

Springer-Lehrbuch

Steffen Paul · Reinhold Paul

# Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik 2

Elektromagnetische Felder  
und ihre Anwendungen

 Springer Vieweg

*Herausgeber*  
Steffen Paul  
Universität Bremen,  
Deutschland

Reinhold Paul  
TU Hamburg-Harburg,  
Deutschland

ISBN 978-3-642-24156-7  
DOI 10.1007/978-3-642-24157-4

e-ISBN 978-3-642-24157-4

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-Verlag Berlin Heidelberg 2012

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.

*Lektorat:* Eva Hestermann-Beyerle

*Einbandentwurf:* WMXDesign GmbH, Heidelberg

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.de](http://www.springer.de)

## Vorwort

Die grundlegenden Ziele, inhaltlichen Konzepte und didaktischen Ansprüche des gesamten Lehrbuchs wurden bereits im Vorwort des ersten Bandes skizziert. Aus guten Gründen umfasst er neben den elektrotechnischen Grundbegriffen die Grundlagen resistiver Schaltungen oder Gleichstromnetzwerke mit den typischen Bauelementen Strom-, Spannungsquellen und Widerstand. Nicht zuletzt deshalb bleiben die mathematischen Anforderungen an die Studienanfänger niedrig, gleichzeitig ist der praktische Nutzen des erlernten Fachwissens erheblich. Konsequenterweise, im Vorwort dort schon angedeutet, müssen dann elektromagnetische Felder den Inhalt dieses Bandes bilden: Felderscheinungen, ihre Grundgesetze und die Fülle der Anwendungen, eingeschlossen die auftretenden Kraftwirkungen und ihre Nutzung, also die mechanisch-elektromagnetische Energiewandlung.

Gerade der Feldbegriff erweckt aber bei vielen Studienanfängern das Unbehagen von „etwas Unvollstrebarem“. Die Überwindung dieser Schwelle verlangt deshalb eine betont physikalisch anschauliche und phänomenologisch orientierte Einführung der Feldgrundlagen: soviel Verständnis wie möglich, so wenig mathematischer Hintergrund wie erforderlich. Dann liegt nahe, zunächst grundlegende Feldbegriffe wie Skalar- und Vektorfeld, Feldlinien, Flussröhre, Quellenfeld (mit Ergiebigkeit und veranschaulichtem Gaußschem Satz) und Wirbelfeld (mit Zirkulation und erläuterten Stokeschem Satz) an bekannten Felderscheinungen des täglichen Lebens zu erläutern. Deutlich wird so der Unterschied zwischen einer lokalen Feldbeschreibung, also im Raumpunkt zur Definition typischer Feldgrößen und dem Übergang zur dreidimensionalen Feldverteilung mit der Einführung integraler Größen. So kann beispielsweise von den elektrischen und magnetischen Feldgrößen zu Ladung, Strom, Spannung und Fluss als gleichwertiger Beschreibungsform für ein Raumgebiet übergegangen werden. Im Ergebnis treten dann zum bekannten Widerstand als Synonym für Strömungsvorgänge in einem Raumgebiet die energiespeichernden Elemente Kondensator und Spule als neue Netzwerkelemente hinzu, verankert im elektromagnetischen Feld. Auf diese Weise lassen sich elektrische und magnetische Feldbereiche bequem in das Netzwerkkonzept einbeziehen.

Für diese zweistufige Behandlung genügen einfache mathematische Vorkenntnisse wie die elementare Vektoralgebra, Differenzial- und Integralrechnung. Die typischen Feldintegrale wurden im Anhang von Band 1 bereits zusammengestellt, gelegentlich öffnet ein Ausblick auf die Vektoranalysis mit den Operationen Gradient (grad) Divergenz (div) und Rotation (rot) an passenden Stellen einen Zugang zur anspruchsvolleren, aber leistungsfähigeren Differenzialform der Feldbeschreibung.

Aus didaktischen Gründen werden die mit gleichmäßig bewegten, ruhenden und beschleunigten Ladungen verbundenen Strömungs-, elektrostatischen und magnetischen Felder zunächst getrennt betrachtet und dann in den Maxwell'schen Gleichungen miteinander verkoppelt. Deren Grundgesetze sind Durchflutungssatz und Induktionsgesetz sowie verschiedene Nebenbedingungen.

Der Übergang vom Gleichstromkreis zur zugehörigen Felddarstellung führt direkt zum Strömungsfeld. Ausgehend vom Strom-Spannungsverhalten eines leitenden Volumens wird zunächst der Ursache-Wirkungs-Zusammenhang durch Feldgrößen begründet, also der Widerstandsbegriff feldmäßig hinterlegt. Im Strömungsfeld lassen sich Leitungsvorgänge in Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen und ihre Anwendungen leicht einbeziehen.

Das an ruhende Ladungen gebundene elektrostatische Feld mit den relevanten Feldgrößen und Phänomenen führt in der Globalbetrachtung zu Spannung und Ladung und dem Kondensator als charakteristischem Netzwerkelement. Dazu gehören aber nach Meinung der Autoren heute auch Begriffe wie nichtlineare Kapazität (Beispiel Halbleiterkapazitäten) und auch zeitabhängige Kapazitäten. Gerade sie bilden mit ihrer energiewandelnden Eigenschaft einen bequemen Zutritt zum Wandlerelement. Selbst das Konzept des MOS-Feldeffekttransistors ist aus dieser Sicht nur ein feldgesteuertes, nichtlineares Strömungsfeld.

Die gleichen Gedankengänge liegen der Einführung des magnetischen Feldes und seiner Feldgrößen zugrunde, unterstützt durch Analogiebetrachtungen zwischen elektrischen, magnetischen und Strömungsgrößen. Wichtige Ergebnisse sind das Netzwerkelement Induktivität/Spule, der magnetische Kreis als Verfahren zur Analyse geführter magnetischer Felder und die magnetische Kopplung zwischen stromdurchflossenen Leiterkreisen mit dem Transformator als verbreitetem Bauelement. Für das Zusammenwirken der Felder sind drei Tatsachen maßgebend: jede Ladung ist von einem elektrischen Feld und Verschiebungsfluss umgeben, jede elektrische Feldänderung erzeugt ein magnetisches Feld und jedes veränderliche magnetische Feld wird von einem elektrischen Feld umwirbelt mit Durchflutungssatz und Induktionsgesetz als gesetzmäßiger Grundlage und verankert im System der Maxwell'schen Gleichungen. Sie werden ausführlich in Integralform interpretiert (und in der Differenzialform angedeutet). Dann bestätigt der unterschiedliche Zeiteinfluss rückblickend die getroffene Feldeinteilung.

Ein weiterer Schwerpunkt dieses Bandes widmet sich den Haupteigenschaften des elektromagnetischen Feldes: der Energiespeicher- und -transportfähigkeit sowie Wandlung in andere Energieformen. Das elektromagnetische Feld ist Träger elektromagnetischer Energie mit folgenden Vorteilen: leichter Trans-

port, rasche Ausbreitung, Regelbarkeit, Wandel- und Speicherbarkeit. Weil nur ihre Wirkungen auf die Umgebung mess- und nutzbar sind, basieren diese Anwendungen auf einer Energiewandlung, denn der Energiebegriff ist allen physikalischen Teilgebieten gemein. Welche Arten (Wärme, chemische, mechanische, Kernenergie, Wind- und Solarenergie) auch auftreten: alle werden in elektrische umgesetzt und unterliegen ebenso dem Umkehrvorgang. So wandelt das Strömungsfeld elektrische Energie in Wärme und die in Feldern auftretenden Kräfte (Coulomb- und Lorentz-Kraft) sind Ausdruck gewandelter mechanischer Energie. Weil die Kraft aber das Volumen eines Feldraumes ändern kann (z. B. Zusammendrücken beweglicher Kondensatorplatten, Änderung des magnetischen Kreises einer Spule), ändern sich solche Energiespeicher zeitlich und spielen als zeitabhängige Netzwerkelemente eine Schlüsselrolle bei der elektrisch-mechanischen Energiewandlung.

Fundamental nutzen diese Energiewandlung Motoren in Rotations- und Linearausführung, Generatoren und Elektromagnete. Sie bestimmen heute den Alltag mit einem Massenmarkt für Kleinmotoren, aber auch die zu erwartende Elektromobilität unterstreicht ihre weiter steigende Bedeutung. Jeder PC enthält etliche Linear- und Rotationsmotoren, und im modernen Kraftfahrzeug verrichten viele Elektromotoren zuverlässig ihre Aufgaben. Angesichts dieses Wandels sucht der Lernende schon in der Grundausbildung nach einem Ansatz, der ihm rasch einen Überblick über typische Motorprinzipien vermittelt. Auch die immer weiter verbreitete Mechatronik als Zusammenführung von Komponenten der Mechanik, Elektrotechnik/Elektronik und Informationstechnik – und überhaupt die Mikrosystemtechnik – empfiehlt jedem aufgeschlossenen Elektrotechniker einen Blick zur Mechanik. Eine Brücke dazu bilden elektrische Netzwerke mit ihren ausgereiften Methoden. Es liegt nahe, deren Grundgedanken durch Analogiebetrachtungen auf andere physikalische Teilgebiete auszudehnen und zum Begriff physikalischer Netzwerke auszuformen. Gerade in der Elektrotechnik hat die Methode Tradition (ihr Ursprung reicht ins Jahr 1944 zurück) und man findet sie heute in der Mechanik, der Wärmelehre, Akustik und Fluidik. Solche Analogien fördern nicht nur das Verständnis, sondern schränken auch den Stoffumfang ein. Die Klammer zwischen elektrischen und nichtelektrischen Teilgebieten bilden Wandler. Deshalb lässt sich die Kraftwirkung elektromagnetischer Felder auf Netzwerkelemente und deren zeitabhängiges Verhalten durch Wandler als verbindende Klammer überzeugend modellieren. Da eine Energieform stets von zwei Größen bestimmt wird, z.B. die mechanische von Kraft und Weg, die elektrische von Spannung und Ladung, muss bei der Energiewandlung eine Größenzuordnung mittels der Analogie erfolgen; beispielsweise können sich Kraft und Strom entsprechen. Analogien werden in Teilbereichen der Elektrotechnik schon lange erfolgreich eingesetzt. Es bot sich für die Aufnahme dieser

Aspekte in ein Grundlagenlehrbuch an, den Rat ausgewiesener Fachkollegen zu suchen. Zu besonderem Dank sind wir deshalb den Herren Prof. Dr.-Ing. habil. A. Lenk (TU Dresden), Prof. Dr.-Ing. habil. G. Pfeiffer (TU Dresden), Prof. Dr.-Ing. habil. G. Gerlach (TU Dresden), Dr.-Ing. habil. P. Schwarz (Fraunhofer-Gesellschaft IIS Dresden) und Prof. Dr.-Ing. habil. J. Mehner (TU Chemnitz) verpflichtet, nicht nur für die bereitwillige Diskussion dieses Themas, sondern auch für manche Anregung.

Die für das gesamte Lehrbuch bereits im Band 1 formulierten didaktischen Zielsetzungen gelten auch uneingeschränkt für diesen Band, ebenso wie die Studienmethodik und der angesprochene Leserkreis.

**Dank** Wie schon bei Band 1 entsprang die Motivation zu diesem Band der Erkenntnis, dass die Grundlagen eines Fachgebietes nie abgeschlossen sind, sondern weiterentwickelt werden müssen. Dies belegen viele Diskussionen mit Fachkollegen sowie Rückmeldungen von Studierenden und Lesern.

Bei der Bearbeitung des Manuskripts hat Herr Dr.-Ing. sc.techn. H.-G. Schulz mit einer Reihe von Vorschlägen aus seiner langjährigen Tätigkeit als Lehrender des Fachgebietes Theoretische Elektrotechnik (TU Dresden) beigetragen. Ihm gilt unser ganz persönlicher und herzlicher Dank.

Dem Springer-Verlag, insbesondere Frau E. Hestermann-Beyerle, danken wir für die gute Zusammenarbeit, die sorgfältige Drucklegung des Buches sowie dafür, dass unseren Wünschen weitgehend entsprochen worden ist.

Über die Jahre gingen von vielen Kollegen und Lesern viele Hinweise und Anregungen ein, die in die Neubearbeitung eingeflossen sind. Unzulänglichkeiten bleiben natürlich nicht aus und wir sind stets für Anregungen, Hinweise auf Fehler und Verbesserungen dankbar ([steffen.paul@me.uni-bremen.de](mailto:steffen.paul@me.uni-bremen.de), [paul@tu-harburg.de](mailto:paul@tu-harburg.de)).

Ein Grundlagenbuch Elektrotechnik für einen breiten Nutzerkreis zu schreiben ist immer eine Herausforderung: es soll einerseits den Leser in seiner Studienwahl bekräftigen, ein breites Fundament für das weitere Studium legen, die Kenntnisse aus Mathematik und Physik aufgreifen und ihn schließlich auf die Vielfalt der Elektrotechnik neugierig machen. Die Autoren hoffen, dass das Buch diesem Anspruch gerecht wird.

Bremen,  
Herbst 2011

*Steffen Paul*

Buchholz,  
Herbst 2011

*Reinhold Paul*

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Das elektrische Feld</b> .....	<b>1</b>
1.1	Felder .....	3
1.1.1	Feldbegriffe.....	4
1.1.2	Merkmale elektrischer und magnetischer Felder .....	12
1.2	Elektrische Feldstärke, Potenzial und Spannung .....	15
1.2.1	Potenzial und Feldstärke .....	16
1.2.2	Potenzialüberlagerung .....	27
1.2.3	Potenzial und Spannung .....	30
1.3	Das stationäre elektrische Strömungsfeld .....	33
1.3.1	Stromdichte, Strom, Kontinuitätsgleichung .....	35
1.3.2	Stromdichte und Feldstärke.....	44
1.3.3	Das Strömungsfeld im Raum und an Grenzflächen.....	46
1.3.3.1	Strömungsfelder wichtiger Leiteranordnungen.....	47
1.3.3.2	Bestimmung des Feldbildes .....	55
1.3.3.3	Verhalten an Grenzflächen .....	58
1.3.4	Die Integralgrößen des Strömungsfeldes.....	61
1.3.4.1	Widerstand .....	61
1.3.4.2	Widerstandsberechnung über die Verlustleistung .....	66
1.3.4.3	Strömungsfeld und Gleichstromkreis .....	66
1.3.5	Leitungsmechanismen im Strömungsfeld .....	70
1.3.5.1	Leitungsvorgänge in Leitern und Halbleitern .....	71
1.3.5.2	Stromleitung in Flüssigkeiten, elektrochemische Spannungsquellen.....	77
1.3.5.3	Stromleitung im Vakuum und Gasen.....	89
<b>2</b>	<b>Das elektrostatische Feld, elektrische Erscheinungen in Nichtleitern</b> .....	<b>99</b>
2.1	Feldstärke- und Potenzialfeld .....	101
2.2	Verschiebungsflussdichte .....	105
2.3	Verschiebungsflussdichte und Feldstärke .....	115
2.4	Eigenschaften an Grenzflächen .....	120
2.5	Berechnung und Eigenschaften elektrostatischer Felder ..	128
2.5.1	Feldberechnung.....	128
2.5.2	Quellencharakter des elektrostatischen Feldes.....	131
2.5.3	MOS-Feldeffekttransistor.....	137
2.6	Die Integralgrößen des elektrostatischen Feldes.....	140
2.6.1	Verschiebungsfluss .....	140
2.6.2	Kapazität $C$ .....	142
2.6.3	Analogie zwischen Strömungs- und elektrostatischem Feld	149
2.6.4	Kapazität von Mehrleitersystemen, Teilkapazität* .....	150



2.7	Elektrisches Feld bei zeitveränderlicher Spannung.....	153
2.7.1	Strom-Spannungs-Relation des Kondensators .....	153
2.7.2	Verschiebungsstrom, Verschiebungsstromdichte, Kontinuitätsgleichung .....	157
2.7.3	Kondensator im Stromkreis .....	163
2.7.4	Allgemeine kapazitive Zweipole .....	170
2.7.5	Der Kondensator als Bauelement .....	175
<b>3</b>	<b>Das magnetische Feld</b> .....	<b>185</b>
3.1	Die vektoriellen Größen des magnetischen Feldes .....	188
3.1.1	Die magnetische Flussdichte .....	188
3.1.2	Die magnetische Feldstärke .....	200
3.1.3	Berechnung der magnetischen Feldstärke .....	213
3.1.4	Haupteigenschaften des magnetischen Feldes .....	224
3.1.5	Magnetische Flussdichte und Feldstärke in Materialien ..	225
3.1.6	Eigenschaften an Grenzflächen .....	232
3.2	Die Integralgrößen des magnetischen Feldes.....	236
3.2.1	Magnetischer Fluss .....	236
3.2.2	Magnetische Spannung, magnetisches Potenzial .....	241
3.2.3	Magnetischer Kreis, Analogie zum elektrischen Kreis.....	253
3.2.4	Dauermagnetkreis.....	265
3.2.5	Verkopplung zwischen magnetischem Fluss und Strom ..	270
3.2.5.1	Selbstinduktivität .....	271
3.2.5.2	Gegeninduktivität .....	278
3.2.6	Magnetische Energie in Spulen.....	291
3.3	Induktionsgesetz: Verkopplung magnetischer und elektrischer Felder .....	292
3.3.1	Induktion als Gesamterscheinung .....	292
3.3.2	Ruheinduktion .....	307
3.3.2.1	Induktionsgesetz für Ruheinduktion .....	307
3.3.2.2	Anwendungen der Ruheinduktion .....	314
3.3.3	Bewegungsinduktion.....	322
3.3.3.1	Induktionsgesetz für Bewegungsinduktion.....	322
3.3.3.2	Anwendungen der Bewegungsinduktion .....	331
3.3.4	Vollständiges Induktionsgesetz, Zusammenfassung.....	348
3.4	Verkopplung elektrischer und magnetischer Größen .....	352
3.4.1	Selbstinduktion .....	353
3.4.1.1	Lineare Induktivität und ihre Eigenschaften .....	353
3.4.1.2	Induktivität im Stromkreis .....	357
3.4.1.3	Allgemeine induktive Zweipole, Spule als Netzwerkelement.....	364

3.4.2	Gegeninduktion.....	368
3.4.3	Transformator .....	376
3.5	Rück- und Ausblick zum elektromagnetischen Feld .....	390
<b>4</b>	<b>Energie und Leistung</b>	
	<b>elektromagnetischer Erscheinungen .....</b>	<b>401</b>
4.1	Energie und Leistung.....	404
4.1.1	Elektrische Energie, elektrische Leistung .....	408
4.1.2	Strömungsfeld .....	411
4.1.3	Elektrostatistisches Feld .....	413
4.1.3.1	Energieverhältnisse am zeitunabhängigen Kondensator ..	415
4.1.3.2	Energieverhältnisse am zeitabhängigen Kondensator.....	421
4.1.3.3	Merkmale der dielektrischen Energie .....	427
4.1.4	Magnetisches Feld .....	431
4.1.4.1	Energie und Ko-Energie des magnetischen Feldes .....	432
4.1.4.2	Energieverhältnisse der zeitabhängigen Induktivität.....	436
4.1.4.3	Merkmale der magnetischen Energie .....	438
4.2	Energieübertragung, Energiewandlung .....	445
4.2.1	Energieströmung .....	445
4.2.2	Energietransport Quelle-Verbraucher.....	453
4.2.3	Energiewandlung.....	455
4.3	Umformung elektrischer in mechanische Energie .....	459
4.3.1	Kräfte im elektrischen Feld .....	460
4.3.1.1	Kraftwirkung auf Ladungsträger .....	460
4.3.1.2	Kraft auf Grenzflächen.....	463
4.3.1.3	Wandlung elektrische-mechanische Energie.....	473
4.3.1.4	Beispiele und Anwendungen .....	483
4.3.2	Kräfte im magnetischen Feld .....	485
4.3.2.1	Kraft auf bewegte Ladungen .....	486
4.3.2.2	Kraft auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld .....	493
4.3.2.3	Kraft auf Grenzflächen.....	505
4.3.2.4	Kraft auf magnetische Dipole .....	522
<b>5</b>	<b>Elektromechanische Aktoren .....</b>	<b>531</b>
5.1	Elektromagnet.....	534
5.2	Elektromotor.....	535
5.2.1	Gleichstrommotor .....	538
5.2.2	Elektronikmotor .....	544
5.2.3	Drehfeldmotor .....	546
5.2.4	Wechselstrom-, Universalmotor .....	554
5.2.5	Schrittmotor .....	557
5.2.6	Linearmotor .....	559

<b>6</b>	<b>Analogien zwischen elektrischen und nichtelektrischen Systemen</b> .....	<b>567</b>
<b>6.1</b>	Physikalische Netzwerke .....	<b>569</b>
<b>6.1.1</b>	Verallgemeinerte Netzwerke.....	<b>570</b>
<b>6.1.2</b>	Wandlerelemente.....	<b>578</b>
<b>6.1.3</b>	Analyseverfahren .....	<b>589</b>
<b>6.2</b>	Mechanisch-elektrische Systeme .....	<b>590</b>
<b>6.2.1</b>	Modelle mechanischer Systeme .....	<b>590</b>
<b>6.2.2</b>	Elektrostatisch-mechanische Wandler .....	<b>593</b>
<b>6.2.3</b>	Magnetisch-mechanische Wandler .....	<b>602</b>
<b>6.2.3.1</b>	Elektromagnetische Wandler.....	<b>602</b>
<b>6.2.3.2</b>	Elektrodynamischer Wandler .....	<b>612</b>
<b>6.3</b>	Thermisch-elektrische Systeme.....	<b>618</b>
<b>6.3.1</b>	Elektrische Energie, Wärme.....	<b>618</b>
<b>6.3.2</b>	Elektrisch-thermische Analogie .....	<b>626</b>
<b>6.3.3</b>	Anwendungen des Wärmeumsatzes .....	<b>631</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>641</b>
<b>A.1</b>	Verzeichnis der wichtigsten Symbole.....	<b>643</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>647</b>
	<b>Index</b> .....	<b>649</b>