

Springer-Lehrbuch



Reinhold Paul

Elektrotechnik 1

Grundlagenlehrbuch

Felder und einfache Stromkreise

Zweite, neubearbeitete und erweiterte Auflage

Mit 212 Abbildungen und 32 Tafeln

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

Dr.-Ing. habil. Reinhold Paul
Universitätsprofessor
Technische Universität Hamburg-Harburg
Bereich Technische Elektronik
2100 Hamburg 90

ISBN 978-3-540-51412-1

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek:
Paul, Reinhold: Elektrotechnik: Grundlagenlehrbuch/R. Paul.

Bd. 1. Felder und einfache Stromkreise. — 2., neubearb. u. erw. Aufl. — 1990
ISBN 978-3-540-51412-1 ISBN 978-3-662-21863-1 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-21863-1

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1990
Originally published by Springer-Verlag in 1990

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Satz: Macmillan India Ltd., Bangalore 25;

2362/3020-543210-Gedruckt auf säurefreiem Papier.

Vorwort zur zweiten Auflage

Aus der Erkenntnis, daß die Neuauflage eines Buches nicht nur Anlaß zu Verbesserungen bietet, sondern sich der Autor auch Erwartungen und Wünschen der Leser verpflichtet fühlt, wurde die vorliegende Ausgabe durchgängig aktualisiert, ohne jedoch das Grundkonzept zu ändern.

Die Leser wirkten dabei durch eine Reihe von wertvollen Hinweisen mit, wofür ich herzlich danke. Ich schließe zugleich die Bitte vor allem an die Lernenden ein, auch weiterhin mit ideenreichen Vorschlägen nicht zu sparen, schließlich kommen sie dem Leserkreis doch selbst am besten zugute.

Mein besonderer Dank gilt dem Springer-Verlag für die sehr gute Zusammenarbeit und das großzügige Entgegenkommen bezüglich meiner Wünsche.

Hamburg, im Sommer 1989

R. Paul

Vorwort zur ersten Auflage

Zu denjenigen Gebieten von Wissenschaft und Technik, die sich während der verflossenen beiden Jahrzehnte besonders rasch entwickelten, zählt unbestritten die Informationstechnik mit der Mikroelektronik als ihrer technischen Basis. Aus der Sicht des Elektrotechnikers gehören dazu extrem miniaturisierte Halbleiterbauelemente und Schaltkreise, die mit der Entwicklung des Mikrorechners eine neue Ära der Informationsverarbeitung einleiteten. Es steht heute außer Zweifel, daß die Bedeutung der Informationstechnik für viele Bereiche der Wirtschaft weiter steigen wird, sind doch die derzeit vorsichtig absteckbaren wissenschaftlichen Grenzen und Anwendungsmöglichkeiten noch nicht annähernd erreicht.

An dieser Entwicklung hat der Elektrotechniker in ganz besonderem Maße Anteil, da die Informationstechnik sehr große Teile seines Tätigkeitsfeldes umfaßt. Eine ständige Aktualisierung seiner Fach- und Grundausbildung ist daher zwingende Notwendigkeit. Das gilt insbesondere für die mathematisch-physikalische Seite und vor allem für den ingenieurtechnischen Anteil: die Grundlagen der Elektrotechnik, ihre Bauelemente, Netzwerke, Schaltungen und die Anwendung von Schaltkreisen in den wichtigsten Vertiefungsrichtungen der Elektrotechnik. Vor einem solchen Hintergrund ein Ausbildungskonzept „Grundlagen der Elektrotechnik“ zu schaffen, war der Ausgangspunkt dieses Lehrbuches um die Mitte der 70er Jahre, wohl wissend, daß gerade die inhaltliche Gestaltung, die pädagogisch-methodische Durcharbeitung sowie eine übergreifende Vorbereitung nachfolgender Lehrveranstaltungen die Motivation des angehenden Elektroingenieurs zu seinem Fachgebiet ganz entscheidend bestimmen.

Aufbauend auf physikalische und mathematische Kenntnisse der höheren Schulausbildung, ist es das besondere Ziel des Lehrbuches, die Gesetzmäßigkeiten des elektromagnetischen Feldes und seiner Anwendungen, die Bedeutung des Energiebegriffes, den Übergang zwischen Feldphänomenen und Netzwerkelementen sowie das große Gebiet der Netzwerkanalyseverfahren bei unterschiedlicher Erregung systematisch zu entwickeln. Bedacht wurde dabei, die Grundausbildung nicht als etwas Abgeschlossenes, Selbständiges aufzufassen, sondern als das, was sie ist: die erste Stufe nachfolgender Lehrgebiete.

Methodisch ist der Inhalt so angelegt, daß der Stoff nicht nur selbständig erarbeitet werden kann, sondern daß der Lernende systematisch durch Lehrsätze, Lösungsstrategien, Zielvorgaben und Wiederholungsfragen in den ständigen Dialog mit dem Lehrbuch einbezogen und so immer wieder auf die Schwerpunkte hingewiesen wird.

Der Stoffumfang gebot, das Gesamtgebiet auf zwei Bände zu verteilen. Der erste Band behandelt nach einer kurzen Einführung in Einheiten, Einheitssysteme und Gleichungen, die physikalische Interpretation der Richtungsdefinitionen von Vektoren und Zählpfeilen vor allem elementare elektrische Erscheinungen: das

elektromagnetische Feld, die Grundbauelemente, Stromkreise und den Energiebegriff. Aus didaktischen Gründen stehen die ruhende und bewegte elektrische Ladung am Anfang, bilden sie doch die Grundlage der Begriffe elektrisches Feld und Trägerströmung. Zur Erleichterung des Verständnisses wird das elektromagnetische Feld zunächst in seinen Bestandteilen getrennt betrachtet: Strömungsfeld, elektrostatisches und magnetisches Feld. Erst später erfolgt die Berücksichtigung der wechselseitigen Feldkopplung. Schwierigkeiten bereitet in einer Einführungsvorlesung immer die Verbindung zwischen Feldgrößen und solch globalen Begriffen wie Strom, Spannung, Widerstand u. a., die als Schulwissen meist verfügbar sind. Deshalb wird dem gegenseitigen Zusammenhang dieser Größenarten besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Der zweite Band hat Netzwerkelemente und Netzwerkanalyseverfahren bei verschiedenartigster Netzwerkanregung zum Inhalt.

Dem Buch liegen langjährig durchgeführte Vorlesungen zugrunde. Die Motivation dazu für den Autor entspringt der Erkenntnis, daß auch die Grundlagen eines Fachgebietes nie abgeschlossen sein können, sondern von Zeit zu Zeit immer wieder einmal neu formuliert werden müssen. Das bestätigte sich auch in zahlreichen Diskussionen mit Fachkollegen, wodurch das Vorhaben sehr gefördert wurde. Fast erscheint es als Ironie des Schicksals, daß gerade sie durch Umstände, die den Betroffenen in allen Einzelheiten bekannt sind, am wenigsten von ihren Anregungen werden profitieren können. Nicht übersehen werden sollen manche Anregungen, die sich aus Diskussionen mit Herrn Prof. Dr. R. S. Müller während eines längeren Aufenthaltes an der University of California Berkeley ergaben.

Während der praktischen Bearbeitungsphase des Manuskriptes hat sich Herr Dr.-Ing. sc. techn. H. G. Schulz sehr verdient gemacht. Frau R. Schmidt besorgte mit vielen fleißigen Helferinnen die Reinzeichnungen. Ihnen gilt mein besonderer Dank. Dem Springer-Verlag danke ich für die gute Zusammenarbeit, sorgfältige Drucklegung des Buches sowie dafür, daß meinen Wünschen weitgehend entsprochen worden ist. Ein persönlicher Dank gilt auch meiner Frau, die mit großer Geduld — wie so oft — ein schwer lesbares Manuskript schrieb, sowie meinem Sohn, der als erster studentischer Leser mit fördernder Kritik nicht sparte.

München, im Herbst 1984

R. Paul

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der wichtigsten Symbole	XV
0 Einführung	1
0.1 Das Lehrgebiet Elektrotechnik — Elektronik	1
0.2 Physikalische Größen und Gleichungen	5
0.2.1 Physikalische Größen und Größenarten. Physikalische Gleichungen	5
0.2.2 Dimensionen. Einheiten.	8
0.2.3 Arten physikalischer Gleichungen.	14
0.2.4 Arten physikalischer Größen. Vorzeichen- und Richtungsregeln . . .	15
1 Beschreibung elektrischer Erscheinungen	23
1.1 Teilchenmodell. Grundvorstellungen	23
1.2 Feldmodell	24
1.3 Teilchenmodell. Elektrische Ladung Q	26
1.3.1 Eigenschaften der elektrischen Ladung.	26
1.3.2 Ladungsverteilungen	30
1.3.3 Erhaltungssatz der Ladung.	35
1.4 Bewegte Ladung. Elektrische Stromstärke I	35
1.4.1 Wesen einer Strömung. Strombegriff	35
1.4.2 Elektrische Stromstärke I	38
1.4.3 Zusammenhang Strom — Ladung.	44
1.4.4 Strommessung	45
2 Das elektrische Feld und seine Anwendungen	47
2.1 Feldbegriffe	47
2.1.1 Wesen und Feldeigenschaften	47
2.1.2 Feldgrößen und Koordinatensysteme.	51
2.1.3 Lokale Felddarstellung. Integrale Größen.	51
2.2 Feldstärke E und Potential φ	52
2.2.1 Feldstärke E	52
2.2.2 Potential φ	58
2.2.3 Bestimmung der Feldstärke aus dem Potential	65
2.2.4 Potentialüberlagerung.	67
2.2.5 Potential φ und Spannung U	68
2.3 Elektrisches Strömungsfeld.	71
2.3.1 Stromdichte S	71

2.3.2	Verknüpfung von Stromdichte S und Feldstärke E . Leitfähigkeit κ	78
2.3.3	Eigenschaften des Strömungsfeldes im Raum und an Grenzflächen	84
2.3.3.1	Strömungsfelder wichtiger Leiteranordnungen	84
2.3.3.2	Bestimmung des Feldbildes.	87
2.3.3.3	Kontinuitätsgleichung im Strömungsfeld.	89
2.3.3.4	Verhalten an Grenzflächen	92
2.4	Integralgrößen des stationären Strömungsfeldes: Strom I , Spannung U , Widerstand R . Gleichstromkreis	95
2.4.1	Spannungsquelle. Quellenspannung U_Q	98
2.4.2	Widerstand R . Leitwert G	101
2.4.2.1	Widerstandsbegriff.	101
2.4.2.2	Zusammenschaltungen von Widerständen und Leitwerten	106
2.4.2.3	Lineare und nichtlineare Strom-Spannungs-Relation.	112
2.4.2.4	Widerstand als Bauelement.	113
2.4.3	Aktive und passive Zweipole. Grundstromkreis.	117
2.4.3.1	Energie und Leistungsumsatz in Zweipolen	117
2.4.3.2	Zweipolgleichungen. Kennlinien und Kenngrößen linearer Zweipole	120
2.4.3.3	Grundstromkreis.	128
2.4.3.4	Anwendungsbeispiele des Grundstromkreises	131
2.4.3.5	Leistungsumsatz im Grundstromkreis	136
2.4.3.6	Nichtlineare Zweipole im Grundstromkreis	140
2.4.4	Analyse von Gleichstromkreisen.	145
2.4.4.1	Zweigstromanalyse.	145
2.4.4.2	Hilfsverfahren für die Netzwerkanalyse.	151
2.4.4.3	Zweipoltheorie	154
2.5	Elektrostatisches Feld: Elektrische Erscheinungen in Nichtleitern . .	159
2.5.1	Feldstärke- und Potentialfeld	160
2.5.2	Verschiebungsflußdichte D	163
2.5.3	Verknüpfung der Verschiebungsflußdichte D und der Feldstärke E im Dielektrikum	166
2.5.4	Eigenschaften des elektrostatischen Feldes im Raum.	168
2.5.4.1	Felder im Dielektrikum.	168
2.5.4.2	Eigenschaften des elektrostatischen Feldes.	169
2.5.4.3	Eigenschaften an Grenzflächen	175
2.5.5	Die Integralgrößen des elektrostatischen Feldes	181
2.5.5.1	Verschiebungsfluß Ψ	181
2.5.5.2	Kapazität C	183
2.5.5.3	Beziehung zwischen Widerstand und Kondensator im Strömungs- und elektrostatischen Feld.	190
2.5.6	Elektrisches Feld im Nichtleiter bei zeitveränderlicher Spannung . .	192
2.5.6.1	Strom-Spannungs-Relation des Kondensators.	192
2.5.6.2	Verschiebungsstrom i_v	197
2.5.6.3	Verschiebungsstromdichte S_v	200

3 Das magnetische Feld und seine Anwendungen	205
3.1 Die vektoriellen Größen des magnetischen Feldes	206
3.1.1 Induktion \mathbf{B}	206
3.1.2 Magnetische Erregung. Magnetische Feldstärke \mathbf{H}	215
3.1.3 Umlaufintegral der magnetischen Feldstärke \mathbf{H} . Durchflutung Θ . Wirbelcharakter des magnetischen Feldes.	220
3.1.4 Verknüpfung der Induktion \mathbf{B} und der magnetischen Feldstärke \mathbf{H} . Permeabilität μ	228
3.1.5 Eigenschaften des magnetischen Feldes im Raum und an Grenzflächen	232
3.2 Integrale Größen des magnetischen Feldes	235
3.2.1 Magnetischer Fluß Φ	236
3.2.2 Magnetisches Potential ψ . Magnetische Spannung V . Durchflutung Θ	239
3.2.3 Magnetischer Kreis	244
3.2.4 Verkopplung; Magnetischer Fluß Θ —Strom I	250
3.2.4.1 Induktivität L (Selbstinduktivität).	251
3.2.4.2 Gegeninduktivität M	254
3.2.5 Dauermagnetkreis	259
3.3 Induktionsgesetz: Verkopplung magnetischer und elektrischer Größen	261
3.3.1 Gesamterscheinung der Induktion	262
3.3.2 Ruheinduktion	266
3.3.2.1 Induktionsgesetz für Ruheinduktion	266
3.3.2.2 Anwendungen der Ruheinduktion.	273
3.3.3 Bewegungsinduktion	277
3.3.3.1 Induktionsgesetz für Bewegungsinduktion.	277
3.3.3.2 Anwendungen der Bewegungsinduktion	280
3.4 Wechselseitige Verkopplung elektrischer und magnetischer Größen	289
3.4.1 Selbstinduktion.	290
3.4.2 Gegeninduktion	297
3.4.3 Transformator	301
3.5 Rückblick bzw. Ausblick zum elektromagnetischen Feld	307
4 Energie und Leistung elektromagnetischer Erscheinungen	319
4.1 Energie und Leistung	322
4.1.1 Elektrische Energie W . Elektrische Leistung P	322
4.1.2 Strömungsfeld	328
4.1.3 Elektrostatisches Feld.	329
4.1.4 Magnetisches Feld.	332
4.2 Energieübertragung	336
4.2.1 Energieströmung.	336
4.2.2 Energietransport Quelle—Verbraucher	340
4.3 Umformung elektrischer in mechanische Energie.	342

XII Inhaltsverzeichnis

4.3.1	Kräfte im elektrischen Feld	342
4.3.1.1	Kraft auf ruhende Ladungen.	342
4.3.1.2	Kraft auf Grenzflächen	345
4.3.2	Kräfte im magnetischen Feld	350
4.3.2.1	Kraft auf bewegte Ladungen	351
4.3.2.2	Kraft auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld	355
4.3.2.3	Kraft auf Grenzflächen	369
4.3.2.4	Mechanisches Drehmoment von Dipolen	375
4.4	Umformung elektrischer Energie in Wärme und umgekehrt	377
4.4.1	Elektrische Energie. Wärme	378
4.4.2	Thermische Ersatzschaltung	385
4.4.3	Anwendungen des Wärmeumsatzes	389
	Literaturverzeichnis	394
	Sachverzeichnis	395

**Inhalt des Bandes 2:
Netzwerke**

5 Netzwerke und ihre Elemente

- 5.1 Netzwerkelemente
- 5.2 Netzwerkerregung
- 5.3 Netzwerke

6 Netzwerke bei stationärer harmonischer Erregung

- 6.1 Analyse im Zeitbereich
- 6.2 Analyse im Frequenzbereich
- 6.3 Darstellung von Netzwerkfunktionen durch Ortskurven.
Inversion komplexer Größen
- 6.4 Energie und Leistung im Wechselstromkreis

7 Eigenschaften und Verhalten wichtiger Netzwerke

- 7.1 Zusammenschaltung von Netzwerkelementen
- 7.2 Vierpole
- 7.3 Wichtige Vierpole und deren Anwendung

8 Lineare Netzwerke bei mehrwelliger Erregung

- 8.1 Darstellung einer periodischen Funktion durch eine Fourier-Reihe
- 8.2 Mehrwellige Zeitfunktionen und ihre Kenngrößen
- 8.3 Netzwerke bei mehrwelliger Erregung

9 Dreiphasig erregte Netzwerke

9.1 Drehstromquellen

9.2 Drehstromverbraucher

9.3 Leistung im Drehstromnetzwerk

9.4 Analyse einfacher Drehstromnetzwerke

10 Übergangsverhalten von Netzwerken

10.1 Lösungsmethoden im Zeitbereich

10.2 Zeit- und Frequenzbereich. Komplexe Frequenz

10.3 Laplace-Transformation. Lösungsmethodik im Frequenzbereich

Verzeichnis der wichtigsten Symbole

(Abschnitt des erstmaligen Auftretens in Klammern)

A	Fläche (0.2.4)
A	Kurzschlußstromverstärkung, Stromübersetzung (5.1.1.2)
B	Blindleitwert (6.1.2.1)
B	Induktion (3.1.1)
B_r	Remanenzinduktion (3.1.4)
b_o	Bandbreite (7.1.3.2)
C	Kapazität (2.5.5.2)
C_{th}	Wärmekapazität (4.2.2)
c	spezifische Wärme (4.4.1)
D	Durchgriff (7.3.6)
D	Verschiebungsdichte (2.5.2)
d	Dämpfung (10.1.4.1)
d_c	Verlustfaktor (7.1.2)
E	elektrische Feldstärke (2.2.1)
E	elektromotorische Kraft, <i>Ursprung</i> (2.4.1)
E_i	fiktive Feldstärke (2.4.1)
e	Elementarladung (1.3.1)
F	Formfaktor (5.2.3)
F	Kraft (0.2.1)
\underline{F}	komplexer Frequenzgang (6.2.2.1)
$ \underline{F} $	Amplitudengang (6.2.4)
f	Frequenz (3.3.3.2)
f_g	Grenzfrequenz (7.1.3)
G	Leitwert (2.4.2.1)
G_m	magnetischer Leitwert (3.2.3)
g	differentieller Leitwert (5.1.2.1)
H	magnetische Erregung, Feldstärke (3.1.2)
H_c	Koerzitivfeldstärke (3.1.4)
I	Stromstärke (0.2.3)
I_B	Blindstrom (6.2.2.2.1)
I_k	Kurzschlußstromstärke (2.4.3.2)
I_Q	Quellenstromstärke (2.4.3.2)
I_v	Verschiebungsstrom (2.5.6.2)
I_w	Energiestrom (4.2.1)
i	zeitveränderlicher Strom, <i>allgemein</i> (1.4)
L	Induktivität (3.2.4.1)
k	Klirrfaktor (8.3)
k	Knotenzahl (5.3.1)
k	Kopplungsfaktor (3.2.4.2)
M	Drehmoment (4.3.2.2)
M	Gegeninduktivität (3.2.4.2)
m	Maschenzahl (5.3.1)

XVI Verzeichnis der wichtigsten Symbole

P	Leistung, Wirkleistung (2.4.3.1)
P_B	Blindleistung (6.4.2)
P_{Hyst}	Hystereseleistung (4.1.5)
P_S	Scheinleistung (6.4.2)
P_W	Wärmestrom (4.4.1)
P_W	Wirkleistung (6.4.1)
p	Momentanleistung (6.4.1)
p'	Leistungsdichte (4.7.2)
\bar{p}	Mittelwert der Leistung (5.2.3)
p_B	Blindleistung, momentane (6.4.2)
p_s	Scheinleistung (6.4.2)
Q	Ladung, Elektrizitätsmenge (1.3.1)
Q	Blindleistung (6.4.2)
$Q(t_0)$	Anfangsladung (1.4.3)
Q_C	Kondensatorgüte (7.1.2)
Q_L	Spulengüte (7.1.2)
q	Elementarladung, allgemein (1.3.1)
R	Widerstand (0.2.3)
R_i	Innenwiderstand (2.4.3.2)
R_m	magnetischer Widerstand (3.2.3)
R_{mi}	magnetischer Innenwiderstand (3.2.5)
R_{th}	Wärmewiderstand (4.2.1)
r	differentieller Widerstand (5.1.2.1)
r	Ortsvektor (1.3.2)
S	Stromdichte (2.3.1)
S	Scheinleistung (6.4.2)
S	Transferleitwert, Steilheit (5.1.1.2)
S_K	Konvektionsstromdichte (2.3.1)
S_V	Verschiebungsstromdichte (2.5.6.3)
S_W	Energiestromdichte, Poynting-Vektor (4.2.1)
T	Periodendauer (3.3.3.2)
T	Temperatur (2.4.2)
t	Zeit (0.2.2)
t_H	Halbwertszeit (3.4.1)
U	Spannung (0.2.3)
\hat{U}	Spitzenspannung (3.4.3)
U_D	Differenzspannung (7.3.6)
U_H	Hallspannung (4.3.2.1)
U_1	Leerlaufspannung (2.4.3.2)
U_Q	Quellenspannung (2.4.3.2)
u	zeitveränderliche Spannung (3.4.3)
\bar{u}	Gleichspannung, Gleichwert (5.2.3)
$ \bar{u} $	Gleichrichtwert (5.2.3)
\tilde{u}	Effektivwert der Spannung (5.2.3)
u_i	induzierte Spannung (3.3.1)
\ddot{u}	Übersetzungsverhältnis (3.4.3)
V	magnetische Spannung (3.2.2)
V	Volumen (1.3.2)
V_m	magnetische Randspannung (3.2.2)
v	Verstärkung (7.3.6)

v	Verstimmung (7.1.3.2)
\underline{v}_i	Kurzschlußstromübersetzung (7.2.3.2)
\underline{v}_u	Spannungsübertragungsfaktor (7.2.3.2)
W	Arbeit, Energie (0.2.4)
W_{Hyst}	Hysteresearbeit (4.1.5)
W_m	magnetische Energie (4.1.5)
w	Energiedichte (4.1.1)
w	Windungszahl (3.2.3)
w_m	magnetische Energiedichte (4.1.5)
X	Blindwiderstand (6.1.1)
Y	Scheinleitwert (6.1.2.1)
\underline{Y}	komplexer Leitwertoperator (6.2.1.1)
\underline{Y}_m	Übertragungsadmittanz (7.2.3.2)
Z	Scheinwiderstand (6.1.1)
\underline{Z}	komplexer Widerstandsoperator (6.2.1.1)
Z_m	Transferimpedanz (5.1.1.2)
\underline{Z}_w	Wellenwiderstand (7.2.3.1)
z	Zweigzahl (5.3.1)
α	Abklingkonstante (10.1.4.1)
α	Temperaturkoeffizient, Temperaturbeiwert (2.3.2)
α	Winkel (2.3.3.4)
α_k	Wärmeübergangszahl (4.2.1)
δ	Fehlwinkel (7.1.2)
ε	Dielektrizitätskonstante (2.5.3)
ε_0	Dielektrizitätskonstante im Vakuum (2.5.3)
ε_r	relative Dielektrizitätskonstante (2.5.3)
η	Wirkungsgrad, Energieübertragungsgrad (2.4.3.5)
θ	Durchflutung (3.1.3)
κ	Leitfähigkeit (2.3.2)
κ_w	Wärmeleitfähigkeit (4.2.1)
λ	Linienladungsdichte (1.3.2)
μ	Beweglichkeit (2.3.2)
μ	Permeabilität (3.1.4)
μ	Steuerfaktor (5.1.1.2)
μ_0	Permeabilitätskonstante im Vakuum (3.1.4)
μ_r	relative Permeabilität (3.1.4)
Q	Kreisgüte, Resonanzschärfe (7.1.4.1)
Q	Länge, Radius (2.3.3.1)
Q	spezifischer Widerstand (2.3.2)
Q	Raumladungsdichte (1.3.2)
σ	mechanische Spannung (4.3.1.2)
σ	Flächenladungsdichte (1.3.2)
σ	Strahlungskonstante (4.2.1)
σ	Streugrad (7.3.5.1)
τ	Dämpfungsmaß (10.2.1)
τ	Zeitkonstante (10.1.2)
Φ	magnetischer Fluß (3.2.1)
φ	elektrisches Potential (2.2.2)
φ	Nullphasenwinkel (5.2.1)
φ_u	Nullphasenwinkel der Spannung (6.1.1)

XVIII Verzeichnis der wichtigsten Symbole

φ_i	Nullphasenwinkel des Stromes (6.1.1)
φ_z	Phasenwinkel des komplexen Widerstandsoperators (6.1.1)
φ_y	Phasenwinkel des komplexen Leitwertoperators (6.1.1)
Ψ	Fluß eines Vektors (0.2.4), Windungsfluß (3.2.4.2)
Ψ	Verschiebungsfluß (2.5.1)
ψ	skalares magnetisches Potential (3.2.2)
ψ	Phasenwinkel
ω	Kreisfrequenz (3.3.3.2)
ω_0	Eigenfrequenz (7.1.4.1)
ω_0	Resonanzfrequenz (7.1.3.2)

Wichtige physikalische Konstanten

Boltzmannkonstante	k	$= 1,38066 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
Elementarladung	e	$= 1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{ As}$
Elektronenruhemasse	m_0	$= 0,91095 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$
Elektronenvolt	eV	$= 1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
magnetische Feldkonstante	μ_0	$= 1,25663 \cdot 10^{-8} \text{ H/cm}$ ($4\pi \cdot 10^{-9}$)
elektrische Feldkonstante	ϵ_0	$= 8,85418 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}$ ($1/\mu_0 c^2$)
Lichtgeschwindigkeit (Vakuum)	c	$= 2,99792 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
Temperaturspannung bei 300 K	kT/q	$= 25,852003 \text{ mV}$

Wichtige Materialdaten

Leitfähigkeit	Tafel 2.2 (S. 82)
relative Dielektrizitätszahl	Tafel 2.7 (S. 168)
relative Permeabilität	Tafel 3.3 (S. 233)