Bibliothek des technischen Wissens

Dietmar Schmid
Eckehard Kalhöfer
Hans Kaufmann
Jürgen Baur
Alexander Pflug

Automatisierungstechnik

Grundlagen, Komponenten und Systeme für die Industrie 4.0

14., überarbeitete Auflage

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
Eckehard Kalhöfer	Dr.-Ing., Professor	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.

14. Auflage 2021

Druck 5 4 3 2 1

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

ISBN 978-3-8085-5165-3

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

© 2021 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
www.europa-lehrmittel.de

Satz und Layout: Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpar

Umschlag: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald

Umschlagfoto: Fotos des Lektors

Druck: Lensing Druck GmbH & Co. KG, 48683 Ahaus

Vorwort zur 14. 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, der Antriebstechnik und der 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 Sensorsysteme zur Sicherheit
- **Computergesteuerte Maschinen:** CNC-Werkzeugmaschinen, Messmaschinen/Messgeräte, Roboter, 3D-Scannen, 3D-Drucken
- **Montageautomatisierung**
- **Prozesse steuern:** statistische Prozessregelung, Prozessfähigkeit, Betriebsdatenerfassung
- **Informationstechnik:** Programmieren, 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 Studierende der Hochschulen dient dieses Buch als eine leicht lesbare Einführung. Über 1200, meist mehrfarbige, Bilder und Tabellen erleichtern das Begreifen der komplexen Zusammenhänge.

Die **14. Auflage** wurde insgesamt überarbeitet und um neue Inhalte und weitere Bilder erweitert. So gibt es neue Seiten und Darstellungen zu:

- Elektrische Gefährdungen und Schutzmaßnahmen,
- Optische Datenspeicher,
- Zweipunktregelung mit LOGO,
- Werkstücke pneumatisch spannen,
- Feldorientierte Regelung von Drehfeldmaschinen,
- Temperatursensoren und Durchfluss-Sensoren,
- MEMS-Gyroskop und MEMS-Drehratensensor,
- Robotersensortechnik mit „Griff in die Kiste",
- Kollaborierende Roboter,
- Robotersicherheit,
- Manufacturing Execution Systems (MES),
- Programmierung mit Lua auf iPad.

In der **EUROPATHEK** (siehe vordere Umschlaginnenseite) stehen eine Reihe von digitalen **Zusatzmaterialien** zur Verfügung: Neben den Lösungen zu den Aufgaben gibt es eine Vielzahl von Softwaretools, Simulationen und animierbaren Objekten. Mit diesen 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". Lehrende können diese Zusatzmaterialien vorteilhaft im Distanzunterricht nutzen und Lernende können damit in sehr kreativer Weise Wissen und Erfahrungen schöpfen. Die Zusatzmaterialien enthalten des Weiteren wichtige Gesetzestexte und ein Repetitorium mit Wiederholungsfragen zur abschnittsweisen Lernkontrolle.

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

Sommer 2021 — Die Autoren

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen der Automatisierungstechnik 9

1.1 Einführung 9
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
1.2 Steuerungstechnik. 16
1.2.1 Steuerungsarten. 16
1.2.2 Programmsteuerungen 19
1.2.3 Elektrische Kontaktsteuerungen 20
1.2.3.1 Tastschalter. 20
1.2.3.2 Näherungsschalter. 21
1.2.3.3 Schütze und Relais 22
1.2.3.4 Stellschalter 24
1.2.3.5 Schlossschalter. 25
1.2.3.6 Schaltzeichen elektrischer Betriebsmittel (Auswahl) 27
1.2.3.7 Kennzeichnung der Betriebsmittel . . . 28
1.2.3.8 Leitungen und Kabel 30
1.2.4 Elektrische Gefährdungen und Schutzmaßnahmen 31
1.2.4.1 Unfälle vermeiden 31
1.2.4.2 Gefahren 32
1.2.4.3 Schutzartenkennzeichnung 32
1.2.4.4 Schutzklassen 33
1.2.4.5 Fehlerstrom-Schutzschalter (FI-Schalter, RCD[1]) 34
1.2.4.6 Elektrostatische Entladungen (ESD[1]) . 36
1.2.4.7 Sicherheitsfunktionen 37
1.2.5 Grundschaltungen 38
1.2.6 Elektronische Bauelemente. 41
1.2.6.1 Halbleiterbauelemente 41
1.2.6.2 Integrierte Schaltkreise (IC) und Grundverknüpfungen 44
1.2.7 Schaltalgebra 45
1.2.8 Kombinatorische Steuerungen 46
1.2.9 Sequentielle[1] Steuerungen 50
1.2.10 GRAFCET 51
1.2.11 Sequentielle Steuerungen mit Flip-Flop (Kippglieder). 57
1.2.12 Zustandsfolgediagramm (Graph) 59
1.3 Digitale Speicher 62
1.3.1 Mechanische Speicher. 62
1.3.2 Optische Datenspeicher. 63
1.3.3 Elektronische Speicher. 64
1.3.4 Magnetische Speicher 66
1.4 Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS). 67
1.4.1 Aufbau und Funktionsweise 67
1.4.2 Systemaufbau 69
1.4.3 Programmierung 70
1.4.4 Programmabarbeitung, Organisationsbausteine. 72
1.4.5 Adressierung und Datentypen 73
1.4.6 Grundverknüpfungen 74
1.4.7 Speicher (Merker). 77
1.4.8 Flankenauswertung 79
1.4.9 Zähloperationen. 81
1.4.10 Programmieren von Zeiten 83
1.4.11 Digitale Grundoperationen (Wortverarbeitung). 86
1.4.12 Analogwertverarbeitung 89
1.4.13 Funktionen (FC) und Funktionsbausteine (FB) 91
1.4.14 Datenbausteine 93
1.4.15 Ablaufsteuerung. 94
1.4.16 Betriebsarten 98
1.4.17 Kleinsteuerung LOGO!. 101
1.4.18 Bedienen und Beobachten mit WINCC 105
1.4.19 Prozess-Simulation 109
1.4.20 IEC 61131. 112
1.4.21 Zuverlässigkeit und Sicherheit 113
1.5 Grundlagen der Analogsignalverarbeitung. 114
1.5.1 Operationsverstärker (OP). 114
1.5.2 Grundschaltungen 115
1.5.3 Analog-Digital-Umsetzer und Digital-Analog-Umsetzer 118
1.6 Regelungstechnik. 120
1.6.1 Begriffe 120
1.6.2 Regelungsarten 121
1.6.3 Regelkreisglieder 123
1.6.3.1 Proportionalglied ohne Verzögerung (P-Glied) 123
1.6.3.2 Proportionalglied mit Verzögerung 1. Ordnung (P-T_1-Glied) 124
1.6.3.3 Proportionalglied mit Verzögerung 2. Ordnung (P-T_2-Glied) und Schwingungsglied 125
1.6.3.4 Integralglied (I-Glied) 128
1.6.3.5 Differenzierglied (D-Glied). 129
1.6.3.6 Totzeitglied (T_t-Glied). 129
1.6.3.7 Zusammenwirken mehrerer Regelkreisglieder 131
1.6.4 Regler und Regelkreise 132
1.6.4.1 Schaltende Regler 132
1.6.4.2 Analoge Regler. 133
1.6.4.3 Digitale Regler (Software-Regler) . . . 135
1.6.4.4 Regelung von P-Strecken. 138
1.6.4.5 Regelung von I-Strecken. 139
1.6.4.6 Einstellen eines Reglers. 141
1.6.4.7 Selbstoptimierende Regler 142
1.7 Schaltpläne. 143
1.7.1 Strukturierung 143

1.7.2 Referenzkennzeichen 145
1.7.3 Schaltplanerstellen mit FluidSIM® . . 147
1.7.4 Steuern und Regeln mit FluidSIM® . 148

2 Aktoren 149

2.1 Pneumatische Aktoren. 149
2.1.1 Einführung 149
2.1.2 Komponenten der Pneumatik 150
2.1.2.1 Wartungsgeräte 150
2.1.2.2 Aktoren 151
2.1.2.3 Ventile 154
2.1.2.4 Signalgeber und Signalwandler 159
2.1.3 Pneumatische Steuerungen 160
2.1.3.1 Schaltplanaufbau 160
2.1.3.2 Pneumatische Verknüpfungssteuerungen 162
2.1.3.3 Elektrische Ansteuerung von Aktoren 164
2.1.3.4 Vakuumtechnik 170
2.1.3.5 Sicherheitsfunktionen 171
2.1.3.6 Energieeffizienz 172
2.2 Hydraulische Aktoren. 173
2.2.1 Allgemeines 173
2.2.2 Physikalische Grundlagen 173
2.2.2.1 Hydrostatik 173
2.2.2.2 Hydrodynamik 175
2.2.3 Hydraulikflüssigkeiten 176
2.2.4 Aufbau hydraulischer Steuerungen . 178
2.2.5 Hydraulikpumpen. 179
2.2.6 Hydraulikspeicher. 181
2.2.7 Antriebselemente. 183
2.2.8 Hydraulikventile 186
2.2.8.1 Druckventile 186
2.2.8.2 Wegeventile 189
2.2.8.3 Sperrventile 190
2.2.8.4 Stromventile. 191
2.2.9 Stetigventile 193
2.2.10 Proportionaltechnik 194
2.2.11 Servoventile 201
2.2.12 Mobilhydraulik 203
2.3 Elektrische Aktoren 204
2.3.1 Einführung 204
2.3.2 Rechnerische Grundlagen 206
2.3.3 Erste Orientierung 209
2.3.4 Gleichstromantriebe (DC-Antriebe) . 210
2.3.5 Drehfeldantriebe 216
2.3.5.1 Drehstromasynchronmotoren. 216
2.3.5.2 Drehstromsynchronmotoren. 224
2.3.5.3 Feldorientierte Regelung 227
2.3.6 Kühlung und Bauformen 229
2.3.7 Antriebsprojektierung 230
2.3.8 EMV-Maßnahmen 231
2.3.9 Kleinmotoren 233
2.3.9.1 DC-Kleinmotoren 233
2.3.9.2 Schrittmotoren 234
2.4 Mechatronische Aktoren 235
2.4.1 Piezoaktoren 235
2.4.2 Tauchspulenantriebe 238
2.4.3 Magnetostriktive Aktoren 238
2.4.4 Kapazitive Mikroaktoren 239
2.4.5 Thermische Aktoren. 240
2.4.5.1 Thermobimetall-Aktoren 240
2.4.5.2 Dehnstoff-Aktoren 241
2.4.5.3 Memory-Metall-Aktoren 241
2.4.6 MRF-Aktoren. 242
2.5 CNC-Achsantriebssysteme 243
2.5.1 Struktur 243
2.5.2 Art der Wegmessung 243
2.5.3 Antriebsarten 245
2.5.4 Mechanische Übertragungsglieder. . 246
2.5.5 Lageregelung 248

3 Sensoren 250

3.1 Allgemeines 250
3.2 Sensoren für Wege, Winkel und Abstände. 251
3.2.1 Sensorsignale durch Widerstandsänderung 251
3.2.2 Sensorsignale durch magnetische Kopplung 256
3.2.3 Sensorsignale mittels magnetischer und elektrischer Felder 257
3.2.4 Sensoren zur Füllstandsmessung. . . 258
3.2.5 Optische Sensoren 259
3.2.6 Sensorsignale durch Laufzeitmessung 263
3.2.7 Digitale Weg- und Winkelmessung . . 265
3.2.7.1 Inkrementale Weg- und Winkelmessung 265
3.2.7.2 Absolute Weg- und Winkelmessung. 269
3.2.7.3 Zyklische analoge Weg- und Winkelmessung 271
3.2.7.4 Berührungsloses Messen mit Autofokus-Systemen 272
3.3 Geschwindigkeitssensoren 273
3.4 Sensoren für Dehnungen, Kräfte, Drehmomente und Drücke 274
3.5 Beschleunigungssensoren 278
3.6 Temperatursensoren 279
3.7 Sensoren für Strömungen. 281
3.8 Sensoren für elektrische Größen (Messumformer). 282
3.9 Sensoren zur Sicherheitstechnik . . . 283
3.10 Mikromechanische Sensoren 285
3.11 Störungen in Sensorleitungen 286

4 Computergesteuerte Maschinen 288

4.1 CNC-Werkzeugmaschinen. 288
4.1.1 Der Produktionsprozess. 288
4.1.2 NC-Achsen und deren Steuerung. . . 291
4.1.3 CNC-Programmierung 293
4.1.3.1 DIN-Programmierung 293

4.1.3.2 Werkstattorientiertes Produzieren (WOP) . . . 303
4.1.4 Interpolation . . . 305
4.1.5 Leistungsfähigkeit . . . 307
4.1.6 Offene CNC-Steuerung . . . 309
4.2 3D-Druckverfahren . . . 310
4.2.1 Allgemeines . . . 310
4.2.2 AM-Verfahren . . . 311
4.2.3 Die Informationskette und die Prozesskette . . . 313
4.3 Messen und Prüfen . . . 314
4.3.1 Koordinatenmessgeräte . . . 314
4.3.1.1 Aufbau und Wirkungsweise . . . 315
4.3.1.2 Bauarten . . . 316
4.3.1.3 Messsysteme . . . 316
4.3.1.4 Messkopfsysteme . . . 317
4.3.1.5 Zusatzausstattungen . . . 319
4.3.1.6 Steuerungen und Antriebe . . . 320
4.3.1.7 Messwertverarbeitung und Messwertauswertung . . . 320
4.3.1.8 Tastelementkalibrierung . . . 323
4.3.1.9 Durchführung eines Messauftrags . . . 323
4.3.2 Laser-Tracking . . . 328
4.3.3 Optisches 3D-Scannen . . . 329
4.3.3.1 Räumlichen Wahrnehmung und Triangulation . . . 329
4.3.3.2 Scannen mit Punkten und mit Linien 330
4.3.3.3 Streifenlichtscanner . . . 331
4.3.3.4 Photogrammetrie . . . 336
4.3.4 Röntgen-Computertomographie (CT) . 338
4.3.4.1 Allgemeines . . . 338
4.3.4.2 CT in der industriellen Messtechnik . 338
4.3.4.3 Auflösung . . . 339
4.4 Robotertechnik . . . 341
4.4.1 Einführung . . . 341
4.4.2 Einteilung . . . 342
4.4.3 Kinematischer Aufbau . . . 343
4.4.3.1 Die RRR-Kinematik . . . 346
4.4.3.2 Der Gewichtsausgleich . . . 347
4.4.4 Greifer . . . 348
4.4.5 Roboterprogrammierung . . . 349
4.4.6 Koordinatensysteme . . . 351
4.4.7 Die Bewegungserzeugung . . . 355
4.4.8 Koordinatentransformation . . . 357
4.4.9 Interpolation und Betriebsarten . . . 358
4.4.10 Schleppabstand und Bahngeschwindigkeit . . . 360
4.4.11 Sensorführung von Robotern . . . 362
4.4.12 Kollaborierende Roboter – Cobot . . . 367
4.4.13 Schutzmaßnahmen . . . 369
4.5 Sicherheit von Maschinen und Anlagen . . . 371

5 Montageautomatisierung 375

5.1 Grundlagen . . . 375
5.2 Materialfluss . . . 378
5.2.1 Lagern . . . 378
5.2.2 Puffern . . . 379
5.2.3 Bunkern . . . 380
5.2.4 Magazinieren . . . 381
5.2.5 Fördersysteme . . . 382
5.2.6 Montage im Kreisprozess . . . 385
5.3 Fügeverfahren . . . 386
5.3.1 Übersicht . . . 386
5.3.2 Zusammensetzen . . . 386
5.3.3 Anpressen und Einpressen . . . 387
5.3.4 Umformendes Fügen . . . 392
5.3.5 Schweißen . . . 394
5.3.5.1 Lichtbogenschweißen . . . 395
5.3.5.2 Fügen durch Widerstandsschweißen 396
5.3.5.3 Gasschmelzschweißen . . . 397
5.3.5.4 Pressschweißen . . . 397
5.3.5.5 Löten . . . 399
5.3.5.6 Kleben . . . 402

6 Prozesse steuern 404

6.1 Einführung . . . 404
6.2 Statistische Prozessregelung (SPC) . 405
6.2.1 Prüfdaten . . . 405
6.2.2 Normalverteilung . . . 406
6.2.3 Wahrscheinlichkeitsnetz . . . 407
6.2.4 Auswertung einer Stichprobe . . . 407
6.2.5 Qualitätsregelkarten . . . 411
6.3 Maschinenfähigkeit und Prozessfähigkeit . . . 413
6.4 Betriebsdatenerfassung (BDE) . . . 416
6.4.1 Chipkarten, Chipmünzen, RFIDs . . . 417
6.5 Manufacturing Execution Sytems (MES) . . . 420
6.5.1 Einführung . . . 420
6.5.2 MES am Beispiel der Datenerfassung . . . 421
6.5.3 MES am Beispiel des Informationsmanagements . . . 421

7 Informationstechnik 422

7.1 Programmierung . . . 422
7.1.1 Programmiersprachen . . . 422
7.1.2 Software Engineering . . . 423
7.1.3 Qualität der Software . . . 424
7.1.4 Sicherung gegen unberechtigte Nutzung . . . 424
7.1.5 Betriebssystem Windows . . . 425
7.1.6 Objektorientierte Programmierung (OOP) . . . 428
7.1.7 Algorithmen . . . 430
7.1.8 Strukturierte Programmierung . . . 431
7.1.9 Rechnerinterne Datendarstellung . . . 432
7.1.10 Programmaufbau und Programmkomponenten . . . 435
7.1.11 Strukturierte Anweisungen . . . 437
7.1.12 Strukturierung mit Funktionen . . . 439
7.1.13 Fallbeispiel: Steuerkurve . . . 440

7.1.14 Einsatz von Smartphone, Tablet und iPad . . . 446
7.1.15 Grafische Programmierung . . . 447
7.2 Steuern mit Computer . . . 453
7.2.1 Zusatzbaugruppen . . . 453
7.2.2 Elemente zu einem i 4.0 Projekt „Werkstück prägen“ . . . 454
7.3 Regelung mit PC und SPS . . . 463
7.3.1 Hardware und Software . . . 463
7.3.2 Grafische Ausgabe . . . 464
7.3.3 Regelkreisglieder . . . 465
7.3.3.1 Proportionalglied ohne Verzögerung (P-Glied) . . . 465
7.3.3.2 Integralglied (I-Glied) . . . 466
7.3.3.3 Totzeitglied (T_t-Glied) . . . 467
7.3.3.4 Proportionalglied mit Verzögerung 1. Ordnung (P-T_1-Glied) . . . 468
7.3.3.5 Proportionalglied mit Verzögerung 2. Ordnung (P-T_2-Glied) und Schwingungsglied . . . 469
7.3.4 Regelkreise . . . 470
7.3.4.1 P-Regelung mit P-T_1-Strecke . . . 470
7.3.4.2 P-Regelung und P-T_1-Strecke (SPS-Simulation) . . . 471
7.3.4.3 I-Regelung und P-T_1-Strecke . . . 472
7.3.4.4 PI-Regelung einer P-T_1-Strecke mit Störgrößenaufschaltung (Beispiel) . . . 473
7.3.4.5 Optimierung der Reglerparameter . . . 474
7.3.4.6 P-Regler mit P-T_1-I-Strecke (Lageregelung) . . . 475
7.3.4.7 Lageregelung mit Totzeit . . . 477
7.3.4.8 Geschwindigkeitsvorsteuerung . . . 478
7.3.5 Fuzzy-Logic . . . 479
7.3.5.1 Grundlagen der Fuzzy-Technologie . 479
7.3.5.2 Fuzzy-Regelung einer Bandsägemaschine . . . 480
7.4 Programmiersprache Java . . . 482
7.4.1 Einführung . . . 482
7.4.2 Erstellen einer Applikation . . . 483
7.4.3 HTML . . . 483
7.4.4 Erstellen von Grafiken . . . 485
7.4.5 Animationen . . . 486
7.4.6 Multithreading . . . 486
7.4.7 Java-Script . . . 487
7.5 Visual Basic für Excel . . . 488
7.5.1 Aufbau eines VBA-Programms . . . 488
7.5.2 Aufruf von VBA . . . 489
7.5.3 Erstellen von Funktionen . . . 490
7.5.4 Variable und Zugriff auf Zellen . . . 491
7.5.5 Projekt: SPC-Maschinenregelung . . . 493
7.5.6 Erstellen eines Formulars als Unterprogramm . . . 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
7.7.2 Binärbildverarbeitung . . . 506
7.7.3 Farbbildverarbeitung und Farbbildcodierung . . . 507
7.8 Virtuelle Umgebung . . . 509
7.8.1 Allgemeines . . . 509
7.8.2 Szenensteuerung . . . 510
7.8.3 Augmented Reality, Mixed Reality . . 511

8 Kommunikationstechnik 512

8.1 Kommunikation über das Internet . . 512
8.2 Local Area Network (LAN) . . . 513
8.2.1 Ethernet-LAN . . . 514
8.2.1.1 Einführung . . . 514
8.2.1.2 Peer-to-Peer-Netzwerk . . . 517
8.2.1.3 Client-Server-Netzwerk . . . 517
8.2.1.4 Peer-to-Peer-Netzwerk mit zwei PCs . 518
8.2.1.5 Erweiterung zu einem Client-Server-Netzwerk . . . 521
8.2.2 Wireless LAN (WLAN) . . . 523
8.3 Feldbus-Systeme . . . 525
8.3.1 CAN-Bus . . . 525
8.3.2 Aktor-Sensor-Interface (AS-i) . . . 527
8.3.3 PROFIBUS, PROFIBUS-DP . . . 529
8.3.4 PROFINET . . . 532
8.3.5 PROFIsafe . . . 533
8.4 Schnittstellen . . . 535
8.4.1 Aufgaben und Art der Schnittstellen 535
8.4.2 USB-Schnittstelle . . . 536
8.4.3 Firewire (IEEE 1394) . . . 536
8.4.4 Serielle Schnittstelle V.24 . . . 537
8.4.5 Serielle Schnittstelle RS 485 . . . 539
8.4.6 IO-Link . . . 540

9 Aufgaben und Übungen 541

9.1 Aufgaben und Übungen zur Pneumatik . . . 541
9.2 Aufgaben und Übungen zur Hydraulik . . . 546
9.3 Aufgaben und Übungen zu GRAFCET . . . 548
9.4 Aufgaben und Übungen zur SPS . . . 549
9.5 Aufgaben und Übungen zur Regelungstechnik . . . 562
9.6 Aufgaben und Übungen zum Programmieren . . . 566
9.7 Aufgaben und Übungen zur Antriebstechnik . . . 569
9.8 Aufgaben und Übungen zur CNC-Technik . . . 570

Sachwortverzeichnis[1] 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 341)* 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 kollaborativ, d. h., sie arbeiten mit Menschen zusammen.

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.

Roboter als Spielzeuge

Roboter als Helfer in der Kantine

Kollaborativer Roboter

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 erwärmte 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.

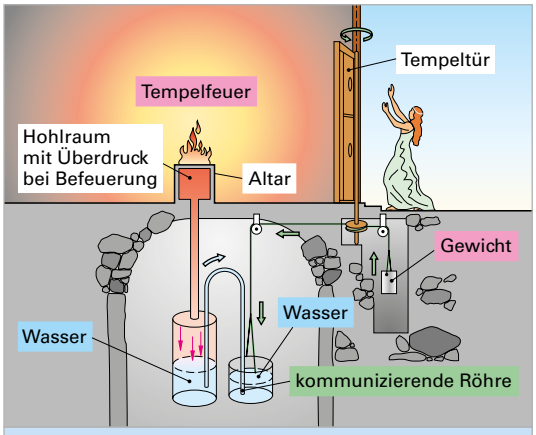

Bild 1: Automatisches Schließen und Öffnen von Tempeltüren, etwa 100 v. Chr.

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)**.

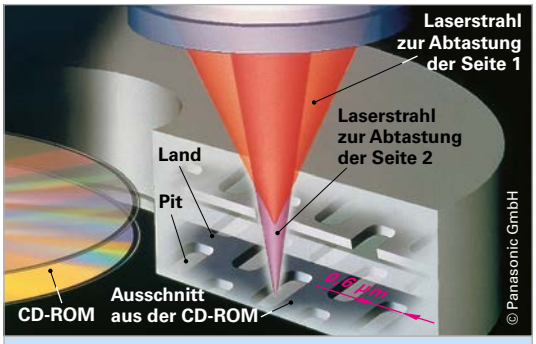

Bild 2: CD-ROM

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)**.

Bild 3: Automatisierung mit Robotern

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.

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.

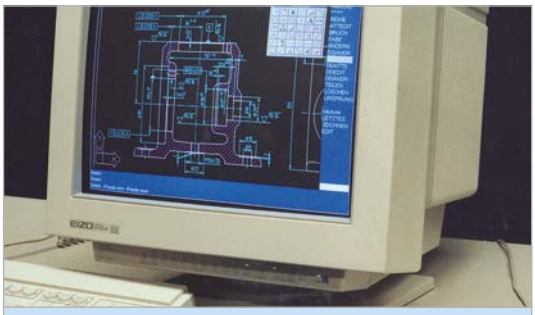

Bild 4: 2D-CAD-System (1998)

[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)**.

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)**.

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 Produktlebenszyklusses. 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 Produklebenszyklus 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.

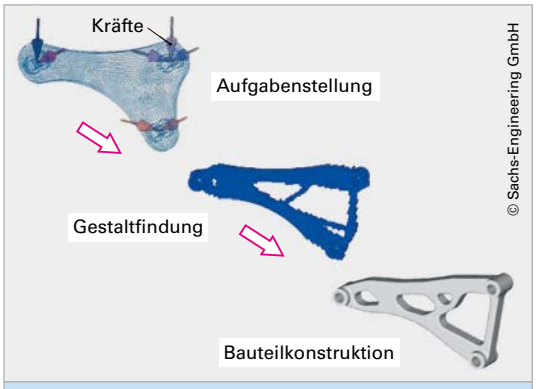

Bild 1: Automatisierte Bauteilentwicklung

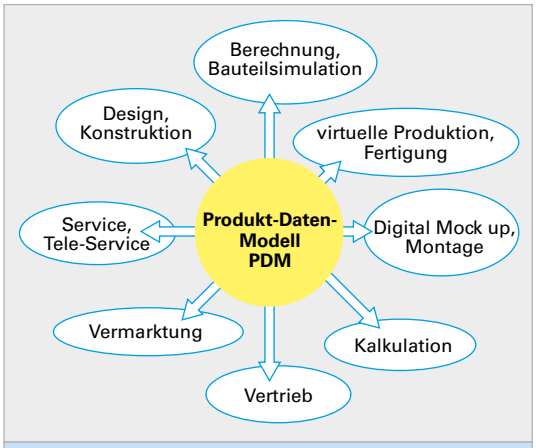

Bild 2: Produkt-Daten-Management

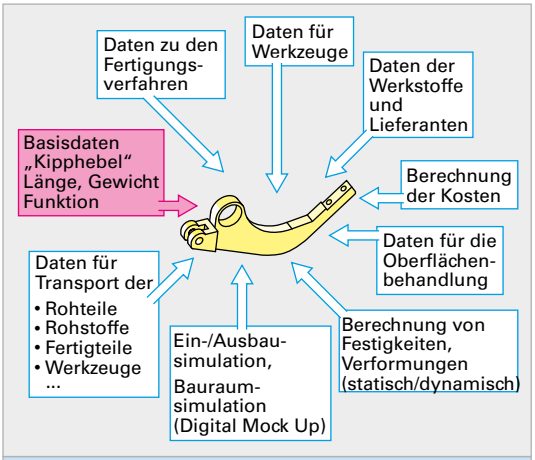

Bild 3: Produktdatenmodell

[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 Internet[1] 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 Malware[2] (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* = bösartig und software

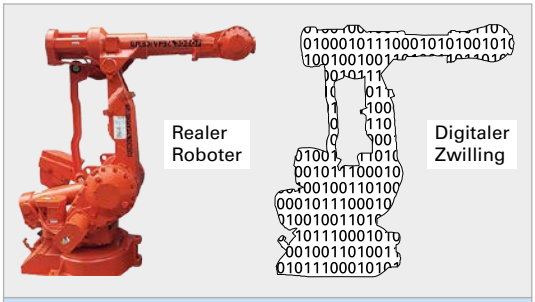

Bild 1: Digitaler Zwilling (Digital Twin)

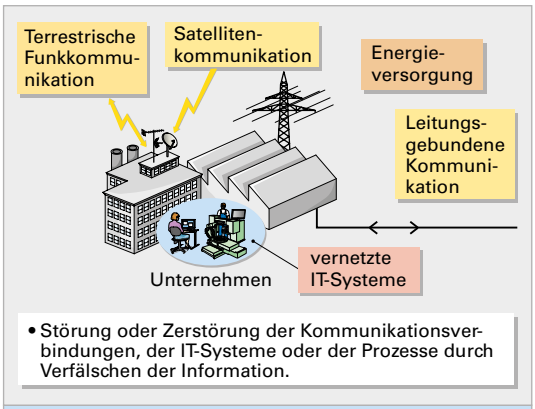

Bild 2: Störungen im IT-Bereich

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 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 sogenannten hybriden Produkten mündet.

Ziel von Industrie 4.0 sind intelligente (smarte[1]) Fabriken. Diese zeichnen sich aus durch:

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

Die heute übliche Produktionsplanung und -steuerung mit der Vorgabe von Arbeitsschritten könnte abgelöst werden, indem z. B. die Werkstücke die Abläufe selbst organisieren. Rohlinge, Fabrikate und Produkte werden **smart**[1]. Sie kommunizieren untereinander und mit übergeordneten Organisationseinheiten **(Bild 1)**.

Die Produkte sind mit speicherfähigen RFIDs[2] versehen oder tragen zumindest eingeprägte Codes **(Bild 2)** zur Kennung. Die Produktionsmittel und Logistikkomponenten sind als „embedded[3] systems“ smart konzipiert und kommunikationsfähig.

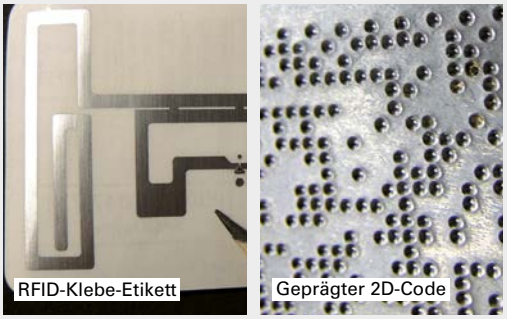

Bild 2: Produktkennung

[1] engl. *smart* = geschickt, klug

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

[3] engl. embedded = eingebettet

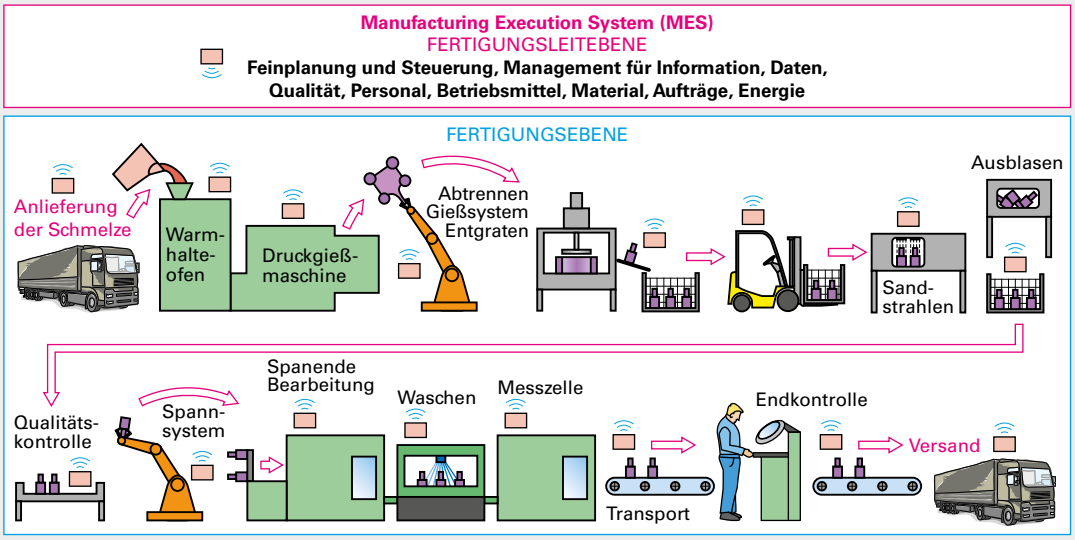

Bild 1: Industrie 4.0 mit Beispiel Gießereibetrieb

1.1.4 Cyber-Physische-Systeme (CPS)

Eine zunehmende Bedeutung haben **Cyber-Physical-Systems**[1] **(CPS)**. Sie ermöglichen durch eine angehängte Kommunikationstechnik die Vernetzung von eingebetteten Systemen untereinander und mit dem Internet. Dabei wird die frühere hierarchische und lokal konzentrierte Struktur aufgelöst **(Bild 1)**. CPS sind die technologische Grundlage für Industrie 4.0. Die besondere Eigenschaft ist, dass CPS als *smart*, d. h. geschickt und intelligent, empfunden wird. So leiten sich daraus Produktnamen ab, wie z. B. *Smartphone* oder *Smart-TV* für internetfähige Mobiltelefone bzw. Fernsehgeräte.

Cyber-Physischen 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)**.

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* (*Augmented*[3] *Reality*, AR). AR verwendet man z. B. bei Inspektionen, Montagen **(Bild 4)** und Reparaturen.

[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

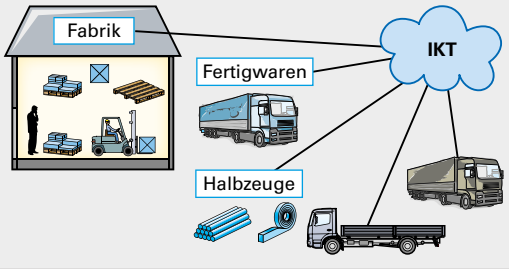

Bild 2: Smart Factory

Bild 3: Immersion in eine virtuelle 3D-Umgebung

Bild 4: Augmented Reality in der Montage

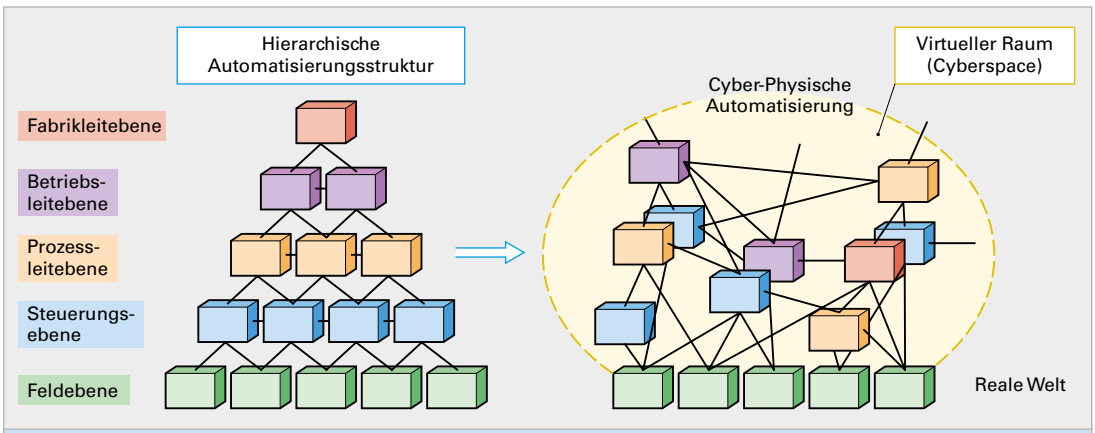

Bild 1: CPS in der Automatisierung

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.

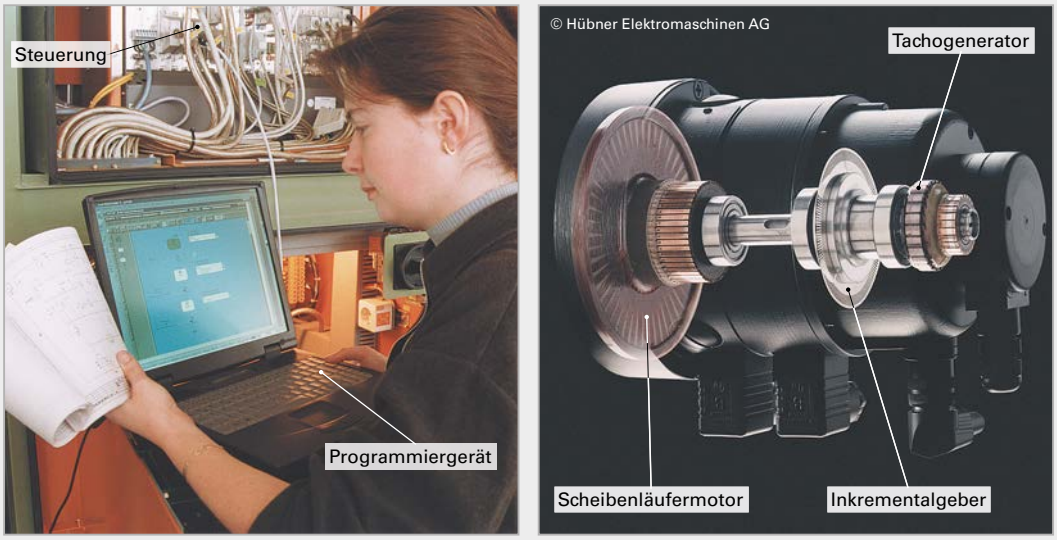

Bild 1: Komponenten der Fertigungsautomatisierung

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)**.

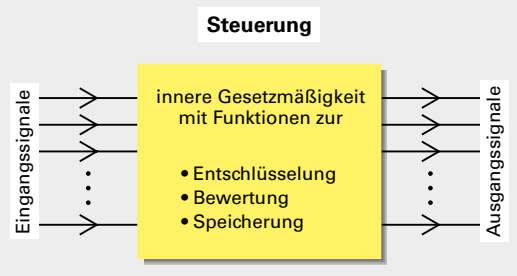

Bild 1: Struktur einer Steuerung

1.2.1 Steuerungsarten

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

Tabelle 1: Steuerungsarten

Art	Signaldarstellung	Beispiele
Analoge Steuerung	Ausgang, Zeit	Steuerung mit Kurvenscheibe
Binäre Steuerung	1 0 1 0 1 0 1, Zeit	Steuerung mit Schaltern und Relais
Digitale Steuerung	0 13 2 4 10 4 9	Winkelcodierer

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.

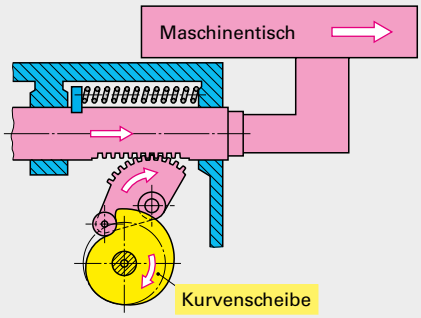

Bild 2: Analoge Steuerung

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.

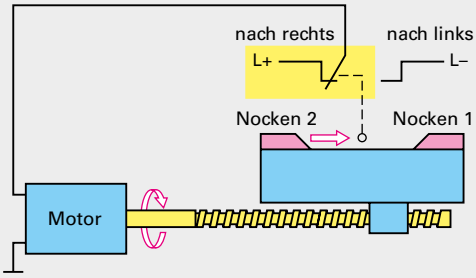

Bild 3: Binäre Steuerung eines Vorschubantriebs für eine Schleifmaschine

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)**.

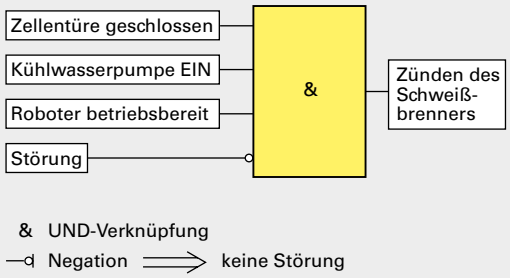

Bild 1: Kombinatorische Steuerung

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).**

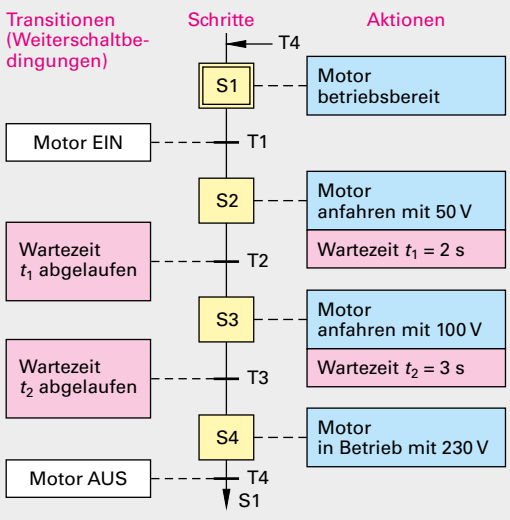

Bild 2: Zeitgeführte Ablaufsteuerung

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

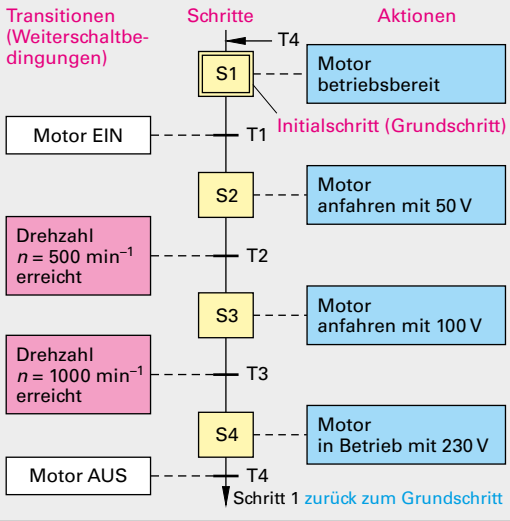

Bild 3: Prozessabhängige Ablaufsteuerung

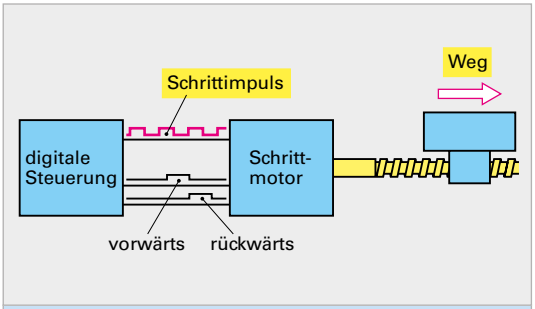

Bild 4: Digital gesteuerter Vorschubantrieb

Codierungen in digitalen Steuerungen

Der meistbenützte Code ist der **Dualcode** (BCN von Binary Coded Natural = natürlicher Binärcode). 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 ... und rechts vom Komma 2^{-1}, 2^{-2}, 2^{-3} ... 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:

$$1101{,}01 \triangleq 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 + 0 \cdot 2^{-1} + 1 \cdot 2^{-2}$$
$$= 8 \quad + 4 \quad + 1 \quad + 0{,}25$$
$$= \mathbf{13{,}25}$$

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).

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

Tabelle 1: Rechnen mit Dualzahlen

Grundregeln:

0 + 0 = 0	0 – 0 = 0	0 · 0 = 0	0 : 1 = 0
1 + 0 = 1	1 – 0 = 1	0 · 1 = 0	1 : 1 = 1
0 + 1 = 1	1 – 1 = 0	1 · 0 = 0	
1 + 1 = 0	0 – 1 = 1	1 · 1 = 1	
plus Übertrag 1 in die nächste Stelle	und belaste die nächste Stelle mit 1		

Beispiele:

6 + 5 = 11	11 – 5 = 6	6 · 5 = 30
110	1011	110 · 101
+ 101	$-_1$101	110
1011 ≙ 11	**110 ≙ 6**	000
		110
		11110 ≙ 30

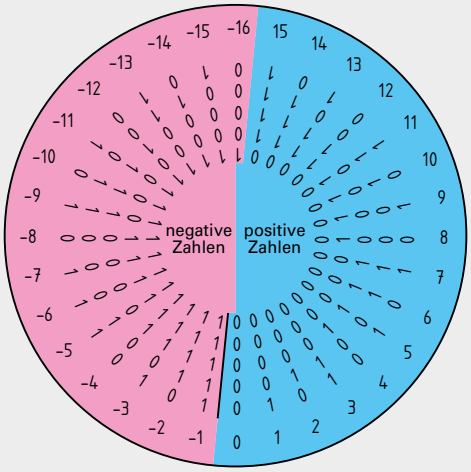

Bild 1: Zahlenring für 4-Bit-Zahlendarstellung

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

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 Einzweckcharakter 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 Steuerung[1] **(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.

[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.

Tabelle 1: Programmverwirklichung

Art		Beispiel
Verbindungs-programmiert **VPS**	fest-programmierbar	Relais-steuerung
	um-programmierbar	Programm-steuerung mit Steckerfeld
Speicherpro-grammiert **SPS** engl. Programmable Logic Controller **PLC**	austausch-programmierbar	SPS mit EPROM1
	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 löschbarer Nur-Lese-Speicher
[3] RAM von Random Access Memory = Speicher mit wahlfreiem Zugriff

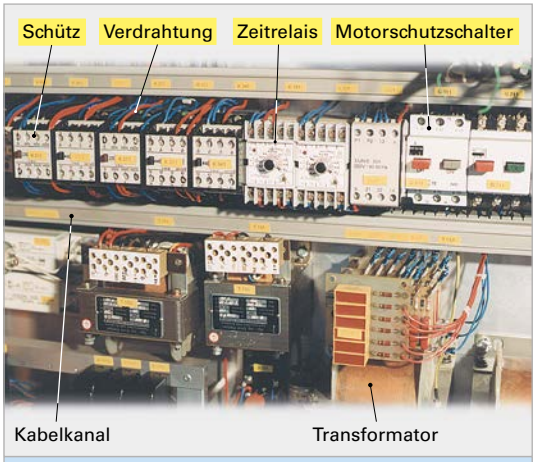

Bild 1: Verbindungsprogrammierte Steuerung (VPS)

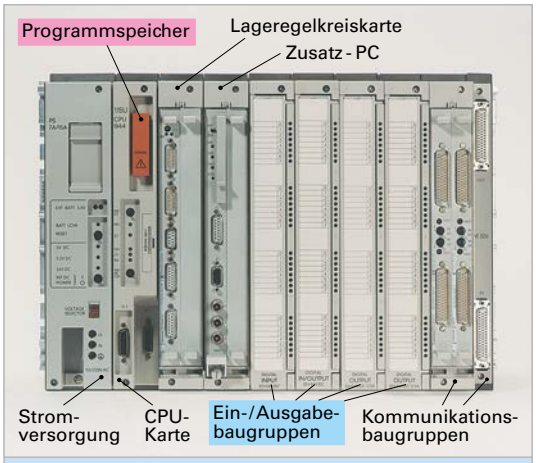

Bild 2: Speicherprogrammierte Steuerung (SPS)

1.2.3 Elektrische Kontaktsteuerungen

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, widergegeben. 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 29/30). In der vereinfachten Form wird zur Kennzeichnung elektrischer Betriebsmittel in Schaltplänen ein einzelnes **Buchstabensymbol** 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.**

1.2.3.1 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).**

Die Betätigung erfolgt entweder direkt über einen Stößel oder über einen Rollenhebel **(Bild 4).** Durch den Hebel vergrößert man den Betätigungsweg und verringert die Betätigungskraft. Die Wegdifferenz zwischen Schaltpunkt und Rückschaltpunkt bezeichnet man als **Schaltdifferenz.**

Bild 1: Schalter

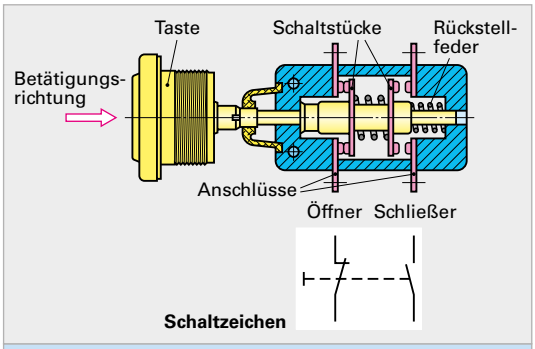

Bild 2: Druckknopftastschalter (Taster)

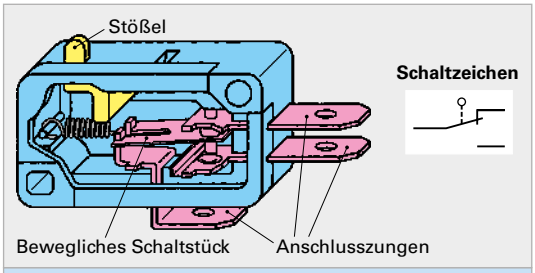

Bild 3: Nockenschalter

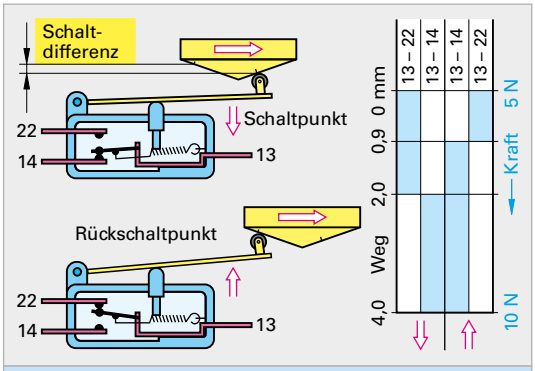

Bild 4: Schaltdifferenz bei einem Positionsschalter mit Rollenhebel