



Bibliothek des technischen Wissens

Dietmar Schmid
Eckehard Kalhöfer

Hans Kaufmann
Jürgen Baur

Alexander Pflug

Automatisierungstechnik

Grundlagen, Komponenten und Systeme für die Industrie 4.0

13., überarbeitete und erweiterte Auflage

mit DVD für Bilder, Übungen, Aufgaben und Simulationen

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

Europa-Nr.: 51518

Die Autoren des Buches

<i>Dietmar Schmid</i>	Dr.-Ing., Professor	Essingen
<i>Hans Kaufmann</i>	Dipl.-Ing. (FH), Studiendirektor	Aalen
<i>Alexander Pflug</i>	Dipl.-Ing., Oberstudienrat	Schwäbisch Gmünd
<i>Eckehard Kalhöfer</i>	Dr.-Ing., Professor	Aalen
<i>Jürgen Baur</i>	Dipl.-Ing. (FH), Oberstudienrat	Aalen

Lektorat und Leitung des Arbeitskreises:

Prof. Dr.-Ing. *Dietmar Schmid*, Essingen

Bildbearbeitung:

Zeichenbüro des Verlags Europa-Lehrmittel, 73760 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.

13. Auflage 2020

Druck 5 4 3 2 1

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

ISBN 978-3-8085-5164-6

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

© 2020 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
<http://www.europa-lehrmittel.de>

Satz und Layout: Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpar

Umschlag: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald

Umschlagfoto: Fotos des Lektors

Druck: Dardedze Holografija, LV-1063 Riga (Lettland)

Vorwort zur 13. Auflage

Die **Automatisierungstechnik prägt auf dem Weg zur Industrie 4.0 den digitalen Wandel (digitale Transformation)**. Sie ist zusammen mit der Informatik der Motor unserer modernen Gesellschaft. Die Komponenten dazu sind digital vernetzte mechanische, elektrische, elektronische und optische Elemente der Steuerungstechnik, Antriebstechnik und Sensortechnik. Programme und Softwarebausteine ermöglichen die Einbindung in die Informations- und Kommunikationstechnik.

Mit diesem Buch werden die technisch-physikalischen **Grundlagen** für die **Industrie 4.0** vermittelt. Die **Komponenten** der Hardware und Software zur Steuerung und Regelung sowie zur Kommunikation werden behandelt und eingepasst in die **digitalen Systeme** industrieller Infrastrukturen.

Die Hauptkapitel sind:

- **Grundlagen** der Automatisierungstechnik
- **Aktoren:** pneumatisch, hydraulisch, elektrisch, mechatronisch
- **Sensoren** für Wege, Winkel, Drücke, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Temperaturen und zur Sicherheit
- **Computergesteuerte Maschinen:** CNC-Werkzeugmaschinen, Messmaschinen/Messgeräte, Roboter, 3D-Scannen, 3D-Drucken
- **Montageautomatisierung**
- **Prozesse steuern:** statistische Prozessregelung, Prozessfähigkeit, Betriebsdatenerfassung
- **Informationstechnik:** Programmierung, Steuern, Regeln und Simulieren, Datenbanken, Bildverarbeitung, Virtuelle Umgebungen
- **Kommunikationstechnik:** Local Area Network (LAN, WLAN), Feldbus-Systeme, Schnittstellen

Das vorliegende Buch vermittelt den Lehrstoff, wie er im Bereich der Digitaltechnik, der Automatisierungstechnik und der Mechatronik in den Fachschulen für Technik gefordert und auch im Bereich der beruflichen Weiterbildung benötigt wird. Für Studenten der Hochschulen dient dieses Buch als eine leicht lesbare Einführung. Über 1200, meist mehrfarbige Bilder oder Tabellen erleichtern das Begreifen der komplexen Zusammenhänge.

Auf der beigelegten DVD werden den Lehrenden und Lernenden alle Bilder, Lösungen zu den Aufgaben und eine Vielzahl von Softwaretools, Simulationen und animierbaren Objekten zur Verfügung gestellt¹. Damit gelingt es Bewegungs- und Steuerungsvorgänge lebendig werden zu lassen. Teilprozesse oder vollständige Anlagen können virtuell dargestellt und beobachtet werden. Auch ist es zum Teil möglich, die virtuellen Vorgänge in realen Anlagen „laufen zu lassen“. Lernende können damit in sehr kreativer Weise Wissen und Erfahrungen schöpfen. Die DVD enthält ferner ein Repetitorium und wichtige Gesetzestexte.

Für die **13. Auflage** wurde die **Montageautomatisierung** deutlich erweitert. **Industrie 4.0** wird z. B. in der Montagetechnik der Automobilindustrie besonders offenkundig und so sind grundlegende Kenntnisse z. B. zu den Fügeverfahren und zur Fördertechnik essentiell in der praktischen Umsetzung. Es gibt ferner **in allen Kapiteln Einzelverbesserungen**, hierzu zählen z. B. Brandschutzmelder, IGBT mit Temperatursensor, Gewichtsausgleich bei Robotern und steuerungstechnische Beispiele zur Energieeffizienz und zur Verwendung einer App.

Hinweise und Verbesserungsvorschläge können dem Verlag und damit den Autoren unter der E-Mail-Adresse lektorat@europa-lehrmittel.de mitgeteilt werden.

Winter 2019/2020

Die Autoren

¹ Rechtliche Hinweise zur DVD. **Eine Weitergabe der DVD-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 beigelegten DVD 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	Grundlagen der Automatisierungstechnik	9	1.4.11	Digitale Grundoperationen (Wortverarbeitung)	86
1.1	Einführung	9	1.4.12	Analogwertverarbeitung	89
1.1.1	Automatisierung und Automaten	9	1.4.13	Funktionen (FC) und Funktionsbausteine (FB)	91
1.1.2	Entwicklungsphasen industrieller Technik	10	1.4.14	Datenbausteine	93
1.1.3	Industrie 4.0	13	1.4.15	Ablaufsteuerung	94
1.1.4	Cyber-Physische-Systeme (CPS)	14	1.4.16	Betriebsarten	98
1.2	Steuerungstechnik	16	1.4.17	Kleinststeuerung LOGO!	101
1.2.1	Steuerungsarten	16	1.4.18	Bedienen und Beobachten mit WINCC	105
1.2.2	Programmsteuerungen	19	1.4.19	Prozess-Simulation	109
1.2.3	Elektrische Kontaktsteuerungen	20	1.4.20	IEC 61131	112
1.2.3.1	Bauelemente und Betriebsmittel	20	1.4.21	Zuverlässigkeit und Sicherheit	113
1.2.4	Schutzmaßnahmen	31	1.5	Grundlagen der Analsignalverarbeitung	114
1.2.4.1	Gefahren	31	1.5.1	Operationsverstärker (OP)	114
1.2.4.2	Schutzartenkennzeichnung	31	1.5.2	Grundschaltungen	115
1.2.4.3	Schutzklassen	32	1.5.3	Analog-Digital-Umsetzer und Digital-Analog-Umsetzer	118
1.2.4.4	Fehlerstrom-Schutzschalter (FI-Schalter, RCD)	33	1.6	Regelungstechnik	120
1.2.4.5	Elektrostatische Entladungen (ESD)	35	1.6.1	Begriffe	120
1.2.4.6	Sicherheitsfunktionen	36	1.6.2	Regelungsarten	121
1.2.5	Grundschaltungen	37	1.6.3	Regelkreisglieder	123
1.2.6	Elektronische Bauelemente	40	1.6.3.1	Proportionalglied ohne Verzögerung (P-Glied)	123
1.2.6.1	Halbleiterbauelemente	40	1.6.3.2	Proportionalglied mit Verzögerung 1. Ordnung (P-T ₁ -Glied)	124
1.2.6.2	Integrierte Schaltkreise (IC) und Grundverknüpfungen	43	1.6.3.3	Proportionalglied mit Verzögerung 2. Ordnung (P-T ₂ -Glied) und Schwingungsglied	125
1.2.7	Schaltalgebra	44	1.6.3.4	Integralglied (I-Glied)	128
1.2.8	Kombinatorische Steuerungen	45	1.6.3.5	Differenzglied (D-Glied)	129
1.2.9	Sequentielle ¹ Steuerungen	49	1.6.3.6	Totzeitglied (T _t -Glied)	129
1.2.10	GRAFSET	50	1.6.3.7	Zusammenwirken mehrerer Regelkreisglieder	131
1.2.11	Sequentielle Steuerungen mit Flip-Flop (Kippglieder)	56	1.6.4	Regler und Regelkreise	132
1.2.12	Zustandsfolgediagramm (Graph)	58	1.6.4.1	Schaltende Regler	132
1.3	Digitale Speicher	61	1.6.4.2	Analoge Regler	133
1.3.1	Mechanische Speicher	61	1.6.4.3	Digitale Regler (Software-Regler)	135
1.3.2	Optische Datenspeicher	62	1.6.4.4	Regelung von P-Strecken	138
1.3.2.1	Barcodes	62	1.6.4.5	Regelung von I-Strecken	139
1.3.2.2	2D-Codes	63	1.6.4.6	Einstellen eines Reglers	141
1.3.3	Elektronische Speicher	64	1.6.4.7	Selbstoptimierende Regler	142
1.3.4	Magnetische Speicher	66	1.7	Schaltpläne	143
1.4	Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS)	67	1.7.1	Strukturierung	143
1.4.1	Aufbau und Funktionsweise	67	1.7.2	Referenzkennzeichen	145
1.4.2	Systemaufbau	69	1.7.3	Schaltplanerstellen mit FluidSIM®	147
1.4.3	Programmierung	70	1.7.4	Steuern und Regeln mit FluidSIM®	148
1.4.4	Programmabarbeitung, Organisationsbausteine	72	2	Aktoren	149
1.4.5	Adressierung und Datentypen	73	2.1	Pneumatische Aktoren	149
1.4.6	Grundverknüpfungen	74	2.1.1	Einführung	149
1.4.7	Speicher (Merker)	77			
1.4.8	Flankenbewertung	79			
1.4.9	Zähloperationen	81			
1.4.10	Programmieren von Zeiten	83			

2.1.2	Komponenten der Pneumatik	150	2.4	Mechatronische Aktoren	235
2.1.2.1	Wartungsgeräte	150	2.4.1	Piezoaktoren	235
2.1.2.2	Aktoren	151	2.4.2	Tauchspulenantriebe	238
2.1.2.3	Ventile	154	2.4.3	Magnetostriktive Aktoren	238
2.1.2.4	Signalgeber und Signalwandler	159	2.4.4	Kapazitive Mikroaktoren	239
2.1.3	Pneumatische Steuerungen	160	2.4.5	Thermische Aktoren	240
2.1.3.1	Schaltplanaufbau	160	2.4.5.1	Thermobimetall-Aktoren	240
2.1.3.2	Pneumatische Verknüpfungssteuerungen	162	2.4.5.2	Dehnstoff-Aktoren	241
2.1.3.3	Pneumatische Ablaufsteuerungen	164	2.4.5.3	Memory-Metall-Aktoren	241
2.1.3.4	Elektrische Ansteuerung von Aktoren	165	2.4.6	MRF-Aktoren	242
2.1.3.5	Vakuumtechnik	170	2.5	CNC-Achsantriebssysteme	243
2.1.3.6	Sicherheitsfunktionen	171	2.5.1	Struktur	243
2.1.3.7	Energieeffizienz	172	2.5.2	Art der Wegmessung	243
2.2	Hydraulische Aktoren	173	2.5.3	Antriebsarten	245
2.2.1	Allgemeines	173	2.5.4	Mechanische Übertragungsglieder	246
2.2.2	Physikalische Grundlagen	173	2.5.5	Lageregelung	248
2.2.2.1	Hydrostatik	173	3	Sensoren	250
2.2.2.2	Hydrodynamik	175	3.1	Allgemeines	250
2.2.3	Hydraulikflüssigkeiten	176	3.2	Sensoren für Wege, Winkel und Abstände	251
2.2.4	Aufbau hydraulischer Steuerungen	178	3.2.1	Sensorsignale durch Widerstandsänderung	251
2.2.5	Hydraulikpumpen	179	3.2.2	Sensorsignale durch magnetische Kopplung	256
2.2.6	Hydraulikspeicher	181	3.2.3	Sensorsignale mittels magnetischer und elektrischer Felder	257
2.2.7	Antriebselemente	183	3.2.4	Sensoren zur Füllstandsmessung	258
2.2.8	Hydraulikventile	186	3.2.5	Optische Sensoren	259
2.2.8.1	Druckventile	186	3.2.6	Sensorsignale durch Laufzeitmessung	263
2.2.8.2	Wegeventile	189	3.2.7	Näherungsschalter (binäre Sensoren)	265
2.2.8.3	Sperrventile	190	3.2.8	Digitale Weg- und Winkelmessung	266
2.2.8.4	Stromventile	191	3.2.8.1	Inkrementale Weg- und Winkelmessung	266
2.2.9	Stetigventile	193	3.2.8.2	Absolute Weg- und Winkelmessung	270
2.2.10	Proportionaltechnik	194	3.2.8.3	Zyklisch analoge Weg- und Winkelmessung	271
2.2.11	Servoventile	201	3.2.8.4	Berührungsloses Messen mit Autofokus-Systemen	272
2.2.12	Mobilhydraulik	203	3.3	Geschwindigkeitssensoren	273
2.3	Elektrische Aktoren	204	3.4	Sensoren für Dehnungen, Kräfte, Drehmomente und Drücke	274
2.3.1	Einführung	204	3.5	Beschleunigungssensoren	278
2.3.2	Rechnerische Grundlagen	206	3.6	Temperatursensoren	279
2.3.3	Erste Orientierung	209	3.7	Sensoren für elektrische Größen (Messumformer)	282
2.3.4	Gleichstromantriebe (DC-Antriebe)	210	3.8	Sensoren zur Sicherheitstechnik	283
2.3.5	Drehstromasynchronmotor	216	3.9	Störungen in Sensorleitungen	286
2.3.5.1	Aufbau des Kurzschlussläufers	216	4	Computergesteuerte Maschinen	288
2.3.5.2	Das Drehfeld	217	4.1	CNC-Werkzeugmaschinen	288
2.3.5.3	Funktionsweise	218	4.1.1	Der Produktionsprozess	288
2.3.5.4	Anlasssteuerungen	219	4.1.2	NC-Achsen und deren Steuerung	291
2.3.5.5	Drehrichtungsumkehr	220	4.1.3	CNC-Programmierung	293
2.3.5.6	Betriebsarten und Fahrprofile	220			
2.3.5.7	Drehzahlsteuerung und Drehzahlregelung	221			
2.3.6	Drehstromsynchronmotor	225			
2.3.6.1	Servoantriebe	225			
2.3.6.2	Direktantriebe	226			
2.3.7	Kühlung und Bauformen	229			
2.3.8	Antriebsprojektierung	230			
2.3.9	EMV-Maßnahmen	231			
2.3.10	Kleinmotoren	233			
2.3.10.1	DC-Kleinmotoren	233			
2.3.10.2	Schrittmotoren	234			

4.1.3.1	DIN-Programmierung	293	5.2	Materialfluss	378
4.1.3.2	Werkstatorientiertes Produzieren(WOP)	303	5.2.1	Lagern	378
4.1.4	Interpolation	305	5.2.2	Puffern	379
4.1.5	Leistungsfähigkeit	307	5.2.3	Bunkern	380
4.1.6	Offene CNC-Steuerung	309	5.2.4	Magazinieren	381
4.2	3D-Druckverfahren	310	5.2.5	Fördersysteme	382
4.2.1	Allgemeines	310	5.2.6	Montage im Kreisprozess	385
4.2.2	AM-Verfahren	311	5.3	Fügeverfahren	386
4.2.3	Die Informationskette und die Prozesskette	313	5.3.1	Übersicht	386
4.3	Messen und Prüfen	314	5.3.2	Zusammensetzen	386
4.3.1	Koordinatenmessgeräte	314	5.3.3	Anpressen und Einpressen	387
4.3.1.1	Aufbau und Wirkungsweise	315	5.3.4	Umformendes Fügen	392
4.3.1.2	Bauarten	316	5.3.5	Schweißen	394
4.3.1.3	Messsysteme	316	5.3.5.1	Lichtbogenschweißen	395
4.3.1.4	Messkopfsysteme	317	5.3.5.2	Fügen durch Widerstandsschweißen	396
4.3.1.5	Zusatzausstattungen	319	5.3.5.3	Gasschmelzschweißen	397
4.3.1.6	Steuerungen und Antriebe	320	5.3.5.5	Löten	399
4.3.1.7	Messwertverarbeitung und Messwertauswertung	320	5.3.5.6	Kleben	402
4.3.1.8	Tastelementkalibrierung	323	6	Prozesse steuern	404
4.3.1.9	Durchführung eines Messauftrags	323	6.1	Einführung	404
4.3.2	Laser-Tracking	328	6.2	Statistische Prozessregelung (SPC)	405
4.3.3	Optisches 3D-Scannen	329	6.2.1	Prüfdaten	405
4.3.3.1	Räumlichen Wahrnehmung und Triangulation	329	6.2.2	Normalverteilung	406
4.3.3.2	Scannen mit Punkten und mit Linien	330	6.2.3	Wahrscheinlichkeitsnetz	407
4.3.3.3	Streifenlichtscanner	331	6.2.4	Auswertung einer Stichprobe	407
4.3.3.4	Photogrammetrie	336	6.2.5	Qualitätsregelkarten	411
4.3.4	Röntgen-Computertomographie (CT)	338	6.3	Maschinenfähigkeit und Prozessfähigkeit	413
4.3.4.1	Allgemeines	338	6.4	Betriebsdatenerfassung (BDE)	416
4.3.4.2	CT in der industriellen Messtechnik	338	6.4.1	Codeleser	417
4.3.4.3	Auflösung	339	6.4.2	Mobile Datenspeicher	418
4.4	Robotertechnik	341	6.4.3	Chipkarten, Chipmünzen, RFIDs	419
4.4.1	Einführung	341	7	Informationstechnik	422
4.4.2	Einteilung	342	7.1	Programmierung	422
4.4.3	Kinematischer Aufbau	343	7.1.1	Programmiersprachen	422
4.4.3.1	Die RRR-Kinematik	346	7.1.2	Software Engineering	423
4.4.3.2	Der Gewichtsausgleich	347	7.1.3	Qualität der Software	424
4.4.4	Greifer	348	7.1.4	Sicherung gegen unberechtigte Nutzung	424
4.4.5	Roboterprogrammierung	349	7.1.5	Betriebssystem Windows	425
4.4.6	Koordinatensysteme	351	7.1.6	Objektorientierte Programmierung (OOP)	428
4.4.7	Die Bewegungserzeugung	355	7.1.7	Algorithmen	430
4.4.8	Koordinatentransformation	357	7.1.8	Strukturierte Programmierung	431
4.4.9	Interpolation und Betriebsarten	358	7.1.9	Rechnerinterne Datendarstellung	432
4.4.10	Schleppabstand und Bahngeschwindigkeit	360	7.1.10	Programmaufbau und Programmkomponenten	435
4.4.11	Sensorführung von Robotern	362	7.1.11	Strukturierte Anweisungen	437
4.4.12	Kollaborierende Roboter	368	7.1.12	Strukturierung mit Funktionen	439
4.4.13	Schutzmaßnahmen	369	7.1.13	Fallbeispiel: Steuerkurve	440
4.5	Sicherheit von Maschinen und Anlagen	371	7.1.14	Einsatz von Smartphone, Tablet und iPad	446
5	Montagetechnik	375	7.1.15	Grafische Programmierung	447
5.1	Grundlagen	375			

7.2	Steuern mit Computer	453	7.7.2	Binärbildverarbeitung	506
7.2.1	Zusatzbaugruppen	453	7.7.3	Farbbildverarbeitung und Farbbildcodierung	507
7.2.2	Elemente zu einem i 4.0 Projekt „Werkstück prägen“	454	7.8	Virtuelle Umgebung	509
7.3	Regelung mit PC und SPS	462	7.8.1	Allgemeines	509
7.3.1	Hardware und Software	462	7.8.2	Szenensteuerung	510
7.3.2	Grafische Ausgabe	463	7.8.3	Augmented Reality, Mixed Reality . .	511
7.3.3	Regelkreisglieder	464	8	Kommunikationstechnik	512
7.3.3.1	Proportionalglied ohne Verzögerung (P-Glied)	464	8.1	Kommunikation über das Internet . .	512
7.3.3.2	Integralglied (I-Glied)	465	8.2	Local Area Network (LAN)	513
7.3.3.3	Totzeitglied (T_I -Glied)	466	8.2.1	Ethernet-LAN	514
7.3.3.4	Proportionalglied mit Verzögerung 1. Ordnung (P- T_1 -Glied)	467	8.1.1.1	Einführung	514
7.3.3.5	Proportionalglied mit Verzögerung 2. Ordnung (P- T_2 -Glied) und Schwingungsglied	468	8.2.1.2	Peer-to-Peer-Netzwerk	517
7.3.4	Regelkreise	469	8.2.1.3	Client-Server-Netzwerk	517
7.3.4.1	P-Regelung mit P- T_1 -Strecke	469	8.2.1.4	Peer-to-Peer-Netzwerk mit zwei PCs .	518
7.3.4.2	P-Regelung und P- T_1 -Strecke (SPS-Simulation)	470	8.2.1.5	Erweiterung zu einem Client-Server-Netzwerk	521
7.3.4.3	I-Regelung und P- T_1 -Strecke	471	8.2.2	Wireless LAN (WLAN)	523
7.3.4.4	PI-Regelung einer P- T_1 -Strecke mit Störgrößenaufschaltung (Beispiel) .	472	8.3	Feldbus-Systeme	525
7.3.4.5	Optimierung der Reglerparameter .	473	8.3.1	CAN-Bus	525
7.3.4.6	P-Regler mit P- T_1 -I-Strecke (Lageregelung)	474	8.3.2	Aktor-Sensor-Interface (AS-i)	527
7.3.4.7	Lageregelung mit Totzeit	476	8.3.3	PROFIBUS, PROFIBUS-DP	529
7.3.4.8	Geschwindigkeitsvorsteuerung	477	8.3.4	PROFINET	532
7.3.5	Fuzzy-Logic	478	8.3.5	PROFIsafe	533
7.3.5.1	Grundlagen der Fuzzy-Technologie .	478	8.4	Schnittstellen	535
7.3.5.2	Fuzzy-Regelung einer Bandsägemaschine	479	8.4.1	Aufgaben und Art der Schnittstellen	535
7.4	Programmiersprache Java	481	8.4.2	USB-Schnittstelle	536
7.4.1	Einführung	481	8.4.3	Firewire (IEEE 1394)	536
7.4.2	Erstellen einer Applikation	482	8.4.4	Serielle Schnittstelle V.24	537
7.4.3	HTML	482	8.4.5	Serielle Schnittstelle RS 485	539
7.4.4	Erstellen von Grafiken	484	8.4.6	IO-Link	540
7.4.5	Animationen	485	9	Aufgaben und Übungen	541
7.4.6	Multithreading	485	9.1	Aufgaben und Übungen zur Pneumatik	541
7.4.7	Java-Script	486	9.2	Aufgaben und Übungen zur Hydraulik	546
7.5	Visual Basic für Excel	487	9.3	Aufgaben und Übungen zu GRAFCEC	548
7.5.1	Aufbau eines VBA-Programms	487	9.4	Aufgaben und Übungen zur SPS . .	549
7.5.2	Aufruf von VBA	488	9.5	Aufgaben und Übungen zur Regelungstechnik	562
7.5.3	Erstellen von Funktionen	489	9.6	Aufgaben und Übungen zum Programmieren	566
7.5.4	Variable und Zugriff auf Zellen	490	9.7	Aufgaben und Übungen zur Antriebstechnik	569
7.5.5	Projekt: SPC-Maschinenregelung	492	9.8	Aufgaben und Übungen zur CNC-Technik	570
7.5.6	Erstellen eines Formulars als Unterprogramm	493			
7.5.7	Kommunikation: Excel mit S7	494			
7.6	Relationale Datenbanken	495			
7.6.1	Datenbankobjekte	496			
7.6.2	Entwerfen einer Datenbank	498			
7.7	Bildverarbeitung	501			
7.7.1	Grauwertbildverarbeitung	501			
				Sachwortverzeichnis	572
				Quellenverzeichnis	576

Automaten und Roboter

Automaten für schwere Arbeit, für Spiele, für Expeditionen, für den Weltraum, zum Denken und zum Fühlen – die Visionen sind seit Menschheitsgedenken vielfältig. Waren es zunächst mechanische Automaten für Kultstätten (Seite 9), so bekamen in der Neuzeit die Geräte auch oft ein menschliches Antlitz, z. B. in Form von Spielautomaten.

Mit dem Schauspiel R.U.R. (Rossum's Universal Robots) schuf 1920 Karel Capek den Begriff des Roboters und der Roboterin. Die Roboter sind hier menschenähnliche Wesen, mit starrem Blick und geschaffen als billige Arbeitskräfte zum Einsatz in der Serienproduktion.

„Sie erinnern sich an alles, denken aber nichts Neues. Sie haben keine Seele und keine Gefühle“, so steht es in der Regieanweisung.

Industrieroboter (Seite 335) sind in diesem Sinne Realität geworden und verrichten, meist als einarmige Gebilde, schwere Arbeit. Sie sind in der Produktion als Mittel zur Automatisierung nicht mehr wegzudenken. Es sind Bewegungsmaschinen, die mit künstlicher Intelligenz (KI) und mit unterschiedlichster Sensorik ausgestattet sind. So können sie auch sehen, hören und fühlen. Sie sind auch kooperativ, d. h., sie arbeiten zusammen, z. B. während der eine Roboter das Bauteil hält, wird es vom anderen Roboter bearbeitet.

Man setzt Roboter auch ein, wenn die Umwelt für den Menschen gefährlich oder feindlich ist, z. B. bei Expeditionen im Weltall und beim Aufspüren von Minen. Es gibt Roboter für viele Anwendungen, z. B. zum Ballspielen, zum Saubermachen, zum Fensterputzen oder zum Rasenmähen.

In der Kunst, in der Literatur, in Filmen und natürlich auch in Videospiele begegnen wir häufig einer Roboter-Fiktion, den *Androiden*, also künstlichen Menschen. Sie beflügeln unsere Fantasie.



© Konrad König

Roboter als Spielzeuge



© Honda Motor Europe GmbH

Roboter als Helfer in der Kantine



Kooperierende Roboter



© ullstein bild-KPA

Roboter im Film „Der 200-Jahre-Mann“

1 Grundlagen der Automatisierungstechnik

1.1 Einführung

1.1.1 Automatisierung und Automaten

Die Automatisierung ermöglicht eine weitgehend selbsttätige, nämlich *automatische Wirkung*, also ohne den ständig steuernden Eingriff des Menschen.

Die Automatisierungstechnik hat ihren Ursprung schon in vorchristlicher Zeit als sich z. B. mit dem Entzünden eines Altarfeuers die Tempeltüren automatisch öffneten (**Bild 1**).

Heron von Alexandrien entwickelte um 100 v. Chr. einen Automaten (Bild 1) zum selbsttätigen Öffnen und Schließen von Tempeltüren.

Er soll so funktioniert haben: Durch das Tempelfeuer erwärmt sich die Luft in einem geschlossenen Behälter. Über einen Druckbehälter wurde Wasser in ein zweites Gefäß gedrückt, das auf Grund der Schwerkraft sich senkte und dabei die Tempeltüren öffnete. Bei zurückgehender Temperatur strömte durch die wassergefüllte kommunizierende Röhre das Wasser zurück und die Türen haben sich wieder geschlossen.

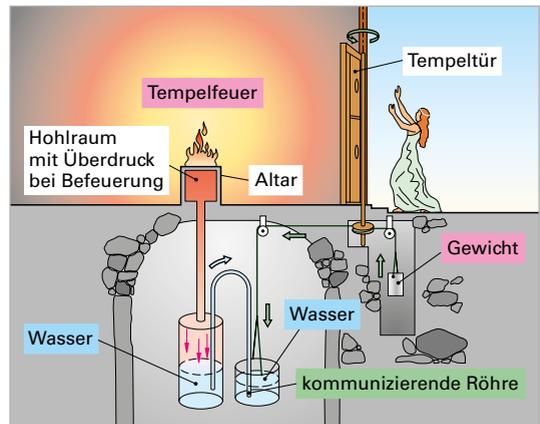


Bild 1: Automatisches Schließen und Öffnen von Tempeltüren, etwa 100 v. Chr.

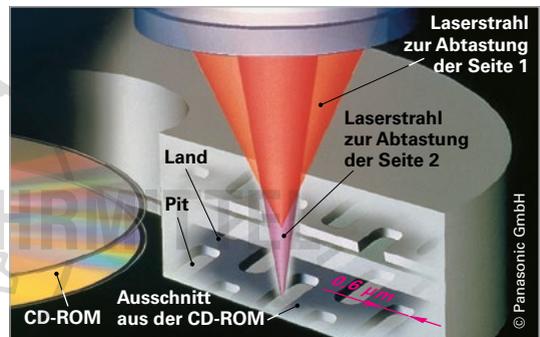


Bild 2: CD-ROM

Bis zum Anfang des letzten Jahrhunderts waren die Automaten mechanische Geräte. Beispiele sind Musikautomaten. Die Steuerungsinformation ist mechanisch auf Steuerwalzen oder Lochbändern gespeichert. Die moderne Form der Steuerwalzen oder der Lochbänder sind die CD-ROMs. Hier gibt es mikroskopisch feine Erhebungen (lands) und Vertiefungen (pits) in denen die Schaltinformation gespeichert ist (**Bild 2**).

Elektrische Antriebe und Elektronik ermöglicht eine Fertigungsautomatisierung mit weitgehend automatisch arbeitenden Maschinen. Die Arbeitsvorgänge sind programmiert und werden Schritt für Schritt ausgeführt. Mit hoher Perfektion wird dies in der Automobilindustrie gemacht (**Bild 3**).

Die Werkstücke, z. B. Motorblöcke oder Karosserieteile, kommen über ein Transportband in die Arbeitsstationen, werden identifiziert und entsprechend dem Kundenwunsch und der Typklasse bearbeitet oder montiert. Die Fertigung ist weitestgehend automatisiert. Der Durchlauf von der „Geburt“ eines Autos bis zu seiner Auslieferung dauert nur einige Stunden. Die eigentlichen Fertigungsprozesse, wie z. B. das Herstellen der Blechteile, das Fertigen des Motorblocks und der Getriebe erfolgt mit *automatisierten Maschinen und Robotern*. Auch die Montage wird zunehmend mit Robotern oder Spezialmaschinen gemacht.



Bild 3: Automatisierung mit Robotern

1.1.2 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 wurde durch Dampfmaschinen ersetzt. Zum Ende des 18. Jahrhunderts kamen als Antriebsaggregate Elektromotoren und Verbrennungsmotoren hinzu. Es entwickelten sich aus den bisherigen Manufakturen Fabriken. Man begann *serienidentische* Teile herzustellen.

Zweite industrielle Revolution

Mit der zweiten industriellen Revolution kam die Massenproduktion und zwar vor allem mit Hilfe elektrisch angetriebener 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.



© Galerie Cyprian Brenner GCB

Bild 1: Der Schmiedehammer, Gemälde von Friedrich von Keller (1887)



© bpk

Bild 2: Der 10.000 Opel läuft vom Band (1931)



© Siemens

Bild 3: NC-Steuerung mit Lochstreifeneingabe (1970)



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

¹ engl. *smart* = geschickt

Systeme der Automatisierung

Die Integration von Computern in die Fertigung (Computer Integrated Manufacturing, **CIM**) hat einen Wandlungsprozess in den Fabriken eingeleitet. Die Informationsspeicherung, die Informationsverarbeitung und die Informationsbereitstellung mit Datenbanken haben mit der 3. Industriellen Revolution einen ungeheuren Aufschwung erlebt. War **CAD** anfangs nur unterstützend (aided) für das Zeichnungswesen, so ist es zu einem Element geworden, das Teile einer Konstruktion auch automatisiert gestaltet, z. B. indem natürliche Wachstumsprozesse nachbildet werden (Bionik) und dabei das Bauteil, abhängig von seinen Belastungen, „wachsen lässt“ (**Bild 1**). Die Herstellung der Produkte geschieht mit Hilfe computergesteuerter Maschinen **CAM** (Computer Aided Manufacturing). Zur Sicherung der Fertigungsqualität werden computergesteuerte Prüfmittel eingesetzt (**CAQ**).

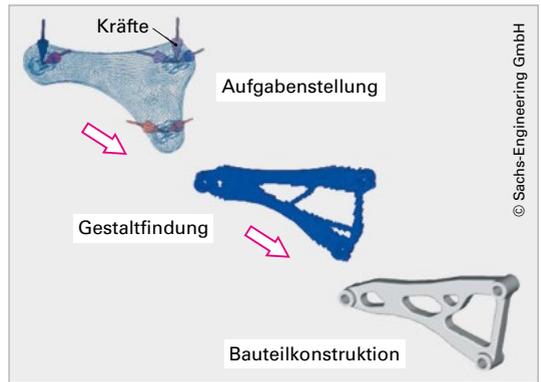


Bild 1: Automatisierte Bauteilentwicklung

PPS und Automatisierung der Geschäftsprozesse

Damit dies alles „reibungslos“, d. h. ohne Störungen abläuft, benötigt man eine ausgeklügelte Organisation. Man sagt dazu *Logistik*¹. Bewältigt wird dies mit einer Computerunterstützung in Form von **Produktionsplanungs- und -steuerungs-Systemen (PPS)**.

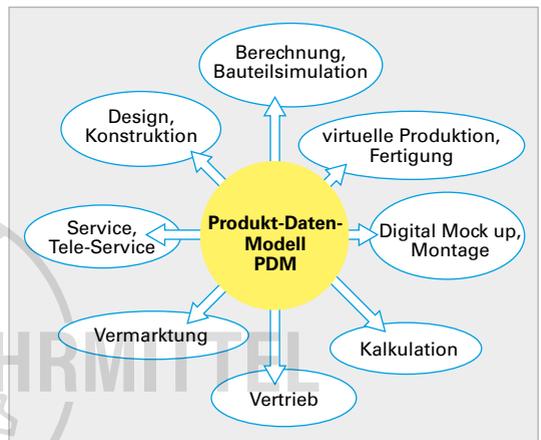


Bild 2: Produkt-Daten-Management

Bauteilentwicklung. Durch *Simulation* können Produkte in allen Phasen, von der Entstehung über die Produktion bis hin zur Nutzung und Verschrottung getestet werden bevor sie wirklich in Produktion gehen. Notwendig ist eine datentechnische Aufbereitung eines solchen Produktlebenszyklus. Man spricht von **Produkt-Daten-Management (PDM)**.

Die Lebenszeit eines Produktes wird von seiner Entstehung bis zu seiner Entsorgung durch das PDM begleitet (**Bild 2**).

Die **Geschäftsprozesse** der Unternehmen, das sind die Aufgaben, welche Unternehmen wahrnehmen, werden mit dem Produkt-Daten-Management so strukturiert, dass der gesamte Produktlebenszyklus durch die betriebliche Informationstechnik begleitet wird.

Das Produktdatenmodell beschreibt das Produkt durch Dateien für:

- die Geometrie insgesamt und die der Einzelteile (**Bild 3**),
- die Stücklisten,
- die Fertigungsvorgänge mit NC-Daten und Roboterprogrammen,
- die Werkstoffe und Prüfprogrammen,
- die Montagevorgänge.

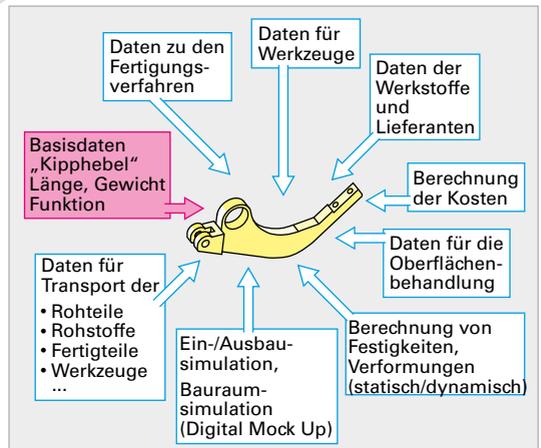


Bild 3: Produktdatenmodell

¹ griech. *logistike* = Rechenkunst, hier: berechneter organisatorischer Ablauf
² griech. *tele* = fern, weit
³ lat. *virtus* = der Möglichkeit nach, hier: mit Hilfe des Computers bildlich dargestellt

Vierte industrielle Revolution

Die vierte industrielle Revolution ist seit etwa dem **Jahr 2000** 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.

Mit Hilfe 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 Algorithmen 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 Malware² (Schadprogramme), welche darauf ausgerichtet sind, Zerstörungen anzurichten und Unheil zu bringen.

¹ Internet von engl. *internetwork* = Zwischennetzwerk, miteinander verbundene Netze

² engl. *malware*, Kunstwort aus engl. *malicious* = bössartig und *software*

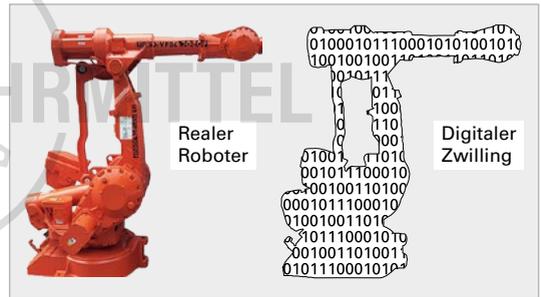
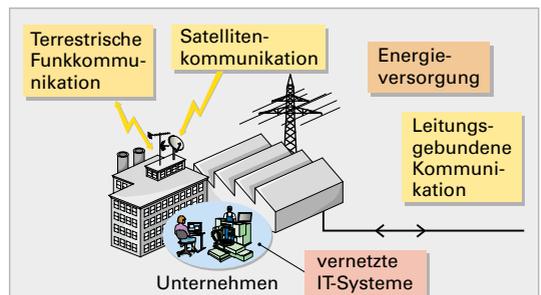


Bild 1: Digitaler Zwilling (Digital Twin)



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

Bild 2: Störungen im IT-Bereich

1.1.3 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,
- Ressourceneffizienz,
- Ergonomie und
- Kundenorientierung.

Die heute übliche Produktionsplanung und -steuerung mit der Vorgabe von Arbeitsschritten könnte abgelöst werden, indem z. B. die Werkstücke die Abläufe selbst organisieren. Rohlinge, Fabrikate und Produkte werden **smart¹**. 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.

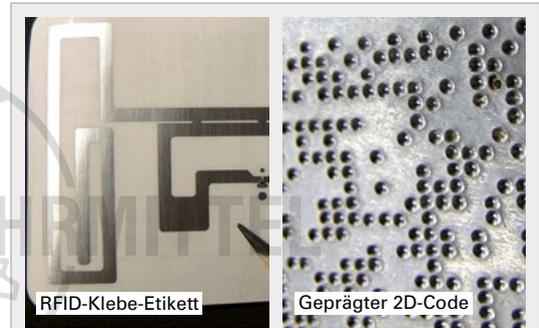


Bild 2: Produktkennung

¹ engl. smart = geschickt, klug

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

³ engl. embedded = eingebettet

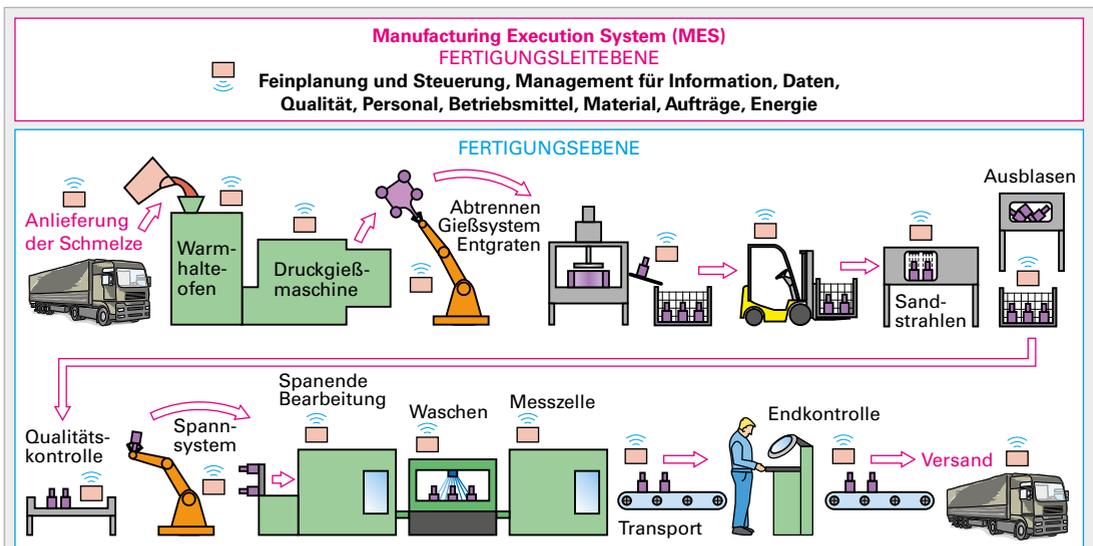


Bild 1: Industrie 4.0 mit Beispiel Gießereibetrieb

1.1.4 Cyber-Physische-Systeme (CPS)

Eine zunehmende Bedeutung haben **Cyber-Physische-Systeme¹ (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 wird. So leiten sich daraus Produktnamen ab, wie z. B. *Smartphone* oder *Smart-TV* für internetfähige Mobiltelefone bzw. Fernsehgeräte.

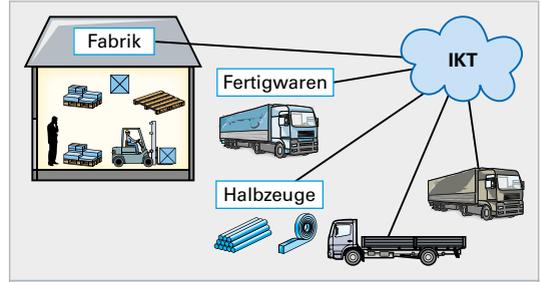


Bild 2: Smart Factory

Cyber-Physische Systeme beschränken sich nicht nur auf Einzelprodukte, sondern gelten auch für Großsysteme wie z. B. die **Smart Factory**. Dies ist eine Fabrik, deren Produktions- und Geschäftsprozesse durch Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) vernetzt sind (**Bild 2**).



Bild 3: Immersion in eine virtuelle 3D-Umgebung

Unter der Überschrift *Smart Production* werden unter anderem die unternehmensübergreifende Produktionslogistik und die Mensch-Maschine-Interaktion in industriellen Anwendungen durch *Immersion* (**Bild 3**) in den Blick genommen. Der Nutzer bewegt sich körperlich inmitten der *Virtuellen Realität* (Virtual Reality, VR). Bei einfacheren Systemen erhält man über eine VR-Brille im Blick auf das wirkliche Umfeld zusätzliche passgenaue Objektdarstellungen oder Textanweisungen. Man spricht von *Erweiterter Realität* (*Augmented³ Reality*, AR). AR verwendet man z. B. bei Inspektionen, Montagen (**Bild 4**) und Reparaturen.



Bild 4: Augmented Reality in der Montage

¹ cyber, altgriechische Vorsilbe für Steuerung... (des Seemanns) – Davon abgeleitet ist die Wissenschaft der Kybernetik = Regelungstechnik und Steuerungstechnik.

² engl. immersion = das Eintauchen

³ engl. to augment = erweitern

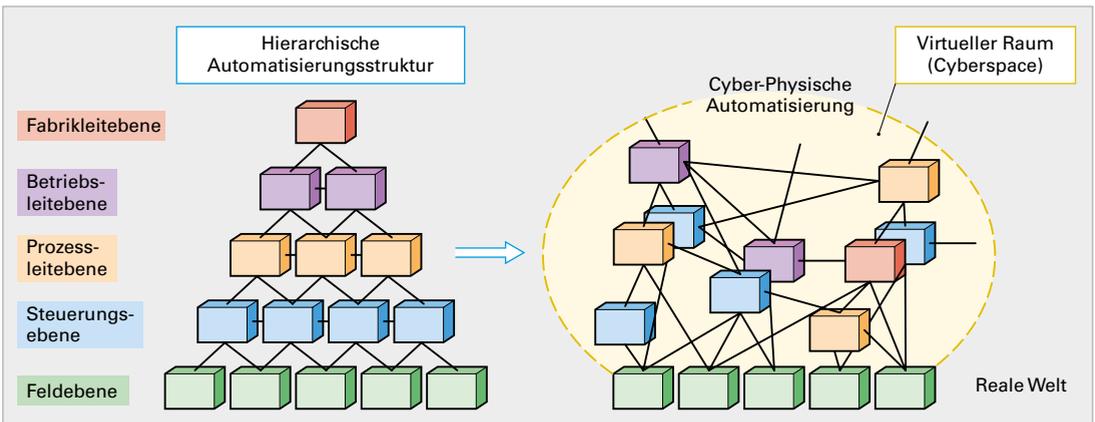


Bild 1: CPS in der Automatisierung

Automatisierungskomponenten

Die Fertigungsautomatisierung ermöglicht eine weitgehend selbsttätige, nämlich automatische **Fertigung**, also ohne den ständig steuernden Eingriff des Menschen.

Der **Automatisierungsgrad** ist um so größer je weniger der Mensch in den Fertigungsprozess eingreifen muss. Die *vollautomatisierte Werkzeugmaschine* führt sowohl alle Arbeitsschritte hinsichtlich des räumlichen *Bewegungsvorganges* als auch hinsichtlich ihrer *Ablauffolge* selbsttätig aus. Der Mensch ist hauptsächlich überwachend tätig. Bei *Teilautomaten* werden *Teilaufgaben*, wie z. B. das Einspannen von Werkstücken, von Hand ausgeführt.

Die Vorteile der Automatisierung sind: **Senkung der Kosten, Erhöhung der Qualität und Humanisierung der Arbeit.**

Unseren heutigen hohen Lebensstandard, mit der gleichfalls hohen Lebenserwartung, verdanken wir im wesentlichen der Automatisierung in der Fertigung. Durch die Automatisierung der Fertigung können mehr Waren bei geringer werdendem Zeitaufwand produziert werden, sodass mehr Menschen im Bereich der Dienstleistungsaufgaben, im Bereich der Wissenschaft und Forschung

tätig werden können. Die Automatisierung ermöglicht ferner eine Gestaltung der Arbeitsplätze, die weitgehend frei sind von schweren Arbeitsbelastungen.

Die Muskelkraft wird durch Motoren ersetzt und die Steuerungsaufgaben, die für den Menschen besonders durch Stress belastend sind, werden von automatisch arbeitenden elektronischen Steuerungen wahrgenommen.

Die **Komponenten (Bild 1)** der Fertigungsautomatisierung sind:

- **Steuerungen**, häufig in Form von **Computern** zur Steuerung des Fertigungsprozesses mit Bedienfeld und Anschluss zu übergeordneten Automatisierungssystemen.
- **Antriebe** (Aktoren) zur Bewegung von Werkstücken und Werkzeugen.
- **Sensoren** zur ständigen Kontrolle des Fertigungsprozesses und zur Signalgebung für den Fertigungsablauf.
- **Software-Bausteine** zur Steuerung, Regelung und Simulation des Fertigungsprozesses.
- **Telekommunikations-Systeme** zur Informationsübertragung, zur Fernsteuerung, zur Fernwartung und zur Fernbeobachtung.



Bild 1: Komponenten der Fertigungsautomatisierung

1.2 Steuerungstechnik

Eine Steuerung erzeugt aufgrund von *Eingangssignalen* und aufgrund seiner *inneren Gesetzmäßigkeit*, z. B. einer Schaltung oder eines Programms, *Ausgangssignale* für die Aktoren, für das Anzeigefeld und für andere Steuerungen.

Die **innere Gesetzmäßigkeit** bestimmt die Ausgangssignale in Abhängigkeit von der Information der Eingangssignale und in Abhängigkeit von dem bisherigen Prozessgeschehen. Demnach enthalten Steuerungen Bausteine oder *Funktionen* zur Entschlüsselung und Bewertung von Eingangssignalen und *Speicher* (Gedächtnisse, Merker) für vorangegangene Ereignisse (**Bild 1**).

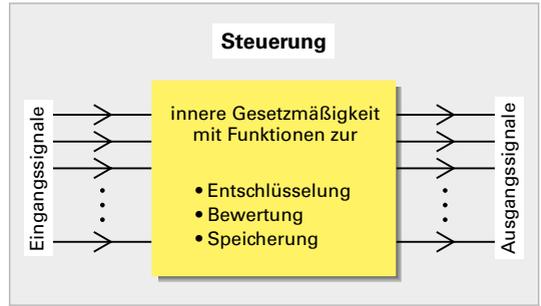


Bild 1: Struktur einer Steuerung

1.2.1 Steuerungsarten

Nach Art der Signalverarbeitung unterscheidet man zwischen **analogen Steuerungen**, **binären Steuerungen** und **digitalen Steuerungen** (**Tabelle 1**).

Tabelle 1: Steuerungsarten																																										
Art	Signalardarstellung	Beispiele																																								
Analoge Steuerung		Steuerung mit Kurvenscheibe																																								
Binäre Steuerung		Steuerung mit Schaltern und Relais																																								
Digitale Steuerung	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>1</td><td>3</td><td>2</td><td>4</td><td>10</td><td>4</td><td>9</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> </table>	0	1	3	2	4	10	4	9	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	Winkelcodierer
0	1	3	2	4	10	4	9																																			
0	0	1	0	0	0	0	1																																			
0	0	1	0	0	1	0	1																																			
0	1	0	1	0	0	0	1																																			
0	1	0	0	1	0	0	1																																			

Analoge Steuerungen

Bei analog arbeitenden Steuerungen werden die Ausgangssignale mit Hilfe eines **analogen Signalumformers** gebildet, z. B. wird die Vorschubbewegung für ein Werkzeug über eine **Kurvenscheibe** (**Bild 2**) gesteuert. Das Eingangssignal ist der Drehwinkel der Kurvenscheibe. Die Kurvenscheibe wird z. B. mit einem langsam laufenden Motor gleichmäßig gedreht. Ausgangsgröße ist die Vorschubbewegung des Werkzeugs, entsprechend der Steigung der Kurvenscheibe.

Analoge Steuerungen werden immer weniger zur Automatisierung der Fertigung eingesetzt, da die Veränderung der *inneren Gesetzmäßigkeit* nur durch Austausch von Bauelementen, z. B. Kurvenscheiben, vorgenommen werden kann und somit teuer und zeitaufwendig ist.

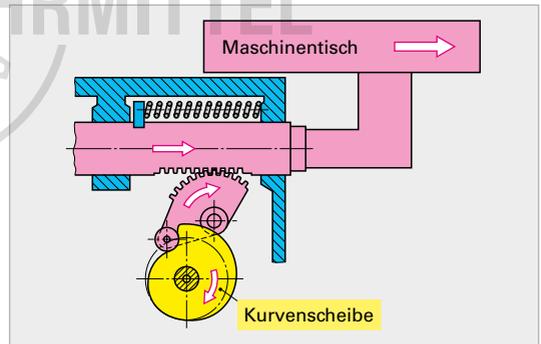


Bild 2: Analoge Steuerung

Binäre Steuerungen

Binäre Steuerungen arbeiten mit Binärsignalen. Binärsignale sind **zweiwertige Signale**, also Schaltsignale mit den Eigenschaften EIN/AUS bzw. mathematisch ausgedrückt mit den Werten 1 und 0.

Beispiel: Der Vorschubtisch einer Schleifmaschine soll ständig hin- und herfahren (**Bild 3**). Über einen Umschalter kann durch eine positive Motorspannung der Tisch nach rechts gesteuert werden. Trifft der am Tisch befestigte Nocken 1 auf den Umschalter, wird der Tisch über die negative Motorspannung nach links bewegt, bis der Nocken 2 wieder auf die Gegenbewegung umschaltet.

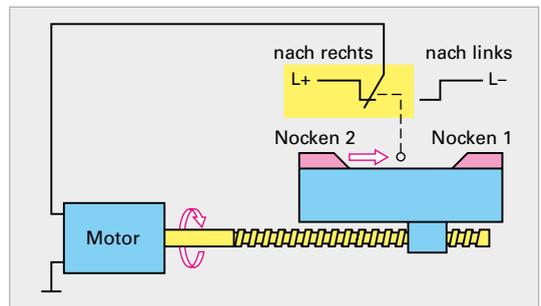


Bild 3: Binäre Steuerung eines Vorschubantriebs für eine Schleifmaschine

Werden aus der Kombination mehrerer Eingangssignale die Steuerungssignale erzeugt, so spricht man von **kombinatorischen Steuerungen** oder von Verknüpfungssteuerungen.

Beispiel für eine kombinatorische Steuerung

Voraussetzung für das Zünden des Schweißbrenners in einer Roboterarbeitszelle ist, dass die Zellentüre geschlossen ist, dass die Kühlwasserpumpe läuft, dass der Roboter „betriebsbereit“ meldet und dass die Überwachung für den Drahtvorschub keine Störung meldet. Erst die vollständige Kombination dieser einzelnen Bedingungen führt zur Zündfreigabe (**Bild 1**).

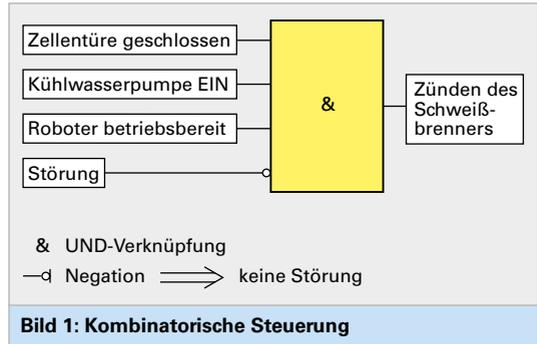


Bild 1: Kombinatorische Steuerung

Häufig ist ein **schrittweiser Ablauf** zu steuern. Dann wird abhängig von dem vorhergehenden Schritt und nach Erfüllung von **Weiterschaltbedingungen** der Folgeschritt ausgelöst. Man spricht von **Ablaufsteuerungen**. Hängen die Weiterschaltbedingungen nur von der Zeit ab, heißen diese Steuerungen **zeitgeführte Ablaufsteuerungen**. So ist z. B. die Steuerung für das langsame Hochlaufen großer Motoren zeitgeführt, wenn abhängig von einer Zeitschaltuhr (**Bild 2**) die Motorspannung schrittweise erhöht wird. Erfolgt die Steuerung der Motorspannung jedoch abhängig von der jeweils erreichten und gemessenen Drehzahl, so spricht man von einer **prozessabhängigen Ablaufsteuerung** (**Bild 3**).

Digitale Steuerungen

In digitalen Steuerungen erfolgt die Signalverarbeitung vorwiegend mit **Zahlen**. So gehören alle numerischen Werkzeugmaschinensteuerungen zu den digitalen Steuerungen (**Bild 4**). Die Verschlüsselung der Zahlen und das Verarbeiten der Zahlen erfolgt meist in Form **binärer Codes** mit **Mikroprozessoren** und **Computern**.

In digitalen Steuerungen erfolgt die Signalverarbeitung mit Zahlen

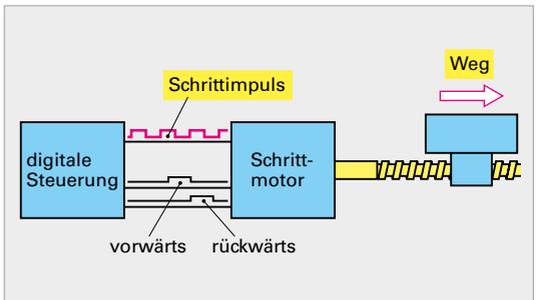


Bild 4: Digital gesteuerter Vorschubantrieb

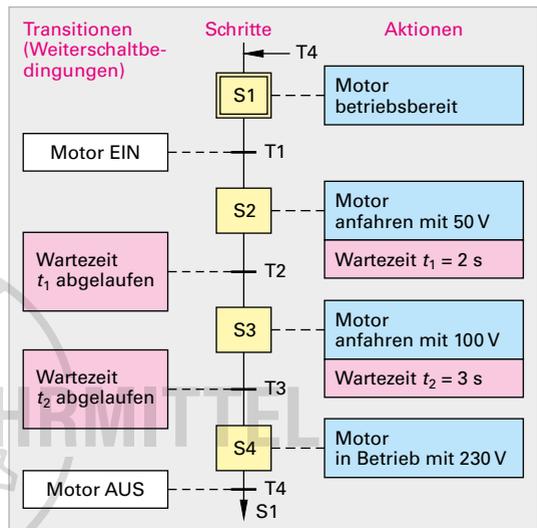


Bild 2: Zeitgeführte Ablaufsteuerung

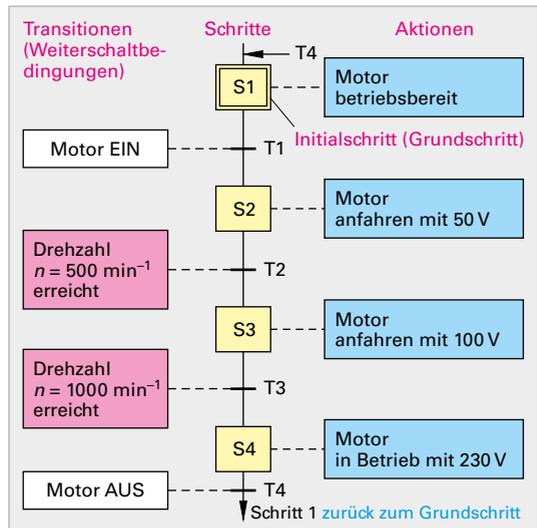


Bild 3: Prozessabhängige Ablaufsteuerung

Codierungen in digitalen Steuerungen

Der meistbenutzte Code ist der **Dualcode** (BCN von Binary Coded Natural = natürlicher Binär-code). Der Dualcode ist ein Zahlencode mit der Basis $B = 2$. Alle Zahlenwerte können durch eine Folge mit Ziffern 1 und 0 ausgedrückt werden, wobei der Stellenwert der 1-Ziffern Potenzen von 2 entspricht und zwar links vom Komma $2^0, 2^1, 2^2 \dots$ und rechts vom Komma $2^{-1}, 2^{-2}, 2^{-3} \dots$. Wenn eine solche 2er-Potenz berücksichtigt wird, schreibt man in die jeweilige Stelle eine 1 sonst eine 0. Diese Ziffern nennt man Binärziffern (binary digit) oder abgekürzt Bit (Mehrzahl: Bits).

Beispiel: Beispiel: Bestimmen Sie die zur Dualzahl 1101,01 gleichwertige Dezimalzahl!

Lösung:

$$\begin{aligned}
 1101,01 &\hat{=} 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 + 0 \cdot 2^{-1} + 1 \cdot 2^{-2} \\
 &= 8 + 4 + 1 + 0,25 \\
 &= 13,25
 \end{aligned}$$

Das Rechnen mit Dualzahlen geschieht ähnlich wie im Dezimalzahlensystem (**Tabelle 1**).

Man kann mit n Bits 2^n Zeichen darstellen.

Mit 4 Bits kann man $2^4 = 16$ verschiedene Zeichen darstellen, z. B. die Zahlen 0 bis 15. Will man positive und negative Zahlen darstellen, dann benötigt man ein weiteres Bit. Die Darstellung negativer Zahlen geschieht durch Komplementbildung. Die Zahlen in der linken Hälfte des Zahlenrings (**Bild 1**) sind die negativen Zahlen.

Neben dem Dualcode gibt es eine Vielzahl weiterer Codierungen. Im **Gray-Code**¹ wechselt von einer Ziffer zur nächsten immer nur 1 Bit (**Tabelle 2**). Der Gray-Code ist daher gut geeignet zur Zahlendarstellung auf Codelinealen und Codescheiben.

Will man Dezimalzahlen direkt binär darstellen, dann verschlüsselt man jede einzelne Ziffer durch einen **BCD-Code** (binary coded decimal = binäre Dezimalverschlüsselung). Man benötigt für jede Ziffer einer Dezimalzahl eine binäre Zahl mit mindestens 4 Bits.

Bei der **8-4-2-1-Codierung** (Tabelle 2) wird jede Dezimalziffer durch die entsprechende Dualzahl ausgedrückt. Es gibt eine Vielzahl von BCD-Codes. Beim **2-aus-5-Code** (Tabelle 2) müssen z. B. immer 2 Bits mit dem Wert 1 vorhanden sein. Codes die mehr Bits für eine Verschlüsselung verwenden als notwendig sind heißen weitschweifig (redundant).

Tabelle 1: Rechnen mit Dualzahlen			
Grundregeln:			
$0 + 0 = 0$	$0 - 0 = 0$	$0 \cdot 0 = 0$	$0 : 1 = 0$
$1 + 0 = 1$	$1 - 0 = 1$	$0 \cdot 1 = 0$	$1 : 1 = 1$
$0 + 1 = 1$	$1 - 1 = 0$	$1 \cdot 0 = 0$	
$1 + 1 = 0$	$0 - 1 = 1$	$1 \cdot 1 = 1$	
plus Übertrag 1 in die nächste Stelle		und belaste die nächste Stelle mit 1	
Beispiele:			
$6 + 5 = 11$ 110 + 101 1011 $\hat{=} 11$	$11 - 5 = 6$ 1011 - 1101 110 $\hat{=} 6$	$6 \cdot 5 = 30$ 110 · 101 110 000 110 11110 $\hat{=} 30$	

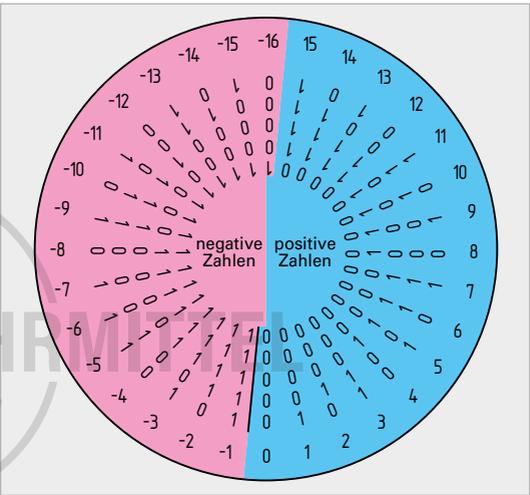


Bild 1: Zahlenring für 4-Bit-Zahlendarstellung

Tabelle 2: Codierungen (Beispiele)				
Dezimalzahl	Dualcode	Gray-code	8-4-2-1-Code	2-aus-5-Code
0	0000	0000	1000	0000
1	0001	0001	1001	0001
2	0010	0010	1010	0010
3	0011	0011	1011	0011
4	0100	0100	1100	0100
5	0101	0101	1101	0101
6	0110	0110	1110	0110
7	0111	0111	1111	0111
8	1000	1000	0100	1000
9	1001	1001	0101	1001
10	1010	1010	0110	1010
11	1011	1011	0111	1011
12	1100	1100	1000	1100
13	1101	1101	1001	1101
14	1110	1110	1010	1110
15	1111	1111	1011	1111
Stellenwert	8 4 2 1	kein	8 4 2 1	7 4 2 1 0

¹ Frank Gray, amerik. Wissenschaftler (1887 bis 1969)

1.2.2 Programmsteuerungen

Bei Steuerungen für automatisch ablaufende Fertigungsvorgänge unterscheidet man zwischen *verbindungsprogrammierten* Steuerungen, *speicherprogrammierten* Steuerungen und *frei programmierten* Steuerungen (Tabelle 1).

Verbindungsprogrammierte Steuerung (VPS)

Bei einer verbindungsprogrammierten Steuerung ist das Programm durch die *Wahl der Bauelemente* und deren *Verdrahtung* (Verbindung) festgelegt (Bild 1). Die Steuerung wird z. B. für einen ganz bestimmten Fertigungsprozess entwickelt und in Form einer Elektronikplatine hergestellt. Eine solche Steuerung hat Einzelfachcharakter und kann nicht für andere Aufgaben verwendet werden.

Bei der VPS werden die Steuerungseigenschaften durch die Bauelemente und ihre Verbindung festgelegt.

Speicherprogrammierte Steuerung (SPS)

Eine speicherprogrammierte Steuerung¹ (Bild 2) enthält intern Mikroprozessoren und erzeugt die *Steuersignale abhängig* von einem Programm, das in einem Programmspeicher gespeichert ist. Der Steuerungsaufgabe muss somit nur das Programm angepasst werden, jedoch nicht die Steuerungshardware. Diese ist universell verwendbar. Speicherprogrammierte Steuerungen können also leicht an unterschiedliche Anforderungen angepasst werden, nämlich einfach durch Austausch der Programme. Die meisten Steuerungen zur Fertigungsautomatisierung sind speicherprogrammierte Steuerungen.

Bei der SPS werden die Steuerungseigenschaften durch ein Programm in einem elektronischen Programmspeicher festgelegt.

Freiprogrammierbare Steuerungen

Eine freiprogrammierbare Steuerung enthält im Unterschied zur speicherprogrammierten Steuerung einen Mikroprozessor mit Schreib-Lese-Speicher.

Freiprogrammierbare Steuerungen sind meist Steuerungen mit Mikrocomputern oder Industrie-PCs.

Tabelle 1: Programmverwirklichung		
	Art	Beispiel
Verbindungsprogrammiert VPS	fest-programmierbar	Relaissteuerung
	um-programmierbar	Programmsteuerung mit Steckerfeld
Speicherprogrammiert SPS <small>engl. Programmable Logic Controller PLC</small>	austausch-programmierbar	SPS mit EPROM ¹
	frei-programmierbar	SPS mit EEPROM ² oder mit RAM ³

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

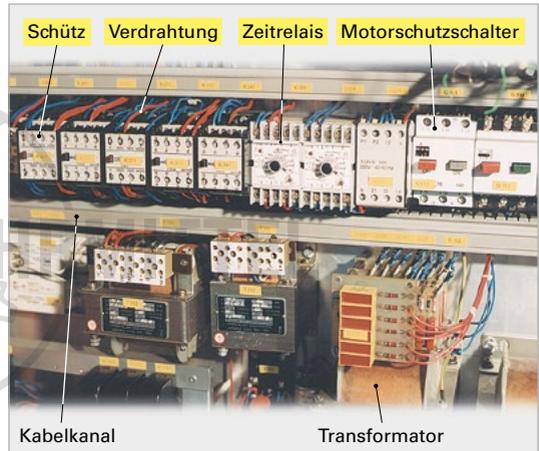


Bild 1: Verbindungsprogrammierte Steuerung (VPS)

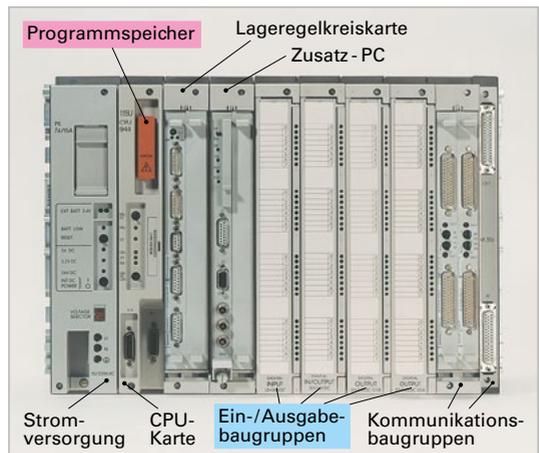


Bild 2: Speicherprogrammierte Steuerung (SPS)

¹ Die in Bild 2 dargestellte SPS stammt aus der Zeit um 1990. Hier ersieht man im Unterschied zu den heutigen Modellen den strukturellen SPS-Aufbau mit den einzelnen Funktionseinheiten.

1.2.3 Elektrische Kontaktsteuerungen

1.2.3.1 Bauelemente und Betriebsmittel

Die wichtigsten Bauelemente elektrischer Kontaktsteuerungen sind: Schaltgeräte, Steckvorrichtungen, Leitungsverbindungen und Anzeigergeräte (**Bild 1**). **Schaltpläne** dienen der übersichtlichen Darstellung einer elektrischen Steuerung. In ihnen wird die Funktion der Bauelemente durch genormte Sinnbilder, die man **Schaltzeichen** nennt, wiedergegeben. Die Schaltzeichen geben grundsätzlich den Zustand des unbetätigten Schaltgerätes an.

Zur **Kennzeichnung** der Betriebsmittel in Schaltplänen verwendet man eine alphanumerische Kennzeichnung. Sie besteht allgemein aus mehreren Zeichen (siehe Seite 134). In der vereinfachten Form wird zur Kennzeichnung elektrischer Betriebsmittel in Schaltplänen ein einzelnes **Buchstabensymbol** nach (**Tabelle 1**) mit angehängter laufender Nummer xx verwendet, z. B. S1 für den Schalter 1 und M1 für den Motor 1.

Schaltkontakte werden z. B. von Hand, durch Nocken oder durch Fernbedienung betätigt. Die Fernbedienung erfolgt meist durch elektromagnetische Kraft, wie beim Relais, Schütz und Schrittschaltwerk.

Bei den Schaltkontakten gibt es **Schließer**, die bei Betätigung des Schalters einen Stromkreis schließen, und **Öffner**, die einen Stromkreis unterbrechen.

Nach Art der Schalterbetätigung unterscheidet man **Tastschalter**, **Stellschalter** und **Schlossschalter**.

Tastschalter

Druckknopftastschalter, kurz Taster genannt, wie z. B. ein Klingelknopf, wirken nur während der Dauer ihrer Betätigung. Die Kontaktgabe oder Unterbrechung erfolgt über bewegliche Schaltstücke, die z. B. von Hand betätigt werden (**Bild 2**). Taster enthalten oft mehrere Kontakte, z. B. 3 Schließer und 3 Öffner. Eine Feder, die bei Betätigung gespannt wird, bringt die Schaltstücke in ihre Ausgangslage, wenn die Betätigung aufhört. Die Taster dienen oft gleichzeitig als Leuchtmelder (Signal-Lampe).

Mit **Positionsschaltern (Grenztastern)**, die über Nocken betätigt werden, wird das Erreichen von Grenz- und Endlagen beweglicher Maschinenteile, z. B. von Werkzeugmaschinen Schlitten, signalisiert. Die Positionsschalter sind mit Sprungschaltern (Mikroschalter) ausgestattet, damit man auch bei sehr langsamer Betätigung eine plötzliche Kontaktgabe oder Kontaktunterbrechung erhält (**Bild 3**).

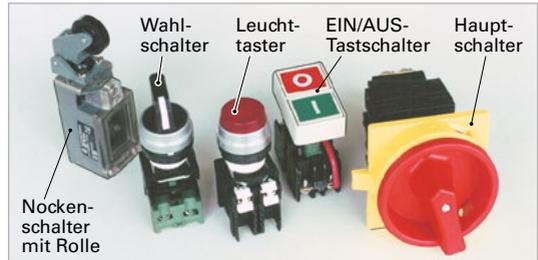


Bild 1: Schalter

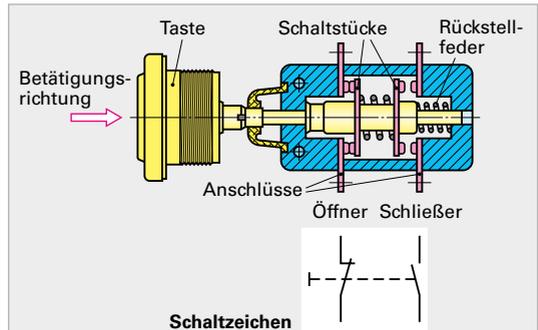


Bild 2: Druckknopftastschalter (Taster)

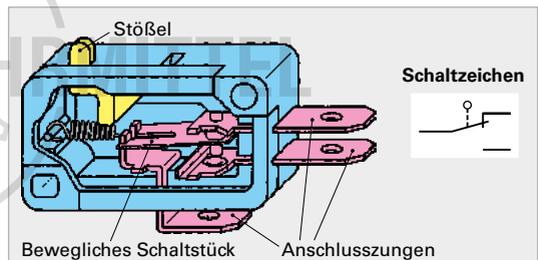


Bild 3: Schaltdifferenz bei Nockenschaltern

Tabelle 1: Kennbuchstaben nach DIN EN 81346

ver-einfacht	voll-ständig	Beispiele für elektrische Steuerungen
B	-BF	Sensor, Näherungsschalter
F	-FF	Sicherung, Schutzschalter
G	-GA	Generator, Batterie, Akku
K	-KF	Relais, Hilfsschütz, Schalttransistor
M	-MA	Motor, Hubmagnet, Stellantrieb
P	-PF	Signalgeber, Signallampe, Hupe
Q	-QA	Leistungsschütz, Kupplung, Trennschalter
S	-SF	Steuerschalter, Taster
X	-XF	Klemme, Klemmleiste, Steckverbinder

Für eine umfassende Darstellung siehe Seite 29 und 139