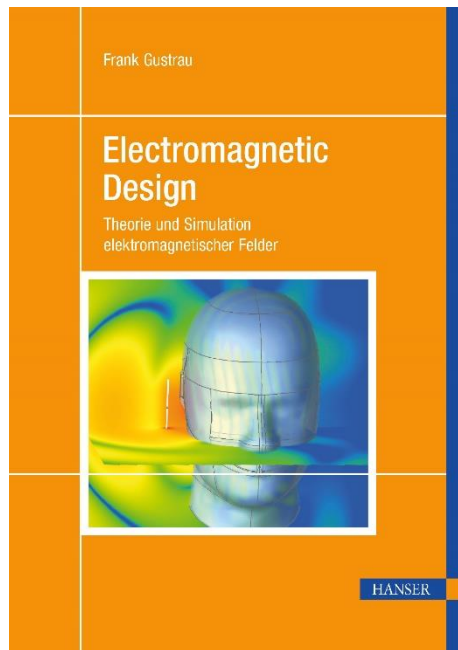


HANSER



Leseprobe

zu

Electromagnetic Design

von Frank Gustrau

Print-ISBN: 978-3-446-47418-5

E-Book-ISBN: 978-3-446-47724-7

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446474185>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort

Die Theorie elektromagnetischer Felder ist seit jeher wesentlicher Bestandteil ingenieurwissenschaftlicher Studiengänge im Bereich der Elektro- und Informationstechnik und fest in den Curricula verankert. Das Fach verbindet physikalische Grundlagen mit modernen Anwendungsfeldern.

Im Grundlagenbereich werden Lehrveranstaltungen wie die *Elektromagnetische Feldtheorie* und im weiteren Studienverlauf die Fortführung und Vertiefung des Themas als *Theoretische Elektrotechnik* von Studierenden häufig als schwierige Fächer angesehen, weil sie intensiv auf mathematische Zusammenhänge aus den Bereichen Vektoranalysis sowie Differential- und Integralrechnung zurückgreifen und gleichermaßen abstraktes wie räumliches Denken fordern. Die ernsthafte Auseinandersetzung mit diesen physikalischen Grundlagen ist allerdings von großem und dauerhaften Nutzen. Einerseits verankert es die vereinfachenden Modelle der Netzwerkanalyse in der komplexeren physikalischen Betrachtung und hält damit den Modellcharakter und die Grenzen der Methoden bewusst. Andererseits ist der komplexe Ansatz unumgänglich, wenn es darum geht, moderne technische Entwicklungen in der Informations- und Elektrotechnik zu verstehen und mitzugestalten.

Wesentliche Themenbereiche wie die *Hochfrequenztechnik* mit ihren räumlich ausgedehnten Wellenleiterstrukturen und Antennen, sowie der Bereich der *Elektromagnetischen Verträglichkeit* (EMV), der sich mit parasitären Kopplungen sowie Störaussendungen und Störeinkopplungen beschäftigt, sind ohne feldtheoretisches Verständnis seit jeher undenkbar.

In anderen Bereichen ist die Feldsimulation weniger etabliert. War zum Beispiel bis vor kurzem der Entwurf von elektronischen Schaltungen noch mit Schaltplänen für die Funktionalität und dem Leiterplatten-Layout mit Designregeln für die Herstellung zu bewerkstelligen, so ist aufgrund der steigenden Packungsdichten und der sich immer weiter erhöhenden Taktraten digitaler Schaltungen die konkrete Umsetzung oft nur mit feldtheoretischen Betrachtungen und Optimierungen des Layouts zu beherrschen.

Um den gestiegenen Anforderungen beim Entwurf von Komponenten, Schaltungen und Systemen zu begegnen, stehen mittlerweile umfangreiche und anwendungsfreundliche Softwarewerkzeuge zur Verfügung, die sehr unterschiedliche methodische Ansätze unter einer Oberfläche vereinen. Die *elektromagnetische Co-Simulation* bringt dabei Schaltungssimulation und Feldsimulation zusammen. Kritische Subsysteme können genauer mit einem Feldsimulator untersucht und weniger kritische Schaltungsteile mit dem klassischen Schaltungssimulator berechnet werden. Schaltungsentwicklerinnen und Schaltungsentwickler müssen also zunehmend darauf eingestellt sein, elektromagnetische Feldsimulationen durchzuführen.

Das vorliegende Buch erlaubt Studierenden den Einstieg in das Themengebiet der elektromagnetischen Feldtheorie und der computergestützten 3D-EM-Simulation. Dreh- und Angelpunkt für die analytischen Betrachtungen sind die *Maxwell'schen Gleichungen* in Differential- und Integralform. Dabei wird auf Anschaulichkeit und mathematische Berechenbarkeit gleichermaßen geachtet. Analytische Berechnungen und numerische Beispiele in den einzelnen Kapiteln vertiefen das Verständnis und verknüpfen Theorie und praktische Anwendung.

Die analytischen Betrachtungen in den einzelnen Kapiteln zur Feldtheorie werden mit numerischen Berechnungen verglichen. Die EM-Simulationen in diesem Buch führen wir dazu mit modernen kommerziellen Simulationswerkzeugen durch, wie sie auch in der täglichen Ingenieurspraxis verwendet werden. Am Ende des Buches schauen wir noch auf einige komplexere Anwendungsbeispiele aus den Bereichen Medizintechnik, Kommunikationstechnik und elektromagnetische Verträglichkeit.

Dieses Buch enthält selbst keine Übungsaufgaben für Studierende. Zur Vertiefung der Lehrinhalte sind eigene praktische Erfahrungen aber sehr wichtig. An den Hochschulen geschieht dies vor allem in Form von Praktikumsversuchen und seminaristischen Veranstaltungen, die zu einem ersten Hands-On an Simulationswerkzeuge einladen. Der praktische Umgang wird dann vertieft in Projekt- und Abschlussarbeiten, wo umfangreichere Arbeiten auf der Höhe aktueller wissenschaftlicher Themen realisiert werden können. Hier werden dann die Möglichkeiten, aber auch die Beschränkungen, sichtbar. So gelingt schließlich der fachkundige und souveräne Umgang mit diesen modernen Softwarewerkzeugen.

Das vorliegende Buch basiert in großen Teilen auf dem im Jahr 2018 im Hanser-Verlag verlegten Werk *Angewandte Feldtheorie* mit dem Untertitel *Eine praxisnahe Einführung in die Theorie elektromagnetische Felder*. Mit diesem neuen Buch – erkennbar am Titel *Electromagnetic Design* – ist eine inhaltliche Neuausrichtung verbunden. Die 3D-EM-Simulation als Werkzeug zum praktischen Entwurf neuer technischer Komponenten und Systeme wird nun stärker in den Fokus gerückt. Entsprechend sind diese Themenbereiche im Buch erweitert und komplett neu gestaltet. Die grundlegende Theorie der elektromagnetischen Felder bleibt aber nach wie vor wichtiges Element, da sie zum einen das fundamentale Verständnis für das eigene Tun liefert und zum anderen uns Beispiele für die Verifikation von EM-Simulationsmodellen an die Hand gibt.

An dieser Stelle bedanke ich mich bei allen Kolleginnen, Kollegen und Studierenden, die durch ihre Anregungen – sei es durch ihre Fragen in Lehrveranstaltungen, sei es durch fachliche Diskussionen – zu diesem Buch beigetragen haben.

Dortmund, im Frühjahr 2023

Frank Gustrau

Inhalt

1	Einleitung	15
1.1	Netzwerk- und Feldtheorie.....	15
1.2	Anwendungsfelder der EM-Simulation	18
1.3	Aufbau der nachfolgenden Kapitel.....	19
2	Theorie elektromagnetischer Felder	22
2.1	Physikalische Grundlagen.....	22
2.1.1	Elektrostatische Feldgrößen.....	22
2.1.1.1	Ladung und Coulomb-Kraft	22
2.1.1.2	Elektrische Feldstärke	23
2.1.1.3	Spannung und elektrisches Potential	25
2.1.1.4	Polarisation und relative Dielektrizitätszahl	29
2.1.1.5	Verhalten bei Wechselstrom	31
2.1.1.6	Dielektrische Verschiebungsdichte	32
2.1.1.7	Elektrische Feldenergie und Kapazität	32
2.1.2	Stationäre elektrische Strömungsfelder und magnetische Felder	33
2.1.2.1	Stromdichte, Leistungsdichte und Widerstand	33
2.1.2.2	Magnetische Feldstärke und magnetische Flussdichte	35
2.1.2.3	Magnetische Feldenergie und Induktivität	36
2.1.2.4	Lorentz-Kraft	37
2.1.3	Vektoranalytische Operatoren	37
2.1.3.1	Divergenz	38
2.1.3.2	Rotation	38
2.1.3.3	Quellen- und Wirbelfelder	39
2.1.3.4	Laplace-Operator	39
2.2	Maxwell'sche Gleichungen	42
2.2.1	Differentialform für allgemeine Zeitabhängigkeit	42
2.2.2	Differentialform für harmonische Zeitabhängigkeit.....	44
2.2.3	Integralform	45
2.2.4	Materialgleichungen	47

2.2.5	Verhalten an Materialgrenzen	48
2.2.6	Ladungserhaltung	49
2.3	Einteilung elektromagnetischer Feldprobleme	51
2.4	Statische Felder	52
2.4.1	Elektrostatische Felder	52
2.4.1.1	Poisson-Gleichung	52
2.4.1.2	Green'sche Funktion	53
2.4.2	Magnetostatische Felder	55
2.4.2.1	Magnetisches Vektorpotential	55
2.4.2.2	Biot-Savart'sches Gesetz	56
2.4.3	Statisches Strömungsfeld	60
2.5	Quasistatische Felder	60
2.6	Stromverdrängung (Skinneffekt)	63
2.6.1	Eindringtiefe	64
2.6.2	Äquivalente Leitschichtdicke	66
2.7	Elektromagnetische Wellen	69
2.7.1	Wellengleichung	69
2.7.2	Homogene ebene Wellen	70
2.7.3	Polarisationsrichtung	74
2.7.3.1	Lineare Polarisation	75
2.7.3.2	Zirkulare Polarisation	75
2.7.3.3	Elliptische Polarisation	75
2.7.4	Reflexion und Brechung an ebenen Grenzflächen	76
2.7.4.1	Senkrechter Einfall	76
2.7.4.2	Schräger Einfall	79
2.7.5	Kugelwellen	83
2.7.6	Wellen in verlustbehafteten Medien	85
2.8	Energieerhaltung	88
2.9	Elektromagnetische Potentiale	90
2.9.1	Potentiale und Feldgrößen	90
2.9.2	Lorenz-Eichung und Wellengleichungen	91
2.9.3	Harmonische Zeitabhängigkeit und Green'sche Funktion	92
2.10	Leistungsumsatz und Temperaturfelder	94
3	Numerische Berechnung elektromagnetischer Felder	97
3.1	Überblick	97
3.2	Methode der Finiten Differenzen im Zeitbereich (FDTD)	99

3.2.1	Maxwell'sche Gleichungen	99
3.2.2	Diskretisierung des Problems	100
3.2.3	Stabilität und Dispersion	105
3.2.4	Randbedingungen	106
3.2.5	Tore und Netzwerkgrößen	106
3.2.6	Zeitsignale	107
3.3	Methode der Finiten Elemente (FEM)	110
3.3.1	Variationsrechnung	110
3.3.2	Finite Elemente	110
3.3.3	Formfunktionen	111
3.3.4	Elementmatrix	113
3.3.5	Gesamtmatrix	114
3.3.6	Lösung des linearen Gleichungssystems	114
3.4	Momentenmethode (MoM)	115
3.4.1	Grundidee des Verfahrens	115
3.4.2	Linienförmige Leiter	116
3.4.3	Geschichtete Strukturen	118
3.5	Weitere Verfahren	120

4 Modellbildung und Simulation122

4.1	Modellbildung	122
4.2	EM-Simulationstools und Workflow	124
4.2.1	Prä-Prozessor	124
4.2.2	Numerischer Problemlöser (Solver)	125
4.2.3	Post-Prozessor	126
4.2.4	EM-Softwaretools	127
4.2.5	Parametervariation und Optimierung	127
4.3	Aufbau der Geometrie	128
4.3.1	Interaktive Geometrieingabe	128
4.3.2	Import von CAD-Daten	130
4.3.3	Overmodeling vermeiden	131
4.4	Materialeigenschaften	131
4.5	Anregungen und Tore	132
4.5.1	Konzentrierte Tore	132
4.5.2	Wellenleitertore	133
4.5.3	Feldanregungen	134
4.5.4	Anregungssignale	134
4.6	Randbedingungen	135

4.7	Diskretisierung und Ressourcenbedarf.....	137
4.7.1	Diskretisierung.....	137
4.7.2	Ressourcenbedarf.....	139
4.7.3	Konvergenzanalyse.....	142
4.8	Auswahl der numerischen Methode.....	145
4.8.1	Momentenmethode.....	145
4.8.2	Finite-Elemente-Methode.....	146
4.8.3	Methode der Finiten Differenzen im Zeitbereich.....	147
4.9	Nach der Simulation.....	148
4.10	Zusammenfassung.....	148

5 Statische magnetische Felder150

5.1	Langgestreckter Linienleiter.....	150
5.1.1	Berechnung mit dem Durchflutungsgesetz.....	151
5.1.2	EM-Simulation.....	152
5.2	Zweidrahtleitung.....	155
5.2.1	Anwendung des Superpositionsprinzips.....	156
5.2.2	EM-Simulation.....	158
5.3	Ringspule.....	161
5.3.1	Berechnung mit dem Biot-Savart'schen Gesetz.....	161
5.3.2	EM-Simulation.....	164
5.3.3	Helmholtzspule.....	166
5.4	Koaxiale Anordnung.....	170
5.4.1	Berechnung mit dem Durchflutungsgesetz.....	170
5.4.2	Rückrechnung auf die Ursachen des magnetischen Feldes.....	176
5.4.2.1	Berechnung der Quellendichte.....	176
5.4.2.2	Berechnung der Wirbeldichte.....	176
5.4.3	Berechnung der Induktivität.....	178
5.4.4	EM-Simulation.....	180
5.5	Langgestreckte Zylinderspule.....	183
5.5.1	Magnetisches Feld und Induktivität.....	183
5.5.2	EM-Simulation.....	185
5.5.3	Fazit.....	188

6 Statische elektrische Felder190

6.1	Plattenkondensator.....	190
6.1.1	Elektrisches Feld und Spannung.....	191
6.1.2	Kapazität als Systemgröße.....	192

6.1.3	Elektrische Feldenergie und Kapazität	193
6.1.4	Berechnung des elektrischen Strömungsfeldes	193
6.1.5	EM-Simulation mit der FDTD-Methode	194
6.1.5.1	Berechnung der Feldstärke und der Kapazität	196
6.1.5.2	Berechnung des Strömungsfeldes und des Widerstandes	198
6.1.5.3	Blick über den Tellerrand	200
6.1.6	EM-Simulation mit der Momentenmethode	202
6.1.7	EM-Simulation mit der Finite-Elemente-Methode	203
6.2	Koaxiale Anordnung	205
6.2.1	Elektrisches Feld und Spannung	206
6.2.2	Elektrische Feldenergie und Kapazität	208
6.2.3	Berechnung des elektrischen Strömungsfeldes im Leitermaterial	209
6.2.4	EM-Simulation	209
6.2.4.1	Berechnung der Kapazität	210
6.2.4.2	Berechnung des Ohm'schen Widerstandes	213

7 Magnetische Induktion214

7.1	Induktionsgesetz	214
7.2	Offene Leiterschleife neben einer Zweidrahtleitung	215
7.2.1	Berechnung der induzierten Spannung	216
7.2.2	EM-Simulation	217
7.2.2.1	Berechnung der magnetischen Feldstärke	217
7.2.2.2	Berechnung der induzierten Spannung	217
7.3	Wirbelströme in einem elektrisch leitfähigen Zylinder	220
7.3.1	Berechnung der induzierten Stromdichte	220
7.3.2	Umgesetzte Leistung und Erwärmung	221
7.3.3	EM-Simulation	223
7.3.3.1	Erzeugung eines homogenen magnetischen Feldes	223
7.3.3.2	Berechnung der Verteilung der Stromdichte	226

8 Skineneffekt und Wellenausbreitung228

8.1	Stromdichte im zylindrischen Leiter	228
8.1.1	Stromverdrängung (Skineneffekt) und Ohm'scher Widerstand	228
8.1.2	EM-Simulation	230
8.2	Proximity-Effekt in parallelen Leitern	232
8.2.1	Zwei parallele Leiter	233
8.2.1.1	Gleichsinnige Stromflussrichtung	233
8.2.1.2	Gegensinnige Stromflussrichtung	235

8.2.2	Leiterbündel	236
8.2.2.1	Parallele Speisung der Leiter	236
8.2.2.2	Einzelspeisung der Leiter	237
8.3	Wellenausbreitung im freien Raum	239
8.3.1	Homogene ebene Wellen, Kugel- und Zylinderwellen.....	239
8.3.2	Wellenausbreitungsphänomene.....	240
8.3.2.1	Reflexion und Brechung.....	240
8.3.2.2	Beugung	242
8.3.2.3	Absorption	243
8.3.2.4	Streuung.....	243
8.3.3	Darstellung der Wellenausbreitung anhand von Simulationen	245
8.3.3.1	Homogene ebene Welle (HEW)	245
8.3.3.2	Kugelwelle.....	245
8.3.3.3	Hindernis im Wellenfeld	248

9 Anwendungsbeispiele für EM-Simulationen250

9.1	Oberflächenspule für die Magnet-Resonanz-Tomographie	250
9.1.1	HF-Spulen in der Magnet-Resonanz-Tomographie	250
9.1.2	Güten von Spulen.....	251
9.1.3	Güten von Resonanzkreisen	252
9.1.4	EM-Simulationen zur Güteberechnung	252
9.1.4.1	Berechnung der Leerlauf-Güte der Spule	252
9.1.4.2	Berechnung der Last-Güte der Spule.....	255
9.1.4.3	Berechnung der Güte von Resonatoren	256
9.1.5	Zusammenfassung	261
9.2	Birdcage-Resonator für die Magnet-Resonanz-Tomographie.....	262
9.2.1	Grundlagen des Birdcage-Resonators	262
9.2.2	EM-Simulationen eines Birdcage-Resonators	264
9.2.2.1	FEM-Eigenmode-Analyse zur Berechnung der Schwingungsmoden	264
9.2.2.2	Anregung eines zirkular polarisierten Feldes (FEM)	266
9.2.2.3	Berechnung der spezifischen Absorptionsrate (FDTD).....	267
9.2.3	Zusammenfassung	270
9.3	Parasitäre Kopplung durch Resonanzen in einem metallischen Gehäuse.....	271
9.3.1	Theorie des Hohlraumresonators	271
9.3.2	EM-Simulationen der parasitären Kopplung zwischen Schaltungsteilen .	273

9.3.2.1	Schaltungen ohne Gehäuse im freien Raum	273
9.3.2.2	Schaltungen umgeben von einem metallischen Gehäuse	275
9.3.2.3	Schaltungen umgeben von einem metallischen Gehäuse mit Absorbermaterial	277
9.3.3	Zusammenfassung	279
9.4	Viertelwellen-Monopol	279
9.4.1	Antennen	279
9.4.1.1	Antennenkenngößen	279
9.4.1.2	Fußpunktimpedanz und Anpassung	282
9.4.1.3	Lineare Antennen	283
9.4.1.4	Monopolantenne	285
9.4.2	EM-Co-Simulation einer Monopolantenne	286
9.4.2.1	Feldverteilung und Impedanzverlauf der Monopolantenne	286
9.4.2.2	Anpasserschaltung	287
9.4.3	Zusammenfassung	291
9.5	Benutzereinfluss bei der Funkkommunikation	291
9.5.1	Elektromagnetische Felder im biologischen Gewebe	291
9.5.1.1	Biologische Wirkungen	291
9.5.1.2	Elektrische Eigenschaften von biologischem Gewebe	292
9.5.1.3	Personenschutz-Grenzwerte	292
9.5.2	EM-Simulation eines Dipols für 1800 MHz in der Nähe eines menschlichen Kopfes	293
9.5.2.1	Simulationsmodell	294
9.5.2.2	Feldverteilungen im Simulationsgebiet und normenkonforme Bewertung	294
9.5.3	Zusammenfassung	297
9.6	Gruppenantenne mit Patchelementen	297
9.6.1	Einzelne Patchantenne	298
9.6.1.1	Geometrie der Patchantenne	298
9.6.1.2	EM-Simulation	299
9.6.2	Gruppenantenne mit Beamforming	301
9.6.2.1	Phased-Array-Antennen	302
9.6.2.2	EM-Simulation	303
9.6.3	Zusammenfassung	304

A	Anhang	307
A.1	Mathematische Grundlagen	307
A.1.1	Ableitungsregeln	307
A.1.2	Ableitungen elementarer Funktionen	308
A.1.3	Vektoralgebra.....	309
A.1.4	Zusammenhänge aus der Vektoranalysis	311
A.2	Koordinatensysteme	312
A.2.1	Kartesisches Koordinatensystem	313
A.2.2	Zylinderkoordinatensystem	314
A.2.3	Kugelkoordinatensystem	315
	Formelzeichen und Abkürzungen	317
	Literatur	321
	Index	325

1

Einleitung

Die Theorie elektromagnetischer Felder ist eine der Grundsäulen der Elektro- und Informationstechnik. Sie beschreibt mathematisch die physikalischen Zusammenhänge zwischen den elektrischen und magnetischen Feldgrößen und ist notwendig, wenn man die Wirkungsweise technischer Komponenten, wie zum Beispiel elementarer Bauelemente, komplexer miniaturisierter Schaltungen oder unterschiedlicher Antennentypen, verstehen will.

Die elektromagnetische Feldtheorie knüpft dabei an grundlegende Begriffe der Mechanik wie Kraft, Arbeit und Leistung an. Zur detaillierten mathematischen Beschreibung werden dann elektrische und magnetische *Vektorfelder* eingeführt, die sich sehr gut veranschaulichen und damit verstehen und begreifen lassen. Der strenge mathematische Formalismus und die visuelle Darstellung und *Greifbarkeit* geben dem Fach eine gewisse Eleganz, der man sich kaum entziehen kann, wenn man einmal die ersten Verständnisschwierigkeiten überwunden hat, die jede neue Materie mit sich bringt.

Im Arbeitsalltag sind Ingenieurinnen und Ingenieure in der Regel eher Problemlösende als Wahrheitssuchende. Sie interessieren sich in der industriellen Praxis weniger für elegante analytische Verfahren als vielmehr für effiziente Werkzeuge und Hilfsmittel beim Entwurf. Was kann die elektromagnetische Feldtheorie also hier für die Fachleute in der Praxis tun? Moderne anwenderfreundliche Simulationsprogramme für elektromagnetische Felder erlauben es, praxisrelevante Strukturen numerisch mit Rechnerunterstützung zu entwerfen und zu analysieren. Es entstehen so numerische Modelle, die aufwendigere messtechnische Untersuchungen reduzieren können und damit die Entwurfsphase technischer Komponenten und Schaltungen vereinfachen und beschleunigen.

Ingenieurinnen und Ingenieure sind *visuell orientiert*, sie erfassen Zusammenhänge besonders schnell durch unterstützende Veranschaulichungen. Die elektromagnetische Feldtheorie bietet genau diese Anschauung durch die grafische Darstellung von Feldgrößen in Form von Feldlinienbildern oder Vektorplots. Moderne EM-Simulationsprogramme liefern somit einen Einblick in die Wirkungsweise von Schaltungsteilen und Komponenten. Hierdurch lässt sich oft unmittelbar erkennen, wo Probleme zu erwarten sind und Verbesserungspotential beim Entwurf liegt.

■ 1.1 Netzwerk- und Feldtheorie

Die *elektromagnetische Simulation* (EM-Simulation) ist sehr nah an der physikalischen Realität. Die dreidimensionale Struktur und die verwendeten Materialien werden im Detail berücksichtigt. Die meisten Ingenieurinnen und Ingenieure der Elektro- und Informationstechnik sind vor allem mit der *Schaltungssimulation* vertraut, z. B. mit dem Programm PSpice. In der Schaltungssimulation befinden wir uns auf einer höheren Abstraktionsstufe und beschreiben

Bauteile und Schaltungen nicht durch elektromagnetische Feldgrößen, sondern durch *Netzwerkgrößen*. Der Schaltungssimulation übergeordnet gibt es noch die Ebene der *Systemsimulation*, die sich auf einem noch höheren Abstraktionsniveau befindet.

Bild 1.1a zeigt eine planare Spule. Eine Leiterbahn ist spiralförmig auf einem dielektrischen nichtleitenden Material geführt. Aus dem Innenbereich der kreisförmigen Anordnung wird der Leiter über eine Brücke zur Speisestelle zurückgeführt. Wird die Anordnung von einem Strom I durchflossen, so entstehen in der Umgebung des Leiters magnetische Felder $\vec{H}(\vec{r})$, die sich im Innenbereich konstruktiv überlagern. Bezüglich der beiden Anschlussklemmen ergibt sich in erster Näherung das Verhalten einer Induktivität. Schaut man genauer hin, so wird klar, dass der Leiter in der Praxis immer eine endliche Leitfähigkeit besitzt. Im Netzwerkmodell erscheint daher ein Ohm'scher Widerstand R in Reihe zur Induktivität L . Längs des spiralförmigen Leiters gibt es einen Spannungsabfall, infolgedessen stellt sich ein elektrisches Feld zwischen den Leitern ein. Vereinfachend kann der Einfluss des elektrischen Feldes durch eine parallel geschaltete Kapazität C im Netzwerkmodell berücksichtigt werden.

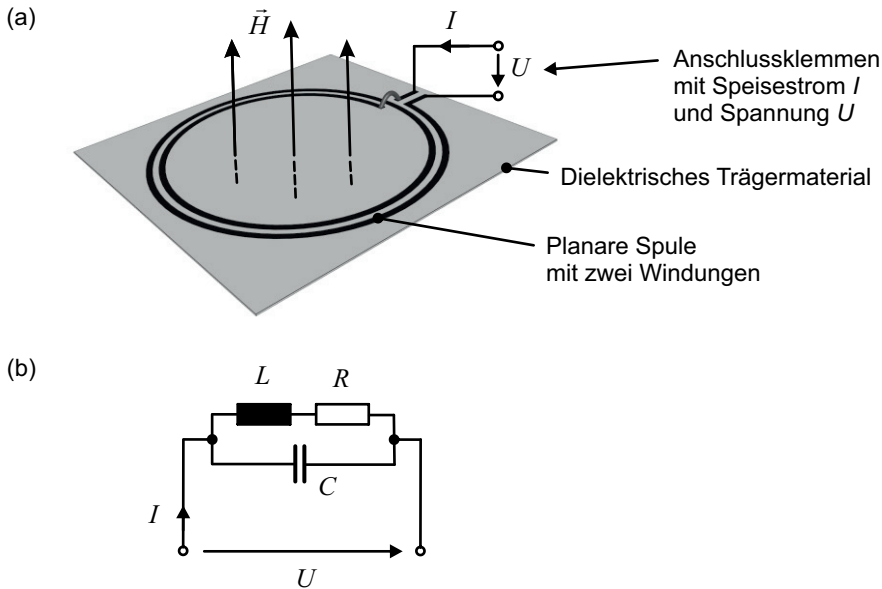


Bild 1.1 (a) 3D-EM-Modell und (b) Netzwerkmodell einer realen Spule

Bild 1.1b zeigt das resultierende Netzwerkmodell oder *Ersatzschaltbild* (ESB) der Anordnung, das für viele Anwendungsfälle ausreichend genau ist. In diesen Anwendungsfällen liefert das Ersatzmodell der Netzwerktheorie mit sehr wenigen Parametern einen sehr effizienten Ansatz, und es lassen sich Schaltungen mit sehr vielen solcher konzentrierter Bauelemente berechnen. Wir befinden uns dann im Bereich der *Schaltungssimulation*. Für die integralen Größen Strom und Spannung gelten dann die *Kirchhoff'schen Gesetze*, also Maschen- und Knotenregel. Bei linearem Verhalten kann mithilfe der komplexen Wechselstromrechnung ein Gleichungssystem für die Unbekannten aufgestellt und eine Lösung ermittelt werden. Dieser Ansatz ist innerhalb seines Gültigkeitsbereiches sehr effizient.

In einer *EM-Simulation* der in Bild 1.1a gezeigten Spulenanordnung können die für die Schaltungssimulation notwendigen Größen (Impedanzverhalten) bezüglich der Anschlussklem-

men ermittelt werden. Darüber hinaus kann aber zusätzlich die Wechselwirkung mit der Umgebung (Nahfeld, Abstrahlung) bestimmt werden. Dies ist bei ansteigender Packungsdichte in integrierten Schaltungen in zunehmendem Maße notwendig. Die EM-Simulation basiert auf den *Maxwell'schen Gleichungen* und ist deutlich aufwendiger in der Durchführung als eine Schaltungssimulation. Der Vorteil der EM-Simulation liegt darin, dass der feldtheoretische Ansatz *universellere Gültigkeit* besitzt, denn er berücksichtigt deutlich mehr reale Aspekte.

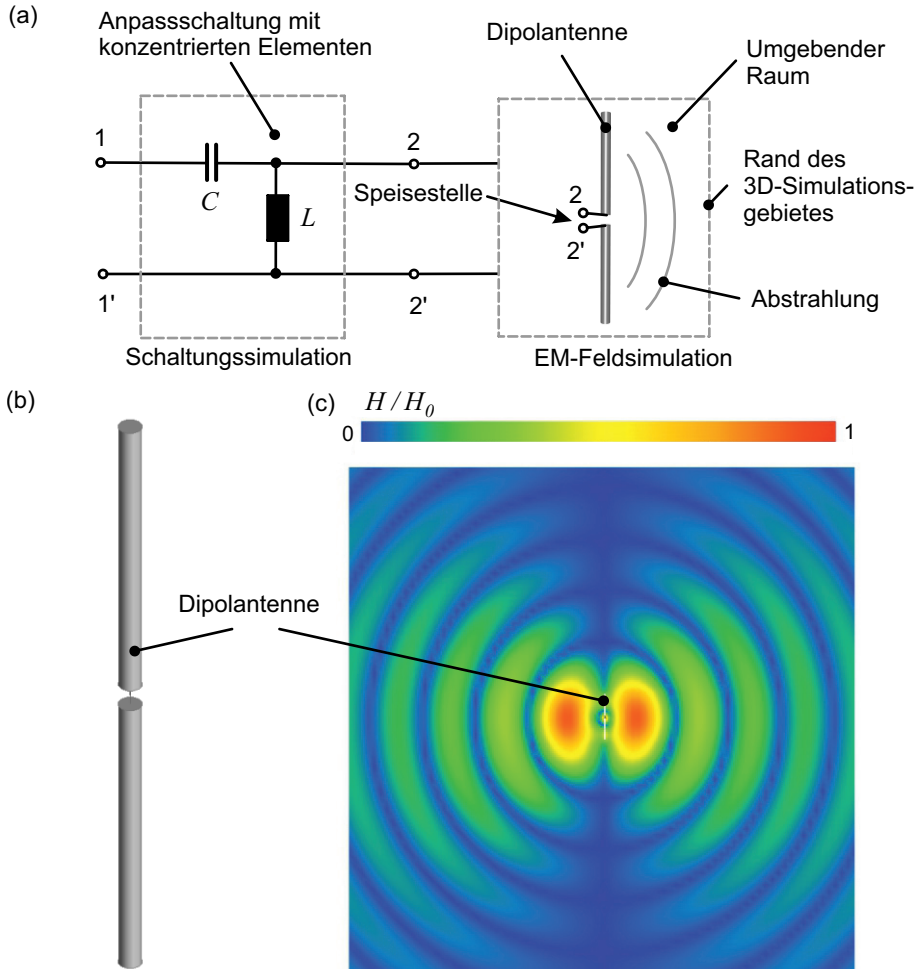


Bild 1.2 (a) Beispiel für eine elektromagnetische Co-Simulation: Berechnung der Anpasserschaltung aus konzentrierten Elementen im Schaltungssimulator und Berechnung der Dipolantenne im EM-Simulator. (b) 3D-Struktur der Dipolantenne. (c) Darstellung der räumlichen Verteilung des magnetischen Nahfeldes in der Umgebung des Dipols

In der Praxis nun besteht der Königsweg in der intelligenten Verknüpfung beider Ansätze, also der Kopplung netzwerktechnischer und feldtheoretischer Modelle. Kritische Komponenten und Geometrien werden mit dem EM-Simulator behandelt, weniger kritische Strukturen im Schaltungssimulator. So lassen sich effiziente Modelle mit einer der übergeordneten Pro-

blemstellung angepassten Genauigkeit erstellen. Bild 1.2a zeigt ein einfaches Beispiel für eine elektromagnetische Co-Simulation: Eine Antenne wird im EM-Simulator berechnet und die Anpassschaltung aus konzentrierten und als ideal angenommenen Elementen im Schaltungssimulator.

Tabelle 1.1 Vergleich von Netzwerktheorie und elektromagnetischer Feldtheorie

	Netzwerktheorie	EM-Feldtheorie
Zustandsgrößen	Strom, Spannung	elektrisches u. magnetisches Feld
	skalar	vektoriell
	zeitabhängig	orts- und zeitabhängig
Gleichungen	Kirchhoff'sche Gleichungen	Maxwell'sche Gleichungen
Gültigkeitsbereich	eingeschränkter (–)	universeller (+)
Berechnungsaufwand	geringer Aufwand (+)	hoher Aufwand (–)

Während in einer Schaltungssimulation Strom und Spannung ermittelt werden, liegen nach einer EM-Simulation umfangreiche Informationen über die räumlichen Verteilungen der elektrischen und magnetischen Feldgrößen vor. Bild 1.2c zeigt in einer vertikalen Darstellungsebene den Betrag der magnetischen Feldstärke in der Umgebung einer Dipolantenne. Tabelle 1.1 stellt abschließend noch einmal wesentliche Aspekte der Schaltungssimulation und der elektromagnetischen Feldsimulation gegenüber.

■ 1.2 Anwendungsfelder der EM-Simulation

Die elektromagnetische Simulation ist mittlerweile ein in der Praxis etabliertes Verfahren und wird in sehr unterschiedlichen Anwendungsfeldern eingesetzt. In der folgenden Aufzählung nennen wir einige Anwendungsbereiche, die zeigen, wie breit das Einsatzgebiet für die elektromagnetische Feldtheorie und ihre Simulationswerkzeuge mittlerweile ist.

Hochfrequenztechnik: In der Hochfrequenztechnik (HF-Technik) haben wir es mit geometrischen Strukturen zu tun, deren Abmessungen im Bereich der Wellenlänge liegen oder kleiner sind. Es kommt somit zu Wellenausbreitungseffekten und elektromagnetischer Abstrahlung. Feldsimulationsprogramme wurden daher in der Antennenentwicklung historisch bereits sehr früh eingesetzt. Mit der Steigerung der Computer-Rechenleistung hat sich die elektromagnetische Feldsimulation auf alle Bereiche der Hochfrequenztechnik ausgedehnt, wie zum Beispiel auf Filter, Koppler, Leitungsübergänge, Hohlleiter, dielektrische Wellenleiter, Gehäuse für integrierte Schaltungen, Leitungsübergänge, Wellenausbreitung in Gebäuden und Spulen für RFID-Tags.

Elektromagnetische Verträglichkeit: Ziel der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) ist es, den störungsfreien Betrieb zwischen elektrischen Geräten und Systemen sicherzustellen. Zu Funktionsstörungen kann es kommen, wenn sich Signale auf *parasitären Kopplungspfaden* ausbreiten. Diese unerwünschten Kopplungspfade sind im Schaltplan nicht direkt ersichtlich. Mit EM-Simulationen können diese parasitären Kopplungspfade jedoch untersucht und durch Gegenmaßnahmen vermindert werden. Die Möglichkeit der Pro-

gramme elektromagnetische Feld- und Stromdichteverteilungen grafisch darzustellen ist äußerst hilfreich bei der Suche nach technischen Lösungen im Bereich der EMV.

Schaltungsentwurf: Immer höhere Takt- und Datenraten in modernen Digitalschaltungen (High speed digital) stellen neue Herausforderungen an das Design von Schaltungslayouts. Reflexionen, Überkopplungen und Laufzeitdifferenzen vermindern die Signalqualität und müssen hinreichend klein gehalten werden. Die Untersuchung und Optimierung der Signalintegrität (*Signal Integrity*) gelingt mit Schaltungs- und EM-Simulationen. Ein anschauliches Werkzeug zur Darstellung ist hierbei das Augendiagramm. Neben dem Trend zu höheren Taktraten finden wir auch zunehmend reduzierte Versorgungsspannungen. Ziel der Simulationen ist es somit, auch die Qualität des Versorgungsnetzes sicherzustellen (*Power Integrity*).

Medizintechnik: Die Anwendung von EM-Simulationen in der Medizintechnik ist mittlerweile etabliert. Die in der *Magnet-Resonanz-Tomographie* (MRT) verwendeten Spulensysteme erzeugen magnetische Felder im Körper. Mithilfe elektromagnetischer Simulationen können Bauformen ermittelt werden, die die erforderliche Homogenität der Felder gewährleisten. Weiterhin können Stromdichten und Leistungsdichteverteilungen im menschlichen Körper berechnet werden, um die Einhaltung gesetzlicher Grenzwerte für die Patientensicherheit zu gewährleisten. In der *Transkraniellen Magnetstimulation* (TMS) können durch induzierte elektrische Felder ausgewählte Bereiche im Gehirn stimuliert oder gehemmt werden. EM-Simulationen erlauben es die Anregungssysteme geeignet auszulegen. Ein weiteres Beispiel ist die *Hyperthermieplanung*. Über eine Berechnung der Leistungsdichteverteilung im menschlichen Gewebe kann durch Kopplung mit einem thermischen Berechnungsprogramm die erforderliche Sendeleitung für einen optimalen Therapieerfolg ermittelt werden.

Elektrische Maschinen: Im Bereich der Antriebstechnik werden numerische EM-Simulationen eingesetzt, um wichtige mechanische und elektrische Kenngrößen wie zum Beispiel Drehmomentenverlauf und Verluste zu optimieren. Bei Elektromotoren – wie auch bei anderen Systemen der Energietechnik, zum Beispiel Transformatoren – ist das Verhalten der magnetischen Materialien (Permanentmagnete) von großer Bedeutung. Wichtig ist die Ankopplung der elektromagnetischen Simulationssoftware an benachbarte physikalische Bereiche (Multiphysics): zum Beispiel eine Ankopplung an die Mechanik für Untersuchungen mechanischer Schwingungen und Festigkeit und eine Ankopplung an die Thermik für Fragen der Erwärmung der Systeme.

■ 1.3 Aufbau der nachfolgenden Kapitel

Nach dieser kurzen Einleitung steigen wir im *zweiten Kapitel* in die physikalischen Grundlagen ein. Wir erläutern zunächst für den statischen, d. h. zeitunabhängigen Fall die elektrischen und magnetischen Feldgrößen und Feldenergien und zeigen den Zusammenhang mit den Netzwerkgrößen Strom, Spannung, Kapazität, Widerstand und Induktivität auf. Über die Maxwell'schen Gleichungen in Differential- und Integralform stellen wir dann mithilfe mathematischer Grundlagen einen allgemeinen Zusammenhang zwischen allen elektromagnetischen Feldgrößen her. Um die Maxwell'schen Gleichungen und ihre Aussagen und Lösungen

besser zu verstehen, betrachten wir danach einige praxisrelevante Spezialfälle. Wir schließen das Kapitel ab über die elektromagnetischen Potentiale und die Green'schen Funktionen, die beim Auffinden von Lösungen in der Praxis hilfreich sein können und in wichtigen Anwendungsbereichen, z. B. in der Antennentechnik, fest verankert sind.

Die Maxwell'schen Gleichungen sind nur für sehr einfache Szenarien analytisch lösbar. Zur Lösung praktischer Probleme müssen mithilfe von mathematischen Verfahren, die sich mit Computerunterstützung umsetzen lassen, Näherungslösungen gefunden werden. Das *dritte Kapitel* gibt daher einen Überblick über die zugrunde liegenden numerischen Verfahren. Etwas genauer schauen wir auf die Methode der Finiten Differenzen im Zeitbereich (FDTD), da diese direkt von den Maxwell'schen Gleichungen ausgeht. Zwei weitere Verfahren, die eine tiefergehende Beschäftigung mit der Mathematik notwendig machen würden, wollen wir nur kurz behandeln: die Finite-Elemente-Methode (FEM) und die Momentenmethode (MoM).

Im *vierten Kapitel* lernen wir dann die wesentlichen Schritte bei der Umsetzung eines realen Problems in ein Simulationsmodell kennen. Wir werden dabei sehen, dass die Umsetzung viele technische Überlegungen erfordert und es fachkundige Anwenderinnen und Anwender braucht, die die zugrunde liegenden feldtheoretischen und technischen Aspekte verstanden haben und so durch sinnvolle Vereinfachungen zu einem effizienten und aussagekräftigen Simulationsmodell kommen. In den nachfolgenden vier Kapiteln (Kapitel 5 bis Kapitel 8) werden wir dann Simulationen in kanonischen Kontexten anwenden und schauen hier gleichermaßen auf feldtheoretische und simulatorische Aspekte. Dies dient zur Verifizierung unserer aufgebauten Modelle und soll zum fachkundigen Umgang mit den Simulationswerkzeugen anleiten. Wir schauen nun im einzelnen auf diese Kapitel.

Im *fünften Kapitel* beschäftigen wir uns zunächst ausschließlich mit statischen magnetischen Feldern. Bei einfachen Geometrien nutzen wir das Durchflutungsgesetz und das Biot-Savart'sche Gesetz, um, ausgehend von einer vorgegebenen Stromverteilung, die magnetische Feldstärke im Raum zu berechnen. Aus der Verteilung des magnetischen Feldes können wir dann über die Energiedichte Netzwerkgrößen wie die Induktivität ermitteln. Den analytischen Ergebnissen stellen wir jeweils numerische Berechnungen gegenüber. Die idealisierten Gedankenmodelle hinter den analytischen Berechnungen lassen sich dabei selten eins zu eins in ein Simulationsmodell überführen. Wir müssen also jeweils überlegen, welche Anpassungen und Veränderungen für die Überführung in ein vergleichbares Simulationsmodell notwendig und angemessen sind.

Thema des *sechsten Kapitels* sind die statischen elektrischen Felder sowie die elektrischen Strömungsfelder in leitfähigen Medien. Mithilfe des Gauß'schen Gesetzes des elektrischen Feldes berechnen wir die Verteilung der elektrischen Feldstärke für einfache Geometrien. Über die Energie sowie Strom und Spannung können wir schließlich Netzwerkgrößen wie die Kapazität und den Ohm'schen Widerstand ermitteln. Wie im vorangegangenen Kapitel stellen wir auch hier den analytischen Ergebnissen numerische Modelle gegenüber. Wir nutzen beim Plattenkondensator auch die Möglichkeiten der EM-Simulation, um einfach einmal die Frequenz zu erhöhen und somit einen Blick über den Tellerrand zu werfen. Hierbei erkennen wir eine Verkopplung der elektrischen und magnetischen Feldgrößen und die Phänomene der Resonanz und Abstrahlung, welche uns später im Anwendungskapitel (Kapitel 9) noch einmal begegnen werden.

Induktionsvorgänge, die in der Technik eine große Bedeutung besitzen, werden im *siebten Kapitel* näher betrachtet. Mithilfe des Induktionsgesetzes berechnen wir ausgehend von magnetischen Wechselfeldern induzierte Wirbelströme und Spannungen. Wie im Kapitel über stati-

sche elektrische und magnetische Felder werden in den Abschnitten dieses Kapitels analytische Berechnungen und numerische Lösungen diskutiert.

Das *achte Kapitel* widmet sich dann zunächst der Stromverdrängung (Skinneffekt) in guten Leitern. Mit zunehmender Frequenz verdrängt sich der Strom aufgrund der Verkopplung elektrischer und magnetischer Felder an den Rand des Leiters. Wir untersuchen die Auswirkungen auf den Widerstand und die Induktivität bei einem zylindrischen Leiter. Zusätzlich zum Einzeleiter untersuchen wir die Auswirkungen mehrerer paralleler Leiter und lernen dabei den Proximity-Effekt kennen. Im weiteren Verlauf des Kapitels betrachten wir dann elektromagnetische Wellen im freien Raum. Wir wollen dabei zunächst die wesentlichen Wellenausbreitungsphänomene beschreiben und anschaulich die physikalischen Zusammenhänge verdeutlichen. Danach beschäftigen wir uns mit numerischen Modellen zur Veranschaulichung der Abstrahlung und Ausbreitung von Wellen im freien Raum und der Interaktion der Wellenfelder mit Objekten.

Das *neunte Kapitel* zeigt abschließend exemplarisch komplexere Simulationsmodelle aus aktuellen Anwendungsgebieten. Wir beginnen mit einem Beispiel aus der Medizintechnik und betrachten Oberflächenspulen für die Magnet-Resonanz-Tomographie. Auch im folgenden Anwendungsbeispiel bleiben wir im Bereich der Magnet-Resonanz-Tomographie und erweitern die Betrachtung auf Birdcage-Resonatoren. Das nächste Beispiel entstammt dem Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV), bei dem durch Gehäuseresonanzen parasitäre Verkopplungen zwischen getrennten Schaltungsteilen auftreten. Weiterhin betrachten wir im vierten Beispiel eine Monopolantenne mit einer Anpassschaltung aus konzentrierten Elementen, um das Konzept der elektromagnetischen Co-Simulation, eine Verbindung aus Schaltungs- und EM-Simulation, deutlich zu machen. Anschließend kommen wir auf die technisch wichtigen Patchantennen zu sprechen und geben einen Ausblick auf das Gebiet der Hochfrequenztechnik, indem wir uns mit den Möglichkeiten der Strahlschwenkung und des Beamformings beschäftigen. Abschließend beschäftigen wir uns noch mit dem Benutzereinfluss bei körpernah eingesetzten Funksystemen.

2

Theorie elektromagnetischer Felder

In diesem Kapitel werden zunächst die elektromagnetischen Feldgrößen vorgestellt, wie sie für den statischen – also zeitunabhängigen – Fall definiert sind. Es wird der Zusammenhang zwischen den Feldgrößen und den Netzwerkgrößen wie Strom und Spannung verdeutlicht. Die Maxwell'schen Gleichungen in Verbindung mit den Stetigkeitsbedingungen dienen dann der vollständigen Beschreibung des elektromagnetischen Verhaltens für zeit- und ortsvariante Feldgrößen.

Bei der mathematischen Behandlung und dem Auffindung von Lösungen der Maxwell'schen Gleichungen hat es sich als vorteilhaft herausgestellt, bestimmte Problemklassen, wie Elektrostatik, Magnetostatik, quasistatische Felder und schnell veränderliche Felder, zu unterscheiden. Die Betrachtung gewinnt dabei an Komplexität, und das Verständnis für die feldtheoretischen Zusammenhänge wächst Schritt für Schritt.

■ 2.1 Physikalische Grundlagen

Zunächst stellen wir in den folgenden Abschnitten grundlegende feldtheoretische und mathematische Zusammenhänge dar, um eine erste anschauliche Vorstellung des elektrischen und magnetischen Feldes zu gewinnen.

2.1.1 Elektrostatische Feldgrößen

Wir beginnen mit den *elektrischen* Feldgrößen für den zeitunabhängigen (statischen) Fall und erklären die Bedeutung der Netzwerkgrößen Spannung und Kapazität.

2.1.1.1 Ladung und Coulomb-Kraft

Historisch hat man schon früh die Bedeutung von elektrischen *Ladungen* Q erkannt und festgestellt, dass sich Ladungen durch ihre Kraftwirkungen aufeinander auszeichnen. Man unterscheidet *positive* und *negative* Ladungen, wobei sich gleichnamige Ladungen abstoßen (Bild 2.1a) und ungleichnamige Ladungen anziehen (Bild 2.1b). Ladungsmengen werden in der Einheit Coulomb angegeben ($[Q] = C$).

Die *Coulomb-Kraft* \vec{F}_C beschreibt die Kraftwirkung zwischen zwei Ladungen Q_1 und Q_2 , die sich im Abstand r zueinander befinden. Die Ladungen werden als punktförmig angenommen

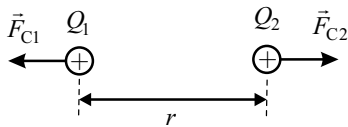
(Punktladung). Der Betrag der Kraft in der Einheit Newton ($[F] = \text{N}$) kann mit nachfolgender Gleichung (2.1) berechnet werden.

$$F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (\text{Coulomb-Kraft}) \quad (2.1)$$

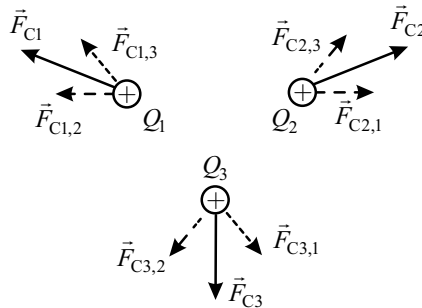
Die Dielektrizitätskonstante ϵ_0 besitzt den Wert $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As/(Vm)}$. Die Richtung der Kraft ergibt sich auf einer gedachten Verbindungsgeraden zwischen den Punktladungen, wobei die Kräfte bei ungleichnamigen Ladungen zueinander zeigen und bei gleichnamigen Ladungen voneinander weg zeigen (Bild 2.1a und 2.1b). Falls mehr als zwei Ladungen vorhanden sind, so können paarweise die Kräfte ermittelt und nach dem *Superpositionsprinzip* vektoriell überlagert werden. Bild 2.1c zeigt die paarweise Wechselwirkung und die vektorielle Addition der Teilkräfte zu den Gesamtkräften.

Ladungen sind naturgemäß gequantelt und kommen nur in ganzzahligen Vielfachen der *Elementarladung* $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ vor. Diese Quantelung spielt aber makroskopisch – also bei Vorhandensein einer ausreichend großen Anzahl von Ladungsträgern – keine Rolle, sodass wir im Folgenden von einer kontinuierlichen Ladungsmenge ausgehen wollen.

(a) Zwei gleichnamige Ladungen



(c) Superposition der Kräfte bei drei Ladungen



(b) Zwei ungleichnamige Ladungen



Bild 2.1 Coulomb-Kräfte zwischen (a) zwei gleichnamigen Ladungen, (b) zwei ungleichnamigen Ladungen und (c) drei Ladungen

Bei den bislang betrachteten Ladungen handelte es sich um Punktladungen, bei denen die Ladungsmenge in einem singulären Raumpunkt angenommen wird. Bei kontinuierlich im Raum verteilten Ladungen verwendet man zur Beschreibung die *Raumladungsdichte* ρ (Einheit $[\rho] = \text{C/m}^3$). Die Gesamtladung Q erhalten wir dann durch die Integration über das ladungserfüllte Volumen V .

$$Q = \iiint_V \rho \, dv \quad (2.2)$$

2.1.1.2 Elektrische Feldstärke

Im Folgenden wollen wir uns vom Begriff der Kraft lösen, indem wir eine neue physikalische Größe einführen. Hierzu beziehen wir die auf die Ladung Q_2 wirkende Kraft \vec{F}_2 auf die La-

dung Q_2 selbst. Wir erhalten damit die *elektrische Feldstärke* \vec{E}_1 der Ladung Q_1 am Ort der Ladung Q_2 .

$$\vec{E}_1 = \frac{\vec{F}_2}{Q_2} \quad (2.3)$$

Die elektrische Feldstärke (in der Einheit $[E] = \text{V/m}$) gibt also die Richtung der Kraftwirkung auf eine Probeladung Q_2 an, die sich in der Nähe einer Ladung Q_1 befindet. Das elektrische Feld \vec{E}_1 einer Punktladung Q_1 im Ursprung ist damit in Kugelkoordinaten durch die nachfolgende Gleichung gegeben.

$$\vec{E}_1(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1}{r^2} \vec{e}_r \quad (\text{Elektrische Feldstärke einer Punktladung im Ursprung}) \quad (2.4)$$

Obleich in Gleichung (2.3) rechentechnisch nur eine Quotientenbildung vorgenommen und damit eine von Q_2 unabhängige Größe geschaffen wird, bedeutet die neue Größe doch mehr als die Normierung einer Kraft. Bei der anfänglichen Beschreibung über die Coulomb-Kräfte existieren im Raum verteilte Ladungen, die direkt – über eine Distanz hinweg – Kräfte aufeinander ausüben (*Fernwirkungsprinzip*).

Nun mit der Einführung des Begriffs des elektrischen Feldes wird zunächst von der Ladung Q_1 ein elektrisches Feld \vec{E}_1 erzeugt. Mathematisch stellt die elektrische Feldstärke \vec{E} nun ein *Vektorfeld* dar, welches jedem Raumpunkt einen Vektor zuweist. Das elektrische Feld \vec{E}_1 der Ladung Q_1 existiert dabei auch ohne die Anwesenheit der Ladung Q_2 . Wird nun eine Ladung Q_2 in des Feld \vec{E}_1 der Ladung Q_1 gebracht, so interagiert die Ladung Q_2 mit dem *lokalen* elektrischen Feld der Ladung Q_1 am Ort der Ladung Q_2 (*Nahwirkungsprinzip*). Die Ladung Q_2 erzeugt nun aber auch ihrerseits ein elektrisches Feld \vec{E}_2 , und so ergibt sich schließlich auch eine Kraftwirkung auf die Ladung Q_1 .

Ein ortsabhängiges elektrisches Vektorfeld $\vec{E}(\vec{r})$ kann durch sogenannte *Feldlinienbilder* anschaulich dargestellt werden. Bild 2.2a zeigt das Feldlinienbild einer positiven Punktladung. Dem Feldlinienbild kann anschaulich die Richtung und der Betrag entnommen werden: Die vektorielle Größe \vec{E} ist dabei immer tangential zu den Feldlinien gerichtet, und die Liniendichte deutet die Amplitude der Feldstärke an. Wie in Gleichung (2.4) mathematisch formuliert erkennt man im Feldlinienbild, dass das elektrische Feld radial von der Ladung fortgerichtet ist und der Betrag mit steigendem Abstand sinkt.

In Bild 2.2b und Bild 2.2c finden wir die Feldlinienbilder von zwei gleichnamigen bzw. ungleichnamigen Ladungen. Bild 2.2d zeigt die Feldverteilung in einem Plattenkondensator, bei dem sich zwei parallele Flächen mit entgegengesetzter Ladung gegenüberstehen. Zwischen den Platten ist das elektrische Feld in guter Näherung *homogen*. An den Rändern entsteht ein Streufeld, und das Feld im Außenraum ist in erster Näherung zu vernachlässigen.

Wenn man sich den Verlauf der Feldlinien und damit die Richtung der Kraftwirkung auf eine positive Ladung in den Bildern ansieht, so fällt auf, dass diese immer von den positiven Ladungen weg- und zu den negativen Ladungen hinführen. Man könnte auch sagen, dass die positiven Ladungen die *Quellen* des elektrostatischen Feldes darstellen (hier entspringen die Feldlinien) und dass die negativen Ladungen die *Senken* sind (hier enden die elektrischen Feldlinien).

Index

- Γ -Transformator, 289
- $\lambda/2$ -Resonanz, 201
- 3 dB-Bandbreite, 258

- Ableitungsregeln, 307
- Absorbermaterial, 277
- Absorbierende Randbedingungen, 106, 137
- Absorption, 243
- Abstrahlung, 89
- Adaptive Netzverfeinerung, 139, 142, 203
- ADS
 - Hohlraumresonator, 273
 - Monopolantenne, 286
 - Patchgruppenantenne, 298
 - Plattenkondensator, 202
- Advanced Design System, 202
- Äquipotentialfläche, 27
- Äquivalente Leitschichtdicke, 66
- Äußeres Produkt, 310
- Aluminium, 35
- Ampere'sches Gesetz, 45
- Anfangs-Randwert-Problem, 42
- Anisotrope Materialien, 31
- Anpassschaltung, 289
- Anpassung, 294, 298
- Anregungssignale, 134
- Antenne, 279
- Arbeit, 25
- Aufpunktvektor, 57, 161
- Ausbreitungsgeschwindigkeit, 52, 71
- Ausbreitungskonstante, 86
- Ausbreitungsmoden, 133
- Ausfallswinkel, 240

- Bandbreite, 108, 258, 294
- Basisgrenzwerte, 292
- Beamforming, 303
- BEM, 120
- Beugung, 242
- Binomiale Belegung, 303

- Biot-Savart'sches Gesetz, 56, 161
- Birdcage-Resonator, 262
- Boundary-Element-Method, 120
- Brechung, 80, 240
- Brechungsindex, 80
- Brewster-Winkel, 80

- CAD, 128
- Co-Simulation, 18, 279
- Coulomb-Eichung, 55
- Coulomb-Kraft, 22
- Courant-Kriterium, 105, 142

- Dämpfungskonstante, 87, 243
- dBi, 282
- Debye-Beziehung, 31
- Delta-Operator, 39
- DFT, 108
- Dichte, 94
- Dielektrikum, 29
- Dielektrische Verschiebungsdichte, 32
- Dielektrischer Wellenleiter, 134
- Dielektrizitätskonstante, 23
- Dielektrizitätszahl, 31, 131
 - Komplexwertige, 44
- Differentialgleichung, 53, 65, 70, 86
- Differentialoperator, 313
- Differenzenquotient, 101
- Diffusionsgleichung, 65, 95
- Digitale Signale, 135
- Dipol, 18, 246, 293
 - Halbwellendipol, 283
- Dirac'sche Delta-Funktion, 54
- Diskrete Fouriertransformation, 108
- Diskretisierung, 98, 100, 137
 - zeitlich, 100, 102
- Dispersion, 48, 105
- Divergenz, 38, 313
- Drahtantenne, 283
- Duales Gitter, 100

- Dummy-Objekt, 205
- Durchflutungsgesetz, 45, 150, 170, 183
- DXF-Format, 130

- Effektive Fläche, 68
- Eigenmode-Analyse, 261, 264
- Eindringtiefe, 66
- Einfallsebene, 79
- Einfallswinkel, 240
- Eingangsimpedanz
 - Antenne, 282
- Einheitsvektor, 313–315
- Eisenkern, 223
- Elektrisch klein, 107
- Elektrische Energiedichte, 32, 193, 208
- Elektrische Feldstärke, 24
- Elektrische Flussdichte, 32
- Elektrische Leitfähigkeit, 34, 131
- Elektrische Stromdichte, 33
- Elektrische Wand, 135, 137, 153, 285
- Elektrische Wirbelfelder, 214
- Elektrischer Fluss, 32
- Elektrisches Potential, 90
- Elektrisches Strömungsfeld, 51
- Elektromagnetische Potentiale, 90
- Elektromagnetische Verträglichkeit, 18, 250
- Elektromagnetische Wellen, 52, 69
- Elektrostatik, 52
- Elementarladung, 23
- Elementarstrahler, 302
- Elementmatrix, 113
- Elliptische Polarisierung, 75
- EM Co-Simulation, 279
- EM-Simulation, 97
- Empfangsantenne, 279
- EMPIRE
 - Koaxiale Anordnung, elektrisches Feld, 209
 - Koaxiale Anordnung, Magnetfeld, 164
 - Leiterschleife, Induktion, 217
 - Linienleiter, Magnetfeld, 152
 - Paralleldrahtleitung, Magnetfeld, 158
 - Plattenkondensator, elektrisches Feld, 194
 - Wellenausbreitung, 245
 - Zylinder, Wirbelstrom, 223
- EMPro
 - Benutzereinfluss, SAR, 293
 - Birdcage-Resonator, 264
 - MR Oberflächenspule, 252
 - Skineffekt im Leiter, 230
 - Zylinderspule, 185
- EMV, 166, 250
- Endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit, 52
- Energie, 32, 36, 88, 193, 208
- Energiedichte, 178, 185
 - Elektrische, 32, 193, 208
 - Magnetische, 36
- Energieerhaltung, 88, 240
- Erhaltungsgroße, 88
- Erhaltungssatz der Ladung, 50
- Ersatzschaltbild, 16
- Erwärmung, 221
- ESB, 16
- Evaneszente Welle, 82
- Externe Güte, 252

- Faktorregel, 307
- Faraday'sches Gesetz, 46
- FDTD, 99, 147, 153, 194, 294
 - Conformal Mesh, 138
- Feldenergie, 32
- Feldlinienbild, 24
- Feldstärke
 - Elektrische, 24
 - Magnetische, 36
- Feldtheorie, 15
- Feldwellenwiderstand, 73, 77, 88
- FEM, 110, 146, 266, 286
 - Konvergenzanalyse, 142
- Fernfeld, 83, 279, 280, 296
- Fernwirkungsprinzip, 24
- Finite Differenzen im Zeitbereich, 99, 147
- Finite Elemente, 111
- Finite Integrationstechnik, 120
- Finite-Elemente-Methode, 110, 146, 286
- FIT, 120
- Flächenwiderstand, 68
- Fluss
 - Elektrischer, 32
 - Magnetischer, 36, 214
- Flussdichte
 - Elektrische, 32
 - Magnetische, 36
- Formfunktion, 112
- Frequenz, 63, 71

- Frequenzbereich, 98
 Fußpunktimpedanz, 279, 282

 Gültigkeitsbereich, 17
 Gauß'sches Gesetz
 – des elektrischen Feldes, 46, 206
 – des magnetischen Feldes, 47
 Gaußförmiger Impuls, 108
 Gegenfeld, 30
 Gehäuseresonanz, 271
 Geometrie, 128
 Geometrischer Schattenbereich, 242
 Geschichtete Strukturen, 118
 Gleichstrom, 51
 Gleichungssystem, 118
 Gold, 35
 Gradient, 26, 313
 Graphical User Interface (GUI), 124
 Green'sche Funktion, 53, 93, 116, 240
 Grenzwerte, 291
 Grenzwinkel der Totalreflexion, 81
 Groundplane, 136
 Grundschiwingung, 272
 Gruppenantenne, 301
 Güte, 253
 – Schwingkreis, 252, 256
 – Spule, 251
 GUI, 124
 Gyromagnetisches Verhältnis, 250

 Halbwellendipol, 283, 291
 Harmonische Zeitabhängigkeit, 92
 Helmholtz-Gleichung, 70, 86
 Helmholtzspule, 166, 223
 HEW, 134, 223, 239
 Hilfsgröße, 94
 Hochfrequenztechnik, 18
 Hohlleiter, 134
 Hohlraumresonator, 271
 Homogene ebene Welle, 70, 134, 223, 239
 – Lokale, 84
 Homogene Raumladungskugel, 40
 Homogenität, 48
 Horizontale Polarisation, 75
 Huygens'sches Prinzip, 243, 303
 Hybride Verfahren, 120

 ICNIRP, 291
 Idealer elektrischer Leiter, 35
 IGES-Format, 130
 Impedanz, 16
 Induktionsgesetz, 46, 214, 216
 Induktivität, 37
 – Koaxiale Anordnung, 178
 – Lange Zylinderspule, 185
 Induzierte Spannung, 214
 Innenwiderstand, 195, 273
 Innere Induktivität, 178
 Inneres Produkt, 309
 Intersektion, 128
 Isotroper Kugelstrahler, 245, 280, 302
 Isotropie, 48

 Kapazität, 32
 – Plattenkondensator, 192
 – Zylinderkondensator, 209
 Kapazitiver Endeffekt, 286
 Kartesisches Koordinatensystem, 313
 Kettenregel, 307
 Kirchhoff'sche Gesetze, 16, 44
 Koaxiale Anordnung, 170, 205
 Koaxialleitung, 133
 Komplexe Wechselstromrechnung, 44
 Konvektion, 95
 Konvergenzanalyse, 142
 Konzentriertes Tor, 106, 132
 Koordinatensysteme, 312
 Kraft
 – Coulomb, 22
 – Lorentz, 37
 Kreisfrequenz, 71
 Kreisspule, 161
 Kreuzprodukt, 310
 Kugelkoordinatensystem, 315
 Kugelwelle, 83, 239, 302
 Kupfer, 35

 L-Netzwerk, 289
 Ladung, 22
 Ladungserhaltung, 49
 Langgestreckte Zylinderspule, 183
 Langsam veränderliche Felder, 63
 Laplace-Gleichung, 53
 Laplace-Operator, 313

- Larmorfrequenz, 250
- Lastgüte, 251
- Lastwiderstand, 273
- Laufzeit, 62
- Laufzeiteffekte, 51
- Leap-Frog-Algorithmus, 104
- Leistung, 89, 221, 222
- Leistungsdichte, 33, 34
- Leistungsflussdichte, 89
- Leiterschleife, 214
- Leitfähigkeit, 34, 131
- Leitungsstromdichte, 42
- Leitungswellenwiderstand, 273, 299
- Lenz'sche Regel, 215, 221
- Lichtgeschwindigkeit, 62, 71
- Lineare Antennen, 283
- Lineare Polarisierung, 75
- Linearität, 47
- Linienleiter, 150
- Loaded Q, 251
- Logarithmische Darstellung, 278
- Lokale homogene ebene Welle, 84
- Lorentz-Kraft, 37
- Lorenz-Eichung
 - Allgemeine Zeitabhängigkeit, 92
 - Harmonische Zeitabhängigkeit, 93
- Magnet-Resonanz-Tomographie, 250, 262
- Magnetische Energiedichte, 36
- Magnetische Feldstärke, 36
- Magnetische Flussdichte, 36
- Magnetische Induktion, 36, 214
- Magnetische Wand, 135, 137
- Magnetischer Fluss, 36, 214
- Magnetisches Vektorpotential, 55, 90
- Magnetostatik, 55
- Massefläche, 106, 135, 274
- Massendichte, 94, 131, 293
- Matching, 267
- Materialgleichungen, 47
- Mathematische Grundlagen, 307
- Matrix, 114
- Maxwell'sche Gleichungen, 42, 99
 - Differentialform, 42
 - Integralform, 45
- Methode der Finiten Differenzen im Zeitbereich, 99, 147
- Methode der Finiten Elemente, 110
- Mikrostreifenleitung, 135, 273, 299
- Milli-Inch (mil), 124
- Mittenfrequenz, 108
- Modellbildung, 152
- MoM, 115, 145
- MoM-2,5D, 120, 146
- Momentenmethode, 115, 145, 202
- Monitoring des Simulationslaufs, 126
- Monopolantenne, 279, 285
- Näherungslösung, 63
- Nabla-Operator, 38, 313
- Nahfeld, 17, 279, 280
- Nahwirkungsprinzip, 24
- Netzwerkanalysator, 260
- Netzwerkgrößen, 106
- Netzwerktheorie, 15
- Numerische Dispersion, 105
- Numerische Verfahren, 97
- Oberflächenladungsdichte, 49
- Oberflächenladungsverteilung, 29
- Oberflächenstromdichte, 49
- Offene Leiterschleife, 215
- Offenes Lösungsgebiet, 106
- Ohm'scher Widerstand, 35, 194, 228
- Ohm'sches Gesetz, 34
- Optimierung, 127
- Overmodeling, 131
- Paralleldrahtleitung, 155
- Parallelschwingkreis, 257
- Parametervariation, 127
- Parasitäre Kopplung, 272, 277
- Pascal'sches Dreieck, 303
- Patchantenne, 297
 - Inset-Speisung, 299
- PEC, 35
- Periodendauer, 71
- Permeabilitätskonstante, 36
- Permeabilitätszahl, 36, 131
- Phased-Array Antenna, 303
- Phasenfläche, 74
- Phasengesteuerte Antenne, 303
- Phasenkonstante, 87
- Phasor, 44, 87, 92

- Pick-Up Coil, 260
 Planare Schaltungen, 118
 Planare Spule, 142
 Plattenkondensator, 24, 190
 PML, 106
 Poisson-Gleichung, 53
 Polarisation, 30
 – Elliptische, 75
 – Lineare, 74
 – Zirkulare, 75
 Polarisationsrichtung, 70, 74, 239
 Post-Prozessor, 124, 126
 Potential, 26, 90
 Poynting-Vektor, 73, 84, 89, 223
 Prä-Prozessor, 124
 Präzession, 250
 Produktregel, 307
 Proximity-Effekt, 234
 Punktladung, 23, 54

 Quantelung, 23
 Quasistatische Felder, 51, 63
 Quelle, 24
 Quellendichte, 38, 176
 Quellenfeld, 25, 39
 Quellpunktvektor, 57, 161
 Quotientenregel, 307

 Radiation pattern, 281
 Randbedingungen, 106, 135
 Raumladungsdichte, 23
 Reaktive Nahfelder, 136
 Rechtssystem, 313
 Referenzwert, 292
 Reflexion, 240
 Reflexionsfaktor, 267, 294
 – Antenne, 282
 – Ebene Welle, 77
 – Schräger Einfall, 80
 Reflexionsgesetz, 79
 Rekursive Berechnung, 104
 Relative Dielektrizitätszahl, 31, 131
 – Komplexwertige, 44
 Relative Permeabilitätszahl, 36, 131
 Resonanz, 134, 271
 Ressourcenbedarf, 139
 Reziprozität, 280

 Richtcharakteristik, 281
 Richtfaktor, 281
 Richtfunktion, 281
 Ringspule, 161, 252
 Rotation, 38, 313

 S-Parameter, 274
 SAM-Phantom, 291
 SAR, 267, 292
 SAT-Format, 130
 Schaltungssimulation, 15, 289
 Schnell veränderliche Felder, 52
 Schräger Einfall, 79
 Sendeantenne, 279
 Senke, 24
 Senkrechter Einfall, 76
 Serienresonanz, 200
 Signal-Rausch-Verhältnis, 251
 Silber, 35
 Simulationsverfahren, 97
 Skalarfeld, 26
 Skalarprodukt, 27, 309
 Skineffekt, 52, 63, 66, 228, 253
 Skintiefe, 65
 Snellius'sches Brechungsgesetz, 80
 SNR, 251
 Solver, 124
 Spannung, 25, 107, 192
 – Induzierte, 214
 Spezifische Absorptionsrate, 267, 292
 Spezifische Wärmekapazität, 94
 Spezifischer Widerstand, 194
 Spule, 37
 Stabilität, 105
 Staircase-Effekt, 138, 226
 Staircasing, 232
 Statische Felder, 52
 Stehende Welle, 223
 STEP-Format, 130
 Stetigkeitsbedingungen, 48
 STL-Format, 130
 Strömungsfeld, 51
 Strahlungsdiagramm, 281
 Strahlungsleistungsdichte, 280
 Streifenleitung, 133
 Streufeld, 27
 Streuparameter, 204, 260, 274

- Streuung, 245
- Strom, 107
- Stromdichte, 33, 42, 220
- Stromstärke, 33
- Stromteilerregel, 200
- Stromverdrängung, 52, 66
- Substrat, 118, 273, 298
- Summenregel, 307
- Superpositionsprinzip, 23, 156
- Symmetrieffläche, 135

- TEM-Welle, 74, 239
- Temperaturerhöhung, 222
- Temperaturfelder, 94
- Tetraeder, 110, 138
- Thermische Leitfähigkeit, 94
- Tor, 106, 132
- Torbedingung, 132
- Totalreflexion, 81
- Trafohle, 223
- Transmissionsfaktor, 261
 - Ebene Welle, 77
 - Schräger Einfall, 80
- Transmissionswinkel, 240
- Tuning, 267
- Tutorial, 148

- Unloaded Q, 251

- Vakuum, 31
- Vakuumlichtgeschwindigkeit, 72
- Variationsrechnung, 110
- Vektor Netzwerkanalysator, 260
- Vektoralgebra, 309
- Vektoranalysis, 311
- Vektoranalytische Operatoren, 38
- Vektorfeld, 24, 34
- Vektorpotential, 55, 90
- Verlustbehaftete Medien, 77
- Verlustfaktor, 31, 45
- Verlustleistung, 34, 89, 222
- Verlustwinkel, 45, 131
- Verschiebungsstromdichte, 43
- Verteilte Quelle, 106

- Vertikale Polarisation, 75
- VNA, 260

- Wärme, 89, 94, 222
- Wärmeleitfähigkeit, 94
- Wärmeleitungsgleichung, 94
- Wärmestrahlung, 95
- Wärmeübergangskoeffizient, 95
- Wahre Stromdichte, 43
- Wechselstromrechnung, 44
- Wellenausbreitung, 52, 89, 228
- Wellenausbreitungseffekte, 240
- Wellengleichung, 70, 86
- Wellenlänge, 71
- Wellenleitertore, 133
- Wellenzahl, 70
- Wellenzahlvektor, 71
- Widerstand, 34, 194
 - Gleichstrom, 35, 194
 - Stromverdrängung, 68
- Wirbeldichte, 39, 176
- Wirbelfeld, 35, 39
 - Elektrisches, 214
- Wirbelstrom, 220, 267
- Wirkleistungstransport, 73
- Workflow, 124

- Yee-Gitter, 101

- Zeitbereich, 98
- Zeitinvarianz, 48
- Zeitschritt, 102
- Zeitsignale, 107
- Zentraler Differenzenquotient, 101
- Zirkular polarisiertes Feld, 266
- Zirkulare Polarisation, 75, 263
- Zweidrahtleitung, 155
- Zweitorparameter, 106
- Zylinder, 220
- Zylinderkondensator, 205
- Zylinderkoordinatensystem, 314
- Zylinderspule, 183
- Zylinderwelle, 240
- Zylindrischer Leiter, 228