Elektrotechnik für Ingenieure 2

Wilfried Weißgerber

Elektrotechnik für Ingenieure 2

Wechselstromtechnik, Ortskurven,
Transformator, Mehrphasensysteme.
Ein Lehr- und Arbeitsbuch
für das Grundstudium

8., durchgesehene Auflage

Mit 420 Abbildungen, zahlreichen Beispielen
und 68 Übungsaufgaben mit Lösungen

STUDIUM

Springer Vieweg

Prof. Dr.-Ing. Wilfried Weißgerber
Wedemark, Deutschland

ISBN 978-3-8348-1031-1
DOI 10.1007/978-3-8348-2072-3

ISBN 978-3-8348-2072-3 (eBook)

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

Springer Vieweg

© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden 1991, 1993, 1996, 1999, 2006, 2007, 2009, 2013

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, 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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

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.

Die Wechselstromtechnik des Kapitels 4 setzt Kenntnisse über die Gleichstromtechnik und das Elektromagnetische Feld voraus, die im Band 1 behandelt sind. Durch die Abbildung der sinusförmigen Größen in komplexe Zeitfunktionen können die Netzberechnungsverfahren entsprechend angewendet werden, weil Differentialgleichungen durch die Abbildung algebraische Gleichungen werden. Die Zusammenhänge zwischen Sinusgrößen, komplexen Zeitfunktionen, komplexe Amplituden, komplexe Effektivwerte, rotierende Zeiger und ruhende Zeiger werden ausführlich erklärt. Damit können die verschiedenen Lösungsmethoden der Wechselstromtechnik gegenübergestellt und durch Beispiele erläutert werden. Bei der Behandlung von gemischten Schaltungen wird das Kreisdiagramm mit Zahlenbeispielen vorgestellt, die leicht rechnerisch nachvollzogen werden können. Resonanzerscheinungen in Reihen- und Parallelschwingkreisen und zahlreiche Wechselstromschaltungen werden ausführlich beschrieben. In der Wechselstromtechnik werden fünf verschiedene Leistungen unterschieden, deren Zusammenhänge mathematisch, in Diagrammen und durch Beispiele erläutert werden.

Bei den Ortskurven im Kapitel 5 steht die Konstruktion des „Kreises durch den Nullpunkt“ im Mittelpunkt.

Um den Transformator im Kapitel 6 verstehen zu können, sind die Ausführungen im Band 1 zu studieren. Dort sind die Differentialgleichungen im Zeitbereich entwickelt, die dann hier in den Bildbereich überführt werden. Besonderes Augenmerk gilt den verschiedenen Ersatzschaltbildern von Transformatoren.

Im Kapitel 7 werden sowohl symmetrische als auch unsymmetrische Dreiphasensysteme behandelt und durch Rechenbeispiele erläutert. Ergänzt wird die Messung der Leistungen des Dreiphasensystems bei symmetrischer und unsymmetrischer Belastung.

Die 5. Auflage wurde um ein Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Einheiten ergänzt. Die 6. Auflage wurde vollständig überarbeitet; dabei wurden Erläuterungen und in den Berechnungen Zwischenschritte ergänzt. In der 7. Auflage sind einige Korrekturen und Verbesserungen vorgenommen worden. Diese 8. Auflage ist nochmals durchgesehen, und das Literaturverzeichnis ist erweitert worden.

Für die mühevollte Durchsicht des Manuskripts und die vielen helfenden Anregungen in Diskussionen bedanke ich mich herzlich bei meinen Kollegen. Ebenso danken möchte ich den Mitarbeitern des Verlags und der Fa. Fromm Media Design für die gute Zusammenarbeit.

Inhaltsverzeichnis

4 Wechselstromtechnik	1
4.1 Wechselgrößen und sinusförmige Wechselgrößen	1
4.1.1 Wechselgrößen	1
4.1.2 Sinusförmige Wechselgrößen	3
4.2 Berechnung von sinusförmigen Wechselgrößen mit Hilfe der komplexen Rechnung	5
4.2.1 Notwendigkeit der Berechnung im Komplexen	5
4.2.2 Die Darstellung sinusförmiger Wechselgrößen durch komplexe Zeitfunktionen, Lösung der Gleichung im Komplexen und Rückführung in die gesuchte Zeitfunktion (rechnerisches Verfahren)	8
4.2.3 Die Darstellung sinusförmiger Wechselgrößen durch Zeiger und die Ermittlung der gesuchten Zeitfunktion mit Hilfe des Zeigerbildes (grafisches Verfahren)	13
4.2.4 Das Rechnen mit komplexen Effektivwerten in Schaltungen mit komplexen Operatoren bzw. komplexen Widerständen und komplexen Leitwerten (Symbolische Methode)	19
4.2.5 Lösungsmethoden für die Berechnung von Wechselstromnetzen	23
4.3 Wechselstromwiderstände und Wechselstromleitwerte	28
4.4 Praktische Berechnung von Wechselstromnetzen	64
Übungsaufgaben zu den Abschnitten 4.1 bis 4.4	89
4.5 Die Reihenschaltung und Parallelschaltung von ohmschen Widerständen, Induktivitäten und Kapazitäten	94
4.5.1 Die Reihenschaltung von Wechselstromwiderständen – die Reihen oder Spannungsresonanz	94
4.5.2 Die Parallelschaltung von Wechselstromwiderständen – die Parallel oder Stromresonanz	107
Übungsaufgaben zum Abschnitt 4.5	121
4.6 Spezielle Schaltungen der Wechselstromtechnik	123
4.6.1 Schaltungen für eine Phasenverschiebung von 90° zwischen Strom und Spannung	123
4.6.2 Schaltungen zur automatischen Konstanthaltung des Wechselstroms – die Boucherot-Schaltung	126
4.6.3 Wechselstrom-Messbrückenschaltungen	128
Übungsaufgaben zum Abschnitt 4.6	136
4.7 Die Leistung im Wechselstromkreis	138
4.7.1 Augenblicksleistung, Wirkleistung, Blindleistung, Scheinleistung und komplexe Leistung	138
4.7.2 Die Messung der Wechselstromleistung	161
4.7.3 Verbesserung des Leistungsfaktors – Blindleistungskompensation	167
4.7.4 Wirkungsgrad und Anpassung	174
Übungsaufgaben zum Abschnitt 4.7	184

5 Ortskurven	186
5.1 Begriff der Ortskurve	186
5.2 Ortskurve „Gerade“	188
5.3 Ortskurve „Kreis durch den Nullpunkt“	193
5.4 Ortskurve „Kreis in allgemeiner Lage“	207
5.5 Ortskurven höherer Ordnung	210
Übungsaufgaben zu den Abschnitten 5.1 bis 5.5	215
6 Der Transformator	218
6.1 Übersicht über Transformatoren	218
6.2 Transformatorgleichungen und Zeigerbild	220
6.3 Ersatzschaltbilder mit galvanischer Kopplung	230
6.4 Messung der Ersatzschaltbildgrößen des Transformators	237
6.5 Frequenzabhängigkeit der Spannungsübersetzung eines Transformators	242
Übungsaufgaben zu den Abschnitten 6.1 bis 6.5	247
7 Mehrphasensysteme	249
7.1 Die m-Phasensysteme	249
7.2 Symmetrische verkettete Dreiphasensysteme	256
7.3 Unsymmetrische verkettete Dreiphasensysteme	267
7.4 Messung der Leistungen des Dreiphasensystems	279
Übungsaufgaben zu den Abschnitten 7.1 bis 7.4	283
Anhang	
Lösungen der Übungsaufgaben	284
4 Wechselstromtechnik	284
5 Ortskurven	331
6 Transformator	347
7 Mehrphasensysteme	357
Verwendete und weiterführende Literatur	369
Sachwortverzeichnis	370

Inhaltsübersicht

Band 1

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

Band 3

- 8 Ausgleichsvorgänge in linearen Netzen
 - 9 Fourieranalyse
 - 10 Vierpoltheorie
- 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
$\underline{\hat{u}}, \underline{\hat{i}}$	komplexe Amplitude
$\underline{U}, \underline{I}$	komplexer Effektivwert, dargestellt durch ruhende Zeiger
Z, Y, z	komplexe Größen
Z^*, Y^*, 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

$\underline{a}$	Operator des m-Phasensystems	i	zeitlich veränderlicher Strom (Augenblicks- oder Momentanwert)
A	Fläche, Querschnittsfläche		laufender Index
$\underline{A}$	komplexe Größe	$\hat{i}$	Amplitude, Maximalwert des sinusförmigen Stroms
B	Blindleitwert (Suszeptanz)	$\underline{i}$	komplexe Zeitfunktion des Stroms
	magnetische Induktion	$\underline{\hat{i}}$	komplexe Amplitude des Stroms
$\underline{B}$	komplexe Größe	I	Stromstärke (Gleichstrom, Effektiv- wert)
C	elektrische Kapazität	$\underline{I}$	komplexer Effektivwert des Stroms
	Konstante	j	imaginäre Einheit: $\sqrt{-1}$
$\underline{C}$	komplexe Größe		imaginäre Achse
d	Verlustfaktor	k	Knotenzahl
e	zeitlich veränderliche EMK		Kopplungsfaktor
$\underline{E}$	komplexe Größe		laufender Index
f	Frequenz	K	Konstante
	Formfaktor	$\underline{K}$	Ortskurve Kreis
$f(t)$	Zeitfunktion	l	Länge
$\underline{F}$	komplexe Größe		Anzahl
g	Gütefaktor	L	Induktivität
G	elektrischer Leitwert	$\underline{L}$	komplexe Größe
	Wirkleitwert (Konduktanz)		
$\underline{G}$	Ortskurve Gerade		
H	magnetische Feldstärke oder magneti- sche Erregung		

m	Anzahl	v	allgemeine zeitlich veränderliche Größe
M	Gegeninduktivität Drehmoment	V	Imaginärteil einer komplexen Zahl
n	Anzahl	V	Effektivwert einer allgemeinen Größe v
<u>N</u>	komplexe Größe		normierte Verstimmung
<u>O</u>	allgemeine Ortskurvengleichung	w	Windungszahl
p	Augenblicksleistung Verhältniszahl Parameter		zeitlich veränderliche Energie
P	Leistung (Gleichleistung, Wirkleistung)	<u>w</u>	komplexe Zahl
<u>P</u>	Ortskurve Parabel	W	Arbeit, Energie
q	zeitlich veränderliche Ladung	x	Verhältniszahl
Q	Ladung, Elektrizitätsmenge Blindleistung Kreisgüte, Gütefaktor, Resonanzschärfe		laufende Ordinate auf der Abzissenachse
r	Betrag einer komplexen Zahl reelle Achse Widerstandsverhältnis		Realteil einer komplexen Zahl
R	elektrischer Widerstand Wirkwiderstand (Resistanz)	X	Blindwiderstand (Reaktanz)
<u>R</u>	komplexe Größe	y	laufende Ordinate auf der Ordinatenachse
S	Scheinleistung		Imaginärteil einer komplexen Zahl
<u>S</u>	komplexe Leistung komplexe Größe	Y	Scheinleitwert (Admittanz)
t	Zeit	<u>Y</u>	komplexer Leitwert bzw. komplexer Leitwertoperator
T	Periodendauer (Dauer einer Schwingung)	z	Zweigzahl
u	zeitlich veränderliche elektrische Spannung (Augenblicks- oder Momentanwert) Realteil einer komplexen Zahl		laufende Ordinate
<u>û</u>	Amplitude, Maximalwert der sinusförmigen Spannung	<u>z</u>	komplexe Zahl
<u>u</u>	komplexe Zeitfunktion der elektrischen Spannung	Z	Scheinwiderstand (Impedanz)
<u>û</u>	komplexe Amplitude der elektrischen Spannung	<u>Z</u>	komplexer Widerstand bzw. komplexer Widerstandsoperator
U	elektrische Spannung (Gleichspannung, Effektivwert)	α	Winkel
<u>U</u>	komplexer Effektivwert der elektrischen Spannung	β	Winkel
ü	Übersetzungsverhältnis	γ	Winkel
		δ	Verlustwinkel
		Δ	Differenz, Abweichung
		Δf	Bandbreite
		ε	Fehlwinkel
		η	Wirkungsgrad
		φ	Phasenverschiebung
			Argument einer komplexen Zahl
		φ_i	Anfangsphasenwinkel des Stroms
		φ_u	Anfangsphasenwinkel der Spannung
		Φ	magnetischer Fluss
		v	relative Verstimmung
		σ	Streufaktor
		ω	Kreisfrequenz

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 des Verschiebungsflusses Ψ	Coulomb,	$1\text{C} = 1\text{A} \cdot \text{s}$
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“.