die Produktion, die Logistik, die Energieübertragung (Bild 2).

Gefahren gibt es durch Spionagesysteme und malware² (Schadprogramme), welche darauf ausgerichtet sind, Zerstörungen anzurichten und Unheil zu bringen.

IT-Systeme allgemeiner Art werden häufig mit Anlagensteuerungen verbunden oder in diese integriert. Hier ist eine hinreichende Segregation unerlässlich, um zu verhindern, dass sich Schadprogramme und Ausspähungen über Teilsystemgrenzen hinweg ausbreiten können.

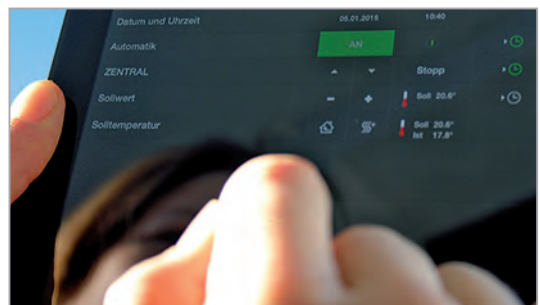


Bild 1: Temperatursteuerung über ein Smartphone

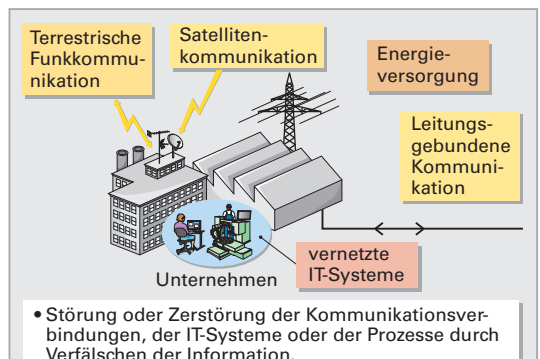


Bild 2: Störungen im IT-Bereich

¹ Internet von engl. internetwork = Zwischennetzwerk von miteinander verbundenen Netzen

² engl. malware, Kunstwort aus engl. malicious = bösartig und software

1.5 Industrie 4.0

Industrie 4.0 ist ein Zukunftsprojekt der deutschen Bundesregierung, mit dem die informationstechnische Vernetzung, insbesondere der Produktionstechnik, vorangetrieben werden soll.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Zitat) [013-1]:

Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 zielt darauf ab, die deutsche Industrie in die Lage zu versetzen, für die Zukunft der Produktion gerüstet zu sein. Industrieproduktion wird gekennzeichnet sein durch starke Individualisierung der Produkte unter den Bedingungen einer hoch flexibilisierten (Großserien-) Produktion, die weitgehende Integration von Kunden und Geschäftspartnern in Geschäfts- und Wertschöpfungsprozesse und die Verkopplung von Produktion und hochwertigen Dienstleitungen.

Die Wirtschaft steht an der Schwelle zur vierten industriellen Revolution. Durch das Internet getrieben, wachsen reale und virtuelle Welt immer weiter zu einem Internet der Dinge zusammen.

Die Kennzeichen der zukünftigen Form der Industrieproduktion sind die starke Individualisierung der Produkte unter den Bedingungen einer hoch flexibilisierten (Großserien-) Produktion, die weitgehende Integration von Kunden und Geschäftspartnern in Geschäfts- und Wertschöpfungsprozesse und die Verkopplung von Produktion und hochwertigen Dienstleitungen, die in sogenannten hybriden Produkten mündet.

Die deutsche Industrie hat jetzt die Chance, die vierte industrielle Revolution aktiv mitzugestalten. Mit dem Zukunftsprojekt Industrie 4.0 wollen wir diesen Prozess unterstützen.

Ziel von Industrie 4.0 sind intelligente (smarte¹) Fabriken. Diese zeichnen sich aus durch:

- Wandlungsfähigkeit,
- Ressourceneffizienz,
- Ergonomie und
- Kundenorientierung.

Die heute übliche Produktionsplanung und -steuerung mit der Vorgabe von Arbeitsschritten könnte abgelöst werden, indem z. B. die Werkstücke die Abläufe selbst organisieren. Rohlinge, Fabrikate und Produkte werden **smart**¹. Sie machen sich ihre Prozesse selbst.

Die Produkte sind mit speicherfähigen RFIDs² versehen (**Bild 1**) oder tragen zumindest eingeprägte Codes (**Bild 2**) zur Kennung. Die Produktionsmittel und Logistikkomponenten sind als „embedded³ systems“ konzipiert (**Bild 2**) und prinzipiell internetfähig.

Embedded Systems sind Produkte mit integrierten (eingebetteten) Computern bzw. Mikrocomputern oder Mikroprozessoren zum Zweck der Steuerung, Regelung, Visualisierung bzw. der Automatisierung.

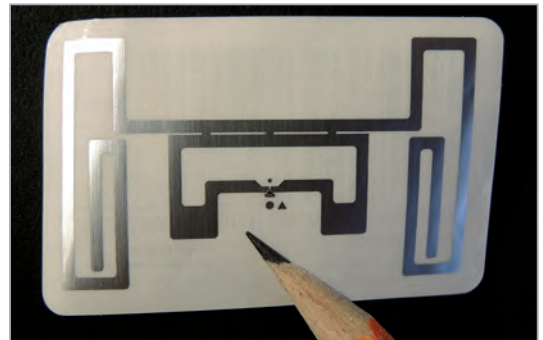


Bild 1: RFID-Klebe-Etikett

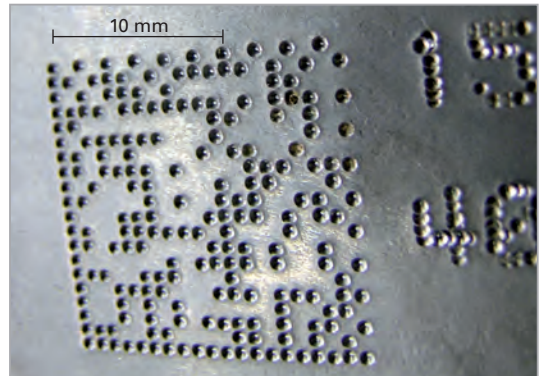


Bild 2: 2D-Code auf Gussteil geprägt

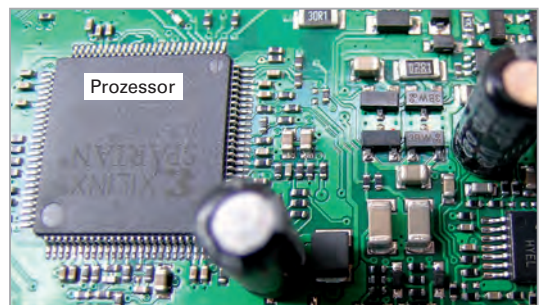


Bild 3: Embedded Systems zur Automatisierung

¹ engl. smart = geschickt

² RFID von engl. radio-frequency identification = drahtlose Identifizierung mithilfe elektromagnetischer Wellen

³ engl. embedded = eingebettet

1.6 Cyber-Physische Systeme (CPS)

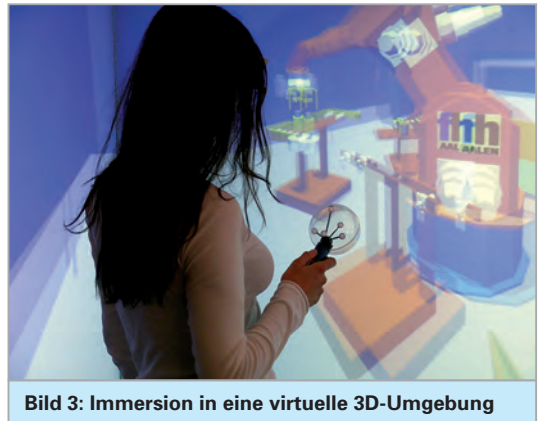
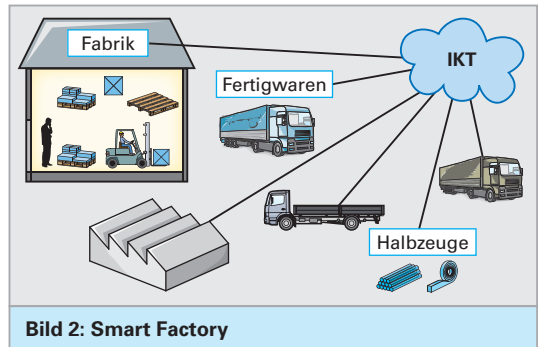
Eine zunehmende Bedeutung haben **Cyber-Physical-Systems¹ (CPS)**. Sie ermöglichen durch eine angehängte Kommunikationstechnik die Vernetzung von eingebetteten Systemen untereinander und mit dem Internet. Dabei wird die frühere hierarchische und lokal konzentrierte Struktur aufgelöst (**Bild 1**).

CPS sind die technologische Grundlage für Industrie 4.0. Die besondere Eigenschaft ist, dass CPS als *smart*, d. h. geschickt und intelligent, empfunden werden. So leiten sich daraus unmittelbar Produktnamen ab, wie z. B. *Smartphone* oder *Smart-TV* für internetfähige Mobiltelefone bzw. Fernsehgeräte.

Die Entwicklungen der Cyber-Physischen Systeme beschränken sich nicht nur auf Einzelprodukte, sondern gelten auch für Großsysteme wie z. B. **Smart Factory²**.

Dies ist eine Fabrik, deren Produktions- und Geschäftsprozesse durch Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) vernetzt sind (**Bild 2**).

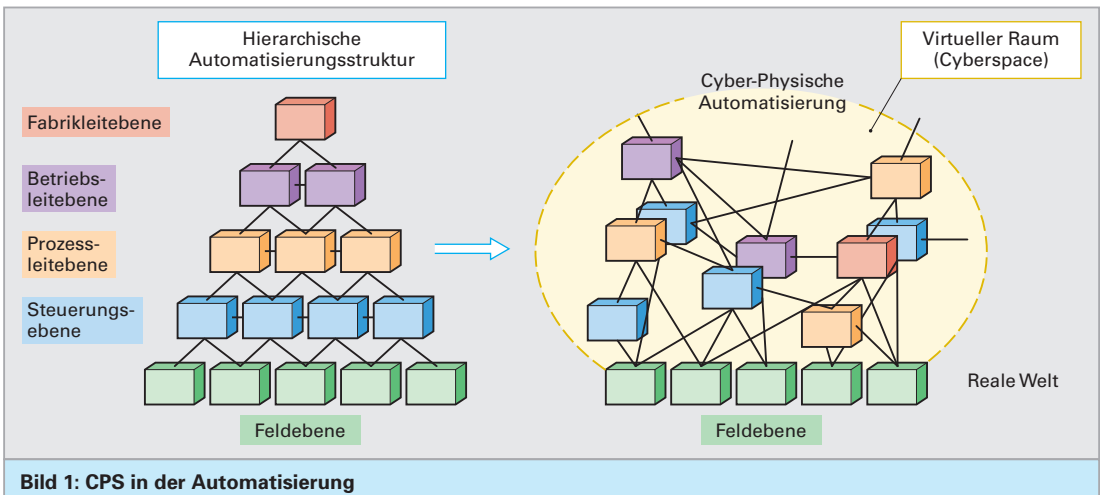
Beim Thema *Smart Factory* liegen die Schwerpunkte auf intelligenten Produktionssystemen und -verfahren sowie auf der Realisierung verteilter und vernetzter Produktionsstätten. Unter der Überschrift *Smart Production* werden unter anderem die unternehmensübergreifende Produktionslogistik und die Mensch-Maschine-Interaktion in industriellen Anwendungen durch *Immersion³* (**Bild 3**) noch stärker in den Blick genommen.



¹ cyber, altgriechische Vorsilbe für Steuerung... (des Seemanns) – ursprünglich die Steuerkunst des Seefahrers. Davon abgeleitet ist die Wissenschaft der Kybernetik = Regelungstechnik, Steuerungstechnik und Sensortechnik, heute meist in Verbindung mit Mikrocomputern, Mikroschaltkreisen und Mikromechanik.

² smart factory = intelligente (kluge) Fabrik

³ engl. immersion = das Eintauchen



2 Mechanische Steuerungen

2.1 Allgemeines

Mechanische Steuereinrichtungen können mit großen Stellgeschwindigkeiten genaue Verstellwege fahren. Durch Nockenwellen werden z. B. die Ventile von Motoren gesteuert. Rundschaftische werden mit Hilfe von Malteserkreuzgetrieben positioniert oder an Drehautomaten werden Vorschübe mit Kurvenscheiben gefahren. Mechanische Steuerelemente sind genau, wirken direkt ohne Verzögerung und haben eine hohe Lebensdauer. Sie sind aber nur mit großem Aufwand herzustellen.

Mechanische Steuerungen¹ bestehen aus Getrieben, Kurvenscheiben, Hebeln, Kupplungen und anderen mechanischen Bauteilen (**Bild 1**).

Beispiel. Ein Elektromotor treibt z. B. die Antriebswelle an, die über eine Kupplung mit dem Zahnradpaar der Abtriebswelle verbunden werden kann. Die Kupplung ist das Stellglied der Steuerung und erhält die Steuersignale über einen Hebel von der Kurventrommel. Die Kurventrommel sitzt auf einer Steuerwelle, die über ein Untersetzungsgetriebe ebenfalls vom Elektromotor angetrieben wird. Die Signalgabe für die Betätigung der Kupplung wird durch die Form der Kurventrommel bestimmt.

Führt die sich drehende Kurvennut in der sich drehenden Kurventrommel nach rechts, wird die Kupplung durch den Hebel geschlossen und die Abtriebswelle eingeschaltet (Start). Führt die Nut nach links, wird die Kupplung geöffnet und die Antriebswelle bleibt stehen (Stopp). Die Signalfolge für Start und Stopp wiederholt sich nach jeder Steuerwellenumdrehung und bildet in diesem Fall das Programm der Steuerung.

Die gesamte **Steuereinrichtung** besteht aus Steuerwelle, Kupplung, Kurventrommel, Hebel und Feder, während die Abtriebswelle die **Steuerstrecke** darstellt.

Die Merkmale mechanischer Steuerungen können folgendermaßen zusammengefasst werden (**Bild 2**): Die Antriebsenergie gelangt über einen Elektromotor in ein verstellbares Getriebe, durch das die Drehzahl, die Drehrichtung und die Drehdauer (Start-Stopp) über mechanische, pneumatische, hydraulische oder elektrische Signale verstellt werden können.

Bei Stufengetrieben erfolgt die Signalgabe über Kupplungen, bei stufenlos verstellbaren Getrieben über besondere Stelleinrichtungen. An der

Abtriebswelle des verstellbaren Getriebes steht eine gesteuerte Rotationsenergie zur Verfügung. Muss die Drehbewegung jedoch in eine geradlinige Bewegung umgewandelt werden, wie z. B. beim Vorschub des Werkzeugschlittens einer Drehmaschine, kann dies mit einem Zahnrad-Zahnstangengetriebe geschehen.

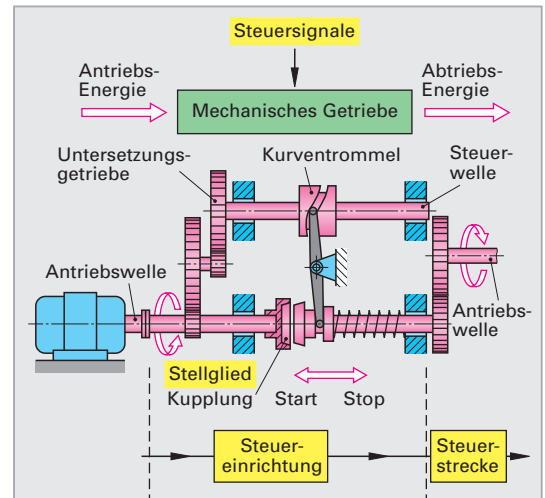


Bild 1: Beispiel einer mechanischen Steuerung

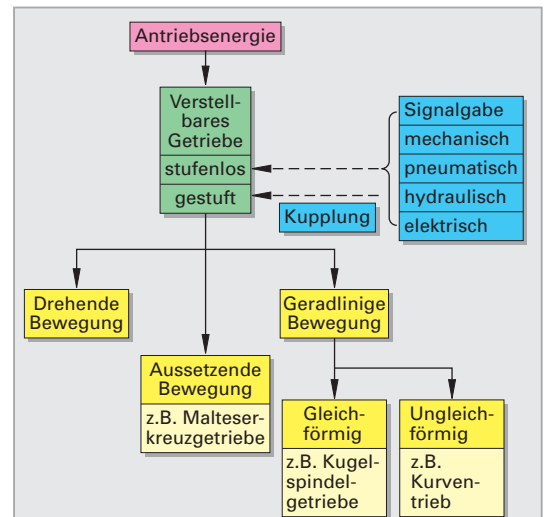


Bild 2: Aufbau mechanischer Steuerungen

¹ Mechanische Steuerungen sind „aus der Mode“ gekommen. Dies gilt vor allem für Steuerungen bei Maschinen und Geräten. Es gibt aber bei vielen Aufgaben, insbesondere, wenn gleichzeitig Bewegungen zu steuern sind, mechanische Lösungen, die wegen der Einfachheit, Robustheit, Zuverlässigkeit und Schnelligkeit elektronisch nicht oder nur sehr teuer erreichbar sind. Beispiele sind: die Ventilsteuerungen durch Nocken und die Lenkungen an Kraftfahrzeugen. Für beides gibt es grundsätzlich auch elektronische Varianten.

Bei reibungsarmen Antrieben werden Kugelgewindetriebe zur Erzeugung der gleichförmigen, geradlinigen Bewegung eingesetzt. Soll die geradlinige Bewegung ungleichförmig verlaufen, um z. B. eine schnelle Zustellbewegung von einer langsamen Arbeitsbewegung zu trennen, verwendet man Kurbel- und Kurvengetriebe. Kurvengetriebe werden auch zur Signalerzeugung eingesetzt. Für Transporteinrichtungen werden oft Schrittbewegungen benötigt. Ein Rundschtalttisch einer Presse muss z. B. nach jedem Arbeitshub des Presswerkzeugs um einen Teilschritt gedreht werden und dann wieder stillstehen. Dies kann durch die Unterbrechung der stetigen Drehbewegung eines verstellbaren Getriebes mit Hilfe eines nachfolgenden aussetzenden Getriebes erreicht werden.

2.2 Verstellbare Getriebe

Mit verstellbaren mechanischen Getrieben werden die Drehrichtung, Drehzahlen und Drehmomente gesteuert.

Die Eingangsleistung an der Antriebswelle des Getriebes ist in vielen Fällen konstant, sodass sich mit der Änderung der Drehzahl auch das Drehmoment verändert. Bei konstanter Leistung steht das Drehmoment M in umgekehrtem Verhältnis zur Drehzahl n : $M \sim 1/n$ (**Bild 1**). Die Kennlinie ist eine Hyperbel. Bei den schlupffreien, stufenlos verstellbaren Getrieben ist die Kennlinie ein geschlossener Kurvenzug, bei Stufengetrieben werden entsprechend der Zahl der Drehzahlstufen nur einige Punkte der Hyperbel belegt.

2.2.1 Stufengetriebe

Stufengetriebe teilt man in **Stufenscheibengetriebe** und **Stufenrädergetriebe** ein.

Stufenscheibengetriebe besitzen zur Kraftübertragung Riemenscheiben und Riemen. Die Kraftübertragung bei Stufenrädergetrieben erfolgt direkt über Zahnräder. Drehrichtung und Drehzahl werden bei automatischen Stufengetrieben durch Kupplungen und Bremsen verstellt.

Beispiel. Mit einem **Keilriemengetriebe** können z. B. zwei Drehzahlen gesteuert werden, ohne dass die Riemenlage verändert werden muss (**Bild 2**).

Die Signalgabe für den Drehzahlwechsel erfolgt elektrisch über zwei Elektromagnet-Kupplungen

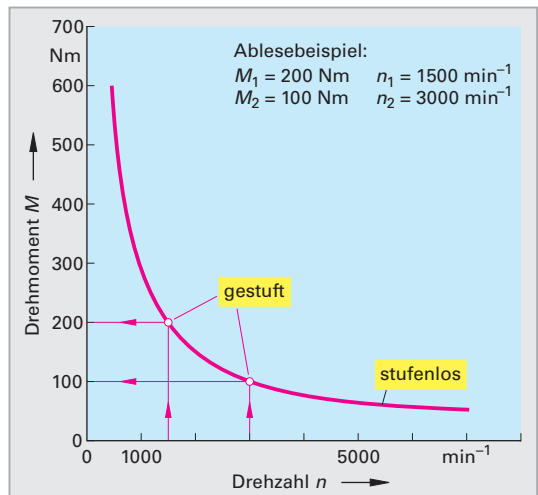


Bild 1: Kennlinie eines verstellbaren Getriebes

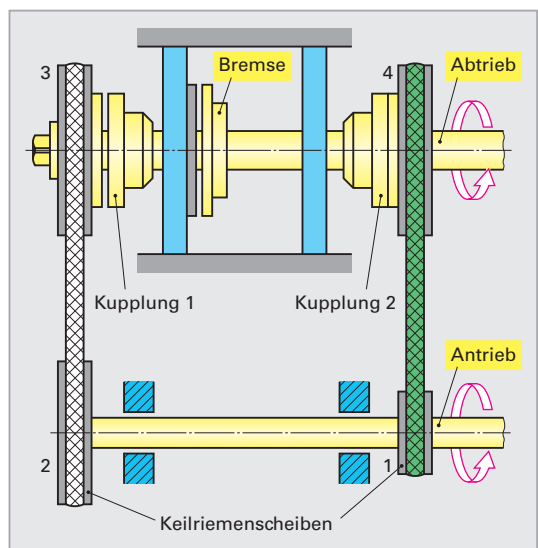


Bild 2: Drehzahlsteuerung eines Stufenscheibengetriebes

und eine Bremse. Wenn die Elektromagnet-Kupplung 2 geschaltet ist, erfolgt der Abtrieb über die Riemenscheibe 4 und der Langsamgang des Getriebes ist angesteuert. Gleichzeitig muss die Kupplung 1 offen sein, damit die Riemenscheibe 3 auf der Welle frei umlaufen kann.

Beim Umschalten auf den Schnellgang wird die Elektromagnet-Kupplung 2 geöffnet und die Bremse für die Abtriebswelle angesteuert. Dann kann die Kupplung 1 mit der Riemenscheibe verbunden werden und den Abtrieb auf den Schnellgang beschleunigen.

Beispiel. Bei dem mechanisch gesteuerten **Stufenrädergetriebe** können zwei Drehzahlen und beide Drehrichtungen gesteuert werden (**Bild 1**). Ein Elektromotor treibt die untere Welle an. Für den Schnellgang der Arbeitsspindel wird die Kupplung K_2 geschlossen.

Für den Langsamgang wird die obere Welle, die wegen der Zahnraduntersetzung eine langsamere Drehzahl als die untere Welle ausführt, durch die Kupplung K_1 und die beiden Kettenriebe mit den Schalen K_4 und K_3 verbunden. Der Schaltzeitpunkt für die mechanische Signalgabe zur Betätigung der beiden Kupplungen K_1 und K_2 wird durch die Steuerwellendrehzahl und die Form der rechten Kurventrommel bestimmt. Die linke Kurventrommel dient zur Steuerung des Richtungswechsels. Beim Linkslauf wird die Kupplung K_4 geschlossen, beim Rechtslauf die Kupplung K_3 .

Solche über Steuerwellen und Kurventrommeln gesteuerten Stufenrädergetriebe verwendet man z. B. bei Drehautomaten zum Antrieb der Arbeitsspindel. Die Formen der Kurventrommeln sind auf ein bestimmtes Werkstück abgestimmt, das bei sehr großen Stückzahlen preiswert hergestellt werden kann.

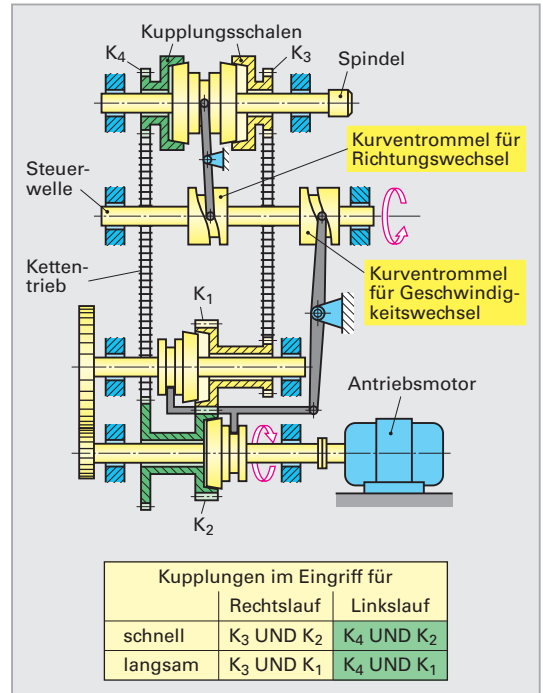


Bild 1: Drehzahl- und Drehrichtungssteuerung eines Stufenrädergetriebes

2.2.2 Stufenlos verstellbare Getriebe

Stufenlos verstellbare Getriebe sind Umschlingungsgetriebe, Reibradgetriebe und Wälzgetriebe.

Umschlingungsgetriebe

Umschlingungsgetriebe sind Stufenscheibenge triebe, bei denen mindestens eine Scheibe aus zwei kegelförmigen Teilen besteht. Diese kegelförmigen Teile lassen sich axial auf ihrer Welle verschieben, wodurch die Laufradien für die Keilriemen oder Stahlketten verstellbar werden. So lassen sich die Abtriebsdrehzahl und das Drehmoment des Getriebes steuern (**Bild 2**).

Für trocken laufende Umschlingungsgetriebe werden meist Breitkeilriemen als Zugmittel verwendet. Mit ihnen erreicht man einen besonders ruhigen, beinahe schlupffreien Lauf.

Für große Zugkräfte und wenn eine lange Lebensdauer des Getriebes gefordert ist, setzt man als Zugmittel Stahlketten ein. Bei Stahlketten, die in einem Ölbad laufen, unterscheidet man je nach Kettengeschwindigkeit und zu übertragender Leistung **Lamellenketten**, **Rollenketten** und **Wiedruckstück-Ketten**.

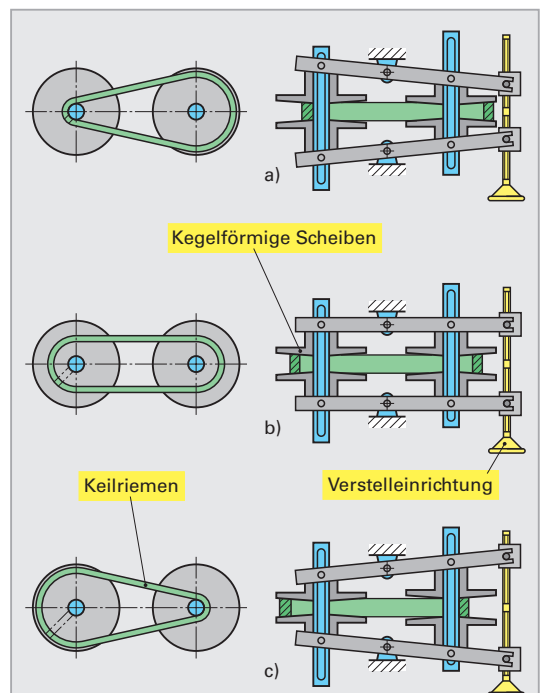


Bild 2: Umschlingungsgetriebe

Die Drehzahl der Breitkeilriemengetriebe wird entweder durch Verstellen des Achsabstands oder durch Verstellen der beiden Teile der Kegelscheiben gesteuert (**Bild 1**).

Um die Keilriemen dabei unter Spannung zu halten, werden die beiden Hälften eines Kegelrades durch eine konstante Federkraft oder durch eine drehmomentabhängige Anpresseinrichtung zusammengedrückt. Die beiden Teile des Antriebs-Kegelrades können z. B. durch ein Handrad auseinander- oder zusammengeschoben werden (**Bild 1**). Bei dem Abtriebs-Kegelrad sorgt eine Anpressfeder für den notwendigen Spanndruck und die Einstellung des Laufradius.

Getriebe mit Stahlketten als Zugmittel werden meist über eine Verstellspindel und ein Hebelsystem verstellt (**Bild 2, vorhergehende Seite**).

Die Ansteuerung der Umschlingungsgetriebe erfolgt durch Handverstellung, elektrisch oder durch Pneumatik- bzw. Hydraulikzylinder. Elektrische Stelleinrichtungen oder hydraulische Servoantriebe werden besonders dann benötigt, wenn die Getriebe als Stellglieder in Regelkreisen eingesetzt werden.

Reibradgetriebe

Bei stufenlos verstellbaren Reibradgetrieben wird das Drehmoment durch ein Reibrad und eine Kegelscheibe übertragen (**Bild 2**). Dabei wird die auf der Motorwelle sitzende Kegelscheibe während der Kraftübertragung gegen das Reibrad gedrückt. Zur Steuerung der Abtriebsdrehzahl werden Motor und Kegelrad senkrecht zur Motorachse verschoben.

Der Anpressdruck des Reibrades wird der jeweiligen Drehmomentbelastung angepasst, um den Verschleiß möglichst klein zu halten. Die Anpresseinrichtung besteht im Wesentlichen aus einer Andrückmuffe und einer Feder. Die axial auf einer Nutwelle verschiebbare Andrückmuffe hat die Form eines Doppelnockens, der in das entsprechend geformte Gegenstück am Reibring eingreift und das Drehmoment von der Antriebsseite zur Abtriebsseite hin überträgt. Wird die Abtriebswelle belastet, gleitet die Andrückmuffe auf den schrägen Nockenflächen aus dem Gegenstück und spannt dadurch die Feder. Die entstehende Federkraft presst den Reibring gegen das Kegelrad und zwar umso stärker, je größer das Drehmoment ist.

Die Kennlinie des Reibradgetriebes verläuft nahezu linear und besitzt wegen des auftretenden Schlupfes an der Reibstelle eine minimale und eine maximale Grenzdrehzahl (**Bild 3**).

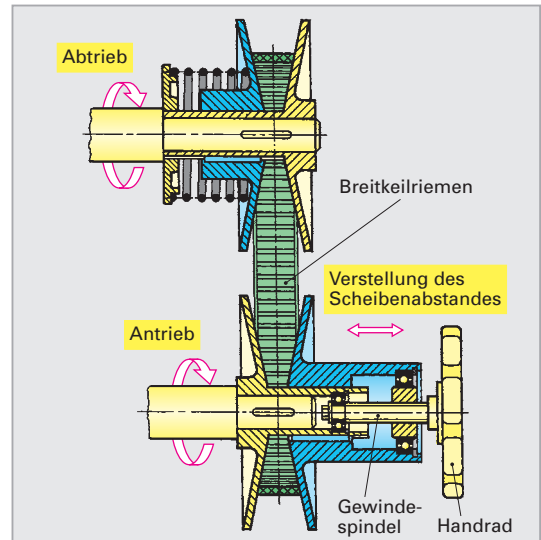


Bild 1: Drehzahlsteuerung durch Verstellen der Kegelscheiben

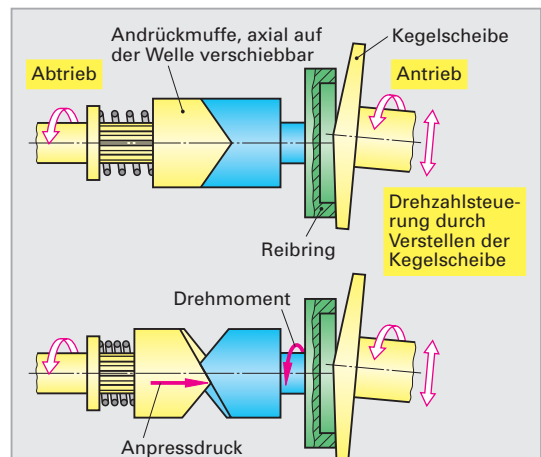


Bild 2: Reibradgetriebe mit Anpresseinrichtung

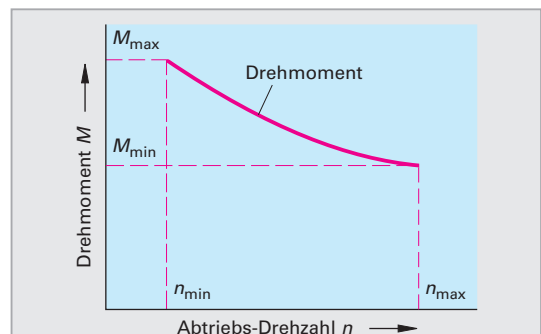


Bild 3: Kennlinie eines Reibradgetriebes

Wälzgetriebe

Bei verstellbaren Wälzgetrieben wird das Drehmoment über kugel- oder kegelförmige Wälzkörper übertragen.

Die Wälzkörper sind z. B. beim **Planetenverstell-Getriebe** kegelförmige Scheiben, die sich um die Antriebswelle drehen (**Bild 1**). Sie werden auf einer Seite vom Flansch der Antriebswelle und einem mitlaufenden Klemmring durch die Kraft einer Feder festgepresst und in Eigendrehung versetzt. Damit sie nicht aus der Klemmeinrichtung herauswandern, werden sie an der gegenüberliegenden Seite von zwei feststehenden Außenringen eingeklemmt.

Die Wellen der rotierenden Planetenscheiben sind in Gleitschuhen in der Abtriebswelle gelagert und lassen sich radial verschieben. Über die Planetenwellen wird das Drehmoment auf die Abtriebswelle übertragen.

Soll z. B. die Abtriebsdrehzahl erhöht werden, müssen die Planetenscheiben nach innen zur Drehachse hin verschoben werden. Dies erfolgt durch Krafteinwirkung über die beiden Außenringe. Die Planetenscheiben wandern wegen ihrer Kegelform aus den Außenringen heraus und dringen tiefer in die Flanschklammung ein. Dabei verkleinern sich die Abwälzradien. Die Planetenscheiben rollen schneller auf dem Antriebsflansch ab und erhöhen die Drehzahl der Abtriebswelle.

Wird die Axialkraft auf die Außenringe verkleinert, wandern die Planetenscheiben durch die Wirkung der Federkraft wieder nach außen und rollen langsamer ab. Die Abtriebsdrehzahl sinkt. Die Kennlinie des Planetenverstell-Getriebes gleicht der Kennlinie des Reibradgetriebes (**Bild 2**).

Erzeugung geradliniger Bewegungen

Mit verstellbaren Getrieben lassen sich Drehzahl und Drehrichtung mechanisch steuern.

Für die Umwandlung der Drehbewegung in eine geradlinige Bewegung, wie sie bei vielen Arbeitsmaschinen verlangt wird, müssen zusätzliche Getriebe verwendet werden (**Bild 3**). Bei automatisch gesteuerten Werkzeugmaschinen muss der geradlinige Antrieb möglichst reibungsarm und spielfrei sein. Ein **Kugelgewindetrieb** erfüllt diese Anforderungen (**Bild 4**). Zwischen der Spindel und der Mutter tritt wegen der eingelagerten Kugeln nur Rollreibung auf. Durch Verspannen einer zweiteiligen Mutter kann ein Gewindenspiel vollständig vermieden werden.

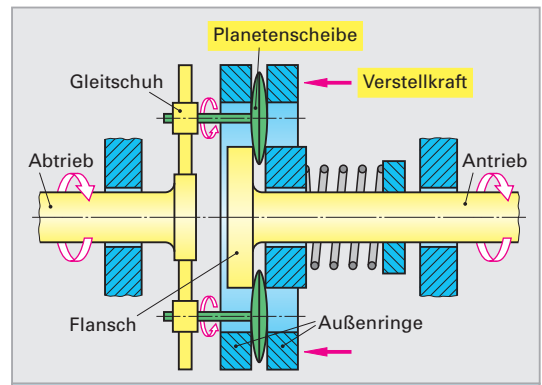


Bild 1: Planetenverstell-Getriebe

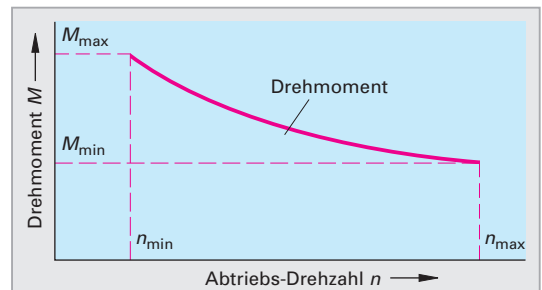


Bild 2: Kennlinie des Planetenverstell-Getriebes

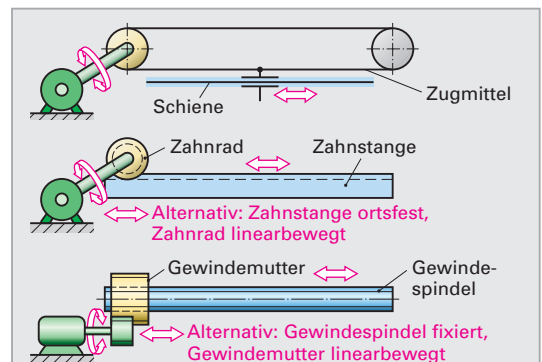


Bild 3: Umwandlung einer Drehbewegung in eine geradlinige Bewegung

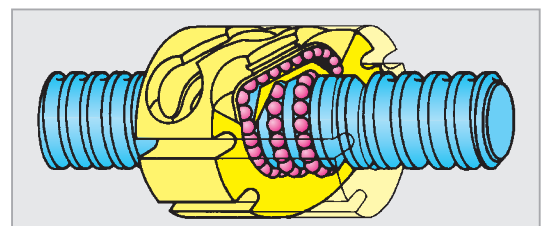


Bild 4: Kugelgewindetrieb