



Bibliothek des technischen Wissens

Fachwissen Betriebs- und Antriebstechnik

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

9. Auflage, erweitert und überarbeitet

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

Europa-Nr.: 50015

Autoren von Fachwissen Betriebs- und Antriebstechnik

Hartmut Fritsche

Dipl.-Ing.

Massen

Gregor D. Häberle

Dr.-Ing., VDE

Tettngang

Heinz O. Häberle †

Dipl.-Gewerbelehrer

Kressbronn

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.

Herr Heinz O. Häberle hat dieses Werk 1986 geschaffen, umfassend weiterentwickelt und geprägt bis zu seinem Tod im Jahre 2017. Durch seine vielfältigen schriftstellerischen Werke unterstützte er junge Menschen in ihrer Aus- und Weiterbildung im Bereich der Elektrotechnik über Jahrzehnte hinweg. Dafür sind wir ihm dankbar.

9. Auflage 2023

Druck 5 4 3 2 1

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

ISBN 978-3-8085-5145-5

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

© 2023 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
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: Dipl. Des. Susanne Beckmann, 59514 Welper
Druck: UAB BALTO print, 08217 Vilnius (LT)

Vorwort zur 9. Auflage

Die Elektrotechnik hat sich im Laufe der letzten Jahrzehnte von einer – im Vergleich zum Maschinenbau mehr oder weniger wichtigen Hilfstechik – zur führenden Technik entwickelt. Diese Entwicklung wird aller Voraussicht nach auch weiter anhalten, wenn man an die Herausforderungen der Energiegewinnung, des Klimawandels und der Zunahme der Erdbevölkerung denkt. Deshalb wurde das Buch in die Richtungen Energiemanagement, Industrie 4.0/5.0 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** (Wärmeleistungwerke, 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 **Sensoren, Steuern und Regeln** (Sensoren, Steuerungseinrichtungen, Regelungseinrichtungen, GRAFCET, Kleinststeuerungen, SPS, TIA-Portal, Bussysteme, PROFINET, Maschinensicherheit, Motorsteuerung)
- 12 **Antriebstechnik** (Drehfeldmotoren, Anlassschaltungen, Schüttschaltungen, Elektrisches Bremsen, Motorschutz, Umrichter, Servomotoren, Elektromobilität)
- 13 **Übertragungsnetze** (Niederspannungsnetze, Niederspannungs-Freileitungen, Mittelspannungsnetz, 110-kV-Netz, Höchstspannungsnetze, HGÜ, Oberschwingungen, Regelung der Netzspannung)
- 14 **Maßnahmen für die Betriebssicherheit** (Arbeiten in elektrischen Anlagen, Schutzmaßnahmen, Elektromagnetische Verträglichkeit EMV, SSV-Systeme, Umweltbelastungen)
- 15 **Planung von elektrischen Anlagen** (Betriebsorganisation, Projektmanagement, Projektieren einer Gebäudeinstallation, Projektieren einer Maschinenausrüstung)
- 16 **Internet und Digitalisierung** (Internet-Kommunikation, Gefahren durch das Internet, Firewall-Systeme, Digitalisierung, RFID-Transponder, Smart Home)
- 17 **Vertiefende Bereiche** (Theorie der Asynchronmaschine, weitere Drehstromwicklungen)

Neu aufgenommen wurden Euroklassen (Brandklassen, Baustoffklassen) von Kabeln und Leitungen, Steuerungsarten, Erstellung von SPS-Programmen, TIA-Portal, PROFINET, elektrische Antriebe für die Elektromobilität, Stromversorgung von Elektrofahrzeugen, Stromhandel, Strommärkte, Koordination elektrischer Betriebsmittel mit Schutzfunktion, Vektorregelung, Betriebsorganisation, Digitalisierung, Smart Home.

Überarbeitet und erweitert wurden Hallsensoren, PV-Stromerzeugung, EC-Motoren, Effizienz von elektrischen Antrieben (IEC-Energieeffizienzklassen), Maschinensicherheit, Typen von RCDs (Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen, FI-Schutzschalter), Durchführung von Prüfungen, Regelung der Netzfrequenz, elektrische Ausrüstung von Maschinen, Kommunikationsanlagen IuK und RuK, Energieeffizienz. Änderungen von DIN-Normen und VDE-Richtlinien wurden bei der Überarbeitung berücksichtigt.

Auf die Antworten zu den im Buch gestellten Fragen sowie auf alle **Bilder** und viele **Tabellen** kann mittels Freischaltcode über die **EUROPATHEK** (siehe vordere Umschlaginnenseite) zugegriffen werden.

In der **9. Auflage** richtet sich das Buch an alle, die sich mit den Lernfeldern der Elektroniker/in der Fachrichtungen Betriebstechnik sowie Maschinen- und Antriebstechnik auseinandersetzen haben, nämlich Auszubildende der Berufe *Elektroniker/in für Maschinen- und Antriebstechnik*, *Elektroniker/in für Betriebstechnik*, *Schüler von Berufsfachschulen und Berufskollegs* entsprechender Schwerpunkte, *Studierende von Fachschulen* (Technikerschulen und Meisterschulen) sowie von *Hochschulen und Universitäten*.

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

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen dieses Buches	8	5	Verhalten von Transformatoren	
Indizes und Zeichen für Formelzeichen dieses Buchs	9	5.1	Idealer Transformator	98
Formelzeichen für drehende elektrische Maschinen	10	5.2	Realer Transformator im Leerlauf	100
1 Grundlagen		5.3	Realer Transformator unter Last	102
1.1	Stromstärke, Widerstand, Spannung	5.4	Ersatzschaltungen von Transformatoren	104
1.2	Schaltungen von Zweipolen	5.5	Zeigerdiagramm des belasteten Transformators	106
1.3	Bezugspfeile	5.6	Kurzschlussstrom und Einschaltstrom	107
1.4	Leistung, Arbeit, Energie, Wärme	5.7	Wirkungsgrad und Arbeitsgrad von Transformatoren	109
2 Elektrisches Feld		5.8	Besondere Transformatoren	110
2.1	Elektrische Ladung	5.8.1	Spartransformator	110
2.2	Elektrische Feldstärke	5.8.2	Übertrager	111
2.3	Elektrische Flussdichte	5.8.3	Elektronische Transformatoren	112
2.4	Kapazität	6	Transformatoren im Netz	
2.5	Kapazitiver Blindwiderstand	6.1	Anschlusskennzeichnung	113
2.5.1	Ladung und Stromstärke	6.2	Kleintransformatoren	114
2.5.2	Kondensatorstrom bei Sinusspannung	6.3	Lichtbogen-Schweißtransformatoren	119
2.5.3	Kapazitive Blindleistung	6.4	Messwandler	121
2.5.4	Kondensator als Blindwiderstand	6.4.1	Spannungswandler	121
2.6	Elektrisches Feld als Energiespeicher	6.4.2	Nicht induktive Spannungswandler	123
2.7	Gleichstrom-Schalten von Kondensatoren	6.4.3	Stromwandler	123
3 Magnetisches Feld		6.4.4	Messen mit Zangen-Stromwandlern	127
3.1	Arten magnetischer Stoffe	6.5	Einphasentransformatoren für Drehstrom	129
3.2	Elektrische Durchflutung	6.5.1	V-Schaltung	129
3.3	Magnetische Feldstärke und Flussdichte	6.5.2	Transformatorengruppe	129
3.4	Magnetischer Fluss und Verkettungsfluss	6.6	Drehstromtransformatoren	131
3.5	Lorentzkraft	6.6.1	Allgemeines	131
3.6	Induktion	6.6.2	Eisenkern	131
3.7	Induktiver Blindwiderstand	6.6.3	Wicklung	132
3.8	Magnetisches Feld als Energiespeicher	6.6.4	Ölkessel	134
3.9	Gleichstrom-Schalten von Spulen	6.7	Schaltungen von Drehstromtransformatoren	135
3.10	Grundlagen des Transformators	6.7.1	Schaltungen der Wicklungsstränge	135
4 Versorgung mit elektrischer Energie		6.7.2	Schaltgruppen	137
4.1	Ströme in öffentlichen Netzen	6.7.3	Parallelschalten von Transformatoren	138
4.1.1	Stromarten für die Stromversorgung	6.7.4	Drehtransformator	140
4.1.2	Erzeugung von Drehstrom	6.7.5	Transformatoren für mehr als drei Phasen	141
4.1.3	Spannungen beim Drehstromnetz	7	Drehende elektrische Maschinen	
4.1.4	Schaltungen bei Drehstrom	7.1	Einteilung	143
4.1.5	Leistungen bei Drehstrom	7.2	Isolierstoffklassen	144
4.1.6	Unsymmetrische Belastung bei 3AC	7.3	Betriebsarten	145
4.2	Grundlagen der Stromversorgung	7.3.1	Allgemeines	145
4.3	Wärme kraftwerke	7.3.2	Dauerbetrieb S1	145
4.3.1	Verbrennungskraftwerke	7.3.3	Kurzzeitbetrieb S2	145
4.3.2	Kernkraftwerke (Atomkraftwerke)	7.3.4	Aussetzbetriebsarten	146
4.4	Regenerative Stromerzeugung	7.3.5	Ununterbrochene periodische Betriebsarten	147
4.4.1	Wasserkraftwerke	7.4	Bauformen von drehenden elektrischen Maschinen	149
4.4.2	Regenerative thermische Stromerzeugung	7.5	Effizienz von elektrischen Antrieben	150
4.4.3	Windkraftwerke	7.5.1	Wirkungsgrade nach DIN EN 60034	150
4.4.4	PV-Stromerzeugung	7.5.2	Leistungsschild	151
4.4.5	Stromerzeugung mit Brennstoffen	7.6	Instandhaltung von elektrischen Antrieben	152
4.4.6	Ausgleich schwankender Stromerzeugung	7.6.1	Maßnahmen	152
4.5	Stromtransport	7.6.2	Elektrische Prüfungen	152
4.5.1	Zweck der Spannungstransformation	7.6.3	Mechanische Prüfungen	157
4.5.2	Spannungsebenen	7.7	Schutzarten	161
4.5.3	Umspannwerke	7.8	Grundgleichungen der drehenden elektrischen Maschinen	163
4.5.4	Leitungen und Kabel	7.9	Anschlussbezeichnung von drehenden elektrischen Maschinen	164
4.5.5	Bemessungsstromstärke von Lasten			
4.5.6	Spannungsfall an Leitungen			
4.5.7	Leistungsverlust in Leitungen			
4.5.8	Strombelastbarkeit von Installationsleitungen			
4.5.9	Überstromschutz von Leitungen			
4.5.10	Leitungsberechnung			
4.5.11	Leitungsberechnung bei Oberschwingungen			

8	Maschinen mit bewegtem Magnetfeld	
8.1	Erzeugung des Drehfeldes	169
8.2	Drehstrom-Synchronmaschinen	172
8.2.1	Synchrongenerator	172
8.2.2	Synchronmotoren für Drehstrom	177
8.2.3	Reluktanzmotoren	179
8.3	Einphasen-Synchronmaschinen	181
8.3.1	Einphasengeneratoren	181
8.3.2	Synchronmotoren für Einphasenwechselstrom	181
8.4	Gleichstrommotoren mit Magnetläufern	182
8.4.1	Arten der Schrittmotoren	182
8.4.2	Ansteuerschaltungen von Schrittmotoren	187
8.4.3	Betriebsverhalten der Schrittmotoren	187
8.4.4	EC-Motor	188
8.5	Maschinen mit Kurzschlussläufern	190
8.5.1	Aufbau des Kurzschlussläufers	190
8.5.2	Wirkungsweise des Asynchrongenerators	191
8.5.3	Wirkungsweise des Kurzschlussläufermotors	192
8.5.4	Kurzschlussläufermotoren für Einphasenwechselstrom	195
8.6	Schleifringläufermaschinen	197
8.7	Sonstige Motoren mit bewegtem Magnetfeld	200
8.7.1	Wirbelstromläufermotoren	200
8.7.2	Polumschaltbare Motoren	201
8.7.3	Spannungsumschaltbare Motoren	203
8.8	Linearantriebe	203
8.8.1	Linearantrieb mit drehendem Motor	203
8.8.2	Wechselstrom-Linear motoren	204
8.8.3	Linearschrittmotoren	206
8.8.4	Schwingankermotoren	207
8.8.5	Piezomotoren	207
8.8.6	Gleichstrom-Linear motoren	209
8.9	Wechselstromwicklungen	210
8.9.1	Drehstromwicklungen	210
8.9.2	Einphasenwicklungen	214
8.9.3	Umwickeln von Wechselstromwicklungen	216
8.10	Fehler bei Drehfeldmaschinen	217
9	Stromwendermaschinen	
9.1	Aufbau von Gleichstrommaschinen	219
9.2	Wirkungsweise von Gleichstrommaschinen	221
9.2.1	Kurvenform der induzierten Spannung	221
9.2.2	Wirkungsweise bei der Spannungserzeugung	222
9.2.3	Fremderregte Gleichstrommaschine	222
9.2.4	Weitere Gleichstrommaschinen	223
9.3	Ankerquerfeld	225
9.3.1	Entstehung des Ankerquerfelds	225
9.3.2	Wendepole	226
9.3.3	Kompensationswicklung	226
9.3.4	Querfeldgeneratoren	228
9.3.5	Ankerquerfeld beim Motor	228
9.4	Gleichstrommaschine als Motor	229
9.4.1	Wirkung des Ankers	229
9.4.2	Drehmoment und Anzugsstrom	230
9.4.3	Einstellen der Umdrehungsfrequenz	231
9.5	Schaltungen von Gleichstrommotoren	231
9.5.1	Fremderregter Motor	232
9.5.2	Reihenschlussmotor	233
9.6	Stromwendermotoren für Wechselstrom	234
9.6.1	Aufbau	234
9.6.2	Einphasen-Reihenschlussmotor	235
9.6.3	Repulsionsmotor	236
9.6.4	Linearmotor mit Stromwender	237
9.6.5	Stromwendermotoren für Drehstrom	237
9.7	Fehler bei Stromwendermaschinen	238
9.8	Wicklungen von Stromwendermotoren	240
9.8.1	Ständerwicklung von Gleichstrommaschinen	240
9.8.2	Ankerwicklung von Stromwendermaschinen	240
9.9	Kleinstmotoren mit Kommutierung	244
9.9.1	Mechanische Kommutierung	244
9.9.2	Elektronische Kommutierung	245
9.9.3	Getriebe für Kleinstmotoren	246
10	Umformer	
10.1	Motorgenerator	247
10.2	Asynchrone Frequenzumformer	247
10.3	Sonstige Umformer	248
11	Sensoren, Steuern, Regeln	
11.1	Sensoren	249
11.1.1	Prinzip von Sensoren	249
11.1.2	Sensoren der Steuerungstechnik	249
11.1.3	Einsatzgebiete von Sensoren	250
11.1.4	Aufbau eines Sensors	250
11.1.5	Sensorelemente	250
11.1.6	Beispiele von Sensoren	252
11.1.7	Lichtschranken	255
11.1.8	Wegmessung, Winkelmessung	256
11.2	Steuern und Regeln	258
11.2.1	Steuern	258
11.2.2	Regeln	259
11.2.3	Schaltende Regeleinrichtungen	261
11.2.4	Stetige Regeleinrichtungen	261
11.2.5	Kennzeichnung der Regelstrecke	262
11.2.6	Steuern und Regeln mit dem PC	263
11.2.7	Regeln mit digitalen Kompaktreglern	264
11.2.8	GRAFNET	266
11.3	Kleinsteuerungen	269
11.3.1	Elemente von LOGO!	269
11.3.2	Bearbeiten eines LOGO!-Projektes	271
11.3.3	Erweiterter Ausbau einer LOGO!	271
11.4	Speicherprogrammierbare Steuerungen	273
11.4.1	SPS-Grundlagen	273
11.4.2	Erstellung von SPS-Programmen	274
11.4.3	TIA-Portal	275
11.4.4	Funktionen einer SPS	276
11.4.5	Ablaufsteuerungen mit SPS	278
11.4.6	Bussysteme für SPS	279
11.4.7	PROFINET	280
11.4.8	Eingabe-Ausgabe-Einheiten	281
11.4.9	Fehlersichere Kommunikation	282
11.5	Maschinensicherheit	284
11.5.1	Sicherheitsschaltgeräte	284
11.5.2	Funktionale Sicherheit – Performance-Level	286
11.5.3	Funktionale Sicherheit nach SIL	287
11.6	Weitere Komponenten für Steuerungen	289
11.6.1	Nockenschalter	289
11.6.2	Schütze	290
11.6.3	Hilfstromkreise	293
11.6.4	Halbleiterbauelemente	296
11.5.5	Halbleiterbaugruppen	302
12	Antriebstechnik	
12.1	Anlassen von Drehfeldmotoren	306
12.1.1	Allgemeine Bestimmungen	306

12.1.2	Anlassschaltungen für Drehstrom-Kurzschlussläufermotoren.....	306	13.4.2	Netzaufbau	379
12.1.3	Einfache Schützsicherungen	308	13.4.3	Elektrische Wirkung auf die Umgebung ...	380
12.1.4	Polumschaltungen	311	13.5 Hochspannungsnetze	381	
12.1.5	Stern-Dreieck-Schützsicherungen.....	313	13.5.1	Bemessungsspannung, Aufgaben	381
12.1.6	Anlassschaltungen für Schleifringläufermotoren.....	314	13.5.2	Netzaufbau beim 110-kV-Netz.....	381
12.1.7	Allgemeine Schützsicherung	315	13.5.3	Netzaufbau der Höchstspannungsnetze ...	383
12.1.8	Elektronische Motorstarter	316	13.5.4	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung HGÜ	384
12.2 Anlasserberechnung beim Schleifringläufermotor.....	319		13.6 Erdungsanlagen	386	
12.3 Bremsen von Drehstrom-Asynchronmotoren	320		13.7 Isolatoren, Armaturen	388	
12.3.1	Mechanisches Bremsen mit elektrischer Steuerung	320	13.7.1	Isolatoren	388
12.3.2	Elektrische Bremsen	321	13.7.2	Armaturen	390
12.3.3	Verlustwärme beim Anlauf und Bremsen ..	324	13.8 Beeinflussung der Netze	393	
12.4 Steuerung von Stromwendermotoren	325		13.8.1	Blindleistung	393
12.5 Motorschutz	329		13.8.2	Oberschwingungen	396
12.6 Stromrichter zur Drehzahlsteuerung.....	331		13.8.3	Stromqualität	399
12.6.1	Drehzahlsteuerung beim Universalmotor ..	331	13.8.4	Kompensation von Oberschwingungen ...	400
12.6.2	Drehzahlsteuerung beim fremderregten Motor	332	13.8.5	Regelung der Netzspannung	401
12.6.3	Drehzahlsteuerung mit Gleichstromsteller ..	334	13.8.6	Regelung der Netzfrequenz	404
12.6.4	Umrichter.....	335	13.9 Intelligente Stromnetze (Smart Grids) ...	405	
12.6.5	Stromzwischenkreis-Umrichter.....	337	13.10 Messen von Oberschwingungen	406	
12.6.6	Umrichter mit Pulsamplitudenmodulation.....	337	13.11 Stromhandel	408	
12.6.7	Umrichter mit Pulsweitenmodulation	339	14 Maßnahmen für die Betriebssicherheit		
12.6.8	Direktumrichter	340	14.1 Sicherheit beim Arbeiten in elektrischen Anlagen	410	
12.6.9	Drehstrommotor mit Stromrichter	341	14.2 Systemformen im Niederspannungsnetz	414	
12.6.10	Frequenzumrichter anwenden	343	14.3 Schutzmaßnahmen	416	
12.6.11	Untersynchrone Stromrichtererkaskade	345	14.3.1	Berührungsarten	416
12.6.12	Doppelt gespeister Asynchrongenerator... ..	345	14.3.2	Stromgefährdung	416
12.7 Servomotoren	347		14.3.3	Basisschutz	417
12.7.1	Anforderungen an Servomotoren	347	14.3.4	Maßnahmen für zugleich Basisschutz und Fehlerschutz	417
12.7.2	Drehstrommotoren als Servomotoren.....	348	14.3.5	Fehlerschutz	418
12.7.3	Gleichstrommotoren als Servomotoren ...	352	14.3.6	Zusätzlicher Schutz	423
12.8 Antriebssysteme betreiben	354		14.3.7	Koordination elektrischer Betriebsmittel mit Schutzfunktionen	424
12.8.1	Informationsbeschaffung	354	14.3.8	Schutz in elektrotechnisch überwachten Anlagen	425
12.8.2	Auftragsplanung	354	14.3.9	Schutzleiter und Schutzpotenzialausgleichsleiter	426
12.8.3	Auftragsdurchführung	355	14.4 Prüfungen	427	
12.8.4	Auftragskontrolle	358	14.4.1	Schutzklassen der Betriebsmittel	427
12.9 Elektromobilität	359		14.4.2	Betätigungselemente in der Nähe berührungsgefährlicher Teile	427
12.9.1	Hybridantriebe	359	14.4.3	Prüfungen der Elektroinstallation	428
12.9.2	Elektrische Antriebe für die Elektromobilität	362	14.4.4	Durchführung der Prüfungen	433
12.9.3	Stromversorgung von Elektrofahrzeugen ..	364	14.5 Elektromagnetische Verträglichkeit EMV ..	435	
13 Übertragungsnetze			14.6 SSV-Anlagen	442	
13.1 Netzformen	366		14.7 Elektrische Ausrüstung von Maschinen ..	447	
13.2 Niederspannungsnetze	367		14.7.1	Anwendungsbereich	447
13.2.1	Netzaufbau	367	14.7.2	Begriffe	447
13.2.2	Niederspannungs-Freileitungen	369	14.7.3	Allgemeine Anforderung	447
13.2.3	Tragmaste	369	14.7.4	Netzanschlüsse, Trenneinrichtung und Schalter	449
13.2.4	Endmaste	372	14.7.5	Schutz gegen elektrischen Schlag	450
13.2.5	Abspannmaste	373	14.7.6	Schutz der Ausrüstung	451
13.2.6	Abgespannte Maste	373	14.7.7	Potenzialausgleich	452
13.2.7	Winkelmaste	373	14.7.8	Steuerstromkreise	453
13.2.8	Winkeltragmaste.....	374	14.7.9	Bedienerschnittstellen	455
13.2.9	Sondermaste	374	14.7.10	Anordnung der Schaltgeräte	455
13.3 Hausanschluss	375		14.7.11	Leiter, Leitungen, Kabel	455
13.3.1	Ausführung des Hausanschlusses	375	14.7.12	Verdrahtungstechnik	456
13.3.2	Bemessen der Leitungen bis zu den Stromkreisverteilern	376	14.7.13	Sonstige Anforderungen	457
13.4 Mittelspannungsnetze	379				
13.4.1	Bemessungsspannung und Aufgaben.....	379			

14.8 Klimatisierung	458	16.1.3 Firewall-Systeme	482
14.8.1 Funktion von Klimatisierungsgeräten	458	16.2 Digitalisierung	483
14.8.2 Klimatisierung von Schaltschränken	459	16.2.1 Anwendungen	483
14.9 Umweltbelastungen der Elektrotechnik ..	461	16.2.2 RFID-Transponder	484
15 Planung von elektrischen Anlagen		16.3 Smart Home	485
15.1 Betriebsorganisation	463	17 Vertiefende Bereiche	
15.2 Projektmanagement	465	17.1 Theorie der Asynchronmaschine	487
15.3 Lastenheft, Pflichtenheft	466	17.1.1 Oberschwingungen	487
15.4 Projektende	466	17.1.2 Ersatzschaltung der Asynchronmaschine ..	489
15.5 Projektieren einer Gebäudeinstallation ..	467	17.1.3 Ortskurve	491
15.5.1 Planungsgrundlagen	467	17.1.4 Leerlaufversuch und Kurzschlussversuch ..	492
15.5.2 Leitungsführung in Wohngebäuden	469	17.1.5 Auswertung der Ortskurve	493
15.5.3 Kommunikationsanlagen	470	17.1.6 Rechengang beim Kreisdiagramm	495
15.5.4 Elektrische Energieeffizienz	471	17.2 Weitere Drehstromwicklungen	497
15.6 Projektieren einer Maschinenausrüstung ..	472	17.2.1 Einschichtwicklungen	497
15.6.1 Auswahl eines Elektromotors	472	17.2.2 Zweischichtwicklungen	498
15.6.2 Stromversorgung, Schutzeinrichtungen ..	474	17.2.3 Polumschaltbare Wicklungen	500
15.6.3 Steuerleitungen	475	18 Anhang	
15.6.4 Schaltungsaufbau	476	18.1 Größen und Einheiten	501
15.6.5 Weg zur sicheren Maschine	477	18.2 Wichtige Normen	503
15.6.6 EU-Maschinenrichtlinie	479	18.3 Teile von VDE 0100	506
16 Internet und Digitalisierung		18.4 Kurzformen von Fachbegriffen	508
16.1 Internet	480	Literaturhinweise	510
16.1.1 Internet-Kommunikation	480	Sachwortverzeichnis	511
16.1.2 Gefahren durch das Internet	481	Firmen und Dienststellen	519

Bildquellenverzeichnis

Die meisten Bilder entstammen aus dem Arbeitsumfeld der Autoren. Ergänzend hierzu haben die nachfolgend aufgeführten Unternehmen und Institutionen die bildliche Ausgestaltung wie unten dargestellt 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. Dies gilt auch für die Bilder der Autoren.

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

Die Autoren danken dafür allen Beteiligten sehr herzlich.

Adaptaflex GmbH, Mörfelden-Walldorf:	448-1	J. Schneider Elektrotechnik GmbH, Offenburg:	402-3
Adobe Systems Software, Dublin, Irland:	135-1, 149-1, 426-2	Kraus & Naimer GmbH, Wien:	289-1
ADDI-DATA Deutschland, Rheinmünster:	263-4	KYOCERA Deutschland, Esslingen:	69-2
Blinzinger Elektronik GmbH, Sindringen:	116-1	maxon motor ag, Sachsel/OW Schweiz:	244-2-3, 245-1, 246-1-2-3
Busch Jaeger Elektro GmbH, Lüdenscheid:	485-1	OBO-Bettermann GmbH: Schaeffler Technologies AG & Co.KG, Herzogenaurach:	387-2
CONEC Elektronische Bauelemente GmbH, Lippstadt:	439-1	Siemens AG, München:	363-1
Danfoss GmbH, Offenbach:	333-3, 341-1		56-2, 57-3, 78-4, 131-1, 134-1, 172-2
Dehn + Söhne GmbH, Neumarkt:	413-3		173-1, 180-1-2, 190-1-2, 197-1, 220-1-4, 221-1, 227-1, 235-1, 241-1, 265-1, 269-1, 273-1, 279-1, 285-1, 347-1, 385-1, 441-1
Dr. F. Faulhaber GmbH, Schönaich:	208-2-4		
Eaton Industries, Bonn:	292-2, 317-1	ZF-Friedrichshafen, Friedrichshafen:	190-3, 360-4
Elektronische Werke			
F. Driescher & Söhne GmbH, Moosburg:	79-1-3		
EnBW AG, Karlsruhe:	77-1-2-3		
Fluke Deutschland GmbH, Glottertal:	122-1, 124-1, 125-1-2, 126-3		
Gossen Metrawatt GmbH, Nürnberg:	126-1, 430-2		
Gustav Hensel GmbH, Lennestadt:	467-2		
Hager Tehalit GmbH, Blieskastel:	375-1		
Hauff-Technik GmbH, Herbrechtingen:	376-1-2		

Formelzeichen dieses Buches					
Formelzeichen	Bedeutung	Formelzeichen	Bedeutung	Formelzeichen	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. Ladungsträgerbeweglichkeit	<i>B</i>	1. Magnetische Flussdichte 2. Blindleitwert 3. Gleichstromverhältnis	β (beta)	1. Winkel 2. Kurzschluss-Stromverstärkungsfaktor
<i>c</i>	1. spez. Wärmekapazität 2. elektrochemisches Äquivalent 3. Ausbreitungsgeschwindigkeit 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>	1. Elektrische Feldstärke, 2. Energie, 3. Bestrahlungsstärke, 4. Elastizitätsmodul	ϵ_0 ϵ (epsilon)	Elektrische Feldkonstante Permittivität
<i>f</i>	Frequenz	<i>F</i>	1. Kraft, 2. Faktor, 3. Fehler	ζ (zeta)	Arbeitsgrad, Nutzungsgrad
<i>g</i>	1. Schwerebeschleunigung (Ortskoeffizient) 2. Tastgrad	<i>G</i>	1. Leitwert, Wirkleitwert 2. Verstärkungsmaß	η (eta)	Wirkungsgrad
<i>h</i>	Höhe	<i>H</i>	Magnetische Feldstärke	ϑ (theta)	Temperatur in °C
<i>i</i>	zeitabhängige Stromstärke	<i>I</i>	Stromstärke	λ (lambda)	1. Wellenlänge, 2. Wärmeleitfähigkeit, 3. Leistungsfaktor
<i>j</i>	Ruck	<i>J</i>	1. Stromdichte 2. Trägheitsmoment	μ_0 μ (mü)	Magnetische Feldkonstante Permeabilität
<i>k</i>	1. Faktor, z. B. für Wicklungsangabe 2. allgem. Konstante	<i>K</i>	1. Konstante 2. Kopplungsfaktor 3. Lamellenzahl	ν (nü)	Ordnungszahl
<i>l</i>	1. Länge, 2. Abstand	<i>L</i>	1. Induktivität 2. Pegel	π (pi)	Zahl 3,1415926...
<i>m</i>	1. Masse 2. Momentverhältnis 3. Strangzahl 4. Zahl der Stufen	<i>M</i>	Drehmoment, Kraftmoment, Moment (siehe auch <i>T</i>)	ρ (rho)	1. spez. Widerstand 2. Dichte
<i>n</i>	1. Drehzahl, Umdrehungsfrequenz 2. Ganze Zahl 1, 2, 3 ...	<i>N</i>	1. Zahl, z.B. Windungszahl 2. Nutenzahl	σ (sigma)	Streufaktor
<i>p</i>	1. Polpaarzahl, 2. Druck 3. Leistungsverhältnis, 4. Impuls	<i>P</i>	Leistung, Wirkleistung	τ (tau)	1. Zeitkonstante 2. Teilung
<i>q</i>	Lochzahl	<i>Q</i>	1. Ladung, 2. Wärme 3. Blindleistung 4. Gütefaktor, Güte	φ (phi)	Winkel, insbesondere Phasenverschiebungswinkel
<i>r</i>	1. Radius 2. differentieller Widerstand	<i>R</i>	Wirkwiderstand	ω (omega)	1. Winkelgeschwindigkeit 2. Kreisfrequenz
<i>s</i>	1. Strecke, Dicke 2. Siebfaktor 3. bezogener Schlupf	<i>S</i>	1. Scheinleistung 2. Steilheit 3. Schlupf (absolut)	Griechische Großbuchstaben	
<i>t</i>	Zeit	<i>T</i>	1. Periodendauer 2. Temperatur in K 3. Übertragungsfaktor 4. Drehmoment	Δ (Delta)	Differenz z.B. Δn Schlupf
<i>u</i>	zeitabhängige Spannung	<i>U</i>	Spannung	Θ (Theta)	Durchflutung
<i>ü</i>	Übersetzungsverhältnis	<i>V</i>	1. Volumen 2. Verstärkungsfaktor	Φ (Phi)	Magnetischer Fluss
<i>v</i>	Geschwindigkeit	<i>W</i>	1. Arbeit, 2. Energie 3. Spulenweite	Ψ (Psi)	1. Elektrischer Fluss 2. magn. Verkettungsfluss
<i>w</i>	1. Energiedichte 2. Führungsgröße	<i>X</i>	Blindwiderstand	Ω (Omega)	Raumwinkel
<i>x</i>	Regelgröße	<i>Y</i>	Scheinleitwert		
<i>y</i>	1. Schritt 2. Stellgröße	<i>Z</i>	1. Impedanz, Scheinwiderstand 2. Wellenwiderstand		
<i>z</i>	ganze Zahl				

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

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</i>				DIN EN 60027-4
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	I_n	I_n oder I_{nom}	–	
Dauerkurzschlussstrom	I_{kd}	I_k	I_{SC}	
Stoßkurzschlussstrom	I_s	\hat{I}_k	\hat{I}_{SC}	
Stoßkurzschlusswechselstrom	\dot{i}_s	I_{k0}	I_{SC0}	
transierter Strom (kurzzeitiger Strom)	i	I'_k	I'_{SC}	
subtransierter Strom (sehr kurzzeitiger Strom)	\dot{i}_s	I''_k	I''_{SC}	
Strombelag	I'	A	entfällt	A/m
Spannungen und verwandte Größen				
Bemessungsspannung	U_N	U_{rat}	U_N	Volt, V
Nennspannung	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
Bemessungscheinleistung	S_N	S_{rat}	S_N	Voltampere, VA
Nennleistung	P_n	P_n oder P_{nom}	entfällt	Watt, W
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)		eins (keine Einheit)
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	
b von backward = rückwärts, g von gain = Ertrag, l von lock = verriegeln, n = Nenn-, nom von nominal = Nenn-, rat von rated = bewertet, sc von short circuit = Kurzschluss, u von up = aufwärts T von torque = Drehmoment, Kraftmoment Wirkfaktor = Kosinus der Grundschiwingung (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*.

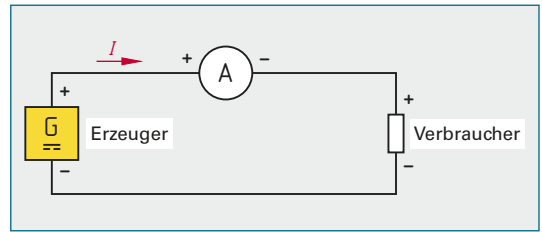


Bild 1: Strommessung in einem Stromkreis

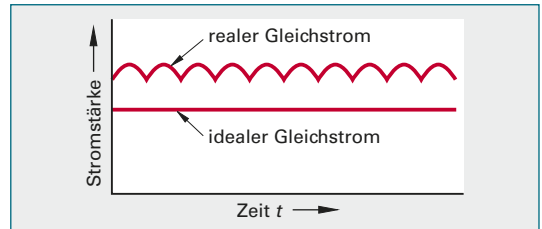


Bild 2: Gleichstrom DC

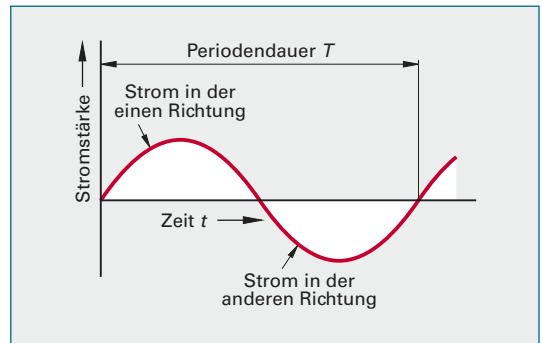


Bild 3: Wechselstrom (Sinusstrom)

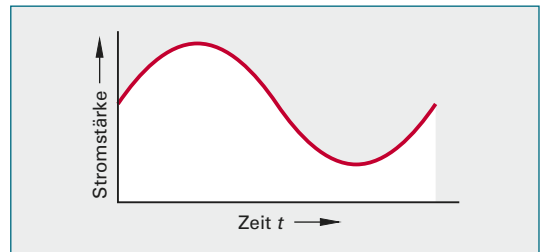


Bild 4: Mischstrom UC

Frequenz
 f Frequenz
 T Periodendauer
 $[f] = \text{Hz}$
 $f = \frac{1}{T}$

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 Sinusstroms beträgt 20 ms. Wie groß ist die Frequenz in Hz und in c/s?

Lösung:

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

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

Stromdichte

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

$$J = \frac{I}{A} \quad \mathbf{1}$$

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:

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

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 Leitwerts 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 *Resistenz* oder *Widerstandswert*. Die Resistenz hat das Formelzeichen R, der Leitwert hat das Formelzeichen G.

Widerstand

- R Widerstand (Resistenz) [R] = Ω
- G Leitwert [G] = S

$$R = \frac{1}{G} \quad \mathbf{2}$$

Beispiel 3:

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

Lösung:

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

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

$$R = \frac{l}{\gamma \cdot A} \quad \mathbf{3} \quad \rho = \frac{1}{\gamma} \quad R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad \mathbf{4}$$

- 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:

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

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

ΔR Widerstandsänderung (Δ griech. Großbuchstabe Delta)

$$\Delta R = \alpha \cdot R_1 \cdot \Delta \vartheta \quad \mathbf{5}$$

α Temperaturkoeffizient
 R_1 Kaltwiderstand bei 20 °C
 $\Delta \vartheta$ Übertemperatur über 20 °C (ϑ griech. Kleinbuchstabe Theta)

$$R_2 = R_1 + \Delta R \quad \mathbf{6}$$

R_2 Warmwiderstand

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

Unterschiede von Temperaturen, z.B. bei $\Delta \alpha$ 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 (Temperaturkoeffizient $\alpha = 0,0039 \text{ 1/K}$) hat bei Raumtemperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ einen Widerstand von $0,5 \text{ }\Omega$. Im Betrieb erreicht die Wicklung eine Temperatur von $110 \text{ }^\circ\text{C}$. Wie groß ist nun der Widerstand?

Lösung:

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta &= 110 \text{ }^\circ\text{C} - 20 \text{ }^\circ\text{C} = 90 \text{ K} \\ \Delta R &= \alpha \cdot R_1 \cdot \Delta\vartheta \\ &= 0,0039 \text{ 1/K} \cdot 0,5 \text{ }\Omega \cdot 90 \text{ K} = \mathbf{0,176 \text{ }\Omega} \\ R_2 &= R_1 + \Delta R = 0,5 \text{ }\Omega + 0,176 \text{ }\Omega \\ &= \mathbf{0,676 \text{ }\Omega} \approx \mathbf{0,68 \text{ }\Omega} \end{aligned}$$

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 Wicklungsteils oder Bauelements.

Ohm'sches Gesetz

Merkformel:

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

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

- I Stromdichte $[I] = \text{A}$
- U Spannung $[U] = \text{V}$
- R Widerstand (Resistanz) $[R] = \Omega$

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

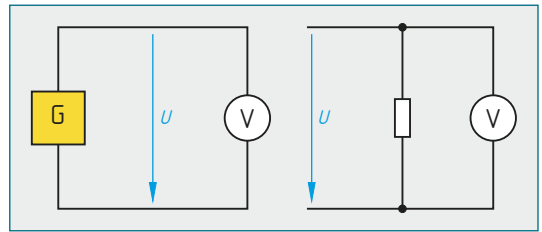


Bild 1: Messung der Spannung

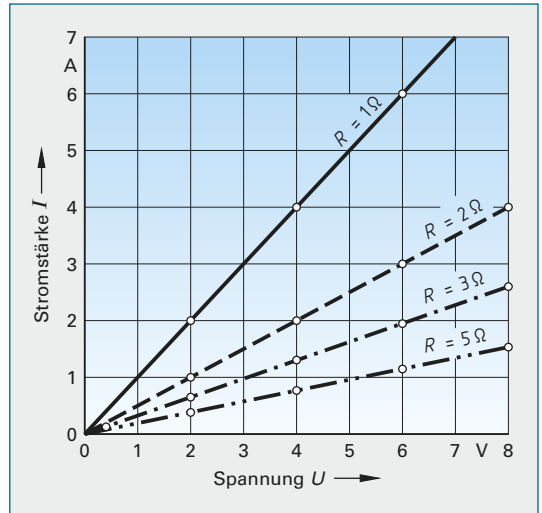


Bild 2: $I(U)$ -Kennlinie von ohmschen Widerständen

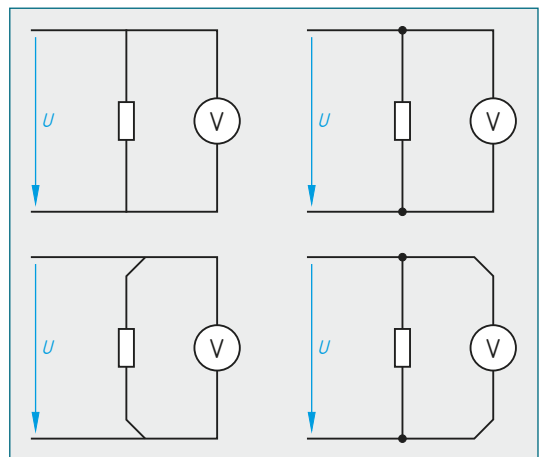


Bild 3: Darstellungen von Abzweigungen nach DIN EN 61082

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. LED-Lampen, 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.

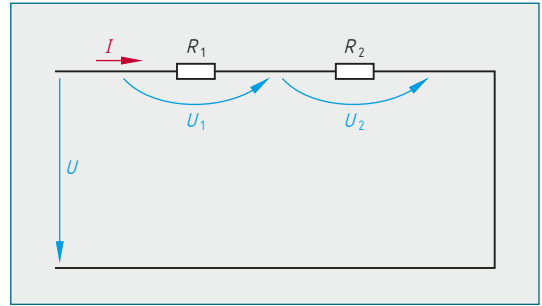


Bild 1: Reihenschaltung

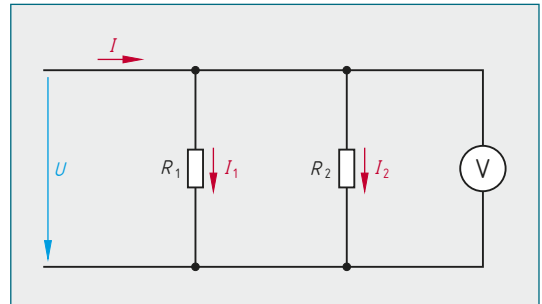


Bild 2: Parallelschaltung

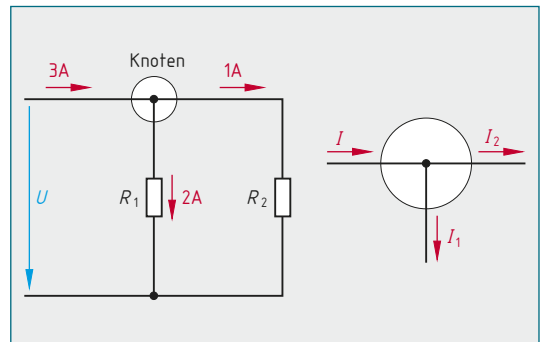


Bild 3: Knotenregel

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.

Knotenregel
 I Gesamtstromstärke
 I_1, I_2, \dots Teilstromstärken
 $I = I_1 + I_2 + \dots$ 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
 $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$ 2

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

Bei 2 Widerständen:
 $R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ 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 Umfahrungssinn die gleiche Richtung hat wie der Spannungspfeil. Negativ sind die Spannungen, wenn der Umfahrungssinn gegen den Spannungspfeil (Bezugspfeil, Abschnitt 1.5) gerichtet ist. Die Summe dieser Spannungen ist in einer Masche gleich Null.

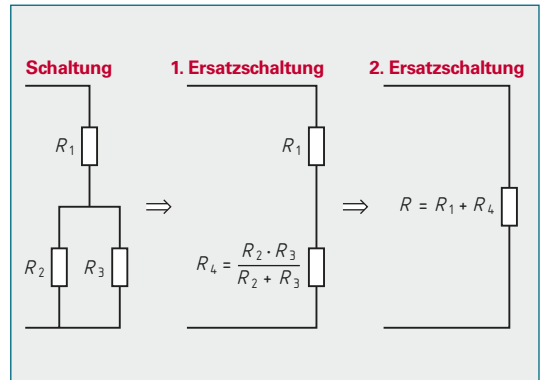


Bild 1: Reduzierung einer gemischten Schaltung

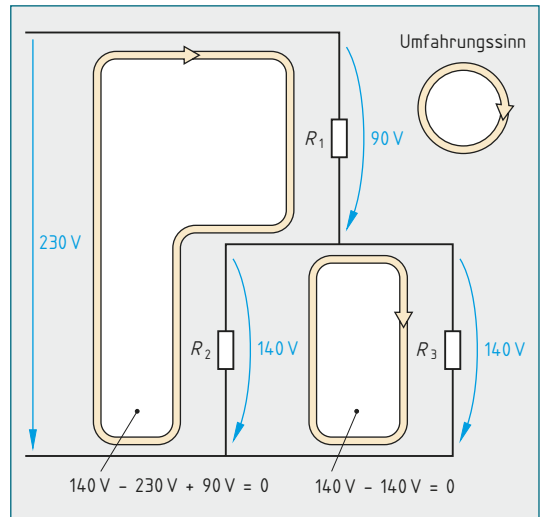


Bild 2: Maschenregel

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
 $U_1 + U_2 + \dots = 0$ 5

Gemischte Schaltungen treten innerhalb von elektrischen Maschinen häufig auf.

Wiederholung und Vertiefung

- 1 Was versteht man unter Zweipolen?
- 2 Geben Sie das Merkmal 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 Bezugs Pfeile

In den Bildern des Buches werden Spannungen und Ströme oft durch Pfeile angegeben. Diese *Bezugs Pfeile* (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 Spannungsbezugspfeils 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.

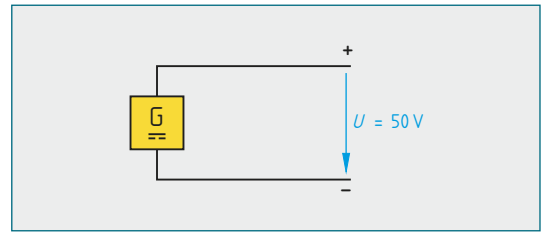


Bild 1: Spannungsbezugspfeil bei einem Gleichspannungserzeuger

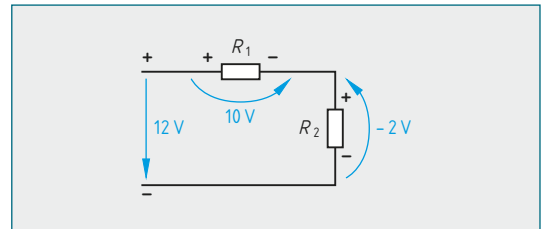


Bild 2: Spannungsbezugspfeile bei einer Reihenschaltung

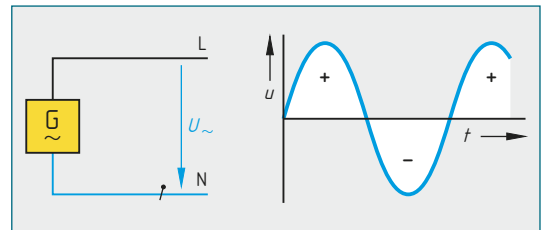


Bild 3: Spannungsbezugspfeil bei einem Wechselspannungserzeuger

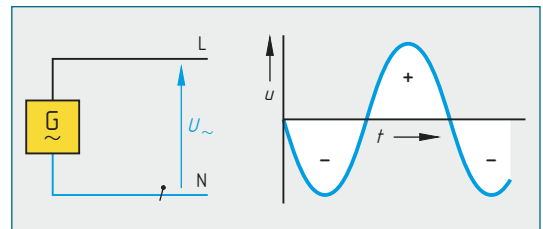


Bild 4: Wechselspannungserzeuger wie in Bild 3, aber mit anderem Spannungsbezugspfeil

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

Derselbe Sachverhalt wie in Bild 3 wird durch **Bild 4** beschrieben. Infolge der Umkehrung des Spannungsbezugspfeils 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 Bezugspfeils 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.

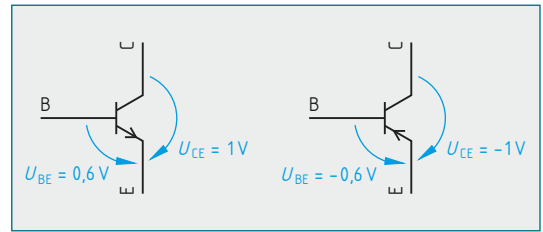


Bild 1: Angabe der Spannung beim bipolaren Transistor.
Links: NPN-Transistor, rechts: PNP-Transistor

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 negativen 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.

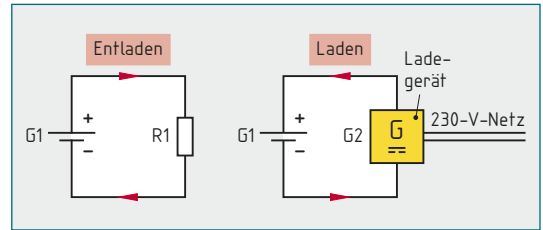


Bild 2: Stromrichtung beim Entladen und beim Laden eines Akkumulators

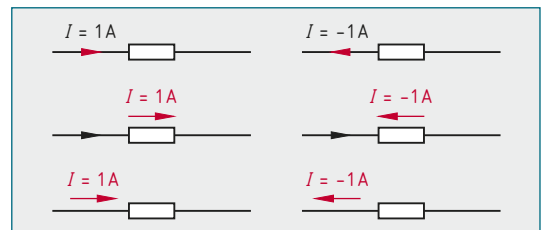


Bild 3: Bezugspfeile für einen Strom von 1 A, der im Bild von links nach rechts fließt

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**). 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.

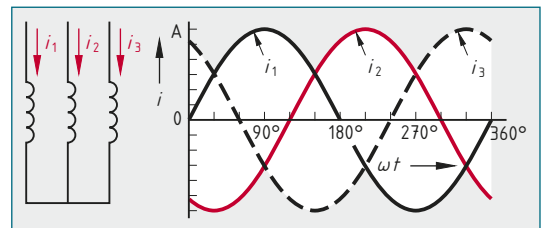


Bild 4: Strombezugspfeile bei Drehstrom

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-Bezugspfeilsystem und das Erzeuger-Bezugspfeilsystem.

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

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

In der Darstellung des Verbraucher-Bezugspfeilsystems erhält man bei einer Induktivität als Verbraucher zwischen Strom und Spannung eine Phasenverschiebung in der Weise, dass die Spannung dem Strom voreilt (**Bild 2, oben**).

Wendet man das Erzeuger-Bezugspfeilsystem an, z. B. bei einem Generator, so ist natürlich ebenfalls eine Phasenverschiebung vorhanden, jedoch eilt jetzt der Strom der Spannung vor (**Bild 2, unten**).

Je nach Bezugspfeilsystem unterscheidet sich wegen der Phasenverschiebung das Vor-, Nacheilen von Strom und Spannung bei Induktivitäten und auch Kapazitäten.

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	$[P] = V \cdot A = W$	$P = U \cdot I$
I	Stromstärke		

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

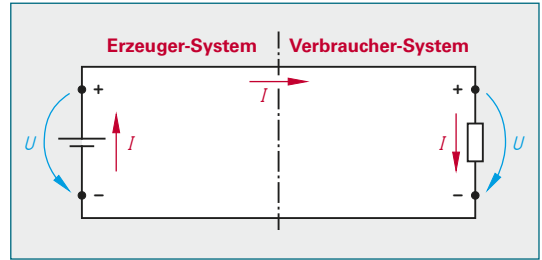


Bild 1: Bezugspfeile beim Erzeuger-System und beim Verbraucher-System

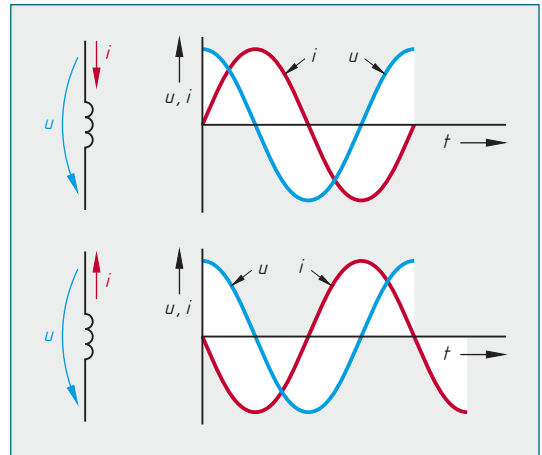


Bild 2: Strom und Spannung bei einer Induktivität. Oben: Darstellung im Verbraucher-System, unten: Darstellung im Erzeuger-System

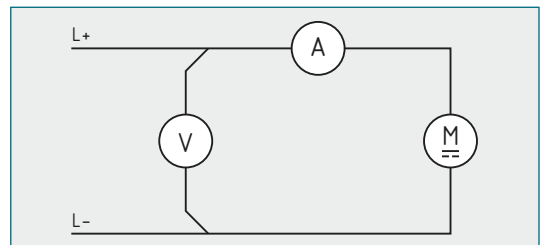


Bild 3: Strom-Spannungsmessung zur Ermittlung der Leistung

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 abgebbare 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

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

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

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**).

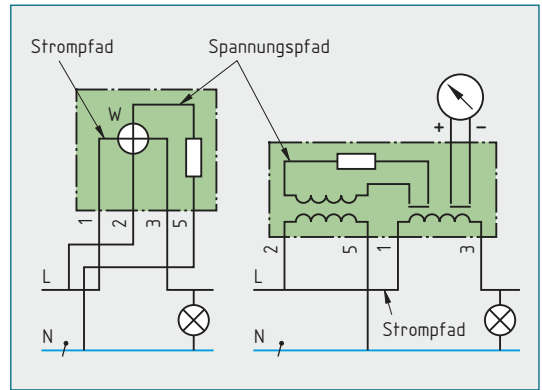


Bild 1: Leistungsmessung mit Leistungsmessern

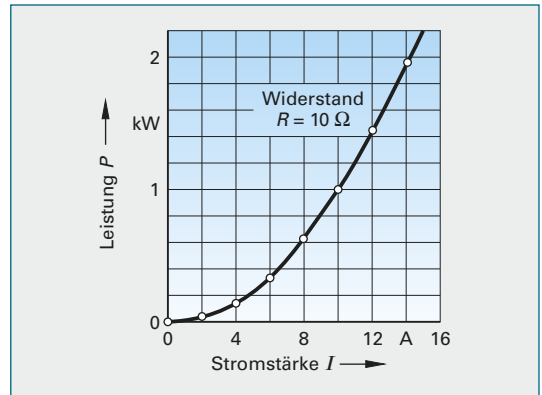


Bild 2: Abhängigkeit der Leistung von der Stromstärke

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
 $P = U^2 / R \Rightarrow R = U^2 / P = 235^2 \text{ V}^2 / 1500 \text{ W} = 36,817 \Omega$
 bei 220 V: $P = U^2 / R = 220^2 \text{ V}^2 / 36,817 \Omega = 1314,6 \text{ W}$

Lösung 2: Berechnung über quadratisches Verhältnis
 $R = U^2 / P \Rightarrow P_{220} / P_{235} = U_{220}^2 / U_{235}^2 = 220^2 / 235^2 = 0,8764$
 bei 220 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).

W	elektrische Arbeit	Arbeit
P	elektrische Leistung	$W = P \cdot t$ 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	mech. Arbeit
F_s	Kraft in Wegrichtung	$W_{\text{mec}} = F_s \cdot s$ 4
s	Weg	

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

P	Leistung	Leistung
W	Arbeit	$P = \frac{W}{t}$ 5
t	Zeit	

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:
 Arbeit $W = F_s \cdot s = 3000 \text{ N} \cdot 10 \text{ m} = 30 \text{ kNm}$
 Leistung $P = W/t = 30 \text{ kNm}/(5 \text{ s}) = 6 \text{ kNm/s} = \mathbf{6 \text{ kW}}$

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 $F_s \cdot v$

$P_{\text{mec}} = F_s \cdot v$ 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:
 $P_{\text{mec}} = F_s \cdot v = 2000 \text{ N} \cdot 2 \text{ M/S} = 4000 \text{ Nm/s}$
 $= 4000 \text{ J/s} = 4000 \text{ W} = \mathbf{4 \text{ kW}}$

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 senkrechtem 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 .

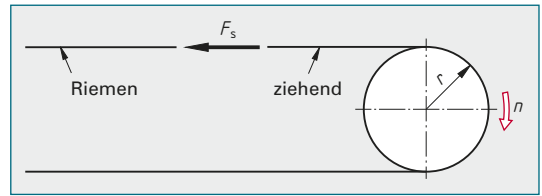


Bild 1: Riemenscheibe mit Riemen

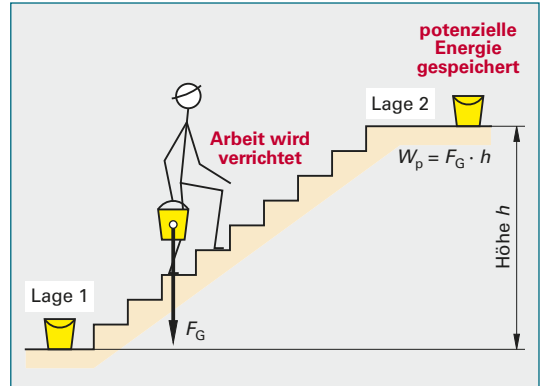


Bild 2: Arbeit und Energie beim Anheben

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

- bei Formel 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, P_{kW} Leistung in kW
 - 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

$W_p = F_G \cdot h$ 6

¹ potentia (lat.) = Vermögen, Macht;
² kinetisch (griech.) = bewegt

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