



Bibliothek des technischen Wissens

Dietmar Schmid  
Peter Strobel

Hans Kaufmann  
Jürgen Baur

Alexander Pflug

# Automatisierungstechnik

## Grundlagen, Komponenten und Systeme

12., überarbeitete und erweiterte Auflage  
mit DVD für Bilder, Übungen, Aufgaben und Simulationen

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

**Europa-Nr.: 51518**

**Die Autoren des Buches**

Dietmar Schmid	Dr.-Ing., Professor	Essingen
Hans Kaufmann	Dipl.-Ing. (FH), Studiendirektor	Aalen
Alexander Pflug	Dipl.-Ing., Oberstudienrat	Schwäbisch Gmünd
Peter Strobel	Dipl.-Ing. (FH), Geschäftsführer	Aalen
Jürgen Baur	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.

12. Auflage 2017

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 978-3-8085-5163-9

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

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

Satz und Layout: Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpar  
Umschlag: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald & Grafik u. Sound, 50679 Köln  
Umschlagfoto: Fotos des Lektors  
Druck: Media-Print Informationstechnologie GmbH, 33100 Paderborn

## Vorwort zur 12. Auflage

Die Automatisierungstechnik ist der Motor unserer modernen Gesellschaft. Die Komponenten dazu sind mechanische, elektrische, elektronische und optische Elemente der Steuerungstechnik, der Antriebstechnik, der Sensorik und der Kommunikationstechnik. Hinzu kommen Software-Bausteine und die Anwendung von Programmsystemen, wie z. B. LabVIEW sowie das Programmieren z. B. in C++, Java oder VBA.

Mit diesem Buch werden die technisch-physikalischen Grundlagen der Steuerungs- und Regelungstechnik vermittelt. Es werden Hard- und Softwarekomponenten der Automatisierung behandelt und in die moderne Systemwelt der Produktion und der Kommunikation einordnet.

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 Automatisierungstechnik und 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 beigefügten DVD werden den Lehrenden und Lernenden alle Bilder, Lösungen zu den Aufgaben und eine Vielzahl von Softwaretools, Simulationen und animierbaren Objekten zur Verfügung gestellt<sup>1</sup>. 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.

In der **12. Auflage** gibt es in allen Kapiteln Einzelverbesserungen, zum Teil sind die Kapitel auch neu strukturiert. Die wichtigsten Neuerungen sind: **Industrie 4.0** mit Erweiterungen und einem konkreten **i4.0-Projekt „Werkstücke prägen“**. Hier werden auch die Vernetzung und das Steuern via **Smartphone** und **Tablet** beispielhaft gezeigt. Die SPS-Technik wurde um die Kleinsteuerung **LOGO!8** ergänzt. Neu hinzugekommen ist ein eigenes Kapitel für **mechatronische Aktoren**. Dabei handelt es sich um die sehr unterschiedlichen piezoelektrisch, elektrostatisch, elektromagnetisch, thermisch und rheologisch wirkenden Aktoren. Ebenfalls neu ist das Kapitel **3D-Scannen**, gewissermaßen als Pendant zum Kapitel **3D-Drucken**. Die Kommunikationstechnik wurde aktualisiert und um **Firewire** und **IO-Link** ergänzt.

Hinweise und Verbesserungsvorschläge können dem Verlag und damit den Autoren unter der E-Mail-Adresse [lektorat@europa-lehrmittel.de](mailto:lektorat@europa-lehrmittel.de) mitgeteilt werden.

Sommer 2017

Die Autoren

<sup>1</sup> 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 beigefügten 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

<b>1</b>	<b>Grundlagen der Automatisierungstechnik</b>	<b>9</b>
<b>1.1</b>	<b>Einführung</b>	<b>9</b>
1.1.1	Automatisierung und Automaten	9
1.1.2	Entwicklungsphasen industrieller Technik	10
1.1.3	Industrie 4.0	13
1.1.4	Cyber-Physische-Systeme (CPS)	14
<b>1.2</b>	<b>Steuerungstechnik</b>	<b>16</b>
1.2.1	Steuerungsarten	16
1.2.2	Programmsteuerungen	19
1.2.3	Elektrische Kontaktsteuerungen	20
1.2.3.1	Bauelemente und Betriebsmittel	20
1.2.4	Schutzmaßnahmen	31
1.2.4.1	Gefahren	31
1.2.4.2	Schutzauszeichnung	31
1.2.4.3	Schutzklassen	32
1.2.4.3	Fehlerstrom-Schutzschalter (FI-Schalter, RCD <sup>1</sup> )	33
1.2.4.4	Elektrostatische Entladungen (ESD <sup>1</sup> )	35
1.2.4.5	Sicherheitsfunktionen	36
1.2.5	Grundschaltungen	37
1.2.6	Integrierte Schaltkreise (IC) und Grundverknüpfungen	40
1.2.7	Schaltalgebra	41
1.2.8	Kombinatorische Steuerungen	42
1.2.9	Sequentielle <sup>1</sup> Steuerungen	45
1.2.10	GRAFCET	46
1.2.11	Sequentielle Steuerungen mit Flip-Flop	52
1.2.12	Zustandsfolgediagramm (Graph)	54
<b>1.3</b>	<b>Digitale Speicher</b>	<b>57</b>
1.3.1	Mechanische Speicher	57
1.3.2	Optische Datenspeicher	58
1.3.2.1	Barcodes	58
1.3.2.2	2D-Codes	59
1.3.3	Elektronische Speicher	60
1.3.4	Magnetische Speicher	62
<b>1.4</b>	<b>Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS)</b>	<b>63</b>
1.4.1	Aufbau und Funktionsweise	63
1.4.2	Systemaufbau	65
1.4.3	Programmierung	66
1.4.4	Programmabarbeitung, Organisationsbausteine	68
1.4.5	Adressierung und Datentypen	69
1.4.6	Grundverknüpfungen	70
1.4.7	Speicher (Merker)	73
1.4.8	Flankenauswertung	75
1.4.9	Zähloperationen	77
1.4.10	Programmieren von Zeiten	79
1.4.11	Digitale Grundoperationen (Wortverarbeitung)	82
1.4.12	Analogwertverarbeitung	85
1.4.13	Funktionen (FC) und Funktionsbausteine (FB)	87
1.4.14	Datenbausteine	89
1.4.15	Ablaufsteuerung	90
1.4.16	Betriebsarten	94
1.4.17	Kleinsteuerung LOGO!	97
1.4.18	Bedienen und Beobachten mit WINCC	101
1.4.19	Prozess-Simulation	105
1.4.20	IEC 61131	108
1.4.21	Zuverlässigkeit und Sicherheit	109
<b>1.5</b>	<b>Grundlagen der Analogsignalverarbeitung</b>	<b>110</b>
1.5.1	Operationsverstärker (OP)	110
1.5.2	Grundschaltungen	111
1.5.3	Analog-Digital-Umsetzer und Digital-Analog-Umsetzer	114
<b>1.6</b>	<b>Regelungstechnik</b>	<b>116</b>
1.6.1	Begriffe	116
1.6.2	Regelungsarten	117
1.6.3	Regelkreisglieder	119
1.6.3.1	Proportionalglied ohne Verzögerung (P-Glied)	119
1.6.3.2	Proportionalglied mit Verzögerung 1. Ordnung (P-T <sub>1</sub> -Glied)	120
1.6.3.3	Proportionalglied mit Verzögerung 2. Ordnung (P-T <sub>2</sub> -Glied) und Schwingungsglied	121
1.6.3.4	Integralglied (I-Glied)	124
1.6.3.5	Differenzierglied (D-Glied)	125
1.6.3.6	Totzeitglied (T <sub>t</sub> -Glied)	125
1.6.3.7	Zusammenwirken mehrerer Regelkreisglieder	127
1.6.4	Regler und Regelkreise	128
1.6.4.1	Schaltende Regler	128
1.6.4.2	Analoge Regler	129
1.6.4.3	Digitale Regler (Software-Regler)	131
1.6.4.4	Regelung von P-Strecken	134
1.6.4.5	Regelung von I-Strecken	135
1.6.4.6	Einstellen eines Reglers	137
1.6.4.7	Selbstoptimierende Regler	138
<b>1.7</b>	<b>Schaltpläne</b>	<b>139</b>
1.7.1	Strukturierung	139
1.7.2	Referenzkennzeichen	141
1.7.3	Schaltplanerstellen mit FluidSIM®	143
1.7.4	Steuern und Regeln mit FluidSIM®	144
<b>2</b>	<b>Aktoren</b>	<b>145</b>
<b>2.1</b>	<b>Pneumatische Aktoren</b>	<b>145</b>
2.1.1	Einführung	145
2.1.2	Komponenten der Pneumatik	146
2.1.2.1	Wartungsgeräte	146

2.1.2.2	Aktoren . . . . .	147	2.4.2	Tauchspulenantriebe . . . . .	232
2.1.2.3	Ventile . . . . .	150	2.3.3	Magnetostriktive Aktoren . . . . .	232
2.1.2.4	Signalgeber und Signalwandler . . . . .	155	2.4.4	Kapazitive Mikroaktoren . . . . .	233
2.1.3	Pneumatische Steuerungen . . . . .	156	2.4.5	Thermische Aktoren . . . . .	234
2.1.3.1	Schaltplanaufbau . . . . .	156	2.4.5.1	Thermobimetall-Aktoren . . . . .	234
2.1.3.2	Pneumatische Verknüpfungssteuerungen . . . . .	158	2.4.5.2	Dehnstoff-Aktoren . . . . .	235
2.1.3.3	Pneumatische Ablaufsteuerungen . . . . .	160	2.4.5.3	Memory-Metall-Aktoren . . . . .	235
2.1.3.4	Elektrische Ansteuerung von Aktoren	161	2.4.6	MRF-Aktoren . . . . .	236
2.1.3.5	Vakuumtechnik . . . . .	164	<b>2.5</b>	<b>CNC-Achsantriebssysteme . . . . .</b>	<b>237</b>
2.1.3.6	Sicherheitsfunktionen . . . . .	165	2.5.1	Struktur . . . . .	237
2.1.3.7	Energieeffizienz . . . . .	166	2.5.2	Art der Wegmessung . . . . .	237
<b>2.2</b>	<b>Hydraulische Aktoren . . . . .</b>	<b>167</b>	2.5.3	Antriebsarten . . . . .	239
2.2.1	Allgemeines . . . . .	167	2.5.4	Mechanische Übertragungsglieder .	240
2.2.2	Physikalische Grundlagen . . . . .	167	2.4.5	Lageregelung . . . . .	242
2.2.2.1	Hydrostatik . . . . .	167	<b>3</b>	<b>Sensoren . . . . .</b>	<b>244</b>
2.2.2.2	Hydrodynamik . . . . .	169	<b>3.1</b>	<b>Allgemeines . . . . .</b>	<b>244</b>
2.2.3	Hydraulikflüssigkeiten . . . . .	170	<b>3.2</b>	<b>Sensoren für Wege, Winkel und Abstände . . . . .</b>	<b>245</b>
2.2.4	Aufbau hydraulischer Steuerungen	172	3.2.1	Sensorsignale durch Widerstandsänderung . . . . .	245
2.2.5	Hydraulikpumpen . . . . .	173	3.2.2	Sensorsignale durch magnetische Kopplung . . . . .	250
2.2.6	Hydraulikspeicher . . . . .	175	3.2.3	Sensorsignale mittels magnetischer und elektrischer Felder . . . . .	251
2.2.7	Antriebselemente . . . . .	177	3.2.4	Sensoren zur Füllstandsmessung . . . . .	252
2.2.8	Hydraulikventile . . . . .	180	3.2.5	Optische Sensoren . . . . .	253
2.2.8.1	Druckventile . . . . .	180	3.2.6	Sensorsignale durch Laufzeitmessung . . . . .	257
2.2.8.2	Wegeventile . . . . .	183	3.2.7	Näherungsempfindliche Schalter (binäre Sensoren) . . . . .	259
2.2.8.3	Sperrenventile . . . . .	184	3.2.8	Digitale Weg- und Winkelmessung . . . . .	260
2.2.8.4	Stromventile . . . . .	185	3.2.8.1	Inkrementale Weg- und Winkelmessung . . . . .	260
2.2.9	Stetigventile . . . . .	187	3.2.8.2	Absolute Weg- und Winkelmessung . . . . .	264
2.2.10	Proportionaltechnik . . . . .	188	3.2.8.3	Zyklisch analoge Weg- und Winkelmessung . . . . .	265
2.2.11	Servoventile . . . . .	195	3.2.8.4	Berührungsloses Messen mit Autofokus-Systemen . . . . .	266
2.2.12	Mobilhydraulik . . . . .	197	3.3	Geschwindigkeitssensoren . . . . .	267
<b>2.3</b>	<b>Elektrische Aktoren . . . . .</b>	<b>198</b>	<b>3.4</b>	<b>Sensoren für Dehnungen, Kräfte, Drehmomente und Drücke . . . . .</b>	<b>268</b>
2.3.1	Einführung . . . . .	198	<b>3.5</b>	<b>Beschleunigungssensoren . . . . .</b>	<b>272</b>
2.3.2	Rechnerische Grundlagen . . . . .	200	<b>3.6</b>	<b>Temperatursensoren . . . . .</b>	<b>273</b>
2.3.3	Erste Orientierung . . . . .	203	<b>3.7</b>	<b>Sensoren für elektrische Größen (Messumformer) . . . . .</b>	<b>276</b>
2.3.4	Gleichstromantriebe (DC-Antriebe)	204	<b>3.8</b>	<b>Sensoren zur Sicherheitstechnik . . . . .</b>	<b>277</b>
2.3.5	Drehstromasynchronmotor . . . . .	210	<b>3.9</b>	<b>Störungen in Sensorleitungen . . . . .</b>	<b>280</b>
2.3.5.1	Aufbau des Kurzschlussläufers . . . . .	210	<b>4</b>	<b>Computergesteuerte Maschinen . . . . .</b>	<b>282</b>
2.3.5.2	Das Drehfeld . . . . .	211	<b>4.1</b>	<b>CNC-Werkzeugmaschinen . . . . .</b>	<b>282</b>
2.3.5.3	Funktionsweise . . . . .	212	4.1.1	Der Produktionsprozess . . . . .	282
2.3.5.4	Anlasssteuerungen . . . . .	213	4.1.2	NC-Achsen und deren Steuerung . .	285
2.3.5.5	Drehrichtungsumkehr . . . . .	214			
2.3.5.6	Betriebsarten und Fahrprofile . . . . .	214			
2.3.5.7	Drehzahlsteuerung und Drehzahlregelung . . . . .	215			
2.3.6	Drehstromsynchrongenerator . . . . .	219			
2.3.6.1	Servoantriebe . . . . .	219			
2.3.6	Direktantriebe . . . . .	220			
2.3.7	Kühlung und Bauformen . . . . .	223			
2.3.8	Antriebsprojektierung . . . . .	224			
2.3.9	EMV-Maßnahmen . . . . .	225			
2.3.10	Kleinmotoren . . . . .	227			
2.3.10.1	DC-Kleinmotoren . . . . .	227			
2.3.10.2	Schrittmotoren . . . . .	228			
<b>2.4</b>	<b>Mechatronische Aktoren . . . . .</b>	<b>229</b>			
2.4.1	Piezoaktoren . . . . .	229			

4.1.3	CNC-Programmierung . . . . .	287	<b>5</b>	<b>Montageautomatisierung</b>	<b>369</b>
4.1.3.1	DIN-Programmierung . . . . .	287	5.1	Grundlagen . . . . .	369
4.1.3.2	Werkstattorientiertes Produzieren (WOP) . . . . .	297	5.2	Materialfluss . . . . .	370
4.1.4	Interpolation . . . . .	299	5.2.1	Lagern . . . . .	370
4.1.5	Leistungsfähigkeit . . . . .	301	5.2.2	Puffern . . . . .	371
4.1.6	Offene CNC-Steuerung . . . . .	303	5.2.3	Bunkern . . . . .	372
<b>4.2</b>	<b>3D-Druckverfahren</b> . . . . .	<b>304</b>	5.2.4	Magazinieren . . . . .	373
4.2.1	Allgemeines . . . . .	304	5.2.5	Fördersysteme . . . . .	374
4.2.2	AM-Verfahren . . . . .	305	<b>5.3</b>	<b>Maschinelle Montage</b> . . . . .	<b>377</b>
4.2.3	Die Informationskette und die Prozesskette . . . . .	307	5.3.1	Montageautomaten . . . . .	377
<b>4.3</b>	<b>Messen und Prüfen</b> . . . . .	<b>308</b>	5.3.2	Automatisiertes Fügen . . . . .	378
4.3.1	Koordinatenmessgeräte . . . . .	308	<b>6</b>	<b>Prozesse steuern</b>	<b>382</b>
4.3.1.1	Aufbau und Wirkungsweise . . . . .	309	<b>6.1</b>	<b>Einführung</b> . . . . .	<b>382</b>
4.3.1.2	Bauarten . . . . .	310	<b>6.2</b>	<b>Statistische Prozessregelung (SPC)</b> . . . . .	<b>383</b>
4.3.1.3	Messsysteme . . . . .	310	6.2.1	Prüfdaten . . . . .	383
4.3.1.4	Tastsysteme . . . . .	311	6.2.2	Normalverteilung . . . . .	384
4.3.1.5	Zusatzausstattungen . . . . .	313	6.2.3	Wahrscheinlichkeitsnetz . . . . .	385
4.3.1.6	Steuerungen und Antriebe . . . . .	314	6.2.4	Auswertung einer Stichprobe . . . . .	385
4.3.1.7	Messwertverarbeitung und Messwertauswertung . . . . .	314	6.2.5	Qualitätsregelkarten . . . . .	389
4.3.1.8	Tastelementkalibrierung . . . . .	317	<b>6.3</b>	<b>Maschinenfähigkeit und Prozessfähigkeit</b> . . . . .	<b>391</b>
4.3.1.9	Durchführung eines Messauftrags .	317	<b>6.4</b>	<b>Betriebsdatenerfassung (BDE)</b> . . . . .	<b>394</b>
4.3.2	Laser-Tracking . . . . .	322	6.4.1	Codeleser . . . . .	395
4.3.3	Optisches 3D-Scannen . . . . .	323	6.4.2	Mobile Datenspeicher . . . . .	396
4.3.3.1	Räumlichen Wahrnehmung und Triangulation . . . . .	323	6.4.3	Chipkarten, Chipmünzen, RFIDs . . . . .	397
4.3.3.2	Scannen mit Punkten und mit Linien . . . . .	324	<b>7</b>	<b>Informationstechnik</b>	<b>400</b>
7.2.3.3	Streifenlichtscanner . . . . .	325	<b>7.1</b>	<b>Programmierung</b> . . . . .	<b>400</b>
4.3.3.4	Photogrammetrie . . . . .	330	7.1.1	Programmiersprachen . . . . .	400
4.3.4	Röntgen-Computertomographie (CT) . . . . .	332	7.1.2	Software Engineering . . . . .	401
4.3.4.1	Allgemeines . . . . .	332	7.1.3	Qualität der Software . . . . .	402
4.3.4.2	CT in der industriellen Messtechnik .	332	7.1.4	Sicherung gegen unberechtigte Nutzung . . . . .	402
4.3.4.3	Auflösung . . . . .	333	7.1.5	Betriebssystem Windows . . . . .	403
<b>4.4</b>	<b>Robotertechnik</b> . . . . .	<b>335</b>	7.1.6	Objektorientierte Programmierung (OOP) . . . . .	406
4.4.1	Einführung . . . . .	335	7.1.7	Algorithmen . . . . .	408
4.4.2	Einteilung . . . . .	336	7.1.8	Strukturierte Programmierung . . . . .	409
4.4.3	Kinematischer Aufbau . . . . .	337	7.1.9	Rechnerinterne Datendarstellung . . . . .	410
4.4.4	Greifer . . . . .	341	7.1.10	Programmaufbau und Programmkomponenten . . . . .	413
4.4.5	Roboterprogrammierung . . . . .	342	7.1.11	Strukturierte Anweisungen . . . . .	415
4.4.6	Koordinatensysteme . . . . .	345	7.1.12	Strukturierung mit Funktionen . . . . .	417
4.4.7	Die Bewegungserzeugung . . . . .	349	7.1.13	Fallbeispiel: Steuerkurve . . . . .	418
4.4.8	Koordinatentransformation . . . . .	351	7.1.14	Einsatz von Smartphone, Tablet und iPad . . . . .	424
4.4.9	Interpolation und Betriebsarten . .	352	7.1.15	Grafische Programmierung . . . . .	425
4.4.10	Schleppabstand und Bahngeschwindigkeit . . . . .	354	<b>7.2</b>	<b>Steuern mit Computer</b> . . . . .	<b>431</b>
4.4.11	Sensorführung von Robotern . . .	356	7.2.1	Zusatzausgruppen . . . . .	431
4.4.12	Kollaborierende Roboter . . . . .	362	7.2.2	Elemente zu einem i 4.0 Projekt „Werkstück prägen“ . . . . .	432
4.4.13	Schutzmaßnahmen . . . . .	363	<b>7.3</b>	<b>Regelung mit PC und SPS</b> . . . . .	<b>440</b>
<b>4.5</b>	<b>Sicherheit von Maschinen und Anlagen</b> . . . . .	<b>365</b>			

<b>7.3.1</b>	Hardware und Software . . . . .	440	<b>7.8</b>	<b>Virtuelle Umgebung . . . . .</b>	<b>487</b>
<b>7.3.2</b>	Grafische Ausgabe . . . . .	441	<b>7.7.1</b>	Allgemeines . . . . .	487
<b>7.3.3</b>	Regelkreisglieder . . . . .	442	<b>7.8.2</b>	Szenensteuerung . . . . .	488
<b>7.3.3.1</b>	Proportionalglied ohne Verzögerung (P-Glied) . . . . .	442	<b>7.8.3</b>	Augmented Reality, Mixed Reality .	489
<b>7.3.3.2</b>	Integralglied (I-Glied) . . . . .	443			
<b>7.3.3.3</b>	Totzeitglied (T <sub>t</sub> -Glied) . . . . .	444			
<b>7.3.3.4</b>	Proportionalglied mit Verzögerung 1. Ordnung (P-T <sub>1</sub> -Glied) . . . . .	445	<b>8</b>	<b>Kommunikationstechnik . . . . .</b>	<b>490</b>
<b>7.3.3.5</b>	Proportionalglied mit Verzögerung 2. Ordnung (P-T <sub>2</sub> -Glied) und Schwingungsglied . . . . .	446	<b>8.1</b>	<b>Local Area Network (LAN) . . . . .</b>	<b>490</b>
<b>7.3.4</b>	Regelkreise . . . . .	447	<b>8.1.1</b>	Ethernet-LAN . . . . .	492
<b>7.3.4.1</b>	P-Regelung mit P-T <sub>1</sub> -Strecke . . . . .	447	<b>8.1.1.1</b>	Einführung . . . . .	492
<b>7.3.4.2</b>	P-Regelung und P-T <sub>1</sub> -Strecke (SPS-Simulation) . . . . .	448	<b>8.1.1.2</b>	Peer-to-Peer-Netzwerk . . . . .	495
<b>7.3.4.3</b>	I-Regelung und P-T <sub>1</sub> -Strecke . . . . .	449	<b>8.1.1.3</b>	Client-Server-Netzwerk . . . . .	495
<b>7.3.4.4</b>	PI-Regelung einer P-T <sub>1</sub> -Strecke mit Störgrößenaufschaltung (Beispiel) .	450	<b>8.1.1.4</b>	Peer-to-Peer-Netzwerk mit zwei PCs .	496
<b>7.3.4.5</b>	Optimierung der Reglerparameter .	451	<b>8.1.1.5</b>	Erweiterung zu einem Client-Server-Netzwerk . . . . .	499
<b>7.3.4.6</b>	P-Regler mit P-T <sub>1</sub> -I-Strecke (Lageregelung) . . . . .	452	<b>8.1.2</b>	Wireless LAN (WLAN) . . . . .	501
<b>7.3.4.7</b>	Lageregelung mit Totzeit . . . . .	454	<b>8.2</b>	<b>Feldbus-Systeme . . . . .</b>	<b>503</b>
<b>7.3.4.8</b>	Geschwindigkeitsvorsteuerung . . . . .	455	<b>8.2.1</b>	CAN-Bus . . . . .	503
<b>7.3.5</b>	Fuzzy-Logic . . . . .	456	<b>8.2.2</b>	Aktor-Sensor-Interface (AS-i) . . . . .	505
<b>7.3.5.1</b>	Grundlagen der Fuzzy-Technologie .	456	<b>8.2.3</b>	PROFIBUS, PROFIBUS-DP . . . . .	507
<b>7.3.5.2</b>	Fuzzy-Regelung einer Bandsägemaschine . . . . .	457	<b>8.2.4</b>	PROFINET . . . . .	510
<b>7.4</b>	<b>Programmiersprache Java . . . . .</b>	<b>459</b>	<b>8.2.5</b>	PROFIsafe . . . . .	511
<b>7.4.1</b>	Einführung . . . . .	459	<b>8.3</b>	<b>Schnittstellen . . . . .</b>	<b>513</b>
<b>7.4.2</b>	Erstellen einer Applikation . . . . .	460	<b>8.3.1</b>	Aufgaben und Art der Schnittstellen . . . . .	513
<b>7.4.3</b>	HTML . . . . .	460	<b>8.3.2</b>	USB-Schnittstelle . . . . .	514
<b>7.4.4</b>	Erstellen von Grafiken . . . . .	462	<b>8.3.3</b>	Firewire (IEEE 1394) . . . . .	514
<b>7.4.5</b>	Animationen . . . . .	463	<b>8.3.4</b>	Serielle Schnittstelle V.24 . . . . .	515
<b>7.4.6</b>	Multithreading . . . . .	463	<b>8.3.5</b>	Serielle Schnittstelle RS 485 . . . . .	517
<b>7.4.7</b>	Java-Script . . . . .	464	<b>8.3.6</b>	IO-Link . . . . .	518
<b>7.5</b>	<b>Visual Basic für Excel . . . . .</b>	<b>465</b>			
<b>7.5.1</b>	Aufbau eines VBA-Programms . . . . .	465	<b>9</b>	<b>Aufgaben und Übungen . . . . .</b>	<b>519</b>
<b>7.5.2</b>	Aufruf von VBA . . . . .	466	<b>9.1</b>	<b>Aufgaben und Übungen zur Pneumatik . . . . .</b>	<b>519</b>
<b>7.5.3</b>	Erstellen von Funktionen . . . . .	467	<b>9.2</b>	<b>Aufgaben und Übungen zur Hydraulik . . . . .</b>	<b>524</b>
<b>7.5.4</b>	Variable und Zugriff auf Zellen . . . . .	468	<b>9.3</b>	<b>Aufgaben und Übungen zu GRAFCET . . . . .</b>	<b>526</b>
<b>7.5.5</b>	Projekt: SPC-Maschinenregelung .	470	<b>9.4</b>	<b>Aufgaben und Übungen zur SPS . . . . .</b>	<b>527</b>
<b>7.5.6</b>	Erstellen eines Formulars als Unterprogramm . . . . .	471	<b>9.5</b>	<b>Aufgaben und Übungen zur Regelungstechnik . . . . .</b>	<b>540</b>
<b>7.5.7</b>	Kommunikation: Excel mit S7 . . . . .	472	<b>9.6</b>	<b>Aufgaben und Übungen zum Programmieren . . . . .</b>	<b>544</b>
<b>7.6</b>	<b>Relationale Datenbanken . . . . .</b>	<b>473</b>	<b>9.7</b>	<b>Aufgaben und Übungen zur Antriebstechnik . . . . .</b>	<b>547</b>
<b>7.6.1</b>	Datenbankobjekte . . . . .	474	<b>9.8</b>	<b>Aufgaben und Übungen zur CNC-Technik . . . . .</b>	<b>548</b>
<b>7.6.2</b>	Entwerfen einer Datenbank . . . . .	476			
<b>7.7</b>	<b>Bildverarbeitung . . . . .</b>	<b>479</b>			
<b>7.7.1</b>	Grauwertbildverarbeitung . . . . .	479			
<b>7.7.2</b>	Binärbildverarbeitung . . . . .	484			
<b>7.7.3</b>	Farbbildverarbeitung und Farbbildcodierung . . . . .	485			

## 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 Čapek 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 Videospielen 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 Behältnis. 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.

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 Fertigung automatisierung 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 Karosserien 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.

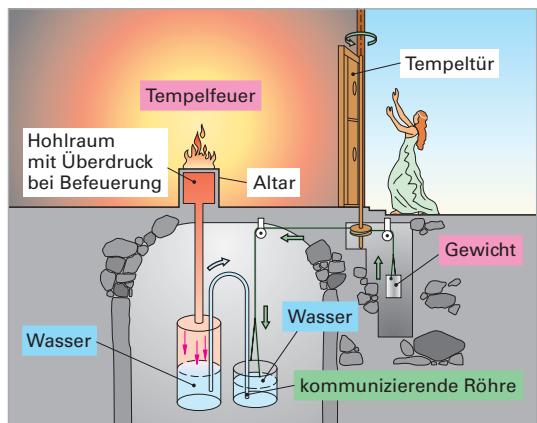


Bild 1: Automatisches Schließen und Öffnen von Tempeltüren, etwa 100 v. Chr.

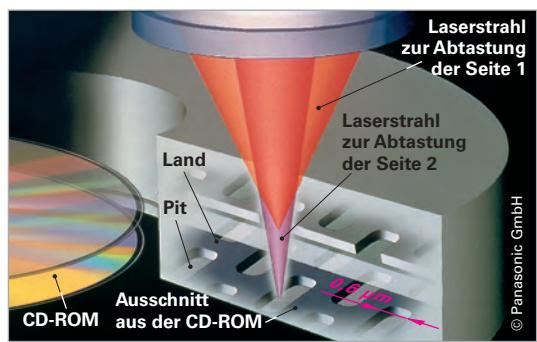


Bild 2: CD-ROM

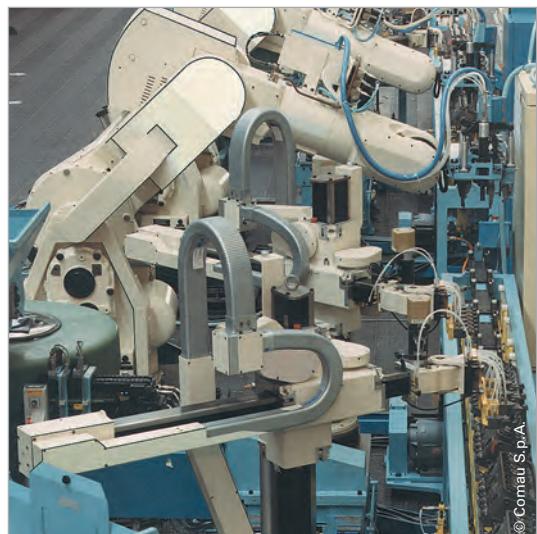


Bild 3: Automatisierung mit Robotern

## 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.



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

### 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**).



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

### Dritte industrielle Revolution

Die dritte industrielle Revolution begann **um 1970** mit der Verwendung von Transistoren und Dioden zur digitalen Datenverarbeitung in Maschinensteuerungen. Man begann Maschinen numerisch (digital) zu steuern. Es entstand die numerische Steuerung (Numerical Control, NC).

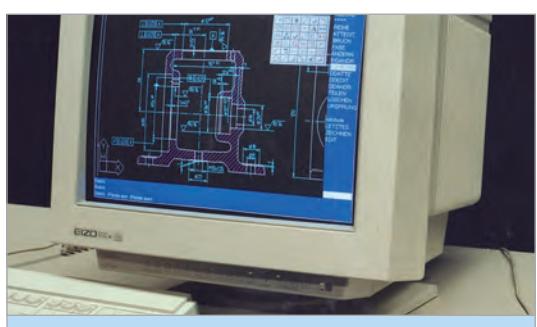
Die **NC-Maschine** (**Bild 3**) verdrängte Zug um Zug handgesteuerte und mechanisch automatisierte Maschinen. Der wirkliche Durchbruch kam mit der Entwicklung der integrierten Schaltkreise und Mikroprozessoren und deren Integration in Maschinensteuerungen und in Produkte, z. B. als Mikrorechner und als speicherprogrammierte Steuerungen (SPS).



**Bild 3:** NC-Steuerung mit Lochstreifeneingabe (1970)

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

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



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

<sup>1</sup> engl. *smart* = geschickt

## Systeme der Automatisierung

Die Integration von Computern in die Fertigung (Computer Integrated Manufacturing, **CIM**) hat einen Wandelungsprozess 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 nachgebildet 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**).

## PPS und Automatisierung der Geschäftsprozesse

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

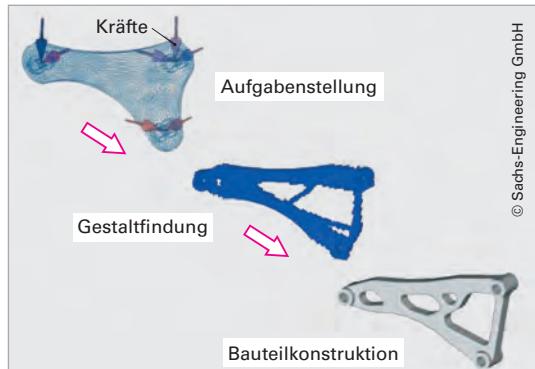
**Bauteilentwicklung.** Durch *Simulation* können Produkte in allen Phasen, von der Entstehung über die Produktion bis hin zur Nutzung und Verschrottung getestet werden bevor sie wirklich in Produktion gehen. Notwendig ist eine datentechnische Aufbereitung eines solchen Produktlebenszyklus. Man spricht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



© Sachs-Engineering GmbH

Bild 1: Automatisierte Bauteilentwicklung

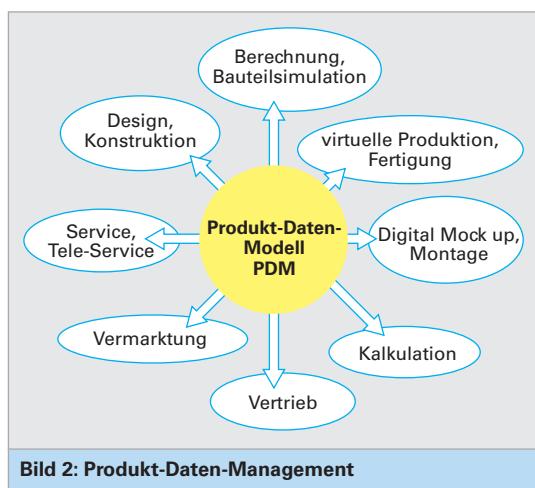


Bild 2: Produkt-Daten-Management

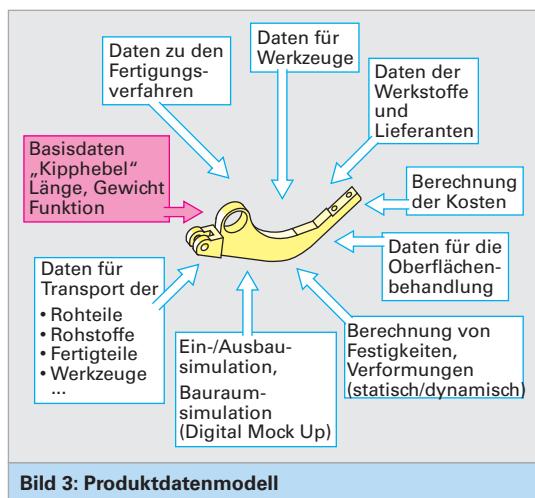


Bild 3: Produktdatenmodell

<sup>1</sup> griech. *logistik* = Rechenkunst, hier: berechneter organisatorischer Ablauf

<sup>2</sup> griech. *tele* = fern, weit

<sup>3</sup> 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 Internet<sup>1</sup>, wurde beginnend ab 1980 als Plattform zum Datenaustausch unter den Großrechnern der Universitäten und Forschungsinstitute eingeführt. Noch waren 1995 die Standorte deutscher Web-Server (**Bild 1**) recht überschaubar.

Nun ist das Internet bei jedermann angekommen, in alle Bereiche der Gesellschaft vorgedrungen (**Bild 2**) 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.

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 (**Bild 3**).

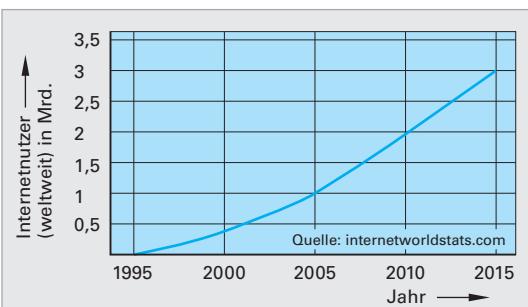
Die Vernetzung von physikalisch-technischen Systemen mit virtuellen, nämlich programmierten Prozessen wird zum „Internet der Dinge und Dienste“ und kennzeichnet die vierte industrielle Revolution. Mit Industrie 4.0 wird die vierte industrielle Revolution, nämlich die totale digitale Vernetzung der Maschinen, Anlagen und Produkte sowie der zugehörigen Dienste eingeleitet.

**Gefahren** gibt es durch Fehler oder Sabotage in den Netzwerken: Durch Ausfall oder Fehlschaltungen von Verbindungen und von Servern für die Kommunikation, die Produktion, die Logistik, die Energieübertragung, die Bankgeschäfte usw.

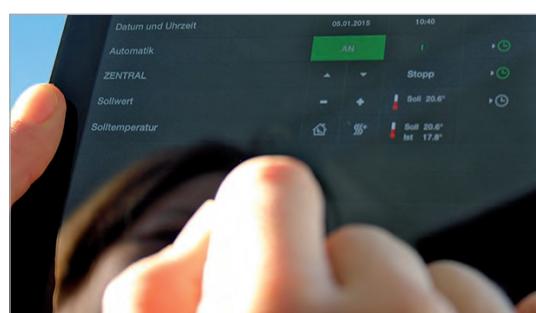
**Gefahren** gibt es durch Spionagesysteme und **malware**<sup>2</sup> (Schadprogramme) welche darauf ausgerichtet sind Zerstörungen anzurichten und Unheil zu bringen.



**Bild 1: Web-Standorte um 1995 in Deutschland**



**Bild 2: Internetnutzer, weltweit**



**Bild 3: Steuern einer Solaranlage mit Smartphone**

<sup>1</sup> Internet von engl. *internetwork* = Zwischenetzwerk, miteinander verbundene Netze

<sup>2</sup> engl. *malware*, Kunstwort aus engl. *malicious* = bösartig und software

### 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) 18.08.2014 (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 hochwertige 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 so genannten hybriden Produkten mündet. Die deutsche Industrie hat jetzt die Chance, die vierte industrielle Revolution aktiv mitzugestalten. Mit dem Zukunftsprojekt Industrie 4.0 wollen wir diesen Prozess unterstützen.

Ziel von Industrie 4.0 sind intelligente (smarte<sup>1</sup>) Fabriken. Diese zeichnen sich aus durch:

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

Neuere technische Produkte, z. B. Fahrzeuge, TV-Geräte, Steller für Antriebe, Telefone u.v.m. sind zunehmend als „embedded systems“ konziert.

Embedded Systems (**Bild 1**) sind Produkte mit integrierten (eingebetteten) Computern bzw. Mikrocomputern oder Mikroprozessoren zum Zweck der Steuerung, Regelung, Visualisierung bzw. allgemein zur Automatisierung.

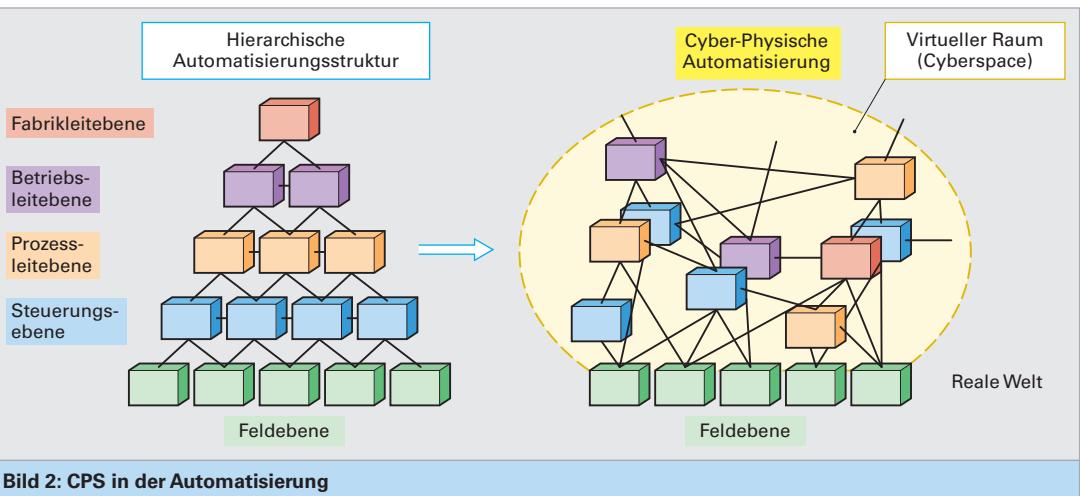
Eine zunehmende Bedeutung haben die **Cyber-Physical-Systems<sup>2</sup>** (**CPS**). Sie möglich durch eine angehängte Kommunikationstechnik die Vernetzung von eingebetteten Systemen untereinander und mit dem Internet. Dabei wird die frühere hierarchische und lokal konzentrierte Struktur aufgelöst (**Bild 2**).

<sup>1</sup> engl. smart = geschickt, klug

<sup>2</sup> 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.



Bild 1: Embedded Systems zur Automatisierung



### 1.1.4 Cyber-Physische Systeme (CPS)

CPS sind die technologische Grundlage für Industrie 4.0. Die besondere Eigenschaft der CPS 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. Fernsehergeräte.

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

- **Smart Mobility:** Optimierte Nutzung der Mobilitätsangebote, z. B. der Kraftfahrzeuge durch den Einsatz von IKT (Informations- und Kommunikationstechnik), für eine energieeffiziente, emissionsarme, sichere, und kostengünstige Mobilität (**Bild 1**).
- **Smart Healthcare:** Mittels IKT werden Patienten durch Ärzte und medizinische Dienstleister optimal versorgt: Lückenloses Monitoring (Beobachten und Aufzeichnen). Im Notfall können Hilfen auch selbsttätig koordiniert veranlasst werden (**Bild 2**).
- **Smart Grid:** Intelligente Vernetzung von Stromerzeugern, Stromspeichern und Stromverbrauchern mithilfe von IKT, sodass das Energieangebot stets die Nachfrage umweltschonend befriedigen kann (**Bild 3**).
- **Smart Factory:** Mit IKT vernetzte Unternehmen, Maschinen, Anlagen, Zulieferer und Logistiker, um auf Kundenwünsche schnell und flexibel reagieren zu können (**Bild 4**).

**Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 18.08.2014 (Zitat):**

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, die Mensch-Maschine-Interaktion und 3D in industriellen Anwendungen (**Bild 5**) noch stärker in den Blick genommen.

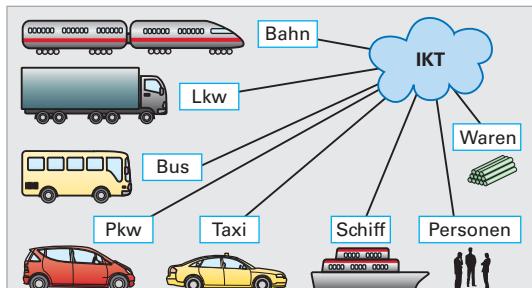


Bild 1: Smart Mobility

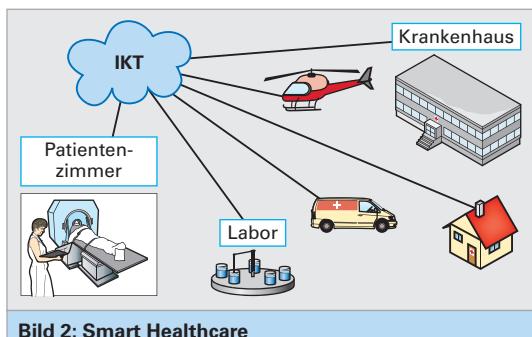


Bild 2: Smart Healthcare

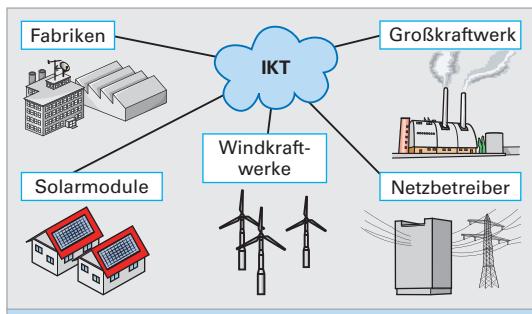


Bild 3: Smart Grid

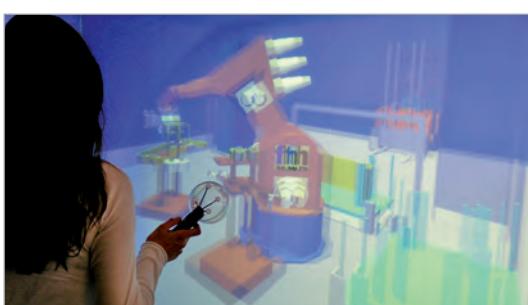


Bild 5: Virtuelles Prüfen in einer 3D-Umgebung

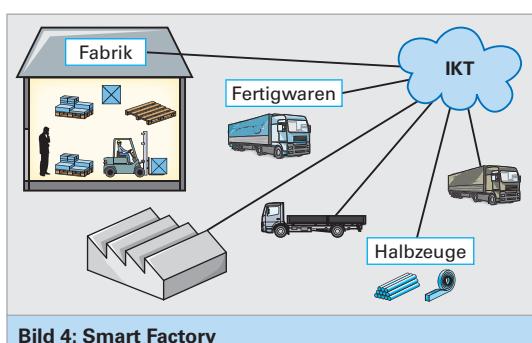


Bild 4: Smart Factory

### 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.



## 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).

### 1.2.1 Steuerungsarten

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

#### Analoge Steuerungen

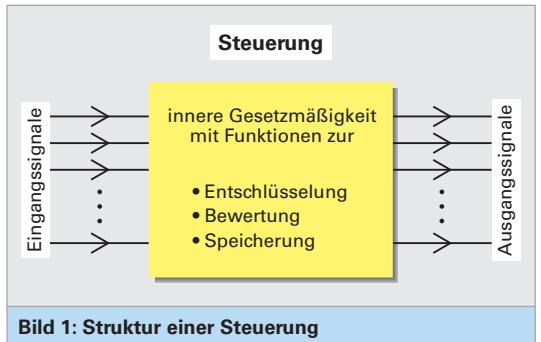
Bei analog arbeitenden Steuerungen werden die Ausgangssignale mit Hilfe eines **analogen Signalfilters** gebildet, z. B. wird die Vorschubbewegung für ein Werkzeug über eine **Kurvenscheibe** (Bild 2) gesteuert. Das Eingangssignal ist der Drehwinkel der Kurvenscheibe. Die Kurvenscheibe wird z. B. mit 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.

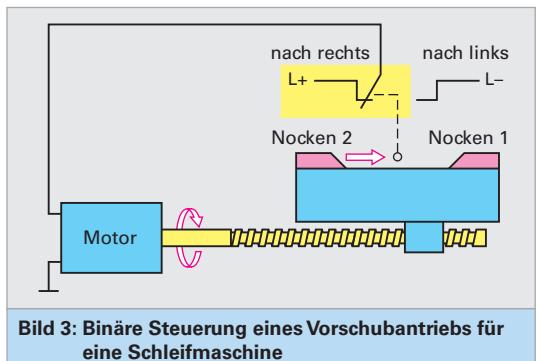
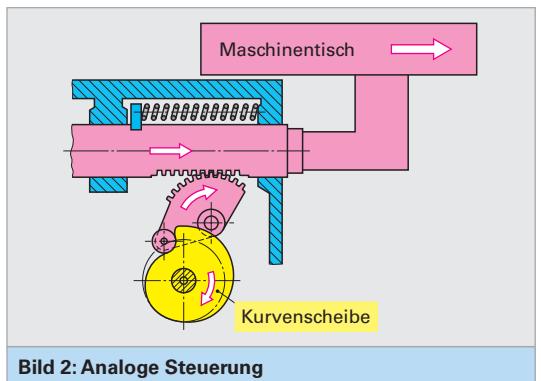
#### Binäre Steuerungen

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.



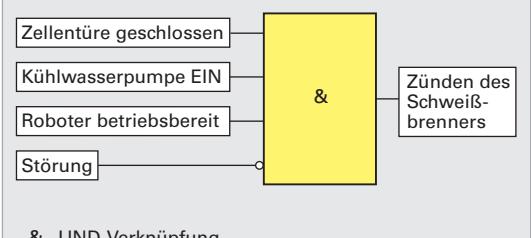
Art	Signaldarstellung	Beispiele
Analoge Steuerung	Ausgang Zeit	Steuerung mit Kurvenscheibe
Binäre Steuerung	1 0 1 0 1 Zeit	Steuerung mit Schaltern und Relais
Digitale Steuerung	0 1 3 2 4 10 4 9 0 - 0 0 0 0 0 1 0 0 - 0 0 0 0 0 0 0 0 - 0 0 0 0 0 0 0 0 - 0 0 0 0 1 0 0 - 0 0 0 0 - 0 0 0 0 0 0	Winkelcodierer



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 Zündfrei-gabe (**Bild 1**).



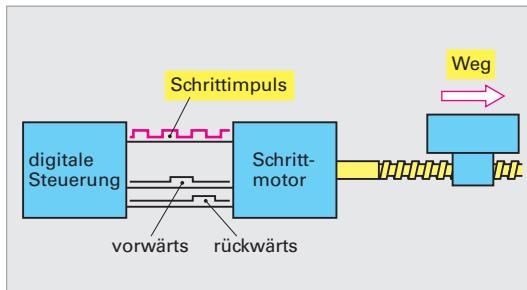
**Bild 1: Kombinatorische Steuerung**

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 **Zeit geführte 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**).

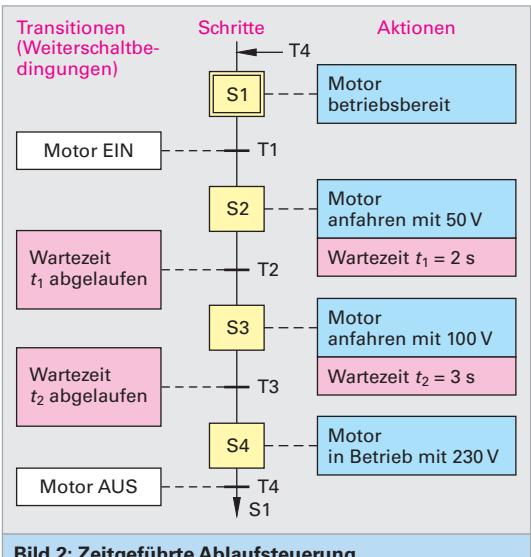
#### Digitale Steuerungen

In digitalen Steuerungen erfolgt die Signalverarbeitung vorwiegend mit **Zahlen**. So gehören alle numerischen Werkzeugmaschinesteuerungen 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**.

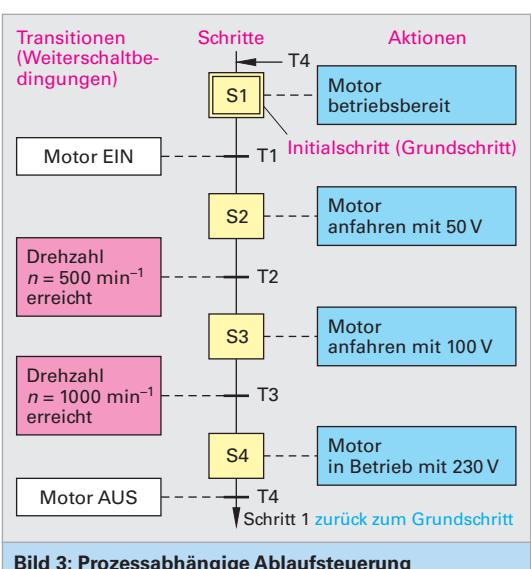
In digitalen Steuerungen erfolgt die Signalverarbeitung mit Zahlen



**Bild 4: Digital gesteuerter Vorschubantrieb**



**Bild 2: Zeit geführte 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 Zahlenaufbau 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:**

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

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**<sup>1</sup> 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).

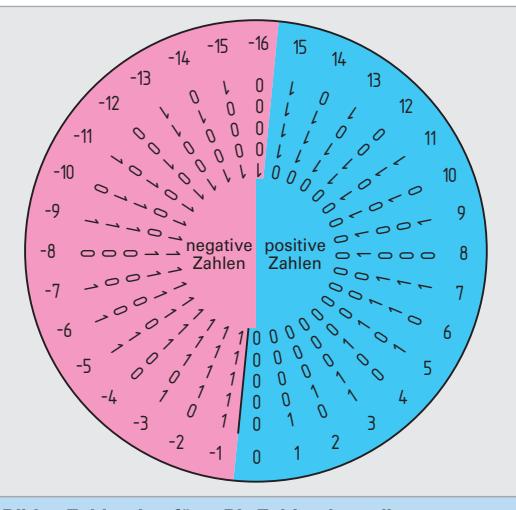
**Tabelle 1: Rechnen mit Dualzahlen**

#### 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:

$6 + 5 = 11$ $\begin{array}{r} 110 \\ + 101 \\ \hline 1011 \end{array}$	$11 - 5 = 6$ $\begin{array}{r} 1011 \\ - 101 \\ \hline 110 \end{array}$	$6 \cdot 5 = 30$ $\begin{array}{r} 110 \\ \cdot 101 \\ \hline 1100 \\ + 110 \\ \hline 1110 \end{array}$
--	--	--



**Bild 1: Zahlenring für 4-Bit-Zahlendarstellung**

**Tabelle 2: Codierungen (Beispiele)**

Dezimalzahl	Dualcode	Graycode	8-4-2-1-Code	2-aus-5-Code
0				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
Stellenwert	8 4 2 1	kein	8 4 2 1	7 4 2 1 0

<sup>1</sup> 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 programmierbaren 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 Einzweckcharakter und kann nicht für andere Aufgaben verwendet werden.

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

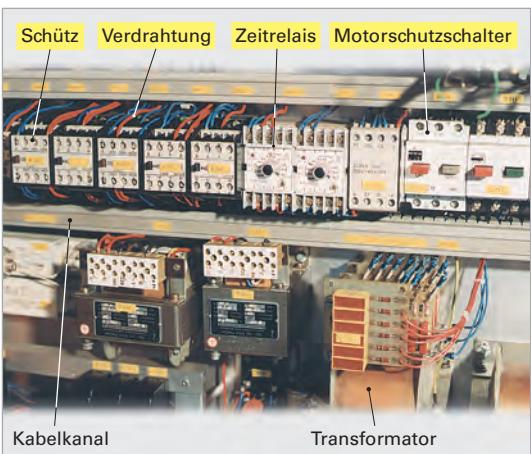
**Tabelle 1: Programmverwirklichung**

Art		Beispiel
Verbindungs-programmiert <b>VPS</b>	fest-programmierbar	Relais-steuerung
	um-programmierbar	Programm-steuerung mit Steckerfeld
Speicherpro-grammiert <b>SPS</b> engl. <b>Programmable Logic Controller PLC</b>	austausch-programmierbar	SPS mit EPROM1
	frei-programmierbar	SPS mit EEPROM <sup>2</sup> oder mit RAM <sup>3</sup>

<sup>1</sup> EPROM von Erasable Programmable Read Only Memory = löscherbarer Nur-Lese-Speicher

<sup>2</sup> EEPROM von Electrically EPROM = elektrisch löscherbarer Nur-Lese-Speicher

<sup>3</sup> RAM von Random Access Memory = Speicher mit wahlfreiem Zugriff



**Bild 1: Verbindungsprogrammierte Steuerung (VPS)**

### Speicherprogrammierte Steuerung (SPS)

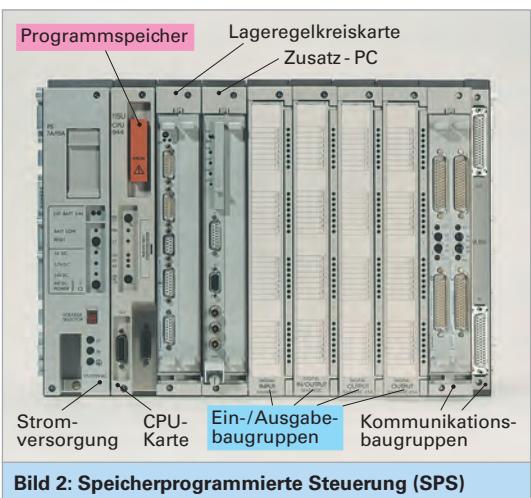
Eine speicherprogrammierte Steuerung (**Bild 2**) enthält intern Mikroprozessoren und erzeugt die **Steuersignale abhängig** von einem **Programm**, das in einem Programmspeicher gespeichert ist. Der Steuerungsaufgabe muss somit nur das Programm angepasst werden, jedoch nicht die Steuerungshardware. 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 Schreib-Lese-Speicher, dessen gesamter Inhalt stets ohne mechanischen Eingriff auch in beliebig kleinem Umfang schnell verändert werden kann.

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



**Bild 2: Speicherprogrammierte Steuerung (SPS)**

## 1.2.3 Elektrische Kontaktsteuerungen

### 1.2.3.1 Bauelemente und Betriebsmittel

Die wichtigsten Bauelemente elektrischer Kontaktsteuerungen sind: Schaltgeräte, Steckvorrichtungen, Leitungsverbindungen und Anzeigegeräte (**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 **Buchstabsymbol** 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 Werkzeugmaschinenschlitten, 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

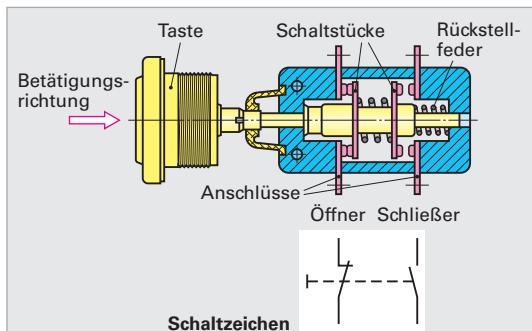


Bild 2: Druckknopftastschalter (Taster)

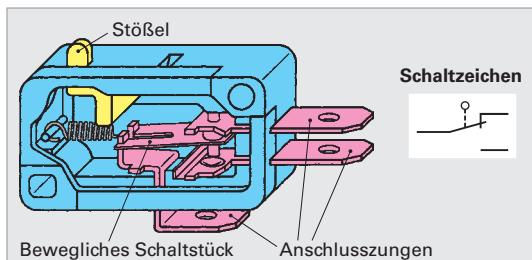


Bild 3: Schaltdifferenz bei Nockenschaltern

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