

Alexander von Weiss

Die elektromagnetischen Felder

nachrichtentechnik

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Jesorsky, Nürnberg

Prof. Dr. techn. Alexander von Weiss, Nürnberg

In der NTE-Reihe sollen die wichtigsten Theorien der Nachrichtentechnik erfaßt, ihre technischen Anwendungen herausgestellt und einschlägige Methoden, Verfahren und Technologien behandelt werden. Die Reihe wendet sich an Studenten mit abgeschlossenem Vorexamen und an Lehrende aus allen Zweigen der Nachrichtentechnik und der Allgemeinen Elektrotechnik an Fachhochschulen und Technischen Universitäten sowie an Ingenieure im Berufsleben.

Band 1 Die elektromagnetischen Felder

Einführung in die Feldtheorie und ihre Anwendung
von A. v. Weiss

Alexander von Weiss

Die elektromagnetischen Felder

**Einführung in die Feldtheorie
und ihre Anwendung**

Mit 77 Beispielen
und 197 Bildern



Friedr. Vieweg & Sohn Braunschweig / Wiesbaden

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Weiss, Alexander von:

Die elektromagnetischen Felder: Einf. in d.
Feldtheorie u. ihre Anwendung/Alexander von
Weiss. — Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg, 1983.
(Nachrichtentechnik; Bd. 1)

NE: GT

1983

Alle Rechte vorbehalten

© Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig 1983

Die Vervielfältigung und Übertragung einzelner Textabschnitte, Zeichnungen oder Bilder, auch für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, gestattet das Urheberrecht nur, wenn sie mit dem Verlag vorher vereinbart wurden. Im Einzelfall muß über die Zahlung einer Gebühr für die Nutzung fremden geistigen Eigentums entschieden werden. Das gilt für die Vervielfältigung durch alle Verfahren einschließlich Speicherung und jede Übertragung auf Papier, Transparente, Filme, Bänder, Platten und andere Medien.

Umschlagentwurf: Peter Lenz, Wiesbaden
Satz: Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig

ISBN-13: 978-3-528-04225-7 e-ISBN-13: 978-3-322-85309-7

DOI: 10.1007/978-3-322-85309-7

Vorwort

Enormes Anwachsen des Wissensstoffes begleitet von einer bisher nicht gekannten Innovationsdynamik kennzeichnet die technische Entwicklung der letzten zwanzig Jahre in der vielschichtigen Elektrotechnik. Eine Neuauflage der seit 1969 vergriffenen 3. Auflage der „Übersicht über die Theoretische Elektrotechnik“ des Verfassers, von der bereits Teil II gemeinsam mit Prof. Dr. H. Kleinwächter verfaßt wurde, müßte daher zu einer Buchreihe mit mehreren Verfassern erweitert werden, um allen Leserwünschen einigermaßen entgegenzukommen. So befaßt sich das vorliegende Buch nur mit der Lehre von den elektromagnetischen Feldern, dem eigentlichen Kerngebiet der Theoretischen Elektrotechnik. Es bildet das Fundament für viele Zweige der Nachrichtentechnik und der ihr angegliederten Fachgebiete und erschien daher besonders geeignet zu sein, um die NTE-Schriftenreihe zu eröffnen.

Behandelt werden die elektromagnetischen Felder und ihre technische Anwendung, die an 77 Anwendungsbeispielen erläutert wird. Der Stoffumfang reicht von den statischen Feldern bis zu den Mikrowellen und Lichtwellen in Lichtwellenleitern. Den Abschluß bildet ein kurzer Blick in die vierdimensionale Raum-Zeit-Welt; er soll eine Vertiefung des Verständnisses für die physikalischen Zusammenhänge vermitteln. Als Einführung in die Feldtheorie beschränkt sich die Stoffauswahl auf das Wesentliche und vermeidet ein detailliertes Eindringen in die anspruchsvolle mathematische Welt der Theoretischen Elektrotechnik. Im Vordergrund steht die physikalische Deutung der Naturvorgänge, der viel Raum gewidmet wird. Das Buch will zum Erkennen und Verstehen des physikalischen Geschehens aus möglichst übergeordneter Sicht verhelfen, das Verständnis für die Notwendigkeit exakt mathematischer Formulierungen wecken sowie zu den mathematischen Ansätzen bei der technischen Anwendung der Feldtheorie auf spezielle Probleme als Brücke zwischen Theorie und Praxis führen.

Die Darstellung versucht weitgehend die Maxwell'schen Gedankengänge mit ihrer affin-invarianten Form der Feldgleichungen herauszustellen. Der felderfüllte Raum, materiefrei oder mit Materie angefüllt, wird dabei als ein Kontinuum betrachtet. Doch bereits die Erklärung selbst elementarer Vorgänge bei der Elektrizitätsleitung ebenso wie die Behandlung der polarisierten und magnetisierten Materie stößt an die Grenzen der Feldtheorie als phänomenologische Theorie des Makrokosmos und kann auf eine atomistische Betrachtung nicht verzichten. Zum besseren Verständnis der Naturvorgänge dient ferner bei physikalischen Betrachtungen die sich in der Elektrodynamik immer mehr durchsetzende Darstellung der Feldgrößen als Multivektoren¹⁾; sie ermöglicht eine besonders anschauliche, klare und eindeutige Unterscheidung ihres Vektorcharakters. Auch im letzten Kapitel kommt der äußere Kalkül nochmals zur Anwendung, wobei seine große Leistungsfähigkeit erkennbar wird.

¹⁾ Siehe Schrifttum [2.4], [2.11], [2.12], [2.17], [2.21].

Vom Leser vorausgesetzt wird die Kenntnis der Grundlagen der Gleich- und Wechselstromtechnik und ihre mathematische Behandlung im Umfang der „Allgemeinen Elektrotechnik“ des Verfassers [1.4]. Die verlangten mathematischen Vorkenntnisse gehen hinsichtlich Grundlagen der klassischen Vektoranalysis und Grundkenntnisse zur Lösung gewöhnlicher und partieller Differentialgleichungen nicht über das hinaus, was normalerweise von Studenten der Elektrotechnik nach abgeschlossenem Vorexamen erwartet wird. Intensive Mitarbeit des Lesers bleibt jedoch unverzichtbar, denn wirkliches Wissen muß erarbeitet werden; das Buch kann dabei nur Helfer sein.

Der Welt des Ingenieurs angepaßt, wird durchwegs das Vierersystem mit den kohärenten SI-Einheiten verwendet. Um jedoch zu einem kritischen Nachdenken anzuregen, wird insbesondere bei physikalischen Betrachtungen auf das Fünfersystem hingewiesen, das wegen seiner Systeminvarianz in der Raum-Zeit-Welt angewendet wird. Die Formelzeichen entsprechen den Empfehlungen des AEF, dabei wird im Vorgriff auf eine noch in Vorbereitung befindliche AEF-Empfehlung die elektrische Leitfähigkeit mit κ bezeichnet. Überschneidungen mit der Flächenladungsdichte σ oder bei der Wellenausbreitung mit der Fortpflanzungskonstante γ wären sonst unvermeidbar.

In zahlreichen Diskussionen mit Fachkollegen erhielt ich viele Anregungen und wertvolle Hinweise zur Verbesserung der Darstellung. Mein besonderer Dank richtet sich dabei an die Herren Prof. Dr. *Helmut Dietz*, Nürnberg und Prof. Dr.-Ing. *Anton Vlcek*, Darmstadt. Zu danken habe ich ferner dem Vieweg-Verlag für die angenehme Zusammenarbeit sowie für die schöne Ausstattung des Buches und den sauberen Formelsatz. Herrn *Michael Langfeld* bin ich für das stets gezeigte Verständnis und Entgegenkommen bei der durch Krankheit bedingten Verzögerung der Manuskriptabgabe zu großem Dank verpflichtet.

Nürnberg, Juli 1983

A. von Weiss

Inhaltsverzeichnis

Abschnitt I Einführende Grundlagen	1
1 Mathematische Hilfsmittel	1
1.1 Grundlagen der Vektoralgebra und Vektoranalysis	1
1.1.1 Skalar und Vektor, Ortsfunktion	1
1.1.2 Elementare Differentialoperationen	3
1.1.3 Zusammengesetzte Differentialoperationen	8
1.1.4 Integralsätze	9
1.1.5 Orthogonale krummlinige Koordinaten	9
1.2 Begriffe der äußeren Algebra	10
1.2.1 Multivektoren	10
1.2.2 Äußere Differentiation	13
1.3 Funktionen komplexer und reeller Veränderlicher	16
1.3.1 Funktionen komplexer Veränderlicher	16
1.3.2 Zylinderfunktionen	17
1.3.3 Kugelfunktionen	20
2 Einführende Betrachtungen	22
2.1 Physikalische Größen, Maßsysteme	22
2.1.1 Physikalische Größen	22
2.1.2 Maßsysteme der Elektrodynamik	23
2.1.3 Konventionelle und rationale Schreibweise	25
2.2 Theorien zur Beschreibung der Elektrodynamik	25
2.2.1 Fernwirkung und Nahwirkung	25
2.2.2 Feldtheorie und Elektronentheorie	26
2.2.3 Zur Darstellung der Elektrodynamik	27
3 Die elektromagnetischen Feldgrößen	29
3.1 Die elektrischen Feldgrößen	29
3.1.1 Elektrische Ladung, elektrisches Feld	29
3.1.2 Elektrische Feldstärke, skalares elektrisches Potential	30
3.1.3 Influenz, elektrischer Fluß und Flußdichte	33
3.1.4 Elektrische Stromstärke und Stromdichte	35
3.1.5 Verknüpfung der elektrischen Größen	37
3.1.6 Physikalische Deutung der elektrischen Feldgrößen	38
3.2 Die magnetischen Feldgrößen	39
3.2.1 Magnetisches Feld, magnetischer Fluß	39
3.2.2 Magnetische Feldstärke, magnetische Flußdichte	41

3.2.3	Magnetische Spannung, Durchflutung	43
3.2.4	Zur Ableitung der magnetischen Feldgrößen	45
3.2.5	Physikalische Deutung der magnetischen Feldgrößen	46
3.3	Spezielles Verhalten der vektoriellen Feldgrößen	46
3.3.1	Die Feldgrößen \mathbf{H} und \mathbf{B}	46
3.3.2	Verhalten an Grenzflächen homogener Materie	47
3.4	Verkettung und Einteilung der Felder	50
3.4.1	Verkettung beider Felder	50
3.4.2	Einteilung der Elektrodynamik	51
3.4.3	Quellen- und Wirbelfelder	54
Abschnitt II Das elektrische Feld		57
4	Das elektrostatische Feld	57
4.1	Einige Grundbegriffe	57
4.1.1	Punktladungen	57
4.1.2	Dipol, Multipole	59
4.1.3	Linienladung, Liniendipol	61
4.1.4	Homogene Dipolschichten	64
4.2	Das elektrostatische Feld in dielektrischer Materie	65
4.2.1	Polarisation des Dielektrikums	65
4.2.2	Das Feld im Dielektrikum	67
4.2.3	Polarisationsformen, dielektrische Stoffe	68
4.2.4	Elektrete	69
4.2.5	Piezoelektrizität, Elektrostriktion	70
4.3	Kondensatoren	71
4.3.1	Allgemeines	71
4.3.2	Plattenkondensatoren	72
4.3.3	Der Kugelkondensator	73
4.3.4	Zylinderkondensator, Koaxialkabel	73
4.4	Kräfte und Energie im elektrostatischen Feld	75
4.4.1	Kraftwirkung auf punktförmige Ladungsträger	75
4.4.2	Kraftwirkung auf Dipole und ungeladene Körper	76
4.4.3	Kraftwirkung auf Träger von Flächenladungen	76
4.4.4	Mechanische Spannungen, Kräfte an Grenzflächen	78
4.4.5	Energie im elektrostatischen Feld	79
4.4.6	Ablenkung von Ladungsträgern, Elektronenoptik	81
5	Elektrostatische Probleme	85
5.1	Einfache elektrostatische Probleme	85
5.1.1	Allgemeines	85
5.1.2	Graphische und experimentelle Feldbildermittlung	86
5.1.3	Verfahren der Spiegelung	88

5.1.4	Kugel, zwei Kugeln	92
5.1.5	Einzelleiter, Doppelleiter	94
5.1.6	Mehrleitersysteme	98
5.1.7	Ladungsverteilung auf Leitern	102
5.2	Raumladungsfelder	106
5.2.1	Raumladungswolken	106
5.2.2	Feldverlauf bei Raumladungen	108
5.3	Die Potentialgleichung	110
5.3.1	Einführung	110
5.3.2	Einfache Lösungen	110
5.3.3	Probleme in der Ebene	112
5.3.4	Allgemeine Lösung in Zylinderkoordinaten	113
5.3.5	Allgemeine Lösung in Kugelkoordinaten	115
5.3.6	Zylinder- und Kugelsymmetrie	116
5.4	Konforme Abbildung	120
5.4.1	Aufgabe der konformen Abbildung in der Elektrostatik	120
5.4.2	Feldermittlung mit Hilfe komplexer Funktionen	121
5.4.3	Berechnung des elektrischen Flusses	123
6	Das stationäre elektrische Strömungsfeld	127
6.1	Kennzeichen und Grundgesetze	127
6.1.1	Grunderscheinungen	127
6.1.2	Grundgesetze	128
6.2	Räumliche Leiteranordnungen	131
6.2.1	Allgemeines	131
6.2.2	Kugel- und Halbkugelelektrode	131
6.2.3	Der Tiefenerder	133
6.2.4	Koaxialkabel und Rohrerder	134
6.3	Elektronen- und Ionenströme	136
6.3.1	Wesen und Mechanismus der Elektrizitätsleitung	136
6.3.2	Elektronenemission	137
6.3.3	Elektrizitätsleitung im Hochvakuum	139
6.3.4	Kennlinie der Gasentladung	144
6.3.5	Glimm- und Bogenentladung	146
Abschnitt III	Elektromagnetische Felder	150
7	Das Magnetfeld stationärer Ströme	150
7.1	Grundbegriffe und Grunderscheinungen	150
7.1.1	Magnetischer Dipol, magnetisches Moment	150
7.1.2	Magnetisches Vektorpotential, Biot-Savartsches Gesetz	152
7.1.3	Skalares magnetisches Potential, magnetische Doppelschicht	154

7.2	Magnetisches Feld in Materie	156
7.2.1	Die Magnetisierungskurve, Permeabilität	156
7.2.2	Das Feld innerhalb und außerhalb magnetisierter Stoffe	158
7.2.3	Dia- und Paramagnetismus	159
7.2.4	Ferro- und ferrimagnetische Stoffe	159
7.3	Berechnung einfacher magnetischer Felder	161
7.3.1	Gerader, stromdurchflossener Leiter	161
7.3.2	Mehrere parallele Leiter	164
7.3.3	Stromführender Kreisring und Zylinderspule	167
7.3.4	Stromleiter innerhalb und außerhalb von Eisenkörpern	169
7.4	Induktivität und Gegeninduktivität	170
7.4.1	Die Selbstinduktivität	170
7.4.2	Gegeninduktivität und Streuinduktivität	170
7.4.3	Induktivität einiger Anordnungen	172
7.4.4	Die Betriebsinduktivität von Mehrleitersystemen	175
8	Kräfte und Energie	179
8.1	Kräfte und Energie im magnetischen Feld	179
8.1.1	Kraftwirkung auf magnetische Dipole	179
8.1.2	Kräfte auf Ladungsträger und Stromleiter	179
8.1.3	Induktionswirkung im zeitlich konstanten Magnetfeld	182
8.1.4	Kräfte zwischen Stromleitern	184
8.1.5	Kraftwirkung auf Grenzflächen	185
8.1.6	Energie im magnetischen Feld	186
8.1.7	Berechnung der Kraftwirkung aus der Induktivität	188
8.1.8	Räumliche Kraftdichten	189
8.2	Die Maxwellschen Spannungen	190
8.2.1	Der Maxwellsche Spannungsvektor	190
8.2.2	Berechnung des Maxwellschen Spannungstensors	191
8.2.3	Anwendungsbeispiele	196
9	Zeitliche veränderliche Felder	199
9.1	Der Induktionsvorgang und seine Deutung	199
9.1.1	Das Induktionsgesetz	199
9.1.2	Deutung des Induktionsvorgangs	202
9.1.3	Zur Anwendung des Induktionsgesetzes	204
9.2	Energie und Energieströmung	206
9.2.1	Elektromagnetische Feldenergie	206
9.2.2	Energieströmung und Poynting-Vektor	207
9.2.3	Energiebetrachtungen	209
9.2.4	Der komplexe Poynting-Vektor	211
9.3	Verschiedene Formen der Feldgleichungen	212
9.3.1	Die erweiterten Feldgleichungen	212
9.3.2	Die Feldgleichungen in der Elementarstrom- und Mengentheorie	213
9.3.3	Die Feldgleichungen im Frequenzbereich	214

9.4	Physikalisch-mathematische Betrachtungen	215
9.4.1	Quantitäts- und Intensitätsgrößen	215
9.4.2	Die Feldkonstanten	216
9.4.3	Vektorgrad der Feldgrößen	217
9.4.4	Abschließende Betrachtungen	220
Abschnitt IV Elektromagnetische Wellen		222
10	Wellen im Dielektrikum und in Leitern	222
10.1	Allgemeine Wellengleichung, Wellenformen	222
10.1.1	Allgemeines	222
10.1.2	Die Wellengleichung	222
10.1.3	Elektrodynamische Potentiale	223
10.1.4	Homogene ebene Wellen	226
10.1.5	Wellenformen	228
10.1.6	Phasen- und Gruppengeschwindigkeit	231
10.2	Ebene Wellen	233
10.2.1	Ebene Wellen im Dielektrikum	233
10.2.2	Ebene Felder in Leitern	233
10.2.3	Zur Schirmwirkung von Blechen	236
10.2.4	Wellen an Grenzflächen	237
10.2.5	Wellen in Medien mit freien Elektronen	241
10.3	Strom- und Feldverdrängung	242
10.3.1	Zur Entstehung der Strom- und Feldverdrängung	242
10.3.2	Wirbelströme in längsmagnetisierten Blechen	243
10.3.3	Wirbelströme in zylindrischen Leitern	247
10.3.4	Wirkwiderstand und innere Induktivität	249
11	Ausbreitung freier und geführter Wellen	252
11.1	Lösungen der skalaren Wellengleichung	252
11.1.1	Zur Einführung elektrodynamischer Potentiale	252
11.1.2	Ausbreitung ebener Wellen	254
11.1.3	Zylinderwellen	256
11.1.4	Kugelwellen	260
11.2	Wellen im freien Raum	262
11.2.1	Wellenablösung	262
11.2.2	Retardierte Potentiale	263
11.2.3	Der Hertzsche und Fitzgeraldsche Dipol	264
11.2.4	Das Strahlungsfeld oszillierender Dipole	265
11.2.5	Leistungsfluß und Strahlungswiderstand	268
11.2.6	Ausstrahlung und Empfang von Wellen	269
11.2.7	Richtstrahlung	272

11.3	Hohlleiter und dielektrische Leitungen	274
11.3.1	Übersicht	274
11.3.2	Wellen in Rechteckrohren	276
11.3.3	Wellen in Rundrohren	279
11.3.4	Verluste in Hohlleitern	282
11.3.5	Hohlraumresonatoren	283
11.3.6	Dielektrische Wellenleiter	284
11.4	Wellen auf Doppelleitungen	286
11.4.1	Die Telegraphengleichung	286
11.4.2	Wellen auf verzerrungsfreier Leitung	290
11.4.3	Die Telegraphengleichung im Frequenzbereich	291
11.4.4	Sprung- und Wanderzellen auf Leitungen	293
Abschnitt V Die Raum-Zeit-Welt		298
12	Einführung in die vierdimensionale Elektrodynamik	298
12.1	Vierdimensionale Darstellung	298
12.1.1	Relativitätsprinzip und Lichtgeschwindigkeit	298
12.1.2	Die vierdimensionalen Koordinaten	298
12.1.3	Galilei- und Lorentztransformation	300
12.2	Die vierdimensionalen Feldgrößen	303
12.2.1	Die Feldtensoren	303
12.2.2	Die Feldgleichungen in der Raum-Zeit-Welt	307
12.2.3	Die Feldgleichungen der Elementarstromtheorie	310
12.2.4	Diskussion der Ergebnisse	310
Kennzeichnung und Formelzeichen der wichtigsten Größen		313
Schrifttum		315
Anhang		316
Tafel I Dimensionssysteme		316
Tafel II Schreibweise einiger Gleichungen in den verschiedenen Systemen		317
Tafel III Einheiten im Vierer- und Fünfersystem		318
Wichtige Konstanten, Permittivität und Permeabilität einiger Stoffe		319
Sachverzeichnis		320