

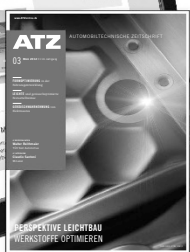


# Elektrotechnik für Ingenieure 1




# Lizenz zum Wissen.

Sichern Sie sich umfassendes Technikwissen mit Sofortzugriff auf tausende Fachbücher und Fachzeitschriften aus den Bereichen: Automobiltechnik, Maschinenbau, Energie + Umwelt, E-Technik, Informatik + IT und Bauwesen.

Exklusiv für Leser von Springer-Fachbüchern: Testen Sie Springer für Professionals 30 Tage unverbindlich. Nutzen Sie dazu im Bestellverlauf Ihren persönlichen Aktionscode **C0005406** auf [www.springerprofessional.de/buchaktion/](http://www.springerprofessional.de/buchaktion/)



Springer für Professionals.  
Digitale Fachbibliothek. Themen-Scout. Knowledge-Manager.

-  Zugriff auf tausende von Fachbüchern und Fachzeitschriften
-  Selektion, Komprimierung und Verknüpfung relevanter Themen durch Fachredaktionen
-  Tools zur persönlichen Wissensorganisation und Vernetzung

[www.entschieden-intelligenter.de](http://www.entschieden-intelligenter.de)

Springer für Professionals

 Springer

---

Wilfried Weißgerber

# Elektrotechnik für Ingenieure 1

Gleichstromtechnik und  
Elektromagnetisches Feld. Ein Lehr- und  
Arbeitsbuch für das Grundstudium

11., durchgesehene und korrigierte Auflage

Mit 469 Abbildungen, zahlreichen Beispielen  
und 121 Übungsaufgaben mit Lösungen

Prof. Dr. Wilfried Weißgerber  
Wedemark, Germany

ISBN 978-3-658-21820-1                      ISBN 978-3-658-21821-8 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-21821-8>

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 1990, 1992, 1994, 1997, 2000, 2005, 2007, 2009, 2013, 2015, 2018

Das 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.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

# Vorwort

Die fünf vorliegenden Bände „Elektrotechnik für Ingenieure“ (drei Lehrbücher, eine Formelsammlung und ein Klausurenrechnen) sind ein Lehr- und Arbeitsbuch für Ingenieurstudenten im Hochschulbereich, die im Grundstudium die Grundlagen der Elektrotechnik verstehen möchten. Das Buch soll dem Studienanfänger das Verständnis für elektrotechnische Probleme erleichtern. Deshalb ist der Stoff sehr ausführlich und systematisch dargestellt. Gleichzeitig soll es bei der Lösung von Übungsaufgaben und bei der Prüfungsvorbereitung behilflich sein, also auch den Anforderungen im Selbststudium genügen.

Das Buch ist aus einem Vorlesungs-Skript entstanden, das in gedruckter Form vorliegt und schon von mehreren Studentengenerationen im Unterricht intensiv genutzt wurde. Von den Studenten, ohne deren helfende Kritik das Buch in dieser Form nicht entstanden wäre, wird die Ausführlichkeit der Darstellung besonders gewürdigt. Bei keiner Herleitung heißt es „wie man leicht sieht“, vielmehr ist die mathematische Herleitung der Ergebnisformeln so ausführlich gehalten, dass sie sofort nachvollzogen und ohne eigene Zwischenrechnungen verstanden werden kann. Dem Studierenden wird es somit ermöglicht, sich auf die dargestellten physikalischen Zusammenhänge und vor allem auf die praktischen Beispiele zu konzentrieren, die sowohl im Text als auch als Aufgaben zum Selbststudium reichlich zu finden sind. Im Anhang sind die Lösungen der Aufgaben zusammengestellt, nicht nur als Zahlenergebnisse, sondern in ausführlicher Form eines Lösungsweges. Bei Neuerscheinungen ist es selbstverständlich, dass die Bezeichnungen dem neuesten Stand der Normen entsprechen. Dadurch ist dem Studierenden oft der Zugang zu älterer Literatur verwehrt, weil Widersprüche das neu erworbene Wissen in Frage stellen. Zwischen der heute üblichen und der nicht mehr gebräuchlichen Darstellung gibt es oft nur kleine Unterschiede, die aber leicht zu verstehen sind, wie beispielsweise die Quellspannung und die EMK in Kapitel 1 oder die elektrostatische Feldstärke und die induzierte Feldstärke beim Induktionsgesetz oder die elektrostatische Feldstärke und die Hallfeldstärke beim Halleffekt in Kapitel 3. Die heute verwendeten Bezeichnungen sind bei der direkten Gegenüberstellung links angeordnet; die auf der rechten Seite aufgeführten veralteten Größen ermöglichen das Verständnis älterer bewährter Literatur. Unterzieht man sich der kleinen Mühe, die heute oft verpönte EMK zu verstehen, dann wird es leichter, die Größen des magnetischen Feldes über Analogiebetrachtungen zu erfassen; im magnetischen Feld gibt es zwei verschiedene Arten von „Spannungen“.

Die Lösungsverfahren der Gleichstrom-Netzberechnung werden in Kapitel 2 nicht nur dargestellt, sondern auch hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit bei umfangreicheren Netzen untersucht. Deshalb wird auch der Gaußsche Algorithmus, der häufig in Rechnerprogrammen zu finden ist, ausführlich beschrieben.

Bei der Behandlung der elektromagnetischen Felder in Kapitel 3 ist die Übersicht über die vier feldbeschreibenden Größen und deren Zusammenhänge an den Anfang gestellt, damit die Analogien und die Unterschiede zwischen den Feldern deutlich werden. Bei der Beschreibung der Felder im einzelnen wird prinzipiell gleich vorgegangen: Wesen des Feldes, messtechnischer Nachweis, Fluss, Flussdichte, Spannung (Durchflutung), Widerstand/Leitwert (Kapazität), Feldstärke. Damit wird die Systematik noch unterstrichen.

Bewusst ist mit der Behandlung des elektrischen Strömungsfeldes begonnen worden, weil der Feldbegriff mit bekannten Größen der Gleichstromtechnik des Kapitels 2 erläutert werden kann.

Auf die Differentialform der Maxwellschen Gleichungen ist absichtlich verzichtet worden, weil oft die mathematischen Voraussetzungen zum Verständnis fehlen und weil die meisten praktischen Berechnungen mit der Integralform möglich sind.

Die Bewegungsinduktion und die Induktion durch zeitlich veränderliche Magnetfelder werden durch gleiche Bilder erläutert. Um die Richtungen der Größen, die die Induktionsvorgänge beschreiben, einfach ermitteln zu können, wird die Rechte-Hand-Regel für alle behandelten Fälle benutzt.

Bei magnetisch gekoppelten Kreisen wird deutlich unterschieden, ob die beiden Spulenströme eingepägt sind oder – wie beim Transformator – nicht.

Die 6. Auflage wurde um ein Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Einheiten ergänzt. Die 7. Auflage ist noch einmal überarbeitet und durch Erläuterungen ergänzt worden. In der 8. Auflage sind einige Korrekturen und Verbesserungen vorgenommen worden. Bei der 9. Auflage handelt es sich um eine nochmals durchgesehene Auflage.

In der 10. Auflage sind Vorbemerkungen zu den einzelnen Kapiteln hinzugefügt worden. Sie weisen auf die Besonderheiten des behandelten Stoffes hin und geben Hinweise, welche mathematischen Voraussetzungen notwendig sind, um die Inhalte zu verstehen. Außerdem geben sie Empfehlungen, welche mathematischen Kenntnisse in den folgenden Kapiteln erworben werden sollten. Es finden sich auch klausurrelevante Hinweise.

Die 11. Auflage wurde nochmals durchgesehen und korrigiert.

Für die vielen Anregungen meiner Kollegen und Studenten möchte ich herzlich danken. Ebenso danken möchte ich allen Mitarbeitern des Verlags und der Fa. Fromm MediaDesign, die zum Gelingen des fünfbandigen Werks beitragen.

Wedemark, im April 2018

*Wilfried Weißgerber*

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Physikalische Grundbegriffe der Elektrotechnik</b> .....	1
1.1 Ungeladene und geladene Körper .....	1
1.2 Das Coulombsche Gesetz und das elektrische Feld .....	4
1.3 Das elektrische Potential und die elektrische Spannung .....	5
1.4 Der elektrische Strom .....	10
1.5 Der elektrische Widerstand .....	12
1.6 Die elektrische Energie und die elektrische Leistung .....	22
Übungsaufgaben zu den Abschnitten 1.1 bis 1.6 .....	25
<b>2 Gleichstromtechnik</b> .....	27
2.1 Der unverzweigte Stromkreis .....	27
2.1.1 Der Grundstromkreis .....	27
2.1.2 Zählpeilsysteme .....	31
2.1.3 Die Reihenschaltung von Widerständen .....	33
2.1.4 Anwendungen der Reihenschaltung von Widerständen .....	34
2.1.5 Die Reihenschaltung von Spannungsquellen .....	35
2.2 Der verzweigte Stromkreis .....	37
2.2.1 Die Maschenregel (Der 2. Kirchhoffsche Satz) .....	37
2.2.2 Die Knotenpunktregel (Der 1. Kirchhoffsche Satz) .....	39
2.2.3 Die Parallelschaltung von Widerständen .....	39
2.2.4 Anwendungen der Parallelschaltung von Widerständen .....	41
2.2.5 Ersatzspannungsquelle und Ersatzstromquelle .....	44
2.2.6 Die Parallelschaltung von Spannungsquellen .....	54
2.2.7 Messung von Widerständen .....	58
2.2.8 Der belastete Spannungsteiler .....	62
2.2.9 Kompensationsschaltungen .....	66
2.2.10 Umwandlung einer Dreieckschaltung in eine Sternschaltung und umgekehrt .....	69
Übungsaufgaben zu den Abschnitten 2.1 und 2.2 .....	74
2.3 Verfahren zur Netzwerkberechnung .....	80
2.3.1 Netzwerkberechnung mit Hilfe der Kirchhoffschen Sätze (Zweigstromanalyse) .....	80
2.3.2 Netzwerkberechnung mit Hilfe des Überlagerungssatzes (Superpositionsverfahren) .....	86
2.3.3 Netzwerkberechnung mit Hilfe der Zweipoltheorie (Zweipolverfahren) .....	90
2.3.4 Netzwerkberechnung nach dem Maschenstromverfahren .....	98
2.3.5 Netzwerkberechnung nach dem Knotenspannungsverfahren .....	102
2.3.6 Matrizen und Determinanten und ihre Anwendung bei der Netzwerkberechnung .....	108
2.3.6.1 Matrizen .....	108
2.3.6.2 Determinanten und Bilden der inversen Matrix .....	114
2.3.6.3 Lösung der Netzberechnungs-Gleichungssysteme .....	118
Übungsaufgaben zum Abschnitt 2.3 .....	129

2.4	Elektrische Energie und elektrische Leistung .....	132
2.4.1	Energie und Leistung.....	132
2.4.2	Energieumwandlungen .....	135
2.4.3	Messung der elektrischen Energie und Leistung .....	138
2.4.3.1	Messung der elektrischen Energie .....	138
2.4.3.2	Messung der elektrischen Leistung .....	140
2.4.4	Wirkungsgrad in Stromkreisen .....	142
2.4.5	Anpassung .....	145
	Übungsaufgaben zum Abschnitt 2.4 .....	149
<b>3</b>	<b>Das elektromagnetische Feld .....</b>	<b>150</b>
3.1	Der Begriff des Feldes .....	150
3.2	Das elektrische Strömungsfeld .....	154
3.2.1	Wesen des elektrischen Strömungsfeldes .....	154
3.2.2	Elektrischer Strom und elektrische Stromdichte .....	156
3.2.3	Elektrische Spannung und elektrische Feldstärke, elektrischer Widerstand und spezifischer Widerstand .....	160
	Übungsaufgaben zum Abschnitt 3.2 .....	166
3.3	Das elektrostatische Feld .....	167
3.3.1	Wesen des elektrostatischen Feldes .....	167
3.3.2	Verschiebungsfluss und Verschiebungsflussdichte .....	170
3.3.3	Elektrische Spannung und elektrische Feldstärke, Kapazität und Permittivität (Dielektrizitätskonstante) .....	175
3.3.4	Verschiebestrom – Strom im Kondensator .....	197
3.3.5	Energie und Kräfte des elektrostatischen Feldes .....	201
3.3.6	Das Verhalten des elektrostatischen Feldes an der Grenze zwischen Stoffen verschiedener Dielektrizitätskonstanten .....	206
	Übungsaufgaben zum Abschnitt 3.3 .....	211
3.4	Das magnetische Feld .....	214
3.4.1	Wesen des magnetischen Feldes .....	214
3.4.2	Magnetischer Fluss und magnetische Flussdichte .....	216
3.4.3	Durchflutung, magnetische Spannung und magnetische Feldstärke (magnetische Erregung), magnetischer Widerstand und Permeabilität .....	222
3.4.4	Das Verhalten des magnetischen Feldes an der Grenze zwischen Stoffen verschiedener Permeabilitäten .....	242
3.4.5	Berechnung magnetischer Kreise .....	246
3.4.5.1	Berechnung geschlossener magnetischer Kreise .....	246
3.4.5.2	Berechnung des nichteisengeschlossenen magnetischen Kreises einer Doppelleitung und mehrerer paralleler Leiter .....	276
3.4.5.3	Berechnung magnetischer Kreise mit Dauermagneten .....	279
3.4.6	Elektromagnetische Spannungserzeugung – das Induktionsgesetz .....	288
3.4.6.1	Bewegte Leiter in einem zeitlich konstanten Magnetfeld – die Bewegungsinduktion .....	288
3.4.6.2	Zeitlich veränderliches Magnetfeld und ruhende Leiter – die Ruheinduktion .....	300



3.4.7	Selbstinduktion und Gegeninduktion .....	305
3.4.7.1	Die Selbstinduktion .....	305
3.4.7.2	Die Gegeninduktion .....	319
3.4.7.3	Haupt- und Streuinduktivitäten, Kopplungs- und Streufaktoren .....	337
3.4.8	Magnetische Energie und magnetische Kräfte .....	343
3.4.8.1	Magnetische Energie .....	343
3.4.8.2	Magnetische Kräfte .....	352
	Übungsaufgaben zum Abschnitt 3.4 .....	363

### **Anhang:**

<b>Lösungen der Übungsaufgaben</b> .....	379
1 Physikalische Grundbegriffe der Elektrotechnik .....	379
2 Gleichstromtechnik .....	381
2.1 und 2.2 Der unverzweigte und der verzweigte Stromkreis .....	381
2.3 Verfahren zur Netzwerkberechnung .....	391
2.4 Elektrische Energie und elektrische Leistung .....	396
3 Das elektromagnetische Feld .....	398
3.2 Das elektrische Strömungsfeld .....	398
3.3 Das elektrostatische Feld .....	399
3.4 Das magnetische Feld .....	410
<b>Verwendete und weiterführende Literatur</b> .....	435
<b>Sachwortverzeichnis</b> .....	436

## **Inhaltsübersicht**

### **Band 2**

- 4 Wechselstromtechnik
- 5 Ortskurven
- 6 Der Transformator
- 7 Mehrphasensysteme
- 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
û, î	Maximalwert
$\vec{E}, \vec{D}, \vec{r}$	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 verwendete Formelzeichen physikalischer Größen

a	Länge	G	elektrischer Leitwert
A	Fläche, Querschnittsfläche	$G_m$	magnetischer Leitwert
b	Länge	h	Höhe, Länge
$B, \vec{B}$	magnetische Flussdichte oder magnetische Induktion	H, $\vec{H}$	magnetische Feldstärke oder magnetische Erregung
c	Länge Konstante Lichtgeschwindigkeit $c = 2,99792 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ spezifische Wärmekapazität (spezifische Wärme)	i	zeitlich veränderlicher Strom (Augenblicks- oder Momentanwert) laufender Index
C	elektrische Kapazität	I	Stromstärke (Gleichstrom)
d	Dicke Durchmesser	k	Knotenzahl Kopplungsfaktor
$D, \vec{D}$	elektrische Verschiebungsflussdichte oder Erregungsflussdichte	K	Konstante
D	Durchmesser	$l, \vec{l}$	Länge
$D^*$	Drehfederkonstante	l	Anzahl
e	Elementarladung $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$	L	Induktivität
$E, \vec{E}$	elektrische Feldstärke	m	Masse Anzahl
E, e	EMK	M	Gegeninduktivität Drehmoment
f	Frequenz	n	Anzahl Drehzahl
$f_{Fe}$	Eisenfüllfaktor	N	Entmagnetisierungsfaktor
$F, \vec{F}$	Kraft	$\vec{N}$	Normale
		p	Verhältniszahl

P	Leistung (Gleichleistung)	$\alpha$	Winkel
q	zeitlich veränderliche Ladung		Temperaturkoeffizient
Q	Ladung, Elektrizitätsmenge		Zeigerausschlag
r	variabler Radius	$\beta$	Winkel
$\vec{r}$	Radiusvektor, Ortsvektor		Temperaturkoeffizient
R	elektrischer Widerstand	$\gamma$	Winkel
	Radius		Zeigerausschlag
$R_m$	magnetischer Widerstand	$\Delta$	Differenz, Abweichung
s	Weg, Länge	$\varepsilon$	Dielektrizitätskonstante
S, $\vec{S}$	Stromdichte		Dielektrizitätskonstante des Vakuums, Influenzkonstante:
t	Zeit		$\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$
T	Periodendauer (Dauer einer Schwingung)	$\eta$	Wirkungsgrad
u	zeitlich veränderliche elektrische Spannung (Augenblicks- oder Momentanwert)	$\varphi$	elektrisches Potential
U	elektrische Spannung (Gleichspannung)	$\Phi$	magnetischer Fluss
$v, \vec{v}$	Geschwindigkeit	$\vartheta$	Temperatur
v	Widerstandsverhältnis	$\kappa$	spezifischer Leitwert
V	Volumen	$\mu$	Permeabilität
	magnetische Spannung		Permeabilität des Vakuums:
w	Windungszahl		$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$
w'	Energiedichte	$\nu$	laufender Index
W	Arbeit, Energie	$\rho$	spezifischer Widerstand
x	laufende Ordinate auf der Abzissenachse	$\Theta$	Durchflutung
y	laufende Ordinate auf der Ordina- tenachse	$\sigma$	Streifaktor
z	Zweigzahl	$\tau$	Zeitkonstante
	Ankerumdrehungen		Temperaturkennwert
		$\omega$	Kreisfrequenz
		$\Psi$	Verschiebungsfluss
			Induktionsfluss oder verketteter Fluss

**Einheiten des MKSA-Systems (m, kg, s, A)****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 $\Psi$		
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 $\Phi$	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“.

# Vorbemerkungen zum Kapitel 1

Zum Verständnis der Grundbegriffe Spannung, Strom, Widerstand, elektrische Energie und elektrische Leistung sind mathematische Vorkenntnisse kaum nötig, entsprechend einfach sind die Übungs- und Prüfungsaufgaben. Sie werden häufig in den Klausuren zum Warmlaufen genutzt und finden sich meist in der ersten Aufgabe einer Klausur (siehe Elektrotechnik für Ingenieure – Klausurenrechnen, Abschnitt 1). Überraschend dürfte für manchen Studierenden sein, dass es nicht nur einen elektrischen Strom im Leiter, sondern auch einen Strom im Nichtleiter gibt; diese notwendige Erweiterung des Strombegriffs wird im Kapitel 2, Abschnitt 3.3.4 ausführlich erklärt.

Nur an einigen Stellen muss die Differential- und Integralrechnung angewendet werden, z. B. bei der Temperaturabhängigkeit des Widerstandes und bei der elektrischen Energie.

Ich empfehle den Studierenden im ersten Semester, die Kenntnisse über die Differential- und Integralrechnung und der Vektorrechnung unbedingt zu vertiefen, weil sie für das Verständnis des Elektromagnetischen Feldes im Kapitel 3 unverzichtbar sind.

# Vorbemerkungen zum Kapitel 2

In der Gleichstromtechnik stehen der Grundstromkreis und die Netzwerkberechnung im Mittelpunkt. Die Formeln der Grundstromkreise sollten stets parat sein, denn viele Anwendungen, insbesondere der Messtechnik, führen zum Grundstromkreis, mit dessen Hilfe Erklärungen möglich werden; dabei müssen die Spannungsteiler- und Stromteilerregel bekannt sein. Die fünf Verfahren der Netzwerkberechnung gehören zum Grundwissen eines Elektroingenieurs, wobei die Maschenregel und die Knotenpunktregel wichtig sind. Bemerkenswert ist bei der Zweipoltheorie, dass hier die Kenntnisse über den Grundstromkreis notwendig sind, denn das vorgegebene Netzwerk wird immer in einen Grundstromkreis überführt. Beim Superpositionsverfahren spielt die Stromteilerregel eine große Rolle, wie in den berechneten Beispielen nachvollzogen werden kann.

Mathematisch ist dieses Kapitel etwas anspruchsvoller, weil die Studierenden mit Gleichungssystemen umgehen können müssen: Werden meine angegebenen Lösungswege aufmerksam verfolgt, können sehr schnell die richtigen Ergebnisse erzielt werden. Mit etwas Geduld kann dann die Matrizenrechnung erarbeitet werden, denn sie ist sehr ausführlich behandelt. Sie anwenden zu können, ist für die Zweigstromanalyse, das Maschenstrom-Verfahren und das Knotenspannungs-Verfahren Voraussetzung, insbesondere für große Gleichungssysteme, bei deren Lösungen Rechner zu Hilfe genommen werden.

In Klausuren fehlen die Netzwerkberechnungen nie, deshalb empfehle ich Studierenden, möglichst viele Beispiele in den Übungsaufgaben und Klausuraufgaben (siehe Elektrotechnik für Ingenieure – Klausurenrechnen, Abschnitt 1) zuerst selbstständig zu lösen und dann erst die Lösungen in den Büchern anzusehen, um aus den Fehlern zu lernen und möglichst geschickt die Aufgaben beurteilen zu können.

Die fünf Verfahren der Netzwerkberechnungen sollten gut geübt sein, denn sie werden für Wechselstrom-Netzwerke im Kapitel 4 vorausgesetzt.

## Vorbemerkungen zum Kapitel 3

Bei der Behandlung des Elektromagnetischen Feldes empfehle ich, die Übersicht auf S. 152 immer wieder anzusehen, denn mit den jeweils vier Vektor- und Skalargrößen und deren Zusammenhänge werden die drei Felder beschrieben. Um über die Analogie der drei Felder die Fülle des Lehrinhalts noch mehr zu strukturieren, sind die Abschnittsüberschriften, Beschreibungen und sogar Beispiele gleich gewählt und finden sich auf entsprechenden Seiten: z. B. 154/167/214 oder 157/171/217. Der Text ist bewusst identisch formuliert, um die Analogien zu unterstreichen, der Unterschied besteht lediglich in den verschiedenen Buchstaben, d. h. es wurden in den entsprechenden Textstellen und Formeln nur die Größen ausgewechselt bzw. angepasst. Es gibt übrigens nur wenige einfache Beispiele, die sich für eine Klausuraufgabe eignen, deshalb empfehle ich, alle angegebenen Beispiele durchzurechnen (siehe Elektrotechnik für Ingenieure – Klausurenrechnen, Abschnitt 2).

Bei der Behandlung des elektrostatischen Feldes ist besonders die Kapazität hervorgehoben, ohne die der kapazitive Widerstand in der Wechselstromtechnik (Kapitel 4) nicht zu erklären ist. Für die Berechnung magnetischer Felder gibt es viele Anwendungen, die häufig in Klausuraufgaben abgefragt werden: Berechnung geschlossener magnetischer Kreise, Berechnung des magnetischen Kreises einer Doppelleitung und Dauermagnetkreise (Abschnitt 3.4.5).

Die Zusammenhänge zwischen dem magnetischen Feld und dem Strömungsfeld werden durch den Durchflutungssatz (Abschnitt 3.4.3) und das Induktionsgesetz (Abschnitt 3.4.6) beschrieben. Sie sind die wichtigsten Gesetze des Elektromagnetischen Feldes (die Maxwell'schen Gleichungen). Die Bewegungsinduktion und die Ruheinduktion sind durch ähnliche Bilder erläutert, wobei die Rechte-Hand-Regel ein einfaches Mittel ist, die Richtung von induzierten elektrischen Spannungen vorauszusagen. Räumliches Denken ist hier verlangt, wobei selbst gebastelte Modelle helfen können.

Die Selbst- und Gegeninduktionsvorgänge führen zu den Begriffen Induktivität und Gegeninduktivität, die wichtig sind für induktive Widerstände der Wechselstromtechnik im Kapitel 4.

Zu den wichtigsten Anwendungen der Induktionsvorgänge gehört der Transformator, der hier ab Seite 332 durch Ersatzschaltbilder und den Trafogleichungen beschrieben wird. In der Wechselstromtechnik findet er dann seine eigentliche Anwendung: Die Ersatzschaltbilder und Trafogleichungen werden dann im Kapitel 4 für Wechselgrößen angepasst.

An manchen Hochschulen wird die Wechselstromtechnik vor dem Elektromagnetischen Feld behandelt, obwohl die Kenntnisse über das Elektromagnetische Feld Voraussetzung sind, um sie in der Wechselstromtechnik anzuwenden und zu verstehen. In diesem Fall empfehle ich Studierenden, sich im Selbststudium mit dem Elektromagnetischen Feld auseinander zu setzen.

Das Studium des Kapitels 3 ist also ohne die Vektorrechnung und Differential- und Integralrechnung nicht denkbar. Genauso verhält es sich beim Studium der Wechselstromtechnik (Kapitel 4) und der komplexen Rechnung. Deshalb meine Empfehlung, parallel zum Studium des Elektromagnetischen Feldes die komplexe Rechnung zu lernen, um bestens vorbereitet zu sein für das nächste Kapitel im Band 2.