

Helmut Lindner  
Harry Brauer  
Constans Lehmann

# Taschenbuch der Elektrotechnik und Elektronik



HANSER

# Größen und Einheiten

Formelzeichen	Größe	Einheit	Beziehung zu den Basiseinheiten des SI
$B$	magnetische Flussdichte	T	$1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2 = 1 \text{ kg}/(\text{s}^2 \cdot \text{A})$
$C$	elektrische Kapazität	F	$1 \text{ F} = 1 \text{ C/V} = 1 \text{ A}^2 \cdot \text{s}^4/(\text{m}^2 \cdot \text{kg})$
$D$	elektrische Flussdichte, Verschiebungsdichte	$\text{C/m}^2$	$1 \text{ C/m}^2 = 1 \text{ A} \cdot \text{s}/\text{m}^2$
$E$	elektrische Feldstärke	$\text{V/m}$	$1 \text{ V/m} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}/(\text{s}^3 \cdot \text{A})$
$G$	elektrischer Leitwert	S	$1 \text{ S} = 1/\Omega = 1 \text{ A}^2 \cdot \text{s}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{kg})$
$H$	magnetische Feldstärke	$\text{A/m}$	
$I$	elektrische Stromstärke	A	Basiseinheit
$J$	elektrische Stromdichte	$\text{A/m}^2$	
$L$	Induktivität	H	$1 \text{ H} = 1 \text{ Wb/A} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}/(\text{s}^2 \cdot \text{A}^2)$
$M$	Gegeninduktivität	H	$1 \text{ H} = 1 \Omega \cdot \text{s} = 1 \text{ V} \cdot \text{s}/\text{A}$
$P$	elektrische Leistung	W	$1 \text{ W} = 1 \text{ V} \cdot \text{A} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}/\text{s}^3$
$Q$	Elektrizitätsmenge, elektrische Ladung	C	$1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$
$R$	elektrischer Wirkwiderstand	$\Omega$	$1 \Omega = 1 \text{ V/A} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}/(\text{s}^3 \cdot \text{A}^2)$
$U$	elektrische Spannung	V	$1 \text{ V} = 1 \text{ W/A} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}/(\text{s}^3 \cdot \text{A})$
$W$	Energie, Arbeit	J	$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ W} \cdot \text{s} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}/\text{s}^2$
$X$	elektrischer Blindwiderstand	$\Omega$	$1 \Omega = 1 \text{ V/A} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}/(\text{s}^3 \cdot \text{A}^2)$
$Z$	elektrischer Scheinwiderstand	$\Omega$	$1 \Omega = 1 \text{ V/A} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}/(\text{s}^3 \cdot \text{A}^2)$
$f$	Frequenz	Hz	$1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$
$\varepsilon$	Permittivität	$\text{F/m}$	$1 \text{ F/m} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}/(\text{V} \cdot \text{m})$ $= 1 \text{ A}^2 \cdot \text{s}^4/(\text{m}^3 \cdot \text{kg})$
$\eta$	Raumladungsdichte	$\text{C/m}^3$	$1 \text{ C/m}^3 = 1 \text{ A} \cdot \text{s}/\text{m}^3$
$\Theta$	magnetische Durchflutung	A	
$\varkappa$	elektrische Leitfähigkeit	$\text{S/m}$	$1 \text{ S/m} = 1/(\Omega \cdot \text{m})$ $= 1 \text{ A}^2 \cdot \text{s}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{kg})$
$\mu$	Permeabilität	$\text{H/m}$	$1 \text{ H/m} = 1 \text{ V} \cdot \text{s}/(\text{A} \cdot \text{m})$ $= 1 \text{ m} \cdot \text{kg}/(\text{A}^2 \cdot \text{s}^2)$
$\varrho$	spezifischer elektrischer Widerstand	$\Omega \cdot \text{m}$	$\Omega \cdot \text{m} = 1 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}/(\text{s}^3 \cdot \text{A}^2)$
$\sigma$	Flächenladungsdichte	$\text{C/m}^2$	$1 \text{ C/m}^2 = 1 \text{ A} \cdot \text{s}/\text{m}^2$
$\Phi$	magnetischer Fluss	Wb	$1 \text{ Wb} = 1 \text{ V} \cdot \text{s} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}/(\text{s}^2 \cdot \text{A})$
$\varphi$	elektrisches Potenzial	V	$1 \text{ V} = 1 \text{ W/A} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}/(\text{s}^3 \cdot \text{A})$
$\psi$	elektrischer Fluss	C	$1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$

---

<b>1</b>	<b>Gleichstrom</b>	<b>21</b>
<hr/>		
<b>2</b>	<b>Elektrische und magnetische Felder</b>	<b>49</b>
<hr/>		
<b>3</b>	<b>Wechselstrom</b>	<b>103</b>
<hr/>		
<b>4</b>	<b>Besondere Wechselstromkreise</b>	<b>135</b>
<hr/>		
<b>5</b>	<b>Signale und Systeme</b>	<b>193</b>
<hr/>		
<b>6</b>	<b>Bauelemente der Elektronik</b>	<b>239</b>
<hr/>		
<b>7</b>	<b>Analoge Schaltungen</b>	<b>354</b>
<hr/>		
<b>8</b>	<b>Digitale Schaltungen</b>	<b>429</b>
<hr/>		
<b>9</b>	<b>Stromversorgungsschaltungen</b>	<b>525</b>
<hr/>		
<b>10</b>	<b>Elektrische Maschinen</b>	<b>554</b>
<hr/>		
<b>11</b>	<b>Matlab-Programme</b>	<b>633</b>
<hr/>		
<b>12</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis zur Elektronik</b>	<b>635</b>
<hr/>		
<b>13</b>	<b>Formelzeichenverzeichnis</b>	<b>639</b>
<hr/>		
<b>14</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>647</b>
<hr/>		
<b>15</b>	<b>Sachwortverzeichnis</b>	<b>657</b>
<hr/>		



Lindner/Brauer/Lehmann  
Taschenbuch der Elektrotechnik und Elektronik



**Bleiben Sie auf dem Laufenden!**

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

**[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**



---

# Taschenbuch der Elektrotechnik und Elektronik

---

von Studiendirektor Helmut Lindner †  
Dr. Harry Brauer †  
und Prof. Dr. Constans Lehmann †

unter Mitarbeit von

Univ.-Prof. Dr. Harald Lindner †  
Prof. Dr. Hartmut Lindner  
Prof. Dr. Wolfgang Reinhold  
Prof. Dr.-Ing. Rolf Fischer

10., aktualisierte Auflage  
Mit 631 Bildern und 99 Tabellen



**Fachbuchverlag Leipzig**  
im Carl Hanser Verlag

Studiendirektor HELMUT LINDNER †  
Bearbeiter Univ.-Prof. Dr. HARALD LINDNER †  
Technische Universität Bergakademie Freiberg  
1 Gleichstrom, 2 Elektrische und magnetische Felder,  
3 Wechselstrom, 4 Besondere Wechselstromkreise

Dr. HARRY BRAUER †  
Bearbeiter Prof. Dr. WOLFGANG REINHOLD  
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig  
6 Bauelemente der Elektronik

Prof. Dr. CONSTANS LEHMANN, Leipzig †  
5 Signale und Systeme, 7 Analoge Schaltungen,  
8 Digitale Schaltungen, 9 Stromversorgungsschaltungen

Prof. Dr. HARTMUT LINDNER  
Hochschule für Technik und Wirtschaft Mittweida (FH)  
unter Mitarbeit von Prof. Dr.-Ing. ROLF FISCHER  
Hochschule Esslingen  
10 Elektrische Maschinen



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

ISBN 978-3-446-44497-3

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2018 Carl Hanser Verlag München

Internet: <http://www.hanser-fachbuch.de>

Lektorat: Manuel Leppert, M.A.  
Herstellung: Dipl.-Ing. (FH) Franziska Kaufmann  
Satz: Satzherstellung Dr. Steffen Naake, Brand-Erbisdorf  
Coverconcept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München  
Coverrealisierung: Stephan Rönigk  
Druck und Binden: Kösel, Krugzell  
Printed in Germany

## Vorwort

Auch die schnelle Zunahme von Spezialwissen erfordert ständiges Vergewärtigen der Grundlagen eines Fachgebietes. Das vorliegende Taschenbuch vermittelt deshalb wesentliche Kenntnisse über Gesetzmäßigkeiten, Prinzipien sowie Anwendungen der Elektrotechnik und Elektronik. Es will dazu beitragen, Wissenslücken zu schließen und früher erworbene Kenntnisse zu vervollständigen und zu aktualisieren. Das Buch wendet sich gleichermaßen an Studenten wie an Praktiker und soll auch Anwendern angrenzender Fachgebiete von Nutzen sein.

Der Stoff wird in übersichtlicher und konzentrierter Form dargestellt. Gesuchte Informationen sind in Verbindung mit einem umfangreichen Sachwort- und Symbolverzeichnis schnell auffindbar.

Die vorliegende 9. Auflage ist wieder eine Neubearbeitung. Dies betrifft vor allem die Kapitel zum Teil Elektronik und die Kapitel Signale und Systeme sowie Elektrische Maschinen. Neben umfangreichen Aktualisierungen und der Aufnahme neuer technischer Anwendungen wurden auch zahlreiche Leserhinweise in der neuen Auflage berücksichtigt.

Für kritische Hinweise zur Verbesserung des Buches sind die Autoren und der Verlag dankbar.

Dezember 2007

Autoren und Verlag



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Gleichstrom</b>	<b>21</b>
1.1	<i>Grundgrößen und Grundbegriffe</i>	21
1.1.1	Elektrische Ladung	21
1.1.2	Elektrischer Strom	21
1.1.3	Elektrische Spannung und Potenzial	22
1.1.4	Elektrischer Widerstand	24
1.1.5	Ohm'sches Gesetz	28
1.1.6	Elektrische Arbeit und Leistung	29
1.2	<i>Zusammengesetzte Widerstände</i>	30
1.2.1	Reihenschaltung von Widerständen und Spannungsteilung	30
1.2.2	Parallelschaltung von Widerständen und Stromteilung	31
1.2.3	Gemischte Schaltung von Widerständen	32
1.2.4	Dreieck-Stern-Umwandlung	32
1.3	<i>Stromkreise und Netzwerke</i>	33
1.3.1	Grundstromkreis	33
1.3.1.1	Darstellung mit Spannungsquelle	33
1.3.1.2	Darstellung mit Stromquelle	34
1.3.1.3	Wirkungsgrad im Grundstromkreis	35
1.3.1.4	Leistungsanpassung	36
1.3.2	Kirchhoff'sche Regeln	36
1.3.3	Berechnung von Netzwerken	37
1.3.3.1	Knotenpunkt- und Maschensatz	38
1.3.3.2	Überlagerungssatz	39
1.3.3.3	Zweipoltheorie	40
1.3.3.4	Maschenstromverfahren	41
1.3.3.5	Knotenpotenzialverfahren	42
1.3.4	Belasteter Spannungsteiler	42
1.4	<i>Messung der elektrischen Grundgrößen</i>	44
1.4.1	Messung von Spannung und Strom	44
1.4.2	Messung des Widerstandes	45
1.4.2.1	Direkte Messung	45
1.4.2.2	Wheatstone-Brücke	46
1.4.2.3	Thomson-Brücke	46
1.4.3	Messung der Leistung	47
<b>2</b>	<b>Elektrische und magnetische Felder</b>	<b>49</b>
2.1	<i>Elektrostatishes Feld</i>	49
2.1.1	Elektrische Feldstärke	49
2.1.2	Influenz	50
2.1.3	Verschiebungsdichte und Verschiebungsfluss	50
2.1.4	Dielektrikum	51
2.1.5	Kondensatoren	52
2.1.5.1	Kapazität	52
2.1.5.2	Schaltung von Kondensatoren	53

	2.1.5.3	Berechnung der Kapazität von Kondensatoren . . . . .	55
	2.1.5.4	Geschichtetes Dielektrikum . . . . .	55
	2.1.5.5	Ladung und Entladung von Kondensatoren . . . . .	55
	2.1.6	Kräfte im elektrischen Feld . . . . .	57
	2.1.7	Energie im elektrischen Feld . . . . .	59
	2.1.8	Piezoelektrischer Effekt . . . . .	60
	2.1.9	Thermoelektrischer Effekt . . . . .	61
	2.1.10	Lichtelektrischer Effekt . . . . .	62
2.2		<i>Stationäres elektrisches Strömungsfeld</i> . . . . .	63
	2.2.1	Strömungsfeld . . . . .	63
	2.2.2	Stromdichte . . . . .	63
	2.2.3	Stromdichte und Feldstärke . . . . .	65
	2.2.4	Feldstärke und Potenzial . . . . .	66
2.3		<i>Magnetisches Feld</i> . . . . .	66
	2.3.1	Magnetische Feldstärke . . . . .	66
	2.3.1.1	Durchflutungssatz . . . . .	67
	2.3.1.2	Gesetz von Biot-Savart . . . . .	70
	2.3.2	Magnetische Flussdichte . . . . .	71
	2.3.3	Magnetischer Fluss und Streuung . . . . .	71
	2.3.4	Permeabilität . . . . .	72
	2.3.5	Magnetismus des Eisens . . . . .	73
	2.3.6	Arten magnetischer Werkstoffe . . . . .	75
	2.3.7	Ohm'sches Gesetz des magnetischen Kreises . . . . .	77
	2.3.8	Eisengefüllte magnetische Kreise . . . . .	78
	2.3.8.1	Unverzweigter magnetischer Kreis ohne Luftspalt . . . . .	78
	2.3.8.2	Zusammengesetzter magnetischer Kreis . . . . .	79
	2.3.8.3	Scherung der Magnetisierungskennlinie . . . . .	80
	2.3.8.4	Flussdichte bei gegebener Durchflutung . . . . .	81
	2.3.8.5	Verzweigter magnetischer Kreis . . . . .	82
	2.3.9	Induktionsgesetz . . . . .	82
	2.3.9.1	Ruhende Spule und zeitlich veränderliches Magnetfeld . . . . .	82
	2.3.9.2	Ruhendes Magnetfeld und bewegter gerader Leiter . . . . .	83
	2.3.9.3	Lenz'sche Regel . . . . .	84
	2.3.9.4	Prinzip des Gleichstromgenerators . . . . .	84
	2.3.9.5	Wirbelströme . . . . .	85
	2.3.9.6	Skinneffekt . . . . .	86
	2.3.10	Selbstinduktion . . . . .	88
	2.3.11	Gegeninduktivität und induktive Kopplung . . . . .	90
2.4		<i>Kräfte und Energie im Magnetfeld</i> . . . . .	91
	2.4.1	Kraft auf eine bewegte elektrische Ladung . . . . .	91
	2.4.2	Kraft auf geradlinige Stromleiter . . . . .	92
	2.4.3	Kraft zwischen zwei parallelen Stromleitern . . . . .	92
	2.4.4	Prinzip des Gleichstrommotors . . . . .	93
	2.4.5	Energie des magnetischen Feldes . . . . .	94
	2.4.5.1	Energie bei konstanter Permeabilität . . . . .	94
	2.4.5.2	Energie im eisengefüllten Kreis . . . . .	94
	2.4.5.3	Hysteresisarbeit . . . . .	95

	2.4.5.4	Zugkraft von Magneten	96
	2.4.5.5	Supraleitende Magnete	96
2.4.6		Schaltvorgänge mit Induktivitäten	97
2.4.7		Hall-Effekt	99
2.4.8		Elektromagnetische Verträglichkeit	101
<b>3</b>		<b>Wechselstrom</b>	<b>103</b>
3.1		<i>Grundgrößen und Grundbegriffe</i>	103
	3.1.1	Vorteile des Wechselstroms gegenüber Gleichstrom	103
	3.1.2	Kenngrößen sinusförmiger Wechselgrößen	103
	3.1.3	Zeiger- und Liniendiagramm	104
	3.1.4	Addition phasenverschobener Wechselgrößen gleicher Frequenz	105
	3.1.5	Mittelwerte sinusförmiger Wechselgrößen	106
	3.1.6	Scheitel- und Formfaktor	108
3.2		<i>Widerstände im Wechselstromkreis</i>	110
	3.2.1	Wirkwiderstand	110
	3.2.2	Induktiver Widerstand	110
	3.2.3	Kapazitiver Widerstand	111
3.3		<i>Komplexe Wechselgrößen</i>	112
	3.3.1	Grundlagen	113
	3.3.2	Arithmetik	113
3.4		<i>Schaltungen von Widerständen im Wechselstromkreis</i>	114
	3.4.1	Reihenschaltungen	114
	3.4.2	Parallelschaltungen	117
	3.4.3	Darstellung komplexer Größen in Wechselstromkreisen	119
	3.4.4	Umwandlung von Schaltungen	121
3.5		<i>Leistung und Arbeit im Wechselstromkreis</i>	123
	3.5.1	Augenblicksleistung	123
	3.5.2	Mittlere Leistung	124
	3.5.3	Leistungsfaktor	127
	3.5.4	Wirk-, Blind- und Gesamtstrom	128
	3.5.5	Verbesserung des Leistungsfaktors	128
	3.5.6	Leistung in komplexer Schreibweise	129
	3.5.7	Messung der Wechselstromleistung	130
		3.5.7.1 Messung der Wirkleistung	130
		3.5.7.2 Messung der Blindleistung	131
		3.5.7.3 Messung der Wirkarbeit	131
		3.5.7.4 Kombinierte Messung von Wirk- und Blindleistung	133
<b>4</b>		<b>Besondere Wechselstromkreise</b>	<b>135</b>
4.1		<i>Zusammengesetzte Schaltungen</i>	135
	4.1.1	Komplexer Spannungs- und Stromteiler	135
	4.1.2	Gemischte Schaltungen	137
		4.1.2.1 Parallelschaltung mit komplexen Widerständen	137
		4.1.2.2 Wechselstromparadoxon	137
		4.1.2.3 90°-Schaltung nach Hummel	138
		4.1.2.4 RC-Kombination mit Phasendrehung um 90°	139
		4.1.2.5 RC-Kombination mit Phasendrehung um 180°	140

4.2	<i>Frequenzverhalten von Wechselstromkreisen</i>	141
4.2.1	Verluste in Wechselstromkreisen	141
4.2.1.1	Verlustwinkel einer Spule	141
4.2.1.2	Verlustwinkel eines Kondensators	142
4.2.2	Reihenresonanz	143
4.2.2.1	Grundvorgang	143
4.2.2.2	Besonderheiten bei Reihenresonanz	145
4.2.2.3	Verluste bei Reihenresonanz	145
4.2.2.4	Normierte Darstellung	146
4.2.3	Parallelresonanz	147
4.2.3.1	Grundvorgang	147
4.2.3.2	Besonderheiten bei Parallelresonanz	148
4.2.3.3	Verluste bei Parallelresonanz	149
4.2.4	Übertragungsfunktion von Vierpolen	150
4.2.5	Filter	151
4.2.5.1	RC-Glied als Hochpass	151
4.2.5.2	RC-Glied als Tiefpass	152
4.2.5.3	RC-Kombination als Bandpass	153
4.3	<i>Spule mit Eisen</i>	155
4.3.1	Eisenverluste	155
4.3.2	Kupferverluste	157
4.3.3	Induktiver Spannungsabfall	157
4.3.4	Ersatzschaltbild der Spule mit Eisenkern	158
4.3.5	Drosselspule mit Gleichstromvormagnetisierung	159
4.4	<i>Transformator</i>	160
4.4.1	Arten der Transformatoren	160
4.4.2	Idealer Transformator	161
4.4.3	Realer belasteter Transformator	162
4.4.4	Grundgleichungen des Transformators in komplexer Form	163
4.4.5	T-Ersatzschaltung des Transformators	163
4.4.6	Reduzierte Ersatzschaltung	164
4.4.7	Vereinfachtes Zeigerdiagramm des Starkstromtransformators	165
4.4.8	Kapp-Diagramm	166
4.4.9	Verluste und Wirkungsgrad des Transformators	167
4.4.10	Spartransformator	168
4.5	<i>Dreiphasenstrom</i>	169
4.5.1	Erzeugung des Dreiphasenstromes	169
4.5.2	Arten der Verkettung	170
4.5.2.1	Sternschaltung	170
4.5.2.2	Dreieckschaltung	171
4.5.3	Leistung des Drehstromes	172
4.5.4	Drehstromtransformator	173
4.5.4.1	Aufbau	173
4.5.4.2	Schaltungsarten	174
4.6	<i>Inversion komplexer Wechselgrößen</i>	175
4.6.1	Inversion eines einzelnen Zeigers	175
4.6.2	Wahl des Maßstabs	177

4.6.3	Inversion von Punkten, Geraden und Kreisen . . . . .	177
4.6.3.1	Punkt . . . . .	177
4.6.3.2	Geraden, durch den Nullpunkt laufend . . . . .	177
4.6.3.3	Geraden, parallel zu einer Achse und nicht durch den Nullpunkt laufend . . . . .	178
4.6.3.4	Geraden, nicht achsenparallel und nicht durch den Nullpunkt laufend . . . . .	179
4.6.3.5	Kreis, nicht durch den Nullpunkt laufend . . . . .	180
4.7	<i>Ortskurven</i> . . . . .	181
4.7.1	Definition . . . . .	181
4.7.2	Maßstäbe und Maßteilungen . . . . .	181
4.7.3	Ortskurven von Grundschaltungen . . . . .	182
4.7.3.1	$L$ in Reihe mit veränderlichem $R$ . . . . .	182
4.7.3.2	$R$ und $L$ in Reihe bei variabler Frequenz . . . . .	183
4.7.3.3	Reihenresonanz bei veränderlicher Frequenz . . . . .	185
4.7.3.4	Normierte Darstellung der Reihenresonanz . . . . .	185
4.7.3.5	$R$ und $L$ parallel bei variabler Frequenz . . . . .	187
4.7.4	Ortskurven gemischter Schaltungen . . . . .	187
4.7.4.1	Addition eines konstanten Widerstandes . . . . .	188
4.7.4.2	Nullpunktverschiebung der Ortskurve einer gemisch- ten Schaltung . . . . .	189
4.7.5	Konstruktion von Ortskurven mittels Wertetabelle . . . . .	190
<b>5</b>	<b>Signale und Systeme</b> . . . . .	<b>193</b>
5.1	<i>Signale</i> . . . . .	193
5.1.1	Begriffsbestimmung und Übersicht . . . . .	193
5.1.2	Periodische Signale mit konstanter Amplitude . . . . .	193
5.1.2.1	Merkmale . . . . .	193
5.1.2.2	Fourier-Reihen . . . . .	195
5.1.3	Nichtperiodische Signale mit zweiseitiger Begrenzung . . . . .	200
5.1.3.1	Merkmale . . . . .	200
5.1.3.2	Fourier-Transformation . . . . .	201
5.1.4	Nichtperiodische Signale mit einseitiger Begrenzung . . . . .	205
5.1.4.1	Merkmale . . . . .	205
5.1.4.2	Laplace-Transformation . . . . .	206
5.2	<i>Systeme</i> . . . . .	208
5.2.1	Begriffsbestimmung . . . . .	208
5.2.2	Lineare, zeitinvariante Systeme (LTI-Systeme) . . . . .	209
5.2.2.1	Systemreaktionen (Impulsantwort, Sprungantwort) . . . . .	209
5.2.2.2	Berechnung von Einschaltvorgängen mit der Laplace- Transformation . . . . .	210
5.2.2.3	Allgemeine Form der komplexen Übertragungsfunk- tion . . . . .	211
5.2.2.4	Pol-Nullstellen-Plan . . . . .	212
5.2.2.5	Amplituden- und Phasen-Frequenzgang . . . . .	213
5.2.3	Abtastsysteme . . . . .	215
5.2.3.1	Bedeutung der Abtastung für die digitale Signalverar- beitung . . . . .	215

	5.2.3.2	Ideale Abtastung	215
	5.2.3.3	Abtasttheorem	217
	5.2.3.4	Bandbegrenzung	217
5.3		<i>Elemente der digitalen Signalverarbeitung</i>	219
	5.3.1	Diskrete Signale	219
	5.3.2	Zeitdiskrete Systeme	220
	5.3.3	$z$ -Transformation	223
5.4		<i>Grundlagen digitaler Filter</i>	225
	5.4.1	Begriffsbestimmung	225
	5.4.2	FIR-Filter	226
	5.4.2.1	Einführung	226
	5.4.2.2	Fenster-Methode	228
	5.4.3	IIR-Filter	232
	5.4.3.1	Einführung	232
	5.4.3.2	Bilineare Transformation	235
	5.4.3.3	Frequenztransformationen	237
<b>6</b>		<b>Bauelemente der Elektronik</b>	<b>239</b>
6.1		<i>Begriffsbestimmung und Übersicht</i>	239
6.2		<i>Leiterplatten</i>	240
	6.2.1	Halbzeuge	240
	6.2.2	Entwurf und Herstellung von Leiterplatten	241
	6.2.3	Leiterplatten-Montagetechniken	243
6.3		<i>Die internationalen E-Reihen</i>	244
6.4		<i>Widerstände</i>	245
	6.4.1	Der Widerstand als Bauelement	245
	6.4.2	Festwiderstände	246
	6.4.3	Einstellwiderstände	248
6.5		<i>Kondensatoren</i>	248
	6.5.1	Kenngrößen	248
	6.5.2	Technische Kondensatoren	249
	6.5.3	Kondensatoren mit veränderbarer Kapazität	250
6.6		<i>Spulen</i>	251
	6.6.1	Kenngrößen	251
	6.6.2	Technische Spulen	251
6.7		<i>Physikalische Grundlagen der Halbleiter</i>	252
	6.7.1	Reine Halbleiter	252
	6.7.2	Dotierte Halbleiter	254
	6.7.3	pn-Übergänge	255
	6.7.3.1	Wirkprinzip	255
	6.7.3.2	Strom-Spannungs-Kennlinie des pn-Übergangs	257
	6.7.3.3	Kleinsignalverhalten des pn-Übergangs	259
	6.7.3.4	Schaltverhalten des pn-Übergangs	259
	6.7.3.5	Thermisches Verhalten des pn-Übergangs	260
	6.7.3.6	Herstellungsverfahren für pn-Übergänge	261
6.8		<i>Halbleiterdioden</i>	262
	6.8.1	Gleichrichter- und Schaltioden	262
	6.8.2	PIN- und PSN-Dioden	263
	6.8.3	Schottky-Dioden	264

6.8.4	Heterodioden	265
6.8.5	Z-Dioden	266
6.8.6	Tunneldioden	268
6.8.7	Backwarddioden	269
6.8.8	Kapazitätsdioden	270
6.8.9	Spezielle Diodenarten	270
6.9	<i>Bipolare Transistoren</i>	271
6.9.1	Aufbau und Wirkprinzip	271
6.9.2	Grundsaltungen des Transistors	275
6.9.3	Strom-Spannungs-Kennlinie des Transistors	275
6.9.3.1	Kennlinienfelder in Emitterschaltung	275
6.9.3.2	Arbeitspunkteinstellung	277
6.9.3.3	Übersteuerungsgrenze und Sättigungsspannung	278
6.9.4	Kleinsignalverhalten des Transistors	279
6.9.5	Transistorkennwerte und -grenzwerte	282
6.9.5.1	Stromverstärkungsgruppen	282
6.9.5.2	Restströme des Transistors	282
6.9.5.3	Temperaturabhängigkeit der Kennwerte	282
6.9.6	Anwendungen bipolarer Transistoren	284
6.9.6.1	Elektronischer Schalter	284
6.9.6.2	Kleinsignalverstärker	287
6.10	<i>Feldeffekttransistoren (FET)</i>	289
6.10.1	Übersicht	289
6.10.2	Strom-Spannungs-Kennlinie	292
6.10.3	Kleinsignalverhalten	295
6.10.4	Effekte bei integrierten MOSFET	296
6.10.5	Thermisches Verhalten	297
6.10.6	Anwendungen von Feldeffekttransistoren	297
6.10.6.1	FET als elektronischer Schalter	297
6.10.6.2	Steuerbarer Widerstand	299
6.10.6.3	Kleinsignalverstärker	299
6.10.6.4	Konstantstromquellen	300
6.10.6.5	Leistungs-Feldeffekttransistoren	301
6.10.6.6	Spezielle Feldeffekttransistorarten	302
6.11	<i>Thyristorbaulemente</i>	307
6.11.1	Überblick	307
6.11.2	Einrichtungs-Thyristordiode	307
6.11.3	Zweirichtungs-Thyristordiode und Diac	308
6.11.4	Einrichtungs-Thyristortriode	310
6.11.4.1	Technologischer Aufbau	310
6.11.4.2	Wirkungsweise	310
6.11.5	Zweirichtungs-Thyristortriode	312
6.11.6	Anwendungen von Thyristor und Triac	313
6.11.6.1	Leistungsschalter für Wechsel- und Gleichstrom	313
6.11.6.2	Elektronische Lastrelais	315
6.11.6.3	Störschutz und Schutzbeschaltung	316
6.11.7	Spezielle Thyristoren	317

6.12	<i>Optoelektronische Bauelemente</i>	317
6.12.1	Übersicht	317
6.12.2	Fotometrische Beziehungen	318
6.12.3	Lichtempfindliche Fotohalbleiter	320
6.12.3.1	Fotowiderstände	320
6.12.3.2	Fotodioden	321
6.12.3.3	Fotoelemente und Solarzellen	322
6.12.3.4	Fototransistoren	323
6.12.3.5	Fotothyristoren	324
6.12.4	Lichtemittierende Fotohalbleiter	324
6.12.4.1	Lumineszenzeffekt in Halbleitern	324
6.12.4.2	Lumineszenzdioden (LED)	325
6.12.4.3	LED-Anzeigesysteme (Display-Bauelemente)	325
6.12.4.4	Halbleiter-Injektionslaser	326
6.12.5	Optoelektronische Koppelemente	326
6.12.6	Feldeffekt-Anzeigeelemente	327
6.13	<i>Halbleitersensoren</i>	327
6.13.1	Temperatursensoren	328
6.13.1.1	Heißleiter	328
6.13.1.2	Kaltleiter	329
6.13.1.3	Thermoelemente	330
6.13.2	Drucksensoren	332
6.13.2.1	Piezoresistive Wandler	332
6.13.2.2	Piezoelektrische Wandler	333
6.13.3	Magnetfeldsensoren	334
6.13.3.1	Feldplatten	334
6.13.3.2	Hall-Generatoren	334
6.13.3.3	Reed-Kontakte	335
6.13.4	Feuchtesensoren	336
6.13.5	Gassensoren	337
6.13.6	Fotosensoren	338
6.13.7	Auswerteprinzipien und Messschaltungen für Sensoren	338
6.14	<i>Integrierte Schaltungen</i>	339
6.14.1	Übersicht	339
6.14.2	Filmschaltkreise	340
6.14.3	Festkörperschaltkreise	341
6.14.3.1	Grundlagen	341
6.14.3.2	Herstellungszyklen	341
6.14.3.3	Schaltkreistechnologien	342
6.14.3.4	Schaltkreisentwurf	346
6.14.4	Schaltkreisgehäuse	347
6.15	<i>Kühlung von Halbleiterbauelementen</i>	348
6.16	<i>Rauschen elektronischer Bauelemente</i>	350
6.16.1	Grundbeziehungen und Widerstandsrauschen	350
6.16.2	Äquivalenter Rauschwiderstand	351
6.16.3	Rauschzahl und Rauschmaß	351
6.16.4	Rauschen von Feldeffekttransistoren	351
6.16.5	Rauschen bipolarer Transistoren	352

---

<b>7</b>	<b>Analoge Schaltungen</b>	<b>354</b>
7.1	<i>Begriffsbestimmung</i>	354
7.2	<i>Analysemethoden</i>	356
7.2.1	Vierpolanalyse (Zweitoranalyse)	356
7.2.1.1	Rechnen mit Vierpolen	357
7.2.1.2	Widerstände und Übertragungsfaktoren	361
7.2.1.3	Wellenbezogene Parameter	363
7.2.2	Knotenspannungsanalyse	365
7.2.3	Computergestützte Netzwerk-Analysen	367
7.3	<i>Aktive Grundsaltungen</i>	369
7.3.1	Begriffsbestimmung	369
7.3.2	Gegengekoppelte Schaltungen	370
7.3.2.1	Begriff der Rückkopplung	370
7.3.2.2	Gegenkopplungsmodelle	371
7.3.2.3	Gegenkopplungseffekte	373
7.3.3	Kopplungsarten bei mehrstufigen Verstärkern	375
7.3.3.1	Grenzfrequenz bei RC-Kopplung	375
7.3.3.2	Drift bei direkter Kopplung	376
7.3.4	Differenzverstärker	378
7.3.4.1	Eigenschaften der Grundsaltung	378
7.3.4.2	Stromspiegel	380
7.3.5	Leistungsendstufen	382
7.3.5.1	Begriffsbestimmung	382
7.3.5.2	Grundsaltungen	383
7.4	<i>Operationsverstärker</i>	386
7.4.1	Begriffsbestimmung und Übersicht	386
7.4.2	Kenngößen	388
7.4.2.1	Statische Kenngößen	388
7.4.2.2	Offset- und Driftkenngößen	389
7.4.2.3	Dynamische Kenngößen	390
7.4.2.4	Kompensationsmaßnahmen	391
7.4.3	Grundsaltungen mit Operationsverstärkern	394
7.4.3.1	Verstärkergrundsaltungen	394
7.4.3.2	Verstärkerschaltungen mit speziellen Eigenschaften	395
7.4.3.3	Konstantstromquellen	396
7.4.3.4	Analogrechenschaltungen	397
7.4.3.5	Komparatoren	400
7.5	<i>Filter</i>	401
7.5.1	Übersicht	401
7.5.2	Aktive RC-Filter	402
7.5.2.1	Tiefpässe	403
7.5.2.2	Hochpässe	406
7.5.2.3	Bandpässe (Selektivfilter)	407
7.5.2.4	Hinweise zu Filtern höherer Ordnung	408
7.5.3	SC-Filter	408
7.6	<i>Oszillatoren</i>	409
7.6.1	Begriffsbestimmung	409
7.6.2	RC-Oszillatoren	410

7.6.3	Quarzoszillatoren	412
7.6.3.1	Elektrische Eigenschaften des Quarzes	412
7.6.3.2	Hinweise zu einfachen Oszillatoren	414
7.7	<i>Analog/Digital- und Digital/Analog-Umsetzer</i>	414
7.7.1	Analog/Digital-Umsetzer	416
7.7.1.1	Parallelverfahren	416
7.7.1.2	Wägeverfahren	417
7.7.1.3	Abtast- und Halteschaltung	419
7.7.1.4	Zählverfahren	421
7.7.1.5	Hinweise zu weiteren Umsetzverfahren	422
7.7.2	Digital/Analog-Umsetzer	424
7.7.2.1	Prinzip der Parallelumsetzung	425
7.7.2.2	Umsetzverfahren mit $R$ - $2R$ -Netzwerk	426
7.7.2.3	Analogschalter	427
<b>8</b>	<b>Digitale Schaltungen</b>	<b>429</b>
8.1	<i>Begriffsbestimmung</i>	429
8.2	<i>Grundlagen der Schaltalgebra</i>	431
8.2.1	Logische Funktionen	431
8.2.2	Rechenregeln	433
8.2.3	Minimierung	436
8.3	<i>Logische Grundschaltungen</i>	439
8.3.1	Logische Pegel	439
8.3.2	Integrierte Standard-Schaltkreise	440
8.3.2.1	TTL-Schaltkreise	441
8.3.2.2	CMOS-Schaltkreise	447
8.4	<i>Ausgewählte Bausteine für Schaltnetze</i>	451
8.4.1	Komparatoren	452
8.4.2	Multiplexer und Demultiplexer	453
8.4.3	Codeumsetzer	455
8.4.4	Addierer und Subtrahierer	457
8.5	<i>Elementare Kippschaltungen</i>	461
8.5.1	Begriffsbestimmung und Übersicht	461
8.5.2	Bistabile Kippschaltungen (Flipflop)	462
8.5.2.1	Ungetaktete Flipflops	463
8.5.2.2	Zustandsgesteuerte Flipflops	465
8.5.2.3	Flankengesteuerte Flipflops	467
8.5.3	Schmitt-Trigger	469
8.5.4	Monostabile Kippschaltungen	471
8.5.5	Astabile Kippschaltungen	472
8.6	<i>Komplexe Bausteine für digitale Systeme</i>	474
8.6.1	Zähler	474
8.6.1.1	Asynchrone Zähler	475
8.6.1.2	Synchrone Zähler	476
8.6.1.3	Integrierte Zähler	477
8.6.2	Frequenzteiler	479
8.6.2.1	Asynchrone Frequenzteiler	480
8.6.2.2	Synchrone Frequenzteiler	480

8.6.3	Register	482
8.6.3.1	Begriffsbestimmung und Überblick	482
8.6.3.2	Elementare Schieberegister	483
8.6.3.3	Integrierte Schieberegister	484
8.7	<i>Halbleiterspeicher</i>	486
8.7.1	Begriffsbestimmung und Übersicht	486
8.7.2	Schreib-Lese-Speicher (RAM)	489
8.7.2.1	Statische RAM	490
8.7.2.2	Dynamische RAM	493
8.7.3	Festwertspeicher (ROM)	495
8.7.3.1	Programmierbare ROM	496
8.7.3.2	Reprogrammierbare ROM	497
8.7.4	Kombinierte Speicherschaltungen	501
8.8	<i>Anwenderspezifische Schaltkreise (ASIC)</i>	503
8.8.1	Merkmale von ASIC-Strukturen	504
8.8.2	Einfache PLD	505
8.8.2.1	PAL-Grundstrukturen	505
8.8.2.2	Reprogrammierbare PLD	508
8.8.2.3	Komplexe PLD (CPLD)	510
8.8.2.4	Feldprogrammierbare Gate Array (FPGA)	511
8.9	<i>Ergänzende Informationen</i>	514
8.9.1	Code-Arten	514
8.9.2	Zahlensysteme	516
8.9.3	Schaltkreis-Listen	518
8.9.4	Hardware-Beschreibungssprachen	519
8.9.4.1	VHDL	520
8.9.4.2	Verilog	522
<b>9</b>	<b>Stromversorgungsschaltungen</b>	<b>525</b>
9.1	<i>Grundfunktionen konventioneller Netzteile</i>	525
9.1.1	Gleichrichtung	526
9.1.1.1	Einweggleichrichtung	526
9.1.1.2	Zweiweggleichrichtung	527
9.1.1.3	Gleichrichtung mit Spannungsvervielfachung	529
9.1.2	Glättung und Siebung	530
9.1.2.1	Glättung mit Ladekondensator	531
9.1.2.2	Siebung mit frequenzabhängigen Bauelementen	534
9.2	<i>Spannungsstabilisierung</i>	535
9.2.1	Begriffsbestimmung	535
9.2.2	Erzeugung von Referenzspannungen	536
9.2.2.1	Diskrete Schaltungen mit Z-Dioden	536
9.2.2.2	Integrierte Referenzspannungsquellen	538
9.2.3	Stetige Gleichspannungsregelung	539
9.2.3.1	Grundsaltung aus diskreten Bauelementen	539
9.2.3.2	Integrierte Regler mit einstellbarer Spannung	540
9.2.3.3	Integrierte Festspannungsregler	541
9.2.4	Unstetige Regelung mit Schaltregler	542
9.2.4.1	Begriffsbestimmung und Übersicht	542
9.2.4.2	Gleichspannungswandler	543

	9.2.4.3	Wandler für Netzbetrieb	548
	9.2.4.4	Integrierte Ansteuerschaltungen	552
<b>10</b>		<b>Elektrische Maschinen</b>	<b>554</b>
10.1		<i>Allgemeine Vorgaben</i>	554
10.1.1		Klassifikation	554
	10.1.1.1	Leistungsbereich	554
	10.1.1.2	Leistungsangaben	555
	10.1.1.3	Gliederung	556
10.1.2		Normen	558
	10.1.2.1	Bauformen und Schutzarten	558
	10.1.2.2	Betriebsarten	559
	10.1.2.3	Baugrößen	560
10.2		<i>Gleichstrommaschinen</i>	561
10.2.1		Aufbau und Wirkungsweise	561
	10.2.1.1	Bauteile	561
	10.2.1.2	Wirkungsweise	562
	10.2.1.3	Anker- und Erregerwicklung	564
10.2.2		Betriebsverhalten	565
	10.2.2.1	Ankerrückwirkung	565
	10.2.2.2	Fremderregte Gleichstrommotoren	567
	10.2.2.3	Reihenschlussmotoren	567
10.2.3		Drehzahlsteuerung	568
	10.2.3.1	Ankervorwiderstand	568
	10.2.3.2	Feldschwächung	569
	10.2.3.3	Spannungsabsenkung	570
	10.2.3.4	Stromrichterbetrieb	571
	10.2.3.5	Bremsverfahren	572
10.3		<i>Drehstrom-Asynchronmaschinen</i>	573
10.3.1		Aufbau und Wirkungsweise	573
	10.3.1.1	Bauteile	573
	10.3.1.2	Drehfeld und Drehmoment	576
10.3.2		Betriebsverhalten	577
	10.3.2.1	Ersatzschaltung und Zeigerbild	577
	10.3.2.2	Stromortskurve	579
	10.3.2.3	Drehmoment	582
10.3.3		Drehzahlsteuerung	584
	10.3.3.1	Frequenzänderung	584
	10.3.3.2	Polumschaltung	586
	10.3.3.3	Läuferwiderstände	587
	10.3.3.4	Absenken der Ständerspannung	588
	10.3.3.5	Untersynchrone Stromrichteraskade (USK)	589
10.3.4		Anlauf- und Bremsverfahren	590
	10.3.4.1	Anlasstechniken	590
	10.3.4.2	Bremsverfahren	593
10.3.5		Asynchronmotoren für Wechselstrombetrieb	596
	10.3.5.1	Kondensatormotoren	596
	10.3.5.2	Spaltpolmotoren	597
	10.3.5.3	Steinmetz-Schaltung für Drehstrommotoren	598

10.4	Synchronmaschinen . . . . .	599
10.4.1	Aufbau und Wirkungsweise . . . . .	600
10.4.1.1	Bauteile . . . . .	600
10.4.1.2	Erregersysteme . . . . .	601
10.4.1.3	Spannungsinduktion . . . . .	603
10.4.2	Betriebsverhalten der Vollpolmaschine . . . . .	604
10.4.2.1	Inselbetrieb . . . . .	604
10.4.2.2	Stoß- und Dauerkurzschlussstrom . . . . .	607
10.4.2.3	Netzbetrieb . . . . .	607
10.4.3	Spezielle Bauformen und Betriebsarten . . . . .	612
10.4.3.1	Schenkelpolmaschinen . . . . .	612
10.4.3.2	Stromrichter gespeiste Synchronmaschinen . . . . .	616
10.4.3.3	Dauermagneterregte Servomotoren (E-Auto) . . . . .	617
10.4.3.4	Linearmotoren . . . . .	619
10.5	Kleinmaschinen . . . . .	622
10.5.1	Batterieversorgte Gleichstrommaschinen . . . . .	623
10.5.2	Universalmotoren . . . . .	624
10.5.3	Schrittmotoren . . . . .	628
10.5.4	Elektronikmotor . . . . .	631
<b>Matlab-Programme . . . . .</b>		<b>633</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis zur Elektronik . . . . .</b>		<b>635</b>
<b>Formelzeichenverzeichnis . . . . .</b>		<b>639</b>
<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>		<b>647</b>
<b>Sachwortverzeichnis . . . . .</b>		<b>657</b>



# 1 Gleichstrom

## 1.1 Grundgrößen und Grundbegriffe

### 1.1.1 Elektrische Ladung

Alle elektrischen Erscheinungen beruhen auf der Anhäufung oder Bewegung *positiver* und *negativer elektrischer Ladungen*. Diese sind an die kleinsten stofflichen Teilchen (z. B. Elektronen oder Ionen) gebunden und üben auf andere, gleichfalls elektrisch geladene Körper Kraftwirkungen aus ( $\rightarrow$  2.1.6):

$\begin{array}{l} \text{Gleichartig} \\ \text{Ungleichartig} \end{array} \text{ geladene Körper} \begin{array}{l} \text{stoßen einander ab} \\ \text{ziehen einander an} \end{array}$
---

- *Hinweis:* SI-Einheit der elektrischen Ladung:  $[Q] = \text{C}$  (Coulomb) =  $\text{A} \cdot \text{s}$  (Amperesekunde).

Jede **elektrische Ladung** ist ein ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung  $e$ .

$$e = \pm 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Elektronen enthalten die negative Elementarladung  $-e$ , während Protonen die positive Elementarladung  $+e$  tragen. Elektronenüberschuss auf einem Körper verursacht seine negative, Elektronenmangel dagegen seine positive Ladung.

### 1.1.2 Elektrischer Strom

**Augenblickswert der Stromstärke.** Das Fließen eines elektrischen Stromes bedeutet die kontinuierliche oder schwingende Bewegung von Ladungsträgern in einem Leiter. Der den Leiterquerschnitt in einer kurzen Zeit  $dt$  durchfließende Ladungsanteil  $dQ$  ist der Augenblickswert der Stromstärke.

$$i = \frac{dQ}{dt} \quad (1.1)$$

**Gleichstrom.** Bleibt die Stromstärke über einen längeren Zeitraum  $t$  konstant, so handelt es sich um einen Gleichstrom.

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1.2)$$

- *Hinweis:* SI-Einheit der Stromstärke:  $[I] = \text{A}$  (Ampere) (zur Definition  $\rightarrow$  2.4.3).

Der Richtungssinn des Stromes entspricht der Bewegungsrichtung der positiven Ladungen vom Pluspol zum Minuspol außerhalb der Spannungsquelle ( $\rightarrow$  Bild 1.1).

Die Ladungsträger selbst können sich entweder in dieser Richtung<sup>1)</sup> (z. B. positive Ladungen, verursacht durch Elektronenmangel) oder auch entgegengesetzt (z. B. Elektronen) in einem Metalldraht bewegen ( $\rightarrow$  Bild 1.2).

In Elektrolyten und Gasen erfolgt die Stromausbreitung durch elektrisch geladene Ionen.

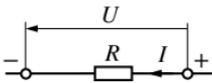


Bild 1.1 Richtungssinn des Stromes

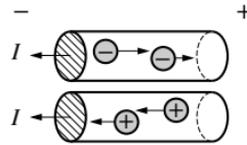


Bild 1.2 Bewegungsrichtung positiver und negativer Ladungsträger

### 1.1.3 Elektrische Spannung und Potenzial

#### Quellenspannung

Elektrische Ladungen  $Q$  mit unterschiedlichen Vorzeichen lassen sich durch äußere Energiezufuhr  $W_{zu}$  voneinander trennen.

Die Trennung elektrischer Ladungen ist die Ursache für das Auftreten einer elektrischen **Quellenspannung**  $U_q$  zwischen den Polen der entstehenden Spannungsquelle ( $\rightarrow$  Tabelle 1.1).

$$U_q = \frac{W_{zu}}{Q} \quad (1.3)$$

Die Quellenspannung ist vom Pluspol zum Minuspol der Spannungsquelle gerichtet und dem angetriebenen Strom entgegengerichtet.

#### Spannungsabfall

In umgekehrter Weise wird beim Fließen des Stromes im Leiter die Energie  $W_{ab}$  wieder frei, meist in Form von Wärme. Zwischen den betrachteten Leiterpunkten besteht dann der Spannungsabfall:

$$U = \frac{W_{ab}}{Q} \quad (1.4)$$

<sup>1)</sup> Aus der Ionenbewegung bei der Elektrolyse abgeleitet.

Tabelle 1.1 Erzeugen von Quellenspannungen

Physikalische Ursache	Vorgang	Anwendung
Elektronenaustausch bei chemischen Reaktionen	chemische Veränderungen der Elektroden	Batterien, Akkumulatoren
Induktionsvorgänge in festen Leitern	Bewegung von Leitern im Magnetfeld	Dynamomaschine
Induktionsvorgänge in Plasmen	Bewegung von Flammgasen im Magnetfeld	magneto hydrodynamischer (MHD-)Generator
Thermoelektrischer Seebeck-Effekt	Erwärmen der Kontaktstellen zwischen verschiedenen Metallen	Thermoelement
Piezoelektrischer Effekt	mechanischer Druck auf polare Kristalle	Dicken- und Dehnungsschwinger
Innerer Fotoeffekt	Lichteinstrahlung in Halbleiterkombinationen	Solarzelle

Der Spannungsabfall hat den gleichen Richtungssinn wie der fließende Strom ( $\rightarrow$  Bild 1.1).

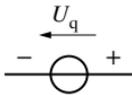


Bild 1.3 Ideale Spannungsquelle

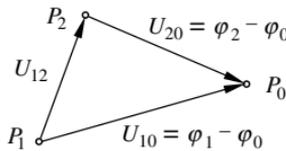


Bild 1.4 Potenzial und Spannung

Die **elektrische Spannung**  $U$  ist der Quotient aus der zur Verschiebung der Ladung  $Q$  erforderlichen Arbeit  $W_{zu}$  und dieser Ladung.

► *Hinweis:* SI-Einheit der elektrischen Spannung:  $[U] = \text{V}$  (Volt).

## Potenzial

Das **Potenzial**  $\varphi_1$  kennzeichnet die zwischen einem Punkt  $P_1$  des elektrischen Feldes oder Leitersystems und einem willkürlichen Bezugspunkt  $P_0$  bestehende elektrische Spannung.

Das Potenzial ist positiv, wenn für den Transport positiver Ladung von einem Raumpunkt  $P_1$  oder  $P_2$  zum Bezugspunkt  $P_0$  Arbeit aufzuwenden ist.

Haben zwei Punkte  $P_1$  und  $P_2$  unterschiedliches Potenzial ( $\rightarrow$  Bild 1.4), so besteht zwischen ihnen die Potentialdifferenz bzw. die Spannung:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$$

(1.5)

Die Spannung von  $P_1$  gegen  $P_2$  ist positiv, wenn für den Ladungstransport die zugeführte Arbeit überwiegt; d. h.,  $\varphi_1 > \varphi_2$ .

Die elektrische Spannung ist eine Potenzialdifferenz. Ströme fließen außerhalb von Quellen von Stellen höheren Potentials zu Stellen niedrigeren Potentials.

### 1.1.4 Elektrischer Widerstand

#### Widerstand und Leitwert

In jedem Leiter wird die Bewegung der Ladungsträger durch seinen Widerstand  $R$  behindert:

$$R = \frac{U}{I} \quad (1.6)$$

Die Ursachen des elektrischen Widerstandes sind z. B. Störungen im exakten Aufbau des Kristallgitters in den Metallen und die unregelmäßigen Wärmeschwingungen der Atome.

► *Hinweis:* SI-Einheit des Widerstandes:  $[R] = \Omega$  (Ohm).

In manchen Fällen ist es zweckmäßiger, mit dem Leitwert zu rechnen, d. i. der reziproke Wert des Widerstandes:

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.7)$$

► *Hinweis:* SI-Einheit des Leitwertes:  $[G] = \text{S}$  (Siemens) =  $1/\Omega$ .

#### Spezifischer Widerstand

Der Widerstand  $R$  ist der Länge  $l$  des Leiters direkt und seinem Querschnitt  $A$  umgekehrt proportional:

$$R = \frac{\varrho l}{A} \quad (1.8)$$

Der Proportionalitätsfaktor  $\varrho$  ist der spezifische Widerstand ( $\rightarrow$  Tabelle 1.2).

► *Hinweis:* SI-Einheit des spezifischen Widerstandes:  $[\varrho] = \Omega \cdot \text{m} = 10^6 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ .

Der reziproke Wert des spezifischen Widerstandes wird als **elektrische Leitfähigkeit**  $\varkappa$  ( $\rightarrow$  Tabelle 1.2) bezeichnet.

Die *Messung* der elektrischen Leitfähigkeit  $\varkappa$  von Materialien lässt sich nach Gl. (1.8) auf eine Widerstandsmessung zurückführen. Diese erfolgt z. B. für

Tabelle 1.2 Werte des spezifischen Widerstandes, der Leitfähigkeit und von Temperaturkoeffizienten verschiedener Leiterwerkstoffe und 5%iger Elektrolyte bei  $\vartheta = 20^\circ\text{C}$

Material	Spezifischer elektrischer Widerstand $10^{-6} \frac{\rho}{\Omega \cdot \text{m}}$	Elektrische Leitfähigkeit $10^6 \text{ S/m}$	Temperaturkoeffizienten	
			$10^{-4} / \text{K}$	$10^{-6} / \text{K}^2$
<b>Widerstandslegierungen</b>				
Chromnickel (80 Ni, 20 Cr)	1,12	0,89	1,4	–
Konstantan (54 Cu, 45 Ni, 1 Mn)	0,50	2,0	–0,03	–
Manganin (86 Cu, 2 Ni, 12 Mn)	0,42	2,38	0,1 ... 0,2	0,4
Nickelin (54 Cu, 26 Ni, 20 Zn)	0,43	2,27	1,1	–
<b>Leiter- und Kontaktmaterial</b>				
Leitungsaluminium	0,0286	35,0	37	1,3
Gold	0,023	43,5	38 ... 40	0,5
Leitungskupfer	0,0178	56,2	39	0,6
Silber	0,0165	60,6	38	0,7
Wolfram	0,055	18,2	48,2	1
Zinn	0,12	8,3	42 ... 46	6
<b>Widerstandsschichtmaterial</b>				
Platin	0,10 ... 0,11	9,1 ... 10,0	39	0,6
Palladium	0,102	9,8	37	–
Kohle	40 ... 100	0,01 ... 0,025	–3,8 ... – 4,0	–
<b>Sonstige Metalle</b>				
Eisen	0,1 ... 0,15	6,67 ... 10,0	65,1 ... 65,7	6
Quecksilber	0,968	1,03	8 ... 9	1,2
Zink	0,061	16,4	41,9	2
<b>Elektrolyte</b>				
KOH	0,208	4,80	–200	–
NaCl	0,724	13,82	–200	–
CuSO <sub>4</sub>	0,020	50,40	–200	–

Elektrolytflüssigkeiten in Messzellen, die mit einer Kochsalzlösung bekannter Leitfähigkeit kalibriert werden. Polarisationseffekte der Elektroden lassen sich durch Nutzung von Wechselstrom mit Frequenzen bis zu mehreren kHz ausschalten.

$$\boxed{\kappa = \frac{1}{\rho}} \quad (1.9)$$

► *Hinweis:* SI-Einheit der Leitfähigkeit:  $[\kappa] = \text{S/m}$  (Siemens/Meter) =  $1/(\Omega \cdot \text{m})$ .

## Widerstand und Temperatur

Der spezifische Widerstand ist als Materialkonstante mehr oder weniger temperaturabhängig.

Als **Temperaturkoeffizient**  $\alpha$  gilt die relative Widerstandsänderung  $\Delta R/R_{20}$  gegenüber der auf  $20^\circ\text{C}$  bezogenen tatsächlichen Temperaturänderung  $\Delta\vartheta$ :

$$\boxed{\alpha = \frac{\Delta R}{\Delta\vartheta R_{20}}} \quad (1.10)$$

$R_{20}$  Widerstand bei der Temperatur  $\vartheta = 20^\circ\text{C}$

Demnach beträgt der Widerstand bei der beliebigen Temperatur  $\vartheta$ :

$$R = R_{20}(1 + \alpha\Delta\vartheta) = R_{20}[1 + \alpha(\vartheta - 20^\circ\text{C})] \quad (1.11)$$

Diese einfache lineare Beziehung gilt jedoch nur näherungsweise für bestimmte Werkstoffe und ist bei höheren Temperaturen durch den Ausdruck

$$R = R_{20}(1 + \alpha\Delta\vartheta + \beta\Delta\vartheta^2) \quad (1.12)$$

zu ersetzen, der die Kenntnis eines zweiten Temperaturkoeffizienten  $\beta$  voraussetzt ( $\rightarrow$  Tabelle 1.2).

► *Beachte:* Verschiedene Elektrolyte (elektrisch leitende Flüssigkeiten) und Halbleiter haben im Gegensatz zu Metallen einen negativen Temperaturkoeffizienten, d. h., ihr Widerstand nimmt mit steigender Temperatur ab. Für Messwiderstände werden Legierungen mit möglichst kleinem Temperaturkoeffizienten, wie z. B. Konstantan, verwendet.

## Supraleitung

**Supraleitung** definiert das sprunghafte Verschwinden des elektrischen Widerstandes unterhalb einer bestimmten Temperatur.

Verschiedene elektrische Leiter zeigen bei tiefen Temperaturen kein allmähliches, sondern ein sprunghaftes Verschwinden ihres Widerstandes. Die Sprungtemperatur  $T_s$  ( $\rightarrow$  Bild 1.5) ist materialabhängig ( $\rightarrow$  Tabelle 1.3). Bei