



Bibliothek des technischen Wissens

Fachwissen Betriebs- und Antriebstechnik

Fachwissen der Elektroniker/in für Betriebstechnik
sowie für Maschinen- und Antriebstechnik

8. Auflage, erweiterte und überarbeitete Auflage

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

Europa-Nr.: 50015

Autoren von Fachwissen Betriebs- und Antriebstechnik

Hartmut Fritzsche	Dipl.-Ing.	Massen
Gregor D. Häberle	Dr.-Ing.	Tettnang
Heinz O. Häberle	Dipl.-Gewerbelehrer, VDE	Kressbronn
Siegfried Schmitt	staatl. geprüfter Techniker, Techn. Oberlehrer	Bad Bergzabern

Bildbearbeitung:

Zeichenbüro des Verlags Europa-Lehrmittel, 73760 Ostfildern

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.

8. Auflage 2018
Druck 5 4 3 2 1

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

ISBN 978-3-8085-5008-3

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

© 2018 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
<http://www.europa-lehrmittel.de>

Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald unter Verwendung eines Fotos der Firma Siemens AG und eines Autorenfotos im Umspannwerk der EnBW Energie Baden-Württemberg AG
Satz: rkt, 42799 Leichlingen, www.rktypo.com
Druck: M.P. Media-Print Informationstechnologie GmbH, 33100 Paderborn

Vorwort zur 8. Auflage

Die Elektrotechnik hat sich im Laufe der letzten Jahrzehnte von einer im Vergleich zum Maschinenbau mehr oder weniger wichtigen Hilfstechnik zur führenden Technik entwickelt. Diese Entwicklung wird aller Voraussicht nach auch weiter anhalten, wenn man an die Herausforderungen der Energiegewinnung, des Klimawandels und der Überbevölkerung von Teilen des Erdballs denkt. Deshalb wurde das Buch wie schon bei der vorherigen Auflage in Richtung auf Energiemanagement, Industrie 4.0 sowie Digitalisierung weiter ausgebaut. Die Hauptabschnitte enthalten

- 1 **Grundlagen** (Grundgrößen, Schaltungen von Zweipolen, Bezugspfeile),
- 2 **Elektrisches Feld** (Feldgrößen, Kapazität, kapazitive Blindleistung),
- 3 **Magnetisches Feld** (Feldgrößen, induktiver Blindwiderstand, Grundlagen des Transformators),
- 4 **Versorgung mit elektrischer Energie** (Wärmekraftwerke, regenerative Stromerzeugung, Stromtransport, Spannungsebenen, Umspannwerke),
- 5 **Verhalten von Transformatoren** (idealer Transformator, realer Transformator, Wirkungsgrad),
- 6 **Transformatoren im Netz** (Anschlusskennzeichnung, Kleintransformatoren, Messwandler, Einphasentransformatoren, Drehstromtransformatoren, Transformatoren für mehr als drei Phasen),
- 7 **Drehende elektrische Maschinen** (Betriebsarten, Bauformen, Schutzarten, Grundgleichungen),
- 8 **Maschinen mit bewegtem Magnetfeld** (Synchrongenerator, Synchronmotor, Gleichstrommotoren mit Magnetläufer, Asynchronmaschinen, Linearantriebe, Wechselstromwicklungen),
- 9 **Stromwendermaschinen** (Gleichstrommaschinen, Einphasen-Reihenschlussmotor, Repulsionsmotor, Kleinstmotoren mit Kommutierung, Getriebe für Kleinstmotoren),
- 10 **Umformer** (Motorgenerator, asynchrone Frequenzumformer, sonstige Umformer),
- 11 **Antriebstechnik** (Auswahl von Elektromotoren, Steuerung und Regelung, GRAFCET, Kleinststeuerungen, Speicherprogrammierbare Steuerungen, Komponenten für Motorsteuerung, Motorschutz, Stromrichter),
- 12 **Übertragungsnetze** (Niederspannungsnetze, Niederspannungs-Freileitungen, Mittelspannungsnetz, 110-kV-Netz, Höchstspannungsnetze, HGÜ, Beeinflussung der Netze, Oberschwingungen, Kompensation der Oberschwingungen, Regelung der Netzspannung),
- 13 **Maßnahmen für die Betriebssicherheit** (Arbeiten in elektrischen Anlagen, Schutzmaßnahmen, Elektromagnetische Verträglichkeit EMV, SSV-Systeme, Umweltbelastungen),
- 14 **Planung von elektrischen Anlagen** (Projektmanagement, Projektieren einer Gebäudeinstallation, Projektieren einer Maschinenausrüstung),
- 15 **Internet** (Internet-Kommunikation, Gefahren durch das Internet),
- 16 **Vertiefende Bereiche** (Theorie der Asynchronmaschine, weitere Drehstromwicklungen).

Neu aufgenommen wurden Trägheitsmomente bei Antrieben, Zeigerbilder bei symmetrischer Belastung von Dreiphasennetzen, Lithium-Solarspeicher zum Ausgleich schwankender Stromerzeugung, Verzerrungsströme elektrischer Verbrauchsmittel, Belastbarkeit von Leitungen und Kabeln bei Oberschwingungen, Leitungsberechnung bei Leitungen mit Oberschwingungen, inkrementale Wegmessung und Winkelmessung, Messen mit Zangen-Stromwandlern, Klimatisierung von Schaltschränken, Effizienz von elektrischen Antrieben (Mindestwirkungsgrade in den IEC-Klassen), Anwenden von Frequenzumrichtern und deren Vernetzung, Betrieb von Drehstrommotoren mit Stromrichtern (auch 87-Hz-Betrieb).

Überarbeitet und erweitert wurden Kraft und Ladungsträger im elektrischen Feld, Sensoren der Steuerungstechnik, analoge Sensoren, Laser-Scanner, Vision-Sensoren und Lichtschranken, Inhalte der Leistungsschilder, moderne Formen der Reluktanzmotoren (mit magnetischem Widerstand der Läuferbleche), Instandhaltung elektrischer Antriebe.

Didaktisch neu ist die Aufnahme der Antworten zu den im Buch gestellten Fragen auf die dem Buch beiliegende CD/DVD mit allen Bildern und vielen Tabellen. Auf diese kann auch mittels Freischaltcode über die EUROPATHEK zugegriffen werden.

In der **8. Auflage** richtet sich das Buch an alle, die sich mit den Lernfeldern der Elektroniker aus den Fachrichtungen Betriebstechnik sowie Maschinen- und Antriebstechnik auseinander zu setzen haben, nämlich Auszubildende der Berufe Elektroniker für Maschinen- und Antriebstechnik, Elektroniker für Betriebstechnik, Schüler von Berufsfachschulen und Berufskollegs entsprechender Schwerpunkte, Studierende von Fachschulen (Technikerschulen und Meisterschulen) sowie von Hochschulen und technischen Universitäten.

Autoren und Verlag danken für die wertvollen Benutzerhinweise und sind weiterhin für konstruktive Verbesserungsvorschläge dankbar. Diese können auch gerichtet sein an: lektorat@europa-lehrmittel.de.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen dieses Buches	8	4.5.6 Spannungsfall an Leitungen	84
Indizes und Zeichen für Formelzeichen dieses Buches	9	4.5.7 Leistungsverlust in Leitungen	87
Formelzeichen für drehende elektrische Maschinen	10	4.5.8 Strombelastbarkeit von Installationsleitungen	88
1 Grundlagen		4.5.9 Überstromschutz von Leitungen	91
1.1 Stromstärke, Widerstand, Spannung	11	4.5.10 Leitungsberechnung	93
1.2 Schaltungen von Zweipolen	14	4.5.11 Leitungsberechnung bei Oberschwingungen	94
1.3 Bezugspeile	16	4.6 Sensoren	97
1.4 Leistung, Arbeit, Energie, Wärme	18	4.6.1 Prinzip von Sensoren	97
2 Elektrisches Feld		4.6.2 Sensoren der Steuerungstechnik	97
2.1 Elektrische Ladung	24	4.6.3 Einsatzgebiete von Sensoren	98
2.2 Elektrische Feldstärke	25	4.6.4 Aufbau eines Sensors	98
2.3 Elektrische Flussdichte	26	4.6.5 Sensorelemente	98
2.4 Kapazität	26	4.6.6 Beispiele von Sensoren	100
2.5 Kapazitiver Blindwiderstand	26	4.6.7 Lichtschranken	103
2.5.1 Ladung und Stromstärke	26	4.6.8 Wegmessung, Winkelmessung	104
2.5.2 Kondensatorstrom bei Sinusspannung	27	4.7 Klimatisierung	106
2.5.3 Kapazitive Blindleistung	28	4.7.1 Funktion von Klimatisierungsgeräten	106
2.5.4 Kondensator als Blindwiderstand	28	4.7.2 Klimatisierung von Schaltschränken	107
2.6 Elektrisches Feld als Energiespeicher	29		
2.7 Gleichstrom-Schalten von Kondensatoren	29		
3 Magnetisches Feld		5 Verhalten von Transformatoren	
3.1 Arten magnetischer Stoffe	31	5.1 Idealer Transformator	109
3.2 Elektrische Durchflutung	32	5.2 Realer Transformator im Leerlauf	111
3.3 Magnetische Feldstärke und Flussdichte	33	5.3 Realer Transformator unter Last	113
3.4 Magnetischer Fluss und Verkettungsfluss	35	5.4 Ersatzschaltungen von Transformatoren	115
3.5 Lorentzkraft	36	5.5 Zeigerdiagramm des belasteten	
3.6 Induktion	37	Transformators	117
3.7 Induktiver Blindwiderstand	41	Kurzschlussstrom und Einschaltstrom	118
3.8 Magnetisches Feld als Energiespeicher	45	5.7 Wirkungsgrad und Arbeitsgrad von	
3.9 Gleichstrom-Schalten von Spulen	45	Transformatoren	120
3.10 Grundlagen des Transformators	47	Besondere Transformatoren	121
4 Versorgung mit elektrischer Energie		5.8 Spartransformator	121
4.1 Ströme in öffentlichen Netzen	50	5.8.1 Übertrager	122
4.1.1 Stromarten für die Stromversorgung	50	5.8.2 Elektronische Transformatoren	123
4.1.2 Erzeugen von Drehstrom	50		
4.1.3 Spannungen beim Drehstromnetz	51		
4.1.4 Schaltungen bei Drehstrom	52		
4.1.5 Leistungen bei Drehstrom	53		
4.1.6 Unsymmetrische Belastung bei Drehstrom	54		
4.2 Grundlagen der Stromversorgung	55		
4.3 Wärmekraftwerke	56		
4.3.1 Verbrennungskraftwerke	56		
4.3.2 Kernkraftwerke (Atomkraftwerke)	59		
4.4 Regenerative Stromerzeugung	61		
4.4.1 Wasserkraftwerke	61		
4.4.2 Regenerative thermische Stromerzeugung	62		
4.4.3 Windkraftwerke	64		
4.4.4 PV-Stromerzeugung	68		
4.4.5 Stromerzeugung mit Brennstoffzellen	71		
4.4.6 Ausgleich schwankender Stromerzeugung	73		
4.5 Stromtransport	76		
4.5.1 Zweck der Spannungstransformation	76		
4.5.2 Spannungsgebenden	76		
4.5.3 Umspannwerke	77		
4.5.4 Leitungen und Kabel	80		
4.5.5 Bemessungsstromstärke von Lasten	82		
6 Transformatoren im Netz			
6.1 Anschlusskennzeichnung			124
6.2 Kleintransformatoren			125
6.3 Lichtbogen-Schweißtransformatoren			130
6.4 Messwandler			132
6.4.1 Spannungswandler			132
6.4.2 Nicht induktive Spannungswandler			134
6.4.3 Stromwandler			134
6.4.4 Messen mit Zangen-Stromwandlern			138
6.5 Einphasentransformatoren für Drehstrom			140
6.5.1 V-Schaltung			140
6.5.2 Transformatorenengruppe			140
6.6 Drehstromtransformatoren			142
6.6.1 Allgemeines			142
6.6.2 Eisenkern			142
6.6.3 Wicklung			143
6.6.4 Ölkelles			145
6.7 Schaltungen von			
Drehstromtransformatoren			146
6.7.1 Schaltungen der Wicklungsstränge			146
6.7.2 Schaltgruppen			148
6.7.3 Parallelschalten von Transformatoren			149
6.7.4 Drehtransformator			151
6.7.5 Transformatoren für mehr als			
drei Phasen			152

7	Drehende elektrische Maschinen	
7.1	Einteilung	154
7.2	Isolierstoffklassen	155
7.3	Betriebsarten	156
7.3.1	Allgemeines	156
7.3.2	Dauerbetrieb S1	156
7.3.3	Kurzzeitbetrieb S2	156
7.3.4	Aussetzbetriebsarten	157
7.3.5	Ununterbrochene periodische Betriebsarten	158
7.4	Bauformen von elektrischen Maschinen	160
7.5	Effizienz von elektrischen Antrieben	161
7.5.1	Wirkungsgrade nach IEC 60034	161
7.5.2	Leistungsschild	162
7.6	Instandhaltung von elektrischen Antrieben	163
7.6.1	Maßnahmen	163
7.6.2	Elektrische Prüfungen	163
7.6.3	Mechanische Prüfungen	168
7.7	Schutzzonen IP	172
7.8	Grundgleichungen der drehenden elektrischen Maschinen	174
7.9	Anschlussbezeichnung von drehenden elektrischen Maschinen	175
8	Maschinen mit bewegtem Magnetfeld	
8.1	Erzeugung eines Drehfeldes	180
8.2	Drehstrom-Synchronmaschinen	183
8.2.1	Synchrongenerator	183
8.2.2	Synchronmotoren für Drehstrom	188
8.2.3	Reluktanzmotoren	190
8.3	Einphasen-Synchronmotoren	192
8.3.1	Einphasengeneratoren	192
8.3.2	Synchronmotoren für Einphasenwechselstrom	192
8.4	Gleichstrommotoren mit Magnetläufern	193
8.4.1	Arten der Schrittmotoren	193
8.4.2	Steuerschaltungen der Schrittmotoren	198
8.4.3	Betriebsverhalten der Schrittmotoren	198
8.4.4	EC-Motor	99
8.5	Maschinen mit Kurzschlussläufern	201
8.5.1	Aufbau des Kurzschlussläufers	201
8.5.2	Wirkungsweise des Asynchrongenerators	202
8.5.3	Wirkungsweise des Kurzschlussläufermotors	203
8.5.4	Kurzschlussläufermotoren für Einphasenwechselstrom	206
8.6	Schleifringläufermaschinen	208
8.7	Sonstige Motoren mit bewegtem Magnetfeld	211
8.7.1	Wirbelstromläufermotoren	211
8.7.2	Polumschaltbare Motoren	212
8.7.3	Spannungsumschaltbare Motoren	214
8.8	Linearantriebe	214
8.8.1	Linearantrieb mit drehendem Motor	214
8.8.2	Wechselstrom-Linearmotoren	215
8.8.3	Linearschrittmotoren	217
8.8.4	Schwingankermotoren	218
8.8.5	Piezomotoren	218
8.8.6	Gleichstrom-Linearmotoren	220
8.9	Wechselstromwicklungen	221
8.9.1	Drehstromwicklungen	221
9	Stromwendermaschinen	
9.1	Aufbau von Gleichstrommaschinen	230
9.2	Wirkungsweise von Gleichstrommaschinen	232
9.2.1	Kurvenform der induzierten Spannung	232
9.2.2	Wirkungsweise bei der Spannungserzeugung	233
9.2.3	Fremderrege Gleichstrommaschine	233
9.2.4	Weitere Gleichstrommaschinen	234
9.3	Ankerquerfeld	236
9.3.1	Entstehung des Ankerquerfeldes	236
9.3.2	Wendepole	237
9.3.3	Kompensationswicklung	237
9.3.4	Querfeldgeneratoren	239
9.3.5	Ankerquerfeld beim Motor	239
9.4	Gleichstrommaschine als Motor	240
9.4.1	Wirkung des Ankers	240
9.4.2	Drehmoment und Anzugsstrom	241
9.4.3	Einstellen der Umdrehungsfrequenz	242
9.5	Schaltungen von Gleichstrommotoren	242
9.5.1	Fremderreger Motor	243
9.5.2	Reihenschlussmotor	244
9.6	Stromwendermotoren für Wechselstrom	245
9.6.1	Aufbau	245
9.6.2	Einphasen-Reihenschlussmotor	246
9.6.3	Repulsionsmotor	247
9.6.4	Linearmotor mit Stromwender	248
9.6.5	Stromwendermotor für Drehstrom	248
9.7	Fehler bei Stromwendermaschinen	249
9.8	Wicklungen von Stromwendermotoren	251
9.8.1	Ständerwicklungen von Gleichstrommaschinen	251
9.8.2	Ankerwicklung von Stromwendermaschinen	251
9.9	Kleinstmotoren mit Kommutierung	255
9.9.1	Mechanische Kommutierung	255
9.9.2	Elektronische Kommutierung	256
9.9.3	Getriebe für Kleinstmotoren	257
10	Umformer	
10.1	Motorgenerator	258
10.2	Asynchrone Frequenzumformer	258
10.3	Sonstige Umformer	259
11	Antriebstechnik	
11.1	Steuern und Regeln	260
11.1.1	Steuern	260
11.1.2	Regeln	260
11.1.3	Schaltende Regeleinrichtungen	262
11.1.4	Stetige Regeleinrichtungen	262
11.1.5	Kennzeichnung der Regelstrecke	263
11.1.6	Steuern und Regeln mit dem PC	264
11.1.7	Regeln mit Digitalregler	265
11.1.8	GRAFCET	267
11.2	Kleinsteuerungen	270
11.2.1	Elemente von LOGO!	270
11.2.2	Bearbeiten eines LOGO!-Projekts	272
11.2.3	Erweiterter Ausbau eines LOGO!	272

11.3	Speicherprogrammierbare Steuerungen	274	12.2.1	Netzaufbau	358
11.3.1	SPS-Grundlagen	274	12.2.2	Niederspannungs-Freileitungen	360
11.3.2	Funktionen einer SPS	275	12.2.3	Tragmaste	360
11.3.3	Ablaufsteuerungen mit SPS	277	12.2.4	Endmaste	363
11.3.4	Bussysteme für SPS	278	12.2.5	Abspannmaste	364
11.3.5	Eingabe-Ausgabe-Einheiten	279	12.2.6	Abgespannte Maste	364
11.3.6	Fehlersichere Kommunikation	280	12.2.7	Winkelmaste	364
11.4	Komponenten für Steuerungen	282	12.2.8	Winkeltragmaste	365
11.4.1	Nockenschalter	282	12.2.9	Sondermaste	365
11.4.2	Schütze	283	12.3	Hausanschluss	366
11.4.3	Hilfsstromkreise	286	12.3.1	Ausführung des Hausanschlusses	366
11.4.4	Maschinensicherheit	289	12.3.2	Bemessen der Leitungen bis zu den Stromkreisverteilern	367
11.4.5	Halbleiterbauelemente	292	12.4	Mittelspannungsnetze	370
11.4.6	Halbleiterbaugruppen	298	12.4.1	Bemessungsspannung und Aufgaben	370
11.5	Anlassen von Drehfeldmotoren	302	12.4.2	Netzaufbau	370
11.5.1	Allgemeine Bestimmungen	302	12.4.3	Elektrische Wirkung auf die Umgebung	371
11.5.2	Anlassschaltungen für Drehstrom-Kurzschlussläufermotoren	302	12.5	Hochspannungsnetze	372
11.5.3	Einfache Schützschaltungen	304	12.5.1	Bemessungsspannung und Aufgaben	372
11.5.4	Polumschaltungen	307	12.5.2	Netzaufbau beim 110-kV-Netz	372
11.5.5	Stern-Dreieck-Schützschaltungen	309	12.5.3	Netzaufbau der Höchstspannungsnetze	374
11.5.6	Anlassschaltungen für Schleifringläufermotoren	310	12.5.4	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung HGÜ	375
11.5.7	Allgemeine Schützschaltung	311	12.5.5	Erdungsanlagen	377
11.5.8	Elektronische Motorstarter	312	12.5.6	Isolatoren	379
11.6	Anlassberechnung beim Schleifringläufermotor	315	12.5.7	Armaturen	381
11.7	Bremsen von Drehstrommotoren	316	12.6	Beeinflussung der Netze	384
11.7.1	Mechanisches Bremsen mit elektrischer Steuerung	316	12.6.1	Blindleistung	384
11.7.2	Elektrisches Bremsen	317	12.6.2	Oberschwingungen	387
11.7.3	Verlustwärme beim Anlauf und Bremsen	320	12.6.3	Stromqualität	390
11.8	Steuerung von Stromwendermotoren	321	12.6.4	Kompensation von Oberschwingungen	391
11.9	Motorschutz	325	12.6.5	Regelung der Netzspannung	392
11.10	Stromrichter zur Drehzahlsteuerung	327	12.6.6	Regelung der Netzfrequenz	395
11.10.1	Drehzahlsteuerung beim Universalmotor	327	12.7	Intelligente Stromnetze (Smart Grids)	396
11.10.2	Drehzahlsteuerung beim fremderregten Motor	328	12.8	Messen von Oberschwingungen	397
11.10.3	Drehzahlsteuerung mit Gleichstromsteller	330	13	Maßnahmen für die Betriebssicherheit	
11.10.4	Umrichter	331	13.1	Sicherheit beim Arbeiten in elektrischen Anlagen	399
11.10.5	Stromzwischenkreis-Umrichter	333	13.2	Systemformen im Niederspannungsnetz	403
11.10.6	Umrichter mit Pulsamplitudenmodulation	333	13.3	Schutzmaßnahmen	05
11.10.7	Umrichter mit Pulsweitenmodulation	335	13.3.1	Berührungsarten	405
11.10.8	Direktumrichter	336	13.3.2	Stromgefährdung	405
11.10.9	Drehstrommotor mit Stromrichter (87-Hz-Betrieb)	337	13.3.3	Basissschutz	406
11.10.10	Frequenzumrichter anwenden	338	13.3.4	Maßnahmen für zugleich Basischutz und Fehlerschutz	406
11.10.11	Untersynchrone Stromrichterkaskade	339	13.3.5	Fehlerschutz	407
11.10.12	Doppelt speisender Asynchrongenerator	341	13.3.6	Zusätzlicher Schutz	412
11.11	Servomotoren	343	13.3.7	Schutz in elektrotechnisch überwachten Anlagen	413
11.11.1	Anforderungen an Servomotoren	343	13.3.8	Schutzleiter und Schutzzential-Ausgleichsleiter	414
11.11.2	Drehstrommotoren als Servomotoren	344	13.4	Prüfungen	415
11.11.3	Gleichstrommotoren als Servomotoren	347	13.4.1	Schutzklassen der Betriebsmittel	415
11.12	Hybridantriebe	349	13.4.2	Betätigungslemente in der Nähe berührungsgefährlicher Teile	415
11.13	Antriebssysteme betreiben	352	13.4.3	Prüfungen der Elektroinstallation	416
11.13.1	Informationsbeschaffung	352	13.4.4	Durchführung der Prüfungen	421
11.13.2	Auftragsplanung	352	13.5	Elektromagnetische Verträglichkeit EMV	423
11.13.3	Auftragsdurchführung	353	13.6	SSV-Anlagen	430
11.13.4	Auftragskontrolle	356	13.7	Elektrische Ausrüstung von Maschinen	435
12	Übertragungsnetze		13.7.1	Anwendungsbereich	435
12.1	Netzformen	357			
12.2	Niederspannungsnetze	358			

13.7.2	Begriffe	435	14.5.6	EU-Maschinenrichtlinie	458
13.7.3	Allgemeine Anforderungen	435	14.5.7	RFID-Transponder	459
13.7.4	Netzanschlüsse, Trenneinrichtung und Schalter	436	15	Internet	
13.7.5	Schutz gegen elektrischen Schlag	437	15.1	Internet-Kommunikation	460
13.7.6	Schutz der Ausrüstung	437	15.2	Gefahren durch das Internet	461
13.7.7	Potenzialausgleich	439	15.3	Firewall-Systeme	462
13.7.8	Steuerstromkreise	439	16	Vertiefende Bereiche	
13.7.9	Bedienerschnittstellen	441	16.1	Theorie der Asynchronmaschine	463
13.7.10	Anordnung der Schaltgeräte	441	16.1.1	Oberschwingungen	463
13.7.11	Leiter, Leitungen, Kabel	441	16.1.2	Ersatzschaltung der Asynchronmaschine	465
13.7.12	Verdrahtungstechnik	441	16.1.3	Ortskurve	467
13.7.13	Sonstige Anforderungen	442	16.1.4	Leerlaufversuch und Kurzschlussversuch	468
13.8	Umweltbelastungen der Elektrotechnik	443	16.1.5	Auswertung der Ortskurve	469
14	Planung von elektrischen Anlagen		16.1.6	Rechengang beim Kreisdiagramm	471
14.1	Projektmanagement	445	16.2	Weitere Dreiphasenwicklungen	473
14.2	Lastenheft, Pflichtenheft	446	16.2.1	Einschichtwicklungen	473
14.3	Projektende	446	16.2.2	Zweischichtwicklungen	474
14.4	Projektieren einer Gebäudeinstallation	447	16.2.3	Polumschaltbare Wicklungen	476
14.4.1	Planungsgrundlagen	447	17	Anhang	
14.4.2	Leitungsführung in Wohngebäuden	449	17.1	Größen und Einheiten	477
14.4.3	Kommunikationsanlagen	450	17.2	Wichtige Normen	479
14.5	Projektieren einer Maschinenausrüstung	451	17.3	Teile von VDE 0100	482
14.5.1	Auswahl eines Elektromotors	451	17.4	Kurzformen von Fachbegriffen	484
14.5.2	Stromversorgung, Schutzeinrichtungen	453		Literaturverzeichnis	486
14.5.3	Steuerleitungen	454	Sachwortverzeichnis	487	
14.5.4	Schaltungsaufbau	455	Firmen und Dienststellen	495	
14.5.5	Weg zur sicheren Maschine	456			

Bildquellenverzeichnis

Die meisten Bilder entstammen aus dem Arbeitsumfeld der Autoren. Ergänzend hierzu haben die nachfolgend aufgeführten Unternehmen und Institutionen die bildliche Ausgestaltung unterstützt. Dabei sind für diese alle Rechte vorbehalten. Kein Teil darf ohne vorherige schriftliche Genehmigung weitergegeben, in einem Datensystem gespeichert oder in irgendeiner Form, weder elektronisch noch mechanisch, durch Fotokopie, Aufnahme noch durch andere Art übertragen werden.

Die Anschriften weiterer Firmen, die mit Bildern dieses Buch unterstützt haben, sind im Verzeichnis „Firmen und Dienststellen“ am Buchende aufgeführt.

Die Autoren danken dafür allen Beteiligten sehr herzlich.

Adaptaflex GmbH	64546 Mörfelden-Walldorf	www.adaptaflex.com	436-1
ADDI-DATA Deutschland	77836 Rheinmünster	www.msx-box.com	264-4
Danfoss GmbH	76073 Offenbach	www.danfoss.com	329-3, 337-1
Dehn + Söhne GmbH	92306 Neumarkt	www.dehn.de	402-3
Dr. F. Faulhaber GmbH	71101 Schönaich	www.faulhaber.com	219-2, 219-4
Driescher KG	41844 Wegberg	www.driescher-wegberg.de	79-3
Eaton Industries	53115 Bonn	www.moeller.net	285-2
EnBW AG	76131 Karlsruhe	www.enbw.com	77-1-2-3
Fluke Deutschland GmbH	79286 Glottental	www.fluke.de	133-1, 135-1
Gossen Metrawatt GmbH	90449 Nürnberg	www.gossenmetrawatt.com	137-1, 418-2
Gustav Hensel GmbH	57368 Lennestadt	www.hensel-electric.de	447-2
Hager Tehalit GmbH	66440 Blieskastel	www.hager.de	366-1
Hauff-Technik GmbH	89542 Herbrechtingen	www.hauff-technik.de	367-1-2
KYOCERA Deutschland	73730 Esslingen	www.kyocera.com	69-2
maxon motor ag	6072 Sachsel/OW Schweiz	www.maxonmotor.com	255-2-3, 256-1, 257-1-2-3
OBO-Bettermann GmbH		www.obo.de	378-2
Siemens AG	80333 München	www.siemens.com	56-2, 57-3, 160-1, 184-1, 191-1-2, 266-1, 270-1, 376-1, 201-3, 350-4
ZF-Friedrichshafen	88046 Friedrichshafen	www.zf.com	

Formelzeichen dieses Buches					
Formel-zeichen	Bedeutung	Formel-zeichen	Bedeutung	Formel-zeichen	Bedeutung
Kleinbuchstaben		Großbuchstaben		Griechische Kleinbuchstaben	
<i>a</i>	Beschleunigung	<i>A</i>	1. Fläche, Querschnitt 2. Ablenkungskoeffizient 3. Dämpfungsmaß	α (alpha)	1. Winkel 2. Temperaturkoeffizient 3. Polbedeckungsfaktor 4. Zündwinkel
<i>b</i>	1. Breite, 2. Ladungsträger- beweglichkeit	<i>B</i>	1. Magnetische Flussdichte 2. Blindleitwert 3. Gleichstromverhältnis	β (beta)	1. Winkel 2. Kurzschluss-Strom- verstärkungsfaktor
<i>c</i>	1. spez. Wärmekapazität 2. elektrochemisches Äquivalent 3. Ausbreitungs- geschwindigkeit von Wellen	<i>C</i>	1. Kapazität 2. Wärmekapazität 3. Konstante	γ (gamma)	1. Winkel 2. Leitfähigkeit
<i>d</i>	1. Durchmesser 2. Abstand 3. Verlustfaktor	<i>D</i>	1. Elektrische Flussdichte 2. Dämpfungsfaktor	δ (delta)	Verlustwinkel
<i>e</i>	Elementarladung	<i>E</i>	Elektrische Feldstärke	ε_0	Elektrische Feldkonstante
<i>f</i>	Frequenz	<i>F</i>	1. Kraft, 2. Faktor, 3. Fehler	ε (epsilon)	Permittivität
<i>g</i>	1. Schwerebeschleunigung (Ortskoeffizient) 2. Tastgrad	<i>G</i>	1. Leitwert, Wirkleitwert 2. Verstärkungsmaß	ζ (zeta)	Arbeitsgrad, Nutzungsgrad
<i>h</i>	Höhe	<i>H</i>	Magnetische Feldstärke	η (eta)	Wirkungsgrad
<i>i</i>	zeitabhängige Stromstärke	<i>I</i>	Stromstärke	ϑ (theta)	Temperatur in °C
<i>k</i>	1. Faktor, z. B. für Wicklungs- angabe 2. allgem. Konstante	<i>J</i>	1. Stromdichte 2. Trägheitsmoment	λ (lambda)	Wellenlänge
<i>l</i>	1. Länge, 2. Abstand	<i>K</i>	1. Konstante 2. Kopplungsfaktor 3. Lamellenzahl	μ_0	Magnetische Feldkonstante
<i>m</i>	1. Masse 2. Momentverhältnis 3. Strangzahl 4. Zahl der Stufen	<i>L</i>	1. Induktivität 2. Pegel	μ (mu)	Permeabilität
<i>n</i>	1. Drehzahl, Umdrehungsfrequenz 2. Ganze Zahl 1, 2, 3 ...	<i>M</i>	Drehmoment, Kraftmoment, Moment (siehe auch <i>T</i>)	ν (nu)	Ordnungszahl
<i>p</i>	1. Polpaarzahl, 2. Druck 3. Leistungsverhältnis	<i>N</i>	1. Zahl, z.B. Windungszahl 2. Nutenzahl	π (pi)	Zahl 3,1415926...
<i>q</i>	Lochzahl	<i>P</i>	Leistung, Wirkleistung	ρ (rho)	1. spez. Widerstand 2. Dichte
<i>r</i>	1. Radius 2. differenzieller Widerstand	<i>Q</i>	1. Ladung, 2. Wärme 3. Blindleistung 4. Gütefaktor, Güte	σ (sigma)	Streufaktor
<i>s</i>	1. Strecke, Dicke 2. Siebfaktor 3. bezogener Schlupf	<i>R</i>	Wirkwiderstand	τ (tau)	1. Zeitkonstante 2. Teilung
<i>t</i>	Zeit	<i>S</i>	1. Scheinleistung 2. Steilheit 3. Schlupf (absolut)	φ (phi)	Winkel, insbesondere Phasenverschiebungswinkel
<i>u</i>	zeitabhängige Spannung	<i>T</i>	1. Periodendauer 2. Temperatur in K 3. Übertragungsfaktor 4. Drehmoment	ω (omega)	1. Winkelgeschwindigkeit 2. Kreisfrequenz
<i>ü</i>	Übersetzungsverhältnis	<i>U</i>	Spannung	Griechische Großbuchstaben	
<i>v</i>	Geschwindigkeit	<i>V</i>	1. Volumen 2. Verstärkungsfaktor 3. Verlustleistung	Δ (Delta)	Differenz z.B. Δn Schlupf
<i>w</i>	1. Energiedichte 2. Führungsgröße	<i>W</i>	1. Arbeit, 2. Energie 3. Spulenweite	Θ (Theta)	Durchflutung
<i>x</i>	Regelgröße	<i>X</i>	Blindwiderstand	Φ (Phi)	Magnetischer Fluss
<i>y</i>	1. Schritt 2. Stellgröße	<i>Y</i>	Scheinleitwert	Ψ (Psi)	1. Elektrischer Fluss 2. magn. Verkettungsfluss
<i>z</i>	ganze Zahl	<i>Z</i>	1. Impedanz, Scheinwiderstand 2. Wellenwiderstand	Ω (Omega)	Raumwinkel

Spezielle Formelzeichen werden gebildet, indem man an die Formelzeichen-Buchstaben einen Index oder mehrere Indizes anhängt oder sonstige Zeichen dazusetzt.

Indizes und Zeichen für Formelzeichen dieses Buches					
Index, Zeichen	Bedeutung	Index	Bedeutung	Index	Bedeutung
Ziffern, Zeichen					
0	1. Leerlauf 2. im Vakuum 3. Bezugsgröße	out	ausgangs-	H	1. Hysterese, 2. Hall-
1	1. Eingang 2. Reihenfolge	p	1. parallel, 2. Pause 3. Puls, 4. potenziell 5. Pol-, 6. Druck 7. Dehnungsspannung	K	1. Kopplung (Gegen-) 2. Kühlkörper 3. Kippen 4. Katode
2	1. Ausgang 2. Reihenfolge	q	Quer-	L	1. induktiv, 2. Last 3. Läufer-, 4. Laden 5. höchstzulässige Berührungsspannung 6. Lorentz-
3, 4, ...	Reihenfolge	r	1. in Reihe 2. relativ, bezogen 3. Anstiegs- 4. Resonanz	M	Mitkopplung
$\hat{\cdot}$, z. B. \hat{u}	Scheitelwert, Höchstwert	s	1. Sieb-, 2. Signal, 3. Serie 4. Synchron-, 5. in Wegrichtung 6. Stoß-, 7. Soll	N	1. Bemessungs- 2. Nutz- 3. Nut-
ζ , z. B. ζ	Tiefstwert, Kleinstwert	sch	Schritt-	Q	Quer-
$\hat{\cdot}$, z. B. \hat{u}	1. Spitze-Talwert 2. Schwingungsbreite	t	tief, unten	R	1. Rückwärts- (reward) 2. Wirkwiderstand 3. rechts 4. Regel- 5. rot
\prime , z. B. u'	1. bezogen auf, 2. Hinweis, 3. Ableitung	th	thermisch, Wärme-	Str	Strang-
Δ	in Dreieckschaltung	tot	total, gesamt	T	1. Transformator 2. Träger- 3. Spur (track)
Y	in Sternschaltung	u	1. Spannungs- 2. Umdrehung	U	Umgebung
Ziffern, Zeichen					
a	1. Abschalten 2. Ausgang, 3. außen 4. Abfall, 5. Anker	v	1. Vor-, 2. Verlust	V	1. Spannungsmesser 2. Verstärkungs-
ab	abgegeben, siehe out	w	1. Wirk-, wirksam 2. Führungsgröße 3. Wellen, 4. Wicklungs-	W	Wirbel
auf	aufgenommen, siehe in	x	1. unbekannte Größe 2. in x-Richtung	X	am X-Eingang
b	1. Betrieb-, 2. Blind-, 3. Bit-	y	1. Stellgröße 2. in y-Richtung	Y	1. am Y-Eingang 2. in Sternschaltung
c	1. Grenz- (cut-off) 2. Form- (crest)	z	Zonen-	Z	1. Zener- 2. Zünd 3. zulässig
d	1. Gleichstrom-, 2. Dauer-, 3. Zonen-, 4. Dämpfung	zu	zugeführt, siehe in		
e	1. Eingang, 3. Empfang			Großbuchstaben	
eff	Effektivwert	A	1. Strommesser 2. Anker- 3. Anzug, Ablauf 4. Anlagenerdung	AC	1. Strommesser 2. Anker- 3. Anzug, Ablauf 4. Anlagenerdung
f	Frequenz	B	1. Basis 2. Betriebserdung (Netz) 3. Bau-	DC	1. Wechselstrom
ges	Gesamt-	C	1. Kollektor 2. kapazitiv 3. Takt	E	1. Drain
h	hoch, oben	D	1. Basis	DC	2. Gleichstrom
i	1. innen, 3. Strom-, 5. ist-,	E	1. Emitter, 2. Entladen 3. Erde	F	1. Drain
in	2. induziert	F	1. Vorwärts- (forward) 2. Fehler	G	2. Gleichstrom
j	eingangs-	G	1. Gate, 2. Gewicht 3. Glättung		
Sperrschicht (von junction)				Griechische Kleinbuchstaben	
k	1. Kurzschluss- 2. kinetisch			α (alpha)	in Richtung vom Winkel α
m	1. magnetisch 2. Mittelwert 3. Messwert 4. Maschine			μ (mu)	Magnetisierung
mec	mechanisch			σ (sigma)	Streu-
max	maximal, höchstens			φ (phi)	Phasenverschiebung betrifftend
min	minimal, mindestens			Griechische Großbuchstaben	
n, nom	Nenn-			Δ (Delta)	eine Differenz betreffend

Die Indizes können kombiniert werden, z. B. bei U_{CE} für Kollektor-Emitterspannung. Indizes, die aus mehreren Buchstaben bestehen, können bis auf den Anfangsbuchstaben gekürzt werden, wenn keine Missverständnisse zu befürchten sind. Zur Kennzeichnung von Werkstoffen können die Symbole für das Material verwendet werden, z. B. P_{vCu} oder V_{Cu} für Kupferverlustleistung.

Formelzeichen für drehende elektrische Maschinen <i>Formula Symbols for Rotating Electric Machines DIN EN 60027-4</i>					
Größe (im Buch stellenweise angewendet)	Formel- zeichen bisher	Formelzeichen		Einheit, Einheiten- zeichen	
		Vorzugs- zeichen	Ausweich- zeichen		
Stromstärken und verwandte Größen					
Bemessungsstrom	I_N	I_{rat}	I_N	Ampere, A	
Nennstrom ¹	I_n	I_n oder I_{nom}	–		
Dauerkurzschlussstrom	I_{kd}	I_k	I_{SC}		
Stoßkurzschlussstrom	I_s	\hat{I}_k	\hat{I}_{SC}		
Stoßkurzschlusswechselstrom	i_s	I_{k0}	I_{SCO}		
transienter Strom (kurzzeitiger Strom)	i	I_k'	I_{SC}'		
subtransienter Strom (sehr kurzzeitiger Strom)	i_s	I_k''	I_{SC}''		
Strombelag	I'	A	entfällt		
Spannungen und verwandte Größen					
Bemessungsspannung	U_N	U_{rat}	U_N	Volt, V	
Nennspannung ¹	U_n	entfällt	entfällt		
Induzierte Spannung	U_i	U_g			
Leerlaufspannung	U_0	U_0			
Leistungen und verwandte Größen					
Bemessungsleistung	P_N	P_{rat}	P_N	Watt, W	
Bemessungsscheinleistung	S_N	S_{rat}	S_N	Voltampere, VA	
Nennleistung	P_n	P_n oder P_{nom}	entfällt	Watt, W eins (keine Einheit)	
Eingangsleistung	P_1 oder P_a	P_{in}			
Ausgangsleistung	P_2 oder P_a	P_{out}			
mechanische Leistung	P	P_{mec}			
Leistungsfaktor	$\cos \varphi$	λ (Lambda)			
Wirkfaktor	–	$\cos \varphi$			
Drehmomente					
Drehmoment, Kraftmoment	M	T	M	Newton- meter, Nm	
Nennmoment	M_n	entfällt	entfällt		
Bemessungsmoment	M_N	T_{rat}	M_{rat}		
Kippdrehmoment	M_K	T_b	M_b		
Haltemoment	M_H	T_H	M_H		
Sattelmoment	M_S	T_u	M_u		
Anzugsmoment	M_A	T_l	M_l		

¹ nom von nominal = Nenn-, rat von rated = bewertet

T von torque = Drehmoment, Kraftmoment

Wirkfaktor = Kosinus der Grundschwingung (ohne Oberschwingungen)

Leistungsfaktor = Verhältnis Wirkleistung zu Scheinleistung (mit Oberschwingungen)

1 Grundlagen

1.1 Stromstärke, Widerstand, Spannung

Zum Verständnis der Automatisierungstechnik, der elektrischen Antriebe und der Energieverteilung sind Grundkenntnisse über den elektrischen Strom erforderlich.

Der elektrische Strom kann nur in einem geschlossenen Stromkreis fließen (Bild 1).

Die Stromrichtung ist festgelegt vom Pluspol des Erzeugers durch den Verbraucher zum Minuspol des Erzeugers und von dort zum Pluspol des Erzeugers zurück.

Die Stromstärke hat die *Einheit* Ampere (A), benannt nach Ampère (sprich: Ampähr), franz. Physiker, 1775 bis 1836. Sie wird durch einen Strommesser gemessen, der in den Stromweg geschaltet wird (Bild 1). Die Stromstärke hat das Formelzeichen I .

Kurzschreibweise: $[I] = A$

Sprich: Einheit der Stromstärke I ist das Ampere A. Man unterscheidet mehrere *Stromarten*. *Gleichstrom* (Kurzform DC, von Direct Current) ist ein Strom, der dauernd in gleicher Richtung und mit gleicher Stärke fließt (Bild 2). *Wechselstrom* (Kurzform AC, von Alternating Current) ist ein elektrischer Strom, der periodisch seine Richtung und seine Stärke ändert (Bild 3).

Mischstrom (Kurzform UC, von Universal Current) ist ein Strom mit einem Gleichstromanteil und einem Wechselstromanteil (Bild 4).

Bei elektrischen Maschinen wird auch dann von Gleichstrom gesprochen, wenn ein Mischstrom mit einem *kleinen* Wechselstromanteil vorliegt, z. B. bei einem Gleichstromgenerator.

In der Energietechnik ist vor allem ein Wechselstrom von Bedeutung, bei dem die zeitabhängige Darstellung der Stromstärke eine Sinuslinie ist (Bild 3). Man spricht da auch von einem *Sinusstrom*.

Einphasenwechselstrom ist die genaue Bezeichnung für einen einzigen Sinusstrom, z. B. aus der Steckdose eines Beleuchtungsstromkreises in der Wohnung. *Dreiphasenwechselstrom* (Drehstrom) besteht aus drei derartigen Einphasenwechselströmen (Kurzform 3 AC, Abschnitt 4.1.2).

Beim Wechselstrom nennt man die Zeit von einem Nulldurchgang bis zum nächsten, gleichartigen Nulldurchgang *Periodendauer*. Das ist die Zeit für eine vollständige Schwingung (Bild 3). Der Kehrwert der Periodendauer heißt *Frequenz*.

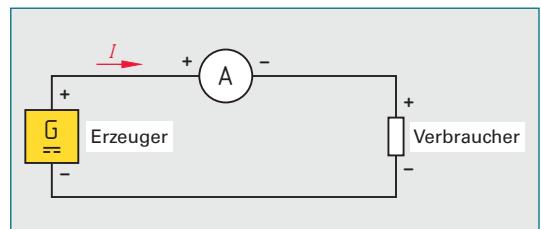


Bild 1: Strommessung in einem Stromkreis

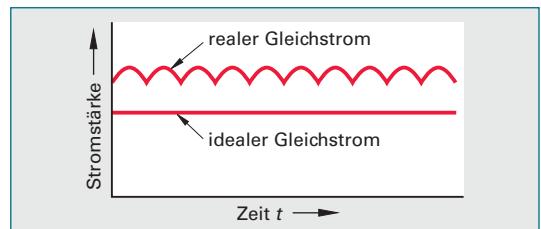


Bild 2: Gleichstrom DC

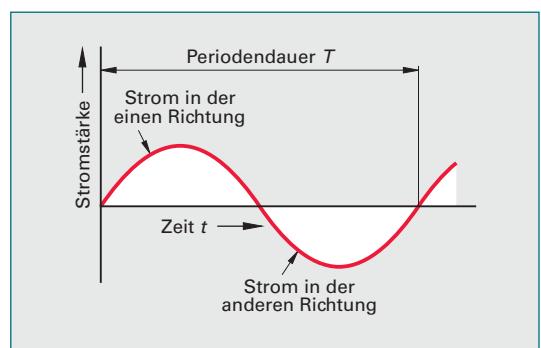


Bild 3: Wechselstrom (Sinusstrom)

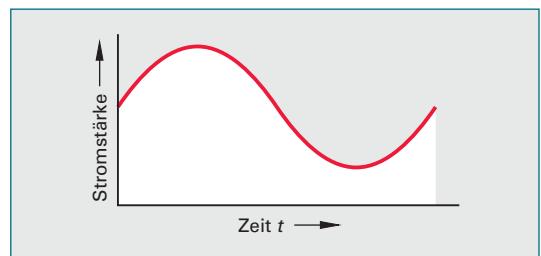


Bild 4: Mischstrom UC

Frequenz	
f	Frequenz
T	Periodendauer

$$[f] = \text{Hz}$$

$$f = \frac{1}{T}$$

1

Die Einheit der Frequenz ist das Hertz (Hz), benannt nach Hertz, deutscher Physiker, 1857 bis 1894. Diese Einheit gilt jedoch nur im deutschen Sprachraum. Sonst wird c/s bzw. cps (cycles per second = Umdrehungen je Sekunde) verwendet.

Beispiel 1:

Die Periodendauer eines Sinusstromes beträgt 20 ms. Wie groß ist die Frequenz in Hz und in c/s?

Lösung:

$$f = 1/T = 1/20 \text{ ms} = 0,05 \text{ kHz} = 50 \text{ Hz} = 50 \text{ c/s}$$

Stromdichte ist der Quotient Stromstärke durch Querschnittsfläche. Bei den Transformatoren und elektrischen Maschinen verwendet man für die Stromdichte die Einheit A/mm².

J Stromdichte
I Stromstärke [J] = A/mm²
A Querschnittsfläche

Stromdichte

$$J = \frac{I}{A}$$

1

Beispiel 2:

Bei einem Transformator beträgt die Stromstärke 25 A. Die zulässige Stromdichte beträgt in der vorgesehenen Bauweise (Ölkühlung) 2,5 A/mm². Wie groß muss der Wicklungsquerschnitt sein?

Lösung:

$$J = I/A \Rightarrow A = I/J = 25 \text{ A}/(2,5 \text{ A/mm}^2) = 10 \text{ mm}^2$$

Jedes Material setzt dem elektrischen Strom einen *Widerstand* entgegen. Dieser Widerstand ist umso größer, je kleiner der *Leitwert* des Materials ist. Die Eigenschaft des großen oder kleinen Leitvermögens kann also durch den Widerstand *oder* den Leitwert ausgedrückt werden. Die Einheit des Widerstandes ist das Ohm (Ω , sprich: Ohm), benannt nach Ohm, deutscher Physiker, 1787 bis 1854. Die Einheit des Leitwertes ist das Siemens (S), benannt nach Siemens, deutscher Ingenieur, 1816 bis 1892. Das Wort Widerstand kann die physikalische Größe „Widerstand“ bedeuten, aber auch das Bauelement Widerstand. Für die physikalische Größe „Widerstand“ sagen wir im Zweifelsfall *Resistanz* oder *Widerstandswert*. Die Resistenz hat das Formelzeichen R , der Leitwert hat das Formelzeichen G .

R Widerstand (Resistanz) [R] = Ω
G Leitwert [G] = S

Widerstand

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

2

Beispiel 3:

Die Wicklung eines Kleintransformators hat einen Widerstand von 0,5 Ω . Wie groß ist der Leitwert?

Lösung:

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

Der Widerstand eines Drahtes, z. B. von einer Wicklung, kann berechnet werden, wenn Material und Abmessungen des Drahtes bekannt sind. Dazu müssen die *Leitfähigkeit* oder der *spezifische Widerstand* des Materials aus einer Tabelle entnommen werden (**Tabelle 1**).

Tabelle 1: Leitfähigkeit und spezifischer Widerstand

Werkstoff	Leitfähigkeit γ in $\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$	Spezifischer Widerstand ϱ in $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$
Silber	60	0,0167
Kupfer	56	0,0178
Aluminium	36	0,0278
Nickelin (CuNi 30 Mn)	2,5	0,4
Konstantan (CuNi 44)	2,04	0,49
Kohle	0,015	65

Die Werte sind gerundet und gelten für 20 °C

Leiterwiderstand

$$R = \frac{l}{\gamma \cdot A} \quad 3$$

$$\varrho = \frac{1}{\gamma} \quad 4$$

$$R = \frac{\varrho \cdot l}{A} \quad 4$$

R Widerstand

l Leiterlänge

A Querschnitt

γ Leitfähigkeit (γ griech. Kleinbuchstabe Gamma)

ϱ spezifischer Widerstand (ϱ griech. Kleinbuchstabe Rho)

An Stelle von γ wird auch das κ (griech Kleinbuchstabe Kappa) verwendet.

Beispiel 4:

Für eine Wicklung sind 30 m Kupferdraht mit 0,5 mm² erforderlich. Wie groß ist der Wicklungswiderstand?

Lösung:

$$R = \frac{l}{\gamma \cdot A} = \frac{30 \text{ m}}{56 \text{ m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2) \cdot 0,5 \text{ mm}^2} = 1,07 \Omega$$

Der Widerstand hängt von der Temperatur ab. Der mit den Werten von Tabelle 1 errechnete Widerstand gilt für eine Temperatur vom 20 °C. Bei Abweichungen von dieser Temperatur erhält man die Widerstandsänderung mithilfe des *Temperaturkoeffizienten* des betreffenden Materials.

Bei Kupfer ist $\alpha_{Cu} = 0,0039 \text{ 1/K}$ und bei Aluminium $\alpha_{Al} = 0,0038 \text{ 1/K}$.

ΔR Widerstandsänderung (Δ griech. Großbuchstabe Delta)

α Temperaturkoeffizient

R_1 Kaltwiderstand bei 20 °C

$\Delta \vartheta$ Übertemperatur über 20 °C (ϑ griech. Kleinbuchstabe Theta)

R_2 Warmwiderstand

$$\Delta R = \alpha \cdot R_1 \cdot \Delta \vartheta \quad 5$$

$$R_2 = R_1 + \Delta R \quad 6$$

$$R_2 = R_1 (1 + \alpha \cdot \Delta \vartheta) \quad 7$$

Unterschiede von Temperaturen, z.B. bei $\Delta \vartheta$ der Übertemperatur, haben an Stelle der berechneten Einheit nach Norm vereinbart die Einheit Kelvin (K), z.B. 25 °C – 20 °C = 5 °C = 5 K. Deshalb hat der Temperaturkoeffizient die Einheit 1/K.

Beispiel 1:

Eine Kupferwicklung hat bei Raumtemperatur von 20 °C einen Widerstand von 0,5 Ω. Im Betrieb erreicht die Wicklung eine Temperatur von 110 °C. Wie groß ist nun der Widerstand?

Lösung:

$$\Delta\vartheta = 110^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 90\text{ K}$$

$$\Delta R = \alpha \cdot R_1 \cdot \Delta\vartheta \\ = 0,0039 \text{ 1/K} \cdot 0,5 \text{ } \Omega \cdot 90 \text{ K} = \mathbf{0,176 \Omega}$$

$$R_2 = R_1 + \Delta R = 0,5 \text{ } \Omega + 0,176 \text{ } \Omega \\ = 0,676 \text{ } \Omega \approx \mathbf{0,68 \Omega}$$

Die elektrische Spannung bewirkt, dass durch einen Widerstand ein elektrischer Strom fließt. Die Spannung hat das Formelzeichen U und die Einheit Volt (V), benannt nach Volta, italienischer Physiker, 1745 bis 1827. Die Spannung wird mit einem Spannungsmesser gemessen. Dieser wird zwischen die Punkte der Schaltung geschaltet, zwischen denen die zu messende Spannung liegt (**Bild 1**).

Entsprechend zu den Stromarten unterscheidet man Gleichspannung, Wechselspannung und Mischspannung. Bei der Wechselspannung ist die *Sinusspannung* besonders verbreitet.

Das *Ohm'sche Gesetz* gibt den Zusammenhang zwischen Stromstärke, Spannung und Widerstand an. Dabei ist wichtig, dass es nur für zusammengehörige Größen gilt, z. B. nur für die Stromstärke, die Spannung und den Widerstand desselben Wicklungsteiles oder Bauelementes.

Ohm'sches Gesetz

Merkformel:

$$\mathbf{1} \quad I = \frac{U}{R}$$

$$\mathbf{2} \quad U = R \cdot I$$

I Stromdichte

$[I] = \text{A}$

U Spannung

[U] = V

R Widerstand (Resistanz)

[R] = Ω

Bei konstantem Widerstand besteht zwischen Stromstärke und Spannung ein linearer Zusammenhang (**Bild 2**). Widerstände mit dieser linearen $I(U)$ -Kennlinie nennt man *ohmsche Widerstände*.

Leiterabzweige

In Bild 1 sind die Leiter zum Spannungsmesser von den Leitern zum Widerstand abgezweigt. Derartige *Abzweigungen* sind in Schaltplänen sehr häufig. Nach DIN EN 61082 können sie verschiedenartig gezeichnet werden, obwohl sie elektrisch das Gleiche aussagen (**Bild 3**). Im Buch werden zur Gewöhnung, wie in der beruflichen Praxis, alle Arten angewendet, vor allem die Formen mit und ohne Punkt.

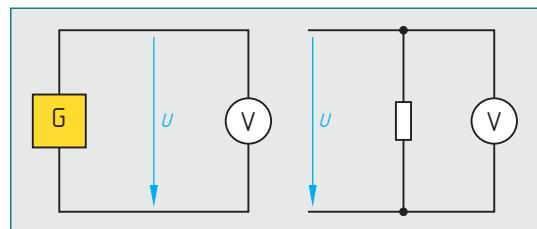


Bild 1: Messung der Spannung

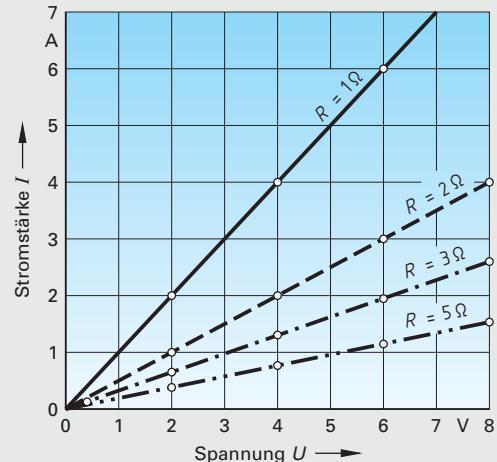


Bild 2: $I(U)$ -Kennlinie von ohmschen Widerständen

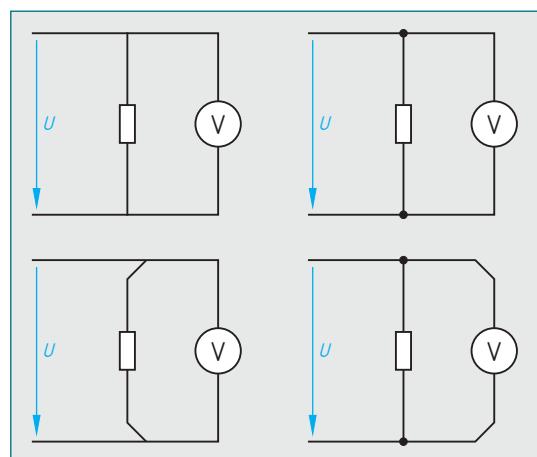


Bild 3: Darstellungen von Abzweigungen nach DIN EN 61082

Wiederholung und Vertiefung

- 1 Welche Einheit hat die elektrische Stromstärke?
- 2 Was versteht man unter Einphasenwechselstrom?
- 3 Erklären Sie den Begriff Sinusstrom.
- 4 Welche Einheiten hat die Frequenz?
- 5 Was versteht man unter der Stromdichte?
- 6 Wie hängen Leitwert und Widerstand voneinander ab?

1.2 Schaltungen von Zweipolen

Als Zweipole bezeichnen wir Betriebsmittel mit zwei Anschlüssen für den Betriebsstromkreis. Derartige Zweipole sind z.B. Glühlampen, Spulen oder Spannungsmesser. Zweipole können Erzeuger oder Verbraucher sein.

Für Zweipole als Erzeuger gelten dieselben Gesetze wie für Zweipole als Verbraucher.

Eine *Reihenschaltung* liegt vor, wenn der Strom nacheinander durch die Zweipole fließt, wenn also das Ende des vorhergehenden Zweipols mit dem Anfang des folgenden verbunden ist (**Bild 1**).

In der Reihenschaltung ist die Stromstärke an jeder Stelle gleich.

Wegen $U = R \cdot I$ und wegen der gleichen Stromstärke I hat der Zweipol mit dem größten Widerstand in der Reihenschaltung auch die größte Spannung.

In der Reihenschaltung verhalten sich die Spannungen wie die Widerstände.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

1

In der Reihenschaltung ist die Gesamtspannung so groß wie die Summe der Teilspannungen (Bild 1).

U Gesamtspannung
 U_1, U_2, \dots Teilspannungen

$$U = U_1 + U_2 + \dots$$

2

Den Widerstand, der dieselbe Stromstärke aufnimmt wie eine Schaltung, nennt man *Ersatzwiderstand* der Schaltung. Wegen $R = U/I$ folgt für den Ersatzwiderstand der Reihenschaltung:

R Ersatzwiderstand
 R_1, R_2, \dots Teilwiderstände

$$R = R_1 + R_2 + \dots$$

3

In Reihe sind z.B. die Spulen der Wicklung eines Drehstrommotors geschaltet.

Eine *Parallelschaltung* liegt vor, wenn alle Zweipole an dieselbe Spannung angeschlossen sind, wenn also alle gleich liegenden Anschlüsse der Zweipole miteinander verbunden sind (**Bild 2**).

In der Parallelschaltung liegt an jedem Zweipol dieselbe Spannung.

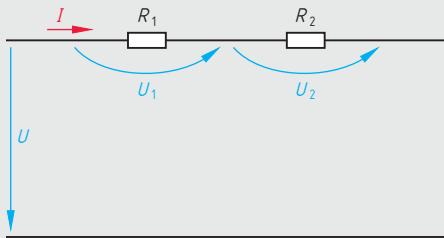


Bild 1: Reihenschaltung

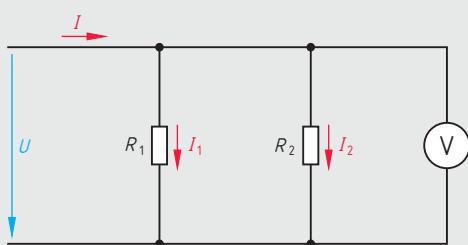


Bild 2: Parallelschaltung

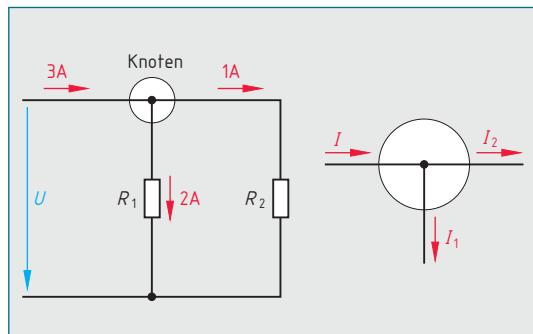


Bild 3: Knotenregel

Wegen $I = U/R$ folgt für die Parallelschaltung:

In der Parallelschaltung verhalten sich die Stromstärken umgekehrt wie die Widerstände.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

4

Bei der Parallelschaltung tritt mindestens eine Stromverzweigung auf (**Bild 3**). Da an der Stromverzweigung kein Stau der Elektronen eintreten kann, gilt folgender wichtiger Satz, übrigens auch dann, wenn keine Parallelschaltung vorliegt (Knotenregel):

Bei einem Knoten fließt so viel Strom zu, wie ab.

Aus der Knotenregel folgt, dass bei der Parallelschaltung die Gesamtstromstärke so groß ist, wie die Summe der Teilstromstärken.

I Gesamtstromstärke

I_1, I_2, \dots Teilstromstärken

Knotenregel

$$I = I_1 + I_2 + \dots \quad 1$$

Wegen der gleichen Spannungen erhalten wir für den Ersatzwiderstand der Parallelschaltung aus $I = U/R = U/R_1 + U/R_2 + \dots$ Formel 2.

Ersatzwiderstand

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \quad 2$$

Ersatzleitwert

$$G = G_1 + G_2 + \dots \quad 3$$

Bei 2 Widerständen:

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad 4$$

R Ersatzwiderstand

R_1, R_2, \dots Teilwiderstände

G Ersatzleitwert

G_1, G_2 Einzelleitwerte

Die meisten Verbraucher sind zueinander parallel geschaltet, da sie dann dieselbe Spannung erhalten. Reicht die Stromstärke eines Erzeugers nicht aus, so wird ein weiterer Erzeuger parallel geschaltet. In dieser Weise sind die Generatoren eines Kraftwerkes parallel geschaltet.

Gemischte Schaltungen enthalten Reihenschaltungen und Parallelschaltungen (Bild 1). Zur Berechnung des Ersatzwiderstandes einer gemischten Schaltung wandelt man nacheinander die Reihenschaltungen und Parallelschaltungen in ihre Ersatzschaltungen um und fasst diese zusammen (Bild 1).

Außer der Knotenregel gilt bei gemischten Schaltungen die **Maschenregel** (Bild 2).

Bei den gemischten Schaltungen gibt es zwischen zwei Knoten mehrere Wege für den Strom. Ähnlich wie bei einem Netz sind **Maschen** vorhanden. Fährt man in einem derartigen Netzwerk von einem beliebigen Knoten auf beliebigem Weg zum selben Knoten zurück, so durchfährt man eine größere oder kleinere Zahl von Spannungen. Die Spannungen können dabei positiv oder negativ sein. Positiv sind die Spannungen, wenn der Umfangungssinn die gleiche Richtung hat wie der Spannungspfeil. Negativ sind die Spannungen, wenn der Umfangungssinn gegen den Spannungspfeil (Bezugspeil, Abschnitt 1.5) gerichtet ist. Die Summe dieser Spannungen ist in einer Masche gleich Null.

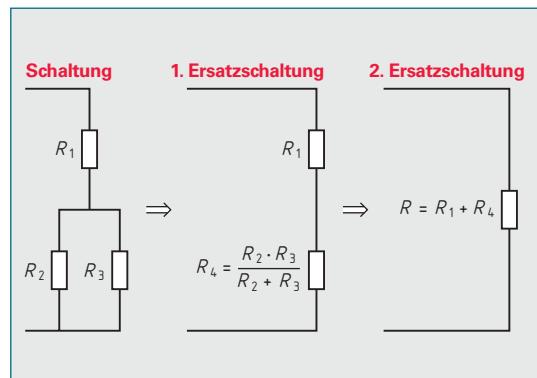


Bild 1: Reduzierung einer gemischten Schaltung

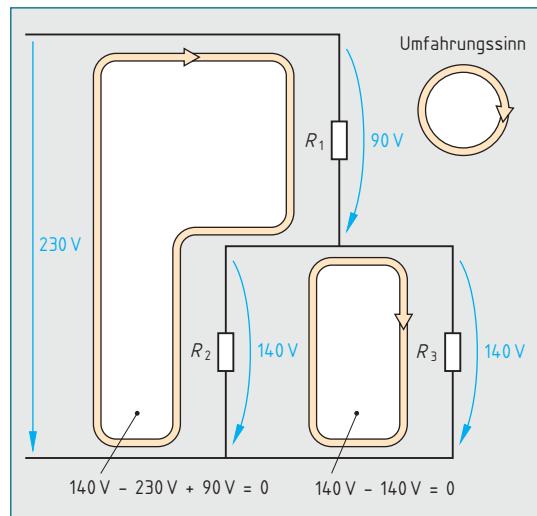


Bild 2: Maschenregel

Maschenregel: Bei einem elektrischen Netzwerk ist die Summe der Spannungen gleich Null, wenn man von einem Knoten auf beliebigem Weg zu ihm selbst zurückfährt.

Maschenregel

$$U_1 + U_2 + \dots = 0 \quad 5$$

Gemischte Schaltungen treten innerhalb von elektrischen Maschinen häufig auf.

Wiederholung und Vertiefung

- 1 Was versteht man unter Zweipolen?
- 2 Geben Sie das Kennzeichen einer Reihenschaltung an.
- 3 Wie verhalten sich in der Parallelschaltung die Stromstärken zu den Widerständen?
- 4 Wie lautet die Knotenregel?
- 5 Wie lautet die Maschenregel?

1.3 Bezugspfeile

In den Bildern des Buches werden Spannungen und Ströme oft durch Pfeile angegeben. Diese **Bezugspfeile** (Zählpfeile) geben nicht in jedem Fall die tatsächliche Richtung von Spannung und Strom an.

Die in Schaltungen oft mit Pfeilen angegebenen Spannungen U bzw. u sowie Ströme I bzw. i können oft eine andere Richtung als der Pfeil haben.

Spannungsbezugspfeile

Bei Gleichspannungserzeugern unterscheidet man bekanntlich den Pluspol und den Minuspol (**Bild 1**). Hier wird der **Spannungsbezugspfeil** vom Pluspol zum Minuspol gezeichnet. Man hat vereinbart, von einer *positiven* Spannung zu sprechen, wenn die Richtung der Spannung (Plus nach Minus) gleich dieser Bezugspfeilrichtung ist. Der Pluspol liegt also dann dort, wo der Spannungsbezugspfeil beginnt, und der Minuspol ist dort, wo die Pfeilspitze des Bezugspfeils hinzeigt (**Bild 1**). Umgekehrt ist das bei einer *negativen* Spannungsangabe, z. B. -12 V (**Bild 2**). Der Minuspol liegt dann dort, wo der Bezugspfeil beginnt, und der Pluspol dort, wohin die Pfeilspitze des Bezugspfeils zeigt.

Bei einer positiven Spannungsangabe ist der Pluspol dort, wo der Bezugspfeil der Spannung beginnt. Bei einer negativen Spannungsangabe ist der Pluspol dort, wohin der Spannungsbezugspfeil zeigt.

Spannungsbezugspfeile werden mit geraden oder gebogenen Pfeilen gezeichnet (**Bild 2**). Man muss dabei beachten, dass aus dem Bezugspfeil der Anfangspunkt und der Endpunkt des Stromkreises erkennbar sein müssen, zwischen denen die angegebene Spannung besteht.

Bei Wechselspannungserzeugern kann eigentlich keine eindeutige Spannungsrichtung festgelegt werden. Deshalb werden die Anschlüsse eines Wechselspannungserzeugers auch nicht mit Plus und Minus bezeichnet (**Bild 3**). Bei einem Wechselspannungsnetz werden die Anschlüsse meistens mit L (Außenleiter) und N (Neutralleiter) bezeichnet. Eine Halbperiode lang ist bekanntlich dann L gegenüber N positiv. In der nächsten Halbperiode dagegen N gegenüber L. Eine Spannungsrichtung kann deshalb eigentlich nicht angegeben werden. Trotzdem ist die Angabe eines Spannungsbezugspfeiles üblich. Der Bezugspfeil von **Bild 3** bedeutet, dass von einer positiven Spannung gesprochen werden soll, wenn L gegenüber N positiv ist, von einer negativen Spannung aber dann, wenn N gegenüber L positiv ist.

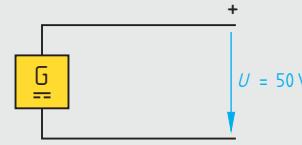


Bild 1: Spannungsbezugspfeil bei einem Gleichspannungserzeuger

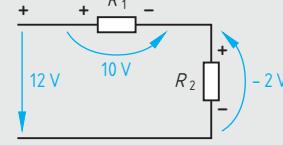


Bild 2: Spannungsbezugspfeile bei einer Reihenschaltung

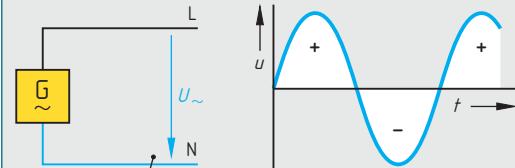


Bild 3: Spannungsbezugspfeil bei einem Wechselspannungserzeuger

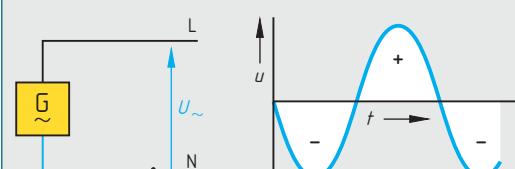


Bild 4: Wechselspannungserzeuger wie in Bild 3, aber mit anderem Spannungsbezugspfeil

Die Kennzeichnung der Spannung mit positiv oder negativ ist bei Wechselspannung nur dann sinnreich, wenn Spannungsbezugspfeile gesetzt sind.

Derselbe Sachverhalt wie in **Bild 3** wird durch **Bild 4** beschrieben. Infolge der Umkehrung des Spannungsbezugspfeiles muss jetzt (**Bild 4**) in der ersten Halbperiode von einer negativen Spannung gesprochen werden, während vorher (**Bild 3**) in derselben Halbperiode die Spannung positiv war.

Sind bei einer Schaltung Anschlusspunkte durch Buchstaben bezeichnet, so kann die Spannungsrichtung auch dadurch angegeben werden, dass an den Großbuchstaben U als Indizes diese Buchstaben der Schaltungspunkte angehängt werden (Bild 1). Dadurch ist dann die Richtung des Bezugspfeiles vorgeschrieben. Bei einer Spannung U_{CE} muss der Spannungsbezugspfeil vom Anschluss C zum Anschluss E gerichtet sein (Bild 1). Ist nun der Anschluss C positiv gegenüber dem Anschluss E, dann ist die Spannung U_{CE} positiv (Bild 1). Bei umgekehrter Polung ist dagegen die Spannung U_{CE} negativ.

Strombezugspfeile

Bekanntlich versteht man unter der Stromrichtung die Bewegungsrichtung eines *positiven* Ladungsträgers. Dabei spielt es keine Rolle, ob in dem betrachteten Stromkreis positive Ladungsträger vorhanden sind, wie zum Beispiel bei Halbleitern oder in Elektrolyten, oder ob positive Ladungsträger überhaupt nicht vorhanden sind, z.B. in elektrischen Maschinen. Demnach scheint es, als ob es wenig Sinn habe, von einem positiven Strom oder von einem negativem Strom zu sprechen. Beim selben Betriebsmittel ist allerdings die Stromrichtung keineswegs immer gleich (Bild 2). Beim *Entladen* eines Akkumulators fließt der Strom vom Pluspol über die Last zum Minuspol. Beim *Laden* desselben Akkumulators fließt dagegen der Strom vom Ladegerät zum Pluspol, von dort zum Minuspol des Akkumulators und wieder zum Ladegerät zurück.

Auch beim Strom ist es deshalb zweckmäßig, mit Strombezugspfeilen zu arbeiten. Haben Stromrichtung und Bezugspfeil dieselbe Richtung, so spricht man von einem *positiven Strom* (Bild 3). Sind Stromrichtung und Bezugspfeile verschieden gerichtet, so spricht man von einem *negativen Strom*.

Der Strombezugspfeil gibt nur die Richtung an, für welche der Zahlenwert der Stromstärke positiv ist.

Strombezugspfeile setzt man *neben* die Leitung oder neben das Betriebsmittel, zweckmäßigerweise in roter Farbe. Nach Norm ist es auch zulässig, den Strombezugspfeil in die Leitung zu zeichnen (Bild 3). Davon werden wir aber auf den folgenden Seiten keinen Gebrauch machen. Beim Eintragen von Strombezugspfeilen ist darauf zu achten, dass diese nicht über Klemmen oder Knoten mit mehr als zwei Anschlüssen hinweg gehen. Dort würde ja eine Stromverzweigung auftreten, sodass sich die Stromstärke ändert.

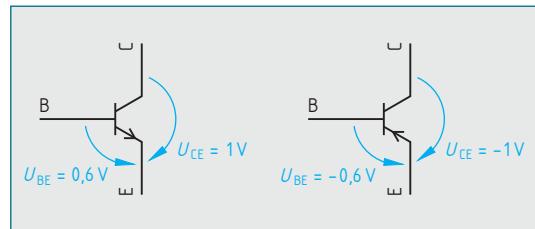


Bild 1: Angabe der Spannung beim bipolaren Transistor.
Links: NPN-Transistor, rechts: PNP-Transistor

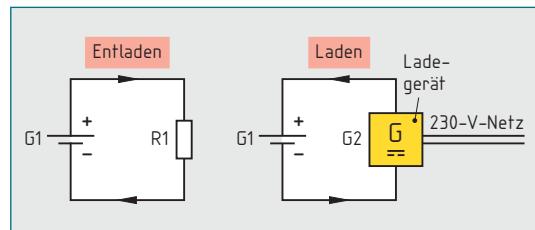


Bild 2: Stromrichtung beim Entladen und beim Laden eines Akkumulators

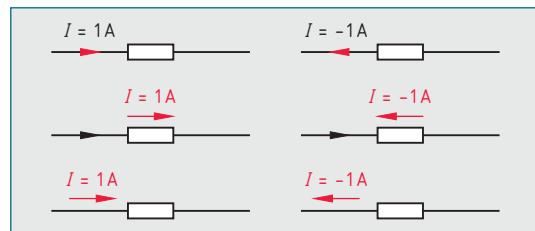


Bild 3: Bezugspfeile für einen Strom von 1 A, der im Bild von links nach rechts fließt

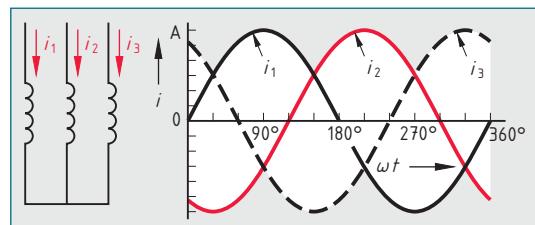


Bild 4: Strombezugspfeile bei Drehstrom

Nur mit der Kenntnis über Strombezugspfeile ist die Angabe von Strömen bei einem Drehstromsystem verständlich (Bild 4). Natürlich können zu keinem Zeitpunkt die drei Ströme tatsächlich in der Richtung der Strombezugspfeile fließen. Lässt man aber zu, dass mindestens eine der drei Stromstärken einen negativen Zahlenwert hat, so ist die Angabe der drei Stromrichtungen durchaus zweckmäßig.

Bezugspfeilsysteme

In einem vollständigen elektrischen Stromkreis sind ein Erzeuger und ein Verbraucher vorhanden (Bild 1). Setzen wir die Bezugspfeile für die Spannung vom Pluspol zum Minuspol und tragen wir dann die Richtung für den positiven Strom ein, so erkennen wir, dass im Verbraucher Strom und Spannung dieselbe Richtung haben, im Erzeuger ist dagegen der Strom entgegengesetzt zur Spannung gerichtet. Entsprechend unterscheidet man bei den Bezugspfeilen das Verbraucher-Bezugs- pfeilsystem und das Erzeuger-Bezugs- pfeilsystem.

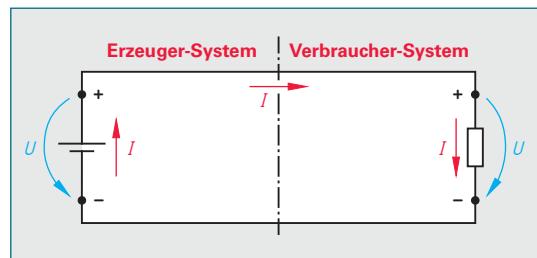


Bild 1: Bezugspfeile beim Erzeuger-System und beim Verbraucher-System

Beim Verbraucher-Bezugs- pfeilsystem trägt man den Bezugspfeil für den Strom so ein, dass er dieselbe Richtung hat wie der Spannungs- bezugs- pfeil. Beim Erzeuger-Bezugs- pfeilsystem ist der Strombezugspfeil entgegengesetzt zum Spannungsbezugspfeil gerichtet.

Meist wendet man das Verbraucher-Bezugs- pfeilsystem stillschweigend an. Zu einer unterschiedlichen Darstellung gelangt man, wenn man auf das Erzeuger-Bezugs- pfeilsystem übergeht. Das kann z.B. in der Wechselstromtechnik geschehen (Bild 2).

In der Darstellung des Verbraucher-Bezugs- pfeilsystems erhält man bei einer Induktivität zwischen Strom und Spannung eine Phasenverschiebung in der Weise, dass die Spannung dem Strom voreilt (Bild 2). Nur im Verbraucher-Bezugs- pfeilsystem, bei dem die Induktivität als Verbraucher angesehen wird, gilt der triviale, aber nützliche Merkvers:

Bei Induktivitäten tut sich der Strom verspätet.

Wendet man das Erzeuger-Bezugs- pfeilsystem an, z.B. bei einem Generator, so ist natürlich wieder eine Phasenverschiebung vorhanden, jedoch eilt jetzt der Strom der Spannung vor.

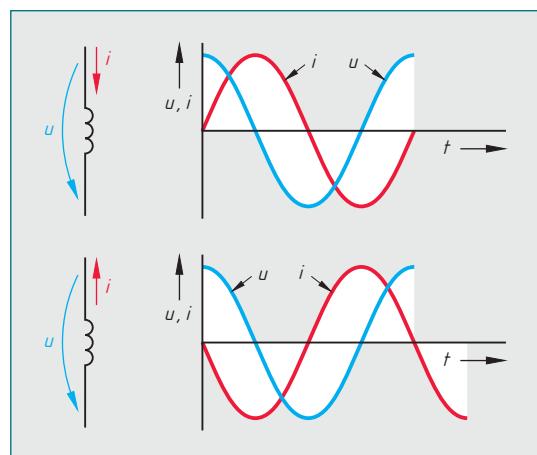


Bild 2: Strom und Spannung bei einer Induktivität. Oben: Darstellung im Verbraucher-System, unten: Darstellung im Erzeuger-System

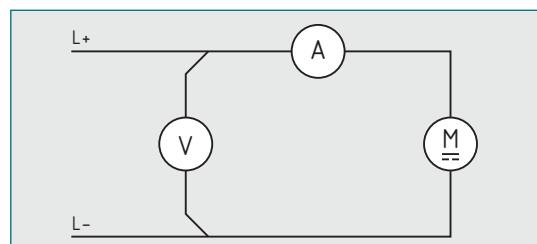


Bild 3: Strom-Spannungsmessung zur Ermittlung der Leistung

1.4 Leistung, Arbeit, Energie, Wärme

Die **elektrische Leistung** ist das Produkt aus Spannung und Stromstärke. Die Einheit der elektrischen Leistung ist das Watt (W), benannt nach Watt, engl. Ingenieur, 1736 bis 1819. Die Leistung hat das Formelzeichen P .

P Leistung

U Spannung

$[P] = U \cdot A = W$

Leistung

$$P = U \cdot I$$

1

Diese Formel gilt bei Gleichspannung immer und bei Wechselspannung dann, wenn der Verbraucher nur Wärme erzeugt.

Die elektrische Leistung kann mit einem Spannungsmesser und einem Strommesser indirekt ermittelt werden (Bild 3). Mit einem Leistungsmesser erfolgt die direkte Messung der Leistung (Bild 1, folgende Seite). Die auf dem Betriebsmittel angegebene Leistung weicht oft von der Leistungsaufnahme ab, weil bei der Herstellung Toleranzen zugelassen werden müssen oder weil eine Alterung eintritt, z.B. bei Lampen.

Bei elektrischen Maschinen steht auf dem Leistungsschild die *Leistungsabgabe*. Das ist bei Transformatoren die abgabbare elektrische Leistung und bei Motoren die mechanische Leistung. Die auf dem Leistungsschild angegebene Leistung heißt *Bemessungsleistung* oder auch *Nennleistung*.

Die Begriffe Bemessungswert und Nennwert bedeuten meist das Gleiche. Nach DIN 40200 ist der Bemessungswert „ein für eine vorgegebene Betriebsbedingung geltender Wert einer Größe“ und der Nennwert „ein gerundeter Wert einer Größe zur Bezeichnung“.

Bei einem Widerstand, der temperaturunabhängig ist und nur Wärme erzeugt, ist es möglich, die elektrische Leistung zu berechnen, wenn nur Stromstärke und Widerstand oder nur Spannung und Widerstand bekannt sind. Setzt man in $P = U \cdot I$ für U nach dem Ohm'schen Gesetz $U = R \cdot I$ ein, so erhält man $P = R \cdot I \cdot I = I^2 \cdot R$. Setzt man für $I = U/R$, so bekommt man $P = U \cdot U/R = U^2/R$.

Leistung

$$1 \quad P = I^2 \cdot R$$

$$2 \quad P = \frac{U^2}{R}$$

Aus den Formeln 1 und 2 erkennt man, dass bei gleichbleibendem R die Leistung quadratisch mit der Spannung oder mit der Stromstärke ansteigt (Bild 2).

Beispiel:

Eine Kochplatte hat an der gemessenen Spannung von 235 V eine Leistungsaufnahme von 1500 W. Wie groß ist bei gleich bleibendem Widerstand die Leistung, wenn die Spannung durch Überlastung des Netzes nur noch 220 V beträgt?

Lösung 1: Berechnung über den Widerstand

$$P = U^2/R \Rightarrow R = U^2/P = 235^2 \text{ V}^2/1500 \text{ W} = 36,817 \Omega$$

$$\text{bei } 220 \text{ V: } P = U^2/R = 220^2 \text{ V}^2/36,817 \Omega = 1314,6 \text{ W}$$

Lösung 2: Berechnung über quadratisches Verhältnis

$$R = U^2/P \Rightarrow P_{220}/P_{235} = 220^2/235^2 = 0,8764$$

$$\text{bei } 220 \text{ V: } P_{220} = P_{235} \cdot 220^2/235^2 = 1500 \text{ W} \cdot 0,8764 = 1314,6 \text{ W}$$

Die *elektrische Arbeit* ist umso größer, je mehr Leistung dem Netz entnommen wird und je länger der Verbraucher eingeschaltet ist.

Die elektrische Arbeit hat das Formelzeichen W . Je nach verwendeter Zeiteinheit hat die Arbeit die Einheit Wattsekunde (Ws) mit dem besonderen Einheitennamen Joule (J), benannt nach Joule, engl. Physiker, 1818 bis 1889, oder die Einheit Wattstunden (Wh).

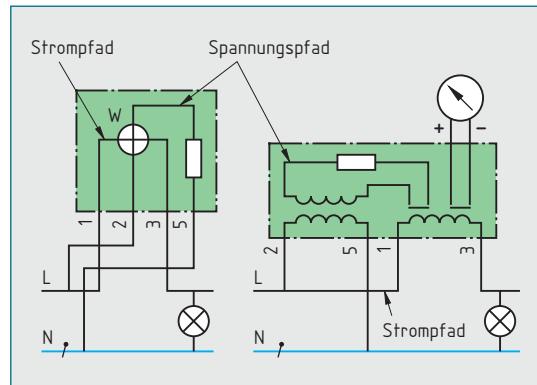


Bild 1: Leistungsmessung mit Leistungsmessern

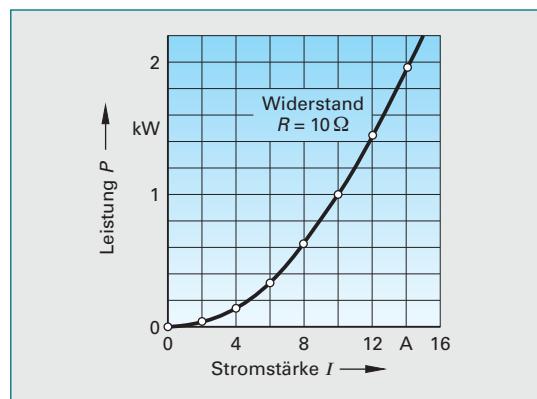


Bild 2: Abhängigkeit der Leistung von der Stromstärke

W elektrische Arbeit

P elektrische Leistung $[W] = W_s = J$
 $[W] = W_h$

Arbeit

$$W = P \cdot t \quad 3$$

t Zeit

Die mechanische Arbeit ist das Produkt aus Kraft in Wegrichtung und Weg. Sie hat die Einheit Newtonmeter (Nm) = Joule (J) = Wattsekunde (Ws).

W_{mec} mechanische Arbeit

F_s Kraft in Wegrichtung $[W] = Nm = Ws = J$

mech. Arbeit

$$W_{mec} = F_s \cdot s \quad 4$$

s Weg

Die Arbeit, geteilt durch die Zeit, ist die Leistung.

P Leistung

W Arbeit $[P] = Nm/s = Ws/s = W$
 t Zeit

Leistung

$$P = \frac{W}{t} \quad 5$$

Beispiel 1:

Mit einer Motorwinde wird zum Anheben einer Last von 300 kg eine Kraft von 3000 N aufgebracht. Die Last soll in 5 s um 10 m angehoben werden. Welche Leistung in kW ist erforderlich?

Lösung:

$$\text{Arbeit } W = F_s \cdot s = 3000 \text{ N} \cdot 10 \text{ m} = 30 \text{ kNm}$$

$$\text{Leistung } P = W/t = 30 \text{ kNm}/(5 \text{ s}) = 6 \text{ kNm/s} = 6 \text{ kW}$$

Aus Formel 5, vorhergehende Seite, folgt

$$P = W/t = (F_s \cdot s)/t = F_s \cdot s/t = F_s \cdot v$$

P_{mec} mechanische Leistung

F_s Kraft in Wegrichtung

v Geschwindigkeit $F_s \cdot v$

mech. Leistung

$$P_{\text{mec}} = F_s \cdot v \quad 1$$

Beispiel 2:

Mit einer Motorwinde soll eine Last von 200 kg mit einer Kraft von 2000 N und einer Geschwindigkeit von 2 m/s angehoben werden. Welche mechanische Leistung ist erforderlich?

Lösung:

$$P_{\text{mec}} = F_s \cdot v = 2000 \text{ N} \cdot 2 \text{ m/s} = 4000 \text{ Nm/s}$$

$$= 4000 \text{ J/s} = 4000 \text{ W} = 4 \text{ kW}$$

Bei drehender Bewegung z. B. von Motoren ist es zweckmäßig, anstelle von Kraft das *Kraftmoment*, genannt *Drehmoment* (auch in Normen), zu verwenden und an Stelle von Geschwindigkeit die *Winkelgeschwindigkeit*. Das Drehmoment M ist das Produkt von Kraft F und zu F senkrecht Hebelarm r , z. B. dem Halbmesser r einer Riemenscheibe (Bild 1).

Statt M wird als Formelzeichen auch T (von Torsion = Drehung) verwendet. M bzw. T hat mit Nm scheinbar dieselbe Einheit wie die Arbeit W , jedoch ist hier nicht $\text{Nm} = \text{J} = \text{Ws}$.

Die Einheit Newtonmeter Nm ist nur dann die Einheit einer Arbeit, wenn die physikalischen Größen der Einheit N und der Einheit m in gleicher Richtung liegen.

Die Winkelgeschwindigkeit ω (griech. Omega) ist ein Maß für die Geschwindigkeit eines Punktes, der im Abstand von 1 um einen Mittelpunkt rotiert.

Bei drehender Bewegung, z. B. bei Motoren, steigt die mechanische Leistung mit dem Drehmoment M und der Winkelgeschwindigkeit ω .

¹ potentia (lat.) = Vermögen, Macht;

² kinetisch (griech.) = bewegt

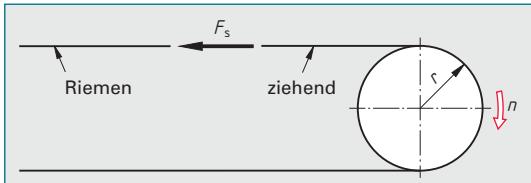


Bild 1: Riemenscheibe mit Riemen

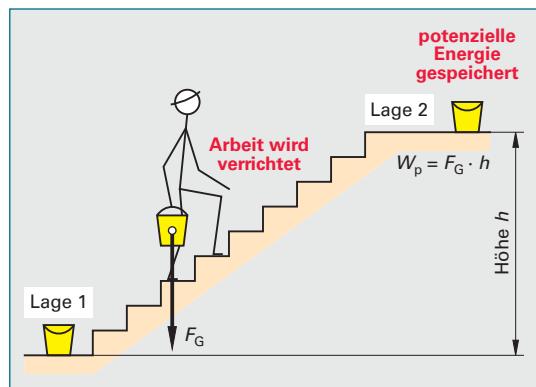


Bild 2: Arbeit und Energie beim Anheben

	Drehmoment	Leistung
$[M] = \text{Nm}$	$M = F \cdot r \quad 2$	$P_{\text{mec}} = M \cdot \omega \quad 3$
$[\omega] = 1/\text{s}$	$\omega = 2\pi \cdot n \quad 4$	$P_{\text{kW}} = \frac{M \cdot n}{9549} \quad 5$
		bei 5 $[n] = 1/\text{min}$

M Kraftmoment, Drehmoment

ω Winkelgeschwindigkeit

(ω griech. Kleinbuchstabe Omega)

r Hebelarm, z. B. Halbmesser der Riemenscheibe

F Kraft

P_{mec} mechanische Leistung

n Umdrehungsfrequenz, Drehzahl

Energie ist Arbeitsvermögen. Die Begriffe Arbeit und Energie stellen dieselbe physikalische Größe dar. Jedoch sagt man mit der Arbeit etwas über den Vorgang aus, mit der Energie etwas über den Zustand. Meist entsteht Energie durch Arbeitsaufwand (Bild 2).

Bei der mechanischen Energie unterscheidet man potentielle¹ Energie und kinetische² Energie. Dem Eimer in Bild 2 wird Arbeit zugeführt, dadurch wird er angehoben. Gegenüber dem Ausgangszustand besitzt er nun potentielle Energie.

W_p potentielle Energie

F_G Gewichtskraft

h Höhe

potentielle Energie

$$W_p = F_G \cdot h \quad 6$$

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