



Bibliothek des technischen Wissens

Dietmar Schmid

Hans Kaufmann

Alexander Pflug

Steuern und Regeln für Maschinenbau und Mechatronik

17., überarbeitete und erweiterte Auflage

Bearbeitet von Lehrern und Ingenieuren (s. Rückseite)

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL • Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsseldorfer 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
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.

17. Auflage 2023

Druck 5 4 3 2 1

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

ISBN 978-3-7585-1411-1

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

© 2023 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
www.europa-lehrmittel.de

Satz: Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpar

Umschlag: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald

Umschlagfotos: Prof. Schmid und Autorenkreis

Druck: LD Medienhaus GmbH & Co. KG, 44149 Dortmund

Vorwort zur 17. Auflage

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

Die **17. Auflage** wurde erweitert und in allen Kapiteln mit Blick auf **Industrie 4.0** aktualisiert.

Die neu gefassten Kapitel dieser Auflage sind:

- **Kapitel 4: Sensoren und Sensorsysteme.** Dieses Kapitel erweitert den bisherigen Abschnitt „Sensoren“ um die komplexen Sensorsysteme der Sonar-, Radar- und Röntgentechnik, sowie um die Sensormikrosysteme der MEMS-Technologie.
- **Kapitel 11: Materialflussautomatisierung.** Der Materialfluss ist das am meisten ins Auge fallende Kennzeichen der **Industrie 4.0.**, wenn Produkte sich nämlich, wie von Geisterhand gesteuert, selbsttätig und zielgerichtet von einer Station zur anderen bewegen. Dem wird mit den Verfahren des Materialförderns, des Speicherns, Magazinierens, Sortierens und Verkettens Rechnung getragen.
- **Kapitel 12: Montageautomatisierung.** Dieses Kapitel umfasst jetzt alle gängigen Fügeverfahren, die in der **Fertigungsautomatisierung** genutzt werden. Es schließt mit einem Fallbeispiel aus der Automobilbranche, einer typischen Anwendung der **Industrie 4.0.**

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 die **Meister- und Technikerausbildung**, für den Unterricht im **Technischen Gymnasium** und im **Berufskolleg**, aber auch als praktische Ergänzung für **Studierende** an **Hochschulen**. Ebenso wird das Buch in der **beruflichen Praxis**, für alle, 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 | • Computergesteuerte Maschinen |
| • Mechanische Steuerungen und Getriebe | • Materialflussautomatisierung |
| • Elektrische und elektronische Steuerungen | • Montageautomatisierung |
| • Sensoren und Sensorsysteme | • Qualitätsmanagement |
| • Pneumatik | • Instandhaltung und Energieeffizienz |
| • Hydraulik | • Geschäftsprozesse |
| • Regelungstechnik | • Arbeitsgestaltung und Arbeitsschutz |
| • Speicherprogrammierte Steuerungen (SPS) | • Informations- und Kommunikationstechnik |
| • Elektrische Antriebe | • Aufgaben und Übungen. |

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.

In der **EUROPATHEK** (siehe vordere Umschlaginnenseite) stehen digitale Zusatzmaterialien zur Verfügung: Neben den Lösungen zu den Aufgaben enthalten die Zusatzmaterialien wichtige Gesetzestexte und ein Repetitorium mit Wiederholungsfragen zur abschnittswisen Lernkontrolle.

Wenn Sie mithelfen möchten, dieses Buch für die kommenden Auflagen zu verbessern, schreiben Sie uns unter lektorat@europa-lehrmittel.de. Ihre Hinweise und Verbesserungsvorschläge nehmen wir gern auf.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung			
1.1	Steuern, Steuerung	7	4.2.4	Temperaturen
1.1.1	Analoge, binäre und digitale Steuerungen	7	4.2.5	Sensoren für Strömungen
1.1.2	Verknüpfungssteuerungen und Ablaufsteuerungen	9	4.3	Digitale Sensoren
1.1.3	Verbindungsprogrammierte Steuerungen und speicherprogrammierte Steuerungen	10	4.3.1	Inkrementale Sensoren
1.2	Regeln, Regelung	10	4.3.2	Codemaßstäbe und Winkelcodierer
1.3	Leiten, Leitung	11	4.3.3	Drehmelder (Resolver)
1.4	Entwicklungsphasen industrieller Technik	12	4.4	Sensorsysteme der Sicherheitstechnik
1.5	Industrie 4.0	14	4.5	Störungen in Sensorleitungen
1.6	Cyber-Physische Systeme (CPS)	15		
2	Mechanische Steuerungen und Getriebe		5	Pneumatik
2.1	Allgemeines	16	5.1	Aufbau einer Pneumatikanlage
2.2	Getriebe	17	5.2	Drucklufterzeugung
2.2.1	Schaltgetriebe	17	5.2.1	Verdichter (Kompressoren)
2.2.2	Stufenlos verstellbares Getriebe	18	5.2.2	Druckluftnetze
2.2.3	Reduziergetriebe als Drehmomentwandler	19	5.2.3	Druckluftaufbereitung
2.3	Getriebe für Linearbewegungen	20	5.3	Antriebsglieder
2.4	Ungleichförmiger Antrieb	21	5.3.1	Druckluftmotoren
			5.3.2	Pneumatischer Muskel
			5.3.3	Balgantrieb
			5.3.4	Dreh- und Schwenkantriebe
			5.3.5	Druckluftzylinder
			5.3.5.1	Standardzylinder
			5.3.5.2	Sonderbauarten
			5.3.5.3	Zylinderkennwerte
			5.3.5.4	Zylinderberechnungen
			5.3.5.5	Vakuumtechnik
			5.4	Ventile und Grundsteuerungen
			5.4.1	Darstellung der Ventile
			5.4.2	Einteilung der Ventile
			5.4.2.1	Wegeventile
			5.4.2.2	Stromventile
			5.4.2.3	Sperrventile
			5.4.2.4	Druckventile und Absperrventile
			5.4.2.5	Ventilinseln
			5.5	Grafische Darstellung
			5.5.1	Aufbau eines Schaltplans
			5.5.2	Funktionsdiagramme
			5.5.2.1	Wegdiagramm
			5.5.2.2	Zustandsdiagramm
			5.6	Proportionaltechnik
			5.6.1	Proportional-Druckregelventile
			5.6.2	Proportional-Wegeventile
			5.7	Pneumatische Positioniersysteme
			5.8	Beispiele für pneumatische Steuerungen
			5.9	Elektropneumatische Steuerungen
			5.9.1	Elektropneumatische Betriebsmittel
			5.9.2	Direkte und indirekte Steuerung
			5.9.3	Selbsthalteschaltung
			5.9.4	Darstellung
			5.9.5	Stetigantrieb
			5.9.6	Ablaufsteuerung
3	Elektrische und elektronische Steuerungen		6	Hydraulik
3.1	Elektrische Kontaktsteuerungen	23	6.1	Allgemeines
3.1.1	Bauelemente und Betriebsmittel	23	6.2	Physikalische Eigenschaften
3.1.2	Grundschaltungen	38	6.2.1	Hydrostatik
3.2	Elektronische Bauelemente	40	6.2.2	Hydrodynamik
3.3	Binäre und digitale Steuerungen	44	6.3	Hydraulikflüssigkeiten
3.3.1	Codierungen	44	6.4	Aufbau hydraulischer Steuerungen
3.3.2	Digitale Speicher	46	6.4.1	Hydraulikpumpen
3.3.2.1	Mechanische Speicher	46	6.4.1.1	Zahnradpumpen
3.3.2.2	Magnetische Speicher	47	6.4.1.2	Kolbenpumpen
3.3.2.3	Elektronische Speicher	48	6.4.1.3	Flügelzellenpumpe
3.3.3	Binäre Verknüpfungen	50	6.5	Hydraulikspeicher
3.3.4	Schaltalgebra	53		
3.3.5	Kombinatorische Steuerungen	54		
3.3.6	Ablaufsteuerungen	57		
3.3.6.1	Elektromechanische Ablaufsteuerungen	58		
3.3.6.2	Ablaufsteuerungen mit Kippgliedern (Flipflops)	58		
3.3.6.3	Zähler	61		
3.4	GRAFCET	64		
3.4.1	Schritte	65		
3.4.2	Aktionen	66		
3.4.3	Transitionen und Ablaufstrukturen	67		
3.4.4	Beispiel zu GRAFCET	69		
3.5	Wegdiagramm und Zustandsdiagramm	70		
3.6	Gefährdungen und Schutzmaßnahmen	71		
3.6.1	Berührungsschutz	71		
3.6.2	Elektrostatische Entladungen (ESD)	72		
3.6.3	Arbeitsschutzmaßnahmen im Rahmen der Fachaufsicht	72		
3.6.4	Erdung und Potenzialausgleich	73		
3.6.5	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	74		
4	Sensoren und Sensorsysteme			
4.1	Allgemeines	76		
4.2	Analoge Sensoren	77		
4.2.1	Wege, Winkel, Abstände und geometrische Strukturen	77		
4.2.2	Dehnungen, Kräfte, Drehmomente und Drücke	89		
4.2.3	Beschleunigungen und Geschwindigkeiten	91		

6.6	Antriebsselemente	156	8.6	Programmieren mit strukturiertem Text (ST)	239
6.6.1	Hydraulikzylinder	156	8.6.1	Digitale Regelung	239
6.6.2	Hydraulikmotoren	157	8.6.2	Zweipunktreger	240
6.7	Hydraulikventile	159	8.6.3	PID-Reglerbaustein	241
6.7.1	Allgemeines	159	8.7	Bedienen und Beobachten von Produktionsprozessen	243
6.7.2	Druckventile	160	8.8	Bedienen und Beobachten mit mobilen Endgeräten	244
6.7.3	Wegeventile	163	8.9	Kleinsteuerung LOGO!	246
6.7.4	Sperrventile	164			
6.7.5	Stromventile	165	9	Elektrische Antriebe und Aktoren	
6.7.6	Ventilaufbauarten	168	9.1	Einführung	250
6.7.7	Stetigventile	170	9.2	Rechnerische Grundlagen	252
6.7.8	Proportionalventiltechnik	171	9.3	Gleichstrommotoren (DC-Motoren)	255
6.7.9	Servoventile	177	9.4	Drehstromasynchronmotor	257
7	Regelungstechnik		9.4.1	Aufbau des Kurzschlussläufers	257
7.1	Grundbegriffe	179	9.4.2	Das Drehfeld	258
7.2	Regelungsarten	180	9.4.3	Funktionsweise	259
7.3	Regelkreisglieder	182	9.4.4	Anlasssteuerungen	260
7.3.1	Proportionalglied ohne Verzögerung (P-Glied)	182	9.4.5	Drehrichtungsumkehr	261
7.3.2	Proportionalglied mit Verzögerung 1. Ordnung (P-T ₁ -Glied)	183	9.4.6	Betriebsarten und Fahrprofile	261
7.3.3	Proportionalglied mit Verzögerung 2. Ordnung (P-T ₂ -Glied), Schwingungsglied	184	9.4.7	Drehzahlsteuerung und Drehzahlregelung	262
7.3.4	Integralglied (I-Glied)	187	9.4.7.1	Allgemeines und Einteilung	262
7.3.5	Differenzierglied (D-Glied)	188	9.4.7.2	U/f-Steuerung	263
7.3.6	Totzeitglied (T _t -Glied)	188	9.4.7.3	Vektorregelung	264
7.3.7	Zusammenwirken mehrerer Regelkreisglieder	190	9.5	Drehstromsynchronmotor	266
7.4	Regler und Regelkreise	191	9.5.1	Servuantriebe	266
7.4.1	Schaltende Regler	191	9.5.2	Direktantriebe	268
7.4.2	Analoge Regler	192	9.5.2.1	Torque-Motoren	268
7.4.3	Digitale Regler (Software-Regler)	194	9.5.2.2	Linearmotoren	269
7.4.3.1	Digitalisierung und Signalabtastung	194	9.5.3	Schrittmotoren	269
7.4.3.2	Regelungsalgorithmus	195	9.6	Mechatronische Aktoren	270
7.4.3.3	PID-Stellungsalgorithmus	196	9.6.1	Piezoaktoren	270
7.4.3.4	PID-Geschwindigkeitsalgorithmus	197	9.6.2	Tauchspulen-Linearaktoren	271
7.4.4	Regelung von P-Strecken	198	9.6.3	Kapazitive Mikroaktoren	271
7.4.4.1	Drehzahlregelung mit PI-Regler	198	9.6.4	Thermische Aktoren	272
7.4.5	Regelung von I-Strecken	199	9.6.4.1	Thermobimetall-Aktoren	272
7.4.6	Einstellen eines Reglers	200	9.6.4.2	Dehnstoff-Aktoren	273
7.4.7	Selbstoptimierende Regler	201	9.6.4.3	Memory-Metall-Aktoren	273
8	Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS)		9.7	Lageregelung (Positionierantriebe)	274
8.1	Aufbau und Funktionsweise	202	9.7.1	Kaskadenregelung	274
8.2	Programmierung	205	9.7.2	Geschwindigkeitsvorsteuerung	275
8.2.1	Programmiersprachen	205	9.7.3	Analoger und digitaler Drehzahlregelkreis	276
8.2.2	Programmaufbau	208			
8.3	Funktionen und Operationen	212	10	Computergesteuerte Maschinen	
8.3.1	Binäre Abfragen und Verknüpfungen	212	10.1	CNC-Werkzeugmaschinen	277
8.3.2	SR/RS-Speicherfunktionen	215	10.1.1	Der Produktionsprozess	277
8.3.3	Flankenbewertung	217	10.1.2	NC-Achsen und deren Steuerung	280
8.3.4	Zeitfunktionen	218	10.1.3	CNC-Programmierung	282
8.3.5	Zählfunktionen	220	10.1.3.1	DIN-Programmierung	282
8.3.6	Arithmetische und numerische Funktionen	222	10.1.3.2	Werkstatorientiertes Produzieren (WOP)	292
8.3.7	Übertragungsfunktionen und Programmsteuerungsfunktionen	222	10.1.4	Interpolation	294
8.3.8	Digitale Operationen	223	10.1.5	Leistungsfähigkeit	296
8.4	Ablaufsteuerungen	225	10.1.6	Offene CNC-Steuerung	298
8.4.1	Gliederung und Darstellung	225	10.2	3D-Druck – Additive Fertigungsverfahren	299
8.4.2	Beispiel für eine Ablaufsteuerung	226	10.2.1	Allgemeines	299
8.4.3	Programmierung in Ablaufsprache	229	10.2.2	AM-Verfahren	300
8.4.4	Betriebsartensignale	231	10.2.3	Die Informationskette und die Prozesskette	302
8.4.5	Funktionsbaustein für Betriebsarten	232	10.3	Robotertechnik	303
8.4.6	Funktionsbaustein für Schrittketten	233	10.3.1	Einteilung	303
8.4.7	Funktionsbaustein für die Befehlsausgabe	234	10.3.2	Der kinematische Aufbau	305
8.4.8	Zustandsautomaten	234	10.3.2.1	Die RRR-Kinematik	308
8.5	Analogwertverarbeitung	236	10.3.2.2	Der Gewichtsausgleich	309
			10.3.3	Greifer	310
			10.3.4	Roboterprogrammierung	311
			10.3.5	Die Bewegungserzeugung	313

10.3.5.1	Koordinatensysteme	313	14.3.1	Energie-Monitoring	389
10.3.5.2	Robotersteuerung	315	14.3.2	Energiewertstrom	389
10.3.5.3	Achsstellungen	316	14.3.3	Lastmanagement	390
10.3.5.4	Überschleifen und Pendeln	318	14.4	Energieeffiziente Geräte und Anlagen	391
10.3.5.5	Robotersensorführung	319	15	Geschäftsprozesse	
10.3.6	Kollaborierende Roboter	321	15.1	Managementaufgaben	392
10.3.7	Schutzmaßnahmen	322	15.2	Prozessmanagement	393
11	Materialflussautomatisierung		15.3	Produkt-Daten-Management	394
11.1	Fördersysteme	324	15.4	Gestaltungsmethoden für Prozessketten	396
11.2	Fahrerlos Transportieren	327	15.5	Projektmanagement	398
11.3	Puffersysteme	328	15.6	Informationsmanagement	399
11.4	Bunkersysteme	328	15.7	Planungsinstrumente	401
11.5	Magazinsysteme	329	15.8	Moderation	407
11.6	Sortieranlagen	330	15.9	Präsentation	407
11.7	Verkettungssysteme	331	15.9.1	Inhalt und visuelle Darstellung	408
12	Montageautomatisierung		15.9.2	Präsentationsgrafik mit PowerPoint	409
12.1	Grundlagen	332	16	Arbeitsgestaltung und Arbeitsschutz	
12.2	Fügeverfahren in der Montage	335	16.1	Der Mensch ist das Maß	410
12.2.1	Zusammensetzen, Anpressen und Einpressen	336	16.2	Arbeitsplatzgestaltung	411
12.2.1.1	Zusammensetzen	336	16.3	Arbeitsbelastungen	415
12.2.1.2	Anpressen und Einpressen	336	16.3.1	Arbeitsbelastung durch die Art der Arbeit	415
12.2.1.3	Verschrauben	337	16.3.2	Belastungen durch die Arbeitsorganisation	416
12.2.2	Fügen durch Umformen	342	16.4	EU-Maschinenrichtlinie	418
12.2.3	Fügen durch Schweißen	344	16.4.1	Sicherheit und Gesundheitsschutz	418
12.2.4	Fügen durch Löten	349	16.4.2	Kennzeichnung und Betriebsanleitung	420
12.2.5	Fügen durch Kleben	351	17	Informations- und Kommunikationstechnik	
12.3	Montageautomaten	353	17.1	Computertechnik	422
12.4	Montagefolge und Erzeugnisgliederung	354	17.1.1	Der PC	422
12.5	Beispiel Motorenmontage	356	17.1.2	Objektorientierte Software	425
12.5.1	Logistik und Layout	356	17.1.3	Steuern mit PC	428
12.5.2	Wareneingang	357	17.1.4	Schaltplanerstellen mit FluidSIM	433
12.5.3	Montage des Basismotors	358	17.1.5	Steuern und Regeln mit FluidSIM	434
13	Qualitätsmanagement		17.2	Kommunikationstechnik	435
13.1	Qualität	359	17.2.1	Lokale Kommunikation	435
13.1.1	Qualitätsmerkmale	360	17.2.2	Lokale Netze (LAN)	437
13.1.2	Fehler	360	17.2.3	Feldbussysteme	439
13.2	Ziele des Qualitätsmanagements	361	17.2.3.1	CAN-Bus	439
13.3	TQM – Total Quality Management	361	17.2.3.2	PROFIBUS, PROFIBUS-DP	440
13.4	Qualitätskreis und Qualitätspyramide	362	17.2.3.3	Aktor-Sensor-Interface (AS-i)	441
13.5	Aufbau und Elemente eines Qualitätsmanagementsystems	363	17.2.3.4	IO-Link	443
13.5.1	Aufbauorganisation	363	17.2.4	Serielle Schnittstelle V.24	444
13.5.2	Ablauforganisation	364	17.2.5	Serielle Schnittstelle RS 485	446
13.5.3	DIN EN ISO 9000	364	18	Aufgaben und Übungen	
13.5.4	Zertifizierung	366	18.1	Aufgaben und Übungen zur Pneumatik	447
13.6	Statistische Qualitätslenkung	366	18.2	Aufgaben und Übungen zur Hydraulik	452
13.6.1	Prozessanalyse	367	18.3	Aufgaben und Übungen zu GRAFCET	454
13.6.2	Qualitätsregelkarten	369	18.4	Aufgaben und Übungen zur SPS	455
13.6.3	Maschinen- und Prozessfähigkeit	370	18.5	Aufgaben und Übungen zur Regelungstechnik	468
14	Instandhaltung und Energieeffizienz		18.6	Aufgaben und Übungen zu elektrischen Antrieben	470
14.1	Instandhaltung	371	18.7	Aufgaben und Übungen zur CNC-Technik	471
14.1.1	Begriffe	371	Verzeichnis der Sachworte und der Personen	472	
14.1.2	Wartung	374	Quellenverzeichnis	480	
14.1.3	Inspektion	378			
14.1.4	Instandsetzung	380			
14.1.5	Inbetriebnahme	381			
14.1.6	Fehlersuche	383			
14.1.7	Reparatur	384			
14.2	Condition-Monitoring (Zustandsbedingte Instandhaltung)	385			
14.3	Energieeffizienz	389			

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 60050-351 „Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351: Leittechnik“ festgelegt (Gesamtumfang 194 Seiten).

1.1 Steuern, Steuerung

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

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

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

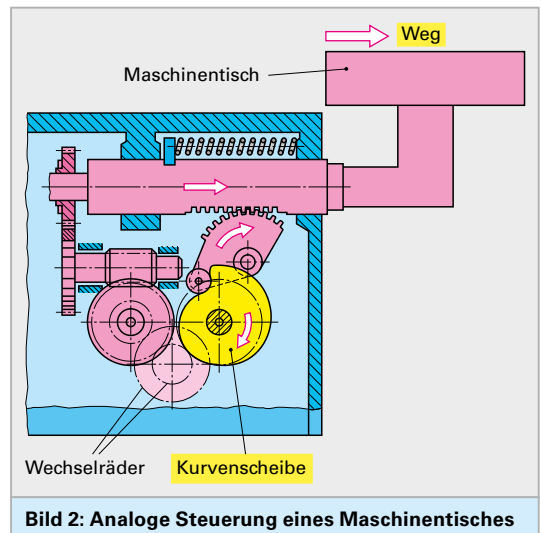
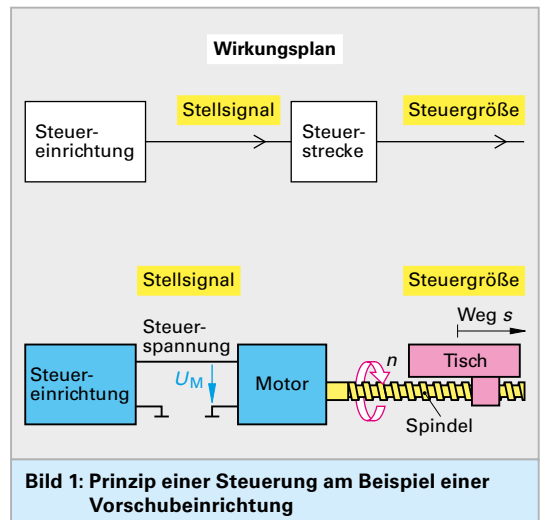
1.1.1 Analoge, binäre und digitale Steuerungen

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 Fahrweg 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 Steuergrößen unstetig.

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

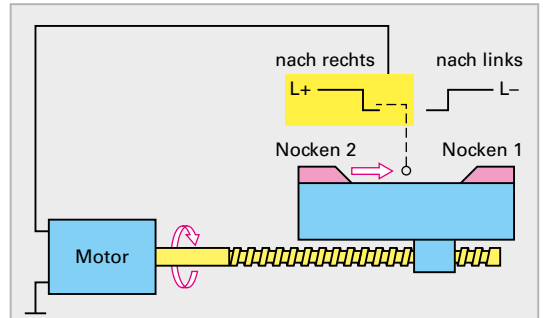


Bild 1: Binäre Steuerung eines Vorschubantriebs (Pendeln)

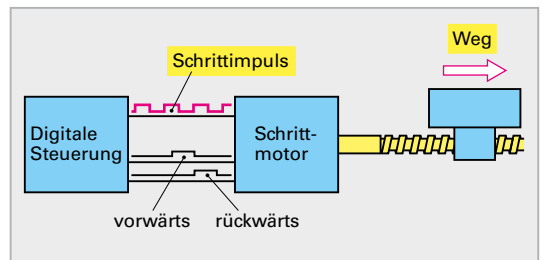


Bild 2: Digitale Vorschubsteuerung mit Schrittmotor

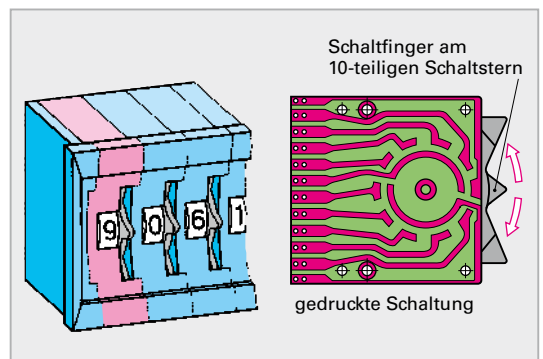


Bild 3: Elektromechanischer Vorwahlschalter

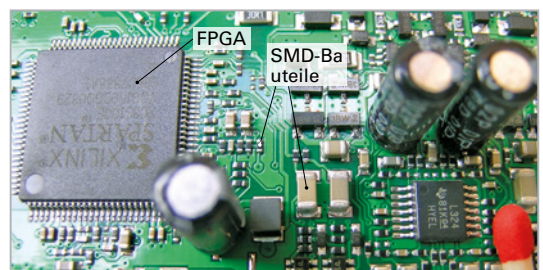


Bild 4: Digitalbaugruppe mit FPGA

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 (sequenzielle 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 mithilfe der **Schaltalgebra**. Die Darstellung erfolgt durch schaltalgebraische Gleichungen, Kontaktpläne, Funktionstabellen und Funktionspläne.

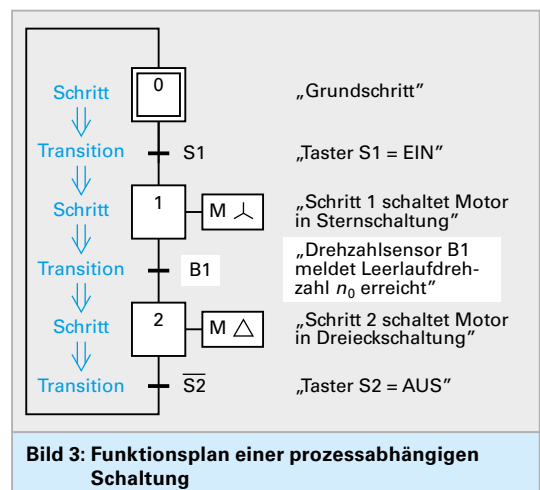
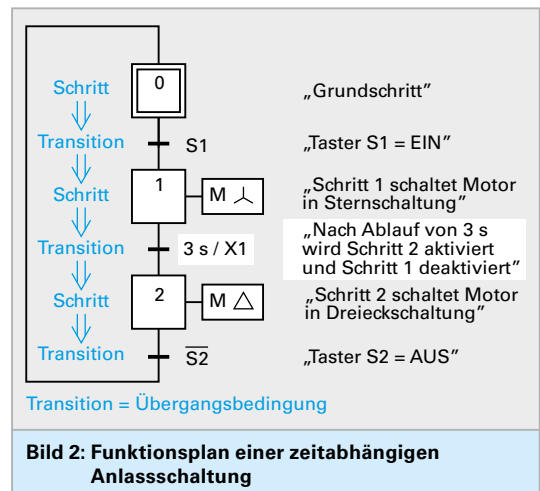
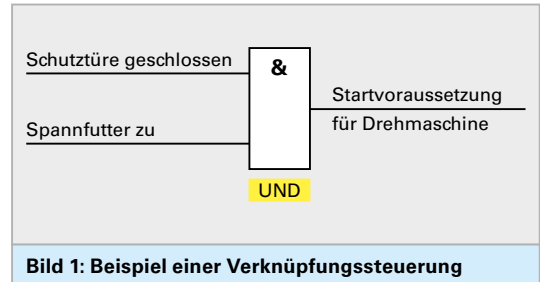
Bei **Ablaufsteuerungen** werden die Steuerungsvorgänge schrittweise ausgelöst. Das Weiterschalten von einem Schritt zum nächsten erfolgt entweder zeitabhängig oder prozessabhängig.

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 zusätzlich 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. Programmablaufplänen (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 verbin- dungsprogrammierte Steuerungen (VPS) und speicherprogrammierte Steuerungen (SPS) (Tabelle 1).

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

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

Speicherprogrammierte Steuerungen (SPS) ent- halten einen elektronischen Programmspeicher, der frei programmiert werden kann.

Das Programm kann über einen PC erstellt und in die Steuerung übertragen werden. Die Pro- gramme sind austauschbar und können schnell geändert werden. SPS sind meist bei Maschi- nensteuerungen eingesetzt. Es werden z. B. bei Transferstraßen die Zustellbewegungen einzel- ner Maschinen mit SPS gesteuert. SPS sind als Mehrprozessorsteuerungen mit hochleistungs- fähigen Mikroprozessoren aufgebaut. Über digi- tale Netze können SPS zusammengeschlossen werden und Daten austauschen. Über Kommuni- kationsschnittstellen können SPS aus der Ferne, z. B. über das Internet, beobachtet und mit neuer Software ausgestattet werden.

Tabelle 1: Programmverwirklichung

Art		Beispiel
Verbindungs- programmiert VPS	fest- programmiert	Relaissteuerung
	umprogrammier- bar	Programm- steuerung mit Steckerfeld
Speicher- programmiert SPS	austausch- programmierbar	SPS mit EPROM ¹
	frei- programmierbar	SPS mit EE- PROM 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

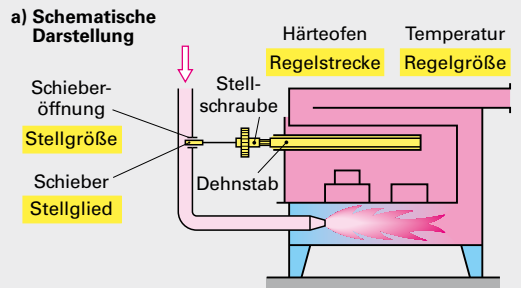
³ RAM von Random Access Memory = Speicher mit wahlfreiem Zugriff

1.2 Regeln, Regelung

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

Man unterscheidet **Festwertregelungen** und **Fol- geregelungen**.

Beispiel für eine Festwertregelung. In einem Här- teofen soll die Temperatur auf einem gleichblei- benden Wert (**Festwert**) gehalten werden (**Bild 1**). Dieser Wert ist die Führungsgröße. Die Tempe- ratur 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

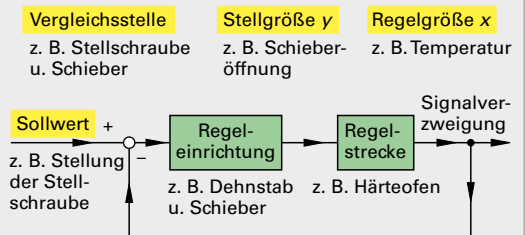


Bild 1: Historische Regelung eines Härteofens

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 so weit, 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.

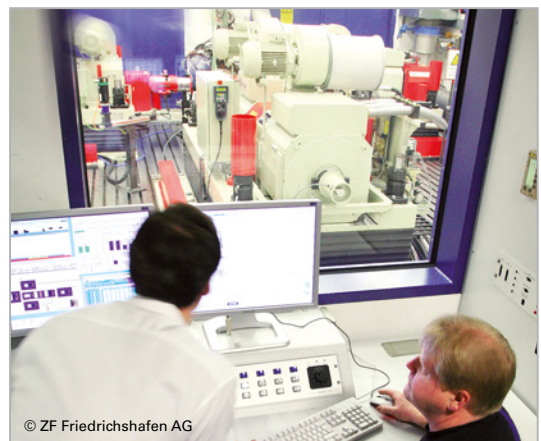
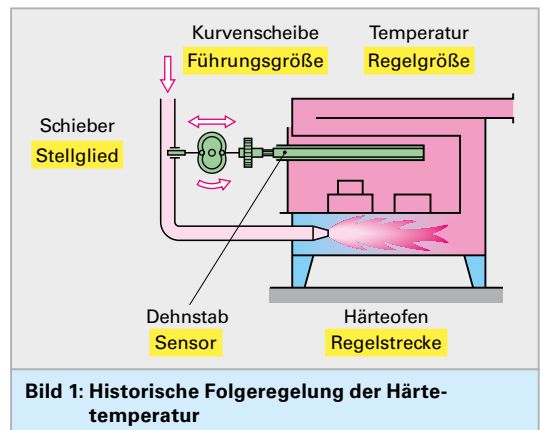


Bild 2: Leitwarte für Getriebeprüfstand

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.

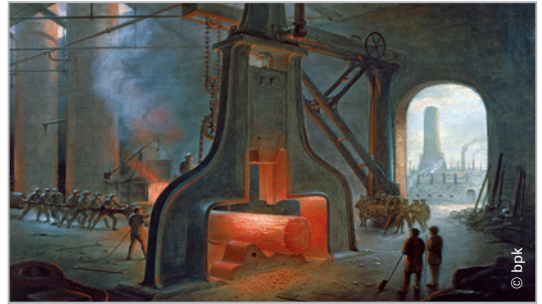


Bild 1: Dampfhammer (1839) von James Nasmyth¹



Bild 2: Der 10000. Opel läuft vom Band (1931)

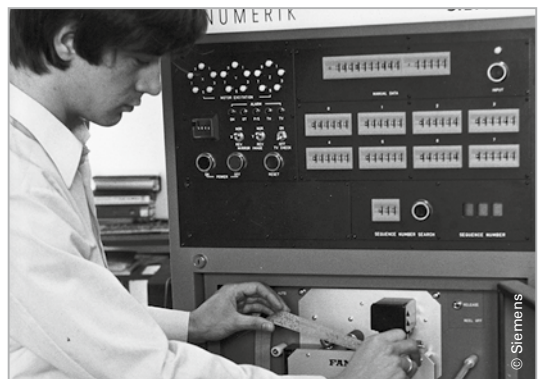


Bild 3: NC-Steuerung mit Lochstreifeneingabe (1970)

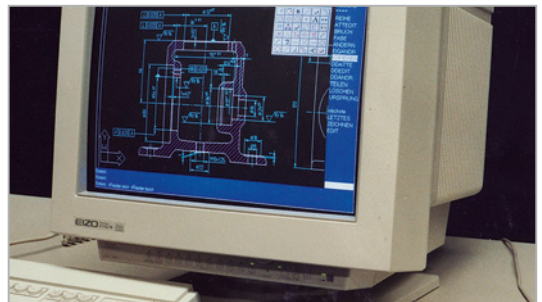


Bild 4: 2D-CAD-System (1998)

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 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.

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.

Fünfte industrielle Revolution

Noch ist man mitten drin in der Entwicklung der 4. Industriellen Revolution und schon ist die 5. industrielle Revolution angesagt. Sie ersetzt nicht 4. Industrielle Revolution, sondern erweitert sie zu einer *nachhaltigen, menschenzentrierten und widerstandsfähigen* Industrie³.

Menschenzentriert bedeutet das gemeinsame Arbeiten von Menschen mit Maschinen, z. B. mit Robotern (**Bild 2**).

Nachhaltigkeit bedeutet sparsamer Umgang mit Energie und Rohstoffen.

Widerstandsfähigkeit (Resilienz) bedeutet, dass Waren und Energie sicher verfügbar sind. Die Schwachstellen durch globale Abhängigkeiten haben nun die Corona-Pandemie und der Ukrainekrieg deutlich werden lassen.

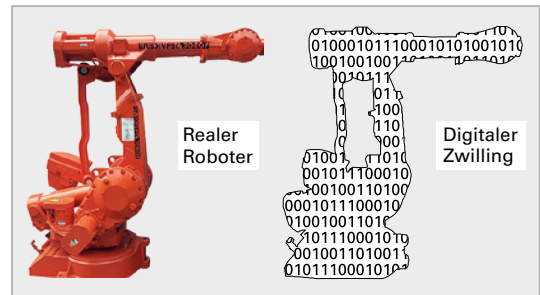


Bild 1: Digitaler Zwilling (Digital Twin)

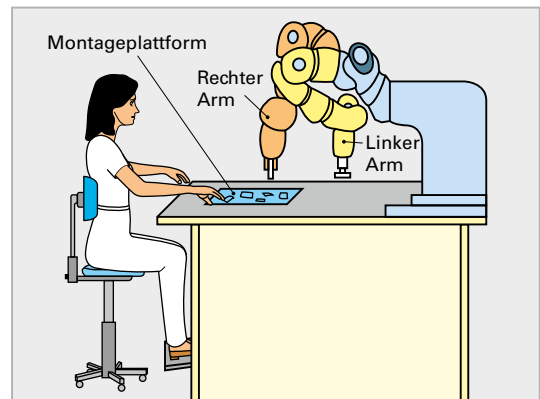


Bild 2: Mensch und Roboter arbeiten zusammen

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

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

³ European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, **Industry 5.0**: human-centric, sustainable and resilient, Publications Office, 2021

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.

¹ engl. smart = geschickt

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

³ engl. embedded = eingebettet

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 „embedded“³ systems“ smart konzipiert und kommunikationsfähig.

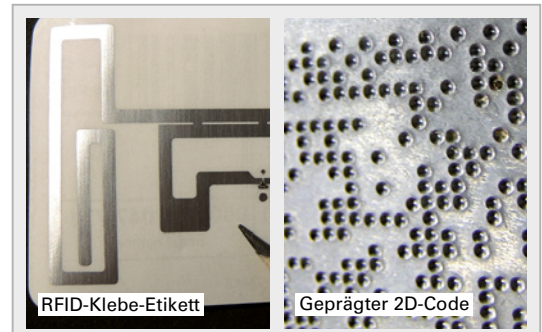


Bild 2: Produktkennung

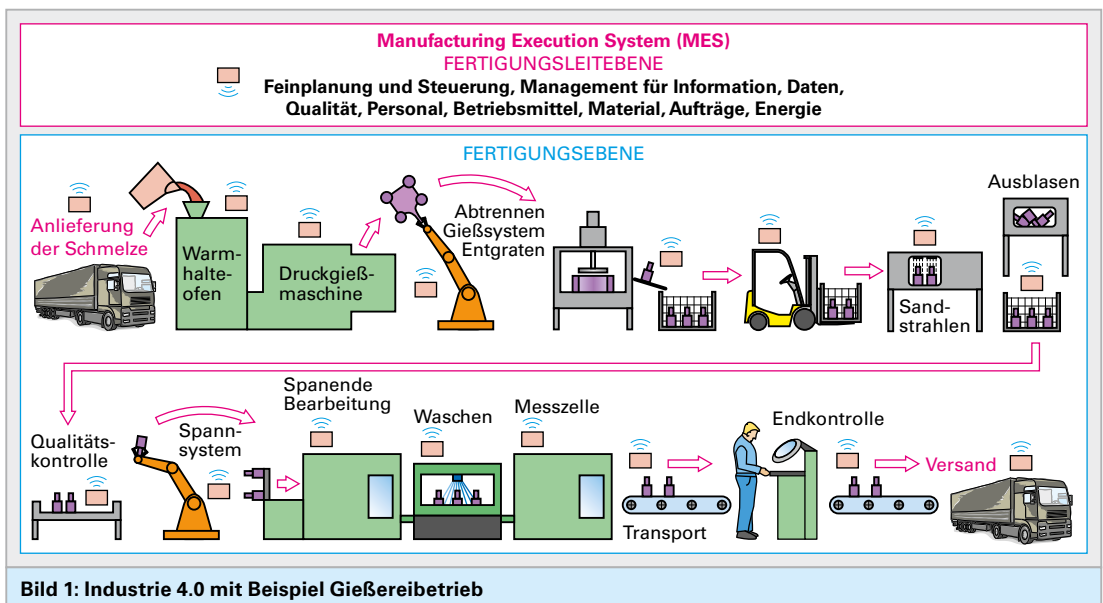


Bild 1: Industrie 4.0 mit Beispiel Gießereibetrieb

1.6 Cyber-Physische Systeme (CPS)

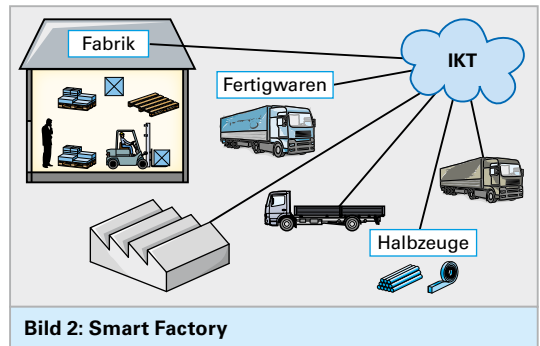
Eine zunehmende Bedeutung haben **Cyber-Physical-Systems**¹ (CPS). Sie ermöglichen durch eine angehängte Kommunikationstechnik die Vernetzung von eingebetteten Systemen untereinander und mit dem Internet. Dabei wird die frühere hierarchische und lokal konzentrierte Struktur aufgelöst (**Bild 1**).

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**).

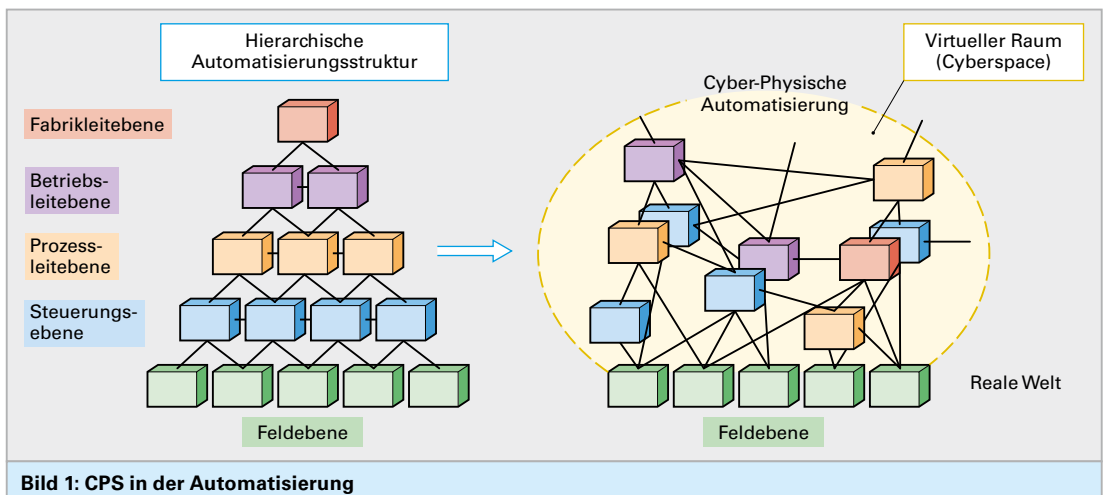
Beim Thema *Smart Factory* liegen die Schwerpunkte auf intelligenten Produktionssystemen und -verfahren sowie auf der Realisierung verteilter und vernetzter Produktionsstätten. Unter der Überschrift *Smart Production* werden unter anderem die unternehmensübergreifende Produktionslogistik und die Mensch-Maschine-Interaktion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



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. Rundschaftische werden mithilfe 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 Getrie-

ben 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.

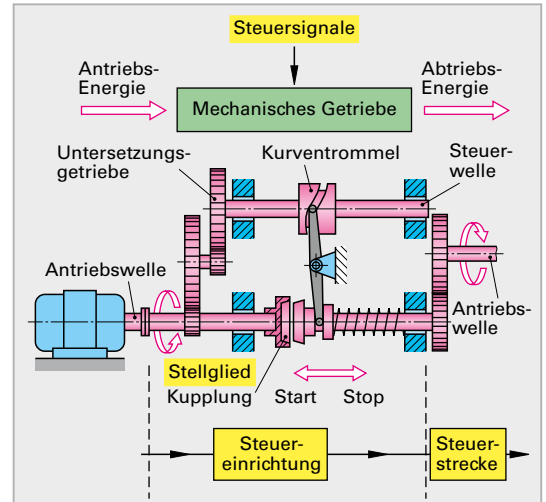


Bild 1: Beispiel einer mechanischen Steuerung

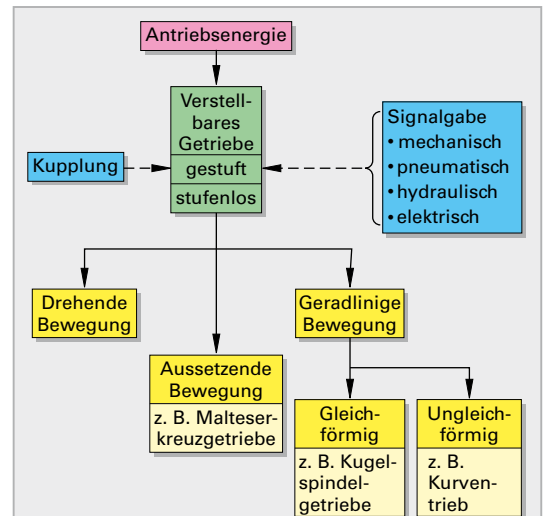


Bild 2: Aufbau mechanischer Steuerungen

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 niedrigen 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 Zahnrädern 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.

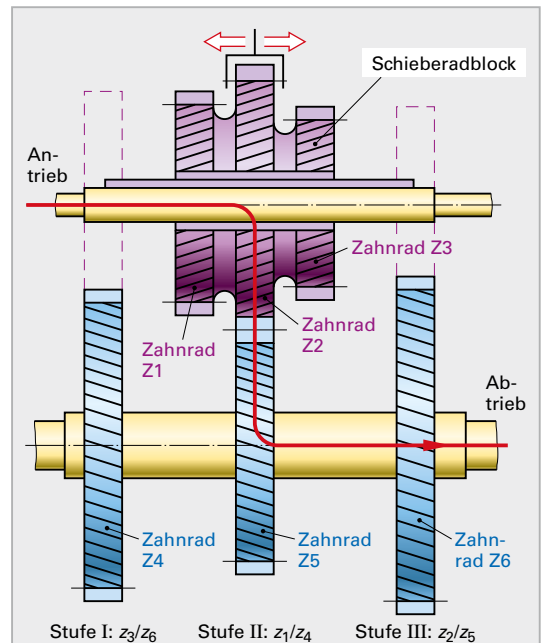
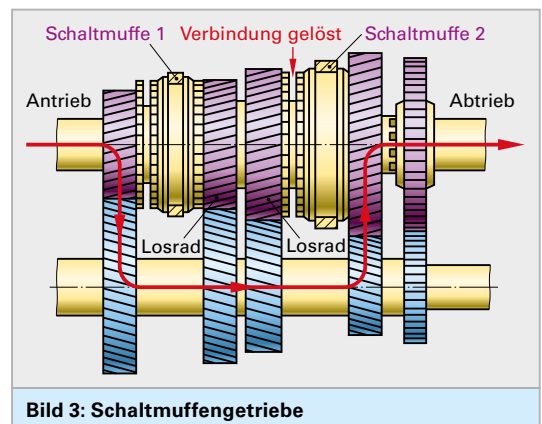
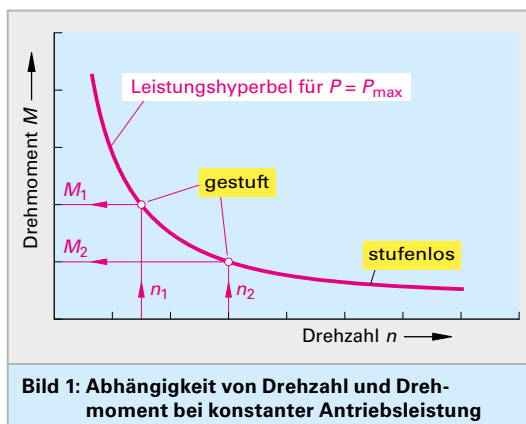


Bild 2: Schieberadgetriebe (Schema)

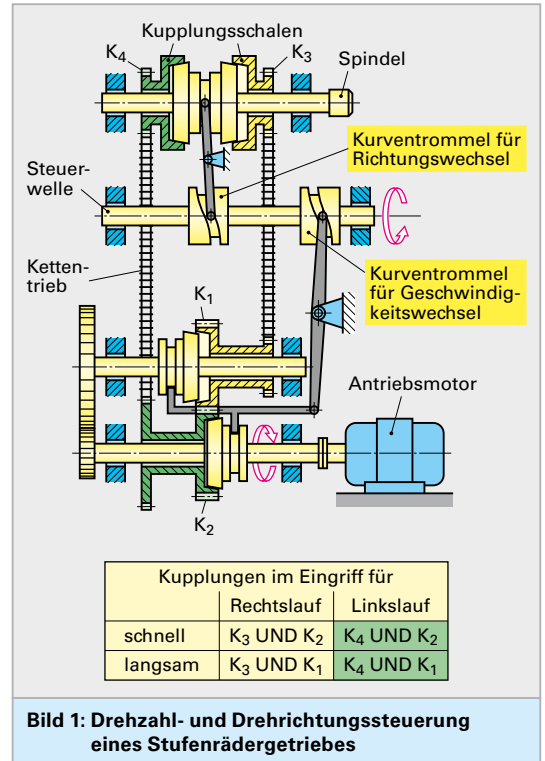


Stufenr dergetriebe

Bei dem mechanisch gesteuerten Stufenr dergetriebe 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 Steuerwelledrehzahl 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 Stufenr dergetriebe 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.



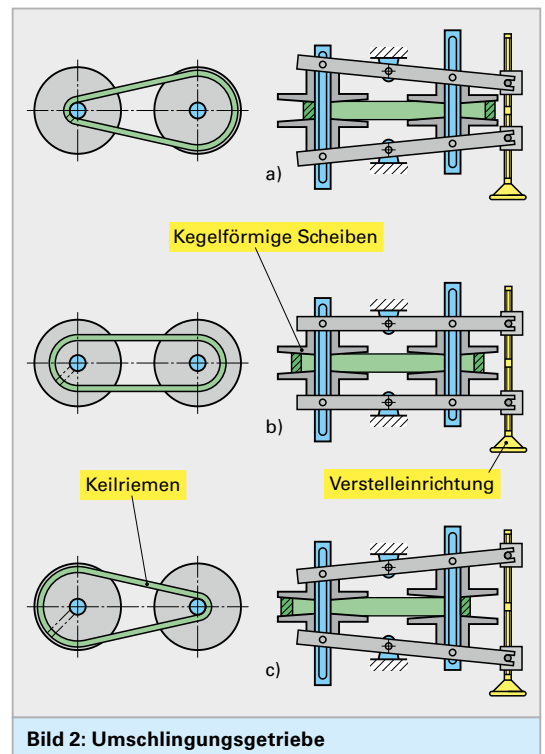
2.2.2 Stufenlos verstellbares Getriebe

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 **Wiegedruckst ck-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 nutzt 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 4**) 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 einen sehr hohen Wirkungsgrad (besser als 95 %) aus.

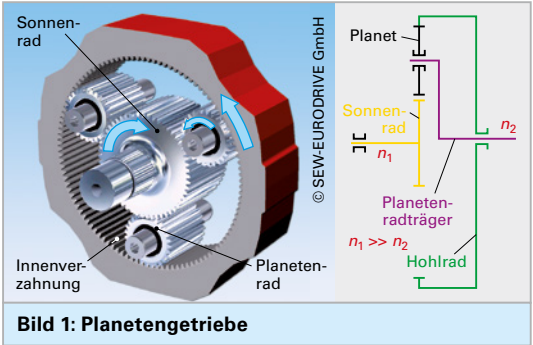


Bild 1: Planetengetriebe

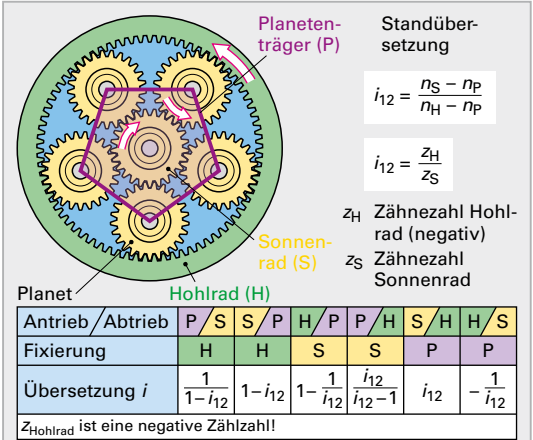


Bild 2: Planetengetriebe mit fünf Planetenrädern

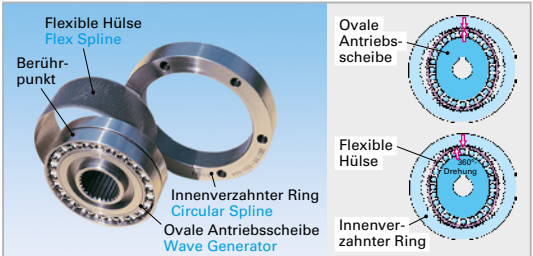


Bild 3: Harmonic-Drive-Getriebe

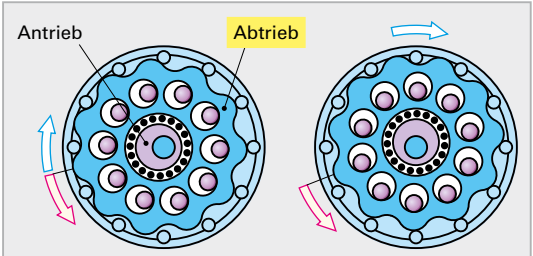


Bild 4: Zykloidgetriebe

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 Stahllitzenverstärkung. 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 verspanntes 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 Spindel-mutter 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.

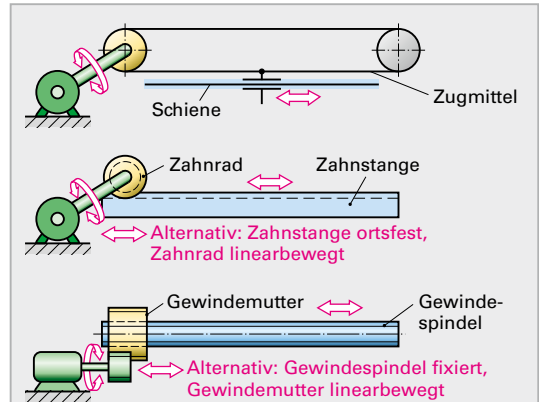


Bild 1: Getriebe für Linearbewegungen

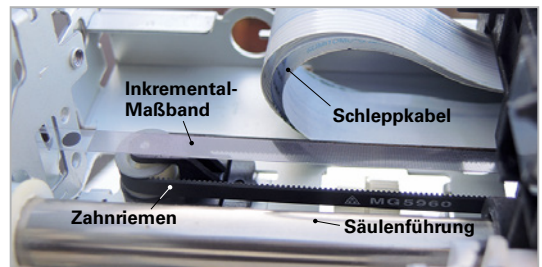


Bild 2: Zahnriementrieb

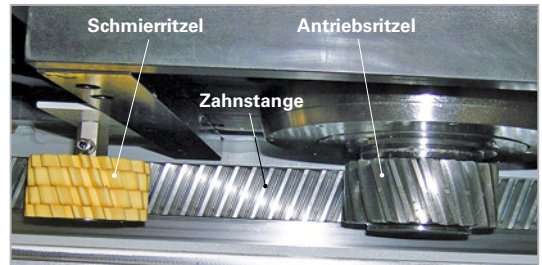


Bild 3: Zahnstangentrieb

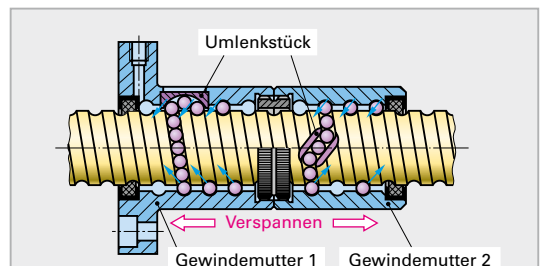


Bild 4: Kugelgewindetrieb