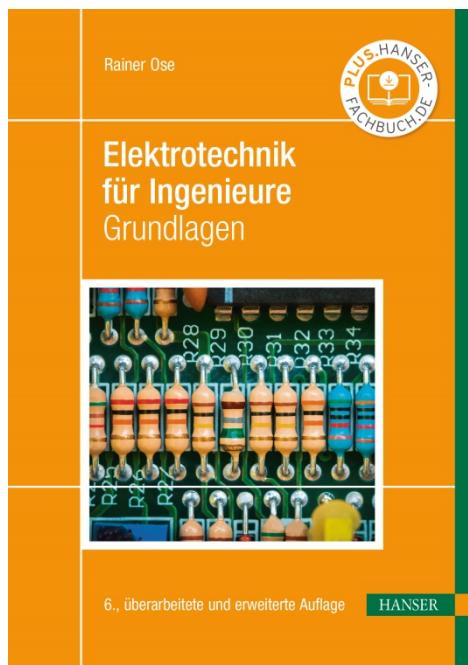


HANSER



Leseprobe

zu

„Elektrotechnik für Ingenieure“

von Rainer Ose

Print-ISBN: 978-3-446-46408-7

E-Book-ISBN: 978-3-446-46535-0

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-46408-7>
sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort zur 6. Auflage

Das vorliegende Lehrbuch gliedert sich in die drei klassischen Grundlagenbereiche:
Gleichstromlehre – Wechselstromtechnik – Elektrische und magnetische Felder.

Es ist als studienbegleitendes Material für Studierende aller technischen Studienrichtungen an Hochschulen/Fachhochschulen konzipiert. Im Vordergrund stehen Betrachtungen zu Vorgängen in elektrischen Stromkreisen aus der Sicht der Schaltungstechnik. Damit wird das Ziel verfolgt, das in den Vorlesungen „Grundlagen der Elektrotechnik“ vermittelte Grundlagenwissen in anwendungsbereiter Form für die nachfolgenden Lehrveranstaltungen bereitzustellen.

Die theoretischen Grundlagen werden zu jedem Kapitel so dargelegt, dass die Studierenden die Vorlesungsmitschrift und den eventuell versäumten Stoff in effektiver Form selbstständig aufarbeiten können. Dazu dienen u.a. Modelle und Analogien, die komplizierte Sachverhalte in möglichst einfacher und leicht verständlicher Form darlegen sollen. Zur Erhöhung der Anschaulichkeit wurden viele Aussagen zusätzlich aus Diagrammen, Prinzipskizzen und Ersatzschaltungen abgeleitet.

In jedem Kapitel befinden sich Lehrbeispiele zur Erklärung typischer Erscheinungen der Elektrotechnik sowie zur Demonstration von Berechnungsmethoden und -verfahren. Soweit sie nicht die Größenordnung eines dargelegten Sachverhalts verdeutlichen sollen, sind diese Lehrbeispiele in allgemeiner Form ausgeführt. Damit gelingt es den Anwendern, den Lösungsweg schrittweise nachzuvollziehen.

Die 6. Auflage entstand durch eine vollständige Überarbeitung und Erweiterung der 5. Auflage des Lehrbuchs. Alle Berechnungsbeispiele befinden sich jetzt in erweiterter Form in einem neu aufgelegten Übungsbuch. Die 6. Auflage enthält einen Anhang mit Übungsaufgaben und eine separate Formelsammlung. Alle Lösungen der Übungsaufgaben sind über das Internet zugänglich.

Wolfenbüttel, im August 2020

Rainer Ose

e-mail: r.ose@ostfalia.de

Hinweise zur Arbeit mit diesem Buch

Das vorliegende Lehrbuch sollte in Kombination mit dem Übungsbuch bearbeitet werden. Aus diesem Grund wurden zahlreiche Lehrbeispiele in das Lehrbuch und zusätzliche Übungsanteile in das neue Übungsbuch eingearbeitet. Machen Sie sich zunächst mit den theoretischen Grundlagen vertraut. Parallel dazu können Sie die Lehrbeispiele (Lehrbuch) und die Berechnungsbeispiele (Übungsbuch) durcharbeiten. Diese Beispiele tragen zur Erhöhung des Verständnisses für die betrachteten Stoffgebiete bei. Das gilt auch für die selbstständige Bearbeitung der Übungsaufgaben im Anhang.

• Lehrbeispiele:

Lehrbeispiele dienen dazu, das grundlegende Verständnis für den jeweils dargelegten Sachverhalt an einem einfachen und überschaubaren Beispiel zu entwickeln bzw. zu festigen. Sie werden im laufenden Text an den Stellen eingefügt, an denen es eventuell zusätzlichen Erklärungsbedarf gibt. Dazu zählen das Aufstellen allgemeiner Lösungsansätze und die Durchführung einfacher Berechnungen sowie die Vermittlung von Vorstellungen über ausgewählte Erscheinungen der Elektrotechnik.

• Übungsaufgaben: (Lösungen: https://www.ostfalia.de/cms/de/pws/ose/Buch_ET_6A/)

Im Anhang des Buches befinden sich Übungsaufgaben. Sie sollen von dem Studierenden möglichst selbstständig abgearbeitet werden. Übungsaufgaben werden im Sinne einer zielgerichteten Prüfungsvorbereitung mit der folgenden Kennzeichnung dem jeweiligen Grundlagenbereich zugeordnet:

ÜA_1 = Gleichstromlehre, ÜA_2 = Wechselstromtechnik und ÜA_3 = Felder.

Die meisten Beispiele und Übungsaufgaben können mit Simulationsprogrammen nachvollzogen werden. Entsprechende Hinweise zur Arbeit mit PSPICE findet man bei Bedarf in [11] – Kap. 1.

Inhaltsverzeichnis

I Gleichstromlehre

1	Elektrische Grundgrößen	12
1.1	Elektrische Ladung	12
1.2	Elektrische Stromstärke	13
1.3	Elektrische Spannung	16
1.4	Elektrischer Gleichstromkreis	17
1.5	Widerstände im elektrischen Stromkreis	20
1.5.1	Bemessungsgleichung	20
1.5.2	Temperaturabhängigkeit	21
1.5.3	Technische Ausführungsformen	22
2	Gesetze zur Berechnung elektrischer Stromkreise	23
2.1	Das OHMSche Gesetz	23
2.2	Die KIRCHHOFFschen Sätze	26
2.2.1	Maschensatz	26
2.2.2	Knotenpunktsatz	27
2.3	Energiesatz	28
3	Lineare elektrische Gleichstromkreise	31
3.1	Eigenschaften elektrischer Stromkreise	31
3.2	Regeln zur Berechnung passiver Zweipole	33
3.2.1	Reihenschaltung und Spannungsteilerregel	33
3.2.2	Parallelschaltung und Stromteilerregel	35
3.3	Berechnung passiver Zweipole	38
3.4	Elektrische Quellen	40
3.5	Lastfälle im Grundstromkreis	44
3.5.1	Leistung und Wirkungsgrad	44
3.5.2	Anpassungsfall	45
3.5.3	Diskussion von Lastfällen	47
3.5.4	Belasteter Spannungsteiler	49
4	Grundschaltungen der elektrischen Messtechnik	52
4.1	Messbereichserweiterung	52
4.2	Aufnahme von Kennlinien	54
4.2.1	Stromrichtige Messung	54
4.2.2	Spannungsrichtige Messung	55
4.3	Messgeräte mit Nullindikator	56
4.4	Allgemeine Berechnung von Brückenschaltungen	59
4.4.1	Allgemeine Umrechnung in eine Sternschaltung	59

4.4.2	Dreieck-Stern-Transformation	61
4.4.3	Stern-Dreieck-Transformation	63
5	Verfahren zur Berechnung linearer Netzwerke	65
5.1	Netzwerkberechnung nach KIRCHHOFF	65
5.2	Der HELMHOLTZsche Überlagerungssatz	68
5.3	Zweipoltheorie	70
5.3.1	Spannungsquellen-Ersatzschaltung	71
5.3.2	Stromquellen-Ersatzschaltung	73
5.4	Analyseverfahren	76
5.4.1	Umlaufanalyse	76
5.4.2	Knotenanalyse	80
6	Stromkreise mit nichtlinearen Bauelementen	84
6.1	Strom-Spannungs-Kennlinie	84
6.2	Ausgewählte Kennlinien nichtlinearer Bauelemente	85
6.3	Konstruktion von Ersatz-Kennlinien	89
6.3.1	Ersatz-Kennlinien von Elementarschaltungen	89
6.3.2	Idealisierte Kennlinien und Ersatzschaltungen	90
6.4	Grafische Bestimmung des Arbeitspunktes	91
II	Wechselstromtechnik	
7	Beschreibung von Wechselgrößen	94
7.1	Periodische Zeitfunktionen	94
7.2	Sinusförmige Zeitfunktionen	95
7.3	Mittelwerte periodischer Zeitfunktionen	97
7.3.1	Arithmetischer Mittelwert	97
7.3.2	Gleichrichtwert	97
7.3.3	Effektivwert	99
7.4	Überlagerung sinusförmiger Zeitfunktionen	101
8	Widerstände im Wechselstromkreis	106
8.1	Elementare Zweipole	106
8.1.1	Ohmscher Widerstand	106
8.1.2	Induktiver Blindwiderstand	107
8.1.3	Kapazitiver Blindwiderstand	109
8.2	Reale Bauelemente	110
8.2.1	Reale Spule	110
8.2.2	Realer Kondensator	112
8.3	Elementarschaltungen	113

8.4	Zeigerbilder	115
8.4.1	Gemischte RLC-Kombinationen	115
8.4.2	Brückenschaltungen	118
9	Berechnung von Stromkreisen bei sinusförmiger Einspeisung	120
9.1	Berechnung im Zeitbereich	120
9.2	Berechnung im Bildbereich	122
9.2.1	Zeigerdarstellung	122
9.2.2	Rechenregeln	123
9.2.3	Transformationsregeln	126
9.2.4	Komplexer Widerstand	128
9.2.5	Komplexer Leitwert	130
9.3	Gemischte Schaltungen im Wechselstromkreis	131
9.3.1	Rechnerische Lösung im Bildbereich	131
9.3.2	Grafische Lösung im Bildbereich	135
9.3.3	Variation von Betriebsparametern	137
9.4	Spezielle Wechselstromschaltungen	141
9.5	Wechselstrom-Brücken	143
9.5.1	Induktivitätsmessbrücke	145
9.5.2	Kapazitätsmessbrücke	146
9.5.3	Phasendrehbrücke	147
9.6	Verfahren zur Netzwerkberechnung	149
9.6.1	Überlagerungsverfahren	149
9.6.2	Zweipoltheorie	151
9.6.3	Analyseverfahren	153
10	Frequenzabhängigkeit der Wechselstromkreise	156
10.1	Komplexer Frequenzgang	156
10.2	Tief- und Hochpässe	157
10.3	Schwingkreise	162
10.4	Übertragungsvierpole	174
11	Leistungsbetrachtungen im Wechselstromkreis	179
11.1	Zeitfunktion der Leistung	179
11.2	Wirk-, Blind- und Scheinleistung	181
11.3	Komplexe Leistung	182
11.4	Leistungsfaktor und seine Verbesserung	184
12	Dreiphasensysteme	188
12.1	Symmetrischer Drehstromgenerator	188
12.2	Spannungen und Ströme	189
12.3	Belastungsarten	193
12.4	Leistung im Dreiphasensystem	197

III Elektrische und magnetische Felder

13	Feldbegriff	202
13.1	Begriffsbestimmung	202
13.1.1	Begriff „Feldpunkt“	202
13.1.2	Begriff „Rechtssystem“	203
13.2	Einteilung der Felder	204
13.3	Eigenschaften elektrischer und magnetischer Felder	206
14	Stationäres elektrisches Strömungsfeld	209
14.1	Eigenschaften des elektrischen Strömungsfeldes	209
14.2	Beschreibung des stationären elektrischen Strömungsfeldes	214
14.2.1	Integrale Größen	214
14.2.2	Ortsbezogene Größen	214
14.2.3	Maschen- und Knotenpunktsatz im Strömungsfeld	219
14.2.4	Überlagerung elektrischer Strömungsfelder	222
14.3	Berechnung elektrischer Strömungsfelder	222
14.3.1	Homogene und einfache inhomogene Strömungsfelder	222
14.3.2	Radialsymmetrische Strömungsfelder	224
14.4	Erderanordnungen	229
14.4.1	Halbkugelerder	229
14.4.2	Vollkugelerder	233
15	Elektrostatisches Feld	238
15.1	Eigenschaften des elektrostatischen Feldes	238
15.2	Erscheinungsformen der Ladung	239
15.3	Beschreibung des elektrostatischen Feldes	241
15.3.1	Integrale Größen	241
15.3.2	Ortsbezogene Größen	243
15.4	Berechnung elektrostatischer Felder	245
15.4.1	Homogene und einfache inhomogene elektrostatische Felder	245
15.4.2	Elektrostatische Felder im geschichteten Dielektrikum	246
15.4.3	Radialsymmetrische elektrostatische Felder	249
15.4.4	Überlagerung elektrostatischer Felder	252
15.5	Energie und Kräfte im elektrostatischen Feld	255
15.5.1	Elektrostatisches Feld als Energiespeicher	255
15.5.2	COULOMBSches Gesetz	256
15.5.3	Kraft auf Trennflächen	257
15.5.4	Influenz und Polarisation	260

16	Elektrisches Verhalten des Kondensators	262
16.1	Regeln zur Berechnung von Kondensatorschaltungen	262
16.1.1	Reihenschaltung und kapazitiver Spannungsteiler	262
16.1.2	Parallelschaltung und Ladungsteiler	265
16.1.3	Gemischte Kondensatorschaltungen	268
16.2	Schaltvorgänge in RC-Kombinationen	269
16.2.1	Ladevorgang	269
16.2.2	Entladevorgang	271
16.2.3	Umschalten vorgeladener Kondensatoren	273
16.3	Ladungsausgleich	276
16.3.1	Ladungsbilanz	276
16.3.2	Ladungsausgleich in einer Reihenersatzschaltung	277
16.3.3	Ladungsausgleich in einer Parallelersatzschaltung	282
16.3.4	Kapazitive Netzwerke	283
17	Stationäres magnetisches Feld	286
17.1	Eigenschaften des magnetischen Feldes	286
17.2	Beschreibung des magnetischen Feldes	288
17.2.1	Integrale Größen	288
17.2.2	Ortsbezogene Größen	290
17.3	Magnetische Kreise	292
17.3.1	Magnetisierungskennlinie	292
17.3.2	Ersatzschaltungen für magnetische Kreise	295
17.3.3	Berechnung magnetischer Kreise	297
17.4	Magnetische Felder stromdurchflossener Leiter	301
17.5	Energie und Kräfte im magnetischen Feld	305
17.5.1	Magnetische Energie	305
17.5.2	LORENTZ-Kraft	308
17.5.3	Energiedichte und Induktivität einer Leitung	311
18	Zeitlich veränderliches magnetisches Feld	314
18.1	Elektromagnetische Induktion	314
18.1.1	Induktionsgesetz – Bewegungsinduktion	315
18.1.2	Induktionsgesetz – Ruheinduktion	319
18.2	Selbstinduktion und Induktivität	321
18.3	Gegeninduktion und Gegeninduktivität	322
18.4	Transformatorgleichungen	328
19	Elektrisches Verhalten der Spule	331
19.1	Zusammenschaltung von Induktivitäten	331
19.1.1	Unverkoppelte Induktivitäten	331
19.1.2	Verkoppelte Induktivitäten	332
19.1.3	Transformator-Ersatzschaltungen	333

19.2	Schaltvorgänge an Spulen	336
19.2.1	Einschaltvorgang	336
19.2.2	Ausschaltvorgang	338
19.2.3	Umschalten vormagnetisierter Spulen	340
19.3	Modelle zum Transformator	343
19.3.1	Idealer Transformator	343
19.3.2	Verlustloser und streuungsfreier Transformator	345
19.3.3	Realer Transformator	347
20	Wechselwirkungen	350
20.1	Ladungsbewegungen in leitfähigen und nichtleitfähigen Medien	350
20.1.1	Konvektionsstrom	350
20.1.2	Feldstrom	351
20.1.3	Diffusionsstrom	352
20.1.4	Verschiebungsstrom	354
20.2	MAXWELLSche Gleichungen	356
20.2.1	Durchflutungsgesetz	356
20.2.2	Induktionsgesetz	357
20.2.3	Wirbelfreies Quellenfeld	358
20.3	Grundlegende Zusammenhänge	359
Übungsaufgaben	360	
Literaturverzeichnis	383	
Sachwortverzeichnis	384	
Formelzeichenverzeichnis		

1 Elektrische Grundgrößen

1.1 Elektrische Ladung

Die elektrische Ladung ist eine grundlegende Eigenschaft der Materie. Alle physikalischen Zustände, Prozesse und Erscheinungen, die in der Elektrotechnik auftreten, werden durch ruhende oder bewegte elektrische Ladungen verursacht.

Elektrische Ladungen sind Bestandteil aller Atome. Um den positiv geladenen Atomkern (Protonen) existiert eine negativ geladene Atomhülle, die mit n Elektronen besetzt ist. Diese beiden Elementarteilchen tragen eine vorzeichenbehaftete Elementarladung e_0 .

- Proton: positive Ladung $+e_0$
- Elektron: negative Ladung $-e_0$

$$e_0 \approx 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ A}\cdot\text{s} \quad (1.1)$$

Ein Atom, dem aus seiner Umgebung keine Energie zugeführt wurde, erscheint für einen externen Beobachter elektrisch neutral. Die negative Ladung der Atomhülle hebt die positive Ladung des Atomkernes nach außen hin auf.

Bewegliche Ladungen entstehen in bestimmten Stoffen z.B. durch das Herauslösen von Elektronen aus der Atomhülle. Infolge der Zufuhr von Energie (z.B. Wärme) können Elektronen die Atomhülle verlassen und stehen dann als bewegliche Ladungsträger Θ zur Verfügung. Das Atom besitzt in diesem Fall einen Überschuss an positiven Ladungen \boxplus seines Kernes. Der Betrag jeder positiven oder negativen Ladung ist dann ein ganzzahliges Vielfaches n der Elementarladung e_0 und wird als Ladungsmenge Q bezeichnet. Für die Einheit gilt: $[Q] = 1 \text{ A}\cdot\text{s}$ (Amperesekunde).

$$|Q| = n \cdot e_0 \quad (1.2)$$

Jede Ladung versetzt den sie umgebenden Raum in einen besonderen Zustand. Sie bewirkt ein elektrisches Feld (Kap. 13 bis 15) und übt damit eine Kraft $F \sim Q$ auf benachbarte Ladungen aus. Nach dem COULOMBSchen Gesetz (Abschn. 15.5.2) stoßen sich Ladungen gleicher Polarität voneinander ab, und Ladungen mit verschiedenen Vorzeichen ziehen sich gegenseitig an.

Ladungen können ruhen oder sich infolge der Kraftwirkung eines elektrischen Feldes bewegen. Ob sie sich bewegen können, und wie schnell sie sich bewegen, hängt von der sie umgebenden Materie ab.

Ruhende Ladungen erhält man z.B. durch Ladungstrennung auf den Oberflächen zweier durch einen Nichtleiter getrennter Metallplatten (vgl. Kap. 15).

Bewegliche Ladungen können gerichtet transportiert werden, wenn ein äußeres elektrisches Feld auf sie einwirkt (z.B. durch Anlegen einer Spannung an einen Leiter).

Die negativen Ladungen führen dann eine Bewegung relativ zu den positiven Ladungen aus.

Der jeweilige Zustand einer Ladung (Ruhe oder Bewegung) wird demzufolge neben der von außen zugeführten Energie durch das stoffliche Medium bestimmt, in dem sich die Ladung befindet bzw. das von den betrachteten Atomen gebildet wird. Solche stofflichen Medien können fest, flüssig oder gasförmig sein.

Die weiteren Ausführungen in diesem Lehrbuch beziehen sich auf Festkörper, die in der Regel bei Raumtemperatur betrachtet werden. Man unterscheidet zwischen folgenden Stoffen:

• **Elektrischer Leiter:**

Unter einem Leiter versteht man einen leitfähigen Stoff, der eine große Anzahl von beweglichen Elektronen enthält (z.B. Kupfer mit der Konzentration $n_{\text{Cu}} \approx 9 \cdot 10^{22}$ Elektronen pro cm^3). In metallischen Leitern sind die Elektronen nur sehr schwach im Atomverband gebunden, können sich leicht lösen und stehen somit in großer Anzahl als bewegliche Ladungsträger für einen Ladungstransport zur Verfügung.

In den weiteren Ausführungen der folgenden Kapitel zur Gleichstromlehre (außer in Kap. 6) werden ausschließlich metallische Leiter betrachtet.

• **Halbleiter:**

In einem Halbleiter ist die Anzahl der beweglichen Ladungen pro Volumeneinheit im Vergleich zum metallischen Leiter um Größenordnungen von bis zu 10^{10} Elektronen / cm^3 geringer. Durch den zielgerichteten Einbau von geeigneten Fremdatomen (Dotierung) kann diese Anzahl jedoch um Größenordnungen verändert werden.

Auf Leitungsmechanismen in Halbleitern kann in diesem Lehrbuch leider nicht eingegangen werden. Es wird auf die weiterführende Literatur (z.B. [11]) verwiesen.

• **Nichtleiter (Isolator):**

Ein idealer Nichtleiter besitzt keine frei beweglichen Ladungsträger. Somit ist ein Ladungstransport nicht möglich.

Bei realen Nichtleitern sind die Elektronen fest im Gitterverband verankert, solange sie nicht entsprechend hohen Temperaturen oder starken elektrischen Feldern ausgesetzt werden. Obwohl es demzufolge keine idealen Nichtleiter geben kann, geht man in ausgewählten Fällen von dieser idealen Eigenschaft aus (z.B. Kap. 15).

1.2 Elektrische Stromstärke

Die elektrische Stromstärke i beschreibt einen Ladungstransport pro Zeiteinheit.

$$i = \frac{dQ}{dt} \quad (1.3)$$

Wenn sich die Menge der transportierten Ladung über der Zeit ändert, so handelt es sich um einen zeitlich veränderlichen Strom $i = f(t)$ mit der Einheit: $[i] = 1 \text{ A}$. Er wird im Weiteren,

wie auch alle anderen von der Zeit abhängigen Größen, mit einem Kleinbuchstaben i gekennzeichnet.

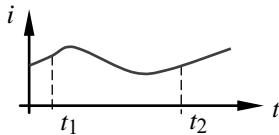


Bild 1.1: Zeitlich veränderlicher Strom

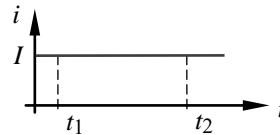


Bild 1.2: Gleichstrom

Betrachtet man einen veränderlichen Strom in einem zeitlichen Intervall (im Bild 1.1 von t_1 bis t_2), so ist die Fläche, die vom Funktionsverlauf $i = f(t)$ gegen die Zeitachse eingeschlossen wird, ein Maß für die in diesem Zeitraum Δt transportierte Ladungsmenge ΔQ :

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1 = \int_{t_1}^{t_2} i \cdot dt \quad (1.4)$$

Wird über der Zeit eine konstante Ladungsmenge bewegt, so handelt es sich um einen zeitlich unabhängigen Strom $i \neq f(t)$. Dieser Gleichstrom wird mit einem großen Buchstaben I gekennzeichnet. Nach Gleich. (1.4) erhält man jetzt die transportierte Ladungsmenge ΔQ folgende Aussage:

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1 = \int_{t_1}^{t_2} I \cdot dt = I \cdot t_2 - I \cdot t_1 = I \cdot (t_2 - t_1) = I \cdot \Delta t$$

Der elektrische Strom ist an seinen drei Hauptwirkungen erkennbar:

- **Wärmewirkung:**

Beim Transport von Ladungsträgern durch den Querschnitt eines Leiters kommt es zu einer Erwärmung des Leiters. Mit zunehmender Dichte der Strömung (Stromdichte, vgl. Kap. 14) wird diese Erwärmung größer.

- **Magnetische Wirkung:**

Bewegte elektrische Ladungen erzeugen um sich herum ein magnetisches Feld (Kap. 17).

- **Chemische Wirkung:**

In flüssigen Leitern (Elektrolyte) fließt ein Ionenstrom. Dieser Ladungstransport ist zugleich ein Massetransport, der zu einer chemischen Beeinflussung des durchströmten Stoffes führt.

Der elektrische Strom ist mit Gleich. (1.3) noch nicht vollständig beschrieben. Die Angabe seines Wertes (Vorzeichen – Zahlenwert – Einheit) ist nur in Verbindung mit einer Richtungsangabe sinnvoll.

In metallischen Leitern können sich lediglich die Elektronen (negative Ladungsträger) bewegen. Im Falle einer Bewegung sind sie die „Träger“ des Stromes. Durch das Herauslösen aus dem Atomverband hinterlassen die Elektronen positive Metallionen. Diese positiven Ionisationszustände verlagern sich im Vergleich zur Bewegung der Elektronen in entgegengesetzter Richtung (Relativbewegung der positiven Ladungsträger – vgl. Bild 1.3).

Die Grundlage für eine einheitliche Richtungsangabe¹⁾ bildet der Richtungssinn des Stromes. Danach wird die Richtung des elektrischen Stromes mit $I > 0$ A gegen die Bewegungsrichtung der Elektronen Θ definiert und mit einem Richtungspfeil gekennzeichnet.

Nach dieser Festlegung fließt der Strom mit $I > 0$ A außerhalb der Quelle vom höheren (+) zum niedrigeren (-) Energieniveau, also in Richtung der Relativbewegung \rightarrow der positiven Ladungen \oplus . Ein Richtungspfeil gibt demzufolge die Richtung des Stromes an, mit der er mit positiven Werten durch einen Stromkreis fließt.

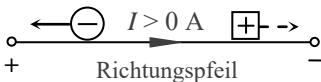


Bild 1.3: Richtungssinn des Stromes [¹⁾ Empfehlung nach DIN EN 60375]

In vielen Fällen kann diese Richtung aber nicht vorhergesagt werden. Das trifft insbesondere auf Brückenschaltungen (siehe Abschn. 4.3 und 4.4) und auf Stromkreise mit mehreren Quellen (vgl. Kap. 5) zu.

Falls die Potentialverhältnisse (vgl. Abschn. 1.3) in einem elektrischen Stromkreis (vgl. Abschn. 1.4) nicht bekannt sind, muss die Richtung eines Stromes vom Betrachter mit einem Bezugspfeil willkürlich festgelegt werden. Im Ergebnis einer Berechnung sagt das Vorzeichen des berechneten Stromes dann aus, ob er wirklich in die festgelegte Richtung fließt (positives Vorzeichen), oder ob er nicht in diese Richtung fließt (negatives Vorzeichen). Im Falle eines positiven Vorzeichens ist der Bezugspfeil zugleich der Richtungspfeil (Bild 1.3).

Obwohl Bezugspfeile beliebig festgelegt werden können, sollte man ihre Richtung während oder im Ergebnis einer Berechnung nicht mehr verändern. Da ein berechneter Strom (Vorzeichen – Zahlenwert – Einheit) nur in Verbindung mit dem festgelegten Bezugspfeil exakt interpretierbar ist, würde ein Richtungswechsel zu einer nicht nachvollziehbaren Lösung führen. Eine Aussage zum Richtungspfeil kann ja aus dem Vorzeichen des Rechenergebnisses im Zusammenhang mit dem Bezugspfeil abgeleitet werden.

In den weiteren Ausführungen dieses Lehrbuchs wird mit dem in der schaltungstechnischen Praxis üblichen Begriff „Zählpfeil“ gearbeitet. Darunter ist ein willkürlich festgelegter Bezugspfeil zu verstehen, der für die jeweils betrachtete Größe einen Bezugssinn vorgibt. Ein Strom wird nur dann als positiv angesehen, wenn der gewählte Bezugssinn (Zählpfeil) mit seinem Richtungssinn (siehe Richtungspfeil im Bild 1.3) übereinstimmt.

Lehrbeispiel 1.1:

Wie viele Ladungsträger müssen bewegt werden, damit in einem Leiter eine Sekunde lang ein Strom von $I = 1$ A fließt?

Da es sich um einen Gleichstrom handelt, gilt die Gleich. (1.3) wie folgt:

$$i = \frac{dQ}{dt} \quad \text{mit: } Q = \text{const.} \quad \Rightarrow \quad I = \frac{Q}{t}$$

Durch Einsetzen von Gleich. (1.2) erhält man: $I = \frac{|Q|}{t} = \frac{n \cdot e_0}{t} \Rightarrow n = \frac{I \cdot t}{e_0} \approx 6,25 \cdot 10^{18}$

Diese große Anzahl ist nicht mehr überschaubar. Um sich zumindest modellmäßig eine Vorstellung von der Menge der an diesem Ladungstransport beteiligten Ladungsträger zu verschaffen, werden folgende Überlegungen angestellt:

Welche Fläche könnte man überdecken, wenn jeder Ladungsträger die Größe eines Tennisballes mit einem Durchmesser $\varnothing \approx 65 \text{ mm}$) hätte?

Zum Bedecken eines Quadratmeters sind ca. 225 Tennisbälle erforderlich. Unsere Erde hat eine Oberfläche von rund 500 Millionen Quadratkilometern ($A \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$). Zum vollständigen Belegen der Erdoberfläche wären demzufolge ca. $1,13 \cdot 10^{17}$ Tennisbälle nötig.

Für das Beispiel mit den n Ladungsträgern bedeutet dies, dass unsere Erde 55-mal mit einer solchen Schicht überzogen werden könnte oder dass diese 55 Schichten (übereinander angeordnet) einen Belag mit einer Höhe von ca. 4 m ergeben würden!

1.3 Elektrische Spannung

Einer Ladung kann an jedem Ort eines elektrischen Kreises (Abschn. 1.4) ein definiertes Energieniveau zugeordnet werden. Bezieht man das Energieniveau dieses Punktes auf die Ladung selbst, erhält man eine Aussage zum elektrischen Potential φ .

Das elektrische Potential φ ist ein Maß für das auf die Ladung bezogene Energieniveau eines Punktes in einem elektrischen Stromkreis.

Für einen Punkt a gilt: $\varphi_a = \frac{W_a}{Q}$

Besitzt ein Punkt b ein von a verschiedenes Potential, so existiert zwischen den beiden Punkten eine Potentialdifferenz, die man als elektrische Spannung U bezeichnet. Für die Einheit gilt: $[\varphi] = 1 \text{ V}$ und $[U] = 1 \text{ V}$ (Volt).

Eine elektrische Spannung beschreibt die Differenz der Potentiale zweier Punkte in einem elektrischen Stromkreis.

Für eine Gleichspannung $u \neq f(t)$ zwischen den Punkten a und b (U_{ab}) gilt dann:

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \quad (1.5)$$

Zur vollständigen Beschreibung der Spannung ist eine Richtungsangabe erforderlich. Die Spannung wird mit einem Spannungszählpfeil gekennzeichnet, der z.B. vom Punkt a zum Punkt b festgelegt wurde. Besitzt nun der Punkt b ein höheres Potential als der Punkt a, so wird die Spannung gemäß Gleich. (1.5) negativ. Dieses negative Vorzeichen signalisiert den Sachverhalt, dass die Spannung U_{ab} nicht vom Punkt a zum Punkt b (sondern von b nach a) mit einem positiven Wert $U_{ba} = -U_{ab}$ abfällt.

1.4 Elektrischer Gleichstromkreis

In einem leitfähigen Medium fließt ein elektrischer Strom, wenn den beweglichen Ladungsträgern durch eine Quelle Energie zugeführt wird und die Anordnung in sich geschlossen ist (Stromkreis). Zur Verdeutlichung dieses Sachverhaltes soll zunächst ein unverzweigter elektrischer Stromkreis betrachtet werden. Er besteht im Elementarfall aus einer elektrischen Quelle und einem Verbraucher (Grundstromkreis).

Zwischen zwei Punkten a und b soll sich eine (vorerst als ideal angenommene) elektrische Quelle EQ befinden, die eine Quellenspannung $U_q > 0$ V (siehe Zählpfeil im Bild 1.4) bereitstellt. Dann liegen die Punkte a und b auf den Potentialen φ_a und φ_b mit $\varphi_a > \varphi_b$.

Es gilt: $U_q = U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$.

In diesem Zusammenhang muss darauf verwiesen werden, dass der Wert des Potentials eines Punktes lediglich eine Aussage relativ zum Potential eines frei wählbaren Bezugspunktes liefert. Diesem Bezugspunkt PB ordnet man ein Bezugspotential (z.B. $\varphi_{PB} = 0$ V) zu.

Wenn nun die Lage des Bezugspunktes oder das Bezugspotential selbst verändert wird, ändern sich die Potentiale aller betrachteten Punkte. Die Potentialdifferenzen (Spannungen) zwischen jeweils zwei Punkten bleiben aber unverändert.

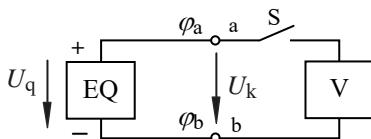


Bild 1.4: Offener elektrischer Kreis

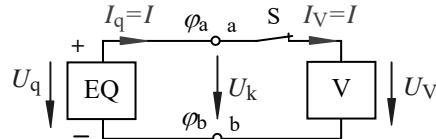


Bild 1.5: Geschlossener elektrischer Stromkreis

Bei geöffnetem Schalter S (Bild 1.4) fließt kein Strom durch den Kreis. Zwischen den Klemmen a und b liegt eine Klemmenspannung U_k , die im Bild 1.4 gleich der Quellenspannung U_q ist. Die Spannung über dem Verbraucher V ist null.

Nun wird der Kreis über den Schalter S geschlossen (Bild 1.5).

Die Quelle treibt jetzt einen Quellenstrom $I_q = I$ vom höheren (φ_a) zum niedrigeren Potential (φ_b) durch den geschlossenen elektrischen Stromkreis. In einem unverzweigten elektrischen Stromkreis fließt nur ein Strom. Dieser Strom $I_V = I$ verursacht einen Spannungsabfall U_V über dem Verbraucher, der in Richtung des fließenden Stromes weist.

Im Bild 1.6 ist ein einfaches Modell für den Ladungstransport in einem Gleichstromkreis dargestellt. Es soll zeigen, dass der elektrische Strom eine in sich geschlossene Erscheinung ist. Er wird zwar von einer elektrischen Quelle (EQ) verursacht – er selbst hat aber kein Anfang und kein Ende.

Eine bewegte Ladung verliert längs des Ladungstransportes durch einen geschlossenen Stromkreis einen Teil ihrer potentiellen Energie. Diese Energie wird der Ladung von der elektrischen Quelle wieder zugeführt. Der elektrische Strom fließt dabei in seinem geschlossenen Umlauf kontinuierlich weiter (Kontinuität des Stromes).

Zur Erläuterung dieses Sachverhaltes wird davon ausgegangen, dass eine positive Ladung im Punkt a des Bildes 1.6 ihr höchstes Energieniveau (W_a) aufweist. Längs des Ladungstransportes (siehe Richtungspfeil des Stromes) sinkt das Energieniveau dieser Ladung in Richtung des Punktes b ab. Dieses Absinken ($W \downarrow$) soll mit dem rechten Füllstandsanzeiger modellmäßig nachgebildet werden.

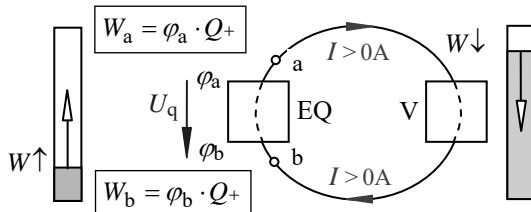


Bild 1.6: Modell zum Gleichstromkreis ($U_q > 0$ V)

Im Punkt b besitzt die betrachtete Ladung ihr geringstes Energieniveau. Längs dieses Ladungstransportes hat sich demzufolge nicht die Ladungsmenge verringert, sondern ihr Energieniveau ist abgesunken. Der links im Bild 1.6 dargestellte Füllstandsanzeiger soll die Arbeitsweise der Quelle modellmäßig nachbilden. Sie hebt das Energieniveau der Ladung von W_b auf den ursprünglichen Wert W_a an ($W \uparrow$). Dabei muss der Strom als in sich geschlossene Erscheinung auch durch die Quelle fließen.

Im Bild 1.7 ist noch einmal der geschlossene elektrische Stromkreis des Bildes 1.5 in vereinfachter Form dargestellt. Für den elektrischen Strom gilt: $I_q = I_V = I$.

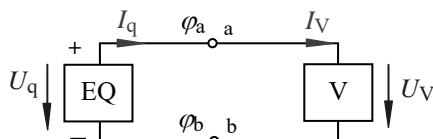


Bild 1.7: Zählpfeile im elektrischen Stromkreis

Bei der Interpretation der Richtungen der Zählpfeile stellt man folgendes fest:
Die Zählpfeile von Spannung und Strom weisen an der Quelle (Bild 1.7 – links) eine entgegengesetzte Richtung zueinander auf. Die Zählpfeile von Spannung und Strom zeigen dagegen am Verbraucher (Bild 1.7 – rechts) in die gleiche Richtung. Es muss demzufolge zwischen zwei verschiedenen Zählpfeilsystemen unterschieden werden.

• Quellen-Zählpfeilsystem:

Wenn die Zuordnung der Zählpfeile von Spannung und Strom eine entgegengesetzte Richtung aufweisen (siehe Bild 1.8), so wird dieser schaltungstechnische Zustand nach Vorbild einer aktiven elektrischen Quelle im Quellen-Zählpfeilsystem dargestellt.

Im Bild 1.8 ist der Quellenstrom I_q gegen den Zählpfeil der Quellenspannung U_q gerichtet. Die Quelle gibt Leistung an den Verbraucher ab (und wirkt damit als Quelle), wenn der Strom mit $I_q > 0$ A vom höheren Potential der Quelle durch einen außen angeschlossenen Verbraucher zum niedrigeren Potential der Quelle fließt. Wenn das nicht ($I_q < 0$ A) der Fall

ist, dann nimmt die Quelle Leistung auf und wirkt als Verbraucher. Das ist allerdings in der hier angenommenen Situation nicht möglich.

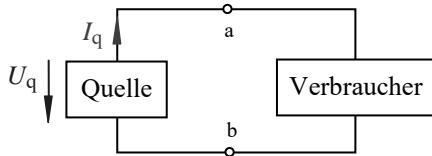


Bild 1.8: Quellen-Zählpfeilsystem

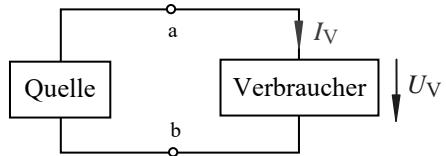


Bild 1.9: Verbraucher-Zählpfeilsystem

• Verbraucher-Zählpfeilsystem:

Wenn die Zuordnung der Zählpfeile von Spannung und Strom die gleiche Richtung aufweisen (siehe Bild 1.9), so wird dieser schaltungstechnische Zustand im Verbraucher-Zählpfeilsystem dargestellt. Danach hat der Strom durch den Verbraucher I_V die gleiche Richtung wie der Zählpfeil der Verbraucherspannung U_V (siehe Bild 1.7 – rechts und Bild 1.9), da ein Strom durch einen Verbraucher einen Spannungsabfall in Flussrichtung verursacht. In diesem Fall nimmt das betrachtete Element Leistung auf und wirkt als Verbraucher.

Nun sollen die in den Bildern 1.4 bis 1.9 vorgestellten Modelle im Zusammenhang mit den getroffenen Festlegungen in eine einfache schaltungstechnische Situation umgesetzt werden. Die Anordnung besteht jetzt aus einer realen linearen Spannungsquelle und einem Lastwiderstand als Verbraucher. Beide Elemente werden an den Punkten a und b zu einem unverzweigten elektrischen Stromkreis (siehe Bild 1.10) verknüpft.

Die elektrische Quelle (EQ) ist der aktive Teil dieses elektrischen Stromkreises. Ladungstrennende Kräfte im Inneren dieses Schaltelementes erzeugen eine Quellenspannung U_q und versetzen elektrische Ladungen in diesem geschlossenen Stromkreis in eine Bewegung relativ zueinander. Solche inneren Vorgänge sind mit Verlusten behaftet, die bei einer linearen Quelle durch einen ohmschen Widerstand (Innenwiderstand R_i im Bild 1.10) nachgebildet werden.

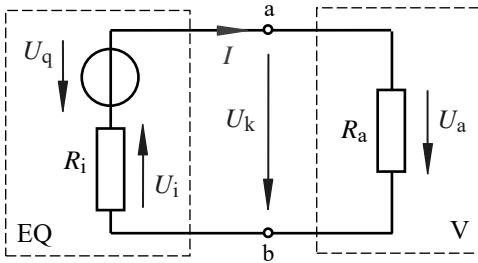


Bild 1.10: Unverzweigter elektrischer Stromkreis

Der Verbraucher (V) als der passive Teil eines elektrischen Stromkreises soll in den folgenden Betrachtungen ein linearer ohmscher Widerstand R_a sein (vgl. Abschn. 1.5 und 2.1). Er setzt die ihm zugeführte Energie in Wärme um. Die Verbindungsleitungen zwischen Quelle und Verbraucher werden als widerstandslos angenommen.

Bei einem offenen Kreis (Trennung der beiden Elemente an den Punkten a und/oder b) fließt kein Strom und der Spannungsabfall U_i über dem Innenwiderstand ist null. Über dem Lastwiderstand kann dann natürlich auch keine Spannung abfallen. Die Klemmspannung U_k ist in diesem Fall gleich der Quellenspannung U_q .

Wird nun der Stromkreis geschlossen (Verbindung der beiden Elemente über die Punkte a und b), so fließt ein Strom I durch die Widerstände R_a und R_i .

In einem unverzweigten elektrischen Stromkreis kann nur ein Strom fließen.

Über beiden Widerständen fällt infolge dieses Stromflusses eine Spannung (U_a bzw. U_i) ab. Die Klemmspannung U_k ist jetzt gleich dem Spannungsabfall U_a .

Es gilt: $U_k = U_a = U_q - U_i$.

Für die Spannungsquelle gilt das Quellen-Zählpfeilsystem, da die Zählpfeile von U_q und I eine entgegengesetzte Richtung aufweisen. Die Quelle gibt Leistung an die angeschlossenen Elemente ab.

Für den Innenwiderstand der Spannungsquelle R_i und für den Lastwiderstand R_a gilt das Verbraucher-Zählpfeilsystem, da die Zählpfeile von U_i und I sowie von U_a und I jeweils die gleiche Richtung aufweisen. Beide Widerstände nehmen Leistung von der Quelle auf. Der in der Praxis in der Regel nicht vernachlässigbare Innenwiderstand R_i einer elektrischen Quelle wirkt demzufolge innerhalb dieser Quelle als Verbraucher.

1.5 Widerstände im elektrischen Stromkreis

1.5.1 Bemessungsgleichung

Der ohmsche Widerstand R (vgl. auch Abschn. 2.1) beschreibt die Fähigkeit eines stofflichen Gebildes zur Begrenzung des elektrischen Stromes I . Zur Diskussion von Einflussgrößen auf diese Begrenzungseigenschaft soll eine Strömung durch ein Stück Manganindraht (homogener Widerstandswerkstoff) betrachtet werden (Bild 1.11).

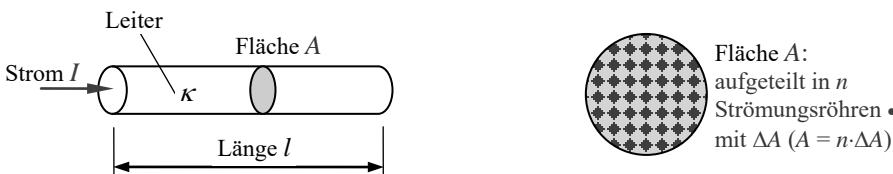


Bild 1.11: Einflussgrößen zur Begrenzung des elektrischen Stromes I

Das stoffliche Gebilde besitzt eine spezifische elektrische Leitfähigkeit κ und ist durch seine konstruktiven Daten (Länge l und Querschnitt A) gekennzeichnet. Die spezifische elektrische Leitfähigkeit κ ist eine Werkstoffkenngröße und wird durch die Dichte der frei beweglichen Ladungsträger und durch ihre Beweglichkeit im Werkstoff bestimmt. Der Kehrwert der elektrischen Leitfähigkeit ist der spezifische elektrische Widerstand ρ .

$$\text{Es gilt: } \kappa = \frac{1}{\rho} \quad \text{mit:} \quad [\kappa] = 1 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} = 1 \frac{\text{S}}{\text{m}}$$

Der Strom durch den Leiter im Bild 1.11 wird durch folgende Maßnahmen begrenzt:

- Verringerung der Dichte der beweglichen Ladungsträger und ihrer Beweglichkeit:

Dazu muss ein Werkstoff mit einer kleineren spezifischen elektrischen Leitfähigkeit κ (also ein „schlechterer“ Leiter) verwendet werden: $\kappa \downarrow \Rightarrow R \uparrow$.

- Vergrößerung der Länge l des Leiters:

Eine größere Länge des Drahtes setzt dem Stromfluss einen größeren Widerstand entgegen. Die Ladungsträger müssen einen längeren Weg zurücklegen: $l \uparrow \Rightarrow R \uparrow$.

- Verringerung des Leiterquerschnittes:

Eine Reduzierung der Fläche A bewirkt eine Verringerung der Anzahl n der verfügbaren Strömungsröhren (Bild 1.11 – rechts) und damit eine Strombegrenzung. Der Widerstand des Leiters steigt in diesem Fall an: $A \downarrow \Rightarrow R \uparrow$.

Daraus ergibt sich die Bemessungsgleichung zur Bestimmung des Widerstandes einer homogenen leitfähigen Anordnung:

$$R = \frac{l}{\kappa \cdot A} = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (1.6)$$

Der ohmsche Widerstand R ist eine Bauelemente-Kenngröße, die von den konstruktiven Daten (Länge und Fläche) und von der Materialkenngröße ($\kappa = 1/\rho$) abhängig ist.

Der elektrische Leitwert G wird über den Kehrwert des ohmschen Widerstandes R bestimmt.

$$G = \frac{1}{R} = \frac{\kappa \cdot A}{l} \quad (1.7)$$

Der Leitwert wird in der Praxis als reine Rechengröße verwendet. Die primären Informationen über die Einsetzbarkeit des Bauelementes „Widerstand“ leitet der Schaltungstechniker vorrangig aus der Angabe des Widerstandswertes ab. Aus diesem Grund wird in den folgenden Ausführungen weitgehend auf Leitwertbetrachtungen verzichtet.

Für die Einheiten gilt: $[R] = 1 \Omega$ (Ohm) und: $[G] = 1 \text{ S}$ (Siemens).

1.5.2 Temperaturabhängigkeit

Bei Leiterwerkstoffen äußert sich eine Temperaturänderung über eine nachweisbare Widerstandsänderung des Stoffes. Der Temperaturkoeffizient α ist ein Maß dafür. Er beschreibt als Werkstoffkenngröße die auf den Widerstandswert des Stoffes bei Raumtemperatur bezogene Widerstandsänderung pro Temperaturänderung. Bei metallischen Werkstoffen ist der Temperaturkoeffizient größer als null (vgl. [11] – Lehrbeispiel 2.3).

$$\alpha = \frac{dR}{dT} \cdot \frac{1}{R} \quad (1.8)$$

Der Widerstandswert wird bei einer definierten Temperatur wie folgt berechnet:

$$R = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (1.9)$$

R_{20} ist der Widerstandswert bei einer Bezugstemperatur von 20 °C. α beschreibt den Temperaturkoeffizienten des für das Bauelement verwendeten Werkstoffes. Der Temperaturkoeffizient wird auch gelegentlich mit TK oder TC bezeichnet. Für ΔT ist die Temperaturänderung (aktuelle Temperatur relativ zur Bezugstemperatur) einzusetzen. Diese Berechnungsvorschrift gilt nur für den in der Schaltungstechnik interessierenden Temperaturbereich und für relativ kleine Temperaturänderungen.

1.5.3 Technische Ausführungsformen

Aus der Sicht des verfügbaren Bauelementesortimentes unterscheidet man zwischen Festwiderständen und Einstellwiderständen (vgl. auch [11] – Abschn. 2.2.1).

Festwiderstände können ein lineares oder ein nichtlineares Verhalten aufweisen. Dieses Verhalten wird mit einer Strom-Spannungs-Kennlinie $I = f(U)$ beschrieben.

Lineare Widerstände werden als Drahtwiderstand (z.B. Konstantdraht), Schichtwiderstand (z.B. Kohleschicht, Metallschicht) oder als Massewiderstand hergestellt.

Nichtlineare Widerstände (z.B. Heißleiter, Kaltleiter, Varistor, Fotowiderstand, usw.; siehe [11] – Abschn. 2.3) bestehen aus einem Halbleitermaterial. Ihr Widerstandswert wird durch eine physikalische Größe (z.B. Temperatur, Spannung, Beleuchtungsstärke) beeinflusst.

Einstellwiderstände ändern ihren Widerstandswert bei Veränderung der Position eines Schleifkontaktees längs einer geraden oder kreisförmigen Widerstandsbahn. Diese Widerstandsbahn kann aus Drahtwindungen (Drahtpotentiometer) oder aus einer Widerstandsschicht (Schichtpotentiometer) bestehen. Der gewünschte Widerstandswert wird mit einem geeigneten Schleifkontakt von der Widerstandsbahn linear oder logarithmisch abgegriffen.

Tabelle 1.1: Zusammenfassung (Formelzeichen und Einheiten)

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit
Ladung	Q	A·s
Strom	I	A
Potential	φ	V
Spannung	U	V
Widerstand	R	Ω
Leitwert	G	S

Sachwortverzeichnis

- A** Abfallflanke 322, 327, 340
 Admittanz 130
 Amplitude 102, 188
 Amplitudenfrequenzgang 156, 170f
 Amplitudenspektrum 104
 Analogiemethode 207
 Analyseverfahren 76, 153
 Anpassungsfall 45
 Anstiegsflanke 322, 327, 340
 Äquipotentialfläche 210, 225, 253
 Äquipotentiallinie 210, 229, 241
 Äquivalenz, schaltungstechnische 60
 Arbeitspunkt 23, 91, 298
 ARON-Schaltung 200
 Atom 12
 Augenblickswert 95, 180
 Ausgleichsstrom 280
 Ausschaltvorgang 338
- B** Bandbreite 165
 Bandpass 164
 Bandsperre 164
 Bauelement, nichtlineares 84
 Bauelement, reales 110
 Bauelemente-Kenngröße 23, 214, 241, 305, 321, 325
 Baum, vollständiger 65
 Baumzweig 77
 Bemessungsgleichung 20f
 Betriebsparameter 137
 Beweglichkeit 21
 Bewegungsinduktion 315
 Bezugsknoten 81, 284
 Bezugspfeil 15
 Bezugspanphase 200
 Bezugspotential 17, 80
 Bezugstemperatur 22
 Bezugszeiger 116
 Bezugszeitpunkt 95, 116, 189
 Bildbereich 122, 149, 182
 Blindleistung 181, 343
 Blindleistungskompensation 186
 Blindspannung 183
 Blindstrom 184
 Blindwiderstand, induktiver 107, 140, 168, 348
 Blindwiderstand, kapazitiver 109, 132, 168
 Brechungsgesetz 249
 Brücke, abgleichbare 143
 Brücke, nicht abgleichbare 143
 Brückenschaltung 56, 118
- C** COULOMB-Kraft 256, 315
 COULOMBSches Gesetz 256
- D** Darstellung, normierte 48
 Deformationspolarisation 260
 Dezibel 173
 Dielektrikum 238, 256, 354
 Dielektrikum, geschichtetes 245
 Differenzierglied 275
 Diffusionsstrom 352
 Diffusionsstromdichte 353
 Diode 85
 Dipol 261
 Drehstromgenerator 188
 Dreieckschaltung 61, 193
 Dreieck-Stern-Transformation 61
 Dreiphasensystem 188
 Dreipolschaltung 59
 Driftgeschwindigkeit 350
 Driftgeschwindigkeit, mittlere 217
 Durchbruchspannung 86
 Durchflutung 288, 292, 295, 357
 Durchflutungsgesetz 290, 298, 356
 Durchlassbereich 164
 Durchlassspannung 85
 Durchlassstrom 86
- E** Ebene, komplexe 122
 Effektivwert 99, 104, 116, 127, 179
 Effektivwertzeiger 127
 Einschaltvorgang 336
 Einstellwiderstand 22
 Eisenkern 298
 Eisenverluste 110, 348
 Eisenweglänge 300
 Elektrode 209, 221, 224
 Elementarladung 12
 Elementarmagnete 293
 Elementarschaltung 32
 Elementaryierpol 177
 Energie 28
 Energie, elektrische 256
 Energie, gespeicherte 255, 258, 306
 Energie, magnetische 305, 312
 Energiedichte 256, 259, 311
 Energieerhaltungssatz 29

- Energieniveau 16, 242
Energiesatz 28
Energiespeicher 255, 306
Entladestrom 256, 269
Entladevorgang 271
Erder, virtueller 234
Erderanordnung 229
Erregerstrom 289, 324
Erregerstrom, periodischer 321
Erregerwicklung 314
Ersatzinduktivität 334
Ersatz-Kennlinie 89
Ersatzschaltbild, reduziertes 349
Ersatzschaltung 90, 316
Ersatzschaltung, magnetische 289, 295
Erzeuger-Zählpfeilsystem 319, 321
Exponentialform 123, 128, 144, 183
- F**ARADAYScher Käfig 260
Feld, elektrostatisches 238
Feld, homogenes 204
Feld, homogenes elektrostatisches 241, 245, 257
Feld, homogenes magnetisches 297, 316
Feld, inhomogenes 205
Feld, inhomogenes elektrostatisches 245
Feld, inhomogenes magnetisches 309
Feld, kugelsymmetrisches 249
Feld, radialsymmetrisches 205, 224
Feld, radialsymmetrisches elektrostatisches 249
Feld, stationäres magnetisches 286
Feld, zeitlich veränderliches magnetisches 314
Feld, zylindersymmetrisches 251
Feldbegriff 202
Feldbild 203
Feldgröße, skalare 204, 214
Feldgröße, vektorielle 214
Feldkonstante, elektrische 238
Feldkonstante, magnetische 287
Feldpunkt 202, 216, 237, 259
Feldraum, passiver 209
Feldstärke, elektrische 215, 230, 243, 260, 352
Feldstärke, magnetische 286, 293, 301, 356
Feldstärkeberechnung 236
Feldstärkevektor 222
Feldstrom 351
Festwiderstand 22
Filter-Flankensteilheit 173
- Flächenladung 240
Flächenladungsdichte 240, 243, 355
Flächenverhältnis 300
Fluss, elektrischer 241, 354
Fluss, magnetischer 289, 295, 305, 311, 319, 324, 348
Fluss, verketteter 305
Fluss, zeitlich veränderlicher magnetischer 321
Flussdichte, elektrische 243
Flussdichte, magnetische 291, 299, 308, 315f, 357
Flussdichtelinie 315
Flussdichtelinie, elektrische 358
Flussdichtevektor 308
Flusslinie 301
Flusslinie, elektrische 241, 354
Flussröhre 256, 291
Flussröhre, magnetische 286, 296
Flussverbreiterung 299
Form, kartesische 122
Form, trigonometrische 123
FOURIER -Reihe 103
FOURIER-Koeffizient 103
Frequenz 94, 188
Frequenz, imaginäre 156
Frequenz, normierte 171
Frequenzabhängigkeit 156
Frequenzdekade 170
Frequenzgang 107
Frequenzgang, komplexer 156
- Galvanometer 57
Gamma-Vierpol 178
GAUßscher Satz 358
Gegenelektrode 225
Gegeninduktion 322
Gegeninduktionsspannung 323, 326, 329
Gegeninduktivität 322, 345
Gegenladung 238, 249
Generatorstränge 188
Generator-Strangspannung 189
Gesamtfluss 323
Geschwindigkeitsvektor 309
Gleichanteil 97
Gleichgröße 94
Gleichrichtwert 97
Gleichspannung 16
Gleichstrom 14, 31
Gleichstromkreis 17
Gleichstromwiderstand 23, 85

-
- Gradient 215, 351
 Graph 65
 Grenzfrequenz 142, 157, 165
 Größe, integrale 207, 214, 241, 288
 Größe, ortsbezogene 207, 214, 243, 290
 Grunddämpfung 157
 Grundfrequenz 103
 Grundschwingung 103
 Grundstromkreis 31, 44
 Grundwelle 103
 Güte 111, 113, 163, 166
- Halbkugelerder** 229
Halbleiter 13
HALL-Konstante 311
HALL-Sonde 293, 310
HALL-Spannung 311
 Harmonische 103
 Hauptfluss 323
 Hauptinduktivität 349
 Heißleiter 87
HELMHOLTZscher Überlagerungssatz 68, 149, 151
 Hochpass 160
 Hohlleiter 302
HOPKINSONsches Gesetz 289, 299, 321
Hüllenintegral 221, 357
- Imaginärteil** 122, 140, 144, 157
Impedanz 128
Indikatorzweig 144
 Induktion, elektromagnetische 314
Induktionsgesetz 315, 337, 357
 Induktivität 107, 129, 305, 311, 321, 323
 Induktivität, äußere 313
 Induktivität, innere 312
 Induktivität, unverkoppelte 331
 Induktivität, verkoppelte 332
 Induktivitätsmessbrücke 145
 Influenz 260
 Innenwiderstand 19, 52, 71, 152
 Integrierglied 275
 Inversbetrieb 176
 Inversion 135
 Inversionskreis 135
 Inversionsregeln 139
 Ionenpolarisation 261
- Kaltleiter** 88
 Kapazität 109, 250, 255
 Kapazitätsmessbrücke 146
- Kennlinie 54
 Kennlinie, idealisierte 90
 Kennwiderstand 163
 Kettenschaltung 175
 Ketten-Zählpfeilsystem 174, 347
KIRCHHOFFsche Sätze 26, 65, 120, 132, 149
 Klemmenspannung 17, 40, 316
 Klemmenverhalten 40
 Klirrfaktor 105
 Knoten 26
 Knoten, echter 32
 Knoten, virtueller 33, 284
 Knotenanalyse 80, 154, 283
 Knotenkapazität 284
 Knotenleitwert 81
 Knotenpotentialanalyse 80
 Knotenpotentialverfahren 153
 Knotenpunkt 27, 32
 Knotenpunktsatz 27, 35, 65, 89, 132, 194, 265, 296, 331
 Koaxialleitung 303
 Koeffizientenschema 77, 81, 154, 284
 Koerzitivfeldstärke 295
 Kompensatorschaltung 56
 Kondensator 130, 262, 354
 Kondensator, realer 112
 Kondensator, vorgeladener 273
 Kondensorschaltung 262
 Kondensorschaltung, gemischte 268
 Konduktanz 131
 Konstantdraht 22
 Kontinuität 17, 221, 350
 Kontinuitätsgleichung 350, 355, 356
 Kontinuitätsatz 221
 Konvektionsstrom 350, 353
 Konvektionsstromdichte 351
 Konzentrationsgefälle 351
 Koppelkapazität 284
 Koppelleitwert 81
 Koppelwiderstand 78
 Kopplungsfaktor 323, 332, 345
 Kraft 257
 Kreis, magnetischer 292
 Kreis, unverzweigter magnetischer 295
 Kreis, verkoppelter magnetischer 323
 Kreis, verzweigter magnetischer 296
 Kreisfrequenz 95, 116
 Kugelkondensator 250
 Kurzschlussfall 44
 Kurzschlussstrom 73, 91, 152
 Kurzschlussstromrückwirkung 176

- Kurzschlussübertragungswiderstand 175
Kurzschlusszweig 32
- Ladestrom 255, 269
Ladevorgang 269
Ladezustand 276
Ladung 12f, 206, 238, 284, 308
Ladung, bewegte 315
Ladung, verschobene 277
Ladungsausgleich 276
Ladungsbewegung 350
Ladungsbilanz 276
Ladungserhaltungssatz 240
Ladungsgesetz 241, 250, 262
Ladungsmenge 14
Ladungsteilerregel 267
Ladungsträgerbeweglichkeit 217, 352
Ladungsträgerkonzentration 352, 353
Ladungstransport 17, 25, 350
Ladungstrennung 315, 350
Ladungszufluss 354
Längszweig 177
Lastfälle 44
Lastkennlinie 91
Lastwiderstand 31, 71, 344
Lastwiderstandsgerade 47
Lastzweipol, komplexer 179
Leerlauffall 44
Leerlaufspannung 71, 91, 152
Leerlaufspannungsrückwirkung 175
Leerlaufübertragungsleitwert 175
Leistung 44, 179
Leistung, elektrische 29
Leistung, komplexe 182, 197, 344
Leistungsaufnahme, maximale 46
Leistungsbilanz 29
Leistungsdichte 218
Leistungsfaktor 184
Leistungsfluss 179, 189, 192
Leistungstransformator 343
Leistungsumsatz 44
Leiter 13
Leiter, elektrischer 13
Leiter, stromdurchflossener 286, 301
Leiterlänge, wirksame 309, 319
Leiterschleife 287, 315, 318
Leiterspannung 189
Leiterstab 314
Leiterstrom 191, 195
Leitfähigkeit, spezifische elektrische 20, 209, 352
Leitwert 21
Leitwert, komplexer 130, 138
Leitwert, magnetischer 288
LENZsche Regel 320
Liniendiagramm 95
Linienintegral 220
Linienladung 240, 253
Linienladungsdichte 240
LORENTZ-Kraft 308, 315
Lösung, grafische 135
Luftspalt 298
Luftspaltgerade 298
Luftspule 288
- Magnetisierungskennlinie 292, 298
Magnetisierungsstrom 349
Masche, abhängige 65
Masche, unabhängige 65
Maschensatz 26, 33, 65, 89, 113, 132, 148, 152, 190, 220, 262, 299, 330
Maschenstrom 76, 153
Maschenstromanalyse 76, 153
Maschenumlauf 26
Maschenwiderstand 78
Massivleiter 301
Maximalwert 95, 107, 116, 179
Maximalwertzeiger 127
MAXWELLSche Gleichungen 356, 359
MAXWELL-WIEN-Brücke 145
Messtechnik 52
Messung, spannungsrichtige 55
Messung, stromrichtige 54
Messwerk 52
Metallfaden-Glühlampe 85, 88
Mischgröße 94
Mittelpunktleiter 188
Mittelwert 97
Mittelwert, arithmetischer 97
Mittelwert, quadratischer 99
- Nebenwiderstand 53
Netzwerk, kapazitives 283
Netzwerk, lineares 65
Netzwerkberechnung 65, 149
NF-Ersatzschaltbild 110
Nichtleiter 13
Nichtlinearitätskoeffizient 86
Normalkomponente 248
Normalwiderstand 57
Nulldurchgang 101
Nullindikator 56

Nullphasenwinkel 95

Oberschwingung 103

OHMsches Gesetz 23, 218

Oktavabstand 170

Orientierungspolarisation 261

Ortskurve 137, 140, 157, 173

Parallelschaltung 32, 35, 131, 184, 265, 331

Parallelschaltung, gleichsinnige 333

Parallelschwingkreis 114, 162

PegeL 173

Periodendauer 94

Permeabilität 287, 299

Permeabilität, relative 287

Permittivität 238

Permittivität, relative 238

Phasendrehbrücke 147

Phasenfrequenzgang 156, 172

Phasenoperator 189

Phasenrelationen 132

Phasenspektrum 105

Phasenwinkel 106, 123, 129, 145, 166

Plattenkondensator 245

Polarisation 260

Polarisationsverluste 112

Potential 16f, 144, 212, 214, 219

Potential, elektrisches 80

Potentialänderung 215

Potentialberechnung 235

Potentialbezugspunkt 215, 251

Potentialdifferenz 16, 311

Potentialfeld, elektrisches 206, 356

Potentialgefälle 213, 233, 351

Pressmassekern 307

Primärspule 328

Prinzipzeigerbild 116

Punktladung 239, 250

Quelle, elektrische 40

Quellen-Charakteristik 347

Quellenfeld 205

Quellenfeld, wirbelfreies 358f

Quellenkennlinie 41, 47, 91

Quellenleistung 30, 40

Quellenspannung 17, 78

Quellen-Zählpfeilsystem 18, 29, 40, 256, 289, 306

Querstrom 50

Querzweig 57, 118, 143, 177

Raumladung 239, 243, 350

Raumladungsdichte 217, 239

RC-Hochpass 161

RC-Kombination 158, 269

RC-Phasenschiebekette 142, 155

RC-Tiefpass 158

Reaktanz 128

Realteil 122, 140, 144, 157

Rechteck-Impulsfolge, periodische 105

Rechteck-Impulsfolge, positive 342

Rechtsschrauben-Regel 289, 308, 319, 325

Rechtssystem 203

Reihenschaltung 31, 33, 131, 183, 262, 277, 295, 331

Reihenschaltung, gleichsinnige 332

Reihenschwingkreis 113, 133, 162

Remanenzflussdichte 294

Resistanz 128

Resonanzfall 140

Resonanzfrequenz 114, 165

Richtungspfeil 15

Richtungssinn 15

Ringspule 300, 307, 321, 326

RLC-Kombination, gemischte 115

RL-Kombination 336

Rücktransformation 127

Ruheinduktion 319

Sättigungsstrom 86

Schaltvorgang 269, 336

Scheinleistung 181

Scheinleitwert 106

Scheinwiderstand 106

Scheinwiderstandsübersetzung 344

SCHERING- Brücke 146

Schleusenspannung 86

Schriftspannung 230, 235

Schriftspannung, maximale 232

Schwingkreis 162

Sekundärspule 328

Selbstinduktion 321

Selbstinduktionsspannung 321, 326, 329

Selbstinduktivität 345

SKIN-Effekt 107

Spannung, elektrische 16f

Spannung, induzierte 317, 320, 336

Spannungsabfall 17

Spannungsmessbereichserweiterung 52

Spannungsquellen-Ersatzschaltbild 41, 71, 151

Spannungsteiler, belasteter 49

- Spannungsteilerregel 33f, 89, 132
Spannungsteilerregel, kapazitive 264
Spannungüberhöhung 167
Spannungszählpfeil 26
Spannungszeigerbild 118
Spektralbereich 157
Sperrbereich 164
Sperrstrom 86
Spiegelader 234
Spiegelladung 253, 254
Spiegelungsprinzip 234
Spule 288, 321, 331, 340
Spule, reale 110
Spule, vormagnetisierte 340
Stabilisierungsfaktor 93
Stellwiderstand 49
Stern-Dreieck-Transformation 63
Sternschaltung 59, 193
Stetigkeit 248
Stoff, diamagnetischer 288
Stoff, ferromagnetischer 288
Stoff, paramagnetischer 288
Strangstrom 195
Streufluss 323
Streuinduktivität 349
Strom, zeitlich veränderlicher 14
Stromdichte 210
Stromdichte, elektrische 216
Stromdichtelinie 211
Stromkreis, elektrischer 23
Stromkreis, unverzweigter 17, 31
Stromkreis, verzweigter 31
Strommessbereichserweiterung 53
Stromquellen-Ersatzschaltbild 41, 73, 151
Stromröhre 210, 216, 350
Stromröhre, differenzielle 216
Strom-Spannungs-Kennlinie 23, 40, 54, 84
Stromstärke 13
Stromstärke, elektrische 13
Stromteilerregel 35, 68, 132, 150
Strömungsfeld 209
Strömungsfeld, homogenes elektrisches 222
Strömungsfeld, inhomogenes 217, 223
Strömungsfeld, kugelsymmetrisches 224
Strömungsfeld, zylindersymmetrisches 226
Strömungslinie 211
Stromzählpfeil 27
Stromzeiger, konjugiert komplexer 183
Superposition 68, 76, 149
Suszeptanz 131
Taktfrequenz 275
Tangentialkomponente 248
Tastverhältnis 342
Teilstrom 37
Temperaturabhängigkeit 21
Temperaturkoeffizient 21, 87
Temperaturspannung 86
T-Ersatzschaltung 176, 334, 346
Thermistor 87
THOMSONSche Brückenschaltung 58
THOMSONSche Schwingungsgleichung 114, 162
Tieppass 157
Transformation 127
Transformationsregel 62, 126
Transformator 343
Transformator, idealer 343
Transformator, realer 347
Transformator, verlustloser 329, 334
Transformator, verlustloser und streuungsfreier 345
Transformator-Ersatzschaltung 333
Transformatorgleichungen 328
Transformator-Verluste 348
Trennfläche 245, 257
Trennfläche, schräge 248
Trennstelle 70, 151, 283
Trenntransformator 343
Übergangswiderstand 230, 235
Überlagerung 101, 121, 222, 234, 252, 301, 328
Übersetzungsverhältnis 343
Übertrager 328, 343, 348
Übertragungsvierpol 174
Umlauf 26
Umlaufanalyse 76, 153
Umlaufintegral 220, 290, 356
Umlaufsinn 66
Umlaufspannung 319
Ummagnetisierungsverluste 348
Umschalten 273, 340
Unabhängigkeitsbedingung 28, 77
Ursache-Wirkungs-Modell 24, 208, 214, 241, 290, 292
Varistor 86
Vektor-Basisystem 203
Vektorfeld 204
Verbindungszyklig 77
Verbraucher, symmetrischer 191

- Verbraucherleistung 30
 Verbraucherstrom 193
 Verbraucher-Zählpfeilsystem 19, 30, 174, 255, 306, 321, 328, 337
 Verkettungsfaktor 190
 Verkopplung 323
 Verlustfaktor 146
 Verlustwiderstand 111, 163
 Verlustwinkel 111, 112
 Verschiebungsfloss 241, 261, 354
 Verschiebungsflossröhre 241
 Verschiebungspolarisation 260
 Verschiebungsstrom 354, 355
 Verschiebungsstrom, dielektrischer 356
 Verschiebungsstromdichte 355
 Vierpol 156, 174, 328, 333, 343
 Vierpolparameter 174
 Vollausschlagsspannung 52
 Vollausschlagstrom 52
 Vollkugelerder 233
 Vorwärtsbetrieb 176
 Vorwiderstand 52

 Wandler 328
 Wechselgröße 94, 156
 Wechselspannung, sinusförmige 317
 Wechselstrom-Brückenschaltung 143
 Wechselstromkreis, gemischter 131
 Wechselstromschaltung, spezielle 141
 WEIßsche Bezirke 293
 WHEATSTONESche Brückenschaltung 57
 Wicklung 286, 345
 Wicklungsrichtung 324
 Wicklungssinn 325, 328, 332
 Wicklungssinn, gegensinniger 325
 Wicklungssinn, gleichsinniger 325
 Wicklungsverluste 110, 348
 Widerstand 20f
 Widerstand, differenzieller 23, 85
 Widerstand, elektrischer 20
 Widerstand, komplexer 128, 138, 144
 Widerstand, magnetischer 288
 Widerstand, ohmscher 106, 129
 Widerstand, spezifischer elektrischer 20
 Widerstands-Temperatur-Kennlinie 87
 Windung 286, 305
 Windungszahl 289, 293, 320, 345
 Wirbelfeld 205, 209, 286, 301
 Wirbelfeld, quellenfreies 359
 Wirbelstrom 357
 Wirbelstromverluste 348

 Wirkleistung 180, 198, 343
 Wirkleistungsmesser 199
 Wirkspannung 183
 Wirkstrom 184
 Wirkungsgrad 44
 Wirkwiderstand 106

 Zählpfeil 15, 26, 32, 66, 116, 150, 278, 289, 316
 Zählpfeilsystem, symmetrisches 343
 Z-Diode 91
 Zeiger 96
 Zeiger, konjugiert komplexer 125, 135
 Zeiger, rotierender 125
 Zeiger, ruhender 125
 Zeigerbild 107, 115, 120, 181, 190
 Zeigerbild, qualitatives 116
 Zeigerbild, quantitatives 116
 Zeigerdarstellung 122
 Zeigerdiagramm 96, 120
 Zeitbereich 120
 Zeitfunktion 272
 Zeitfunktion, nichtsinusförmige 94
 Zeitfunktion, periodische 94
 Zeitfunktion, sinusförmige 95
 Zeitkonstante 270, 337
 Zweig 26, 32
 Zweigspannung 82
 Zweigstrom 26, 32, 68
 Zweipol 31
 Zweipol, aktiver 298
 Zweipol, elementarer 106, 110
 Zweipol, passiver 33, 38, 79, 298
 Zweipoltheorie 70, 151, 174
 Zweitor 174
 Zylinderkondensator 252
 Zylinderspule 287

 Π-Ersatzschaltung 177, 335