

Marlene Marinescu



Elektrische und magnetische Felder

Eine praxisorientierte
Einführung



Dritte Auflage



Springer Vieweg

Elektrische und magnetische Felder

Marlene Marinescu

Elektrische und magnetische Felder

Eine praxisorientierte Einführung

3., bearbeitete Auflage

 Springer

Prof. Dr. Marlene Marinescu
MAGTECH
Mailänder Str. 15
D-60598 Frankfurt am Main
magtech@t-online.de

ISBN 978-3-642-24219-9 e-ISBN 978-3-642-25794-0
DOI 10.1007/978-3-642-25794-0
Springer Heidelberg Dordrecht London New York

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1996, 2009, 2012

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

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.

Einbandentwurf: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort zur dritten Auflage

Die zweite Auflage dieses Buches fand viele interessierte und aufmerksame Leser, die einige Verbesserungen angeregt haben. Auch die Arbeit mit den Studenten lieferte mir Hinweise darauf, an welchen Stellen geringfügig geänderte Formulierungen oder graphische Darstellungen zum leichteren Verständnis des Stoffes beitragen können. Mit der vorliegenden, dritten Auflage hoffe ich, die Erwartungen und Wünsche der Leser erfüllt zu haben.

Hinweise auf eventuell verbliebene Fehler und weitere Verbesserungsvorschläge nehme ich dankbar entgegen.

Zum Buch gehören zusätzliche Aufgaben mit Lösungen, die sich für die Prüfungsvorbereitung als nützlich erwiesen haben. Diese findet man jetzt im Internet auf der Produktseite:

<http://www.springer.de/978-3-642-24219-9> .

Der Springer-Verlag bietet Dozenten die Möglichkeit an, die Abbildungen vom Buch für eigene Vorbereitungen ihrer Vorlesungen auf der o.g. Produktseite abzurufen.

Frankfurt,
Januar 2012

Marlene Marinescu

Vorwort zur zweiten Auflage

Dem vorliegenden Buch liegen eine jahrzehntelange Forschungs- und Entwicklungstätigkeit für die elektrotechnische Industrie und langjährig durchgeführte Vorlesungen über „Grundlagen der Elektrotechnik“, an den Fachhochschulen Wiesbaden und Frankfurt, zugrunde.

Das Buch eignet sich besonders als Lehrbuch für Studierende aller Bachelor-Studiengänge an Fachhochschulen, aber auch an Universitäten, mit Hauptfach Elektrotechnik. Auch in der Praxis stehenden Ingenieuren kann dieses Buch zum Auffrischen oder Vertiefen ihrer Grundkenntnisse helfen.

Die Zusammenarbeit mit der Industrie auf vielen Gebieten der Elektrotechnik zeigte mir, wie wichtig die Kenntnis der Grundlagen für alle in der Praxis vorkommenden Aufgaben ist. Die moderne Entwicklung der Elektrotechnik mit ihren verschiedenen Richtungen erfordert heute von dem Elektroingenieur ein langlebiges, aber auch anwendungsorientiertes Grundlagenwissen, das allein ihm, unabhängig von der gewählten Spezialisierung, den Zugang zu den neuen Entwicklungen verschaffen kann. Nur mit dem soliden Fundament des Grundlagenwissens hat man heute eine Chance, mit der sehr schnellen Entwicklung Schritt zu halten.

Bei der Beantwortung von Fragen der industriellen Praxis musste ich oft an einen Satz von Ludwig Boltzmann denken, der mir heute immer noch aktuell erscheint:

„Fast wäre man versucht zu behaupten, dass, ganz abgesehen von ihrer geistigen Mission, die Theorie auch noch das denkbar Praktischste, gewissermaßen die Quintessenz der Praxis, sei“.

(„Über die Bedeutung von Theorien“, Graz, 1890).

Meine Arbeit mit den Studenten zeigte mir auf der anderen Seite, wie schwierig es ist, die Gesetzmäßigkeiten der abstrakten elektrischen und magnetischen Felder zu verstehen. Diese Erkenntnis motivierte mich dazu, dieses Buch zu schreiben, das in erster Linie das Ziel verfolgt, das Grundwissen über die elektrischen und magnetischen Felder so klar und anschaulich wie möglich zu vermitteln.

Um diese Zielsetzung zu realisieren, steht heute ein Instrument zur Verfügung, das vor drei Jahrzehnten nicht existierte. Die in diesem Zeitraum entwickelten numerischen Rechenverfahren, zusammen mit der rasanten Entwicklung leistungsfähiger Computer, führten dazu, dass man heute praktisch jedes Feldproblem numerisch lösen kann.

Mit entsprechenden Zeichenprogrammen kann man Feldbilder der berechneten Felder erstellen. Somit kann man heute die unsichtbaren elektrischen und magnetischen Felder auch in komplizierten Anordnungen sichtbar machen, was einen unschätzbaren Beitrag zu ihrem Verständnis leisten kann. Das vorliegende Buch setzt dieses graphische Darstellungsmittel sehr oft ein und unterscheidet sich dadurch von anderen Lehrbüchern auf diesem Gebiet.

Alle Feldbilder wurden erstellt mit dem Finite-Elemente-Programm MANI, das von meinem Mann, *Prof. Dr. Nicolae Marinescu*, in den 1980er Jahren entwickelt und seit damals in unserer Firma MAGTECH zur Entwicklung und Optimierung von Magnetsystemen eingesetzt wurde.

Zur Erleichterung des Verständnisses wird in diesem Buch das elektromagnetische Feld in seinen Bestandteilen getrennt betrachtet: Elektrostatik (Kapitel 1), stationäre Strömungsfelder (Kapitel 2), stationäre Magnetfelder (Kapitel 3) und zeitlich veränderliche Magnetfelder (Kapitel 4). Im Anhang befinden sich einige Auskünfte über das Finite-Elemente-Verfahren und Hinweise zur Interpretation der Feldbilder.

Jedes Kapitel fängt an mit der Darstellung der experimentellen Beobachtungsbefunde: ausgehend von den Kraftwirkungen zwischen ruhenden elektrischen Ladungen wird das *elektrostatische Feld* eingeführt; bewegliche Ladungen in Leitern erzeugen das *stationäre elektrische Feld*; die Kraft zwischen stromdurchflossenen Leitern führt zu dem Begriff *magnetisches Feld*; schließlich versteht man aus den Experimenten von Faraday wie man mit *zeitlich veränderlichen Magnetfeldern* elektrische Energie erzeugen kann. Anschließend werden in jedem Kapitel Schritt für Schritt die Grund- und die Materialgesetze erläutert und besonders hervorgehoben, damit der Leser leicht begreift, was er sich unbedingt merken sollte. Allgemeine Anwendungen der Gesetze werden, soweit mit einfachen mathematischen Mitteln möglich, ausführlich besprochen. Jedes Kapitel enthält außerdem eine große Anzahl von Beispielen, viele davon mit direktem Praxisbezug, mit deren Hilfe der Leser lernen kann, wie man die Gesetze anwendet, um praktische Aufgaben zu lösen. Für die 38 „Beispiele“ und die 9 „Anwendungen“ wurde ein Grauraster verwendet, sodass der Leser sie leicht finden kann.

Zusätzliche Aufgaben mit ausführlichen Lösungen findet man im Internet unter:

<http://www.springer.de/978-3-540-89696-8> .

Das Buch führt den Leser bis zu den Maxwell'schen Gleichungen, die alle elektromagnetischen Erscheinungen umfassen und eindeutig bestimmen. Diese Differentialgleichungen werden hier nur in ihrer Integralform angegeben, die sich als vollkommen ausreichend erwies.

Die Mathematik ist die Form, in der man das Verständnis der Gesetze der elektrischen und magnetischen Felder ausdrückt; ohne sie kann man die physikalischen Erkenntnisse über die Felder nicht quantitativ formulieren. Deswegen soll der Leser mathematische Vorkenntnisse mitbringen: Die elementare Mathematik bis hin zu den Grundzügen der Vektoralgebra und der Differential- und Integralrechnung sollen ihm vertraut sein.

Ein Lehrbuch über die Grundlagen der Elektrotechnik, die in der Literatur in vielen Büchern auf den unterschiedlichsten Ebenen behandelt wurden, kann nicht völlig neu sein. Die Quellen, aus denen dieses Buch schöpft, sind im Literaturverzeichnis angeführt; dort findet der Leser auch andere Werke, die ihm zum Verständnis und zu seiner Fortbildung helfen können.

Mein besonders herzlicher Dank gilt meinem ehemaligen Studenten in Frankfurt, Herrn cand.el. *Andreas Kopp*, der alle Bilder am Computer erstellt hat. Ohne seinen begeisterten Einsatz, seine Geduld und seine Kreativität wäre dieses Buch nicht in der vorliegenden Form erschienen.

Zum Schluss noch ein Zitat aus Arthur Schopenhauer, aus dem Jahre 1851: *„Es wäre eine schöne Sache, wenn man Das, was man gelernt hat, nun Ein für alle Mal und auf immer wüßte; allein dem ist anders: jedes Erlernte muß von Zeit zu Zeit durch Wiederholung aufgefrischt werden; sonst wird es allmählig vergessen. Da nun aber die bloße Wiederholung langweilt, muß man immer noch etwas hinzulernen: daher entweder Fortschritt oder Rückschritt“.*

Frankfurt,
April 2009

Marlene Marinescu

Inhaltsverzeichnis

1	Elektrostatische Felder	1
1.1	Wesen des elektrostatischen Feldes	5
1.1.1	Elektrische Ladung	5
1.1.2	Elektrostatisches Feld	6
1.1.3	Grundlegende Beobachtungsbefunde: Das Coulomb- sche Gesetz	8
1.1.4	Die elektrische Feldstärke \vec{E}	11
1.2	Verhalten der Leiter im elektrostatischen Feld	15
1.3	Elektrische Spannung und Potential	18
1.3.1	Arbeit und elektrische Spannung	18
1.3.2	Wegunabhängigkeit der elektrostatischen Spannung	19
1.3.3	Das elektrische Potential φ	22
1.4	Die Erregung des elektrostatischen Feldes	26
1.4.1	Die elektrische Verschiebungsflussdichte \vec{D}	26
1.4.2	Der Gaußsche Satz der Elektrostatik	27
1.4.3	Das Materialgesetz der Elektrostatik	29
1.5	Feldstärke und Potential spezieller Ladungsverteilun- gen	31
1.5.1	Feldstärke und Potential einer Punktladung	32
1.5.2	Feldstärke und Potential einer gleichmäßig geladenen (Metall-) Kugel	33
1.5.3	Feldstärke einer weit ausgedehnten Metallebene	35
1.5.4	Feldstärke von zwei parallelen, geladenen Platten ...	37
1.5.5	Feldstärke und Potential einer Linienladung	38
1.6	Zusammenfassung der Grundgesetze der Elektrosta- tik	41
1.6.1	Allgemeine Gesetze	41
1.6.2	Materialgesetze	42
1.6.3	Bedingungen an Grenzflächen	43
1.7	Die Kapazität	47
1.7.1	Definition der Kapazität, technische Anwendungen .	47
1.7.2	Parallel- und Reihenschaltungen von Kapazitäten ..	49
1.7.3	Die Kapazität spezieller Anordnungen	53
1.7.4	Zusammenfassung der meist angewendeten Kapazi- täten	77
1.8	Energie und Kräfte im elektrostatischen Feld	80
1.8.1	Elektrische Energie und Energiedichte	80

1.8.2	Kräfte im elektrostatischen Feld, Prinzip der virtuellen Verschiebung	83
1.8.3	Kräfte auf freie Ladungen; Strahlablenkung	86
2	Stationäre elektrische Felder	91
2.1	Wesen des elektrischen Strömungsfeldes	93
2.2	Die Grundgesetze des elektrischen Strömungsfeldes	95
2.2.1	Die elektrische Stromdichte \vec{S} , Kontinuität	95
2.2.2	Wegunabhängigkeit der elektrischen Spannung U ...	98
2.2.3	Das Materialgesetz der Strömungsfelder	99
2.2.4	Das Gesetz über die Energiewandlung in Leitern	102
2.2.5	Zusammenfassung; Analogie mit der Elektrostatik ..	103
2.3	Widerstandsberechnung bei inhomogenen Feldern ..	104
2.3.1	Unterschiedliche Querschnitte der Stromfäden	104
2.3.2	Länge der Stromfäden oder κ unterschiedlich	106
2.4	Berechnung elektrischer Strömungsfelder	109
2.4.1	Homogene Felder	109
2.4.2	Inhomogenes Zylinderfeld	111
2.4.3	Inhomogenes Kugelfeld	118
2.4.4	Allgemeiner Lösungsweg	123
3	Stationäre Magnetfelder	125
3.1	Wesen des Magnetfeldes	127
3.1.1	Ursachen: Dauermagnete, Ströme	127
3.1.2	Grundlegende Beobachtungsbefunde: Kräfte zwischen parallelen Leitern	128
3.2	Magnetfeld von Leitern in der Luft	149
3.2.1	Die Experimente von Biot und Savart	149
3.2.2	Die Formel von Biot und Savart	151
3.2.3	Gültigkeitsbereich der Biot–Savartschen Formel	152
3.2.4	Magnetfelder spezieller Leiteranordnungen	153
3.3	Das Durchflutungsgesetz	173
3.3.1	Das Gesetz; magnetische Spannung, Durchflutung ..	173
3.3.2	Anwendung des Durchflutungsgesetzes	178
3.3.3	Erweitertes Durchflutungsgesetz	188
3.4	Der magnetische Fluss; Kontinuität des Flusses	190
3.4.1	Der Gaußsche Satz des Magnetfeldes	190
3.5	Das magnetische Verhalten materieller Körper	196
3.5.1	Das Materialgesetz	196

3.5.2	Klassifizierung	197
3.5.3	Magnetisierungskennlinie, Hysteresekurve	197
3.5.4	Diskussion über die Sättigung	200
3.6	Zusammenfassung der Grundgesetze der stationären Magnetfelder	201
3.6.1	Allgemeine Gesetze und Materialgesetz	201
3.6.2	Bedingungen an Grenzflächen	202
3.7	Der magnetische Kreis	206
3.7.1	Definition und Klassifizierung	206
3.7.2	Einige technische Anwendungen der Magnetkreise ..	207
3.7.3	Berechnungsmethoden für lineare Magnetkreise	215
3.7.4	Magnetkreise mit Dauermagneten	226
3.7.5	Nichtlineare Magnetkreise	238
3.7.6	Kräfte auf hochpermeable Eisenflächen	243
3.7.7	Die Rolle ferromagnetischer Teile bei der Entstehung der Magnetkraft	247
4	Zeitlich veränderliche magnetische Felder	259
4.1	Induktionswirkung und Induktionsgesetz	261
4.1.1	Die Experimente von Faraday	261
4.1.2	Lenzsche Regel	264
4.1.3	Kraft auf bewegte Ladungen im Magnetfeld	265
4.1.4	Das Induktionsgesetz in einfacher Form	267
4.1.5	Andere Formen des Induktionsgesetzes	272
4.1.6	Die Maxwellschen Gleichungen	273
4.1.7	Wie wendet man das Induktionsgesetz an? Beispiele	274
4.2	Induktivitäten	289
4.2.1	Selbstinduktion; Induktivität	289
4.2.2	Induktivität spezieller Anordnungen	291
4.2.3	Gegeninduktivität magnetisch gekoppelter Spulen ..	298
4.3	Energie und Kräfte im Magnetfeld	306
4.3.1	Magnetische Energie und Energiedichte	306
4.3.2	Berechnung von Kräften über die Magnetenergie ...	309
4.3.3	Zusammenfassung aller Kraftwirkungen im Magnet- feld	309
A	Nummerische Methoden zur Feldberechnung ..	317
A.1	Rechenmethoden für Magnetfelder, Überblick	319
A.1.1	Analytische Methoden	319

A.1.2	Halb-empirische Methoden	320
A.1.3	Numerische Verfahren.....	320
A.2	Finite-Elemente-Methode zur Berechnung von Magnetfeldern	321
A.2.1	Kurze Beschreibung, Vergleich	321
A.2.2	Diskretisierung, Auslegung des Gitternetzes	324
A.2.3	Berücksichtigung von Nichtlinearitäten	324
A.2.4	Was kann man von einem FE-Programm noch erwarten?	325
A.3	Aufstellung eines Rechenmodells	326
A.4	Worauf soll der Anwender besonders achten?	328
A.5	Besonderheiten der Feldbilder	330
	Literaturverzeichnis	335
	Index	339

Kapitel 1

Elektrostatische Felder

1

1

1	Elektrostatische Felder	5
1.1	Wesen des elektrostatischen Feldes	5
1.1.1	Elektrische Ladung	5
1.1.2	Elektrostatisches Feld	6
1.1.3	Grundlegende Beobachtungsbefunde: Das Coulomb- sche Gesetz	8
1.1.4	Die elektrische Feldstärke \vec{E}	11
1.2	Verhalten der Leiter im elektrostatischen Feld	15
1.3	Elektrische Spannung und Potential	18
1.3.1	Arbeit und elektrische Spannung	18
1.3.2	Wegunabhängigkeit der elektrostatischen Spannung	19
1.3.3	Das elektrische Potential φ	22
1.4	Die Erregung des elektrostatischen Feldes	26
1.4.1	Die elektrische Verschiebungsflussdichte \vec{D}	26
1.4.2	Der Gaußsche Satz der Elektrostatik	27
1.4.3	Das Materialgesetz der Elektrostatik	29
1.5	Feldstärke und Potential spezieller Ladungsverteilun- gen	31
1.5.1	Feldstärke und Potential einer Punktladung	32
1.5.2	Feldstärke und Potential einer gleichmäßig geladenen (Metall-) Kugel	33
1.5.3	Feldstärke einer weit ausgedehnten Metallebene	35
1.5.4	Feldstärke von zwei parallelen, geladenen Platten ...	37
1.5.5	Feldstärke und Potential einer Linienladung	38
1.6	Zusammenfassung der Grundgesetze der Elektrosta- tik	41
1.6.1	Allgemeine Gesetze	41
1.6.2	Materialgesetze	42
1.6.3	Bedingungen an Grenzflächen	43
1.7	Die Kapazität	47
1.7.1	Definition der Kapazität, technische Anwendungen .	47
1.7.2	Parallel- und Reihenschaltungen von Kapazitäten ..	49
1.7.3	Die Kapazität spezieller Anordnungen	53
1.7.4	Zusammenfassung der meist angewendeten Kapazi- täten	77
1.8	Energie und Kräfte im elektrostatischen Feld	80
1.8.1	Elektrische Energie und Energiedichte	80

1.8.2	Kräfte im elektrostatischen Feld, Prinzip der virtuellen Verschiebung	83
1.8.3	Kräfte auf freie Ladungen; Strahlablenkung	86