



Bibliothek des technischen Wissens

Dietmar Schmid

Hans Kaufmann

Bernhard Zippel

Alexander Pflug

Steuern und Regeln für Maschinenbau und Mechatronik

16., 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 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.

16. Auflage 2019

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 978-3-8085-1688-1

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

© 2019 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: mediaprint solutions GmbH, 33100 Paderborn

Vorwort zur 16. 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 **16. Auflage** wurde in allen Kapiteln aktualisiert. In die Übersicht zur 4. Industriellen Revolution wurden *MES (Manufacturing Execution System)* und *digitaler Zwilling* aufgenommen. Hervorzuheben sind die Erneuerungen in den Kapiteln: *Mechanische Steuerungen und Getriebe*, *SPS*, *Robotik* und *Kommunikationstechnik*.

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 und Getriebe**,
- **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 2019

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			
1.1	Steuern, Steuerung	7	3.6.3.1	Inkrementale Sensoren
1.1.1	Analoge, binäre und digitale Steuerungen	7	3.6.3.2	Codemaßstäbe und Winkelcodierer
1.1.2	Verknüpfungssteuerungen und Ablaufsteuerungen	9	3.6.3.3	Drehmelder (Resolver)
1.1.3	Verbindungsprogrammierte Steuerungen und speicher-programmierte Steuerungen	10	3.6.4	Sensoren zur Sicherheitstechnik
1.2	Regeln, Regelung	10	3.6.5	Störungen in Sensorleitungen
1.3	Leiten, Leitung	11	3.7	Gefährdungen und Schutzmaßnahmen
1.4	Entwicklungsphasen industrieller Technik	12	3.7.1	Berührungsschutz
1.5	Industrie 4.0	14	3.7.2	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
1.6	Cyber-Physische Systeme (CPS)	15	3.7.3	Elektrostatische Entladungen (ESD)
			3.7.4	Arbeitsschutzmaßnahmen im Rahmen der Fachaufsicht
				100
2	Mechanische Steuerungen und Getriebe		4	Pneumatik
2.1	Allgemeines	16	4.1	Aufbau einer Pneumatikanlage
2.2	Getriebe	17	4.2	Drucklufterzeugung
2.2.1	Schaltgetriebe	17	4.2.1	Verdichter (Kompressoren)
2.2.2	Stufenlos verstellbares Getriebe	18	4.2.2	Druckluftnetze
2.2.3	Reduziergetriebe als Drehmomentwandler	19	4.2.3	Druckluftaufbereitung
2.3	Getriebe für Linearbewegungen	20	4.3	Antriebsglieder
2.4	Ungleichförmiger Antrieb	21	4.3.1	Druckluftmotoren
2.5	Getriebe mit aussetzender Bewegung	23	4.3.2	Pneumatischer Muskel
			4.3.3	Balgantrieb
			4.3.4	Dreh- und Schwenkantriebe
			4.3.5	Druckluftzylinder
			4.3.5.1	Standardzylinder
			4.3.5.2	Sonderbauarten
			4.3.5.3	Zylinderkennwerte
			4.3.5.4	Zylinderberechnungen
3	Elektrische und elektronische Steuerungen		4.4	Ventile und Grundsteuerungen
3.1	Elektrische Kontaktsteuerungen	24	4.4.1	Darstellung der Ventile
3.1.1	Bauelemente und Betriebsmittel	24	4.4.2	Einteilung der Ventile
3.1.2	Darstellung und Schaltpläne	38	4.4.2.1	Wegeventile
3.1.3	Grundsaltungen	39	4.4.2.2	Stromventile
3.2	Elektronische Bauelemente	41	4.4.2.3	Sperrventile
3.3	Binäre und digitale Steuerungen	45	4.4.2.4	Druckventile und Absperrventile
3.3.1	Codierungen	45	4.4.2.5	Ventilinseln
3.3.1.1	Dualcode	45	4.5	Grafische Darstellung
3.3.1.2	BCD-Codes	46	4.5.1	Aufbau eines Schaltplans
3.3.1.3	Barcodes	46	4.5.2	Funktionsdiagramme
3.3.1.4	2D-Codes	46	4.5.2.1	Wegdiagramm
3.3.2	Digitale Speicher	47	4.5.2.2	Zustandsdiagramm
3.3.2.1	Mechanische Speicher	47	4.6	Proportionaltechnik
3.3.2.2	Magnetische Speicher	48	4.6.1	Proportional-Druckregelventile
3.3.2.3	Elektronische Speicher	49	4.6.2	Proportional-Wegeventile
3.3.3	Binäre Verknüpfungen	51	4.7	Pneumatische Positioniersysteme
3.3.4	Schaltalgebra	54	4.8	Beispiele pneumatischer Steuerungen
3.3.5	Kombinatorische Steuerungen	55	4.8.1	Wegplansteuerung einer Biegevorrichtung
3.3.6	Ablaufsteuerungen	60	4.8.2	Spannen von Werkstücken
3.3.6.1	Elektromechanische Ablaufsteuerungen	61	4.8.3	Beispiel: Werkstücke heben
3.3.6.2	Ablaufsteuerungen mit Kippgliedern (Flipflops)	61	4.9	Elektropneumatische Steuerungen
3.6.6.3	Zähler	64	4.9.1	Elektropneumatische Betriebsmittel
3.4	GRAFSET	67	4.9.2	Direkte und indirekte Steuerung
3.4.1	Schritte	68	4.9.3	Selbsthalteschaltung
3.4.2	Aktionen	69	4.9.4	Darstellung
3.4.3	Transitionen und Ablaufstrukturen	70	4.9.5	Stetigantrieb
3.4.4	Beispiel zu GRAFSET	72	4.9.6	Ablaufsteuerung
3.5	Wegdiagramm und Zustandsdiagramm	73		
3.6	Sensoren	74	5	Hydraulik
3.6.1	Allgemeines	74	5.1	Allgemeines
3.6.2	Analoge Sensoren	75	5.2	Physikalische Grundlagen
3.6.2.1	Wege, Winkel, Abstände und Dicken	75	5.2.1	Hydrostatik
3.6.2.2	Geschwindigkeiten und Drehzahlen	82	5.2.2	Hydrodynamik
3.6.2.3	Dehnungen, Kräfte, Drehmomente und Drücke	83	5.3	Hydraulikflüssigkeiten
3.6.2.4	Beschleunigungen	85		
3.6.2.5	Temperaturen	86		
3.6.3	Digitale Sensoren	88		

5.4	Aufbau hydraulischer Steuerungen	149	7.4.6	Funktionsbaustein für Schrittketten	231
5.4.1	Hydraulikpumpen	150	7.4.7	Funktionsbaustein für die Befehlsausgabe	232
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	Bedienen und Beobachten mit mobilen Endgeräten	242
5.8.1	Allgemeines	157	7.9	Kleinsteuerung LOGO!	244
5.8.2	Druckventile	158			
5.8.3	Wegeventile	161	8	Elektrische Antriebe	
5.8.4	Sperrventile	162	8.1	Einführung	248
5.8.5	Stromventile	163	8.2	Rechnerische Grundlagen	250
5.8.6	Ventilaufbauarten	166	8.3	Gleichstrommotoren (DC-Motoren)	253
5.8.7	Stetigventile	168	8.4	Drehstromasynchronmotor	255
5.8.8	Proportionalventiltechnik	169	8.4.1	Aufbau des Kurzschlussläufers	255
5.8.9	Servoventile	175	8.4.2	Das Drehfeld	256
			8.4.3	Funktionsweise	257
			8.4.4	Anlasssteuerungen	258
			8.4.5	Drehrichtungsumkehr	259
			8.4.6	Betriebsarten und Fahrprofile	259
			8.4.7	Drehzahlsteuerung und Drehzahlregelung	260
			8.4.7.1	Allgemeines und Einteilung	260
			8.4.7.2	U/f-Steuerung	261
			8.4.7.3	Vektorregelung	262
			8.5	Drehstromsynchronmotor	264
			8.5.1	Servoantriebe	264
			8.5.2	Direktantriebe	265
			8.5.2.1	Torque-Motoren	265
			8.5.2.2	Linearmotoren	267
			8.6	Schrittmotoren	267
			8.7	Lagerregelung (Positionierantriebe)	268
			8.7.1	Kaskadenregelung	268
			8.7.2	Geschwindigkeitsvorsteuerung	269
			8.7.3	Analoger und digitaler Drehzahlregelkreis	270
			9	Computergesteuerte Maschinen	
			9.1	CNC-Werkzeugmaschinen	271
			9.1.1	Der Produktionsprozess	271
			9.1.2	NC-Achsen und deren Steuerung	274
			9.1.3	CNC-Programmierung	276
			9.1.3.1	DIN-Programmierung	276
			9.1.3.2	Werkstatorientiertes Produzieren (WOP)	286
			9.1.4	Interpolation	288
			9.1.5	Leistungsfähigkeit	290
			9.1.6	Offene CNC-Steuerung	292
			9.2	3D-Druck – Additive Fertigungsverfahren	293
			9.2.1	Allgemeines	293
			9.2.2	AM-Verfahren	294
			9.2.3	Die Informationskette und die Prozesskette	296
			9.3	Robotertechnik	297
			9.3.1	Einteilung	297
			9.3.2	Der kinematische Aufbau	299
			9.3.2.1	Die RRR-Kinematik	302
			9.3.2.2	Der Gewichtsausgleich	303
			9.3.3	Greifer	304
			9.3.4	Roboterprogrammierung	305
			9.3.5	Die Bewegungserzeugung	307
			9.3.5.1	Koordinatensysteme	307
			9.3.5.2	Robotersteuerung	309
			9.3.5.3	Achsstellungen	310
6	Regelungstechnik				
6.1	Grundbegriffe	177			
6.2	Regelungsarten	178			
6.3	Regelkreisglieder	180			
6.3.1	Proportionalglied ohne Verzögerung (P-Glied)	180			
6.3.2	Proportionalglied mit Verzögerung				
1. Ordnung (P-T ₁ -Glied)		181			
6.3.3	Proportionalglied mit Verzögerung				
2. Ordnung (P-T ₂ -Glied), Schwingungsglied		182			
6.3.4	Integralglied (I-Glied)	185			
6.3.5	Differenzierglied (D-Glied)	186			
6.3.6	Totzeitglied (T _T -Glied)	186			
6.3.7	Zusammenwirken mehrerer Regelkreisglieder	188			
6.4	Regler und Regelkreise	189			
6.4.1	Schaltende Regler	189			
6.4.2	Analoge Regler	190			
6.4.3	Digitale Regler (Software-Regler)	192			
6.4.3.1	Digitalisierung und Signalabtastrung	192			
6.4.3.2	Regelungsalgorithmus	193			
6.4.4	Regelung von P-Strecken	196			
6.4.5	Regelung von I-Strecken	197			
6.4.6	Einstellen eines Reglers	198			
6.4.7	Selbstoptimierende Regler	199			
7	Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS)				
7.1	Aufbau und Funktionsweise	200			
7.2	Programmierung	203			
7.2.1	Programmiersprachen	203			
7.2.2	Programmaufbau	206			
7.3	Funktionen und Operationen	210			
7.3.1	Binäre Abfragen und Verknüpfungen	210			
7.3.2	SR/RS-Speicherfunktionen	213			
7.3.3	Flankenwertung	215			
7.3.4	Zeitfunktionen	216			
7.3.5	Zählfunktionen	218			
7.3.6	Arithmetische und numerische Funktionen	220			
7.3.7	Übertragungsfunktionen und Programmsteuerungsfunktionen	220			
7.3.8	Digitale Operationen	221			
7.4	Ablaufsteuerungen	223			
7.4.1	Gliederung und Darstellung	223			
7.4.2	Beispiel für eine Ablaufsteuerung	224			
7.4.3	Programmierung in Ablaufsprache	227			
7.4.4	Betriebsartensignale	229			
7.4.5	Funktionsbaustein für Betriebsarten	230			

9.3.5.4	Überschleifen und Pendeln	312	12.3.1	Energie-Monitoring	373
9.3.5.5	Robotersensorführung	313	12.3.2	Energiewertstrom	373
9.3.6	Kollaborierende Roboter	315	12.3.3	Lastmanagement	374
9.3.7	Schutzmaßnahmen	316	12.4	Energieeffiziente Geräte und Anlagen	375
10	Montagetechnik		13	Geschäftsprozesse	
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
10.2.5.5	Fahrerlose Transportsysteme (FTS)	326			
10.3	Fügen in der Montage	327	14	Arbeitsgestaltung und Arbeitsschutz	
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 und Abdichten (Sealen)	332	14.3.1	Arbeitsbelastung 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			
10.5	Montageorganisation	338	15	Informations- und Kommunikationstechnik	
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 PC	412
			15.1.4	Schaltplanerstellen mit FluidSIM®	417
			15.1.5	Steuern und Regeln mit FluidSIM®	418
11	Qualitätsmanagement		15.2	Kommunikationstechnik	419
11.1	Qualität	343	15.2.1	Lokale Kommunikation	419
11.1.1	Qualitätsmerkmale	344	15.2.2	Lokale Netze (LAN)	421
11.1.2	Fehler	344	15.2.3	Feldbussysteme	423
11.2	Ziele des Qualitätsmanagements	345	15.2.3.1	CAN-Bus	423
11.3	TQM – Total Quality Management	345	15.2.3.2	PROFIBUS, PROFIBUS-DP	424
11.4	Qualitätskreis und Qualitätspyramide	346	15.2.3.3	Aktor-Sensor-Interface (AS-i)	425
11.5	Aufbau und Elemente eines Qualitätsmanagementsystems	347	15.2.3.4	IO-Link	427
11.5.1	Aufbauorganisation	347	15.2.4	Serielle Schnittstelle (V.24)	428
11.5.2	Ablauforganisation	348			
11.5.3	DIN EN ISO 9000	348	16	Aufgaben und Übungen	
11.5.4	Zertifizierung	350	16.1	Aufgaben und Übungen zur Pneumatik	429
11.6	Statistische Qualitätslenkung	350	16.2	Aufgaben und Übungen zur Hydraulik	434
11.6.1	Prozessanalyse	351	16.3	Aufgaben und Übungen zu GRAFCET	436
11.6.2	Qualitätsregelkarten	353	16.4	Aufgaben und Übungen zur SPS	437
11.6.3	Maschinen- und Prozessfähigkeit	354	16.5	Aufgaben und Übungen zur Regelungstechnik	450
12	Instandhaltung und Energieeffizienz		16.6	Aufgaben und Übungen zu elektrischen Antrieben	452
12.1	Instandhaltung	355	16.7	Aufgaben und Übungen zur CNC-Technik	453
12.1.1	Begriffe	355			
12.1.2	Wartung	358			
12.1.3	Inspektion	362			
12.1.4	Instandsetzung	364			
12.1.5	Inbetriebnahme	365			
12.1.6	Fehlersuche	367			
12.1.7	Reparatur	368			
12.2	Condition-Monitoring (Zustandsbedingte Instandhaltung)	369			
12.3	Energieeffizienz	373			
				Sachwortverzeichnis	454
				Quellenverzeichnis	463

1 Einführung

Damit Maschinen und Anlagen selbsttätig, also automatisch, arbeiten können, werden sie mit Steuerungs-, Regelungs- und Leitechniken 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 Leitechnik, Steuerungstechnik und Regelungstechnik sind in DIN IEC 60 050-351 „Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351: Leitechnik“ 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.

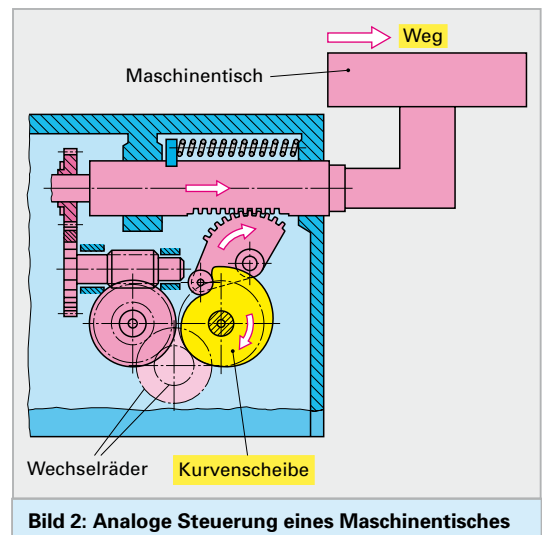
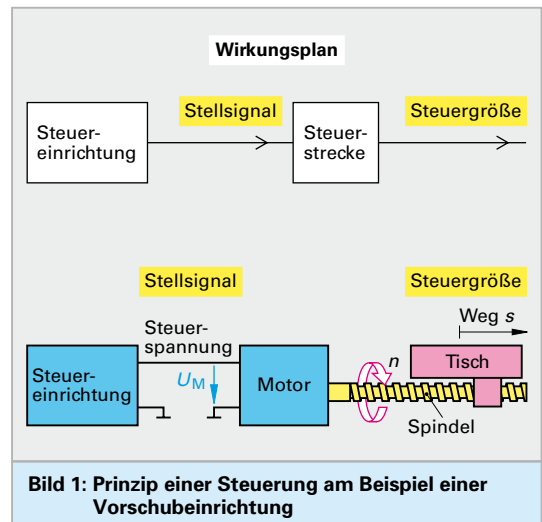
1.1.1 Analoge, binäre und digitale Steuerungen

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.

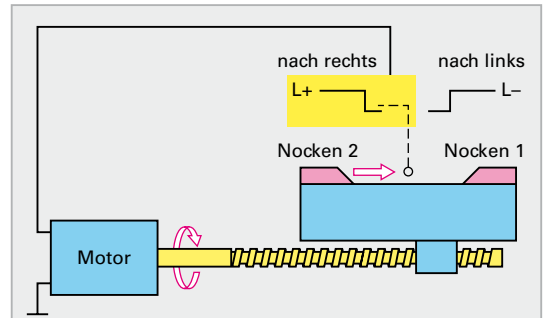


Bild 1: Binäre Steuerung eines Vorschubantriebs (Pendeln)

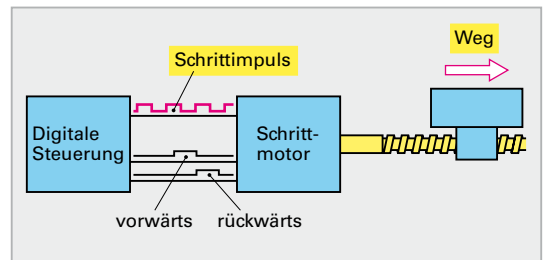


Bild 2: Digitale Vorschubsteuerung mit Schrittmotor

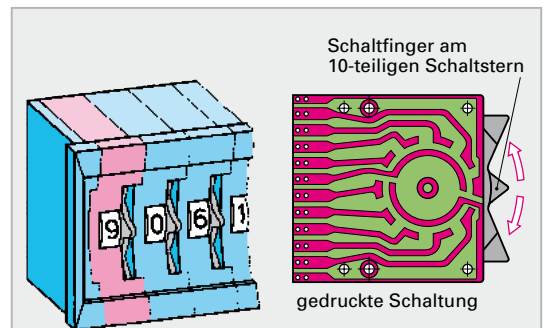


Bild 3: Vorwahlschalter

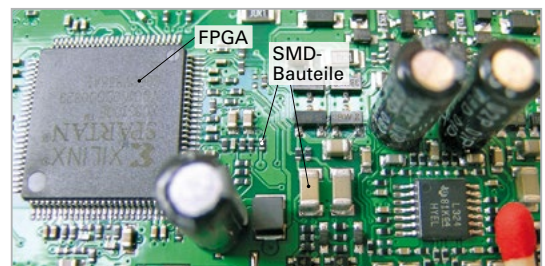


Bild 4: Digitalbaugruppe mit FPGA

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.

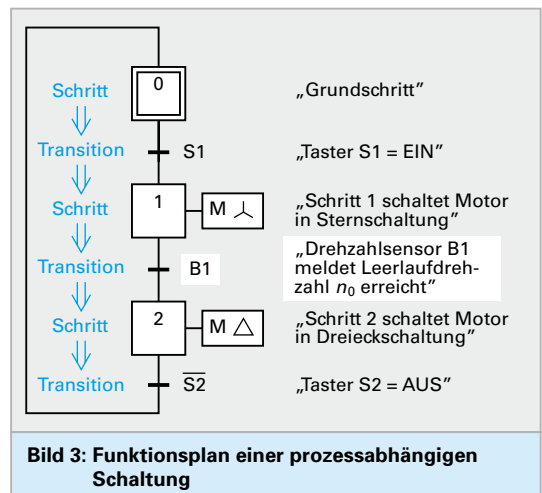
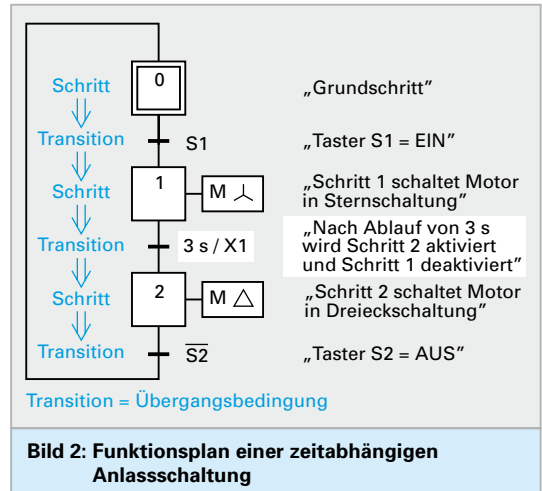
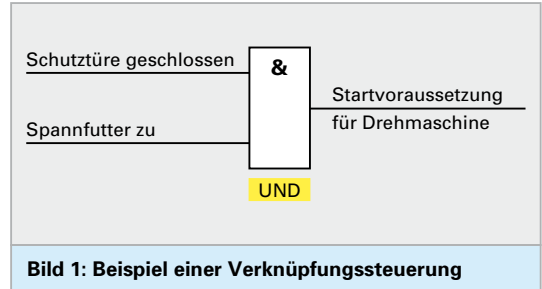
Bei **Ablaufsteuerungen** werden die Steuerungsvorgänge schrittweise ausgelöst. Das Weiterschalten von einem Schritt zum nächsten erfolgt entweder zeitabhängig oder prozessabhängig.

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

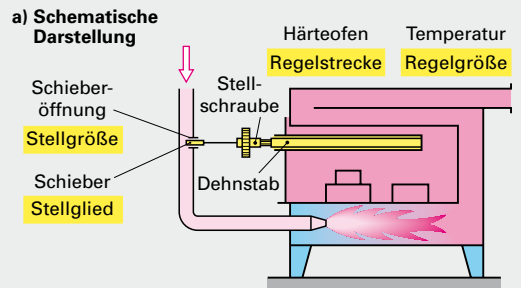
³ RAM von Random Access Memory = Speicher mit wahlfreiem Zugriff

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.



b) Wirkungsplan

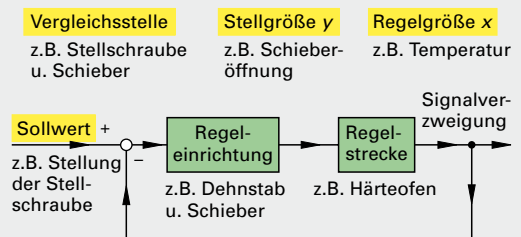


Bild 1: Historische Regelung eines Härteofens

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.

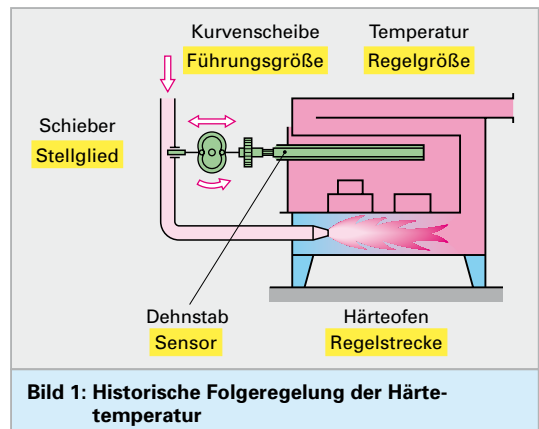


Bild 2: Leitwarte für Getriebeprüfstand

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.

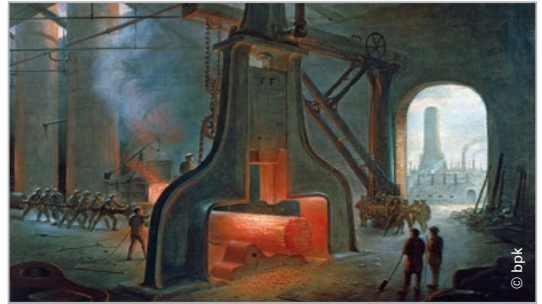


Bild 1: Dampfhammer (1839) von James Nasmyth¹

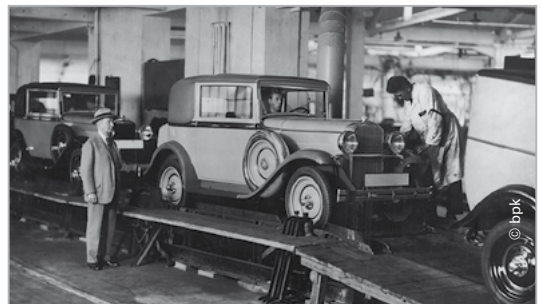


Bild 2: Der 10 000. Opel läuft vom Band (1931)

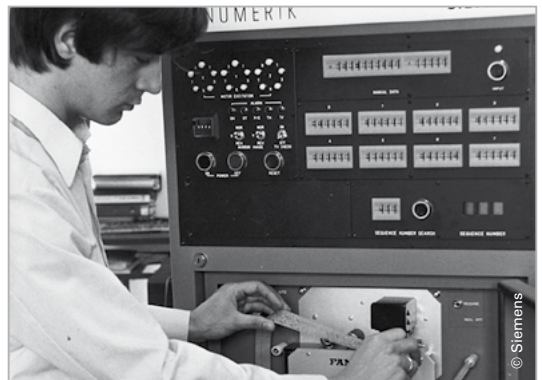


Bild 3: NC-Steuerung mit Lochstreifeneingabe (1970)



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 entfernt ablaufender Prozesse. Die Vernetzung von physikalisch-technischen Systemen mit virtuellen, nämlich programmierten Prozessen wird zum „Internet der Dinge und Dienste“ (Internet of Things, IoT) und kennzeichnet die vierte industrielle Revolution.

Der Digitale Zwilling

Der digitale Zwilling, engl. digital twin (**Bild 1**) ist ein digitales mathematisches Modell als Abbild eines realen Gebildes, z. B. eines Roboters aus der realen Welt mit dessen Eigenschaften. Das digitale Modell beschreibt nicht nur die äußere Gestalt oder die Einzelbauteile bezüglich Geometrie und Werkstoff, sondern auch das Betriebsverhalten, z. B. Beschleunigungen, Bremszeiten, Kräfte, also das Produkt in sehr realistischer und umfassender

Weise (siehe auch S. 306). Durch Algorithmen² z. B. zu Verschleiß, zu Alterung u. v. m. stellt der digitale Zwilling das reale Produkt während seiner Lebensphase dar. Der digitale Zwilling wird anhand von realen Sensordaten und Betriebszeiten laufend aktualisiert und die beschreibenden Algorithmen werden selbstlernend weiterentwickelt.

Gefahren bei Industrie 4.0

Steuerungsgeräte von Produktionsmaschinen (SPS) waren lange Zeit eine eigene Welt mit eigener, firmenspezifischer Software und Hardware. 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 Malware³ (Schadprogramme), welche darauf ausgerichtet sind, Zerstörungen anzurichten und Unheil zu bringen.

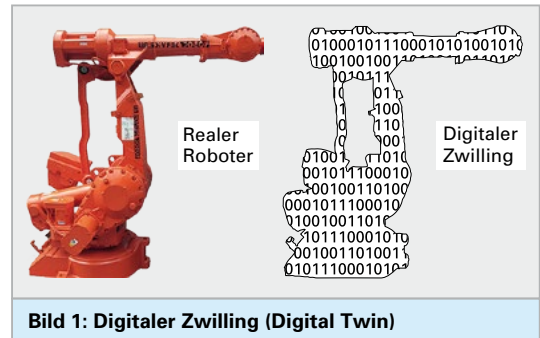


Bild 1: Digitaler Zwilling (Digital Twin)

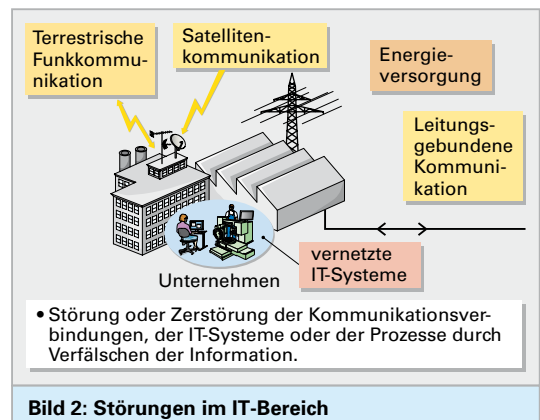


Bild 2: Störungen im IT-Bereich

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

² Algorithmus = Handlungsanweisung z. B. in Form eines Computerprogramms

³ 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):

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.

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

- Wandlungsfähigkeit,
- Ergonomie und
- Ressourceneffizienz,
- 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 kommunizieren untereinander und mit übergeordneten Organisationseinheiten (**Bild 1**).

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

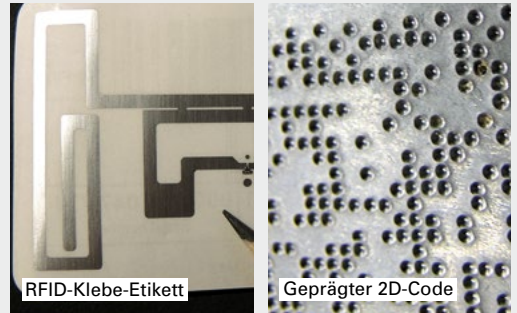


Bild 2: Produktkennung

¹ engl. smart = geschickt

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

³ engl. embedded = eingebettet

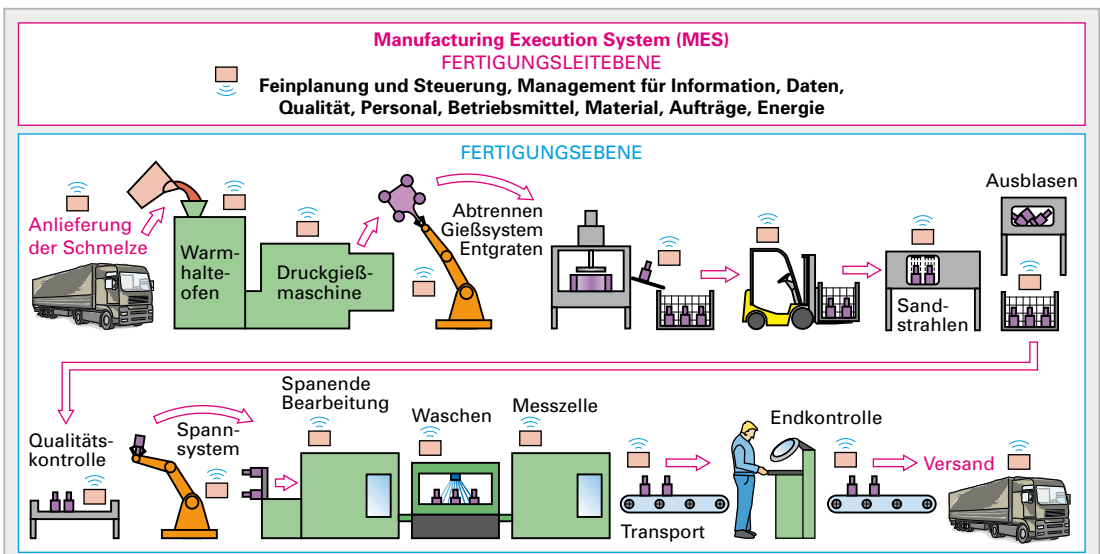


Bild 1: Industrie 4.0 mit Beispiel Gießereibetrieb

1.6 Cyber-Physische Systeme (CPS)

Eine zunehmende Bedeutung haben **Cyber-Physical-Systems**¹ (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.

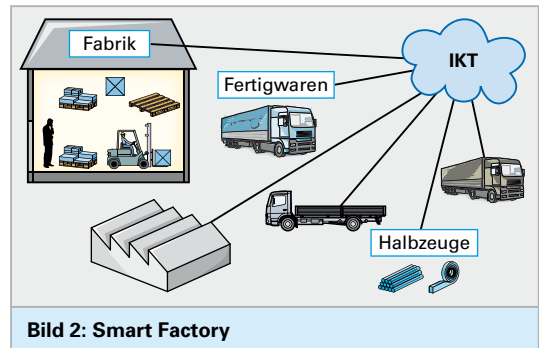
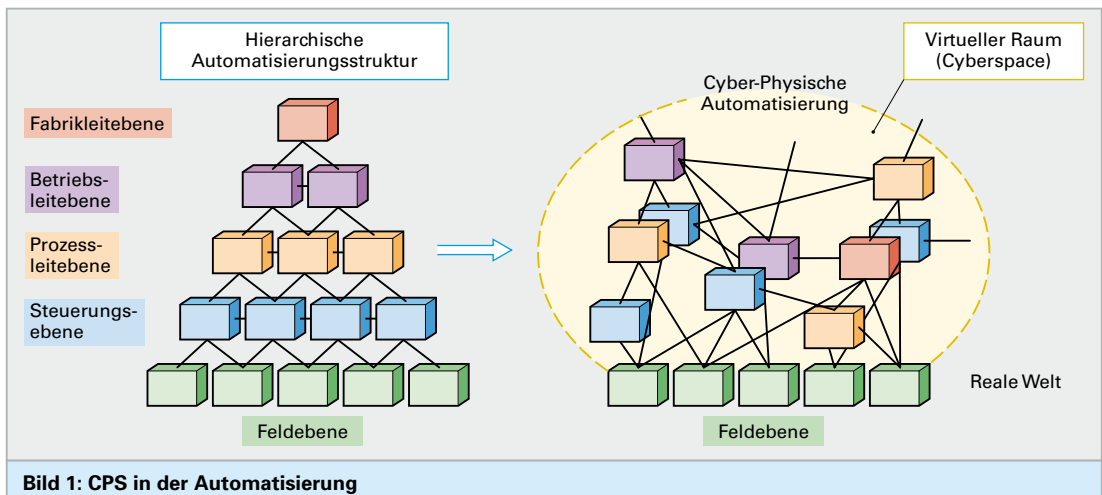


Bild 3: Immersion in eine virtuelle 3D-Umgebung

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



2 Mechanische Steuerungen und Getriebe

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 Roboterarme werden über Reduziergetriebe bewegt. 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.

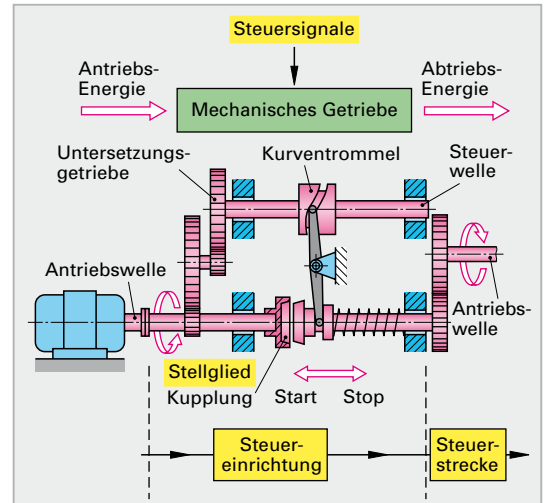


Bild 1: Beispiel einer mechanischen Steuerung

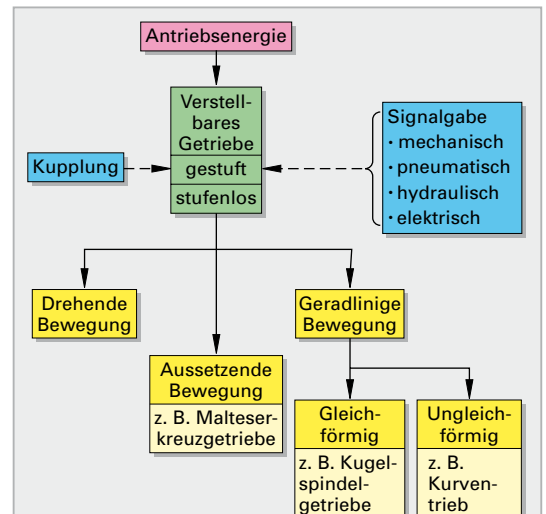


Bild 2: Aufbau mechanischer Steuerungen

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.

2.2 Getriebe

Die Eingangsleistung an der Antriebswelle des Getriebes ist in vielen Fällen gleich der Maximalleistung des Motors und damit konstant. Bei konstanter Leistung steht das Drehmoment M am Getriebeausgang in umgekehrtem Verhältnis zur erzeugten 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.

Mit verstellbaren mechanischen Getrieben werden die Drehrichtung, Drehzahlen und Drehmomente gesteuert. Bei hohen Drehzahlen ist das Drehmoment klein, bei niederen Drehzahlen groß.

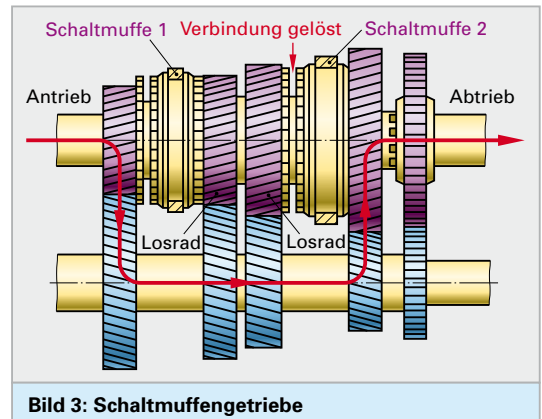
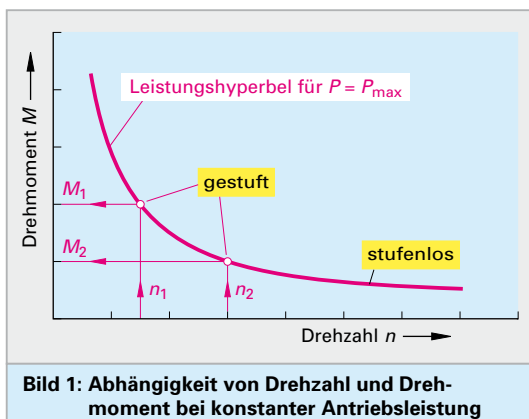
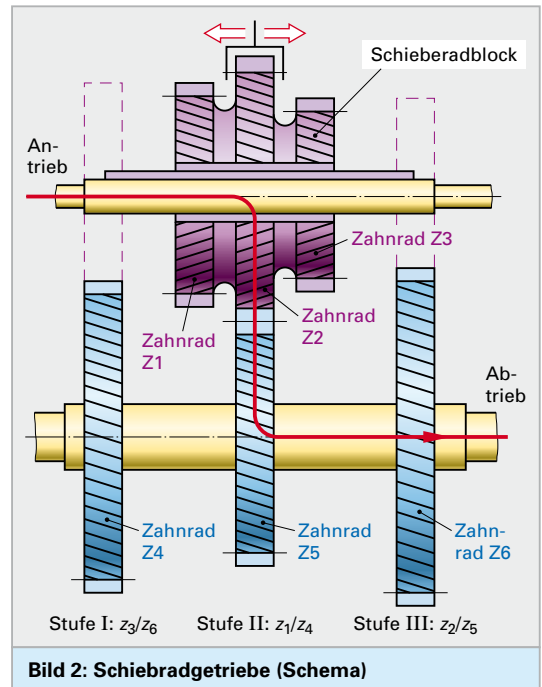
Im Unterschied hierzu ist bei elektrischen Servoantrieben (mit elektrisch stufenlos stellbarer Drehzahl) das Dauerdrehmoment durch den Nennstrom begrenzt. D. h. der Servoantrieb liefert im Unterschied zum Getriebe bei Verkleinerung der Drehzahl keine Erhöhung des Drehmoments.

2.2.1 Schaltgetriebe

Schaltgetriebe benötigt man zur Drehzahlanpassung oder Drehmomentanpassung, wenn von Seiten des Motors dies nicht abgedeckt werden kann, z. B. beim Kraftfahrzeug. Schieberadgetriebe (**Bild 2**) sind die einfachsten schaltbaren Zahnradgetriebe. Hier werden auf einer Schaltwelle Schieberäder so verschoben, dass unterschiedliche Zahnradpaarungen mit den auf einer Vorgelegewelle platzierten Zahnradern ermöglicht werden.

Anwendungen für Schieberadgetriebe sind z. B. Drehmaschinen.

Schaltmuffengetriebe (Bild 3) sind in ihrem Aufbau den Schieberadgetrieben sehr ähnlich. Allerdings sind hier alle Zahnradpaare stets im Eingriff und laufen permanent mit. Hierzu werden die Gangräder der Schaltwelle drehbar gelagert und nur das geschaltete Gangrad zur momentanen Kraftübertragung wird formschlüssig über eine Schaltmuffe mit der Schaltwelle verbunden. Schaltmuffengetriebe findet man z. B. bei Kraftfahrzeugen.

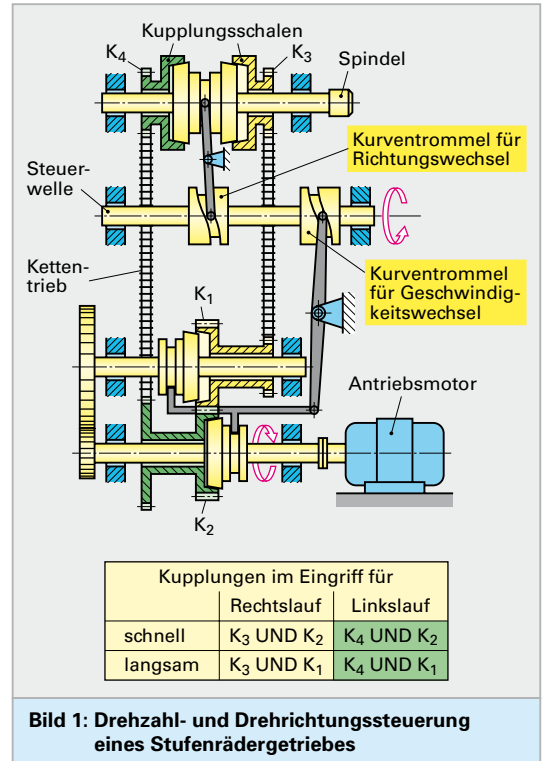


Stufenrädergetriebe

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.



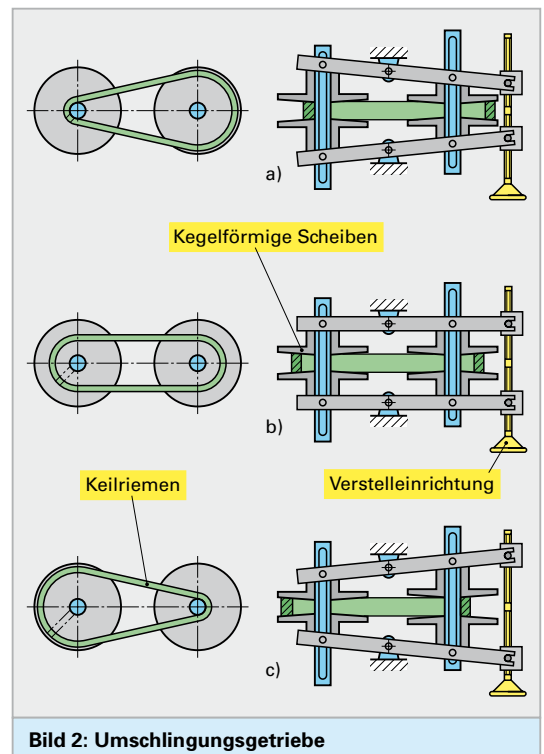
2.2.2 Stufenlos verstellbares Getriebe

Bei stufenlosen Getrieben verändert man das Verhältnis der wirksamen Radien von Antriebsrad zu Abtriebsrad. In **Bild 2** ist das dargestellt am Beispiel eines Umschlingungsgetriebes mit Keilriemen.

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 Kettengeschwindigkeit und zu übertragender Leistung **Lamellenketten**, **Rollenketten** und **Wiedruckstück-Ketten**.



2.2.3 Reduziergetriebe als Drehmomentwandler

Getriebe dienen häufig als Drehmomentwandler. So kann man eingangsseitig mit kleinem Antriebsdrehmoment M_1 (und hoher Drehzahl n_1) ein großes Abtriebsdrehmoment M_2 (bei kleiner Drehzahl n_2) erzeugen. Es gilt:

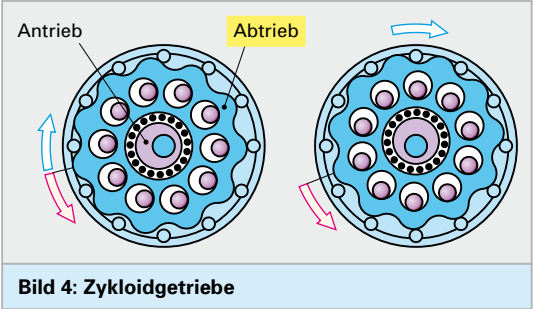
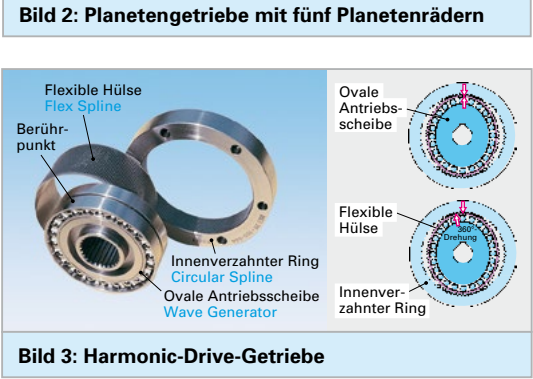
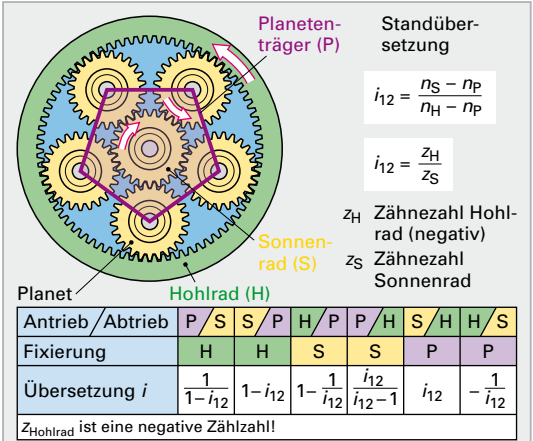
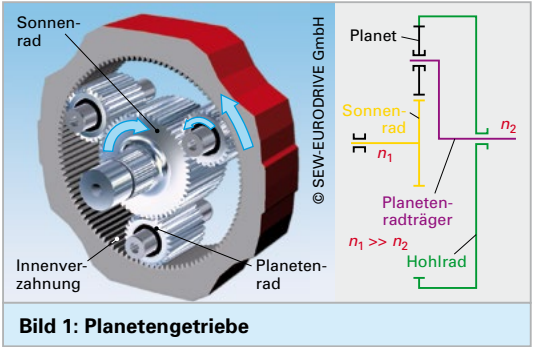
$\frac{M_2}{M_1} = \frac{n_1}{n_2}$ Die Getriebeübersetzung i ist kleiner 1

Getriebe mit hoher Untersetzung sind *Planetenradgetriebe*, *Harmonic-Drive-Getriebe* und *Zykloidgetriebe*. Die Drehmomentwandlung nützt man z. B. bei Robotern zur Armbewegung, bei Jalousieantrieben und bei Stellantrieben in der Verfahrenstechnik.

Planetengetriebe sind Umlaufrädergetriebe bei denen die Planetenzahnräder, auf Kreisbahnen im Getriebegehäuse umlaufen. Sie umkreisen dabei ein zentrales Rad, das Sonnenrad (**Bild 1**). So bezeichnet man sie auch als Planetengetriebe. Die Anzahl der Planetenräder liegt meist zwischen drei und fünf (**Bild 2**). Die Vorteile der Planetengetriebe sind: Geringer Platzbedarf, die koaxiale Lage von Eintrieb und Abtrieb, die hohen Übersetzungsverhältnisse (bis 12 ins Langsame) und die kleinen Schwungmassen.

Das **Harmonic-Drive-Getriebe** (**Bild 2**) besteht aus einer ovalen Antriebsscheibe, die, über Kugeln geführt, eine flexible außenverzahnte Hülse (Flex Spline) in einen innenverzahnten feststehenden Ring presst (**Bild 3**). Durch die ovale Form der Antriebsscheibe (Wave Generator) berührt die flexible außenverzahnte Hülse den feststehenden innenverzahnten Ring nur an 2 gegenüberliegenden Punkten (**Bild 4**). Die Zähnezahl der außenverzahnten Hülse ist z. B. um 2 Zähne kleiner als die Zähnezahl des innenverzahnten Außenrings. Beträgt die Zähnezahl der außenverzahnten Hülse z. B. 200 und die des innenverzahnten Außenrings 202, dann wird beim Abwälzen der Hülse auf dem Ring bei einer Umdrehung der ovalen Antriebsscheibe die Hülse um 2 Zähne, also um 1/100 einer Umdrehung, gedreht. Das Übersetzungsverhältnis beträgt also $i = 0,01$. Harmonic-Drive-Getriebe sind sehr einfach aufgebaut, sind leicht, haben einen guten Wirkungsgrad (besser als 80 %), sind spielfrei und beanspruchen nur einen sehr kleinen Einbauraum.

Beim Zykloidgetriebe (**Bild 5**) wälzt sich die exzentrisch gelagerte, innere Wellenscheibe über eine Rollenunterstützung auf der Innenseite der äußeren Wellenscheibe ab. Die innere Scheibe führt bei der Drehbewegung eine *zykloidische* Pendelbewegung aus. Da die innere Scheibe einen geringeren wirksamen Radius hat, entsteht eine Relativdrehzahl hoher Untersetzung zwischen $i = 1 : 9$ bis $1 : 71$ bei *einstufigen* Getrieben. *Zweistufige* Getriebe ermöglichen Übersetzungsverhältnisse von $1 : 9 \times 9$ bis $1 : 71 \times 71$. Die Zykloidgetriebe zeichnen sich durch besonders hohe Belastbarkeit, Drehsteifigkeit, geringes Spiel und einem sehr hohen Wirkungsgrad (besser als 95 %) aus.



2.3 Getriebe für Linearbewegungen

Zur Umsetzung von Drehbewegungen in translatorische Arbeitsbewegungen verwendet man prinzipiell dieselben Techniken wie bei den rotatorischen Getrieben (**Bild 1**):

- Zugmittel (Seile, Bänder, Zahnriemen), gepaart mit Rädern,
- Zahnräder gepaart mit Zahnstangen,
- Schraubengewinde (-spindeln) gepaart mit Schraubenmuttern,

Lineare Zugmittelgetriebe. Neben Seilzügen und Ketten kommen bei Maschinen und Anlagen vor allem Zahnriemen (**Bild 2**), zur Anwendung. Der Zahnriemen umschlingt, über Leitrollen geführt, das Antriebsritzel zu etwa 300°. Auf diese Weise können in Verbindung mit Führungsschienen fast beliebig lange Lineareinheiten gebaut werden. Hohe Steifigkeiten und entsprechend hohe Messgenauigkeiten bei einer Wegmessung über das Antriebsritzel erreicht man mit „Breitzahnriemen“ mit innerer Stahlilitzenverstärkung. Mit Flachriemen, Bändern bzw. Gurten realisiert man vielfach Förderantriebe, z. B. die Doppelgurtförderer bei Montagesystemen.

Zahnstange-Ritzel-Trieb. Mit Zahnstange und Ritzel können sehr steif bauende und durch fortlaufendes Aneinandersetzen der Zahnstangen beliebig lange Getriebestrecken (Zahnradbahn) hergestellt werden. Wir finden solche Getriebe (**Bild 3**) z. B. als Präzisionsgetriebe bei Werkzeugmaschinen. Hier werden Schrägverzahnungen, vergleichbar mit den schrägverzahnten Getrieben, verwendet. Sie ermöglichen eine geräuscharme gleichförmige Vorschubbewegung. Etwaiges Spiel vermeidet ein doppeltes und gegeneinander federelastisch vorgespanntes Ritzel.

Gewindetrieb. Bewegungsschrauben für Linearbewegungen sind als Spindeln mit Trapezgewinde bei einfachen Maschinen und Gerätekomponenten, z. B. bei Schraubstöcken und zur Handverstellung an einfachen Werkzeugmaschinen üblich. Beim Kugelgewindetrieb liegt eine Wälzlagerung der Gewindemutter vor. Bei einer Relativbewegung zwischen Spindel und Spindelmutter rollen die Kugeln im Gewindegang. Am Ende der Mutter werden sie über ein Umlenkstück um einen Gewindegang oder über einen Rückkanal an den Gewindeanfang der Kugelmutter zurückgeführt (**Bild 4**). Die Gewindeoberflächen sind entsprechend wie die Laufflächen bei Kugellagern gehärtet und geschliffen oder feingewalzt. Die Spindelsteigungen sind meist größer als 5 mm. So erreichen die Kugeln einen hinreichend großen Durchmesser um die Flächenpressung in zulässigen Grenzen zu halten.

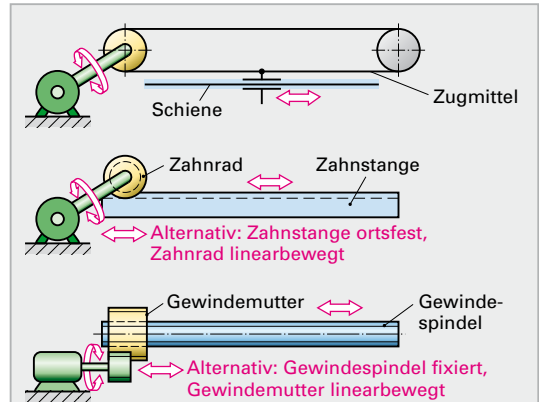


Bild 1: Getriebe für Linearbewegungen

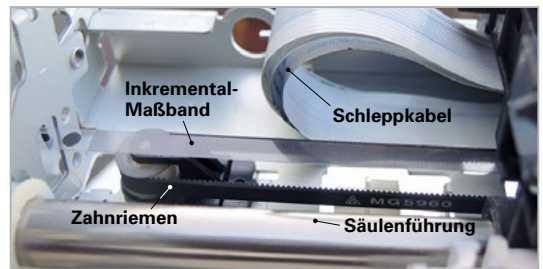


Bild 2: Zahnriementrieb

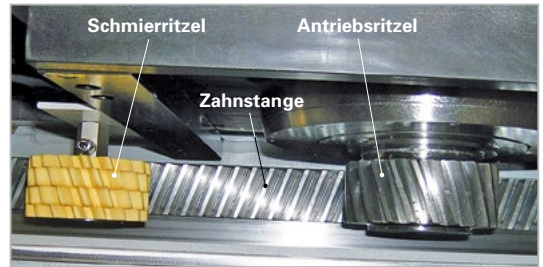


Bild 3: Zahnstangentrieb

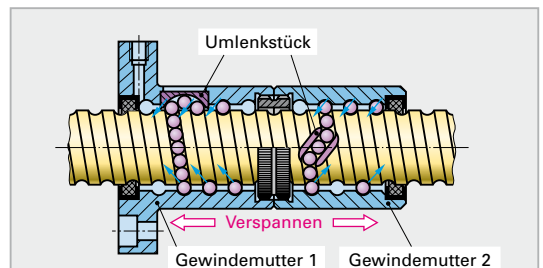


Bild 4: Kugelgewindetrieb