



EUROPA-FACHBUCHREIHE
für elektrotechnische
und elektronische Berufe

Fachkunde Industrieelektronik und Informationstechnik

Geräte- und Systemtechnik, Automatisierungstechnik

14. 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

Sommer 2024

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

Europa-Nr.: 32319

Autoren der Fachkunde Industrieelektronik und Informationstechnik

Günther Buchholz	Stuttgart
Monika Burgmaier	Durbach (Ortenau)
Christian Gmeiner	Oppenau (Ortenau)
Oliver Gomber	Freiburg
Bernhard Grimm	Sindelfingen, Leonberg
Gregor Häberle	Tettngang
Jörg A. Oestreich	Schwäbisch Hall
Bernd Schiemann	Durbach (Ortenau)
Dietmar Schmid	Essingen

Bildentwürfe: Die Autoren

Bildbearbeitung: Zeichenbüro des Verlags Europa-Lehrmittel GmbH & Co. KG, Ostfildern
Grafische Produktionen Neumann, Rimpar

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.

14. Auflage 2024

Druck 5 4 3 2 1

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

ISBN 978-3-7585-3272-6

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

© 2024 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
www.europa-lehrmittel.de

Satz: Grafische Produktionen Neumann, 97222 Rimpar

Umschlag Idee: Bernd Schiemann

Umschlag: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald

Umschlagfotos: ty_cgi_stock ; Jürgen Fälchle: beide adobe.stock.com

Druck: UAB BALTO print, 08217 Vilnius (LT)

Vorwort zur 14. 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 Elektroniker/in – Fachrichtung Automatisierungs- und Systemtechnik.

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, Dualen Hochschulen und Fachhochschulen.

Besonderer Wert wurde in dieser Auflage darauf gelegt, den sprachsensiblen Fachunterricht zu unterstützen. Dazu wurden viele Texte angepasst.

Inhalte: Grund- und Fachstufeninhalte der Informationstechnik, der Industrieelektronik der Systemtechnik und der Automatisierungstechnik in einem Band. Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik mit Anwendungen, Digitaltechnik, Messen, Regeln, Leistungselektronik. Betriebsmittelkennzeichnung nach DIN EN 81346-2:2009, Leittechnik nach DIN IEC 60050-351:2014-9, Sachwortverzeichnis in Deutsch mit Übersetzung in die englische Fachsprache. Für schülerzentriertes Lernen und fächerverbindendes Unterrichten in Lernfeldern.

Das Buch bietet ein weites Spektrum auch produktionsnaher Inhalte wie z. B. Robotik, Sensorik, Geschäftsprozesse, 3D-Druck, Virtualisierung und Embedded Systems.

Die 14. Auflage wurde überarbeitet und um zahlreiche neue Inhalte erweitert:

Neue Themen in dieser Auflage:

Wendeschutzschaltung, Multifunktionsrelais, Instrumentenverstärker, agiles Projektmanagement, SPI Bus, PoE, Konfiguration PROFINET IO, Big Data, Mobile Kommunikation, MQTT, Passwörter, Analogwertverarbeitung, Pneumatik, Qualitätswerkzeuge, Instandhaltung, Adressen im Netzwerk, Schutzmaßnahmen, Digitalisierung, CodeSys, Remote Control.

Überarbeitet oder erweitert wurden folgende Kapitel/Themen:

Transistor als Schalter, elektrotechnische Qualifizierungsmaßnahmen, 3D-Drucker, Raspberry PI, Adressierung im Netzwerk, Fertigungsautomatisierung und TIA-Portal, MSR, USV, Digitalmultimeter, völlig neu wurde die Regelungstechnik gestaltet.

Hinweise auf verwendete Tabellenbücher werden im Buch abgekürzt verwendet, z. B. **TabIGSA** für das Tabellenbuch „Tabellenbuch Informations-, Geräte-, System- und Automatisierungstechnik“ oder **MELGSIAT** für Mathematik für Elektroniker.

Zur Verbesserung der Lesbarkeit z. B. bei Buchtiteln wird die männliche Bezeichnung verwendet, dennoch sind weibliche und andere Personen damit angesprochen.

Welche Ziele können Sie 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?

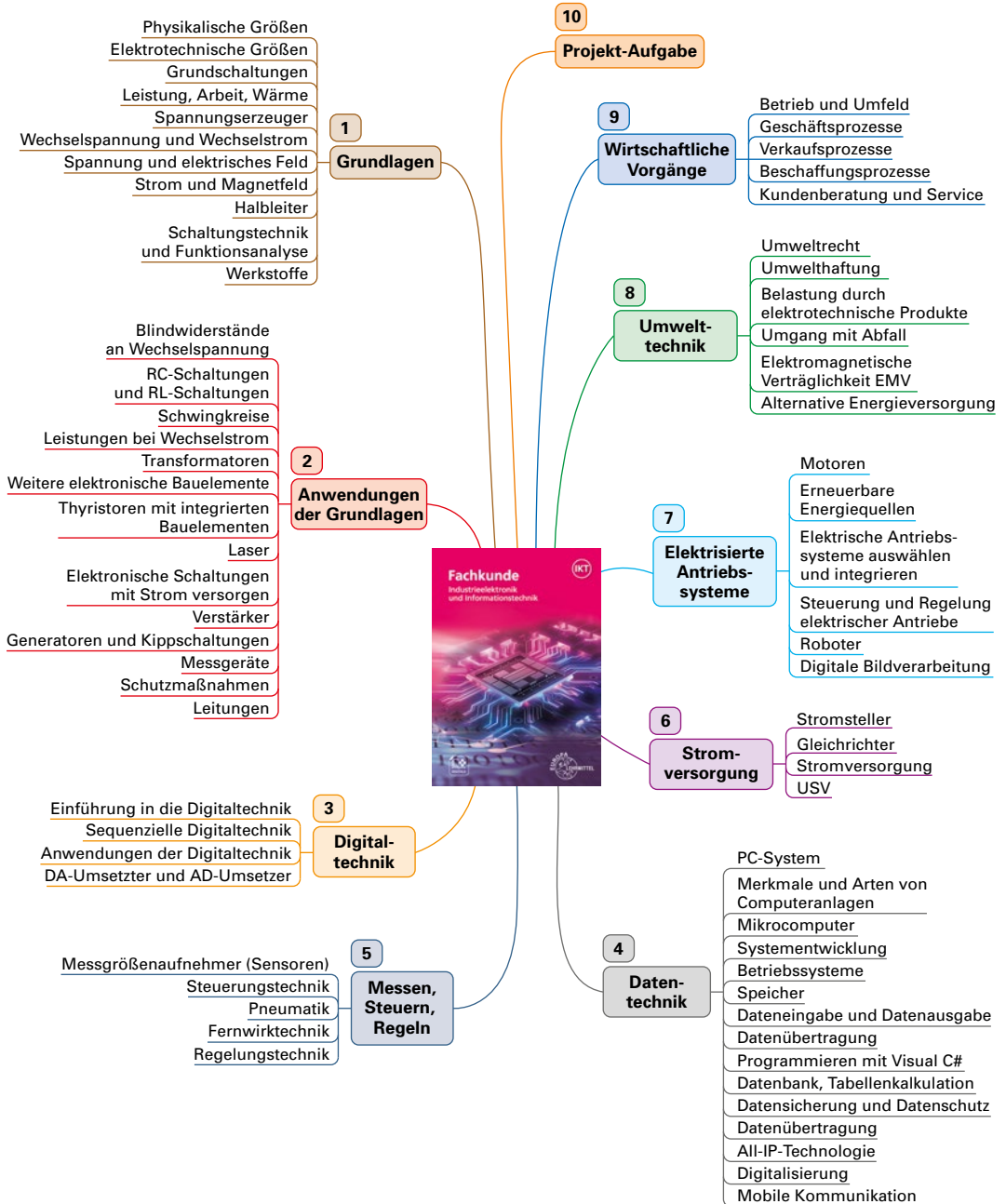
- Ein ausführliches Sachwortverzeichnis erleichtert das Finden technischer Begriffe.
- Physikalische und technische Sachverhalte werden durch viele anschauliche Bilder und Tabellen ergänzt und erklärt.
- Passend eingefügte Schaltpläne fördern die Fähigkeit zur Analyse, auch komplexer Systeme.
- Wichtige Formeln mit Formelzeichenerklärungen und vielen Beispielrechnungen fördern und festigen das Verständnis.
- Merksätze fassen wichtige Sachverhalte kurz zusammen.
- Eine kleine Übersicht auf der folgenden Seite 4 ordnet Beispiele aus ausgewählten Kapiteln Lernsituationen zu.

Lernfelder des ersten Ausbildungsjahres für alle Berufe1					
LF/ Jahr	Zeitvor- gabe in h			Lernfeldinhalte	Beispiele, Kapitel
1/1	80		Elektrotechnische Systeme analysieren und Funktionen prüfen	El. Grundgrößen Grundsaltungen Wirtschaftliche Vorgänge	1.2 1.3 9.1-2
2/1	80		Elektrotechnische Installationen planen und ausführen	Installationsschaltungen Sicherheitsbestimmungen Bemessung von Leitungen	1.10 2.13 2.13
3/1	80		Steuerungen analysieren und anpassen	Schaltungstechnik Digitaltechnik	1.10 3.1, 3.2
4/1	80		Informationstechnische Systeme bereitstellen	Systemanalyse Betriebssysteme von PC Hardware	4.1.1 4.10 4.4, 4.8, 4.9
Lernfelder der Fachstufen GS und AT sowie Elektroniken – Fachrichtung Automatisierungs- und Systemtechnik					
5/2	GS	60	Elektroenergieversorgung für Geräte und Systeme realisieren und deren Sicherheit gewährleisten	Gefahren des el. Stromes Schutzmaßnahmen	2.12 2.13
5/2	AT	60	Elektroenergieversorgung und Sicherheit von Betriebsmitteln gewährleisten	Wechselspannung, Wechselstrom, Drehstrom Transformatoren Industrielle Netzteile	1.6 2.5 6.6.2
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	Sensoren Schutzmaßnahmen	5.1 2.13
7/2	GS	80	Baugruppen hard- und softwareseitig konfigurieren	Mikrocontroller PLD SPS	4.4 3.3 5.2.5
7/2	AT	80	Steuerungen für automatisierte Anlagen programmieren und realisieren	Steuerungstechnik, SPS TIA-Portal, CODESYS	5.2, 5.2.5 5.2.6, 5.2.7
8/2	GS	60	Geräte herstellen und prüfen	AD-DA-Umsetzer Kleinmotoren	3.4 7.1-2
8/2	AT	60	Antriebssysteme auswählen und integrieren	Elektrische Antriebssysteme Drehstromasynchronmotoren	7 7.1.9
9/3	GS	100	Geräte und Systeme in Stand halten	Schaltungsanalyse Entsorgung	2.9.6 8.2
9/3	AT	100	Steuerungssysteme und Kommunikationssysteme integrieren	Feldbussysteme Mensch-Maschine-Schnittstellen	4.14 5.2.8
10/3	GS	80	Fertigungsanlagen einrichten	Steuerungsarten Steuerungen	5.2.1 5.2.2, 5.2.3
10/3	AT	100	Automatisierungssysteme in Betrieb nehmen und übergeben	Regelungstechnik Parametrierung von FU	5.5 7.2.4
11/3	GS	100	Prüfsysteme einrichten und anwenden	Diagnosewerkzeuge, Debugger Bussysteme	4.6.3 4.9.7
11/3	AT	80	Automatisierungssysteme in Stand halten und optimieren	Servomotoren Elektronisch kommutierte Motoren Elektromagnetische Verträglichkeit	7.2.7 7.2.4 8.6
12/4	GS	80	Geräte und Systeme planen und realisieren	Schutzleiter Kosten-Nutzenbetrachtung	1.11.7 4.6.1
12/4	AT	60	Automatisierungssysteme planen	Pflichtenheft Recycling	4.6.1 8.5
13/4	GS	60	Fertigungs- und Prüfsysteme in Stand halten	Soll-Ist-Vergleich	5.5.1
13/4	AT	80	Automatisierungssysteme realisieren	Programmimplementierung	4.6.4

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.

Inhalte

Die neue Fachkunde auf einen Blick:



Inhaltsverzeichnis

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	Heißeleiterwiderstände NTC	23
1.2.8.4	Kaltleiterwiderstände PTC	23
1.2.8.5	Spannungsabhängige Widerstände VDR	24
1.2.9	Gefahren des elektrischen Stromes	24
1.3	Grundschaltungen	26
1.3.1	Bezugspfeile	26
1.3.2	Reihenschaltung	27
1.3.3	Parallelschaltung	29
1.3.4	Gemischte Schaltungen	31
1.3.4.1	Spannungsteiler	31
1.3.4.2	Messen elektrischer Grundgrößen	33
1.3.4.3	Widerstandsbestimmung durch indirekte Messung	34
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	Belastungsfälle einer Spannungsquelle	45
1.5.3	Anpassung	46
1.5.4	Schaltungen 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	81
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	Schaltungsunterlagen der Elektrotechnik	102
1.10.2	Referenzkennzeichnung in der Elektrotechnik	103
1.10.3	Schaltungen mit Installationsschaltern	105
1.10.4	Schaltfunktion	105
1.10.5	Schüttschaltungen	107
1.10.6	Schaltungen mit Zeitschaltern	110
1.10.7	Multifunktionsrelais (MFR)	111
1.11	Werkstoffe	112
1.11.1	Grundlagen	112
1.11.2	Periodensystem	112
1.11.3	Chemische Bindungen	112
1.11.4	Säuren, Basen und Salze	113
1.11.5	Elektrochemie	114
1.11.6	Korrosion	117
1.11.7	Leiterplatten	118
1.11.8	Lote und Flussmittel	119
1.11.9	Isolierstoffe	120
2 Anwendungen der Grundlagen		
2.1	Blindwiderstände an Sinuswechselspannung	121
2.1.1	Wechselstromwiderstand des Kondensators	121
2.1.2	Wechselstromwiderstand der Spule	122
2.1.3	Schaltungen von nicht gekoppelten Spulen	123
2.2	RC-Schaltungen und RL-Schaltungen	124
2.2.1	Reihenschaltung aus Wirkwiderstand und Blindwiderstand	124
2.2.2	Parallelschaltung aus Wirkwiderstand und Blindwiderstand	126
2.2.3	Verluste im Kondensator	127
2.2.4	Verluste in der Spule	128
2.2.5	Impulsverformung	129
2.2.6	Siebschaltungen	131
2.3	Schwingkreise	135
2.3.1	Reihenschwingkreis	135
2.3.2	Parallelschwingkreis	136
2.3.3	Kennfrequenz f_0 und Resonanzfrequenz f_r	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	2.12.4	Grundbegriffe der Oszilloskop-Messtechnik	227
2.5.1	Aufbau und Wirkungsweise	148	2.12.4.1	Digitales Speicheroszilloskop DSO	229
2.5.2	Aufbau von Transformatoren	148	2.12.4.2	ScopeMeter®	231
2.5.3	Idealer Transformator	149	2.12.4.3	PC-Oszilloskop	232
2.5.4	Realer Transformator im Leerlauf	151	2.12.5	Elektrizitätszähler	233
2.5.5	Besondere Transformatoren	152	2.12.6	PC-Messtechnik	234
2.6	Weitere elektronische Bauelemente	155	2.12.7	Simulationssysteme anwenden	238
2.6.1	Besondere Halbleiterdioden	155	2.13	Schutzmaßnahmen	242
2.6.1.1	Z-Dioden	155	2.13.1	Schutz gegen elektrischen Schlag	242
2.6.1.2	Schottkydioden	156	2.13.2	Verteilungssysteme, Fehlerarten	243
2.6.1.3	SiC-Dioden	156	2.13.3	Überstromschutz	244
2.6.2	Bipolare Transistoren	156	2.13.4	Fehlerstromschutz	245
2.6.3	Unipolare Transistoren (FET)	161	2.13.5	Schutz durch Gehäuse	246
2.6.4	HEM-Transistoren	166	2.13.6	Schutz durch automatische Abschaltung	246
2.6.4.1	SiC-MOSFET	166	2.13.7	Schutz durch doppelte oder verstärkte Isolierung (Schutzklasse II)	248
2.6.4.2	GaN-MOSFET	167	2.13.8	Schutz durch Schutztrennung	248
2.6.5	IGBT	167	2.13.9	Schutz durch Kleinspannung mittels SELV oder PELV	249
2.6.6	Thyristoren	169	2.13.10	Prüfung elektrischer Anlagen und Betriebsmittel	250
2.6.7	Triac	171	2.13.11	Wiederholungsprüfung an ortsveränderlichen elektrischen Geräten	251
2.6.8	Diac	171	2.13.12	Prüfung der elektrischen Ausrüstung von Maschinen	252
2.6.9	Vierschichtdiode	171	2.13.13	Elektrotechnische Qualifizierungsmaßnahmen	253
2.6.10	Thyristortetrode	172	2.14	Leitungen	254
2.7	Thyristoren mit integrierten Bauelementen	172	2.14.1	Leiter- und Kontaktwerkstoffe	254
2.7.1	ACR	173	2.14.2	Leitungen der Energietechnik	255
2.7.2	MCT	173	2.14.3	Allgemeine Grundsätze	256
2.7.3	Integrierte Schaltungen (IC)	174	2.14.4	Mindestquerschnitte	256
2.8	Laser	175	2.14.5	Strombelastbarkeit	256
2.9	Elektronische Schaltungen mit Energie versorgen	178	2.14.6	Spannungsfall in Wohngebäuden	259
2.9.1	Netzgeräte	178	2.14.7	Überlastschutz und Kurzschlusschutz	260
2.9.2	Prinzip der Gleichrichtung	178			
2.9.3	Gleichrichterschaltungen	179			
2.9.4	Glätten der gleichgerichteten Spannung	182			
2.9.5	Stabilisieren	184			
2.9.5.1	Stabilisierungsfaktor	184			
2.9.5.2	Lineare Spannungsregler	185			
2.9.5.3	Lineare Spannungsregler-ICs	187			
2.9.6	Projektaufgabe Netzteil	189			
2.10	Verstärker	192			
2.10.1	Grundbegriffe	192			
2.10.2	Verstärker mit bipolaren Transistoren	196			
2.10.2.1	Verstärkergrundschaltungen	196			
2.10.2.2	Arbeitspunkt	197			
2.10.2.3	Emitterschaltung	198			
2.10.2.4	Gegenkopplung	200			
2.10.2.5	Gegentaktschaltungen	201			
2.10.3	Verstärker mit Feldeffekttransistoren	202			
2.10.4	Verstärker für den D-Betrieb	205			
2.10.5	Operationsverstärker	206			
2.10.5.1	Eigenschaften	206			
2.10.5.2	Schaltungsaufbau	207			
2.10.5.3	Betriebsverhalten	207			
2.10.5.4	Grundschaltungen	208			
2.10.6	Instrumentenverstärker	214			
2.10.7	Treiberverstärker	215			
2.11	Generatoren und Kipperschaltungen	216			
2.11.1	Sinusgeneratoren	216			
2.11.2	Sägezahn-generator	218			
2.11.3	Elektronische Schalter	218			
2.11.4	Bistabile Kipperschaltung	220			
2.11.5	Zeitgeberbaustein NE555	220			
2.11.6	Monostabile Kipperschaltung	221			
2.11.7	Astabile Kipperschaltung (Rechteckgenerator)	222			
2.11.8	Schwellwertschalter	223			
2.12	Messgeräte	224			
2.12.1	Zeigermessgeräte	224			
2.12.2	Digitale Messgeräte	225			
2.12.3	Digitalmultimeter	226			

3 Digitaltechnik

3.1	Einführung in die Digitaltechnik	261
3.1.1	Dualcode	261
3.1.2	Binäre Elemente	262
3.1.3	Grundlagen der Schaltalgebra	265
3.1.4	Analyse und Synthese von Schaltungen	267
3.1.5	Binäre Elemente mit besonderen Ausgängen	268
3.1.6	Digitale Schaltkreise	269
3.1.7	Daten von binären Elementen	270
3.1.8	Karnaugh-Diagramm	272
3.1.9	Binärcodes	274
3.1.9.1	BCD-Codes	274
3.1.9.2	Gray-Code	275
3.1.9.3	Strichcodes (Barcodes)	275
3.1.9.4	Flächencodes	277
3.1.9.5	Codeleser	277
3.1.9.6	Darstellung von alphanumerischen Zeichen	278
3.1.10	Anwendung Codeumsetzer	279
3.2	Sequenzielle Digitaltechnik (Schaltwerke)	280
3.2.1	Binärspeicher	280
3.2.2	Asynchrone Kippglieder (Flipflops)	282
3.2.3	Synchrone Kippglieder (Flipflops)	283
3.2.4	Mono-flops und Verzögerungselemente	286
3.2.5	Asynchrone Zähler	287
3.2.6	Synchrone Zähler	288
3.2.6.1	Wertetabelle und Zeitablaufdiagramm	288
3.2.6.2	Schaltfunktionen aus der Wertetabelle	288
3.2.6.3	Zähler mit T-Kippgliedern	289
3.2.7	Zähldekaden	290
3.2.8	Schieberegister	292
3.2.9	Frequenzteiler	294
3.2.10	Projektaufgabe Signalanlage	295

3.3	Anwendungen der Digitaltechnik	297			
3.3.1	Programmierbare Logikelemente	297	4.6.3	Programmentwicklung	362
3.3.1.1	Aufbau und Programmierung	297	4.6.4	CPU-Programmierung mit Hochsprachen	363
3.3.1.2	PAL-Schaltkreise	298	4.7	Programmieren in Hochsprache	366
3.3.1.3	Schaltkreise mit zwei programmierbaren Feldern	301	4.7.1	Begriffe des Programmierens	366
3.3.1.4	PAL-Schaltkreis als PROM	301	4.7.2	Strukturierte Anweisungen	367
3.3.1.5	CPLD-Logikschaltkreise	302	4.8	Programmieren in Visual C#	369
3.3.1.6	ISP-Bauelemente	304	4.8.1	Vereinbarungen (Deklarationen)	370
3.3.2	Binäre Übertragungsfehler erkennen	307	4.8.2	Methoden für die Eingabe und Ausgabe	372
3.3.3	Paritätsprüfung	307	4.8.3	Operatoren und Ausdrücke	374
3.4	DA-Umsetzer und AD-Umsetzer	309	4.8.4	Bedingte Anweisungen	375
3.4.1	Digital-Analog-Umsetzer	309	4.8.5	Inkrementoperatoren und Dekrementoperatoren	377
3.4.2	Analog-Digital-Umsetzer	310	4.8.6	Iterationsanweisungen	377
3.4.2.1	Momentanwert-AD-Umsetzer	310	4.8.7	Vergleich der Schleifenanweisungen	379
3.4.2.2	Integrierende AD-Umsetzer	312	4.9	Mikrocontroller	380
			4.9.1	Allgemeines	380
			4.9.2	AVR-Mikrocontroller	383
			4.9.3	Raspberry Pi	384
			4.9.4	Programmierung von Mikrocontrollern	387
			4.9.4.1	Programmierung von Mikrocontrollern in C	389
			4.9.5	ARDUINO	391
			4.9.6	Online-Programmierung mit Mbed OS 5	393
			4.9.6.1	Einrichten von Mbed für Nucleo F103RB	393
			4.9.6.2	Programme für Nucleo-F103RB erstellen	394
			4.9.6.3	Anwendungen programmieren für Nucleo-F103RB	395
			4.9.7	Periphere Busse	396
			4.9.7.1	I ² C-Bus	396
			4.9.7.2	Serial Peripheral Interface SPI	398
			4.10	Betriebssystem	400
			4.10.1	Aufgaben eines Betriebssystems	400
			4.10.2	BIOS und UEFI	401
			4.10.3	Befehlszeilenkommandos	403
			4.11	Windows anwenden	405
			4.11.1	Taskleiste und Startmenü	405
			4.11.2	Installation von Anwendungssoftware	406
			4.11.3	Dateiverwaltung	407
			4.11.4	Konfigurieren von Windows	408
			4.11.5	Datenbanksystem Access	409
			4.11.6	Tabellenkalkulation	413
			4.11.7	Präsentationsprogramm PowerPoint	417
			4.12	Lernen mit Moodle	419
			4.13	Linux anwenden	421
			4.14	Datenübertragung	423
			4.14.1	Verhalten von Leitungen bei hoher Frequenz	423
			4.14.2	Analoge Modulation und Demodulation	425
			4.14.2.1	Amplitudenmodulation (AM)	425
			4.14.2.2	Digitale Modulation	426
			4.14.2.3	Demodulation	430
			4.14.3	Multiplexverfahren	431
			4.14.3.1	Zeitmultiplexverfahren	431
			4.14.3.2	Weitere Multiplexverfahren	433
			4.14.4	Datenetze und Feldbussysteme	434
			4.14.4.1	Kommunikation in Datennetzen	434
			4.14.4.2	Netztopologie und Netzwerkkomponenten	435
			4.14.4.3	Übertragungsgeschwindigkeiten	436
			4.14.4.4	Ethernet LAN	437
			4.14.4.5	Adressen im Netzwerk	441
			4.14.4.6	Power over Ethernet (PoE)	443
			4.14.4.7	Powerline Communication	444
			4.14.4.8	CAN-Bus	445
			4.14.4.9	AS-i-Feldbus	447
			4.14.4.10	IO-Link	449
			4.14.4.11	Gateways für Feldbusse	450
			4.14.4.12	PROFIBUS, PROFIBUS-DP	451
			4.14.4.13	PROFINET IE	452
			4.14.4.14	PROFIsafe	454
4	Datentechnik				
4.1	PC-System	315			
4.1.1	Bestandteile eines PC-Systems	315			
4.1.2	Externe Schnittstellen am PC	316			
4.1.3	Tastatur des PC	317			
4.1.4	Inbetriebnahme eines PC	317			
4.1.5	PCI-Express-Schnittstellen	318			
4.2	Merkmale und Arten von Computeranlagen	319			
4.2.1	Leistungsfähigkeit	319			
4.2.2	Arten von Computern	319			
4.2.3	Client-Server-Systeme	321			
4.2.4	Aufgabenbereiche von Computern	322			
4.3	Speichertechnik	323			
4.3.1	RAM	323			
4.3.2	ROM	325			
4.3.3	Speicheradressierung	326			
4.3.4	Datenzugriff	327			
4.3.5	Festplattenspeicher	328			
4.3.6	Halbleiterlaufwerke	330			
4.3.7	Optische Speicher	331			
4.3.8	Speicher für Backup	333			
4.3.9	Chipkarten	335			
4.3.10	RFID-Transponder	337			
4.4	Mikrocomputer	338			
4.4.1	Aufbau eines Mikrocomputers	338			
4.4.2	Wirkungsweise von Mikroprozessoren	339			
4.4.3	Mikroprozessorfamilien x86, x64	341			
4.4.4	Weitere Mikroprozessoren	343			
4.5	Dateneingabe und Datenausgabe	344			
4.5.1	Eingabegeräte	344			
4.5.1.1	Tastaturen	344			
4.5.1.2	Dateneingabe am Bildschirm	344			
4.5.1.3	Befehls- und Dateneingaben durch Gestik und Tracking	346			
4.5.1.4	Scanner	347			
4.5.2	Ausgabegeräte	347			
4.5.2.1	Drucker	347			
4.5.2.2	3D-Drucker	349			
4.5.2.3	Displays und Beamer	351			
4.5.2.4	Interaktives Whiteboard	352			
4.5.3	Schnittstellen für periphere Geräte	353			
4.5.3.1	Aufgaben und Art der Schnittstellen	353			
4.5.3.2	USB-Schnittstelle	354			
4.5.3.3	Firewire (IEEE 1394)	354			
4.5.3.4	Serielle Schnittstellen	355			
4.6	Systementwicklung	358			
4.6.1	Systemanalyse, Aufgabenanalyse	358			
4.6.2	Agiles Projektmanagement	361			

4.15	All-IP-Technologie	455
4.15.1	Next Generation Network (NGN)	455
4.15.2	Digital Subscriber Line (DSL)	456
4.15.3	Voice over IP (VoIP), Internettelefonie	458
4.16	Internet	459
4.16.1	Aufbau des Internet	459
4.16.2	Internet-Zugangsorten	460
4.16.3	Kommunikationsprotokolle	461
4.17	Digitalisierung	462
4.17.1	Big Data	462
4.17.2	Internet der Dinge (IoT)	463
4.17.2.1	Teilnehmer im Verbraucher-IoT	463
4.17.2.2	IIoT in der Industrie	464
4.17.3	Gerätekommunikation mit MQTT	465
4.18	Mobile Kommunikation	467
4.18.1	Mobile Netze	467
4.18.2	Mobilfunksystem GSM	468
4.18.3	LTE 4 und 5 G	469
4.18.4	Funknetzwerke mit geringem Energiebedarf (LPWAN)	471
4.18.5	Funkbussysteme	472
4.18.6	Bluetooth	473
4.18.7	Funkanwendungen auf ISM-Bändern	475
4.18.8	WLAN	476
4.18.8.1	WLAN-Betriebsarten	476
4.18.8.2	Störungen bei Funkübertragung im industriellen Umfeld	477
4.18.9	App mit Android Studio entwickeln	478
4.19	Datensicherung und Datenschutz	482
4.19.1	Maßnahmen zur Datensicherung	482
4.19.2	Maßnahmen gegen unbefugte Nutzung	484
4.19.3	Schutz vor Computerviren	486
4.19.4	Gesetzlicher Datenschutz	487
4.19.5	EU-Datenschutzgrundverordnung DSGVO	488
4.19.6	Kryptografie	489
4.19.6.1	Einfache Verschlüsselungsverfahren	489
4.19.6.2	Komplexe Verschlüsselungsverfahren	490
4.19.7	Passwörter	492

5 Messen, Steuern, Regeln

5.1	Messgrößenaufnehmer (Sensoren)	493
5.1.1	Analoge Sensoren	494
5.1.1.1	Eigenschaften	494
5.1.1.2	Sensoren für Wege, Winkel und Abstände	495
5.1.1.3	Näherungsschalter	501
5.1.1.4	Lichtschranken, Lichtvorhänge, Scan-Mikrometer	502
5.1.1.5	Sensoren für Kräfte, Dehnungen und Drücke	503
5.1.1.6	Beschleunigungssensoren	505
5.1.1.7	Temperatursensoren	506
5.1.1.8	Sensoren der Sicherheitstechnik	508
5.1.2	Digitale Weg- und Winkelmessung	510
5.1.2.1	Inkrementelle Weg- und Winkelmessung	510
5.1.2.2	Codelineale und Winkelcodierer	511
5.1.2.3	Drehmelder (Synchro)	511
5.1.3	Messwertgeber für elektrische Größen (Messumformer)	512
5.1.4	Störungen in Messleihen	513
5.1.5	Bestimmungen für Messeinrichtungen	515
5.2	Steuerungstechnik	516
5.2.1	Steuerungsarten	516
5.2.2	Binäre Steuerungen	517
5.2.3	GRAFCET	520
5.2.3.1	Die GRAFCET-Struktur	520
5.2.3.2	Schritte	521
5.2.3.3	Aktionen	522
5.2.3.4	Transitionen und Ablaufstrukturen	523

5.2.4	Digitale Steuerungen (Beispiele)	524
5.2.5	Speicherprogrammierbare Steuerungen SPS	525
5.2.5.1	Aufbau und Funktionsweise	525
5.2.5.2	Projekt	526
5.2.5.3	Programmstruktur	527
5.2.5.4	Programmiersprachen	527
5.2.5.5	SPS-Programmerstellung	528
5.2.5.6	Ansteuerung der SPS	530
5.2.5.7	Programmieren in AWL, KOP, FUP	530
5.2.5.8	Programmieren von Zeitfunktionen	532
5.2.5.9	Zähler in SPS	533
5.2.5.10	Analogwertverarbeitung.	534
5.2.5.11	Ablaufsprache	536
5.2.5.12	Ablaufsteuerung mit S7-Graph	537
5.2.5.13	Bibliotheksfähige SPS-Bausteine	538
5.2.5.14	Strukturierter Text ST	539
5.2.5.15	Zustandsgraph	540
5.2.5.16	Dokumentation von SPS-Programmen	541
5.2.5.17	Sicherheits-SPS	542
5.2.6	Fertigungsautomatisierung und TIA-Portal	543
5.2.6.1	TIA-Portal	544
5.2.6.2	TIA-Variablen und Konstanten	545
5.2.6.3	Programmorganisation	546
5.2.6.4	Bibliotheksfähige Bausteine	547
5.2.6.5	TIA-Projekt	549
5.2.7	Programmierungsumgebung CODESYS	550
5.2.8	Mensch-Maschine-Schnittstellen	553
5.2.9	Kleinsteuerungen	555
5.2.9.1	Allgemeines	555
5.2.9.2	Anwendung der Kleinsteuerung LOGO!	556
5.2.9.3	LOGO! im Netzwerk	558
5.3	Pneumatik	560
5.4	Fernwirktechnik (Telecontrol)	562
5.4.1	Fernwirken und Fernüberwachen	562
5.4.2	Fernwartung (Remote Control)	564
5.4.3	Virtuelles Privates Netzwerk VPN	565
5.5	Regelungstechnik	566
5.5.1	Einführung	566
5.5.1.1	Unstetige Regelung	566
5.5.1.2	Stetige Regelung	567
5.5.2	Der Regelkreis	568
5.5.2.1	Die Regelstrecke	569
5.5.2.2	Zusammenstellung wichtigster Regelkreisglieder mit Beispielen	572
5.5.2.3	Regeleinrichtung	573
5.5.3	Beispiele für Regelkreise	574
5.5.3.1	Regelung von P-T ₁ -Strecken	574
5.5.3.2	Regelung von I-Strecken	576
5.5.4	Aufbau und Funktion von Standardreglern	578
5.5.4.1	Analoge Regler mit Operationsverstärkern	578
5.5.4.2	Digitale Regler (Software-Regler)	580
5.5.4.3	Kompaktregler	582
5.5.5	Wahl der Reglerparameter	583
5.5.5.1	Prüfen des Wirkungssinns	583
5.5.5.2	Die Regelkreisstabilität	583
5.5.5.3	Einstellen der Reglerparameter	583
5.5.5.4	Selbstoptimierende Regler	584

6 Stromversorgung

6.1	Geräte mit elektrischer Energieversorgung	585
6.2	Leistungsgrenzen am öffentlichen Netz	585
6.3	Gesteuerte Gleichrichter	588
6.4	Gleichstromsteller	593
6.5	Wechselrichter	593

6.6	Durchflusswandler und Sperrwandler	595
6.6.1	Schaltregler	597
6.6.2	Industrielle Netzgeräte	600
6.7	Unterbrechungsfreie Stromversorgungssysteme	602

7 Elektrische Antriebssysteme

7.1	Motoren	605
7.1.1	Drehbewegungen	605
7.1.2	Kennlinien von Arbeitsmaschinen	606
7.1.3	Kennwerte von Elektromotoren	606
7.1.4	Drehfeldmaschinen	608
7.1.5	Synchronmotoren	609
7.1.6	Reluktanzmotoren	610
7.1.7	Schrittmotoren	611
7.1.8	Piezo-Antriebe	613
7.1.9	Asynchronmotor (Induktionsmotor)	614
7.1.10	Energiesparende Antriebe	617
7.1.11	Stromwendermotoren	618
7.1.12	Linearantriebe	621
7.1.13	Motoren in vier Quadranten betreiben	623
7.2	Steuerung und Regelung elektrischer Antriebe	624
7.2.1	Maschinensicherheit	624
7.2.2	Funktionale Sicherheit	626
7.2.3	Drehzahlsteuerung	627
7.2.3.1	Universalmotor	627
7.2.3.2	Drehzahlsteuerung beim fremderregten Gleichstrommotor	628
7.2.3.3	Gleichstromsteller mit H-Brücke	629
7.2.4	Elektronisch kommutierte Motoren	630
7.2.4.1	Überblick, Vergleich mit Kommutatormotor	630
7.2.4.2	EC-Motor mit Hallensensoren	631
7.2.4.3	Sensorlose Steuerung des EC-Motors	632
7.2.4.4	Vektorregelung eines EC-Motors	633
7.2.4.5	Geschalteter Reluktanzmotor (SRM)	634
7.2.5	Asynchronmotoren steuern	635
7.2.5.1	Motorschutz auswählen	635
7.2.5.2	Anlassen von Kurzschlussläufermotoren (Ständeranlassverfahren)	638
7.2.6	Drehzahl mit Frequenzumrichter FU steuern	640
7.2.6.1	Frequenzumrichter mit Zwischenkreis	640
7.2.6.2	Pulsweitenmodulation (PWM)	641
7.2.6.3	Zusammenhang zwischen Spannung und Frequenz	643
7.2.6.4	Kurzschlussläufermotoren am Frequenzumrichter betreiben	644
7.2.6.5	Frequenzumrichter auswählen	645
7.2.6.6	Projektaufgabe Positionierung Transportband	646
7.2.6.7	Frequenzumrichter anschließen	648
7.2.7	Servomotoren	649
7.2.7.1	Anforderungen an Servomotoren	649
7.2.7.2	Servomotoren im Antriebssystem	650
7.2.7.3	Messsysteme auswählen	651
7.2.7.4	Achsmechanik einstellen	652
7.2.7.5	Maßbezug herstellen	653
7.2.7.6	Achsen positionieren	653
7.2.7.7	Synchronisieren mehrerer Achsen	655
7.2.7.8	Elektronisches Nockenschaltwerk	655
7.3	Roboter	657
7.3.1	Einteilung	657
7.3.2	Industrieroboter	657
7.4	Bildverarbeitung	661

8 Umwelttechnik

8.1	Erneuerbare Energiequellen	663
8.1.1	Solartechnik	663
8.1.1.1	Solarthermie	663
8.1.1.2	Fotovoltaik	664
8.1.2	Windkraftanlagen	666
8.1.3	Brennstoffzellen	668
8.1.4	Hybridantriebe	670
8.1.5	Elektromobilität	671
8.2	Umweltrecht	672
8.3	Umwelthaftung	672
8.4	Belastung durch elektrotechnische Produkte	673
8.5	Umgang mit Abfall	674
8.5.1	Begriffe der Abfallwirtschaft	674
8.5.2	Träger der Entsorgung	674
8.5.3	Betriebsbeauftragte	675
8.6	Elektromagnetische Verträglichkeit EMV	676
8.6.1	Bedeutung der EMV	676
8.6.2	Störungen durch elektrische Felder	676
8.6.3	Störungen durch elektromagnetische Felder	679

9 Wirtschaftliche Vorgänge

9.1	Betrieb und Umfeld	682
9.1.1	Betrieb und Unternehmen	682
9.2	Geschäftsprozesse	683
9.3	Verkaufsprozesse	686
9.3.1	Verkaufskalkulation	686
9.3.2	Erstellung eines Angebots	686
9.3.3	Verträge	687
9.3.4	Rechnungsstellung	688
9.4	Beschaffungsprozesse	688
9.5	Kundenberatung und Service	690
9.5.1	Umgang mit Kunden	690
9.5.2	Kundenservice	691
9.5.3	Kundenbindung	692
9.5.4	ABC-Analyse	692
9.5.5	Beschwerdemanagement (Reklamationen)	693
9.5.6	Konformitätserklärung	694
9.5.7	Qualitätsmanagement	695
9.5.7.1	Grundlagen	695
9.5.8	Qualitätswerkzeuge	696
9.6	Instandhaltung	697

10 Projektaufgabe

11 Anhang

11.1	Größen und Einheiten	707
11.2	Mathematische Begriffe und Basiseinheiten	711
11.3	Vorsätze, Größen und Einheiten der IT-Technik – Prefixes, Quantities and Units of IT-Technology	712
11.4	Wichtige Normen	713
11.5	Bildquellenverzeichnis	715
11.6	Verzeichnis der Firmen und Dienststellen	716
11.7	Software- und Literaturverzeichnis	717

Sachwortverzeichnis

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 Solarzellen¹ nehmen die elektromagnetischen Felder der Lichtstrahlung auf und versorgen den Satelliten mit elektrischem Strom. Außerdem sind Schwerefelder wirksam, vor allem das Schwerefeld der Erde ist wirksam.

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



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

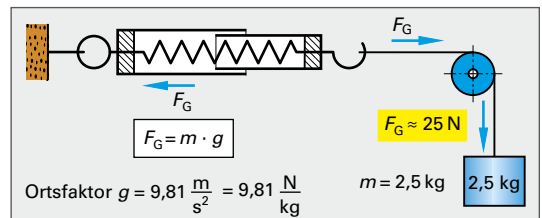


Bild 2: Kraftmessung

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 Newton² mit dem Einheitenzeichen N.

Ein Körper mit der Masse 1 kg hat auf der Erde die Gewichtskraft von etwa 10 N.

¹ lateinisch sol = Sonne

² Sir Isaac Newton, englischer Physiker, 1643 bis 1727

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. **TabIGSA**

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: 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:

$$v = \frac{s}{t} = \frac{180 \text{ m}}{10 \text{ s}} = \frac{180 \text{ m}}{10 \text{ s}} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}} = 64,8 \text{ km/h}$$

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 Ampere¹. Einheiten der Basisgrößen sind die Basiseinheiten (Tabelle 1). Einheitenzeichen sind die Abkürzungen für die Einheiten. Einheitenzeichen werden im Gegensatz zu den Formelzeichen aufrecht gedruckt.

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 Einheiten-

$$F_G = m \cdot g$$

$$v = \frac{s}{t}$$

F_G Gewichtskraft

g Fallbeschleunigung,

Ortsfaktor;

An der Erdoberfläche ist

$g = 9,81 \text{ N/kg} \approx 10 \text{ N/kg}$.

m Masse

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 $A \cdot s$	Coulomb ²	C
Je Sekunde $1/s$	Hertz ³	Hz
Meterquadrat $m \cdot m$	–	m ²

! Namensgeber wichtiger Einheiten

¹ André Marie Ampère, franz. Physiker

1775 bis 1836

² Charles A. de Coulomb, franz. Physiker

1736 bis 1806

zeichen. 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 Volt⁴ (V), Ohm⁵ (Ω), Watt⁶ (W), Farad⁷ (F) und Henry⁸ (H).

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

¹ André Marie Ampère, französischer Physiker, 1775 bis 1836

² Charles A. de Coulomb, französischer Physiker, 1736 bis 1806

³ Heinrich R. Hertz, deutscher Physiker, 1857 bis 1894

⁴ Alessandro G. Volta, italienischer Physiker, 1745 bis 1827

⁵ Georg Simon Ohm, deutscher Physiker, 1789 bis 1854

⁶ James Watt, schottischer Erfinder, 1736 bis 1819

⁷ Michael Faraday, englischer Physiker, 1791 bis 1867

⁸ Joseph Henry, amerikanischer Physiker, 1797 bis 1878

Beispiel: Geschwindigkeitsberechnung

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

Lösung:

$$v = \frac{s}{t} \rightarrow [v] = \frac{[s]}{[t]} = \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

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.

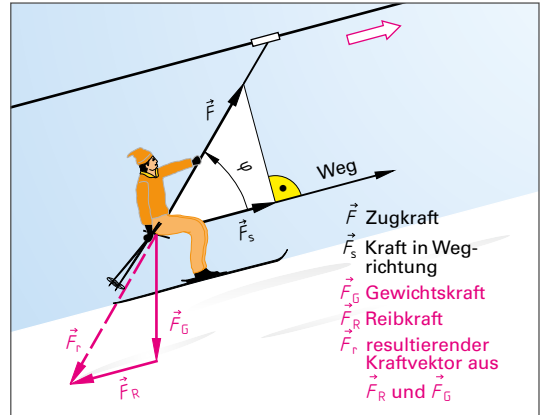


Bild 1: Kräfte bei einem Schlepplift

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.

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 Einheitenamen Joule¹ (J). Liegen Kraft und Weg nicht auf derselben Geraden, so wird zur Berechnung der Arbeit nur die Teilkraft in Wegrichtung berücksichtigt (**Bild 1**).

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$[a] = (\text{m/s})/\text{s} = \text{m/s}^2$$

$$F = m \cdot a$$

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

$$W = F_s \cdot s$$

$$W = F \cdot s \cdot \cos \varphi$$

$$[W] = \text{N} \cdot \text{m} = \text{Nm} = \text{J}$$

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

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 James P. Joule, englischer Physiker, 1818 bis 1889

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 (**Bild 1**). 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*.

Durch physikalische, chemische oder biologische Vorgänge kann Energie von einer Energieform in eine andere Energieform umgewandelt werden.

Potenzielle Energie oder Energie der Lage (Bild 1) ist die in einem System gespeicherte Energie, z. B. in einer Masse, die sich im Schwerfeld der Erde befindet. Potenzielle Energie¹ bedeutet hier das in Lage 1 gespeicherte Arbeitsvermögen gegenüber einer Lage 0 (Bezugslage). Für die Menge 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:

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

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

¹ lateinisch potentia = Vermögen, Macht

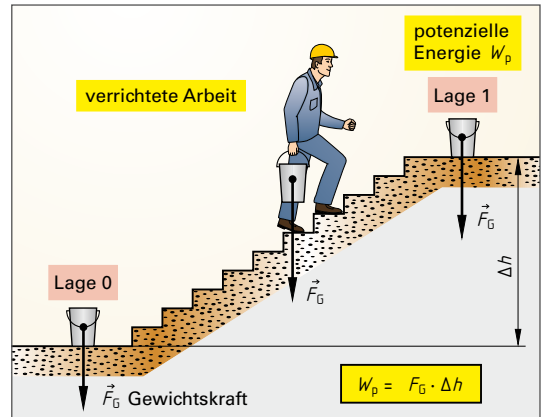


Bild 1: Änderung der Energie durch Arbeit

$$W_p = m \cdot g \cdot \Delta h$$

$$[W_p] = \text{Nm} = \text{J}$$

W_p potenzielle Energie
 m Masse
 g Fallbeschleunigung
 $(g \approx 10 \text{ N/kg})$

$$W_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

$$[W_k] = \text{Nm} = \text{J}$$

Δh Höhendifferenz
 W_k kinetische Energie
 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.

Wird einem Körper oder einem System keine Arbeit zugeführt, 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

Gegenstände sind im normalen Zustand elektrisch neutral. Durch Reiben können einige elektrisch geladen werden.

Reibt man einen Polystyrolstab mit einem Wolltuch und bringt ihn in die Nähe von Papierschnitzeln (**Bild 1**), so werden diese angezogen. Diese Anziehungskräfte werden durch **elektrische Ladungen** verursacht.

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

Gleiche Ladungen stoßen sich ab, ungleiche Ladungen ziehen sich an.

Die Ladung des Acrylglasstabes ist eine **positive Ladung** (Plusladung), die Ladung des Polystyrolstabes ist eine **negative Ladung** (Minusladung). Ladungen üben Kräfte aufeinander aus (**Bild 4**). Das Auftreten von Ladungen kann am Atommodell erklärt werden.

Enthält der Kern eines Atoms gleich viele Protonen, wie Elektronen um den Kern kreisen, ist das Atom elektrisch neutral (**Bild 5**). Die Ladungswirkungen heben sich nach außen auf. Kreisen dagegen um einen Atomkern z. B. mehr Elektronen, als Protonen im Kern vorhanden sind, ist das Atom negativ geladen, sind es weniger, ist das Atom positiv geladen. Solche Atome nennt man Ionen.

Die elektrische Ladung Q ist von der Stromstärke und von der Zeit abhängig. Sie hat die Einheit Ampere-sekunde (As) mit dem besonderen Einheitennamen Coulomb¹ (C).

Elektronen sind negativ geladen, Protonen sind positiv geladen. Beide tragen die kleinste Ladungsmenge, die **Elementarladung**. Die Elementarladung eines Elektrons beträgt $-1,602 \cdot 10^{-19}$ C, die Elementarladung eines Protons beträgt $+1,602 \cdot 10^{-19}$ 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:

$$\begin{aligned} \Delta Q &= I \cdot \Delta t = 150 \text{ mA} \cdot 1 \text{ min} = 150 \text{ mA} \cdot 60 \text{ s} \\ &= 9000 \text{ mAs} = \mathbf{9 \text{ As}} \end{aligned}$$

Bei $I = \text{const.}$ und mit Anfangsladung:

$$\Delta Q = I \cdot \Delta t$$

Bei $I = \text{const.}$ und ohne Anfangsladung:

$$Q = I \cdot t$$

ΔQ Ladungsänderung

I konstante Stromstärke

Δt Zeitabschnitt

Q Ladung

Δ (griech. Großbuchst. Delta)

Zeichen für Differenz

t Zeit

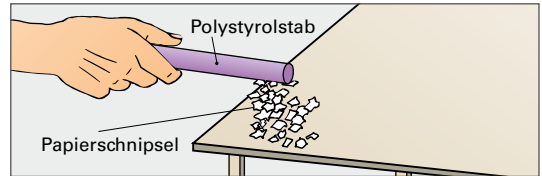


Bild 1: Anziehung von Teilchen durch Ladungen

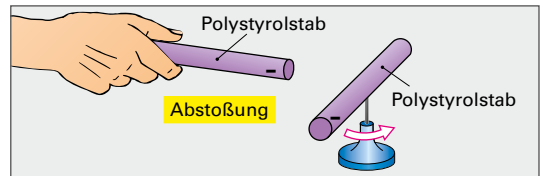


Bild 2: Abstoßung gleicher Ladungen

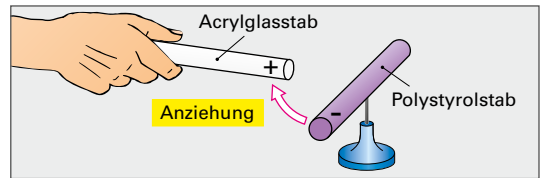


Bild 3: Anziehung ungleicher Ladungen

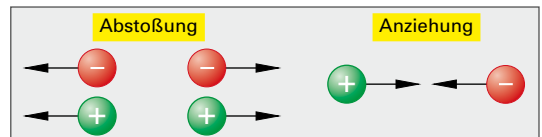


Bild 4: Ladungswirkungen

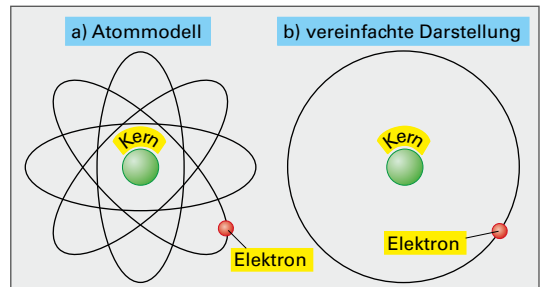


Bild 5: Aufbau eines Wasserstoffatoms

¹ Charles A. de Coulomb, französischer Physiker, 1736 bis 1806

1.2.2 Spannung

Zwischen positiven und negativen Ladungen wirkt eine Anziehungskraft. Werden diese Ladungen voneinander entfernt, so muss gegen die Anziehungskraft eine Arbeit verrichtet werden. Diese Arbeit ist als Energie zwischen den Ladungen gespeichert. Dadurch tritt zwischen den Ladungen eine **Spannung** auf.

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 Spannungsmessgerät (**Bild 2**).

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

Einheit der elektrischen Spannung U ist das Volt¹ (V). Im Schaltzeichen des Spannungsmessgerätes steht V.

$[U] = V$.

($[U]$ spricht: 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**).

Am Pluspol ist Elektronenmangel vorhanden und am Minuspol Elektronenüberschuss. Man unterscheidet Gleichspannung, Wechselspannung und Mischspannung. In einer an Gleichspannung von ca. 90 V liegenden Glimmlampe leuchtet der negative Pol. Bei Wechselspannung leuchten die Pole im Wechsel.

Potenzial nennt man eine Spannung, die von einem beliebigen Schaltungsknotenpunkt gegen Masse gemessen wird (Bild 2). Spannung kann als Differenz zweier Potentiale aufgefasst werden. Zwischen dem Knotenpunkt mit dem Potenzial φ_A und dem Punkt mit dem Potenzial φ_B liegt die Spannung $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = 12\text{ V} - 3\text{ V} = 9\text{ V}$. φ_C beträgt 0 V.

$$U = \frac{W}{Q}$$

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$$

$$[U] = \frac{\text{Nm}}{\text{C}} = \frac{\text{Ws}}{\text{As}} = \text{V}$$

U Spannung

Q Ladung

W Arbeit

φ Potenzial

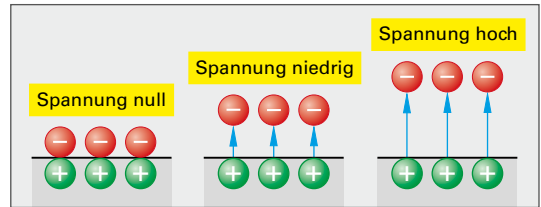


Bild 1: Spannung durch Ladungstrennung

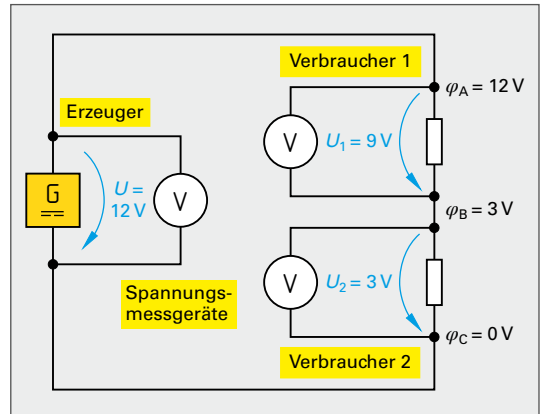


Bild 2: Spannungsmessung

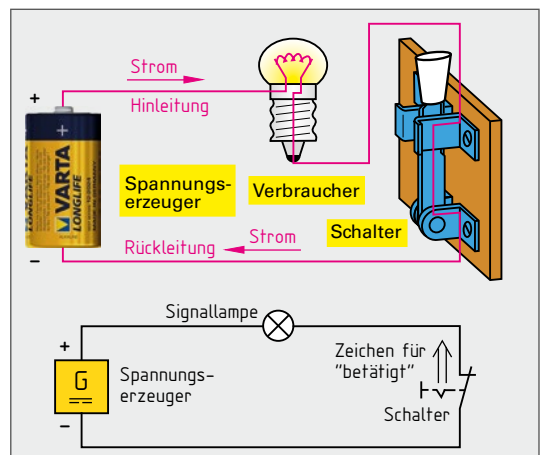
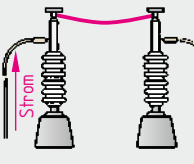
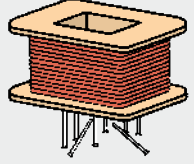
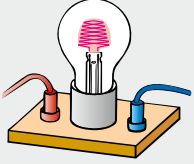
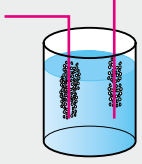



Bild 3: Elektrischer Stromkreis

¹ Alessandro Volta, italienischer Physiker, 1745 bis 1827

Tabelle 1: Stromwirkungen

Wärmewirkung immer vorhanden	Magnetkraftwirkung immer vorhanden	Lichtwirkung in Gasen, in manchen Halbleitern	Chemische Wirkung in leitenden Flüssigkeiten	Wirkung auf Lebewesen bei Menschen und Tieren
				
Heizung, Lötkolben, Schmelzsicherung	Relaisspule, Türöffner, Elektromotor, Laut- sprecher, Magnet- schwebebahn	Glimmlampe, LED, Leuchtstofflampe, Elektro-Schweißen	Ladevorgang bei Akku- mulatoren, belastete Elemente	Negativ: Unfälle, Positiv: Herzschritt- macher

1.2.3 Elektrischer Strom

Spannung verursacht einen elektrischen Strom, der bei geschlossenem Stromkreis fließt. Ein Stromkreis besteht aus dem Erzeuger, dem Verbraucher und der Hin- und Rückleitung zwischen Erzeuger und Verbraucher (Bild 3, Seite 16). 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 Bewegung der 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 technischen Stromrichtung ging man ursprünglich von der Bewegungsrichtung positiver Ionen in Flüssigkeiten aus (Bild 1).

Die Elektronen bewegen sich entgegengesetzt zur technischen Stromrichtung.

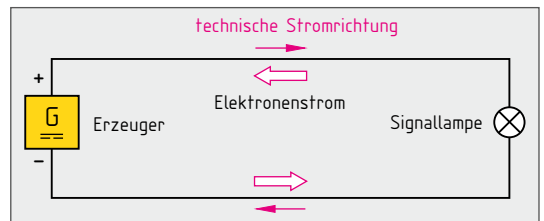


Bild 1: Stromrichtung

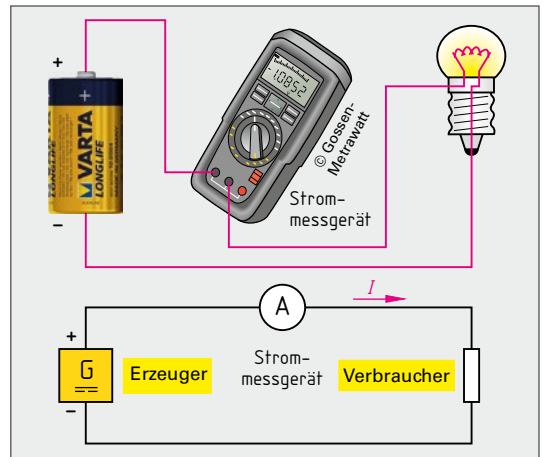


Bild 2: Strommessung

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 die 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. Ionen sind geladene Atome (siehe Seite 15). Ionenströme fließen in Akku, Batterien oder beim Galvanisieren, z. B. beim Verzinken von Eisen.

Ladungsträgerbeweglichkeit. Die Bewegung der Ladungsträger b (Driftgeschwindigkeit, von to drift = abtreiben) im Stromkreis unter Einwirkung eines elektrischen Feldes (**Abschnitt 1.7**) ist von der elektrischen Feldstärke E 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 m²/(Vs). Wie groß ist die Driftgeschwindigkeit?

Lösung:

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

Die Beweglichkeit der Ladungsträger beträgt in Metallen 0,0044 m²/(Vs), in Halbleitern 0,01 m²/(Vs) bis 1 m²/(Vs). Sie ist in Metallen wegen der großen Zahl freier Elektronen kleiner als bei Halbleitern, weil sich die vielen Ladungsträger gegenseitig behindern.

$$b = \frac{v}{E}$$

$$[b] = \frac{\frac{\text{m}}{\text{s}}}{\frac{\text{V}}{\text{m}}} = \frac{\text{m}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

b Ladungsträgerbeweglichkeit

v Driftgeschwindigkeit
 E elektrische Feldstärke

Tabelle 1: Stromarten

Bezeichnung	Kennlinie
Gleichstrom DC, d. c. Zeichen — oder ==	
Wechselstrom AC, a. c. Zeichen ~	
Mischstrom UC, u. c. Zeichen ≈	

1.2.4 Elektrischer Widerstand

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

Der Widerstand, auch *Resistenz* (von lat. resistere = widerstehen), hat das Formelzeichen R und die Einheit Ohm¹ (Ω), $[R] = \Omega$. Den Kehrwert des Widerstandes nennt man Leitwert. Der Leitwert (Formelzeichen G) hat die Einheit Siemens² (S), $[G] = \text{S}$ (**Tabelle 1, Seite 19**).

Beispiel 2: Leitwert berechnen

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

Lösung:

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

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 mit gleichen Abmessungen.

Der spezifische¹ Widerstand von Drähten hat die Einheit Ω · mm²/m. Bei Isolierstoffen und Halbleiterwerkstoffen wird die Einheit Ω · cm²/cm = Ω · cm verwendet. Der spezifische Widerstand gibt an, wie groß der Widerstand eines Würfels von 1 cm Kantenlänge ist.

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

Der **spezifische Widerstand** ρ wird meist für 20 °C angegeben. Oft wird mit der **Leitfähigkeit** γ statt mit dem spezifischen Widerstand gerechnet (**Tabelle 2**). Die Leitfähigkeit γ ist der Kehrwert des spezifischen Widerstandes ρ.

Die Leitfähigkeit γ ist der Kehrwert des spezifischen Widerstandes ρ.

Beispiel 1: Leiterwiderstand berechnen

Auf einer Kabeltrommel befindet sich ein 42 m langes 3-adriges Kupferkabel. Die Querschnitte der Leiter betragen je 1,5 mm². Berechnen Sie den Leiterwiderstand, wenn ein Verbraucher angeschlossen wird.

Leitfähigkeit von Kupfer (Cu): $\gamma = 56 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$
Lösung:

$$R = \frac{l}{\gamma \cdot A} = \frac{2 \cdot 42 \text{ m}}{56 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \cdot 1,5 \text{ mm}^2} = 1 \Omega$$

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. Wird die Spannung verdoppelt, verdoppelt sich auch die Stromstärke. 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 flacher, je größer der Widerstand ist. Mit zunehmendem Widerstand nimmt also die Stromstärke ab.

$$R = \frac{1}{G}$$

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

$$R = \frac{l}{\gamma \cdot A}$$

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

- | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>R Widerstand (Resistanz)
 G Leitwert
 γ Leitfähigkeit, spezifischer Leitwert
 (γ griech. Kleinbuchstabe Gamma)</p> | <p>ρ spezifischer Widerstand (ρ griech. Kleinbuchstabe Rho)
 l Länge des Leiters
 A Querschnitt des Leiters</p> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Tabelle 1: Wissenschaftler

 <p style="font-size: small; text-align: center;">© ullstein bild – Granger Collection</p>	 <p style="font-size: small; text-align: center;">© ullstein bild – Granger Collection</p>
<p>Ohm, Georg Simon, 1789 bis 1854, geb. in Erlangen</p>	<p>Siemens, Werner von, 1816 bis 1892, geb. in Lenthe</p>

Tabelle 2: Spezifischer Widerstand ρ und Leitfähigkeit γ

Werkstoff	ρ in $\Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$	γ in $\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$
Aluminium (Al)	0,0278	36,0
Kupfer (Cu)	0,0178	56,0
Silber (Ag)	0,0167	60,0
Gold (Au)	0,022	45,7

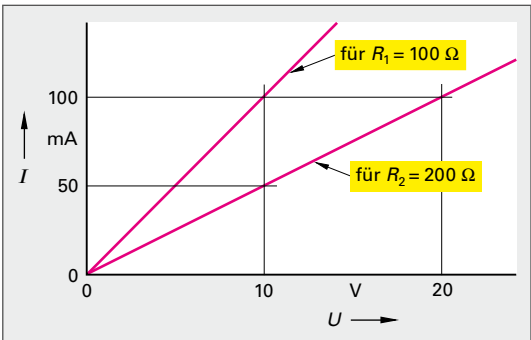


Bild 1: I als Funktion von U beim linearen Widerstand

¹ lateinisch specificus = arтеigen

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 ein Kupferdraht mit einem Widerstand von 100Ω , der an 10 V angeschlossen ist?

Lösung:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{10 \text{ V}}{100 \Omega} = 0,1 \text{ A}$$

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 **Heißeleiter**. Ihr Widerstand nimmt bei Temperaturerhöhung ab. Wenige Halbleiterstoffe leiten dagegen in kaltem Zustand besser. Man nennt sie **Kaltleiter**. Ihr Widerstand nimmt bei Temperaturerhöhung zu. Auch der Widerstand von Metallen, z. B. Wolfram, nimmt mit Temperaturerhöhung zu. Der **Temperaturkoeffizient** α gibt die relative Widerstandsänderung je Grad an (**Tabelle 1**).

Der Temperaturkoeffizient α gibt an, um wie viel Ohm ein Widerstand von 1Ω größer oder kleiner wird, wenn die Temperatur um 1 K erhöht wird.

Temperaturen werden meist in Celsiusgraden gemessen, Temperaturdifferenzen in Kelvin¹ (K). Der Temperaturkoeffizient von Heißeleitern ist negativ, da ihr Widerstand mit zunehmender Temperatur abnimmt. Der Temperaturkoeffizient von Kaltleitern ist positiv, da ihr Widerstand mit zunehmender Temperatur zunimmt.

Die Widerstandsänderung ΔR bei R_1 ist vom Widerstand R_1 , dem Temperaturkoeffizienten α und der Temperaturänderung $\Delta \vartheta$ abhängig.

Bei Abkühlung von Leitern nimmt ihr Widerstand ab. Bei sehr tiefen Temperaturen haben einige Stoffe keinen Widerstand mehr. Sie sind **supraleitend** geworden. Supraleiter arbeiten z. B. bei 4 bis 39 Grad Kelvin .

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

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

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

$R_2 = R_1 + \Delta R$

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

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

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

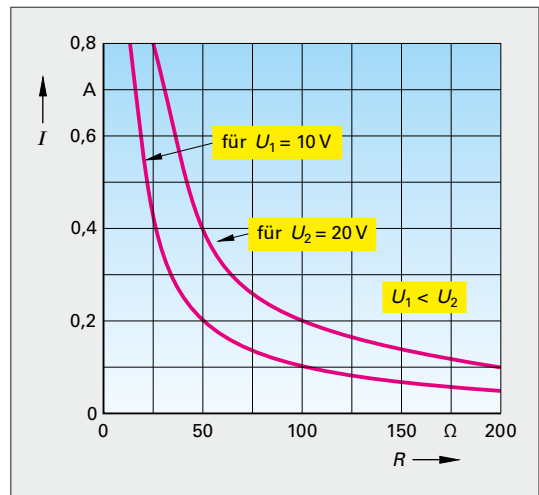


Bild 1: I als Funktion von R beim linearen Widerstand

Tabelle 1: Temperaturkoeffizient α in $1/\text{K}$ bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$

Kupfer	$3,9 \cdot 10^{-3}$	Nickelin	$0,15 \cdot 10^{-3}$
Aluminium	$4,0 \cdot 10^{-3}$	Manganin	$0,01 \cdot 10^{-3}$
Wolfram	$4,6 \cdot 10^{-3}$	Kohlenstoff	$-0,5 \cdot 10^{-3}$

Beispiel 2: Widerstandsänderung berechnen

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

Lösung

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

¹ Lord Kelvin, englischer Physiker, vor Erhebung in den Adelsstand William Thomson, 1824 bis 1907