



Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik 2

Steffen Paul · Reinhold Paul

Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik 2

Elektromagnetische Felder und ihre
Anwendungen

2. Auflage

Steffen Paul
Institut für Theoretische Elektrotechnik und
Mikroelektronik (ITEM), Universität Bremen
FB 1 Physik und Elektrotechnik
Bremen, Deutschland

Reinhold Paul
TU Hamburg-Harburg Institut für
Nanoelektronik
Hamburg, Deutschland

ISBN 978-3-662-58220-6 ISBN 978-3-662-58221-3 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-58221-3>

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 GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2012, 2019

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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

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.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort zur 2. Auflage

Die vor einiger Zeit herausgebrachte Neubearbeitung des vorliegenden Lehrbuches war nicht nur dem Einbezug neuer Teilgebiete in der Grundausbildung der Elektrotechnik an Fachhochschulen und Universitäten geschuldet, sondern auch den Anforderungen, die die stärkere Modularisierung des Gesamtgebietes mit sich brachten. Auch die auto-didaktischen Anforderungen der heutigen Berufswelt flossen mit ein. Ergebnis war die tiefgreifende Neubearbeitung des gesamten Lehrstoffes. Geblieben ist dabei die Dreiteilung in Grundgrößen, Stromkreise und Gleichstromnetzwerke im ersten Band, in elektromagnetische Felder und ihre breiten Anwendungen, der zugehörigen Energie- und Leistungsaspekte sowie der Verknüpfung elektrischer und nichtelektrischer Systeme in diesem Band und schließlich der grundlegenden Aspekte dynamischer Netzwerke, einfacher Systemaspekte und der Transformationen im Folgeband.

Eine solche Neubearbeitung hinterlässt natürlicherweise noch verbesserungswürdige Stellen (und leider auch Fehler), die in dieser Neuauflage behoben wurden. Dazu gaben uns die Leser wertvolle Anregungen, Hinweise und Kommentare, für die wir ihnen hier herzlich danken. Wir freuen uns auch für diese Auflage auf Zuschriften und Anregungen (steffen.paul@me.uni-bremen.de). Darüber hinaus wurde der Bezug zur theoretischen Elektrotechnik verbessert, um den Übergang zu vertiefenden Folgevorlesungen zu verbessern.

Unser Dank gilt natürlich auch dem Springer-Verlag und insbesondere Frau E. Hestermann-Beyerle sowie Frau B. Kollmar-Thoni für die sehr gute Zusammenarbeit, aber auch für die Geduld in allen Phasen der Herausgabe dieses Buches.

Bremen
Buchholz
Herbst 2018

Steffen Paul
Reinhold Paul

Vorwort 1. Auflage

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 Unvollstabilem“. 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 Gauß'schem Satz) und Wirbelfeld (mit Zirkulation und erläuterten Stokes'schem 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 Transport, 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 diese 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 Größenordnung 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, 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
Buchholz
Herbst 2011

Steffen Paul
Reinhold Paul

Inhaltsverzeichnis

1	Das elektrische Feld	1
1.1	Felder	2
1.1.1	Feldbegriffe	2
1.1.2	Merkmale elektrischer und magnetischer Felder	13
1.1.3	Felder und Bauelemente	16
1.2	Elektrische Feldstärke, Potenzial und Spannung	19
1.2.1	Potenzial und elektrische Feldstärke	19
1.2.2	Potenzialüberlagerung	32
1.2.3	Potenzial und Spannung	36
1.3	Das stationäre elektrische Strömungsfeld	39
1.3.1	Stromdichte, Strom, Kontinuitätsgleichung	41
1.3.2	Stromdichte und Feldstärke	50
1.3.3	Das Strömungsfeld im Raum und an Grenzflächen	53
1.3.4	Die Integralgrößen des Strömungsfeldes	69
1.3.5	Leitungsmechanismen im Strömungsfeld	82
2	Das elektrostatische Feld, elektrische Erscheinungen in Nichtleitern	117
2.1	Feldstärke- und Potenzialfeld	118
2.2	Verschiebungsflussdichte	121
2.3	Verschiebungsflussdichte und Feldstärke	133
2.4	Eigenschaften an Grenzflächen	138
2.5	Berechnung und Eigenschaften elektrostatischer Felder	146
2.5.1	Feldberechnung	147
2.5.2	Quellencharakter des elektrostatischen Feldes	149
2.5.3	MOS-Feldeffekttransistor	156
2.6	Die Integralgrößen des elektrostatischen Feldes	159
2.6.1	Verschiebungsfluss	159
2.6.2	Kapazität C	161
2.6.3	Analogie zwischen Strömungs- und elektrostatischem Feld	168
2.6.4	Kapazität von Mehrleitersystemen, Teilkapazität*	169

2.7	Elektrisches Feld bei zeitveränderlicher Spannung	172
2.7.1	Strom-Spannungs-Relation des Kondensators	172
2.7.2	Verschiebungsstrom, Verschiebungsstromdichte, Kontinuitätsgleichung.	176
2.7.3	Kondensator im Stromkreis	184
2.7.4	Allgemeine kapazitive Zweipole	190
2.7.5	Der Kondensator als Bauelement.	196
3	Das magnetische Feld	203
3.1	Die vektoriellen Größen des magnetischen Feldes	204
3.1.1	Die magnetische Flussdichte	205
3.1.2	Die magnetische Feldstärke	216
3.1.3	Berechnung der magnetischen Feldstärke	229
3.1.4	Haupteigenschaften des magnetischen Feldes	240
3.1.5	Magnetische Flussdichte und Feldstärke in Materialien	241
3.1.6	Eigenschaften an Grenzflächen	248
3.2	Die Integralgrößen des magnetischen Feldes.	252
3.2.1	Magnetischer Fluss	253
3.2.2	Magnetische Spannung, magnetisches Potenzial.	259
3.2.3	Magnetischer Kreis, Analogie zum elektrischen Kreis	270
3.2.4	Dauermagnetkreis.	284
3.2.5	Verkopplung zwischen magnetischem Fluss und Strom	289
3.2.6	Magnetische Energie in Spulen	311
3.3	Induktionsgesetz: Verkopplung magnetischer zeitveränderlicher Felder und elektrischer Felder	312
3.3.1	Induktion als Gesamterscheinung	314
3.3.2	Ruheinduktion	327
3.3.3	Bewegungsinduktion	345
3.3.4	Vollständiges Induktionsgesetz, Zusammenfassung	373
3.4	Verkopplung elektrischer und magnetischer Größen.	377
3.4.1	Selbstinduktion.	379
3.4.2	Gegeninduktion	393
3.4.3	Transformator.	402
3.5	Rück- und Ausblick zum elektromagnetischen Feld	416
4	Energie und Leistung elektromagnetischer Erscheinungen	427
4.1	Energie und Leistung	428
4.1.1	Elektrische Energie, elektrische Leistung	432
4.1.2	Strömungsfeld	436
4.1.3	Elektrostatisches Feld.	438
4.1.4	Magnetisches Feld	457

4.2	Energieübertragung, Energiewandlung	471
4.2.1	Energieströmung	471
4.2.2	Energietransport Quelle-Verbraucher	479
4.2.3	Energiewandlung	482
4.3	Umformung elektrischer in mechanische Energie	486
4.3.1	Kräfte im elektrischen Feld	486
4.3.2	Kräfte im magnetischen Feld	512
5	Elektromechanische Aktoren	559
5.1	Elektromagnet	560
5.2	Elektromotor	561
5.2.1	Gleichstrommotor	563
5.2.2	Elektronikmotor	570
5.2.3	Drehfeldmotor	572
5.2.4	Wechselstrom-, Universalmotor	581
5.2.5	Schrittmotor	583
5.2.6	Linearmotor	585
6	Analogien zwischen elektrischen und nichtelektrischen Systemen	593
6.1	Physikalische Netzwerke	593
6.1.1	Verallgemeinerte Netzwerke	595
6.1.2	Wandlerelemente	602
6.1.3	Analyseverfahren	613
6.2	Mechanisch-elektrische Systeme	616
6.2.1	Modelle mechanischer Systeme	616
6.2.2	Elektrostatisch-mechanische Wandler	618
6.2.3	Magnetisch-mechanische Wandler	627
6.3	Thermisch-elektrische Systeme	642
6.3.1	Elektrische Energie, Wärme	643
6.3.2	Elektrisch-thermische Analogie	651
6.3.3	Anwendungen des Wärmeumsatzes	656
Anhang		665
Literatur		669
Sachverzeichnis		671