

Wilfried Weißgerber

Elektrotechnik für Ingenieure 3

Weitere Lehrbücher vom Autor:

Elektrotechnik für Ingenieure 1 und 2

von W. Weißgerber

Elektrotechnik für Ingenieure – Formelsammlung

von W. Weißgerber

Elektrotechnik für Ingenieure – Klausurenrechnen

von W. Weißgerber

Grundzusammenhänge der Elektrotechnik

von H. Kindler und K.-D. Haim

Handbuch Elektrotechnik

herausgegeben von W. Pläßmann und D. Schulz

Aufgabensammlung Elektrotechnik 1 und 2

von M. Vömel und D. Zastrow

Elektrotechnik

von D. Zastrow

Wilfried Weißgerber

Elektrotechnik für Ingenieure 3

Ausgleichsvorgänge, Fourieranalyse, Vierpoltheorie
Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Grundstudium

7., korrigierte Auflage

Mit 261 Abbildungen, zahlreichen Beispielen
und 40 Übungsaufgaben mit Lösungen

STUDIUM



VIEWEG+
TEUBNER

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

1. Auflage 1991
- 2., überarbeitete Auflage 1993
- 3., korrigierte Auflage 1996
- 4., verbesserte Auflage 1999
- 5., verbesserte Auflage 2005
- 6., überarbeitete Auflage 2007
- 7., korrigierte Auflage 2009

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009

Lektorat: Reinhard Dapper | Maren Mithöfer

Vieweg+Teubner ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg

Druck und buchbinderische Verarbeitung: MercedesDruck, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0614-7

Vorwort

Das dreibändige Buch „Elektrotechnik für Ingenieure“ ist für Studenten des Grundstudiums der Ingenieurwissenschaften, insbesondere der Elektrotechnik, geschrieben. Bei der Darstellung der physikalischen Zusammenhänge, also der Elektrotechnik als Teil der Physik – sind die wesentlichen Erscheinungsformen dargestellt und erklärt und zwar aus der Sicht des die Elektrotechnik anwendenden Ingenieurs. Für ein vertiefendes Studium der Elektrizitätslehre dienen Lehrbücher der theoretischen Elektrotechnik und theoretischen Physik.

Die Herleitungen und Übungsbeispiele sind so ausführlich behandelt, dass es keine mathematischen Schwierigkeiten geben dürfte, diese zu verstehen. Teilgebiete aus der Mathematik werden dargestellt, sofern sie in den üblichen Mathematikvorlesungen des Grundstudiums ausgespart bleiben. Im Band 3 sind mathematische Exkurse häufiger notwendig als im Band 1; dabei erfolgt die Darstellung der Mathematik aus der Sicht des Ingenieurs unter Verzicht auf äußerste Strenge.

Die Ausgleichsvorgänge im Kapitel 8 werden sowohl im Zeitbereich durch Lösung der Differentialgleichungen als auch mit Hilfe der Laplacetransformation behandelt. Dabei wird ausführlich auf die mathematischen Zusammenhänge der Laplacetransformation eingegangen.

Periodische nichtsinusförmige Wechselgrößen, die analytisch oder durch Stützstellen gegeben sind, und aperiodische Größen lassen sich in diskrete bzw. kontinuierliche Spektren überführen. Im Kapitel 9 wird auf die Fourieranalyse periodischer und aperiodischer Größen eingegangen. Bei periodischen Größen mit Stützstellen werden die trigonometrische Interpolation und das Sprungstellenverfahren vorgestellt.

Das abschließende Kapitel 10 ist der Vierpoltheorie gewidmet. Zunächst werden die Zusammenhänge der Vierpolparameter, Betriebskenngrößen und der fünf Arten der Zusammenschaltung erläutert, ehe die Einzelheiten der Vierpoltheorie erklärt und praktische Beispiele berechnet werden. Die Wellenparameter des passiven Vierpols werden schließlich eingeführt.

Die 5. Auflage wurde um ein Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Schreibweisen ergänzt. Die 6. Auflage ist noch einmal überarbeitet und durch Erläuterungen ergänzt worden. In der 7. Auflage sind einige Korrekturen und Verbesserungen vorgenommen worden.

Für die vielen helfenden Hinweise darf ich mich herzlich bedanken. Ebenso danken möchte ich den Mitarbeitern des Verlags für die gute Zusammenarbeit.

Wedemark, im April 2009

Wilfried Weißgerber

Inhaltsverzeichnis

8	Ausgleichsvorgänge in linearen Netzen	1
8.1	Grundlagen für die Behandlung von Ausgleichsvorgängen	1
8.2	Berechnung von Ausgleichsvorgängen durch Lösung von Differentialgleichungen.....	3
8.2.1	Eingeschwungene und flüchtige Vorgänge.....	3
8.2.2	Ausgleichsvorgänge in einfachen Stromkreisen bei zeitlich konstanter Quellspannung	7
8.2.3	Ausgleichsvorgänge in einfachen Stromkreisen bei zeitlich sinusförmiger Quellspannung.....	14
8.2.4	Ausgleichsvorgänge in Schwingkreisen.....	20
8.3	Berechnung von Ausgleichsvorgängen mit Hilfe der Laplace-Transformation	30
8.3.1	Grundlagen für die Behandlung der Ausgleichsvorgänge mittels Laplace-Transformation	30
8.3.2	Lösungsmethoden für die Berechnung von Ausgleichsvorgängen	51
8.3.3	Sätze für Operationen im Zeit- und Bildbereich der Laplace-Transformation	56
8.3.4	Berechnung von Ausgleichsvorgängen in einfachen Stromkreisen bei zeitlich konstanter und zeitlich sinusförmiger Quellspannung mittels Laplace-Transformation	63
8.3.5	Ermittlung von Übergangsfunktionen	78
8.3.6	Zusammenfassung der Laplace-Operationen und der Laplace-Transformierten (Korrespondenzen)	85
	Übungsaufgaben zu den Abschnitten 8.1 bis 8.3.....	92
9	Fourieranalyse von nichtsinusförmigen periodischen Wechselgrößen und nichtperiodischen Größen	95
9.1	Fourierreihenentwicklung von analytisch gegebenen nichtsinusförmigen periodischen Wechselgrößen.....	95
9.2	Reihenentwicklung von in diskreten Punkten vorgegebenen nichtsinusförmigen periodischen Funktionen	116
9.3	Anwendung der Fourierreihen	141
9.4	Die Darstellung nichtsinusförmiger periodischer Wechselgrößen durch komplexe Reihen.....	150
9.5	Transformation von nichtsinusförmigen nichtperiodischen Größen durch das Fourierintegral	156
	Übungsaufgaben zu den Abschnitten 9.1 bis 9.5.....	167
10	Vierpoltheorie	171
10.1	Grundlegende Zusammenhänge der Vierpoltheorie.....	171
10.2	Vierpolgleichungen, Vierpolparameter und Ersatzschaltungen	175
10.3	Vierpolparameter passiver Vierpole.....	186
10.4	Betriebskenngrößen von Vierpolen.....	189

10.5	Leistungsverstärkung und Dämpfung	203	
10.6	Spezielle Vierpole	218	
10.7	Zusammenschalten zweier Vierpole	226	
10.7.1	Grundsätzliches über Vierpolzusammenschaltungen	226	
10.7.2	Die Parallel-Parallel-Schaltung zweier Vierpole	230	
10.7.3	Die Reihen-Reihen-Schaltung zweier Vierpole	232	
10.7.4	Die Reihen-Parallel-Schaltung zweier Vierpole	236	
10.7.5	Die Parallel-Reihen-Schaltung zweier Vierpole	241	
10.7.6	Die Ketten-Schaltung zweier Vierpole	243	
10.8	Die Umrechnung von Vierpolparametern von Dreipolen	248	
10.9	Die Wellenparameter passiver Vierpole	253	
	Übungsaufgaben zu den Abschnitten 10.1 bis 10.9	259	
 Anhang			
Lösungen der Übungsaufgaben			264
8	Ausgleichsvorgänge in linearen Netzen	264	
9	Fourieranalyse von nichtsinusförmigen periodischen Wechselgrößen und nicht periodischen Größen	285	
10	Vierpoltheorie	298	
 Verwendete und weiterführende Literatur			316
 Sachwortverzeichnis			317

Inhaltsübersicht

Band 1

- 1 Physikalische Grundbegriffe der Elektrotechnik
 - 2 Gleichstromtechnik
 - 3 Das elektromagnetische Feld
- Anhang mit Lösungen der Übungsaufgaben

Band 2

- 4 Wechselstromtechnik
 - 5 Ortskurven
 - 6 Der Transformator
 - 7 Mehrphasensysteme
- Anhang mit Lösungen der Übungsaufgaben

Formelsammlung

Kompakte Darstellung der zehn Kapitel der Bände 1 bis 3

Klausurenrechnen

40 Aufgabenblätter mit je vier Aufgaben, ausführlichen Lösungen und Bewertungen

Schreibweisen, Formelzeichen und Einheiten

Schreibweise physikalischer Größen und ihrer Abbildungen

u, i	Augenblicks- oder Momentanwert zeitabhängiger Größen: kleine lateinische Buchstaben
U, I	Gleichgrößen, Effektivwerte: große lateinische Buchstaben
\hat{u}, \hat{i}	Maximalwert
$\underline{u}, \underline{i}$	komplexe Zeitfunktion, dargestellt durch rotierende Zeiger
$\hat{\underline{u}}, \hat{\underline{i}}$	komplexe Amplitude
$\underline{U}, \underline{I}$	komplexer Effektivwert, dargestellt durch ruhende Zeiger
$\underline{Z}, \underline{Y}, \underline{z}$	komplexe Größen
$\underline{Z}^*, \underline{Y}^*, \underline{z}^*$	konjugiert komplexe Größen
$\vec{E}, \vec{D}, \vec{r}$	vektorielle Größen

Schreibweise von Zehnerpotenzen

$10^{-12} = p = \text{Piko}$	$10^{-2} = c = \text{Zenti}$	$10^3 = k = \text{Kilo}$
$10^{-9} = n = \text{Nano}$	$10^{-1} = d = \text{Dezi}$	$10^6 = M = \text{Mega}$
$10^{-6} = \mu = \text{Mikro}$	$10^1 = da = \text{Deka}$	$10^9 = G = \text{Giga}$
$10^{-3} = m = \text{Milli}$	$10^2 = h = \text{Hekto}$	$10^{12} = T = \text{Tera}$

Die in diesem Band verwendeten Formelzeichen physikalischer Größen

a	Vierpolparameter Wellendämpfungsmaß	G	elektrischer Leitwert Wirkleitwert (Konduktanz)
a_k	Fourierkoeffizient	$G(s)$	Übertragungsfunktion, Netzwerkfunktion
\underline{A}	Vierpolparameter	$G(j\omega)$	Übertragungsfunktion
b	Wellenphasenmaß	h	Vierpolparameter
b_k	Fourierkoeffizient	\underline{H}	Vierpolparameter
B	Blindleitwert (Suszeptanz)	i	zeitlich veränderlicher Strom (Augenblicks- oder Momentanwert)
c	Vierpolparameter		laufender Index
c_k	komplexer Fourierkoeffizient	\hat{i}	Amplitude, Maximalwert des sinusförmigen Stroms
c_k	Amplitudenspektrum	\underline{i}	komplexe Zeitfunktion des Stroms
C	elektrische Kapazität	I	Stromstärke (Gleichstrom, Effektivwert)
\underline{C}	Vierpolparameter	\underline{I}	komplexer Effektivwert des Stroms
f	Frequenz	j	imaginäre Einheit: $\sqrt{-1}$ imaginäre Achse
	Formfaktor	k	Kopplungsfaktor Klirrfaktor
$f(t)$	Zeitfunktion		laufender Index
$F(s)$	Laplace transformierte der Zeitfunktion $f(t)$	K	Konstante
$F\{f(t)\}$	Fourier transformierte der Zeitfunktion $f(t)$		
$F(j\omega)$	Fourier transformierte der Zeitfunktion $f(t)$		
$ F(j\omega) $	Amplitudenspektrum		
g	Wellen-Übertragungsmaß		

L	Induktivität	V	Effektivwert einer allgemeinen Größe v
$L\{f(t)\}$	Laplace-transformierte der Zeitfunktion $f(t)$		Verstärkung
m	Anzahl	x	unabhängige Veränderliche
M	Gegeninduktivität	$x(t)$	Eingangs-Zeitfunktion
n	Anzahl	X	Blindwiderstand (Reaktanz)
	Drehzahl	$X(s)$	Laplace-transformierte der Eingangs-Zeitfunktion
p	Augenblicksleistung	y	Vierpolparameter
	Tastverhältnis	$y(t)$	Ausgangs-Zeitfunktion
p_i	Größen der Zipperer-Tafel	$Y(s)$	Laplace-transformierte der Ausgangs-Zeitfunktion
P	Leistung (Gleichleistung, Wirkleistung)	Y	Scheinleitwert (Admittanz)
q_i	Größen der Zipperer-Tafel	\underline{Y}	komplexer Leitwert bzw. komplexer Leitwertoperator
Q	Blindleistung		Vierpolparameter
	Kreisgüte, Gütefaktor, Resonanzschärfe	z	Vierpolparameter
R	elektrischer Widerstand	Z	Scheinwiderstand (Impedanz)
	Wirkwiderstand (Resistanz)	\underline{Z}	komplexer Widerstand bzw. komplexer Widerstandsoperator
s	komplexe Variable der Laplace-Transformation		Vierpolparameter
s_i	Ordinaten Sprünge	δ	Abklingkonstante
$s_n(t)$	Summenfunktion		Realteil der komplexen Variablen s
S	Scheinleistung	$\delta(t)$	Dirac-Impuls oder Dirac'sche Deltafunktion
\underline{S}	komplexe Leistung	φ	Phasenverschiebung
t	Zeit	φ_i	Anfangsphasenwinkel des Stroms
T	Periodendauer (Dauer einer Schwingung)	φ_u	Anfangsphasenwinkel der Spannung
u	zeitlich veränderliche elektrische Spannung (Augenblicks- oder Momentanwert)	φ_{uk}	Phasenspektrum
\hat{u}	Amplitude, Maximalwert der sinusförmigen Spannung	$\varphi(\omega)$	Phasenspektrum
\underline{u}	komplexe Zeitfunktion der elektrischen Spannung	κ	Teil der Lösung der charakteristischen Gleichung
U	elektrische Spannung (Gleichspannung, Effektivwert)	λ	Lösung der charakteristischen Gleichung
\underline{U}	komplexer Effektivwert der elektrischen Spannung	$\sigma(t)$	Sprungfunktion
v	allgemeine zeitlich veränderliche Größe	τ	Zeitkonstante
v_i	abgelesene Ordinatenwerte	ω	Kreisfrequenz
$v_i(x)$	Geradenstücke einer Ersatzfunktion	Ψ_k	Phasenspektrum
		ζ	Abszissenwert von Stützstellen
			Scheitelfaktor

Einheiten des SI-Systems (Système International d'Unités)**Basiseinheit**

der Länge l	das Meter, m
der Masse m	das Kilogramm, kg
der Zeit t	die Sekunde, s
der elektrischen Stromstärke I	das Ampere, A
der absoluten Temperatur T	das Kelvin, K
der Lichtstärke I	die Candela, cd
der Stoffmenge n	das Mol, mol

von den Basiseinheiten abgeleitete Einheit

der Kraft F	Newton,	$1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} = 1\text{V} \cdot \text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$
der Energie W	Joule,	$1\text{J} = 1\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = 1\text{V} \cdot \text{A} \cdot \text{s}$
der Leistung P	Watt,	$1\text{W} = 1\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} = 1\text{V} \cdot \text{A}$
der Ladung Q gleich	Coulomb,	$1\text{C} = 1\text{A} \cdot \text{s}$
des Verschiebungsflusses Ψ		
der elektrischen Spannung U	Volt,	$1\text{V} = 1\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1} = 1\text{W} \cdot \text{A}^{-1}$
des elektrischen Widerstandes R	Ohm,	$1\Omega = 1\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-2} = 1\text{V} \cdot \text{A}^{-1}$
des elektrischen Leitwertes G	Siemens,	$1\text{S} = 1\text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3 \cdot \text{A}^2 = 1\text{V}^{-1} \cdot \text{A}$
der Kapazität C	Farad,	$1\text{F} = 1\text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2 = 1\text{C} \cdot \text{V}^{-1}$
des magnetischen Flusses Φ	Weber,	$1\text{Wb} = 1\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1} = 1\text{Vs}$
der Induktivität L	Henry,	$1\text{H} = 1\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2} = 1\text{Wb} \cdot \text{A}^{-1}$
der magnetischen Induktion B	Tesla,	$1\text{T} = 1\text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1} = 1\text{Wb} \cdot \text{m}^{-2}$
der Frequenz f	Hertz,	$1\text{Hz} = \text{s}^{-1}$

Die komplette Liste der verwendeten Formelzeichen und Schreibweisen befindet sich in der Formelsammlung vom selben Autor unter dem Titel „Elektrotechnik für Ingenieure – Formelsammlung“.