



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 beigefügte 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
Düsselberger 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 Rimpar

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 Rimpar

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 Feldbusssysteme 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		
2	Mechanische Steuerungen	16	4 Pneumatik	100
2.1	Allgemeines	16	4.1 Aufbau einer Pneumatikanlage	101
2.2	Verstellbare Getriebe	17	4.2 Drucklufterzeugung	104
2.2.1	Stufengetriebe	17	4.2.1 Verdichter (Kompressoren)	104
2.2.2	Stufenlos verstellbare Getriebe	18	4.2.2 Druckluftnetze	107
2.3	Getriebe mit ungleichmäßiger Übersetzung	21	4.2.3 Druckluftaufbereitung	108
2.4	Getriebe mit aussetzender Bewegung	23	4.3 Antriebsglieder	109
3	Elektrische und elektronische Steuerungen	24	4.3.1 Druckluftmotoren	109
3.1	Elektrische Kontaktsteuerungen	24	4.3.2 Pneumatischer Muskel	111
3.1.1	Bauelemente und Betriebsmittel	24	4.3.3 Balg'antrieb	111
3.1.2	Darstellung und Schaltpläne	38	4.3.4 Dreh- und Schwenkantriebe	112
3.1.3	Grundschaltungen	39	4.3.5 Druckluftzylinder	112
3.2	Elektronische Bauelemente	41	4.3.5.1 Standardzylinder	112
3.3	Binäre und digitale Steuerungen	45	4.3.5.2 Sonderbauarten	115
3.3.1	Codierungen	45	4.3.5.3 Zylinderkennwerte	116
3.3.1.1	Dualcode	45	4.3.5.4 Zylinderberechnungen	116
3.3.1.2	BCD-Codes	46	4.4 Ventile und Grundsteuerungen	118
3.3.1.3	Barcodes	46	4.4.1 Darstellung der Ventile	118
3.3.1.4	2D-Codes	46	4.4.2 Einteilung der Ventile	120
3.3.2	Digitale Speicher	47	4.4.2.1 Wegeventile	120
3.3.3	Binäre Verknüpfungen	51	4.4.2.2 Stromventile	122
3.3.4	Schaltalgebra	54	4.4.2.3 Sperrventile	123
3.3.5	Kombinatorische Steuerungen	55	4.4.2.4 Druckventile und Absperrventile	125
3.3.6	Ablaufsteuerungen	60	4.4.2.5 Ventilinseln	126
2.3.6.1	Elektromechanische Ablaufsteuerungen	61	4.5 Grafische Darstellung	127
3.3.6.2	Ablaufsteuerungen mit Kippgliedern (Flipflops)	61	4.5.1 Aufbau eines Schaltplans	127
3.3.6.3	Zähler	64	4.5.2 Funktionsdiagramme	129
3.4 GRAFCET		67	4.5.2.1 Wegdiagramm	130
3.4.1	Schritte	68	4.5.2.2 Zustandsdiagramm	130
3.4.2	Aktionen	69	4.6 Proportionaltechnik	133
3.4.3	Transitionen und Ablaufstrukturen	70	4.6.1 Proportional-Druckregelventile	133
3.4.4	Beispiel zu GRAFCET	72	4.6.2 Proportional-Wegeventile	134
3.5 Wegdiagramm und Zustandsdiagramm		73	4.7 Pneumatische Positioniersysteme	134
3.6 Sensoren		74	4.8 Beispiele pneumatischer Steuerungen	136
3.6.1	Allgemeines	74	4.8.1 Wegplansteuerung einer Biegevorrichtung	136
3.6.2	Analoge Sensoren	75	4.8.2 Taktstufensteuerung	137
3.6.2.1	Wege, Winkel, Abstände und Dicken	75	4.9 Elektropneumatische Steuerungen	139
3.6.2.2	Geschwindigkeiten und Drehzahlen	82	4.9.1 Elektropneumatische Betriebsmittel	139
3.6.2.3	Dehnungen, Kräfte, Drehmomente und Drücke	83	4.9.2 Direkte und indirekte Steuerung	140
3.6.2.4	Beschleunigungen	84	4.9.3 Selbsthalteschaltung	141
3.6.2.5	Temperaturen	86	4.9.4 Darstellung	141
3.6.3	Digitale Sensoren	88	4.9.5 Stetigantrieb	142
3.6.3.1	Inkrementale Sensoren	88	4.9.6 Ablaufsteuerung	142
5 Hydraulik			5 Allgemeines	144
5.1 Allgemeines			5.2 Physikalische Grundlagen	144
5.2 Physikalische Grundlagen			5.2.1 Hydrostatik	144
5.3 Hydraulikflüssigkeiten			5.2.2 Hydrodynamik	146
5.4 Aufbau hydraulischer Steuerungen			5.4.1 Hydraulikpumpen	147

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

10	Montagetechnik	317	13	Geschäftsprozesse	376
10.1	Grundlagen	317	13.1	Managementaufgaben	376
10.2	Der Materialfluss	320	13.2	Prozessmanagement	377
10.2.1	Lagern	320	13.3	Produkt-Daten-Management	378
10.2.2	Puffern	321	13.4	Gestaltungsmethoden für Prozessketten	380
10.2.3	Bunkern	322	13.5	Projektmanagement	382
10.2.4	Magazinieren	323	13.6	Informationsmanagement	383
10.2.5	Fördersysteme	324	13.7	Planungsinstrumente	385
10.2.5.1	Transporttische und Rutschen	324	13.8	Moderation	391
10.2.5.2	Rollenförderer	324	13.9	Präsentation	391
10.2.5.3	Bandförderer	325	13.9.1	Inhalt und visuelle Darstellung	392
10.2.5.4	Hängeförderer	325	13.9.2	Präsentationsgrafik mit PowerPoint	393
10.3	Fügen in der Montage	327	14	Arbeitsgestaltung und Arbeitsschutz	394
10.3.1	Fügestrukturen	327	14.1	Der Mensch ist das Maß	394
10.3.2	Schrauben	327	14.2	Arbeitsplatzgestaltung	395
10.3.3	Umformen	331	14.3	Arbeitsbelastungen	399
10.3.4	Kleben, Abdichten (Sealen)	332	14.3.1	Arbeitsbelastungen durch die Art der Arbeit	399
10.3.5	Thermisches Fügen	333	14.3.2	Belastungen durch die Arbeitsorganisation	400
10.3.6	Zusammenlegen	335	14.4	EU-Maschinenrichtlinie	402
10.3.7	Schrumpfen	335	14.4.1	Sicherheit und Gesundheitsschutz	402
10.4	Montageplätze	336	14.4.2	Kennzeichnung und Betriebsanleitung	404
10.4.1	Manuelle Montage	336	14.5	Europäische Sicherheitsnormen	405
10.4.2	Maschinelle Montage	337	11	Qualitätsmanagement	343
10.5	Montageorganisation	338	15	Informations- und Kommunikationstechnik	406
10.5.1	Topologie	338	15.1	Computertechnik	406
10.5.2	Montageablauf	338	15.1.1	Der PC	406
10.6	Erzeugnisgliederung und Montagefolge	340	15.1.2	Objektorientierte Software	409
10.7	Taktgebundene Montage	342	15.1.3	Steuern mit dem PC	412
			15.1.4	Schaltplanerstellen mit FluidSIM®	417
			15.1.5	Steuern und Regeln mit FluidSIM®	418
12	Instandhaltung und Energieeffizienz	355	15.2	Kommunikationstechnik	419
12.1	Instandhaltung	355	15.2.1	Lokale Kommunikation	419
12.1.1	Begriffe	355	15.2.2	Lokale Netze (LAN)	421
12.1.2	Wartung	358	15.2.3	Feldbusssysteme	423
12.1.3	Inspektion	362	15.2.3.1	CAN-Bus	423
12.1.4	Instandsetzung	364	15.2.3.2	PROFIBUS, PROFIBUS-DP	424
12.1.5	Inbetriebnahme	365	15.2.3.3	Aktor-Sensor-Interface (AS-i)	425
12.1.6	Fehlersuche	367	15.2.3.4	IO-Link	427
12.1.7	Reparatur	368	15.2.4	Serielle Schnittstelle (V.24)	428
12.2	Condition-Monitoring (Zustandsbedingte Instandhaltung)	369	16	Aufgaben und Übungen	429
12.3	Energieeffizienz	373	16.1	Aufgaben und Übungen zur Pneumatik	429
12.3.1	Energie-Monitoring	373	16.2	Aufgaben und Übungen zur Hydraulik	434
12.3.2	Energiewertstrom	373	16.3	Aufgaben und Übungen zu GRAFCET	436
12.3.3	Lastmanagement	374	16.4	Aufgaben und Übungen zur SPS	437
12.4	Energieeffiziente Geräte und Anlagen	375	16.5	Aufgaben und Übungen zur Regelungstechnik	450
			16.6	Aufgaben und Übungen zu elektrischen Antrieben	452
			16.7	Aufgaben und Übungen zur CNC-Technik	453
				Fachwörterbuch Deutsch-Englisch, Sachwortverzeichnis	454
				Quellenverzeichnis	464

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).

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**.

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.

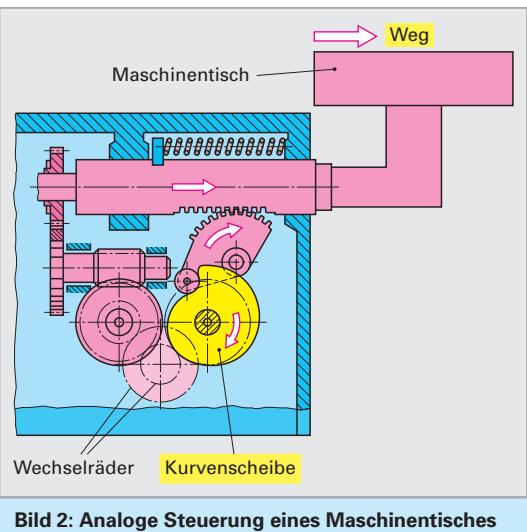
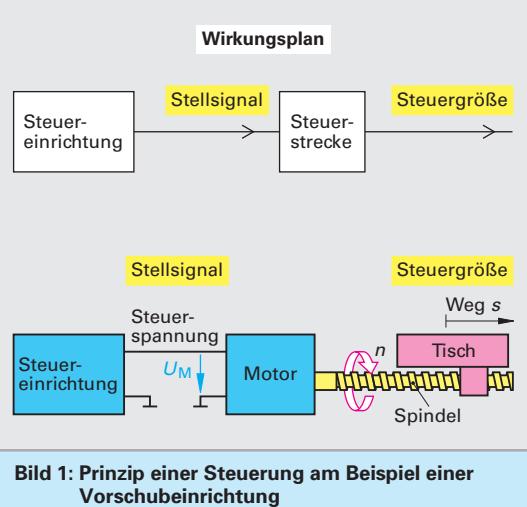
Die Steuersignale wirken von dem Steuergerät auf die Anlage oder Maschine ohne ein fortlaufendes Erfassen und Korrigieren des Steuervorgangs (**Bild 1**). Bei einer Vorschubsteuerung wird der Maschinentisch über einen Antrieb bewegt. **Stellsignal** ist die Motorspannung U_M für den Vorschubmotor. Dieser 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.



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 **Zählcod**. Dabei werden entsprechend der darzustellenden Zahl Impulse erzeugt und beim Empfänger gezählt.

Beispiel. Ein Vorschubtisch soll um einen durch Zahlen bestimmbarer 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 zu analogen Steuerungen sind Stell- und Steuergröße unstetig.

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

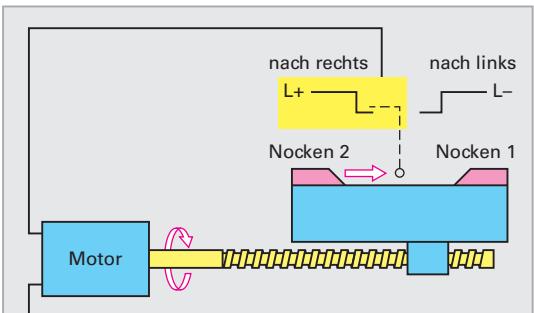


Bild 1: Binäre Steuerung eines Vorschubantriebs (Pendeln)

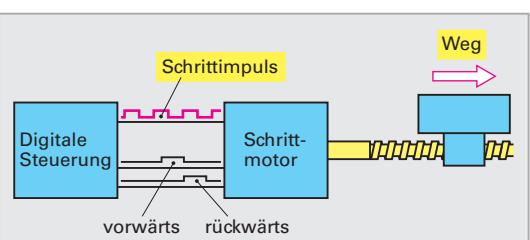


Bild 2: Digitale Vorschubsteuerung mit Schrittmotor

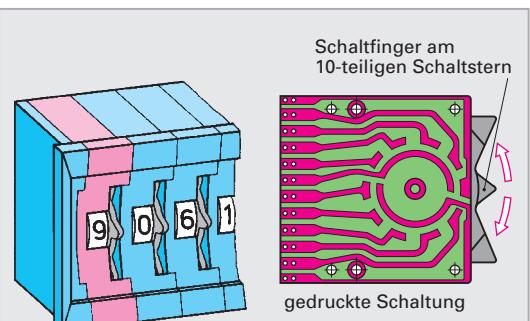


Bild 3: Vorwahlschalter

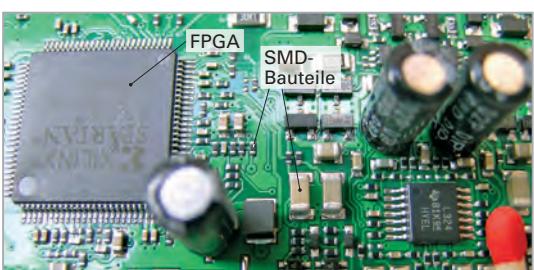


Bild 4: Digitalbaugruppe mit FPGA

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 Schutztür 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. Programmbablaufplänen (GRAFCET, EN 60 848) 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.

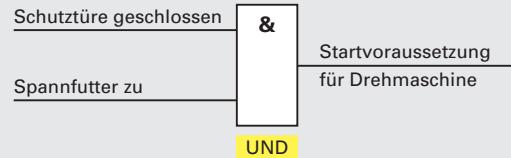


Bild 1: Beispiel einer Verknüpfungssteuerung

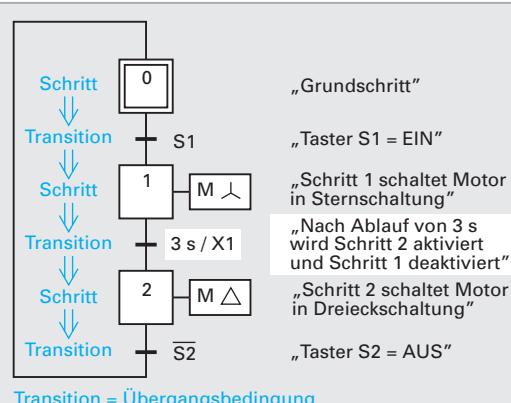


Bild 2: Funktionsplan einer zeitabhängigen Anlassschaltung

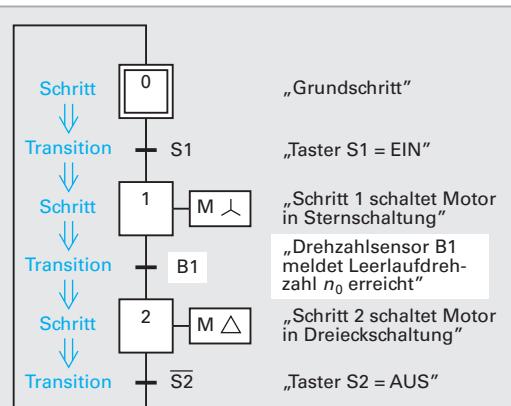


Bild 3: Funktionsplan einer prozessabhängigen Schaltung

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 = lösbarer Nur-Lese-Speicher

² EEPROM von Eletrically EPROM = elektrisch lösbarer 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.

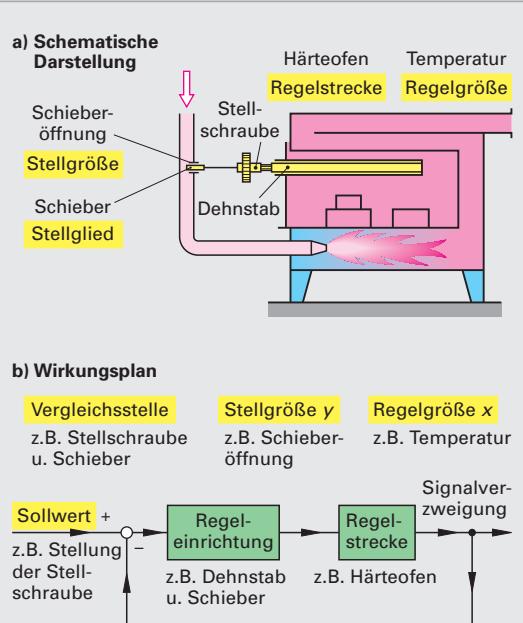


Bild 1: Historische Regelung eines Härteofens

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 Härteln 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 Datennetze zur Verbindung der Leiteinrichtung mit den dezentralen Steuerungs-, Regelungs- und Messeinrichtungen einer Anlage.

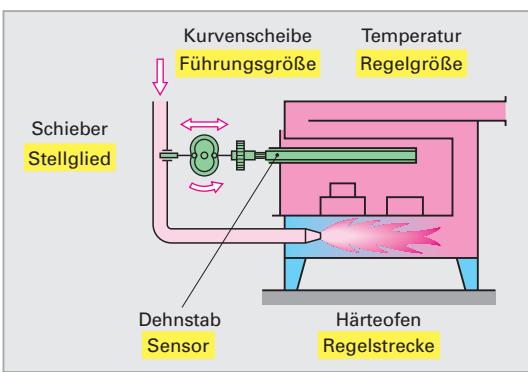


Bild 1: Historische Folgeregelung der Härtetemperatur



Bild 2: Leitwarte für Getriebeprüfstand

© ZF Friedrichshafen AG

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.



Bild 1: Dampfhammer (1839) von James Nasmyth¹

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**).



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

Dritte industrielle Revolution

Die dritte industrielle Revolution begann **um 1970** mit der Verwendung von Transistoren und Diode 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).

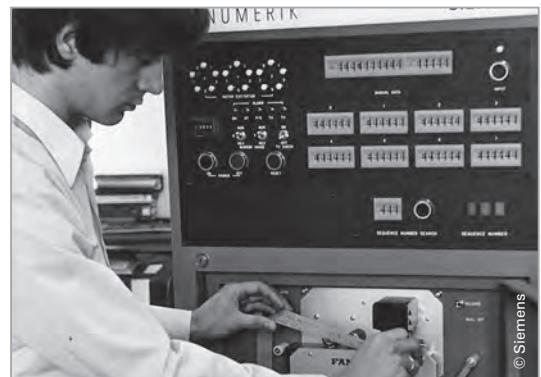


Bild 3: NC-Steuerung mit Lochstreifeneingabe (1970)

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.

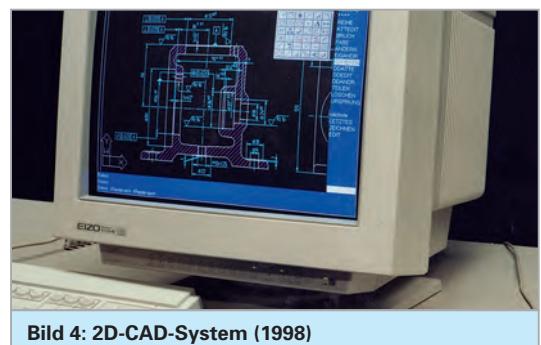


Bild 4: 2D-CAD-System (1998)

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

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 entfernt 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.

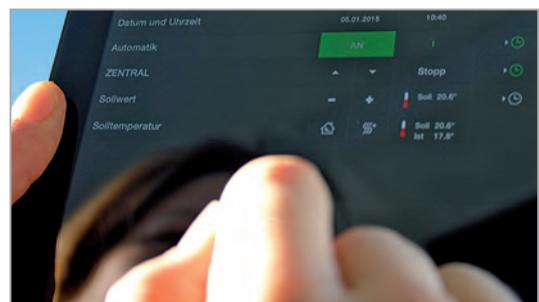
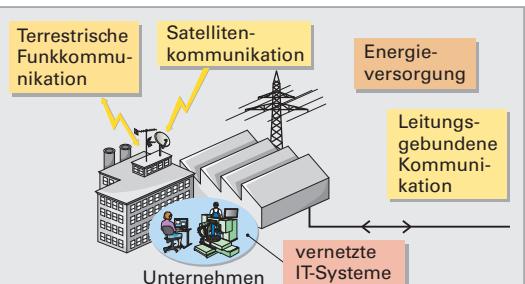


Bild 1: Temperatursteuerung über ein Smartphone



- Störung oder Zerstörung der Kommunikationsverbindungen, der IT-Systeme oder der Prozesse durch Verfälschen der Information.

Bild 2: Störungen im IT-Bereich

¹ Internet von engl. internetwork = Zwischenetzwerk 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 Produktions-technik, 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 Dienstleistungen.

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 Dienstleistungen, 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.

¹ engl. smart = geschickt

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

³ engl. embedded = eingebettet

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 internefähig.

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

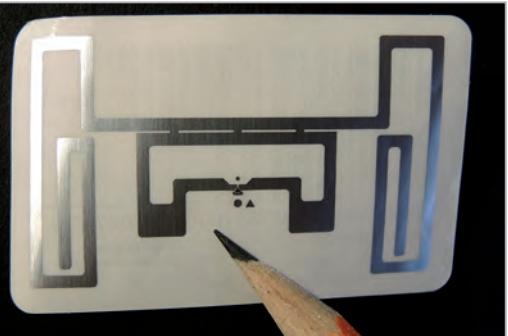


Bild 1: RFID-Klebe-Etikett

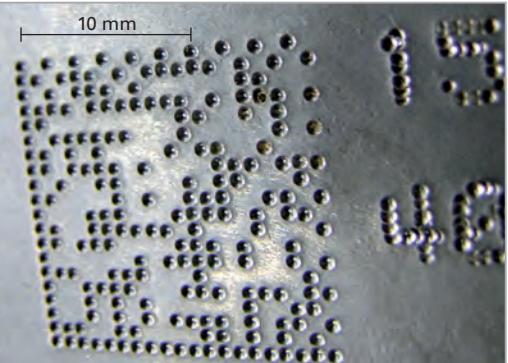


Bild 2: 2D-Code auf Gussteil geprägt

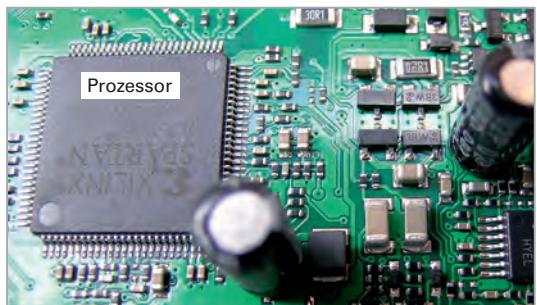


Bild 3: Embedded Systems zur Automatisierung

1.6 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 Factory**².

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 *Immersion*³ (**Bild 3**) noch stärker in den Blick genommen.

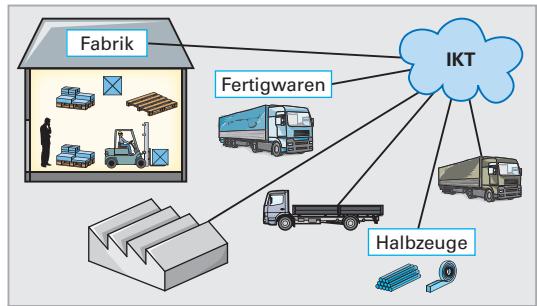


Bild 2: Smart Factory



Bild 3: Immersion in eine virtuelle 3D-Umgebung

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

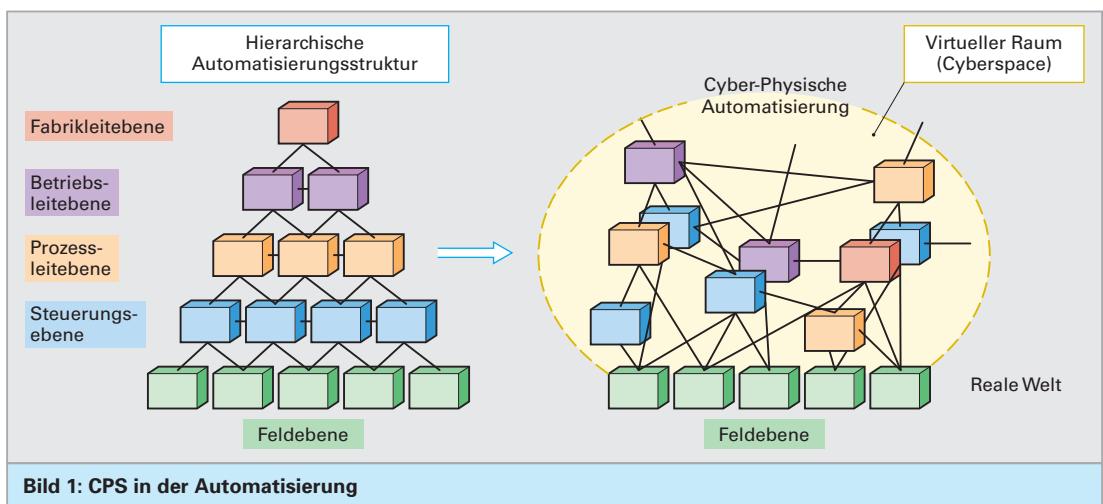


Bild 1: CPS in der Automatisierung

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. Rundschalttische 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 (Stop). Die Signalfolge für Start und Stop 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 ver stellt 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.

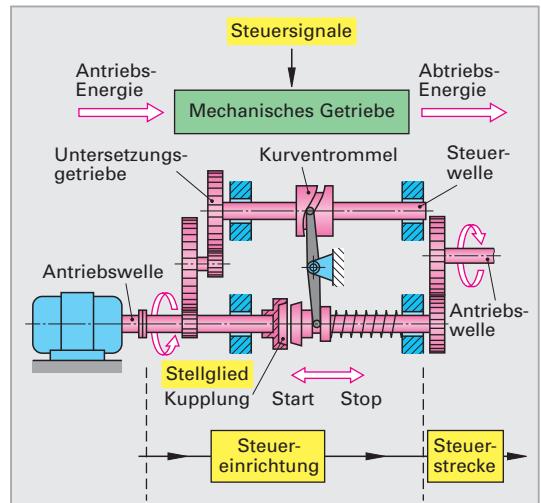


Bild 1: Beispiel einer mechanischen Steuerung

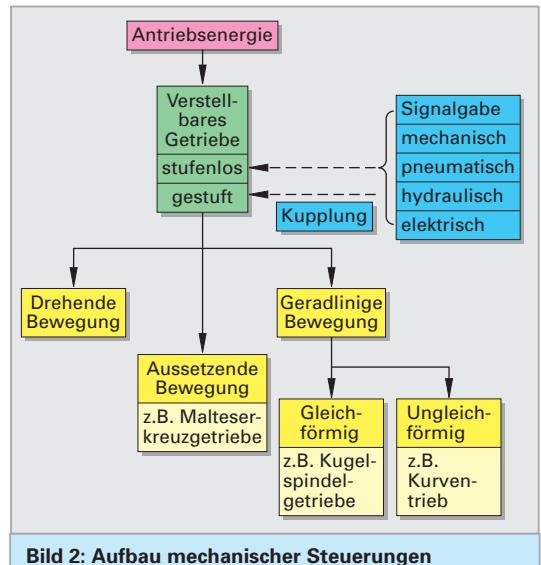


Bild 2: Aufbau mechanischer Steuerungen

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 Ventilsteuерungen 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 Rundschalttisch 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 Riemscheiben 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

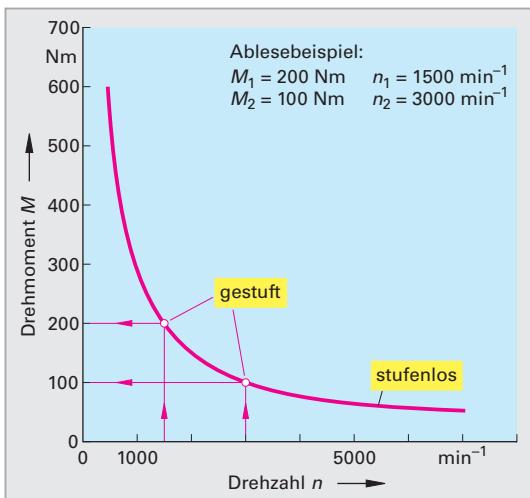


Bild 1: Kennlinie eines verstellbaren Getriebes

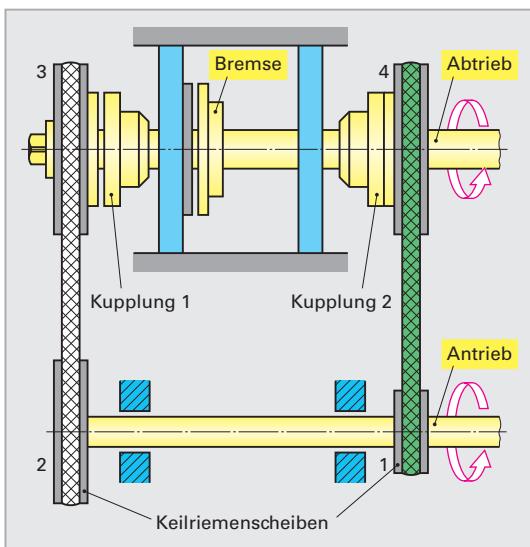


Bild 2: Drehzahlsteuerung eines Stufenscheibengetriebes

und eine Bremse. Wenn die Elektromagnet-Kupplung 2 geschaltet ist, erfolgt der Abtrieb über die Riemscheibe 4 und der Langsamgang des Getriebes ist angesteuert. Gleichzeitig muss die Kupplung 1 offen sein, damit die Riemscheibe 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 Riemscheibe 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 Kettentriebe 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.

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 verstellt 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 Ketten geschwindigkeit und zu übertragender Leistung **Lamellenketten**, **Rollenketten** und **Wiegdruckstück-Ketten**.

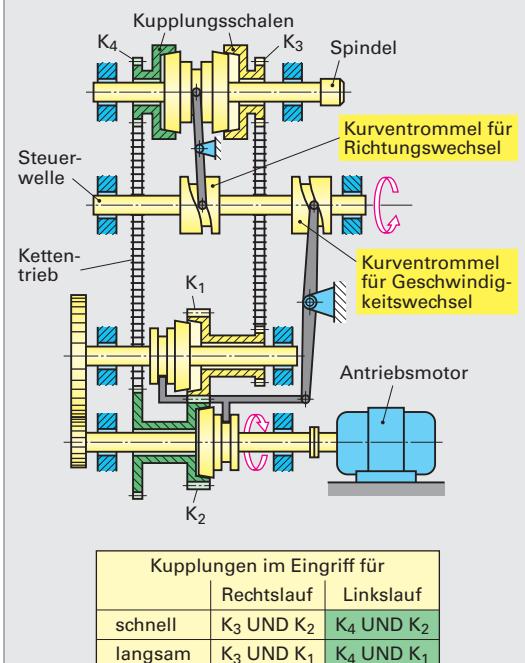


Bild 1: Drehzahl- und Drehrichtungssteuerung eines Stufenrädergetriebes

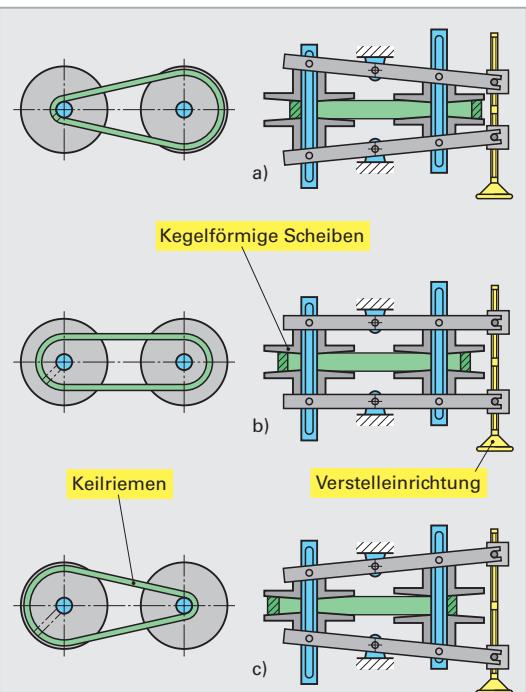


Bild 2: Umschlingungsgetriebe

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 zusammengezogen 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 Hebel-System 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**).

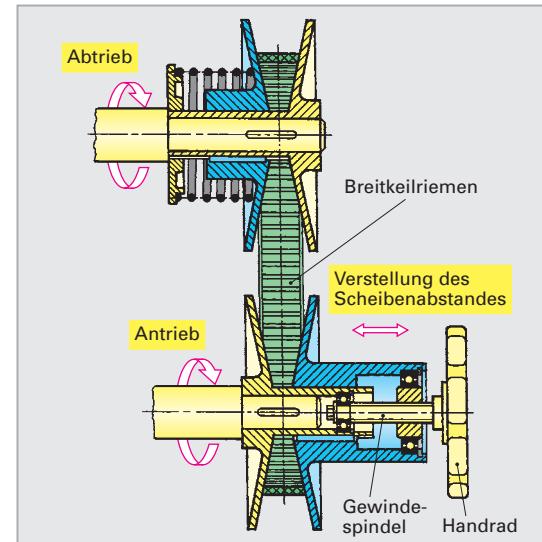


Bild 1: Drehzahlsteuerung durch Verstellen der Kegelscheiben

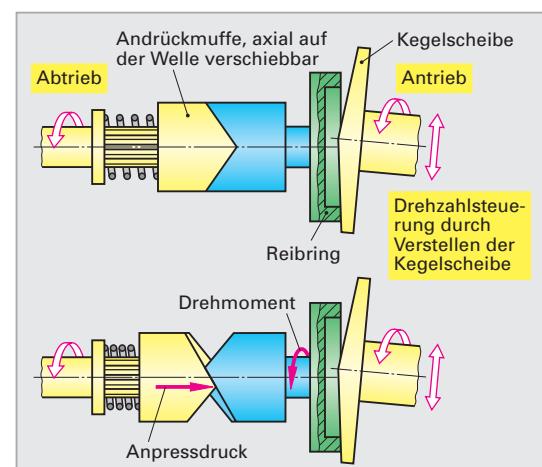


Bild 2: Reibradgetriebe mit Anpresseinrichtung

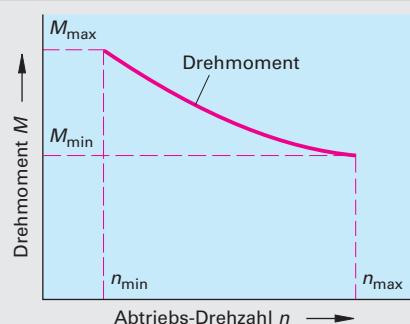


Bild 3: Kennlinie eines Reibradgetriebes

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 Flanschklemmung 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 Gewindespur vollständig vermieden werden.

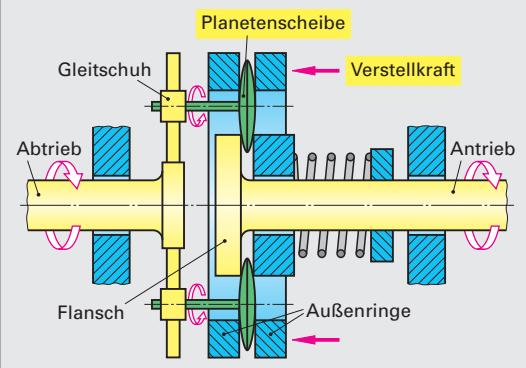


Bild 1: Planetenverstell-Getriebe

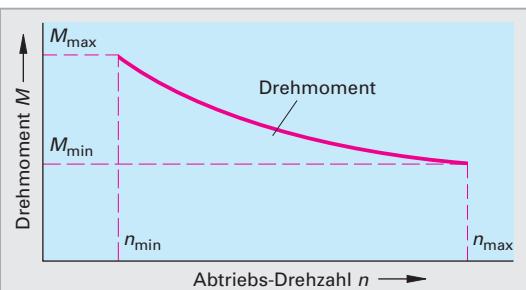


Bild 2: Kennlinie des Planetenverstell-Getriebes

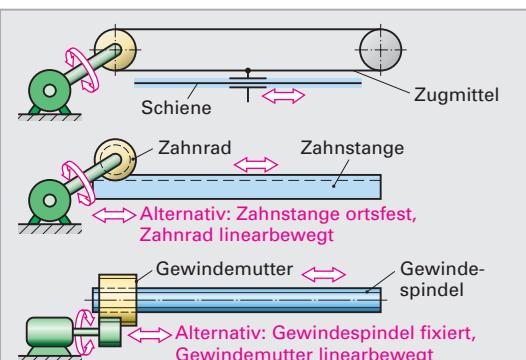


Bild 3: Umwandlung einer Drehbewegung in eine geradlinige Bewegung

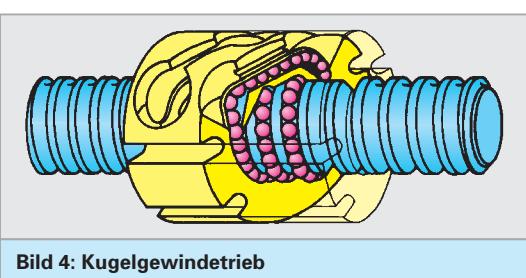


Bild 4: Kugelgewindetrieb