



R. Paul

Elektrotechnik

Grundlagenlehrbuch

Band II
Netzwerke

Mit 188 Abbildungen und 44 Tafeln

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

Dr.-Ing. **Reinhold Paul**

Professor, Lehrstuhl für Technische Elektronik
der Technischen Universität München

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

ISBN 978-3-540-13634-7 ISBN 978-3-662-06989-9 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-06989-9

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Die Vergütungsansprüche des § 54, Abs. 2 UrhG werden durch die ‚Verwertungsgesellschaft Wort‘, München, wahrgenommen.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1985
Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1985

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

2362/3020-543210

Vorwort

Der vorliegende zweite Band des Grundlagenlehrbuchs „Elektrotechnik“ umfaßt Netzwerke, ihre Elemente und vor allem die wichtigsten Berechnungsverfahren für elektrische Netzwerke unter verschiedenen Erregungsbedingungen.

Aufbauend auf den physikalischen Grundlagen des ersten Teilbandes werden zunächst die generellen linearen und nichtlinearen Strom-Spannungs-Relationen der wichtigsten Netzwerkelemente einschließlich der Quellen (gesteuert, ungesteuert) erklärt und die unterschiedlichen Netzwerkerregungen (sinusförmig, impulsförmig) eingeführt. Ein Abschnitt ist der Aufstellung, den Eigenschaften und den Lösungsverfahren der Netzwerkgleichungen gewidmet.

Schwerpunkt dieses Bandes ist naturgemäß die Wechselstromlehre, wobei die Netzwerkgleichung für den Sonderfall sinusförmig stationärer Erregung mit der komplexen Rechnung gelöst wird. Besonderer Wert kommt der formalen Handhabung dieser Lösungsmethodik, ihrem Bezug zur physikalischen Realität sowie der Transformation von Netzwerkfunktionen einschließlich der Energie- und Leistungsbetrachtungen zu. Vertieft wird die Wechselstromlehre an beispielhaften Zusammenschaltungen weniger Netzwerkelemente, durch die technisch so wichtigen Resonanzkreise sowie durch Vierpole, ihre Strom-Spannungs-Relationen, die wichtigsten Eigenschaften und das Zusammenspiel mit der umgebenden Schaltung. Eine Reihe wichtiger Vierpole (Brücken-, Kompensationsschaltungen, Transformator, Verstärker) wird eingehend behandelt.

Kürzere Abschnitte über das Verhalten von Netzwerken bei mehrwelliger Erregung und dreiphasig erregten Netzwerken mit ihrer großen praktischen Bedeutung folgen. Ein abschließender größerer Abschnitt behandelt das Übergangsverhalten der Netzwerke im Zeitbereich bei Sprung- und beliebiger Erregung mit einer Reihe typischer Beispiele, die Übertragungsfunktion mit dem PN-Plan sowie das Übergangsverhalten mit der Laplace-Transformation.

Auch mit diesem Band werden die gleichen pädagogisch-methodischen Ziele verfolgt wie mit dem ersten, wegen der größeren Schwierigkeiten dieses Gebietes jedoch noch ausgeprägter durch Lehrsätze, Lösungsstrategien, Zielvorgaben und Wiederholungsfragen unterstützt.

Da die beiden Bände in einem Zuge abgefaßt und bearbeitet wurden, gelten Dank und Anerkennung für die förderliche Fachdiskussion, die Kritik, die technische Ausführung und die Gestaltung genau jenem Kreis, der bereits im ersten Band genannt worden ist. Besonders hervorgehoben werden soll erneut die reibungslose und angenehme Zusammenarbeit mit dem Springer-Verlag.

München, im Herbst 1984

R. Paul

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der wichtigsten Symbole	XIII
---	------

5 Netzwerke und ihre Elemente	1
5.1 Netzwerkelemente	3
5.1.1 Quellen	8
5.1.1.1 Unabhängige Quellen	8
5.1.1.2 Gesteuerte Quellen	9
5.1.1.3 Überlagerungssatz und Zweipoltheorie in Netzwerken mit gesteuerten Quellen. Leistungsbetrachtung	19
5.1.2 Widerstand	21
5.1.2.1 Zeitunabhängiger Widerstand	21
5.1.2.2 Unabhängig gesteuerter linearer Widerstand	27
5.1.3 Kapazität	28
5.1.3.1 Zeitunabhängige Kapazität	28
5.1.3.2 Unabhängig gesteuerte Kapazität	30
5.1.4 Induktivität	31
5.1.5 Dynamische Kennlinie	31
5.1.6 Energiebeziehungen	34
5.2 Netzwerkerregung	38
5.2.1 Erregungsarten	38
5.2.2 Sinusförmige Erregung	41
5.2.3 Mittelwerte periodischer Größen	45
5.3 Netzwerke	49
5.3.1 Netzwerkstruktur	51
5.3.2 Maschenstromanalyse	53
5.3.3 Knotenspannungsanalyse	63
5.3.4 Netzwerktheoreme	70
5.3.4.1 Reziprozitätstheorem	71
5.3.4.2 Miller-Theorem	73
5.3.4.3 Teilungssatz symmetrischer Netzwerke	75
5.3.5 Netzwerkgleichung	75
6 Netzwerke bei stationärer harmonischer Erregung	83
6.1 Analyse im Zeitbereich	84
6.1.1 Verhalten der Netzwerkelemente R, L, C	85
6.1.2 Berechnung einfacher Netzwerke	91
6.1.2.1 Zusammenschaltung von Wirk- und Blindschaltelementen	92

6.1.2.2	Allgemeines Lösungsverfahren	94
6.2	Analyse im Frequenzbereich	97
6.2.1	Darstellung harmonischer Funktionen durch komplexe Größen	98
6.2.1.1	Komplexe Größen	98
6.2.1.2	Zeitveränderliche komplexe Größen. Zeigerdarstellungen	104
6.2.2	Netzwerkberechnung über den Frequenzbereich	111
6.2.2.1	Transformation der Netzwerk-Differentialgleichung	112
6.2.2.2	Transformation des Netzwerkes	119
6.2.2.2.1	Widerstands- und Leitwertoperator	120
6.2.2.2.2	Widerstands-(Leitwert-)operatoren der Netzwerkelemente R , L , C und ihrer Zusammenschaltungen	126
6.2.2.2.3	Netzwerktransformation	132
6.2.2.3	Anwendungen der Netzwerktransformation	136
6.2.3	Zeigerdiagramm	144
6.2.4	Frequenzgang $F(j\omega)$	147
6.3	Darstellung von Netzwerkfunktionen durch Ortskurven. Inversion komplexer Größen	149
6.3.1	Ortskurven	150
6.3.2	Inversion von komplexen Größen und Ortskurven	152
6.3.2.1	Inversion einer komplexen Größe	153
6.3.2.2	Inversion von Ortskurven	156
6.3.2.3	Frequenzgang $\underline{F}(j\omega)$ und Ortskurve	162
6.3.2.4	Inversionsdiagramm	163
6.3.3	Betrags- und Phasendiagramm	170
6.4	Energie und Leistung im Wechselstromkreis	176
6.4.1	Leistung und Energie für periodische Ströme und Spannungen	176
6.4.2	Leistungsdarstellung für sinusförmige Ströme und Spannungen im Zeitbereich	179
6.4.3	Leistungsberechnung mit rotierenden Zeigern. Komplexe Leistung	188
6.4.4	Leistungsübertragung im Grundstromkreis	191
7	Eigenschaften und Verhalten wichtiger Netzwerke	197
7.1	Zusammenschaltung von Netzwerkelementen	197
7.1.1	Wirk- und Blindschaltelemente	198
7.1.2	Klemmenverhalten technischer Bauelemente	201
7.1.3	RC -Netzwerke	206
7.1.4	Resonanzkreise	210
7.1.4.1	Resonanzphänomene	210
7.1.4.2	Reihen- und Parallelschwingkreis	215
7.1.4.3	Zusammenspiel Schwingkreis — aktiver Zweipol	222
7.1.4.4	Anwendungen	223
7.2	Vierpole	225
7.2.1	Grundeigenschaften des Vierpols	225
7.2.1.1	Vierpolbegriff.	225
7.2.1.2	Vierpolgleichungen	231
7.2.1.2.1	Darstellungsarten	231

7.2.1.2.2	Vierpolkennlinien	240
7.2.1.2.3	Kleinsignalaussteuerung	242
7.2.1.3	Ersatzschaltungen	245
7.2.1.4	Vierpolarten	249
7.2.1.5	Vierpoltransformationen	251
7.2.2	Vierpolzusammenschaltungen	254
7.2.2.1	Grundtypen	256
7.2.2.2	Rückkopplungsprinzip	261
7.2.3	Vierpol in der Schaltung. Vierpol-Betriebsgrößen	262
7.2.3.1	Betriebswiderstände und -leitwerte	262
7.2.3.2	Übertragungsgrößen	267
7.3	Wichtige Vierpole und deren Anwendung	270
7.3.1	Elementarvierpole	270
7.3.2	Wechselstrombrücken- und Kompensationsschaltungen	271
7.3.3	Phasendrehvierpole	278
7.3.4	Übersetzervierpole	280
7.3.4.1	Proportionalübersetzervierpole	282
7.3.4.2	Dualübersetzervierpole	283
7.3.5	Transformator	284
7.3.5.1	Vierpoldarstellung	284
7.3.5.2	Ersatzschaltung	286
7.3.5.3	Eigenschaften	291
7.3.6	Verstärkervierpol	294
8	Lineare Netzwerke bei mehrwelliger Erregung	305
8.1	Darstellung einer periodischen Funktion durch eine Fourier-Reihe	305
8.1.1	Fourier-Reihe	305
8.1.2	Zeitfunktion und Spektrum	311
8.2	Mehrwellige Zeitfunktionen und ihre Kenngrößen	314
8.3	Netzwerke bei mehrwelliger Erregung	318
9	Dreiphasig erregte Netzwerke	323
9.1	Drehstromquellen	323
9.1.1	Sternschaltung	325
9.1.2	Dreieckschaltung	326
9.2	Drehstromverbraucher	328
9.3	Leistung im Drehstromnetzwerk	329
9.4	Analyse einfacher Drehstromnetzwerke	330
10	Übergangsverhalten von Netzwerken	333
10.1	Lösungsmethoden im Zeitbereich	334
10.1.1	Netzwerke bei Sprungerregung. Mathematisch-physikalische Grundlagen	334
10.1.2	Lösungsverfahren	336

10.1.3	Netzwerke mit einem Energiespeicher	341
10.1.3.1	Netzwerk-Sprungerregung	341
10.1.3.2	RC-Netzwerk. Periodische Erregung	346
10.1.3.3	RL-Netzwerk. Zweipoltheorie	347
10.1.4	Netzwerke mit zwei Energiespeichern	350
10.1.4.1	Schwingkreis. Sprungerregung	352
10.1.5	Netzwerke bei beliebiger Erregung	355
10.1.5.1	Sprungerregung. Sprungantwort	355
10.1.5.2	Anstiegserregung	357
10.1.5.3	Impulserregung. Impulsantwort	358
10.1.6	Anwendungen	362
10.1.6.1	Verhalten der Grundelemente	362
10.1.6.2	Anfangswerte der Energiespeicher	364
10.1.6.3	RC-Netzwerk. Impulserregung	365
10.1.6.4	RC-Netzwerk. Impuls- und Sprungerregung	367
10.2	Zeit- und Frequenzbereich. Komplexe Frequenz	370
10.2.1	Komplexe Frequenz. Komplexe Exponentialfunktion	370
10.2.2	Übertragungsfunktion	373
10.2.2.1	Zusammenhang Übertragungsfunktion—Frequenzgang	373
10.2.2.2	Pole und Nullstellen der Übertragungsfunktion	375
10.3	Laplace-Transformation. Lösungsmethode im Frequenzbereich	382
10.3.1	Laplace-Transformation	384
10.3.1.1	Laplace-Integral und Laplace-Umkehrintegral	384
10.3.1.2	Transformationsregeln, Korrespondenzen	386
10.3.2	Netzwerke ohne Anfangsenergie	387
10.3.2.1	Lösung im Frequenzbereich. Nullzustandsverhalten	389
10.3.2.2	Nullverhalten	392
10.3.3	Netzwerke mit Anfangsenergie	393
10.3.3.1	Anfangswerte der Energiespeicher	393
10.3.3.2	Beispiele	394
10.3.3.3	Allgemeine Lösungsverfahren	400
	Literaturverzeichnis	403
	Sachverzeichnis	405

Inhalt des Bandes I: Elektrische Erscheinungen und Felder

0 Einführung

- 0.1 Das Lehrgebiet Elektrotechnik—Elektronik
- 0.2 Physikalische Größen und Gleichungen

1 Beschreibung elektrischer Erscheinungen

- 1.1 Teilchenmodell. Grundvorstellungen
- 1.2 Feldmodell
- 1.3 Teilchenmodell. Elektrische Ladung Q
- 1.4 Bewegte Ladung. Elektrische Stromstärke I

2 Das elektrische Feld und seine Anwendungen

- 2.1 Feldbegriffe
- 2.2 Feldstärke E und Potential φ
- 2.3 Elektrisches Strömungsfeld
- 2.4 Integralgrößen des stationären Strömungsfeldes: Strom I , Spannung U , Widerstand R . Gleichstromkreis
- 2.5 Elektrostatisches Feld: Elektrische Erscheinungen in Nichtleitern

3 Das magnetische Feld und seine Anwendungen

- 3.1 Die vektoriellen Größen des magnetischen Feldes
- 3.2 Integrale Größen des magnetischen Feldes
- 3.3 Induktionsgesetz: Verkopplung magnetischer und elektrischer Größen
- 3.4 Wechselseitige Verkopplung elektrischer und magnetischer Größen
- 3.5 Rückblick bzw. Ausblick zum elektromagnetischen Feld

4 Energie und Leistung elektromagnetischer Erscheinungen

- 4.1 Energie und Leistung
- 4.2 Energieübertragung
- 4.3 Umformung elektrischer in mechanische Energie
- 4.4 Umformung elektrischer Energie in Wärme und umgekehrt

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_ω	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, Urspannung (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)
F	komplexer Frequenzgang (6.2.2.1)
$ 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, allgemein
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)
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)

XIV Verzeichnis der wichtigsten Symbole

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)
\mathbf{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_l	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)
\tilde{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)
v_i	Kurzschlußstromübersetzung (7.2.3.2)
\tilde{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)
Z_w	Wellenwiderstand (7.2.3.1)
z	Zweigliedzahl (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)
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)