EUROPA-FACHBUCHREIHE
für elektrotechnische
und elektronische Berufe

Fachkunde Industrieelektronik und Informationstechnik

Geräte- und Systemtechnik

12. überarbeitete und erweiterte Auflage

Bearbeitet von Lehrern und Ingenieuren an beruflichen Schulen,
Hochschulen und Produktionsstätten (siehe Rückseite)

Ihre Meinung interessiert uns!
Teilen Sie uns Ihre Verbesserungsvorschläge, Ihre Kritik aber auch Ihre Zustimmung zum Buch mit.

Schreiben Sie uns an die E-Mail-Adresse: **lektorat@europa-lehrmittel.de**

Die Autoren und der Verlag Europa-Lehrmittel Herbst 2017

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

Europa-Nr.: 32319

Autoren der Fachkunde Industrieelektronik und Informationstechnik

Günther Buchholz	Dipl.-Ing. (FH), Oberstudienrat	Stuttgart
Oliver Gomber	Dipl.-Ing., Studiendirektor	Freiburg
Bernhard Grimm	Oberstudienrat	Sindelfingen, Leonberg
Gregor Häberle	Dr.-Ing., Abteilungsleiter	Tettnang
Jörg A. Oestreich	Dipl.-Ing., StR	Schwäbisch Hall
Werner Philipp	Dipl.-Ing.	Heilbronn
Bernd Schiemann	Dipl.-Ing.	Durbach
Albrecht Schilling	Dipl.-Ing. (FH), Oberstudienrat	Sindelfingen
Dietmar Schmid	Dr.-Ing., Professor	Essingen

Bildentwürfe: Die Autoren

Fotos: Autoren und Firmen (Verzeichnis der Firmen und Dienststellen Seite 680)

Bildbearbeitung: Zeichenbüro des Verlags Europa-Lehrmittel GmbH & Co. KG, Ostfildern

Lektorat und Leitung des Arbeitskreises: Bernd Schiemann

Warenzeichen:

- Windows ist ein eingetragenes Warenzeichen der Microsoft Corporation (Nachdruck der Box Shots von Microsoft-Produkten mit freundlicher Erlaubnis der Microsoft-Corporation)
- INTEL ist ein eingetragenes Warenzeichen der INTEL-Corporation
- Alle anderen Produkte, Warenzeichen, Schriftarten, Firmennamen und Logos sind Eigentum oder eingetragene Warenzeichen ihrer jeweiligen Eigentümer

Diesem Buch wurden die neuesten Ausgaben der DIN-Blätter und der VDE-Bestimmungen zugrunde gelegt. Verbindlich sind jedoch nur die DIN-Blätter und VDE-Bestimmungen selbst.

Die DIN-Blätter können von der Beuth-Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, und Kamekestraße 2–8, 50672 Köln, bezogen werden. Die VDE-Bestimmungen sind bei der VDE-Verlag GmbH, Bismarckstraße 33, 10625 Berlin, erhältlich.

12. Auflage 2017

Druck 5 4 3 2

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

ISBN 978-3-8085-3260-7

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: Grafische Produktionen Neumann, 97222 Rimpar

Umschlag Idee: Bernd Schiemann, Umsetzung: Atelier PmbH, 35088 Battenberg

Umschlagfotos: Dr. Fritz Faulhaber GmbH.

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

Vorwort zur 12. Auflage

Das Buch „Fachkunde Industrieelektronik- und Informationstechnik" ist ein Lehrbuch für die Erstausbildung in den Berufen Elektroniker/in für Geräte- und Systeme, Elektroniker/in für Automatisierungstechnik sowie für die Systemelektroniker/in und Systeminformatiker.

Auch für den Unterricht an Informationstechnischen Gymnasien, Fachgymnasien, Fachoberschulen und Berufsoberschulen wird das Buch empfohlen. Als grundlegende Einführung in das gesamte Fachgebiet ist dieses Buch gleichzeitig nützlich für Schüler an Berufskollegs und Studierende an Fachschulen, Berufsakademien und Fachhochschulen.

Besonderer Wert wurde darauf gelegt, Funktionszusammenhänge und Funktionsabläufe durch zahlreiche mehrfarbige Bilder, Diagramme und Tabellen zu veranschaulichen.

Neu: 1-Bit-AD-Umsetzer, Sigma-Delta-Umsetzer, PCIe-Schnittstelle, Mikrocontroller mit 8051-Architektur, ARDUINO, 3D-Drucker, Asi-Interface, safety at work, IO-Link, Gateways für Feldbusse, Vectoring und GFast, IoT, Logo!-Produktfamilie, Mensch-Maschine-Schnittstellen, Elektrizitätszähler, Universalschaltregler-IC, Piezo-Antriebe, elektronisch kommutierte Motoren BLDC auch mit Vektorregelung, geschalteter Reluktanzmotor SRM, Hybridantriebe, Elektromobilität.

Völlig neu gestaltet wurde das Kapitel *Sensoren*.

Eine Vielzahl von Seiten wurde neu gestaltet oder überarbeitet.

Liebe Leserin und lieber Leser,

Sie haben die neue Fachkunde Industrieelektronik und Informationstechnik vor sich liegen. In diesem Lehrbuch finden Sie alles, was zur Ausbildung und Weiterbildung in entsprechenden Lernfeldberufen verwendet wird.

Welche Ziele kann ich mithilfe dieses Buchs erreichen?

Das Buch

- vermittelt Wissen, Fähigkeiten und Fertigkeiten,
- soll neugierig auf Neues machen, damit zum Lernen anregen und so eigene Kompetenzen wie Handlungskompetenz, Fachkompetenz sowie Methodenkompetenz stärken.

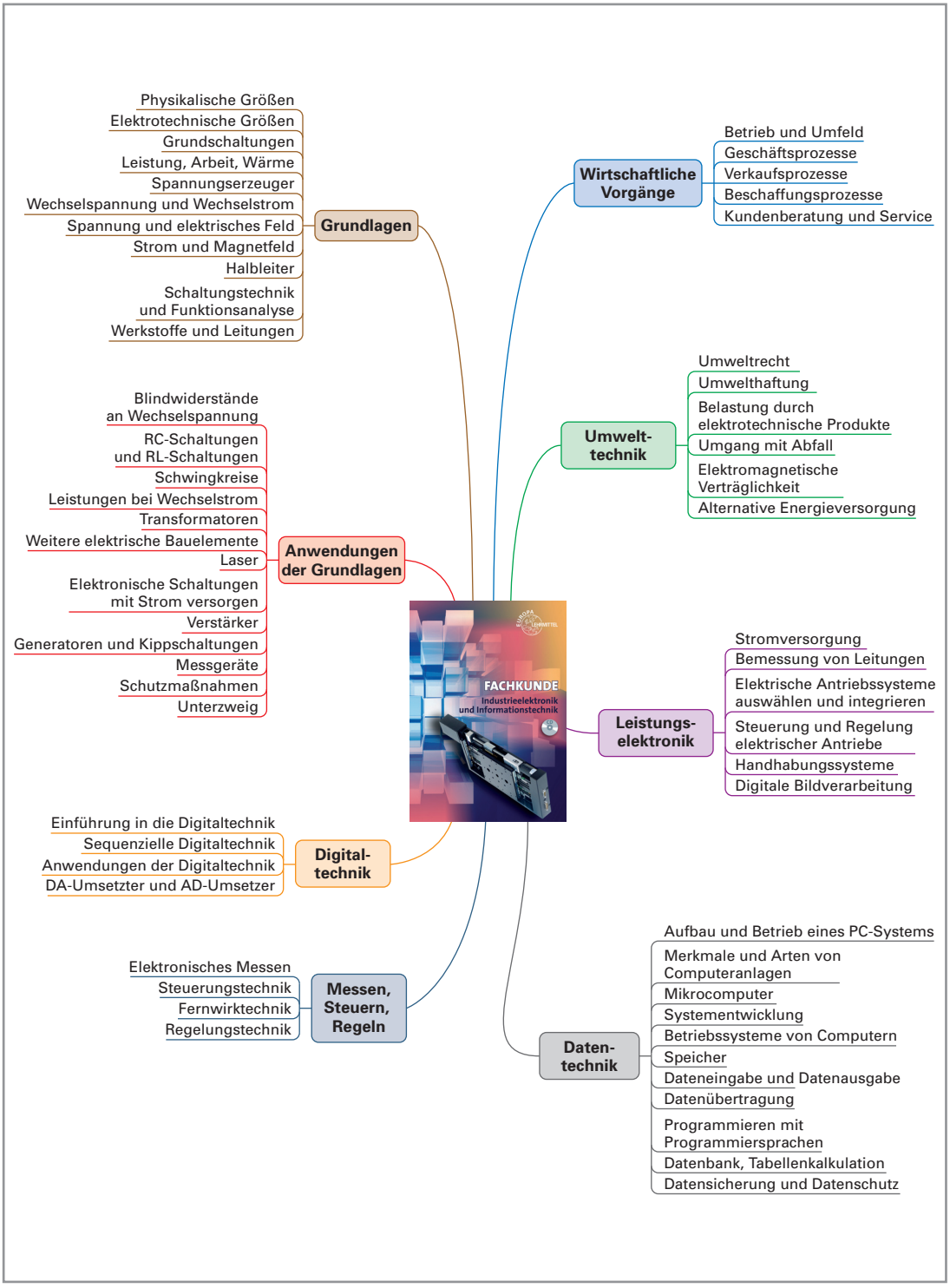
Sie besuchen einen Lernfeldunterricht und bearbeiten eine Lernsituation. Wie kann Ihnen dieses Buch dabei helfen?

- Ein ausführliches Sachwortverzeichnis erleichtert das Finden technischer Begriffe, auch auf Englisch.
- physikalische und technische Sachverhalte werden durch viele anschauliche Bilder und Tabellen ergänzt und erklärt.
- passend eingefügte Schaltpläne fördern die Fähigkeit zur Analyse, auch komplexer Systeme.
- wichtige Formeln mit Formelzeichenerklärungen und vielen Beispielrechnungen fördern und festigen das Verständnis.
- Merksätze fassen wichtige Sachverhalte kurz zusammen.
- Eine kleine Übersicht auf der folgenden Seite ordnet Beispiele aus ausgewählten Kapiteln Lernsituationen zu.

Lernfelder des ersten Ausbildungsjahres für alle Berufe[1]					
LF/ Jahr	Zeitvor- gabe in h			Lernfeldinhalte	Beispiele, Kapitel
1/1	80		Elektrotechnische Systeme analysieren und Funktionen prüfen	El. Grundgrößen Grundschaltungen Wirtschaftliche Vorgänge	1.2 1.3 8.1-2
2/1	80		Elektrotechnische Installationen planen und ausführen	Installationsschaltungen Sicherheitsbestimmungen	1.10 2.12
3/1	80		Steuerungen analysieren und anpassen	Steuerungsarten Digitaltechnik	5.2 3.3, 3.4
4/1	80		Informationstechnische Systeme bereitstellen	Systemanalyse Betriebssysteme von PC Hardware	4.1.1 4.5 4.3, 4.6, 4.7
Lernfelder der Fachstufen GS mit Systemelektroniker und AT					
5/2	GS	60	Elektroenergieversorgung für Geräte und Systeme realisieren und deren Sicherheit gewährleisten	Gefahren des el. Stromes Schutzmaßnahmen	1.2.9 2.12
5/2	AT	60	Elektroenergieversorgung und Sicherheit von Betriebsmitteln gewährleisten	Gefahren des el. Stromes Schutzmaßnahmen	1.2.9 2.12
6/2	GS	80	Elektronische Baugruppen von Geräten konzipieren, herstellen und prüfen	Widerstandsarten Halbleiter Messtechnik	1.2.8 1.9 2.11
6/2	AT	80	Anlagen analysieren und deren Sicherheit prüfen	MSR-Technik Schnittstellen	5 4.7.3
7/2	GS	80	Baugruppen hard- und softwareseitig konfigurieren	Mikrocontroller PLD SPS	4.3.7 3.3 5.2.4
7/2	AT	80	Steuerungen für automatisierte Anlagen programmieren und realisieren	Feldbusse Programmierung Gebäudeleittechnik und Gebäudesystemtechnik	4.8.4.6-9 4.9 4.8.7
8/2	GS	60	Geräte herstellen und prüfen	AD-DA-Umsetzer Kleinmotoren	3.4 6.3.1-4
8/2	AT	60	Antriebssysteme auswählen und integrieren	Stromrichter Handhabungsautomaten	6.4.5.1-5 6.5
9/3	GS	100	Geräte und Systeme in Stand halten	Schaltungsanalyse Entsorgung	2.8.7 7.1-4
9/3	AT	100	Steuerungssysteme und Kommunikationssysteme integrieren	Datennetze, Topologien Echtzeitfähigkeit	4.8 4.2.1-4
10/3	GS	80	Fertigungsanlagen einrichten	Steuerungsarten Steuerungen	5.2.1 5.2.2, 5.2.3, 5.2.4.16
10/3	AT	100	Automatisierungssysteme in Betrieb nehmen und übergeben	Parametrierung von FU	6.4.7.3
11/3	GS	100	Prüfsysteme einrichten und anwenden	Diagnosewerkzeuge, Debugger Bussysteme	4.4.4.1-2 4.8.4
11/3	AT	80	Automatisierungssysteme in Stand halten und optimieren	Reglereinstellungen LabView	5.4.6.3 2.11.4
12/4	GS	80	Geräte und Systeme planen und realisieren	Schutzleiter Kosten-Nutzenbetrachtung	1.11.8 4.4.1
12/4	AT	60	Automatisierungssysteme planen	Pflichtenheft Recycling	4.4.1 7.4
13/4	GS	60	Fertigungs- und Prüfsysteme in Stand halten	Soll-Ist-Vergleich	5.4.1
13/4	AT	80	Automatisierungssysteme realisieren	Programmimplementierung	4.4.3

[1] Elektronikerberufe mit Lernfeldern: Automatisierungstechnik AT; Energie- und Gebäudetechnik BT; Betriebstechnik BT; Gebäude- und Infrastruktursysteme GI; Maschinen- und Antriebstechnik MA; Geräte und Systeme GS und Systemelektroniker im Handwerk.

Die neue Fachkunde auf einen Blick:



Inhaltsverzeichnis

Titel 1
Autoren 2
Vorwort und Hinweise zum Lernfeldunterricht 3
Lernfeldbezug 4
Die neue Fachkunde auf einen Blick 5
Inhaltsverzeichnis ..... 6 - 10

1 Grundlagen

1.1 Physikalische Größen 11
1.1.1 Kraftfelder 11
1.1.2 Masse und Kraft 11
1.1.3 Basisgrößen, Einheiten und abgeleitete Einheiten 12
1.1.4 Kraft als Beispiel eines Vektors 13
1.1.5 Arbeit 13
1.1.6 Energie 14

1.2 Elektrotechnische Grundgrößen 15
1.2.1 Ladung 15
1.2.2 Spannung 16
1.2.3 Elektrischer Strom 17
1.2.4 Elektrischer Widerstand 18
1.2.5 Ohm'sches Gesetz 19
1.2.6 Widerstand und Temperatur 20
1.2.7 Stromdichte 21
1.2.8 Bauformen der Widerstände 21
1.2.8.1 Festwiderstände 21
1.2.8.2 Veränderbare Widerstände 23
1.2.8.3 Heißleiterwiderstände NTC 23
1.2.8.4 Kaltleiterwiderstände PTC 24
1.2.8.5 Spannungsabhängige Widerstände VDR 24
1.2.9 Gefahren des elektrischen Stromes 25

1.3 Grundschaltungen 26
1.3.1 Bezugspfeile 26
1.3.2 Reihenschaltung 27
1.3.3 Parallelschaltung 29
1.3.4 Gemischte Schaltungen 30
1.3.4.1 Spannungsteiler 31
1.3.4.2 Messbereichserweiterung bei Strommessern 32
1.3.4.3 Widerstandsbestimmung durch Strom- und Spannungsmessung 33

1.4 Leistung, Arbeit, Wärme 35
1.4.1 Elektrische Leistung 35
1.4.2 Elektrische Arbeit 37
1.4.3 Mechanische Leistung 38
1.4.4 Wirkungsgrad 38
1.4.5 Temperatur und Wärme 40
1.4.6 Wärmeübertragung 41
1.4.7 Leistungshyperbel 43

1.5 Spannungserzeuger 44
1.5.1 Arten der Spannungserzeugung 44
1.5.2 Belasteter Spannungserzeuger 45
1.5.3 Anpassung 46
1.5.4 Schaltung von Spannungserzeugern 48
1.5.5 Ersatzspannungsquelle und Ersatzstromquelle 49

1.6 Wechselspannung und Wechselstrom 50

1.7 Spannung und elektrisches Feld 57
1.7.1 Elektrisches Feld 57
1.7.2 Kondensator 59
1.7.3 Schaltungen von Kondensatoren 62
1.7.4 Kondensator im Gleichstromkreis 63
1.7.5 Bauformen der Kondensatoren 64

1.8 Strom und Magnetfeld 68
1.8.1 Magnetisches Feld 68
1.8.2 Elektromagnetische Baugruppen 76
1.8.2.1 Elektromagnete 76
1.8.2.2 Relais 76
1.8.3 Strom im Magnetfeld 78
1.8.4 Induktion 83
1.8.5 Spule im Gleichstromkreis 87
1.8.6 Bauformen der Spulen 87

1.9 Halbleiter 89
1.9.1 Kristallaufbau 89
1.9.2 Eigenleitung 89
1.9.3 Störstellenleitung 89
1.9.4 Halbleiterdioden 90
1.9.4.1 Sperrschicht 90
1.9.4.2 Sperrschichtkapazität 91
1.9.4.3 Rückwärtsrichtung und Vorwärtsrichtung 91
1.9.4.4 Elektrischer Durchbruch 93
1.9.4.5 Bauformen von Halbleiterdioden 94
1.9.4.6 Fotodioden, Fotowiderstände und Fotoelemente 96
1.9.4.7 LED und Optokoppler 98
1.9.5 Arbeitspunkt 100

1.10 Schaltungstechnik und Funktionsanalyse 102
1.10.1 Dokumente der Elektrotechnik 102
1.10.2 Betriebsmittelkennzeichnung nach DIN EN 61346 103
1.10.3 Schaltungen mit Installationsschaltern 104
1.10.4 Schaltfunktion 104
1.10.5 Schützschaltungen 106
1.10.6 Schaltungen mit Zeitschaltern 108

1.11 Werkstoffe 109
1.11.1 Atommodell 109
1.11.2 Periodensystem 110
1.11.3 Chemische Bindungen 110
1.11.4 Säuren, Basen, Salze 111
1.11.5 Elektrochemie 112
1.11.5.1 Stromleitung in Flüssigkeiten 112
1.11.5.2 Elektrolytische Elemente 112
1.11.5.3 Akkumulatoren 113
1.11.6 Korrosion 115
1.11.7 Leiterwerkstoffe 116
1.11.8 Lote und Flussmittel 117
1.11.9 Isolierstoffe 118

2 Anwendungen der Grundlagen

2.1 Blindwiderstände an Wechselspannung 119
2.1.1 Wechselstromwiderstand des Kondensators 119
2.1.2 Wechselstromwiderstand der Spule 120
2.1.3 Schaltungen von nicht gekoppelten Spulen 121

2.2 RC-Schaltungen und RL-Schaltungen 122
2.2.1 Reihenschaltung aus Wirkwiderstand und Blindwiderstand 122
2.2.2 Parallelschaltung aus Wirkwiderstand und Blindwiderstand 124
2.2.3 Verluste im Kondensator 125
2.2.4 Verluste in der Spule 126

2.2.5 Impulsverformung 127
2.2.6 Siebschaltungen 130
2.2.7 Mechanische Bandfilter 134

2.3 Schwingkreise 135
2.3.1 Reihenschwingkreis 135
2.3.2 Parallelschwingkreis 136
2.3.3 Eigen- und Resonanzfrequenz 137
2.3.4 Bandbreite und Güte 138

2.4 Leistungen bei Wechselstrom 139
2.4.1 Wirkleistung 139
2.4.2 Blindleistung, Scheinleistung 139
2.4.3 Leistungsdreiecke 140
2.4.4 Leistungsfaktor 141
2.4.5 Leistungen bei Dreiphasenwechselspannung 142
2.4.5.1 Entstehung des Drehstromes 142
2.4.5.2 Sternschaltung 143
2.4.5.3 Dreieckschaltung 144
2.4.5.4 Ermittlung der Leistung 145
2.4.6 Kompensation von Blindwiderständen 146

2.5 Transformatoren 148
2.5.1 Wirkungsweise und Begriffe 148
2.5.2 Aufbau von Transformatoren 148
2.5.3 Idealer Transformator 149
2.5.4 Realer Transformator im Leerlauf 151
2.5.5 Realer Transformator unter Last 152
2.5.6 Besondere Transformatoren 154

2.6 Weitere elektronische Bauelemente 157
2.6.1 Besondere Halbleiterdioden 157
2.6.1.1 Z-Dioden 157
2.6.1.2 Schottkydioden 158
2.6.2 Bipolare Transistoren 158
2.6.3 Unipolare Transistoren (FET) 163
2.6.4 IGBT 168
2.6.5 Thyristoren 170
2.6.6 Integrierte Schaltungen (IC) 175
2.6.7 Elektronenstrahlröhren 176
2.6.8 Gasentladungsröhren 177
2.6.9 Strahlungsgesteuerte Röhren 179

2.7 Laser 180

2.8 Elektronische Schaltungen mit Strom versorgen 183
2.8.1 Netzanschlussgerät 183
2.8.2 Gleichrichter 183
2.8.3 Gleichrichterschaltungen 184
2.8.4 Phasenanschnittsteuerung 187
2.8.5 Glättung der gleichgerichteten Spannung 188
2.8.6 Stabilisieren 190
2.8.6.1 Stabilisierungsfaktor 190
2.8.6.2 Lineare Spannungsregler 191
2.8.6.3 Lineare Spannungsregler-IC 193
2.8.7 Projektaufgabe Netzteil 195

2.9 Verstärker 198
2.9.1 Grundbegriffe 198
2.9.2 Verstärker mit bipolaren Transistoren 202
2.9.2.1 Verstärkergrundschaltungen 202
2.9.2.2 Arbeitspunkt 203
2.9.2.3 Emitterschaltung 204
2.9.2.4 Gegenkopplung 206
2.9.2.5 Gegentaktschaltungen 207
2.9.3 Verstärker mit Feldeffekttransistoren 208
2.9.5 Verstärker für den D-Betrieb 211
2.9.6 Operationsverstärker 212
2.9.6.1 Eigenschaften 212
2.9.6.2 Schaltungsaufbau 213
2.9.6.3 Betriebsverhalten 213
2.9.6.4 Grundschaltungen 215
2.9.7 Treiberverstärker 220

2.10 Generatoren und Kippschaltungen 221
2.10.1 Sinusgeneratoren 221
2.10.2 Sägezahngenerator 223
2.10.3 Elektronische Schalter 223
2.10.4 Bistabile Kippschaltung 224
2.10.5 Zeitgeberbaustein NE555 224
2.10.6 Monostabile Kippschaltung 225
2.10.7 Astabile Kippschaltung 226
2.10.8 Schwellwertschalter 227

2.11 Messgeräte 228
2.11.1 Zeigermesswerke 228
2.11.2 Digitalmultimeter 229
2.11.3 Oszilloskop 230
2.11.3.1 Analog-Oszilloskop 230
2.11.3.2 Digitales Speicheroszilloskop DSO 233
2.11.3.3 Scopemeter 234
2.11.3.4 Logikanalysatoren 235
2.11.4 PC-Messtechnik 237
2.11.5 Simulationssysteme 241

2.12 Schutzmaßnahmen 245
2.12.1 Sicherheitsbestimmungen 245
2.12.2 Schutzarten elektrischer Betriebsmittel 247
2.12.3 Systemunabhängige Schutzmaßnahmen Überstrom-Schutzeinrichtungen 248
2.12.4 Systemabhängige Schutzmaßnahmen 250
2.12.5 Funktionale Sicherheit 254
2.12.6 Prüfung von Schutzmaßnahmen 255
2.12.7 Wiederholungsprüfungen an elektrischen Geräten 256

3 Digitaltechnik

3.1 Einführung in die Digitaltechnik 257
3.1.1 Dualcode 257
3.1.2 Binäre Elemente 258
3.1.3 Grundlagen der Schaltalgebra 261
3.1.4 Analyse und Synthese von Schaltungen 263
3.1.5 Binäre Elemente mit besonderen Ausgängen 264
3.1.6 Digitale Schaltkreise 265
3.1.7 Daten von binären Elementen 266
3.1.8 Karnaugh-Diagramm 268
3.1.9 Binärcodes 270
3.1.9.1 BCD-Codes 270
3.1.9.2 Gray-Code 271
3.1.9.3 Strichcodes (Barcodes) 271
3.1.9.4 Flächencodes 273
3.1.9.5 Codeleser 273
3.1.9.6 Darstellung von alphanumerischen Zeichen 274
3.1.10 Anwendung Codeumsetzer 275

3.2 Sequenzielle Digitaltechnik (Schaltwerke) 276
3.2.1 Binärspeicher 276
3.2.2 Asynchrone Kippglieder (Flipflops) 278
3.2.3 Synchrone Kippglieder (Flipflops) 279
3.2.4 Monoflops und Verzögerungselemente 282
3.2.5 Asynchrone Zähler 283
3.2.6 Synchrone Zähler 285
3.2.6.1 Wertetabelle und Zeitablaufdiagramm 285
3.2.6.2 Schaltfunktionen aus Wertetabelle 285

3.2.6.3 Zähler mit T-Kippgliedern 286
3.2.7 Zähldekaden 288
3.2.8 Schieberegister 290
3.2.9 Zähler mit Codeumsetzer 292
3.2.10 Frequenzteiler 293
3.2.11 Projektaufgabe Signalanlage 294

3.3 Anwendungen der Digitaltechnik 296
3.3.1 Programmierbare Logikelemente 296
3.3.1.1 Programmierung und Aufbau 296
3.3.1.2 PAL-Schaltkreise 297
3.3.1.3 Schaltkreise mit zwei programmierbaren Feldern 300
3.3.1.4 PAL-Schaltkreis als PROM 300
3.3.1.5 EPLD-Logikschaltkreis EP 310 301
3.3.1.6 ISP-Bauelemente 303
Parallele Rechenwerke 304
3.3.3 Fehler erkennen 306

3.4 DA-Umsetzer und AD-Umsetzer 307
3.4.1 Digital-Analog-Umsetzer 307
3.4.2 Analog-Digital-Umsetzer 308
3.4.2.1 Momentanwert-AD-Umsetzer 308
3.4.2.2 Integrierende AD-Umsetzer 310

4 Datentechnik

4.1 PC-System 313
4.1.1 Bestandteile eines PC-Systems 313
4.1.2 Externe Schnittstellen am PC 314
4.1.3 Tastatur des PC 315
4.1.4 Inbetriebnahme eines PC 315
4.1.5 PCI-Express-Schnittstelle 316

4.2 Merkmale und Arten von Computeranlagen 317
4.2.1 Leistungsfähigkeit 317
4.2.2 Arten von Computern 317
4.2.3 Client-Server-Systeme 319
4.2.4 Aufgabenbereiche von Computern 320

4.3 Mikrocomputer 321
4.3.1 Aufbau eines Mikrocomputers 321
4.3.2 Wirkungsweise von Mikroprozessoren 322
4.3.3 Mikroprozessorfamilie X86 324
4.3.4 Weitere Mikroprozessoren 326
4.3.5 Speicherverwaltungen 327
4.3.5.1 Adressierungsarten 327
4.3.5.2 FIFO-Speicherverwaltung 328
4.3.5.3 Stack-Speicherverwaltung 328
4.3.5.4 Virtuelle Speicherverwaltung 329
4.3.6 EA-Elemente 331
4.3.7 Mikrocontroller 332
4.3.7.1 Allgemeines 332
4.3.7.2 Mikrocontroller mit 8051-Architektur 335
4.3.7.3 AVR-Mikrocontroller 336

4.4 Systementwicklung 337
4.4.1 Systemanalyse, Aufgabenanalyse 337
4.4.2 Programmentwicklung 340
4.4.3 CPU-Programmierung mit Hochsprachen 341
4.4.4 Programmierung von Mikrocontrollern 344
4.4.4.1 Programmierung mit Assemblersprache 345
4.4.4.2 Programmierung von Mikrocontrollern mit C 346
4.4.5 PIC-Mikrocontroller 348
4.4.6 ARDUINO 349

4.5 Betriebssysteme von Computern 351
4.5.1 Aufgaben eines Betriebssystems 351
4.5.2 BIOS und UEFI 352
4.5.3 Befehlszeilenkommandos 353
4.5.4 Windows anwenden 355
4.5.5 Linux anwenden 359

4.6 Speicher 361
4.6.1 RAM 361
4.6.2 ROM 363
4.6.3 Speicheradressierung 364
4.6.4 Datenzugriff 365
4.6.5 Festplattenspeicher 366
4.6.6 Halbleiterlaufwerke 368
4.6.7 Optische Speicher 369
4.6.8 Speicher für Backup 371
4.6.9 Chipkarten 373
4.6.10 RFID-Transponder 375

4.7 Dateneingabe und Datenausgabe 376
4.7.1 Eingabegeräte 376
4.7.1.1 Tastaturen 376
4.7.1.2 Dateneingabe am Bildschirm 376
4.7.1.3 Digitalisierer (Digitizer) 378
4.7.1.4 Scanner 379
4.7.2 Ausgabegeräte 379
4.7.2.1 Drucker 379
4.7.2.2 3D-Drucker 380
4.7.2.3 Displays und Beamer 382
4.7.2.4 Interaktives Whiteboard 383
4.7.3 Schnittstellen für Eingabegeräte und Ausgabegeräte 384
4.7.3.1 Aufgaben und Art der Schnittstellen 384
4.7.3.2 Serielle Schnittstellen 385

4.8 Datenübertragung 389
4.8.1 Verhalten von Leitungen bei hoher Frequenz 389
4.8.2 Modulation und Demodulation 391
4.8.2.1 Analoge Modulation 391
4.8.2.2 Digitale Modulation 392
4.8.2.3 Demodulation 396
4.8.3 Multiplexverfahren 397
4.8.3.1 Zeitmultiplexverfahren 397
4.8.3.2 Weitere Multiplexverfahren 399
4.8.4 Datennetze 400
4.8.4.1 Begriffe zu Datennetzen 400
4.8.4.2 Netztopologien und Zugriffsverfahren 401
4.8.4.3 Übertragungsgeschwindigkeiten 401
4.8.4.4 Ethernet-LAN 402
4.8.4.5 CAN-Bus 406
4.8.4.6 AS-i-Feldbus 408
4.8.4.7 IO-Link 410
4.8.4.8 PROFIBUS, PROFIBUS DP 412
4.8.4.9 Profinet 413
4.8.4.10 PROFIsafe 414
4.8.5 Datenübertragung im Telekommunikationsnetz 415
4.8.6 Digital Subscriber Line DSL 416
VoIP, Vectoring.... 417
4.8.7 Gebäudeleittechnik und Gebäudesystemtechnik 418
4.8.8 Internet 424
4.8.8.1 Aufbau des Internet 424
4.8.8.2 Internet-Zugangsarten 425
4.8.8.3 Kommunikationsprotokolle 426
4.8.8.4 Powerline Communication 427
4.8.9 Internet der Dinge (IoT) 428
4.8.9.1 Teilnehmer im Verbraucher-IoT 428

4.8.9.2 IoT in der Industrie 429

4.9 Programmieren mit Programmiersprachen 430
4.9.1 Begriffe des Programmierens 430
4.9.2 Programmieren in Visual Basic 431
4.9.2.1 Allgemeines 431
4.9.2.2 Projekte, Formeln, Module 432
4.9.2.3 Vereinbarungen 432
4.9.2.4 Strukturierte Anweisungen 433
4.9.2.5 Textfenster, Check-Kästchen, Buttons 435
4.9.2.6 Combo-Box 438
4.9.2.7 Menüleisten 440
4.9.2.8 Operatoren und mathematische Funktionen 443
4.9.3 Programmieren in Visual C# 445
4.9.3.1 Prinzipieller Programmaufbau 445
4.9.3.2 Vereinbarungen (Deklarationen) 446
4.9.3.3 Methoden für die Eingabe und die Ausgabe 448
4.9.3.4 Operatoren und Ausdrücke 450
4.9.3.5 Bedingte Anweisungen 451
4.9.3.6 Inkrementoperatoren und Dekrementoperatoren 453
4.9.3.7 Iterationsanweisungen 453
4.9.4 Lernen mit Moodle 455

4.10 Datenbank, Tabellenkalkulation 457
4.10.1 Datenbanksystem Access 457
4.10.2 Tabellenkalkulation 461
4.10.3 Präsentationsprogramm PowerPoint 465

4.11 Datensicherung und Datenschutz 467
4.11.1 Maßnahmen zur Datensicherung 467
4.11.2 Maßnahmen gegen unbefugte Nutzung 469
4.11.3 Schutz vor Computerviren 471
4.11.5 Gesetzlicher Datenschutz 472

5 Messen, Steuern, Regeln

5.1 Messgrößenaufnehmer (Sensoren[1]) 473
5.1.1 Analoge Sensoren 474
5.1.1.1 Eigenschaften 474
5.1.1.2 Sensoren für Wege, Winkel und Abstände 475
5.1.1.3 Näherungsschalter 481
5.1.1.4 Lichtschranken, Livchtvorhänge, Scan-Mikrometer 482
5.1.1.5 Sensoren für Kräfte, Dehnungen und Drücke 483
5.1.1.6 Beschleunigungssensoren 485
5.1.1.7 Temperatursensoren 486
5.1.1.8 Sensoren der Sicherheitstechnik 488
5.1.2 Digitale Weg- und Winkelmessung 490
5.1.2.1 Inkrementelle Weg- und Winkelmessung 490
5.1.2.2 Codelineale und Winkelcodierer 491
5.1.2.3 Drehmelder (Synchro) 491
5.1.3 Messwertgeber für elektrische Größen (Messumformer) 492
5.1.4 Störungen in Messleitungen 493
5.1.5 Bestimmungen für Messeinrichtungen 495

5.2 Steuerungstechnik 496
5.2.1 Steuerungsarten 496
5.2.2 Binäre Steuerungen 497
5.2.3 GRAFCET 500
5.2.3.1 GRAFCET-Struktur 500
5.2.3.2 Schritte 501
5.2.3.3 Aktionen 502
5.2.3.4 Transitionen und Ablaufstrukturen 503
5.2.4 Digitale Steuerungen (Beispiele) 504
5.2.5 Speicherprogrammierbare Steuerungen SPS 505
5.2.5.1 Aufbau und Funktionsweise 505
5.2.5.2 Projekt 506
5.2.5.3 Programmstruktur 507
5.2.5.4 Programmiersprachen 507
5.2.5.5 SPS-Programmerstellung 508
5.2.5.6 Ansteuerung der SPS 510
5.2.5.7 Programmieren in AWL, KOP und FUP 510
5.2.5.8 Programmieren von Zeitfunktionen 512
5.2.5.9 Zähler in SPS 513
5.2.5.10 Ablaufsprache 514
5.2.5.11 Ablaufsteuerung mit S7-Graph 515
5.2.5.12 Bibliotheksfähige SPS-Bausteine 516
5.2.5.13 Strukturierter Text 517
5.2.5.14 Zustandsgraph 518
5.2.5.15 Dokumentation von SPS-Programmen 519
5.2.5.16 Sicherheits-SPS 520
5.2.5.17 Mensch-Maschine-Schnittstellen 521
5.2.6 Programmierumgebung CoDeSys 523
5.2.7 Kleinsteuerungen 527

5.3 Fernwirktechnik 528
5.3.1 Fernwirken und Fernüberwachen 529
5.3.2 Elektrizitätszähler 533

5.4 Regelungstechnik 534
5.4.1 Grundbegriffe 534
5.4.2 Regelungsarten 535
5.4.3 Regelkreisglieder 536
5.4.4 Regler 541
5.4.5 Digitale Regelungstechnik 544
5.4.5.1 Digitalisierung und Signalabtastung 544
5.4.5.2 Regelalgorithmus 545
5.4.6 Regelkreise (Beispiele) 548
5.4.6.1 Regelung von P-Strecken 548
5.4.6.2 Regelung von I-Strecken 549
5.4.6.3 Einstellen eines Reglers 551
5.4.6.4 Selbstoptimierende Regler 552

6 Leistungselektronik

6.1 Stromversorgung 553
6.1.1 Geräte mit elektrischer Energie versorgen 553
6.1.2 Leistungsgrenzen am öffentlichen Netz 553
6.1.3 Gesteuerte Gleichrichter und Gleichstromsteller 556
6.1.4 Wechselrichter 560
6.1.5 Durchflusswandler und Sperrwandler 562
6.1.6 Schaltregler 564
6.1.7 Schaltregler für Festspannungen 566
6.1.8 SSV-Systeme 567

6.2 Bemessung von Leitungen 570
6.2.1 Leitungen der Energietechnik 570
6.2.2 Allgemeine Grundsätze 571
6.2.3 Mindestquerschnitte 571
6.2.4 Strombelastbarkeit 571
6.2.5 Spannungsfall 574
6.2.6 Überlastschutz und Kurzschlussschutz 575

6.3 Elektrische Antriebssysteme auswählen und integrieren 576
6.3.1 Drehbewegungen 576
6.3.2 Kennlinien von Arbeitsmaschinen 577
6.3.3 Kennwerte von Elektromotoren 577
6.3.4 Drehfeldmaschinen 579
6.3.5 Synchronmotoren 580
6.3.6 Reluktanzmotoren 581

6.3.7 Schrittmotoren 582
6.3.8 Piezo-Antriebe 584
6.3.9 Asynchronmotor (Induktionsmotor) 585
6.3.10 Energiesparende Antriebe 588
6.3.11 Stromwendermotoren 589
6.3.12 Linearantriebe 592
6.3.13 Motoren in vier Quadranten betreiben 594

6.4 Steuerung und Regelung elektrischer Antriebe 595
6.4.1 Maschinensicherheit 595
6.4.2 Drehzahlsteuerung 597
6.4.2.1 Universalmotor 597
6.4.2.2 Drehzahlsteuerung beim fremderregten Gleichstrommotor 598
6.4.2.3 Gleichstromsteller mit H-Brücke 599
6.4.3 Elektronisch kommutierte Motoren 600
6.4.3.1 Überblick, Vergleich und Kommutatormotor 600
6.4.3.2 Steuerung des BLDC mit Hallsensoren 601
6.4.3.3 Sensorlose Steuerung des BLDC 602
6.4.3.4 Vektorregelung eines BLDC 603
6.4.3.5 Geschalteter Reluktanz-Motor (SRM) 604
6.4.4 Asynchronmotoren steuern 605
6.4.4.1 Motorschutzgeräte 605
6.4.4.2 Motorschutz auswählen 606
6.4.4.3 Anlassen von Kurzschlussläufermotoren (Ständeranlassverfahren) 608
6.4.5 Drehzahl mit Frequenzrichter FU steuern 610
6.4.5.1 Frequenzumrichter mit Zweischenkreis 610
6.4.5.2 Pulsweitenmodulation (PWM) 611
6.4.5.3 Zusammenhang zwischen Spannung und Frequenz 613
6.4.5.4 Kurzschlussläufermotoren am Frequenzumrichter betreiben 614
6.4.5.5 Frequenzumrichter auswählen 615
6.4.5.6 Positionieraufgabe 616
6.4.5.7 Frequenzumrichter anschließen 618
6.4.6 Servomotoren 619
6.4.6.1 Anforderungen an Servomotoren 619
6.4.6.2 Servomotoren im Antriebssystem 620
6.4.6.3 Messsysteme auswählen 621
6.4.6.4 Achsmechanik einstellen 622
6.4.6.5 Maßbezug herstellen 623
6.4.6.6 Achsen positionieren 623
6.4.6.7 Synchronisieren mehrerer Achsen 625
6.4.6.8 Elektronisches Nockenschaltwerk 626

6.5 Handhabungssysteme 627
6.5.1 Einteilung 627
6.5.2 Kinematischer Aufbau eines Roboters 628
6.5.3 Programmieren von Robotern 629
6.5.4 Sensorführung von Robotern 630

6.6 Digitale Bildverarbeitung 631

7 Umwelttechnik

7.1 Umweltrecht 633

7.2 Umwelthaftung 633

7.3 Belastung durch elektrotechnische Produkte 634

7.4 Umgang mit Abfall 635
7.4.1 Begriffe der Abfallwirtschaft 635
7.4.2 Träger der Entsorgung 635
7.4.3 Betriebsbeauftragte 636

7.5 Elektromagnetische Verträglichkeit EMV 637
7.5.1 Bedeutung der EMV 637
7.5.2 Störungen durch elektrische Felder 637
7.5.3 Störungen durch elektromagnetische Felder 640

7.6 Alternative Energieversorgung 643
7.6.1 Solartechnik 643
7.6.1.1 Solarthermie 643
7.6.1.2 Fotovoltaik 644
7.6.2 Windkraftanlagen 646
7.6.3 Brennstoffzellen 648
7.6.4 Hybridantriebe 650
7.6.5 Elektromobilität 651

8 Wirtschaftliche Vorgänge

8.1 Betrieb und Umfeld 652

8.2 Geschäftsprozesse 653

8.3 Verkaufsprozesse 656
8.3.1 Verkaufskalkulation 656
8.3.2 Erstellung eines Angebots 656
8.3.3 Verträge 656
8.3.4 Rechnungsstellung 658

8.4 Beschaffungsprozesse 658

8.5 Kundenberatung und Service 660
8.5.1 Umgang mit Kunden 660
8.5.2 Kundenservice 662
8.5.3 Kundenbindung 662
8.5.4 Bechwerdemanagement (Reklamationen) 663
8.5.5 Konformitätserklärung 664
8.5.6 Qualitätsmanagement 665

9 Projekt-Aufgabe

666

10 Anhang

10.1 Größen und Einheiten 673

10.2 Mathematische Begriffe und Basiseinheiten 675

10.3 Vorsätze, Größen und Einheiten der IT-Technik 676

10.4 Wichtige Normen 677

10.5 Bildquellenverzeichnis 679

10.6 Verzeichnis der Firmen und Dienststellen 680

10.7 Softwareverzeichnis 682

10.8 Literaturverzeichnis 683

10.9 CD-Inhalt 684

Sachwortverzeichnis (Dt-Engl) 685

Formelzeichen dieses Buches U2

Indizes und Zeichen für Formelzeichen dieses Buches U3

1 Grundlagen

1.1 Physikalische Größen

Zur Beschreibung der elektrotechnischen Vorgänge sind physikalische Begriffe unentbehrlich.

1.1.1 Kraftfelder

Auf einen Körper kann durch *unmittelbare Berührung* eine Wirkung ausgeübt werden, z. B. eine Kraft. Die Wirkung kann aber oft auch *aus der Ferne* erfolgen, z. B. durch die Anziehungskraft der Erde auf eine Weltraumstation **(Bild 1)**. Ohne diese Anziehungskraft würde die Weltraumstation mit gleich bleibender Geschwindigkeit in den Weltraum fliegen.

Massen von Körpern üben aufeinander eine Anziehungskraft aus, die auch aus der Ferne wirkt. Diese Anziehungskraft ist umso größer, je größer die Massen sind und je kleiner ihr Abstand voneinander ist. Bei kleinen Massen ist diese Anziehungskraft sehr klein, bei großen Massen, z. B. Himmelskörpern, aber recht groß.

Tritt eine Wirkung aus der Ferne ein, so sagt man, dass ein *Feld* zwischen der Ursache der Wirkung und dem Körper ist. Ist mit der Wirkung eine Kraft verbunden, so spricht man von einem *Kraftfeld*.

Jeder Raum ist von Feldern erfüllt.

Bekannt ist das *Schwerefeld* der Erde. Es bewirkt, dass es sehr schwierig ist, die Erde und ihre Umgebung zu verlassen.

In der Nähe von elektrischen Leitungen tritt ein *elektrisches Feld* auf (Abschnitt 1.7). In der Nähe von Magneten ist ein *magnetisches Feld* wirksam (Abschnitt 1.8). Sich rasch ändernde elektrische bzw. magnetische Felder sind immer miteinander verknüpft. Man nennt sie deshalb *elektromagnetische Felder*. Bei der Weltraumstation in Bild 1 sind gleichzeitig mehrere *elektromagnetische Felder* wirksam. Die verschiedenen Antennen empfangen Felder oder strahlen sie ab. Die Flächen mit Solarzellen[1] nehmen die elektromagnetischen Felder der Lichtstrahlung auf und versorgen den Satelliten mit elektrischem Strom. Außerdem sind Schwerefelder wirksam, vor allem das Schwerefeld der Erde wirksam.

[1] lat. sol = Sonne

[2] Sir Isaac Newton, engl. Physiker, 1643 bis 1727

Bild 1: Weltraumstation *Mir* im All, im Schwerefeld der Erde

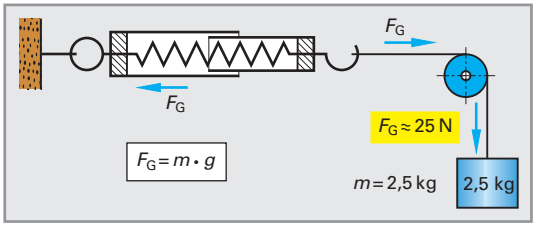


Bild 2: Kraftmessung

1.1.2 Masse und Kraft

Die Angabe der Masse eines Körpers gibt Auskunft darüber, ob es leicht oder schwer ist, den Körper in Bewegung zu versetzen oder die Bewegung des Körpers hinsichtlich des Betrags oder hinsichtlich der Richtung zu ändern. Die Masse ist unabhängig von Ort und Umgebung. Die Einheit der Masse ist das Kilogramm mit dem Einheitenzeichen kg.

Die Masse eines Körpers ist an jedem Punkt der Erde und außerhalb der Erde gleich groß.

Ihre Messung erfolgt auf einer Balkenwaage durch Vergleich mit geeichten Massen.

Infolge des Schwerefeldes der Erde wirkt auf jede Masse auf der Erde oder nahe der Erde eine Kraft. Diese Gewichtskraft kann mit einem Kraftmesser gemessen werden. Beim Kraftmesser tritt unter der Wirkung der Kraft eine Verformung ein, deren Größe ein Maß für die Kraft ist **(Bild 2)**. Die Einheit der Kraft ist das Newton[2] mit dem Einheitenzeichen N.

Ein Körper mit der Masse 1 kg wiegt auf der Erde etwa 10 N.

1.1.3 Basisgrößen, Einheiten und abgeleitete Einheiten

Physikalische Größen sind messbare Eigenschaften von Körpern, physikalischen Zuständen oder physikalischen Vorgängen, z. B. Masse, Länge, Zeit, Kraft, Geschwindigkeit, Stromstärke, Spannung und Widerstand. Jeder spezielle Wert einer Größe kann durch das Produkt von Zahlenwert und Einheit angegeben werden, z. B. zu 10 kg. Der spezielle Wert einer Größe wird *Größenwert* und in der Messtechnik *Messwert* genannt.

Formelzeichen dienen zur Abkürzung von Größen, insbesondere bei Berechnungen. Man verwendet als Formelzeichen Buchstaben des lateinischen oder des griechischen Alphabets. Formelzeichen werden in diesem Buch *kursiv* (schräg) gedruckt.

Physikalische Größen, aus denen die anderen Größen abgeleitet werden können, nennt man *Basisgrößen* **(Tabelle 1)**.

Vektoren sind Größen, zu denen eine Richtung gehört, z. B. ist die Kraft ein Vektor.

Formeln sind kurzgefasste Anweisungen, wie ein Größenwert zu berechnen ist. Wegen ihres Gleichheitszeichens spricht man auch von *Größengleichungen*. Mithilfe der Berechnungsformel kann man meist auch die Einheit des berechneten Ergebnisses erhalten.

Beispiel 1: Geschwindigkeit berechnen

Für eine gleichbleibende Geschwindigkeit gilt obenstehende Formel. Wie groß ist die Geschwindigkeit eines Autos, das in 10 s eine Strecke von 180 m zurücklegt?

Lösung:

$$v = \frac{s}{t} = \frac{180\ \text{m}}{10\ \text{s}} = 18 \cdot 3{,}6\ \text{km/h} = \mathbf{64{,}8\ km/h}$$

Einheiten

Die meisten physikalischen Größen haben Einheiten. Die Einheit ist oft aus einem Fremdwort entstanden, z. B. Meter vom griechischen Wort für Messen. Oft sind aber Einheiten auch zu Ehren von Wissenschaftlern benannt, z. B. das Ampere (nach [1]André Marie Ampère, franz. Physiker, 1775 bis 1836). Einheiten der Basisgrößen sind die Basiseinheiten (Tabelle 1). *Einheitenzeichen* sind die Abkürzungen für die Einheiten. Einheitenzeichen werden im Gegensatz zu den Formelzeichen aufrecht gedruckt.

[1] André Marie Ampère, franz. Physiker, 1755 bis 1836; [2] Charles A. de Coulomb, franz. Physiker (1736 bis 1806); [3] Heinrich R. Hertz, deutscher Physiker, 1857 bis 1894; [4] Alessandro G. Volta, ital. Physiker, 1745 bis 1827; [5] Georg Simon Ohm, dt. Physiker, 1789 bis 1854; [6] James Watt, schottischer Erfinder, 1736 bis 1819; [7] Michael Faraday, engl. Physiker, 1791 bis 1867; [8] Joseph Henry, amerik. Physiker, 1797 bis 1878.

$$F_G = m \cdot g \qquad v = \frac{s}{t}$$

F_G	Gewichtskraft;	m	Masse;
g	Fallbeschleunigung, Ortsfaktor; An der Erdoberfläche ist $g = 9{,}81\ \text{N/kg} \approx 10\ \text{N/kg}$.	v	Geschwindigkeit
		s	zurückgelegte Strecke
		t	Zeit für das Zurücklegen der Strecke

Tabelle 1: Basisgrößen

Größe	Formelzeichen	Basiseinheit	Einheitenzeichen
Länge	l	Meter	m
Masse	m	Kilogramm	kg
Zeit	t	Sekunde	s
Stromstärke	I	Ampere	A
Temperatur	T	Kelvin	K
Lichtstärke	I_V	Candela	cd

Tabelle 2: Abgeleitete Einheiten (Beispiele)

Einheiten und Einheitenzeichen der Basisgröße		besond. Einheitenname	Einheitenzeichen
Amperesekunde	A · s	Coulomb[2]	C
Je Sekunde	1/s	Hertz[3]	Hz
Meterquadrat	m · m	–	m^2

Abgeleitete Einheiten sind aus Basiseinheiten zusammengesetzt oder auch aus anderen, abgeleiteten Einheiten. Oft haben derartige abgeleitete Einheiten einen besonderen *Einheitennamen* **(Tabelle 2)**. Auch die besonderen Einheitennamen haben genormte Einheitenzeichen. Einheitennamen erinnern an Wissenschaftler und ermöglichen eine kurze Schreibweise der Größe.

Es ist zulässig, die besonderen Einheitennamen als Einheiten zu bezeichnen. Einheiten mit besonderem Einheitennamen sind z. B. die in der Elektrotechnik häufigen Volt[4] (V), Ohm[5] (Ω), Watt[6] (W), Farad[7] (F) und Henry[8] (H).

Die abgeleitete Einheit einer Größe erhält man, durch Einsetzen der Einheiten in die Berechnungsformel. Dafür gibt es die Schreibweise mit eckigen Klammern.

Namensgeber wichtiger Einheiten:
[1] André Marie Ampère, franz. Physiker (1775 bis 1836)
[2] Charles A. de Coulomb, franz. Physiker (1736 bis 1806)

Beispiel 1: Geschwindigkeitsberrechnung

Die Geschwindigkeit v berechnet man aus der Strecke s und der Zeit t mit der Formel $v = s/t$. Zu berechnen ist $[v]$ (sprich: Einheit von v).

Lösung:

$v = \frac{s}{t}$ (sprich: daraus folgt) $[v] = \frac{[s]}{[t]} = \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Vorsätze geben bei sehr kleinen oder sehr großen Zahlenwerten die Zehnerpotenz an, mit welcher der Zahlenwert einer Größe malzunehmen ist **(Tabelle 1)**.

Die Zehnerpotenzen der Zahlenwerte von Größen schreibt man als Vorsatzzeichen der Einheitenzeichen.

1.1.4 Kraft als Beispiel eines Vektors

Ein beweglicher Körper kann durch eine Kraft beschleunigt werden, also seine Geschwindigkeit ändern. Als *Beschleunigung* bezeichnet man den Quotienten aus Geschwindigkeitsänderung durch den Zeitabschnitt, in dem diese Änderung erfolgt.

Je größer bei einer Masse die Beschleunigung ist, desto größer ist die auf die Masse wirkende Kraft. Man bezeichnet diesen Zusammenhang als *Grundgesetz der Mechanik*.

Darstellung von Kräften. Die Kraft ist ein Vektor, der durch den Pfeil $\vec{F}$ (sprich: Vektor F) dargestellt wird **(Bild 1)**. Die Länge des Pfeils gibt $|\vec{F}| = F$ (sprich: Betrag des Vektors F) an, die Pfeilrichtung gibt die Wirkungsrichtung. Bei der Addition hängt man die Kraftvektoren unter Berücksichtigung ihrer Richtung aneinander (siehe Mathematik für Elektroniker, Ausgabe I).

Vektoren werden geometrisch addiert oder geometrisch subtrahiert.

1.1.5 Arbeit

Eine Arbeit wird aufgewendet, wenn infolge einer Kraft ein Wegstück zurückgelegt wird, z. B. von einem Hubstapler gegen die Gewichtskraft der Last. Der Größenwert der mechanischen Arbeit ist also das Produkt aus Kraft und Weg.

Die Einheit der Arbeit ist das Newtonmeter (Nm) mit dem besonderen Einheitennamen Joule[1] (J). Liegen Kraft und Weg nicht auf derselben Geraden, so wird zur Berechnung der Arbeit nur die Teilkraft in Wegrichtung berücksichtigt (Bild 1).

[1] James P. Joule, engl. Physiker, 1818 bis 1889

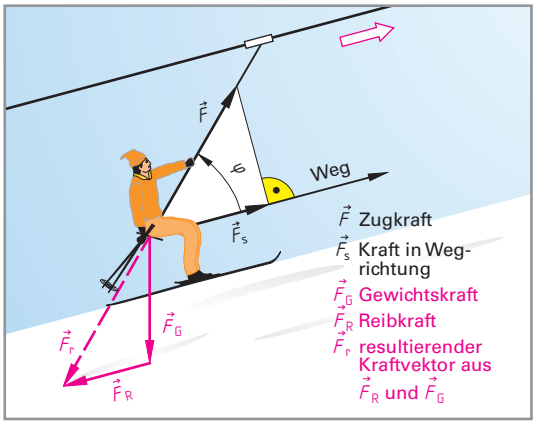


Bild 1: Kräfte bei einem Schlepplift

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \qquad [a] = (\text{m/s})/\text{s} = \text{m/s}^2$$

$$F = m \cdot a \qquad [F] = \text{kg} \cdot \text{m/s}^2 = \text{N}$$

$$W = F_s \cdot s \qquad W = F \cdot s \cdot \cos\varphi \qquad [W] = \text{N} \cdot \text{m} = \text{Nm} = \text{J}$$

a	Beschleunigung;	m	Masse
Δv	Geschwindigkeitsänderung (Δgriech. Großbuchstabe Delta);	W	Arbeit
		F_s	Kraft in Wegrichtung
		s	Weg
Δt	Zeitabschnitt	φ	Winkel zwischen $\vec{F}$ und $\vec{F}_s$
F	Kraft;		

Tabelle 1: Vorsätze und Vorsatzzeichen

Faktor	Vorsatz	Vorsatzzeichen	Faktor	Vorsatz	Vorsatzzeichen
10^{24}	Yotta	Y	10^{-1}	Dezi	d
10^{21}	Zetta	Z	10^{-2}	Zenti	c
10^{18}	Exa	E	10^{-3}	Milli	m
10^{15}	Peta	P	10^{-6}	Mikro	µ
10^{12}	Tera	T	10^{-9}	Nano	n
10^{9}	Giga	G	10^{-12}	Piko	p
10^{6}	Mega	M	10^{-15}	Femto	f
10^{3}	Kilo	k	10^{-18}	Atto	a
10^{2}	Hekto	h	10^{-21}	Zepto	z
10^{1}	Deka	da	10^{-24}	Yokto	y

1.1.6 Energie

Die Fähigkeit zum Verrichten einer Arbeit nennt man *Arbeitsvermögen* oder *Energie*. Die Energie hat dasselbe Formelzeichen und dieselbe Einheit wie die Arbeit. Arbeit und Energie stellen also dieselbe physikalische Größe dar. Jedoch drückt der Begriff Arbeit den Vorgang aus, der Begriff Energie dagegen den *Zustand* eines Körpers oder eines Systems aus mehreren Körpern. Meist ändert sich die Energie durch Arbeitsaufwand **(Bild1)**. Die beim Heben einer Last aufgewendete Arbeit steckt nach dem Heben in der Last. Diese Arbeit kann wieder freigesetzt werden, wenn die Last gesenkt wird, z. B. bei einem Baukran. Dann kann elektrische Energie ans Netz zurückgeliefert werden.

Energie ist Arbeitsvermögen. Arbeit bewirkt Energieänderung.

Außer der mechanischen Energie gibt es weitere Energiearten. In brennbaren Stoffen ist *chemische Energie* gespeichert. Diese lässt sich durch Verbrennung in *Wärmeenergie* umwandeln. Die in Atomkernen gespeicherte Energie nennt man *Kernenergie* oder auch *Atomenergie*. Die von der Sonne als Wärmestrahlung oder als Lichtstrahlung ausgesandte Energie nennt man *Sonnenenergie*.

Energie lässt sich nicht erzeugen, sondern nur umwandeln.

Potenzielle Energie oder Energie der Lage (Bild 1) ist die in einem System gespeicherte Energie, z. B. in einer Masse, die sich im Schwerefeld der Erde befindet. Potenzielle Energie[1] bedeutet hier das in Lage 1 gespeicherte Arbeitsvermögen gegenüber einer Lage 0 (Bezugslage). Für die Größe der potenziellen Energie ist also vor allem die *Bezugslage* (Ausgangslage) maßgebend.

Beispiel 1: Berechnen der potenziellen Energie

In einem Stausee, 600 m über dem Turbinenhaus befinden sich 10^6 m^3 Wasser (Dichte 10^3 kg/m^3). Wie groß ist die potenzielle Energie gegenüber der Lage des Turbinenhauses?

Lösung:

$$W_p = m \cdot g \cdot \Delta h \approx 10^6\ \text{m}^3 \cdot \frac{10^3\ \text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{10\ \text{N}}{\text{kg}} \cdot 600\ \text{m}$$

$$= 10^9 \cdot 10 \cdot 600\ \text{Nm} = 6 \cdot 10^{12}\ \text{Nm} = \mathbf{6\ TJ}$$

[1] lat. potentia = Vermögen, Macht

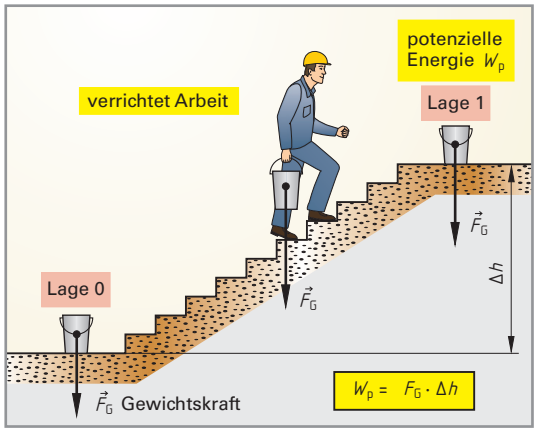


Bild 1: Änderung der Energie durch Arbeit

$W_p = m \cdot g \cdot \Delta h$	$W_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2$
$[W_p] = \text{Nm} = \text{J}$	$[W_k] = \text{Nm} = \text{J}$

W_p	potenzielle Energie	Δh	Höhendifferenz
m	Masse	W_k	kinetische Energie
g	Fallbeschleunigung ($g \approx 10$ N/kg)	v	Geschwindigkeit

Die potenzielle Energie gegenüber der Bezugslage ist so groß wie die erforderliche Arbeit zur Bewegung der Masse aus der Bezugslage in die neue Lage. Potenzielle Energie kann auch anders gespeichert werden, z. B. in einer gespannten Feder.

Kinetische Energie ist in einer bewegten Masse gespeichert. Die kinetische Energie ist unabhängig von einer Bezugslage. Sie hängt nur von der Masse und von deren Geschwindigkeit ab.

Wenn einem Körper oder einem System keine Arbeit zugeführt wird, so kann die kinetische Energie des Körpers oder des Systems höchstens so groß werden wie seine potenzielle Energie ist, z. B. beim Fall aus einer bestimmten Höhe.

Wiederholung und Vertiefung

1. **Welche physikalischen Größen können in einem Raum ohne Materie vorhanden sein?**
2. **Nennen Sie drei Kraftfelder.**
3. **Auf eine Masse von 2000 kg wirkt eine Beschleunigungskraft von 1000 N. Wie groß ist die Beschleunigung?**
4. **Erklären Sie den Begriff Vektor.**
5. **Worin liegt der Unterschied zwischen Arbeit und Energie?**
6. **Wie heißen die beiden Arten der mechanischen Energie?**

1.2 Elektrotechnische Grundgrößen

1.2.1 Ladung

Jeder Körper ist im normalen Zustand elektrisch neutral. Durch Reiben des Körpers kann dieser Zustand geändert werden. Der Ladungszustand ist aus dem Aufbau der Stoffe erklärbar.

Reibt man einen Polystyrolstab mit einem Wolltuch und bringt ihn in die Nähe von Papierschnitzeln **(Bild 1)**, so werden diese angezogen. Für diese Kräfte sind *elektrische Ladungen* verantwortlich.

Stäbe aus Isolierstoffen, wie z. B. Acrylglas, Polystyrol, die man mit einem Wolltuch reibt, üben wegen der Ladungen aufeinander Abstoßungskräfte **(Bild 2)** oder Anziehungskräfte **(Bild 3)** aus.

Gleichartige Ladungen stoßen sich ab, ungleichartige Ladungen ziehen sich an.

Die Ladung des Acrylglasstabes bezeichnet man als *positive Ladung* (Plusladung), die Ladung des Polystyrolstabes als *negative Ladung* (Minusladung). Ladungen üben Kräfte aufeinander aus **(Bild 4)**.

Enthält der Kern eines Atoms so viele Protonen, wie Elektronen um den Kern kreisen, so ist das Atom elektrisch neutral **(Bild 5)**. Nach außen tritt keine elektrische Ladung in Erscheinung. Kreisen dagegen um den Atomkern mehr oder weniger Elektronen als Protonen im Kern vorhanden sind, so ist das Atom im ersten Fall negativ, im zweiten Fall positiv geladen. Man nennt es Ion[1].

Die elektrische Ladung Q ist von der Stromstärke und von der Zeit abhängig. Sie hat die Einheit Amperesekunde (As) mit dem besonderen Einheitennamen Coulomb[2] (C).

Jedes Elektron ist negativ geladen, jedes Proton ist positiv geladen. Beide tragen die kleinste Ladung, die *Elementarladung*. Die Elementarladung eines Elektrons beträgt $-0{,}1602 \cdot 10^{-18}$ C, die Elementarladung eines Protons beträgt $-0{,}1602 \cdot 10^{-18}$ C.

Beispiel 1: Ladungsmenge berechnen

In einem elektrischen Leiter fließt ein Strom I mit 150 mA. Welche Ladungsmenge ΔQ wird je Minute im Leiter transportiert?

Lösung:

$\Delta Q = I \cdot \Delta t = 150\ \text{mA} \cdot 1\ \text{min} = 150\ \text{mA} \cdot 60\ \text{s}$
$= 9000\ \text{mA} = 9\ \text{As}$

[1] griech. ion = wandernd; [2] Coulomb, franz. Physiker, 1736 bis 1806

Bei I = const. und mit Anfangsladung:	Bei I = const. und ohne Anfangsladung:
$\Delta Q = I \cdot \Delta t$	$Q = I \cdot t$

ΔQ	Ladungsänderung;	Q	Ladung
I	konstante Stromstärke;	t	Zeit
Δt	Zeitabschnitt;		
Δ	(griech. Großbuchstabe Delta) Zeichen für Differenz		

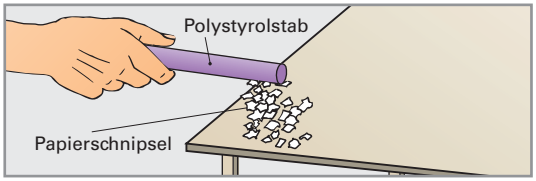


Bild 1: Anziehung von Teilchen durch Ladungen

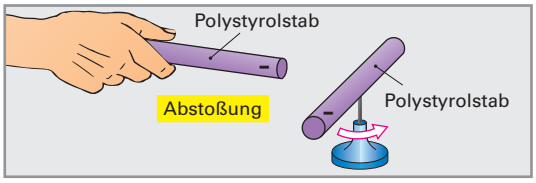


Bild 2: Abstoßung gleichartiger Ladungen

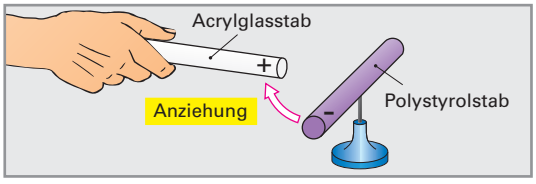


Bild 3: Anziehung ungleichartiger Ladungen

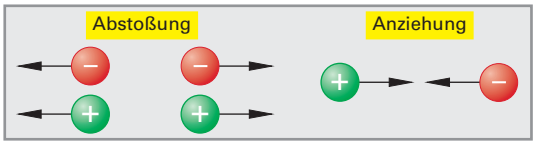


Bild 4: Ladungswirkungen

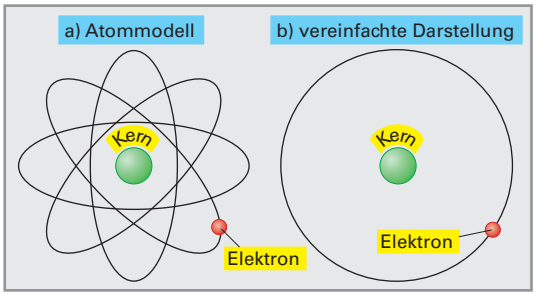


Bild 5: Aufbau eines Wasserstoffatoms

1.2.2 Spannung

Zwischen verschiedenartigen Ladungen wirkt eine Anziehungskraft. Werden verschiedenartige Ladungen voneinander entfernt, so muss gegen die Anziehungskraft eine Arbeit verrichtet werden. Diese Arbeit ist nun als Energie zwischen den Ladungen gespeichert. Dadurch besteht zwischen den Ladungen eine *Spannung*.

Die elektrische Spannung ist die zur Ladungstrennung aufgewendete Arbeit je Ladung.

Elektrische Spannung entsteht durch Trennung von Ladungen.

Je höher die erzeugte Spannung ist, desto größer ist das Bestreben der Ladungen sich auszugleichen **(Bild 1)**. Elektrische Spannung ist also auch das Ausgleichsbestreben von Ladungen. Die elektrische Spannung (Formelzeichen U) misst man mit dem *Spannungsmesser* **(Bild 2)**.

Zur Messung der Spannung wird der Spannungsmesser parallel zu den Anschlüssen des Erzeugers oder Verbrauchers geschaltet.

Einheit der elektrischen Spannung U ist das Volt[1] (V). Im Schaltzeichen des Spannungsmessers steht V.

$[U] = \mathrm{V}$
($[U]$ sprich: Einheit von U).

Die Ladungstrennung und damit die Spannungserzeugung kann auf verschiedene Arten geschehen (Abschnitt 1.5). Bei einem Spannungserzeuger liegt die Spannung zwischen zwei Anschlüssen, dem Pluspol und dem Minuspol **(Bild 3)**.

Der Pluspol ist gekennzeichnet durch Elektronenmangel, der Minuspol durch Elektronenüberschuss. Man unterscheidet Gleichspannung, Wechselspannung und Mischspannung. Die Spannungsart und die Polung der Spannung lassen sich d. h. mit einer Glimmlampe feststellen. In einer an Gleichspannung liegenden Glimmlampe leuchtet der negative Pol. Bei Wechselspannung zeigen beide Pole ein Flimmern.

Potenzial nennt man eine auf einen *Bezugspunkt* bezogene Spannung, d. h. die Spannung gegen Erde oder die Spannung gegen Masse. Spannung kann als Differenz zweier Potenziale aufgefasst werden. Eine Spannung besteht sowohl zwischen positiven und negativen Potenzialen wie auch zwischen gleichartigen, aber verschieden starken Potenzialen.

[1] Volta, ital. Physiker, 1745 bis 1827

$$[U] = \frac{\mathrm{Nm}}{\mathrm{C}} = \frac{\mathrm{Ws}}{\mathrm{As}} = \mathrm{V} \qquad U = \frac{W}{Q}$$

U Spannung
W Arbeit
Q Ladung

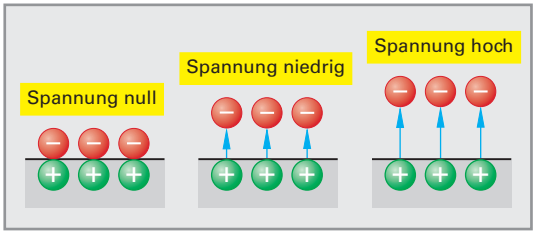


Bild 1: Spannung durch Ladungstrennung

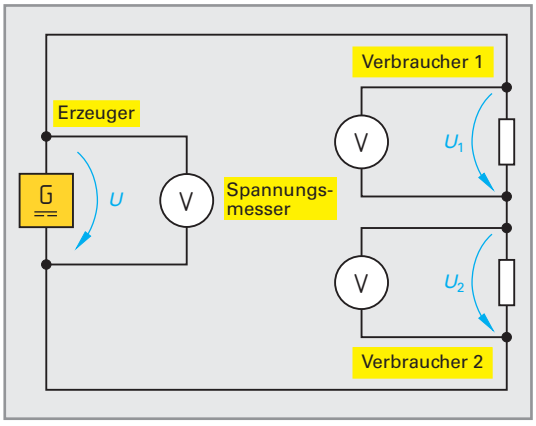


Bild 2: Spannungsmessung

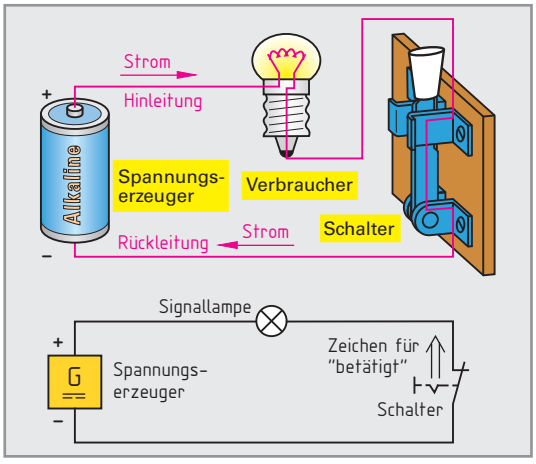
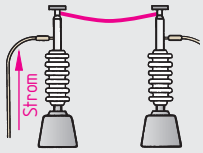
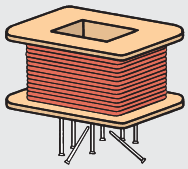
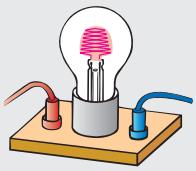
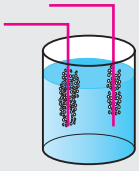
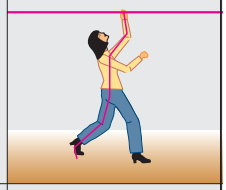


Bild 3: Elektrischer Stromkreis

Tabelle 1: Stromwirkungen

Wärmewirkung	Magnetwirkung	Lichtwirkung	Chemische Wirkung	Wirkung auf Lebewesen
immer vorhanden	immer vorhanden	in Gasen, in manchen Halbleitern	in leitenden Flüssigkeiten	bei Menschen und Tieren
				
Heizung, Lötkolben, Schmelzsicherung	Relaisspule, Türöffner	Glimmlampe, LED, Leuchtstofflampe	Ladevorgang bei Akkumulatoren, belastete Elemente	Unfälle, Herzschrittmacher

1.2.3 Elektrischer Strom

Die Spannung bewirkt den *elektrischen Strom*, der nur im geschlossenen Stromkreis fließt. Der *Stromkreis* besteht aus dem Erzeuger, dem Verbraucher und der Hin- und Rückleitung zwischen Erzeuger und Verbraucher (Bild 3, vorhergehende Seite). Mit dem Schalter kann man den Stromkreis öffnen und schließen.

Der elektrische Strom hat verschiedene Wirkungen **(Tabelle 1)**. Die Wärmewirkung und die Magnetwirkung treten bei elektrischem Strom immer auf. Lichtwirkung, chemische Wirkung und Wirkungen auf Lebewesen treten nur in bestimmten Fällen auf.

Metalle besitzen Elektronen, die im Inneren des Metalls frei beweglich sind. Man bezeichnet diese als freie Elektronen. Sie bewegen sich vom Minuspol zum Pluspol des Spannungserzeugers (**Bild 1**)

Die gerichtete Bewegung von Elektronen nennt man Elektronenstrom.

Freie Elektronen entstehen dadurch, dass die Elektronen der Außenschale eines Atoms genauso weit vom Kern des Nachbaratoms entfernt sein können wie vom eigenen Atomkern. Die Anziehungskräfte beider Kerne heben sich auf.

Der Spannungserzeuger übt eine Kraft auf die freien Elektronen aus. Diese Krafteinwirkung breitet sich nach dem Schließen eines Stromkreises fast mit Lichtgeschwindigkeit aus. Bei der Festlegung der Richtung des elektrischen Stromes ging man ursprünglich von der Bewegungsrichtung positiver Ionen in Flüssigkeiten aus **(Bild 1)**.

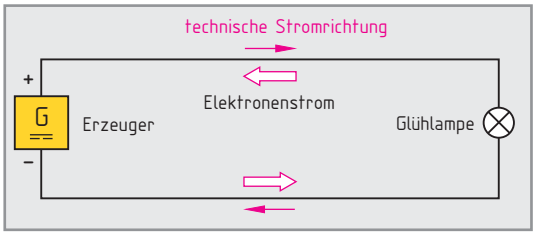


Bild 1: Stromrichtung

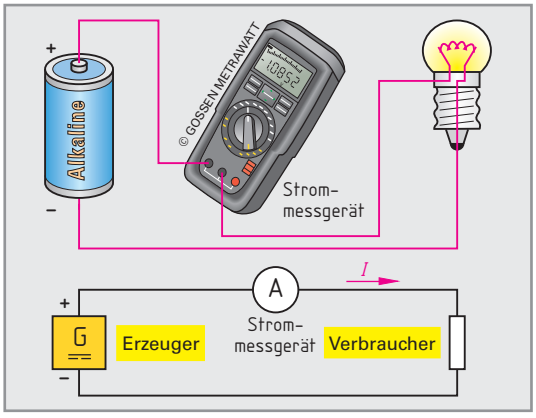


Bild 2: Strommessung

Die Elektronen bewegen sich entgegengesetzt zur technischen Stromrichtung.

Die elektrische Stromstärke (Formelzeichen I) misst man mit dem Strommessgerät **(Bild 2)**. Die Einheit der elektrischen Stromstärke I ist das Ampere (A). Im Schaltzeichen des Strommessgerätes steht A.

Zur Messung der Stromstärke wird das Strommessgerät in Reihe in den Stromkreis geschaltet.

Bei *Gleichstrom* bleibt der Strom bei gleicher Spannung konstant **(Tabelle 1)**. Die Elektronen fließen vom Minuspol durch den Verbraucher zum Pluspol. Das Kurzzeichen für Gleichstrom ist DC (von Direct Current = Einrichtungsstrom).

Gleichstrom ist elektrischer Strom, der dauernd in gleicher Richtung und gleicher Stärke fließt.

Bei *Wechselstrom* ändern die Elektronen ständig ihre Richtung. Das Kurzzeichen für Wechselstrom ist AC (von Alternating Current = abwechselnder Strom).

Wechselstrom ist elektrischer Strom, der ständig seine Richtung und Stärke ändert.

Ein gleichgerichteter Wechselstrom enthält Gleichstrom und Wechselstrom. Man nennt ihn *Mischstrom*. Das Kurzzeichen für Mischstrom ist UC (von Universal Current = allgemeiner Strom).

Mischstrom ist Gleichstrom mit überlagertem Wechselstrom.

Ionenstrom ist die Ionenbewegung in Flüssigkeiten oder Gasen. Ein positives Ion ist ein Atom oder Molekül, dem ein oder mehrere Elektronen fehlen. Ein negatives Ion ist ein Atom oder Molekül, das ein oder mehrere Elektronen zu viel hat.

Ladungsträgerbeweglichkeit. Die Bewegung der Ladungsträger (Driftgeschwindigkeit, von to drift = abtreiben) im Stromkreis unter Einwirkung eines elektrischen Feldes (Abschnitt 1.7) in oder gegen die Richtung der elektrischen Feldlinien ist vom Leiterwerkstoff und von der elektrischen Feldstärke abhängig. Unter der Beweglichkeit der Ladungsträger versteht man das Verhältnis Driftgeschwindigkeit zu elektrischer Feldstärke.

Beispiel 1: Driftgeschwindigkeit berechnen

Bei einer Halbleiterstrecke beträgt die elektrische Feldstärke 50 V/mm, die Ladungsträgerbeweglichkeit 0,39 $m^2/(Vs)$. Wie groß ist die Driftgeschwindigkeit?

Lösung:

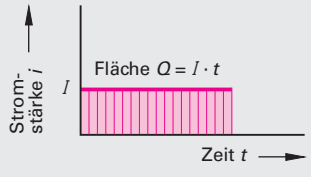
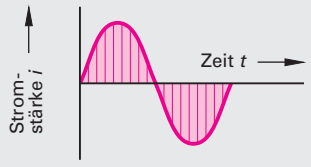
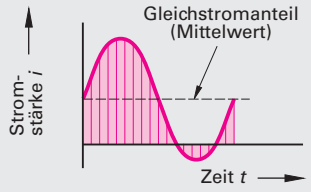
$$b = \frac{v}{E} \Rightarrow v = b \cdot E = \frac{0{,}39\ m^2}{Vs} \cdot 50\ \frac{kV}{m} = \mathbf{19{,}5\ \frac{km}{s}}$$

Bei Elektronen ist der Betrag der Beweglichkeit in Metallen 0,004 4 $m^2/(Vs)$, in Halbleitern 0,01 $m^2/(Vs)$ bis 1 $m^2/(Vs)$. Die Beweglichkeit der Ladungsträger in Metallen ist infolge der großen Zahl freier Elektronen wesentlich kleiner als bei Halbleitern, weil die vielen Ladungsträger einander mehr hemmen, als wenn es nur wenige Ladungsträger wären.

$$[b] = \frac{\frac{m}{s}}{\frac{V}{m}} = \frac{m^2}{V \cdot s} \qquad b = \frac{v}{E}$$

b	Ladungsträgerbeweglichkeit
v	Driftgeschwindigkeit
E	elektrische Feldstärke

Tabelle 1: Stromarten

Bezeichnung	Kennlinie
Gleichstrom DC Zeichen ⎓ oder ⎓	
Wechselstrom AC Zeichen ∿	
Mischstrom UC Zeichen ⎓∿	

1.2.4 Elektrischer Widerstand

Die Werkstoffe setzen dem elektrischen Strom einen verschieden großen Widerstand entgegen.

Der Widerstand, auch *Resistanz* (von lat. resistere = stehenbleiben) genannt (Formelzeichen R), hat die Einheit Ohm[1] (Ω), $[R] = \Omega$. Den Kehrwert des Widerstandes nennt man Leitwert. Der Leitwert (Formelzeichen G) hat die Einheit Siemens[2] (S), $[G] = S$.

Beispiel 2: Leitwert berechnen

Ein Widerstand beträgt 2 Ω. Wie groß ist der Leitwert?

Lösung:

$$R = \frac{1}{G} \Rightarrow G = \frac{1}{R} = \frac{1}{2\,\Omega} = \mathbf{0{,}5\ S}$$

[1] Georg Simon Ohm, deutscher Physiker, 1789 bis 1854

[2] Werner von Siemens, deutscher Erfinder, 1816 bis 1892

Leiterwiderstand

Der Widerstand eines Leiters hängt von der Länge, vom Querschnitt und vom Leiterwerkstoff ab. Ein Kupferdraht von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt hat z. B. mehr freie Elektronen als ein Eisendraht gleicher Abmessung.

Der spezifische[1] Widerstand von Drähten hat die Einheit $\Omega \cdot mm^2/m$. Bei Isolierstoffen und Halbleiterwerkstoffen wird die Einheit $\Omega \cdot cm^2/cm = \Omega \cdot cm$ verwendet. Dann gibt der spezifische Widerstand an, wie groß der Widerstand eines Würfels von 1 cm Kantenlänge ist.

Der spezifische Widerstand ϱ gibt den Widerstand eines Leiters von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt an.

Der *spezifische Widerstand* ϱ wird meist für 20 °C angegeben. Oft wird mit der *Leitfähigkeit* γ statt mit dem spezifischen Widerstand gerechnet. Die Leitfähigkeit γ ist der Kehrwert des spezifischen Widerstandes ϱ.

Die Namensgeber für die Einheiten Ohm und Siemens sind deutsche Wissenschaftler **(Tabelle 1)**.

Die Leitfähigkeit γ ist der Kehrwert des spezifischen Widerstandes ϱ.

Beispiel 1: Drahtwiderstand berechnen

Ein Drahtwiderstand besteht aus 1,806 m Manganindraht mit einem Querschnitt von 0,007 85 mm². Berechnen Sie den Widerstand.
Leitfähigkeit von Mangan (Mn): $\gamma = 2{,}3 \ \frac{m}{\Omega \cdot mm^2}$

Lösung:

$$R = \frac{l}{\gamma \cdot A} = \frac{1{,}806\ m}{2{,}3\ \frac{m}{\Omega \cdot mm^2} \cdot 0{,}007\,85\ mm^2} = \mathbf{100}\ \Omega$$

1.2.5 Ohm'sches Gesetz

Stellt man an einem Schiebewiderstand einen festen Widerstandswert ein, schließt ihn an einen Spannungserzeuger mit veränderbarer Spannung an und erhöht die Spannung von 0 V ausgehend, so nehmen die Spannung und die Stromstärke im gleichen Verhältnis zu. Bei konstantem Widerstand nimmt die Stromstärke linear mit der Spannung zu. Zeichnet man I in Abhängigkeit von U auf, so erhält man eine Gerade **(Bild 1)**. Wenn $I \sim U$ (sprich: I ist proportional U) ist, so spricht man von einem *linearen* Widerstand. Die Gerade verläuft umso steiler, je kleiner der Widerstand ist. Mit zunehmendem Widerstand nimmt also die Stromstärke ab.

$$[R] = \frac{1}{[G]} = \frac{1}{S} = \Omega \qquad R = \frac{1}{G}$$

$$\gamma = \frac{1}{\varrho} \qquad R = \frac{\varrho \cdot l}{A} \qquad R = \frac{l}{\gamma \cdot A}$$

R	Widerstand (Resistanz)
G	Leitwert
γ	Leitfähigkeit, spezifischer Leitwert (γ griech. Kleinbuchstabe Gamma)
ϱ	spezifischer Widerstand (ϱ griech. Kleinbuchstabe Rho)
l	Länge des Leiters
A	Querschnitt des Leiters

Tabelle 1: Wissenschaftler

Ohm, Georg Simon, 1789 – 1854, geb. in Erlangen, Realschullehrer und Gymnasiallehrer für Mathematik, später Professor für Physik in Nürnberg und München.
Er fand 1826 heraus, dass Stromstärke und Spannung im elektrischen Leiter proportional sind $I \sim U$.

© ullstein bild – Granger Collection

Siemens, Werner von, 1816 – 1892, geb. in Lenthe, militärische Ingenieurschule, Unternehmer. Begründer des Galvanisierens, Entwickler der elektronischen Lokomotive, Erbauer der ersten Dynamomaschine.
Engagierte sich politisch und sozial für das Wohl der Arbeiterklasse.

© ullstein bild – Granger Collection

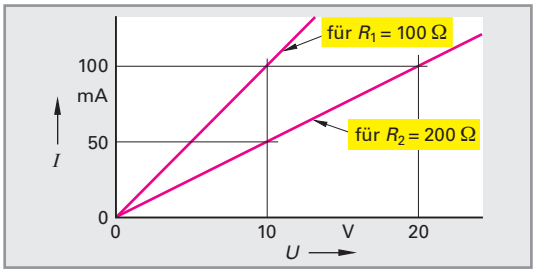


Bild 1: I als Funktion von U beim linearen Widerstand

[1] lat. specificus = arteigen

Bei konstanter Spannung nimmt die Stromstärke im umgekehrten Verhältnis zum Widerstand ab. Zeichnet man I in Abhängigkeit von R auf, so erhält man eine *Hyperbel* **(Bild 1)**. $I \sim 1/R$ (sprich: I ist umgekehrt proportional zu R).

Das Ohm'sche Gesetz drückt den Zusammenhang von Stromstärke, Spannung und Widerstand aus.

Beispiel 1: Stromstärke berechnen

Welche Stromstärke hat eine Glühlampe mit einem Widerstand von 12 Ω, die an 6 V angeschlossen ist?

Lösung:

$I = \frac{U}{R} = \frac{6\ \text{V}}{12\ \Omega} = \mathbf{0{,}5\ A}$

1.2.6 Widerstand und Temperatur

Der Widerstand der Leiterwerkstoffe ist von der Temperatur abhängig. Kohle und die meisten Halbleiter leiten in heißem Zustand besser als in kaltem Zustand. Diese Stoffe nennt man deshalb auch *Heißleiter*. Wenige Halbleiterstoffe, z. B. Bariumtitanat, leiten dagegen in kaltem Zustand besser. Man nennt sie *Kaltleiter*. Ihr Widerstand nimmt bei Temperaturerhöhung zu. Auch der Widerstand von Metallen nimmt mit Temperaturerhöhung zu. Der Widerstand von Heißleitern, z. B. Kohle, nimmt bei Temperaturerhöhung ab. Der *Temperaturkoeffizient* α gibt die relative Widerstandsänderung je Grad an **(Tabelle 1)**. Man nennt ihn auch Temperaturbeiwert.

Der Temperaturkoeffizient gibt an, um wie viel Ohm der Widerstand 1 Ω bei 1 K Temperaturerhöhung größer oder kleiner wird.

Kelvin[1] (K) ist die Einheit des Temperaturunterschieds, gemessen in der Celsiusskala oder in der Kelvinskala. Der Temperaturkoeffizient von Heißleitern ist *negativ*, da ihr Widerstand mit zunehmender Temperatur abnimmt. Der Temperaturkoeffizient von Kaltleitern ist *positiv*, da ihr Widerstand mit zunehmender Temperatur zunimmt.

Die Widerstandsänderung bei Erwärmung ist vom Kaltwiderstand, dem Temperaturkoeffizienten und der Übertemperatur abhängig.

Bei Abkühlung von Leitern nimmt ihr Widerstand ab. Bei sehr tiefen Temperaturen haben einige Stoffe keinen Widerstand mehr. Sie sind *supraleitend* geworden.

$[I] = \frac{[U]}{[R]} = \frac{\text{V}}{\Omega} = \text{A}$

$I = \frac{U}{R}$

$\Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1$

$\Delta R = \alpha \cdot R_1 \cdot \Delta\vartheta$

$R_2 = R_1 + \Delta R$

$R_2 = R_1 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta)$

I	Stromstärke
U	Spannung
R	Widerstand
$\Delta\vartheta$	Temperaturunterschied (ϑ griech. Kleinbuchstabe Theta)
ϑ_1	Anfangstemperatur
ϑ_2	Endtemperatur
ΔR	Widerstandsänderung (Δ griech. Großbuchstabe Delta; Zeichen für Differenz)
α	Temperaturkoeffizient (α griech. Kleinbuchstabe Alpha)
R_1	Widerstand bei Temperatur ϑ_1
R_2	Widerstand bei Temperatur ϑ_2

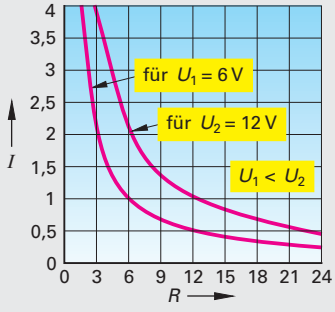


Bild 1: I als Funktion von R beim linearen Widerstand

Tabelle 1: Temperaturkoeffizient α in 1/K

Kupfer	$3{,}9 \cdot 10^{-3}$	Nickelin	$0{,}15 \cdot 10^{-3}$
Aluminium	$3{,}8 \cdot 10^{-3}$	Manganin	$0{,}02 \cdot 10^{-3}$
Die Werte gelten für eine Temperaturerhöhung ab 20 °C.			

Beispiel 2: Widerstandsänderung berechnen

Welche Widerstandsänderung erfährt ein Kupferdraht mit $R_1 = 100\ \Omega$, wenn die Temperatur sich um $\Delta\vartheta = 100$ K ändert?

Lösung

$\Delta R = \alpha \cdot R_1 \cdot \Delta\vartheta = 3{,}9 \cdot 10^{-3}\ \text{K}^{-1} \cdot 100\ \Omega \cdot 100\ \text{K} = \mathbf{39\ \Omega}$

[1] Lord Kelvin, engl. Physiker, vor Erhebung in den Adelsstand William Thomson, 1824 bis 1907