

HANSER



Leseprobe

zu

Elektrotechnik für Ingenieur:innen

von Rainer Ose

Print-ISBN: 978-3-446-47479-6

E-Book-ISBN: 978-3-446-47480-2

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446474796>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort zur 7. 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.

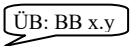
In jedem Kapitel befinden sich Lehrbeispiele zur Erklärung typischer Erscheinungen der Elektrotechnik sowie zur Demonstration von Berechnungsmethoden und -verfahren. Soweit sie nicht die Größenordnung eines dargelegten Sachverhalts verdeutlichen sollen, sind diese Lehrbeispiele in allgemeiner Form ausgeführt.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

Die 7. Auflage entstand durch eine vollständige Überarbeitung und Erweiterung der 5./6. Auflage des Lehrbuchs. Alle Berechnungsbeispiele (BB) befinden sich jetzt in erweiterter Form in einem neu aufgelegten Übungsbuch (ÜB). Die 7. Auflage enthält einen Anhang mit Übungsaufgaben und eine separate Formelsammlung. Alle Lösungen der Übungsaufgaben sind über das Internet zugänglich.

Wolfenbüttel, im August 2022

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 (BB) aus dem Übungsbuch (ÜB) durcharbeiten.  Diese Beispiele tragen zur Erhöhung des Verständnisses für die betrachteten Stoffgebiete bei.

• 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	Grundsaltungen 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
10.5	Modelle für Leitungen	179
10.5.1	Elektrisch kurze Leitung	179
10.5.2	Leitungsgleichungen	180
10.5.3	Wellenmodell	183
11	Leistungsbetrachtungen im Wechselstromkreis	186
11.1	Zeitfunktion der Leistung	186
11.2	Wirk-, Blind- und Scheinleistung	188
11.3	Komplexe Leistung	189
11.4	Leistungsfaktor und seine Verbesserung	191

12	Dreiphasensysteme	195
12.1	Symmetrischer Drehstromgenerator	195
12.2	Spannungen und Ströme	196
12.3	Belastungsarten	200
12.4	Leistung im Dreiphasensystem	204
12.5	Symmetrische Komponenten	209
12.5.1	Entstehung unsymmetrischer Dreiphasensysteme	209
12.5.2	Zerlegung in symmetrische Komponenten	211
12.5.3	Komponenten-Ersatzschaltungen	212

III Elektrische und magnetische Felder

13	Feldbegriff	214
13.1	Begriffsbestimmung	214
13.1.1	Begriff „Feldpunkt“	214
13.1.2	Begriff „Rechtssystem“	215
13.2	Einteilung der Felder	216
13.3	Eigenschaften elektrischer und magnetischer Felder	218
14	Stationäres elektrisches Strömungsfeld	221
14.1	Eigenschaften des elektrischen Strömungsfeldes	221
14.2	Beschreibung des stationären elektrischen Strömungsfeldes	226
14.2.1	Integrale Größen	226
14.2.2	Ortsbezogene Größen	226
14.2.3	Maschen- und Knotenpunktsatz im Strömungsfeld	231
14.2.4	Überlagerung elektrischer Strömungsfelder	234
14.3	Berechnung elektrischer Strömungsfelder	234
14.3.1	Homogene und einfache inhomogene Strömungsfelder	234
14.3.2	Radialsymmetrische Strömungsfelder	236
14.4	Erderanordnungen	241
14.4.1	Halbkugelerder	241
14.4.2	Vollkugelerder	245
15	Elektrostatisches Feld	250
15.1	Eigenschaften des elektrostatischen Feldes	250
15.2	Erscheinungsformen der Ladung	251
15.3	Beschreibung des elektrostatischen Feldes	253
15.3.1	Integrale Größen	253
15.3.2	Ortsbezogene Größen	255
15.4	Berechnung elektrostatischer Felder	257
15.4.1	Homogene und einfache inhomogene elektrostatische Felder	257
15.4.2	Elektrostatische Felder im geschichteten Dielektrikum	258

15.4.3	Radialsymmetrische elektrostatische Felder	261
15.4.4	Überlagerung elektrostatischer Felder	264
15.5	Energie und Kräfte im elektrostatischen Feld	267
15.5.1	Elektrostatisches Feld als Energiespeicher	267
15.5.2	COULOMBSches Gesetz	268
15.5.3	Kraft auf Trennflächen	269
15.5.4	Influenz und Polarisierung	272
16	Elektrisches Verhalten des Kondensators	274
16.1	Regeln zur Berechnung von Kondensatorschaltungen	274
16.1.1	Reihenschaltung und kapazitiver Spannungsteiler	274
16.1.2	Parallelschaltung und Ladungsteiler	277
16.1.3	Gemischte Kondensatorschaltungen	280
16.2	Schaltvorgänge in RC-Kombinationen	281
16.2.1	Ladevorgang	281
16.2.2	Entladevorgang	283
16.2.3	Umschalten vorgeladener Kondensatoren	285
16.3	Ladungsausgleich	288
16.3.1	Ladungsbilanz	288
16.3.2	Ladungsausgleich in einer Reihenersatzschaltung	289
16.3.3	Ladungsausgleich in einer Parallelersatzschaltung	294
16.3.4	Kapazitive Netzwerke	295
17	Stationäres magnetisches Feld	298
17.1	Eigenschaften des magnetischen Feldes	298
17.2	Beschreibung des magnetischen Feldes	300
17.2.1	Integrale Größen	300
17.2.2	Ortsbezogene Größen	302
17.3	Magnetische Kreise	304
17.3.1	Magnetisierungskennlinie	304
17.3.2	Ersatzschaltungen für magnetische Kreise	307
17.3.3	Berechnung magnetischer Kreise	309
17.4	Magnetische Felder stromdurchflossener Leiter	313
17.5	Energie und Kräfte im magnetischen Feld	317
17.5.1	Magnetische Energie	317
17.5.2	LORENTZ-Kraft	320
17.5.3	Energiedichte und Induktivität einer Leitung	323
18	Zeitlich veränderliches magnetisches Feld	326
18.1	Elektromagnetische Induktion	326
18.1.1	Induktionsgesetz – Bewegungsinduktion	327
18.1.2	Induktionsgesetz – Ruheinduktion	331
18.2	Selbstinduktion und Induktivität	333

18.3	Gegeninduktion und Gegeninduktivität	334
18.4	Transformatorgleichungen	340
19	Elektrisches Verhalten der Spule	343
19.1	Zusammenschaltung von Induktivitäten	343
19.1.1	Unverkoppelte Induktivitäten	343
19.1.2	Verkoppelte Induktivitäten	344
19.1.3	Transformator-Ersatzschaltungen	345
19.2	Schaltvorgänge an Spulen	348
19.2.1	Einschaltvorgang	348
19.2.2	Ausschaltvorgang	350
19.2.3	Umschalten vormagnetisierter Spulen	352
19.3	Modelle zum Transformator	355
19.3.1	Idealer Transformator	355
19.3.2	Verlustloser und streuungsfreier Transformator	357
19.3.3	Realer Transformator	359
20	Wechselwirkungen	362
20.1	Ladungsbewegungen in leitfähigen und nichtleitfähigen Medien	362
20.1.1	Konvektionsstrom	362
20.1.2	Feldstrom	363
20.1.3	Diffusionsstrom	364
20.1.4	Verschiebungsstrom	366
20.2	MAXWELLSche Gleichungen	368
20.2.1	Durchflutungsgesetz	368
20.2.2	Induktionsgesetz	369
20.2.3	Wirbelfreies Quellenfeld	370
20.3	Wechselseitige Verkopplungen im elektromagnetischen Feld	371
20.3.1	Wirbelverkopplungen bei Änderungen des magnetischen Flusses	371
20.3.2	Wirbelverkopplungen bei schnellen Stromänderungen	372
20.3.3	Parasitäre Effekte im HF-Bereich	374
20.4	Grundlegende Zusammenhänge	378
	Übungsaufgaben	379
	Berechnungsbeispiele im Übungsbuch	402
	Literaturverzeichnis	407
	Sachwortverzeichnis	408
	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 $\ominus$ zur Verfügung. Das Atom besitzt in diesem Fall einen Überschuss an positiven Ladungen $\oplus$ 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: $[i] = 1 \text{ A (AMPERE)}$. Er wird im

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

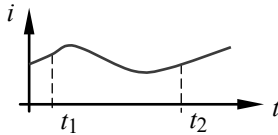


Bild 1.1: Zeitlich veränderlicher Strom

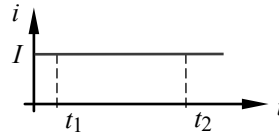


Bild 1.2: Gleichstrom

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 $\ominus$ 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.

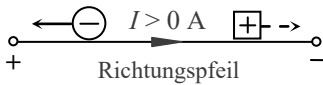


Bild 1.3: Richtungssinn des Stromes [Empfehlung nach DIN EN 60375]¹⁾

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:

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

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

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 Spannungspfeil 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 $U_q > 0 \text{ V}$ (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. $\varphi_{PB} = 0 \text{ V}$) 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.

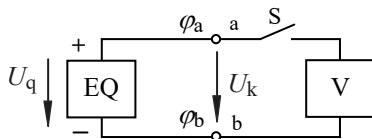


Bild 1.4: Offener elektrischer Kreis

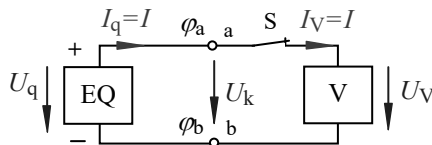


Bild 1.5: Geschlossener elektrischer Stromkreis

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.

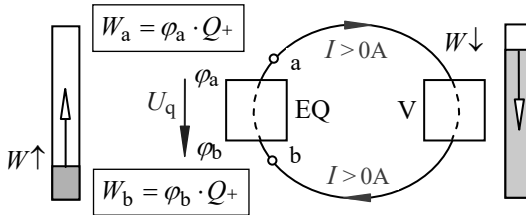


Bild 1.6: Modell zum Gleichstromkreis ($U_q > 0\text{ V}$)

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: $I_q = I_V = I$.

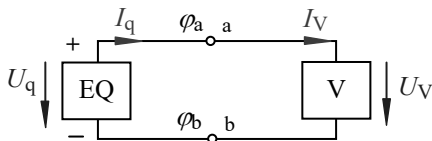


Bild 1.7: Zählpeile im elektrischen Stromkreis

ÜB: BB 1.3

Bei der Interpretation der Richtungen der Zählpeile stellt man folgendes fest:

Die Zählpeile von Spannung und Strom weisen an der Quelle (Bild 1.7 – links) eine entgegengesetzte Richtung zueinander auf. Die Zählpeile von Spannung und Strom zeigen dagegen am Verbraucher (Bild 1.7 – rechts) in die gleiche Richtung. Es muss demzufolge zwischen zwei verschiedenen Zählpeilsystemen unterschieden werden:

• Quellen-Zählpeilsystem:

Wenn die Zuordnung der Zählpeile 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-Zählpeilsystem dargestellt.

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

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

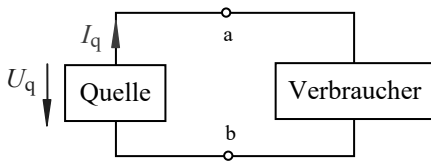


Bild 1.8: Quellen-Zählpeilsystem

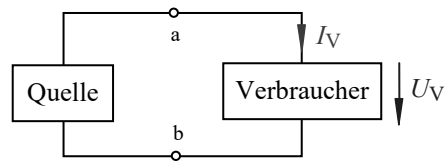


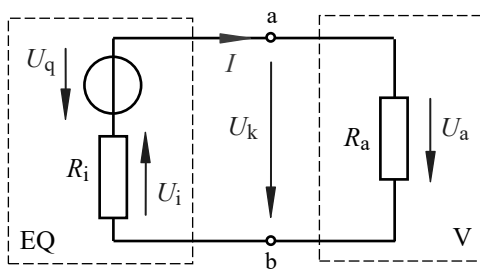
Bild 1.9: Verbraucher-Zählpeilsystem

• Verbraucher-Zählpeilsystem:

Wenn die Zuordnung der Zählpeile von Spannung und Strom die gleiche Richtung aufweisen (siehe Bild 1.9), so wird dieser schaltungstechnische Zustand im Verbraucher-Zählpeilsystem dargestellt. Danach hat der Strom durch den Verbraucher I_V die gleiche Richtung wie der Zählpeil 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.



ÜB: BB 1.4

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 Klemmenspannung 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 Klemmenspannung 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 Begrenzereigenschaft soll eine Strömung durch ein Stück Manganindraht (homogener Widerstandswerkstoff) betrachtet werden (Bild 1.11).

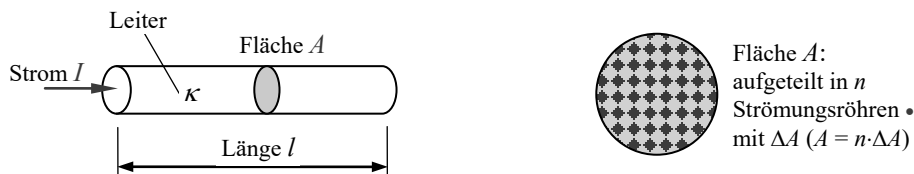


Bild 1.11: Einflussgrößen zur Begrenzung des elektrischen Stromes I

ÜB: BB 1.1

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 .

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

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: $[R] = 1 \Omega \text{ (OHM)}$ und: $[G] = 1 \text{ S (SIEMENS)}$.

1.5.2 Temperaturabhängigkeit

ÜB: BB 1.5

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. auch [11] – LB 2.3).

Sachwortverzeichnis

- Abfallflanke 334, 339, 352
Admittanz 130
Amplitude 102, 195
Amplitudenfrequenzgang 156, 170f
Amplitudenspektrum 104
Analogiemethode 219
Analyseverfahren 76, 153
Anpassungsfall 45
Anstiegsflanke 334, 339, 352
Äquipotentialfläche 222, 237, 265
Äquipotentiallinie 222, 241, 253
Äquivalenz, schaltungstechnische 60
Arbeitspunkt 23, 91, 310
ARON-Schaltung 207
Atom 12
Augenblickswert 95, 187
Ausgleichsstrom 292
Ausschaltvorgang 350
- Bandbreite** 165
Bandpass 164
Bandsperre 164
Baelement, nichtlineares 84
Baelement, reales 110
Baelemente-Kenngröße 23, 226, 253, 317, 333, 337
Baum, vollständiger 65
Baumzweig 77
Bemessungsgleichung 20f
Betriebskapazität 179
Betriebsparameter 137
Beweglichkeit 21
Bewegungsinduktion 327
Bezugsknoten 81, 296
Bezugspfeil 15
Bezugsphase 207
Bezugspotential 17, 80
Bezugstemperatur 22
Bezugszeiger 116
Bezugszeitpunkt 95, 116, 196
Bildbereich 122, 149, 189
Blindleistung 188, 355
Blindleistungskompensation 193
Blindspannung 190
Blindstrom 191
Blindwiderstand, indukt. 107, 140, 168, 360
Blindwiderstand, kapazitiver 109, 132, 168
Brechungsgesetz 261
Brücke, abgleichbare 143
Brücke, nicht abgleichbare 143
Brückenschaltung 56, 118
- COULOMB-Kraft** 268, 327
COULOMBSches Gesetz 268
- Dämpfungskonstante** 181
Darstellung, normierte 48
Deformationspolarisation 272
Dezibel 173
Dielektrikum 250, 268, 354
Dielektrikum, geschichtetes 257
Differenzierglied 287
Diffusionsstrom 352
Diffusionsstromdichte 353
Diode 85
Dipol 273
Drehstromgenerator 195
Dreieckschaltung 61, 200
Dreieck-Stern-Transformation 61
Dreileiternetz 209
Dreiphasensystem 195
Dreipolschaltung 59
Driftgeschwindigkeit 350
Driftgeschwindigkeit, mittlere 229
Durchbruchspannung 86
Durchflutung 300, 304, 307, 357
Durchflutungsgesetz 302, 310, 356
Durchlassbereich 164
Durchlassspannung 85
Durchlassstrom 86
- Ebene, komplexe** 122
Effektivwert 99, 104, 116, 127, 186
Effektivwertzeiger 127
Eindringtiefe 373
Einschaltvorgang 348
Einstellwiderstand 22
Eisenkern 310
Eisenverluste 110, 360
Eisenweglänge 312
Elektrode 221, 233, 236
Elementarladung 12
Elementarmagnete 305
Elementarschaltung 32
Elementarvierpol 177
Energie 28
Energie, elektrische 268
Energie, gespeicherte 267, 270, 318
Energie, magnetische 317, 324
Energiedichte 268, 271, 323
Energieerhaltungssatz 29

- Energieniveau 16, 254
Energiesatz 28
Energiespeicher 267, 318
Entladestrom 268, 281
Entladevorgang 283
Erder, virtueller 246
Erderanordnung 241
Erregerstrom 301, 336
Erregerstrom, periodischer 333
Erregerwicklung 326
Ersatzinduktivität 346
Ersatz-Kennlinie 89
Ersatzschaltbild, reduziertes 361
Ersatzschaltung 90, 328
Ersatzschaltung, magnetische 301, 307
Erzeuger-Zählpfeilsystem 331, 333
Exponentialform 123, 128, 144, 190
- FARADAYScher Käfig 272
Fehler, unsymmetrischer 209, 211
Feld, elektrostatisches 250
Feld, homogenes 216
Feld, homogenes elektrostatisches 253, 257, 269
Feld, homogenes magnetisches 309, 328
Feld, inhomogenes 217
Feld, inhomogenes elektrostatisches 257
Feld, inhomogenes magnetisches 321
Feld, kugelsymmetrisches 261
Feld, radialsymmetrisches 217, 236
Feld, radialsymmetrisches elektrostatisches 261
Feld, stationäres magnetisches 298
Feld, zeitlich veränderliches magnetisches 326
Feld, zylindersymmetrisches 263
Feldbegriff 214
Feldbild 215
Feldgröße, skalare 216, 226
Feldgröße, vektorielle 226
Feldkonstante, elektrische 250
Feldkonstante, magnetische 299
Feldpunkt 214, 228, 249, 271
Feldraum, passiver 221
Feldstärke, elektrische 227, 242, 255, 272, 352
Feldstärke, magnetische 298, 305, 313, 356
Feldstärkeberechnung 248
Feldstärkevektor 234
Feldstrom 351
Feldvektoren 378
Festwiderstand 22
Filter-Flankensteilheit 173
Flächenladung 252
Flächenladungsdichte 252, 255, 355
Flächenverhältnis 312
Fluss, elektrischer 253, 354
Fluss, magnetischer 301, 307, 317, 323, 331, 336, 360
Fluss, verketteter 317
Fluss, zeitlich veränderlicher magnetischer 333
Flussdichte, elektrische 255
Flussdichte, magnetische 303, 311, 320, 327f, 357
Flussdichtelinie 327
Flussdichtelinie, elektrische 358
Flussdichtevektor 320
Flusslinie 313
Flusslinie, elektrische 253, 354
Flussröhre 268, 303
Flussröhre, magnetische 298, 308
Flussverbreiterung 311
Form, kartesische 122
Form, trigonometrische 123
FOURIER-Reihe 103
FOURIER-Koeffizient 103
Frequenz 94, 195
Frequenz, imaginäre 156
Frequenz, normierte 171
Frequenzabhängigkeit 156
Frequenzdekade 170
Frequenzgang 107, 375
Frequenzgang, komplexer 156
- Galvanometer 57
Gamma-Vierpol 178, 180
GAUßscher Satz 358
Gegenelektrode 237
Gegeninduktion 334
Gegeninduktionsspannung 335, 338, 341
Gegeninduktivität 334, 357
Gegenladung 250, 261
Gegensystem 209
Generatorstränge 195
Generator-Strangspannung 196
Gesamtfluss 335
Geschwindigkeitsvektor 321
Gleichanteil 97
Gleichgröße 94
Gleichrichtwert 97
Gleichspannung 16
Gleichstrom 14, 31
Gleichstromkreis 17
Gleichstromwiderstand 23, 85
Gradient 227, 351
Graph 65
Grenzfrequenz 142, 157, 165
Größe, integrale 219, 226, 253, 300

Größe, ortsbezogene 219, 226, 255, 302

Grunddämpfung 157

Grundfrequenz 103

Grundschiwingung 103

Grundstromkreis 31, 44

Grundwelle 103

Güte 111, 113, 163, 166, 376

Halbkugelerder 241

Halbleiter 13

HALL-Konstante 323

HALL-Sonde 305, 322

HALL-Spannung 323

Harmonische 103

Hauptfluss 335

Hauptinduktivität 361

Heißeiter 87

HELMHOLTZscher Überlagerungssatz 68, 149f

HF-Ersatzschaltbild 374

Hochpass 160

Hohlleiter 314

HOPKINSONSches Gesetz 301, 311, 333

Hüllenintegral 233, 357

Imaginärteil 122, 140, 144, 157

Impedanz 128

Indikatorzweig 144

Induktion, elektromagnetische 326

Induktionsgesetz 327, 349, 369, 371

Induktivität 107, 129, 317, 323, 333, 335

Induktivität, äußere 325

Induktivität, innere 324

Induktivität, unverkoppelte 343

Induktivität, verkoppelte 344

Induktivitätsbelag 179

Induktivitätsmessbrücke 145

Influenz 272

Innenwiderstand 19, 52, 71, 152

Integrierglied 287

Inversbetrieb 176

Inversion 135

Inversionskreis 135

Inversionsregeln 139

Ionenpolarisation 273

Kaltleiter 88

Kapazität 109, 262, 267

Kapazitätsbelag 179

Kapazitätsmessbrücke 146

Kennlinie 54

Kennlinie, idealisierte 90

Kennwiderstand 163

Kettenschaltung 175

Ketten-Zählpfeilsystem 174, 359

KIRCHHOFFSche Sätze 26, 65, 120, 132, 149

Klemmenspannung 17, 40, 328

Klemmenverhalten 40

Klirrfaktor 105

Knoten 26

Knoten, echter 32

Knoten, virtueller 33, 296

Knotenanalyse 80, 154, 295

Knotenkapazität 296

Knotenleitwert 81

Knotenpotentialanalyse 80

Knotenpotentialverfahren 153

Knotenpunkt 27, 32

Knotenpunktsatz 27, 35, 65, 89, 132, 201, 277, 308, 343

Koaxialleitung 315

Koeffizientenschema 77, 81, 154, 296

Koerzitivfeldstärke 307

Kompensatorschaltung 56

Komponenten-Ersatzschaltungen 212

Komponenten, symmetrische 209

Kondensator 130, 274, 354

Kondensator, realer 112

Kondensator, vorgeladener 285

Kondensatorschaltung 274

Kondensatorschaltung, gemischte 280

Konduktanz 131

Konstantendraht 22

Kontinuität 17, 233, 350

Kontinuitätsgleichung 350, 355f, 378

Kontinuitätssatz 233, 370

Konvektionsstrom 350, 353, 362

Konvektionsstromdichte 363

Konzentrationsgefälle 351

Koppelkapazität 296

Koppelleitwert 81

Koppelwiderstand 78

Kopplungsfaktor 335, 344, 357

Kraft 269

Kreis, magnetischer 304

Kreis, unverzweigter magnetischer 307

Kreis, verkoppelter magnetischer 335

Kreis, verzweigter magnetischer 308

Kreisfrequenz 95, 116

Kugelkondensator 262

Kurzschluss, einsträngiger 213

Kurzschlussfall 44

Kurzschlussstrom 73, 91, 152, 213

Kurzschlussstromrückwirkung 176

Kurzschlussübertragungswiderstand 175

Kurzschlusszweig 32

- Ladestrom 267, 281
Ladevorgang 281
Ladezustand 288
Ladung 12f, 218, 250, 296, 320
Ladung, bewegte 327
Ladung, verschobene 289
Ladungsausgleich 288
Ladungsbewegung 362
Ladungsbilanz 288
Ladungserhaltungssatz 252
Ladungsgesetz 253, 262, 274
Ladungsmenge 14
Ladungsteilerregel 279
Ladungsträgerbeweglichkeit 229, 352
Ladungsträgerkonzentration 352, 353
Ladungstransport 17, 25, 350
Ladungstrennung 327, 350
Ladungszufluss 354
Längsweig 177
Lastfälle 44
Lastkennlinie 91
Lastwiderstand 31, 71, 356
Lastwiderstandsgerade 47
Lastzweipol, komplexer 186
Leerlauf 44
Leerlaufspannung 71, 91, 152
Leerlaufspannungsrückwirkung 175
Leerlaufübertragungsleitwert 175
Leistung 44, 186
Leistung, elektrische 29
Leistung, komplexe 189, 204, 356
Leistungsaufnahme, maximale 46
Leistungsbilanz 29
Leistungsdichte 230
Leistungsfaktor 191
Leistungsfluss 186, 196, 199
Leistungstransformator 355
Leistungsumsatz 44
Leiter 13
Leiter, elektrischer 13
Leiter, stromdurchflossener 298, 313
Leiterlänge, wirksame 321, 331
Leiterschleife 299, 327, 330
Leiterspannung 196
Leiterstab 326
Leiterstrom 198, 202
Leitfähigkeit, spezifische elektr. 20, 221, 352
Leitung 179
Leitungselement, differenzielles 180
Leitungsgleichungen 182
Leitwert 21
Leitwert, komplexer 130, 138
Leitwert, magnetischer 300
Leitwertbelag 179
LENZsche Regel 332
Liniendiagramm 95
Linienintegral 232
Linienladung 252, 265
Linienladungsdichte 252
Linkssystem 210
LORENTZ-Kraft 320, 327
Lösung, grafische 135
Luftspalt 310
Luftspaltgerade 310
Luftspule 300
Magnetisierungskennlinie 304, 310
Magnetisierungsstrom 361
Masche, abhängige 65
Masche, unabhängige 65
Maschensatz 26, 33, 65, 89, 113, 132, 148, 152, 197, 232, 274, 311, 342
Maschenstrom 76, 153
Maschenstromanalyse 76, 153
Maschenumlauf 26
Maschenwiderstand 78
Massivleiter 313
Maximalwert 95, 107, 116, 186
Maximalwertzeiger 127
MAXWELLSche Gleichungen 356, 359, 378
MAXWELL-WIEN-Brücke 145
Messtechnik 52
Messung, spannungsrichtige 55
Messung, stromrichtige 54
Messwerk 52
Metallfaden-Glühlampe 85, 88
Mischgröße 94
Mitsystem 209
Mittelpunktleiter 195
Mittelwert 97
Mittelwert, arithmetischer 97
Mittelwert, quadratischer 99
Nebenwiderstand 53
Netzwerk, kapazitives 295
Netzwerk, lineares 65
Netzwerkberechnung 65, 149
NF-Ersatzschaltbild 110
Nichtleiter 13
Nichtlinearitätskoeffizient 86
Normalkomponente 260
Normalwiderstand 57
Nulldurchgang 101
Nullimpedanz 212

- Nullindikator 56
- Nullkomponente 210
- Nullsystem 210
- Nullphasenwinkel 95
- Oberschwingung** 103
- OHMSches Gesetz 23, 230
- Oktavabstand 170
- Orientierungspolarisation 273
- Ortskurve 137, 140, 157, 173
- Parallelschaltung** 32, 35, 131, 191, 277, 343
- Parallelschaltung, gleichsinnige 345
- Parallelschwingkreis 114, 162
- Pegel 173
- Periodendauer 94
- Permeabilität 299, 311
- Permeabilität, relative 299
- Permittivität 250
- Permittivität, relative 250
- Phasendrehbrücke 147
- Phasenfrequenzgang 156, 172
- Phasenkonstante 181
- Phasenoperator 196
- Phasenrelationen 132
- Phasenspektrum 105
- Phasenwinkel 106, 123, 129, 145, 166
- Plattenkondensator 257
- Polarisation 272
- Polarisationsverluste 112
- Potential 16f, 144, 224, 226, 231
- Potential, elektrisches 80
- Potentialänderung 227
- Potentialberechnung 247
- Potentialbezugspunkt 227, 263
- Potentialdifferenz 16, 323
- Potentialfeld, elektrisches 218, 356
- Potentialgefälle 225, 245, 351
- Pressmassekern 319
- Primärspule 340
- Prinzipzeigerbild 116
- Punktladung 251, 262
- Quelle, elektrische** 40
- Quellen-Charakteristik 359
- Quellenfeld 217
- Quellenfeld, wirbelfreies 358f, 370
- Quellenfreiheit 368
- Quellenkennlinie 41, 47, 91
- Quellenleistung 30, 40
- Quellenspannung 17, 78
- Quellen-Zählpfeilsystem 18, 29, 40, 268, 301, 318
- Querstrom 50
- Querzweig 57, 118, 143, 177
- Raumladung** 251, 255, 350
- Raumladungsdichte 229, 251, 363, 365
- RC-Hochpass 161
- RC-Kombination 158, 281
- RC-Phasenschiebekette 142, 155
- RC-Tiefpass 158
- Reaktanz 128
- Realteil 122, 140, 144, 157
- Rechteck-Impulsfolge, periodische 105
- Rechteck-Impulsfolge, positive 354
- Rechtsschrauben-Regel 301, 320, 331, 337, 371
- Rechtssystem 209, 215
- Reihenschaltung 31, 33, 131, 190, 274, 289, 307, 343
- Reihenschaltung, gleichsinnige 344
- Reihenschwingkreis 113, 133, 162
- Remanenzflusssdichte 306
- Resistanz 128
- Resonanzfall 140
- Resonanzfrequenz 114, 165
- Richtungspfeil 15
- Richtungssinn 15
- Ringspule 312, 319, 333, 338
- RLC-Kombination, gemischte 115
- RL-Kombination 348
- Rücktransformation 127
- Ruheinduktion 331
- Sättigungsstrom** 86
- Schaltvorgang 281, 348
- Scheinleistung 188
- Scheinleitwert 106
- Scheinwiderstand 106
- Scheinwiderstandsübersetzung 356
- SCHERING- Brücke 146
- Schleusenspannung 86
- Schrittspannung 242, 247
- Schrittspannung, maximale 244
- Schwingkreis 162
- Sekundärspule 340
- Selbstinduktion 333
- Selbstinduktionsspannung 333, 338, 341
- Selbstinduktivität 357
- SKIN-Effekt 107, 373
- Spannung, elektrische 16f
- Spannung, induzierte 329, 332, 348
- Spannungsabfall 17
- Spannungsmessbereichserweiterung 52

- Spannungsquellen-Ersatzschaltbild 41, 71, 151
Spannungsteiler, belasteter 49
Spannungsteilerregel 33f, 89, 132
Spannungsteilerregel, kapazitive 276
Spannungsüberhöhung 167
Spannungswelle 184
Spannungszählpfeil 26
Spannungszeigerbild 118
Spektralbereich 157
Sperrbereich 164
Sperrstrom 86
Spiegelerder 246
Spiegelladung 265, 266
Spiegelungsprinzip 246
Spule 300, 333, 343, 352
Spule, reale 110
Spule, vormagnetisierte 352
Stabilisierungsfaktor 93
Stellwiderstand 49
Stern-Dreieck-Transformation 63
Sternschaltung 59, 200
Stetigkeit 260
Stoff, diamagnetischer 300
Stoff, ferromagnetischer 300
Stoff, paramagnetischer 300
Strangstrom 202
Streufluss 335
Streuinduktivität 361
Strom, zeitlich veränderlicher 14
Stromdichte 222
Stromdichte, elektrische 228
Stromdichtelinie 223
Stromkreis, elektrischer 23
Stromkreis, unverzweigter 17, 31
Stromkreis, verzweigter 31
Strommessbereichserweiterung 53
Stromquellen-Ersatzschaltbild 41, 73, 151
Stromröhre 222, 228, 350
Stromröhre, differenzielle 228
Strom-Spannungs-Kennlinie 23, 40, 54, 84
Stromstärke 13
Stromstärke, elektrische 13
Stromteilerregel 35, 68, 132, 150
Strömungsfeld 221
Strömungsfeld, homogenes elektrisches 234
Strömungsfeld, inhomogenes 229, 235
Strömungsfeld, kugelsymmetrisches 236
Strömungsfeld, zylindersymmetrisches 238
Strömungslinie 223
Stromzählpfeil 27
Stromzeiger, konjugiert komplexer 190
Superposition 68, 76, 149
Suszeptanz 131
Taktfrequenz 287
Tangentialkomponente 260
Tastverhältnis 354
Teilstrom 37
Temperaturabhängigkeit 21
Temperaturkoeffizient 21, 87
Temperaturspannung 86
T-Ersatzschaltung 176, 346, 358
Thermistor 87
THOMSONSche Brückenschaltung 58
THOMSONSche Schwingungsgleichung 114, 162
Tiefpass 157
Transformation 127
Transformationsregel 62, 126
Transformator 355
Transformator, idealer 355
Transformator, realer 359
Transformator, verlustloser 341, 346
Transformator, verlustloser und streuungsfreier 357
Transformator-Ersatzschaltung 345
Transformatorgleichungen 340
Transformator-Verluste 360
Trennfläche 257, 269
Trennfläche, schräge 260
Trennstelle 70, 151, 295
Trenntransformator 355
Übergangswiderstand 242, 247
Überlagerung 101, 121, 210, 234, 246, 264, 313, 340
Übersetzungsverhältnis 355
Übertrager 340, 355, 360
Übertragungsmaß, komplexes 182
Übertragungsmaß, längenbezogenes 181
Übertragungsvierpol 174
Umlauf 26
Umlaufanalyse 76, 153
Umlaufintegral 232, 302, 356
Umlaufsinn 66
Umlaufspannung 331, 369
Ummagnetisierungsverluste 360
Umschalten 285, 352
Unabhängigkeitsbedingung 28, 77
Ursache-Wirkungs-Modell 24, 220, 226, 253, 302, 304
Varistor 86
Vektor-Basisssystem 215

-
- Vektorfeld 216
 - Verbindungszweig 77
 - Verbraucher, symmetrischer 198
 - Verbraucherleistung 30
 - Verbraucherstrom 200
 - Verbraucher-Zählpfeilsystem 19, 30, 174, 267, 318, 333, 340, 349
 - Verkettungsfaktor 197
 - Verkopplung 335
 - Verkopplungen, wechselseitige 371
 - Verlustfaktor 146
 - Verlustwiderstand 111, 163
 - Verlustwiderstandskoeffizient 377
 - Verlustwinkel 111, 112
 - Verschiebungsfluss 253, 273, 354, 367
 - Verschiebungsflussröhre 253
 - Verschiebungspolarisation 272
 - Verschiebungsstrom 354, 355, 366
 - Verschiebungsstrom, dielektrischer 356
 - Verschiebungsstromdichte 355, 367
 - Vierleiternetz 209
 - Vierpol 156, 174, 340, 345, 355
 - Vierpolparameter 174
 - Vollausschlagspannung 52
 - Vollausschlagstrom 52
 - Vollkugelerder 245
 - Vorwärtsbetrieb 176
 - Vorwiderstand 52
 - Wanderungsgeschwindigkeit** 184
 - Wanderwelle 183
 - Wandler 340
 - Wechselgröße 94, 156
 - Wechselspannung, sinusförmige 329
 - Wechselstrom-Brückenschaltung 143
 - Wechselstromkreis, gemischter 131
 - Wechselstromschaltung, spezielle 141
 - WEIßsche Bezirke 305
 - Wellengleichung 184
 - Wellenlänge 179
 - Wellenmodell 183
 - Wellenwiderstand 182, 185
 - WHEATSTONEsche Brückenschaltung 57
 - Wicklung 298, 357
 - Wicklungskapazität 377
 - Wicklungsrichtung 336
 - Wicklungssinn 337, 340, 344
 - Wicklungssinn, gegensinniger 337
 - Wicklungssinn, gleichsinniger 337
 - Wicklungsverluste 110, 360
 - Widerstand 20f
 - Widerstand, differenzieller 23, 85
 - Widerstand, elektrischer 20
 - Widerstand, komplexer 128, 138, 144
 - Widerstand, magnetischer 300
 - Widerstand, ohmscher 106, 129
 - Widerstand, spezifischer elektrischer 20
 - Widerstandsbelag 179
 - Widerstands-Temperatur-Kennlinie 87
 - Windung 298, 317
 - Windungszahl 301, 305, 332, 357
 - Wirbelfeld 217, 221, 298, 313
 - Wirbelfeld, quellenfreies 359
 - Wirbelstrom 357, 371f
 - Wirbelstromverluste 360, 371
 - Wirkleistung 187, 205, 355
 - Wirkleistungsmesser 206
 - Wirkspannung 190
 - Wirkstrom 191
 - Wirkungsgrad 44
 - Wirkwiderstand 106
 - Zählpfeil** 15, 26, 32, 66, 116, 150, 290, 301, 328
 - Zählpfeilsystem, symmetrisches 355
 - Z-Diode 91
 - Zeiger 96
 - Zeiger, konjugiert komplexer 125, 135
 - Zeiger, rotierender 125
 - Zeiger, ruhender 125
 - Zeigerbild 107, 115, 120, 188, 197
 - Zeigerbild, qualitatives 116
 - Zeigerbild, quantitatives 116
 - Zeigerdarstellung 122
 - Zeigerdiagramm 96, 120
 - Zeitbereich 120
 - Zeitfunktion 284
 - Zeitfunktion, nichtsinusförmige 94
 - Zeitfunktion, periodische 94
 - Zeitfunktion, sinusförmige 95
 - Zeitkonstante 282, 349
 - Zweig 26, 32
 - Zweigspannung 82
 - Zweigstrom 26, 32, 68
 - Zweipol 31
 - Zweipol, aktiver 310
 - Zweipol, elementarer 106, 110
 - Zweipol, passiver 33, 38, 79, 310
 - Zweipoltheorie 70, 151, 174
 - Zweiter 174
 - Zylinderkondensator 264
 - Zylinderspule 299
 - II-Ersatzschaltung** 177, 180, 347