Elektromagnetische Feldtheorie

Günther Lehner

Elektromagnetische Feldtheorie

für Ingenieure und Physiker

7. bearbeitete Auflage

Springer

Prof. Dr. rer. nat. Günther Lehner (em.)
Universität Stuttgart
Fak. 05 Informatik, Elektrotechnik
und Informationstechnik
Pfaffenwaldring 47
70569 Stuttgart

ISBN 978-3-642-13041-0 e-ISBN 978-3-642-13042-7
DOI 10.1007/978-3-642-13042-7
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.

Einbandgestaltung: eStudioCalamar, Figueres/Berlin

Gedruckt auf säurefreiem Papier

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

Für Lore († 1984)
und Helma
ohne die dieses Buch
nicht entstanden wäre

Vorwort zur 7. Auflage

Die Theorie elektromagnetischer Felder ist schon lange nicht mehr ohne die spezielle Relativitätstheorie denkbar. Deshalb habe ich das vorliegende Buch schon vor längerer Zeit durch einen *Anhang über die spezielle Relativitätstheorie* ergänzt. Diese ist, wie Einstein zeigte, bereits in den Maxwellschen Gleichungen enthalten. Vieles in der Theorie elektromagnetischer Felder kann auch erst mit Hilfe der speziellen Relativitätstheorie wirklich verstanden werden, die scheinbar mißglückter Versuche zur Lichtausbreitung wegen entstanden ist. Die Versuche von Michelson bzw. Michelson und Morley gehören, gerade weil sie ihr ursprüngliches Ziel (die unterschiedlichen Lichtgeschwindigkeiten in verschiedenen Inertialsystemen zu messen) verfehlt haben und verfehlen mußten, zu den folgenreichsten und wichtigsten Versuchen der Wissenschaftsgeschichte. Sie zeigen, daß die Vorstellungen zutreffen, die Einstein zur speziellen Relativitätstheorie geführt haben. Nun besteht das Licht aus Lichtquanten (Photonen). Diese besitzen Energie und, nach der speziellen Relativitätstheorie, auch Masse (allerdings, wie üblicherweise angenommen, keine Ruhmasse – sollten sie dennoch eine Ruhmasse haben, so muß sie sehr klein sein; siehe Anhang A1). Sie unterliegen deshalb wie jede andere Masse der Gravitation. Sie verhalten sich in Gravitationsfeldern allerdings anders als es die klassische Newtonsche Gravitationstheorie erwarten läßt. Fliegen beispielsweise Lichtquanten nah an der Sonne (oder einer anderen Masse) vorbei, so werden sie von dieser angezogen und aus ihrer geradlinigen Bahn um einen bestimmtem Winkel abgelenkt. Diese Ablenkung kann man messen. Sie erweist sich als doppelt so groß wie man es nach dem Newtonschen Gravitationsgesetz erwarten würde. Die Erklärung ergibt sich aus einer ebenfalls von Einstein stammenden Verallgemeinerung der speziellen Relativitätstheorie, der sogenannten allgemeinen Relativitätstheorie. Die Verallgemeinerung besteht darin, daß zwar die vierdimensionale Raumzeit beibehalten wird jedoch nun unter dem Einfluß der im Raum vorhandenen Massen zu einer vierdimensionalen „gekrümmten" Raumzeit wird. Wenn Lichtbahnen, die per Definitionem kürzesten Verbindungen zwischen zwei Punkten (Geodäten), gekrümmt sind, dann ist der Raum nicht „flach" (euklidisch) sondern gekrümmt. Die Geometrie ist letzten Endes keine mathematische, sondern eine physikalische Disziplin, die wesentlich durch die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen geprägt wird. So hielt ich es für angemessen, einen *Anhang über die allgemeine Relativitätstheorie* als einer, wie ich meine, nicht unwesentlichen Ergänzung der Theorie elektromagnetischer Felder aufzunehmen. Selbstverständlich kann dieser kurze Anhang nur eine erste Einführung in deren großes Gebäude bieten. Er könnte und sollte den einen oder anderen Leser dazu verführen, die weiterführende Literatur zu studieren. Die allgemeine Relativitätstheorie ist schon heute nicht nur theoretisch, sondern auch technisch bedeutsam und sie wird wohl bald noch bedeutsamer werden (etwa in der Satelliten- und Raumfahrttechnik). Herrn Kollegen Professor Wolfgang Weidlich schulde ich Dank für anregende Gespräche über die allgemeine Relativitätstheorie.

Von diesem neuen Anhang abgesehen, habe ich mich auf die Korrektur einiger erst jetzt entdeckter Druckfehler beschränkt.

Wie bisher immer habe ich dem Springer-Verlag und seinen Mitarbeitern für die stets gute und vorbildlich konstruktive Zusammenarbeit zu danken.

Stuttgart, im Frühjahr 2010 Günther Lehner

Vorwort

Form nur ist Glaube und Tat,
die erst von Händen berührten,
doch dann den Händen entführten
Statuen bergen die Saat.

Gottfried Benn

Die elektromagnetische Feldtheorie stellt ein für Naturwissenschaftler und Ingenieure grundlegendes Wissensgebiet dar. Die vorliegende Darstellung ist aus einer Vorlesung hervorgegangen, die der Autor seit dem Jahr 1972 an der Universität Stuttgart für die Studenten der Elektrotechnik – sie ist für diese Pflichtfach – gehalten hat. Dennoch hofft der Autor, daß Stoffauswahl und Art der Behandlung das Interesse nicht nur von Ingenieuren, sondern auch von Naturwissenschaftlern finden.

Durch die Form, die Maxwell ihr gegeben hat, kann die elektromagnetische Feldtheorie geradezu als ein Musterbeispiel einer in sich geschlossenen, großartigen, ja schönen Theorie gelten, die jeden begeistert, der sich ernsthaft damit beschäftigt. Dazu gehört, daß sie sowohl in ihrem durchaus anschaulichen Gehalt wie auch in ihrer formalen Ausgestaltung aufgenommen wird. Deshalb hat der Autor sich gleichzeitig um Anschaulichkeit auf der einen, um begriffliche Klarheit und formale Strenge auf der anderen Seite bemüht. Er ist der Überzeugung, daß Anschaulichkeit und formale Strenge keine Widersprüche sind, sondern zwei verschiedene Seiten jeder brauchbaren und vernünftigen Theorie. Niemand sollte Scheu vor mathematisch formulierten Theorien haben. Es gibt und es kann auch nichts Brauchbareres geben als eine gute und logisch konsequente – d. h. eine strenge – Theorie. Natürlich setzt die Anwendung einer Theorie deren anschauliche, ja phantasievolle Durchdringung voraus. Die konzentrierte mathematisch formulierte Theorie ist ja Zentrum und Durchgangspunkt einer zweifachen Anstrengung des menschlichen Geistes, nämlich einerseits das nur scheinbar Chaotische der uns umgebenden Erscheinungen zu ordnen und den ihnen gemeinsamen Kern zu erkennen und andererseits aus diesem Kern heraus die unglaubliche Vielfalt der Erscheinungen neu zu sehen und zu verstehen. Es ist kein Zufall – und deshalb das oben vorangestellte Motto von Gottfried Benn –, daß man dasselbe von der Kunst sagen kann. Kunst und Wissenschaft gehören eng zusammen, auch wenn das heute oft nicht so aussieht. Sie sind zwei einander ergänzende, nicht einander widersprechende Wege zu einem Ziel. Beide wollen ihren Aussagen die vollkommene Form geben. Gerade dies ist in der elektromagnetischen Feldtheorie gelungen. Wenn man Wert und Schönheit einer wissenschaftlichen Theorie daran mißt, wie sie den erwähnten Anstrengungen dient, dann wird die elektromagnetische Feldtheorie einen hervorragenden Platz einnehmen, – vier einfache, unglaublich elegante und (wenn man sich die Mühe gemacht hat, sie zu verstehen) auch anschauliche Gleichungen, eben die Maxwellschen Gleichungen und, ihnen gegenüber, die überwältigende und nicht ausschöpfbare Vielfalt der durch sie beschriebenen elektromagnetischen Erscheinungen in Natur und Technik. Dieses Lehrbuch wird sein Ziel erreicht haben, wenn der Leser am Ende seiner Lektüre dem zustimmen kann.

Auch die erforderlichen mathematischen Hilfsmittel sollten nicht in Form auswendig gelernter Rezepte angewandt werden, sondern mit Anschauung und Phantasie erfüllt werden. Nehmen wir z. B. die in der Feldtheorie ständig benutzen Integralsätze von Gauß und Stokes. Sie hängen mit den Begriffen der Divergenz (div) und der Rotation (rot) von Vektorfeldern zusammen. Beide Begriffe sind koordinatenfrei und ganz anschaulich definiert, wobei die Beziehung zu Quellen (oder Senken) und Wirbeln deutlich wird. Die beiden genannten Integralsätze wiederum sind nichts anderes als unmittelbar anschauliche und beinahe selbstverständliche Konsequenzen dieser beiden Definitionen. An dieser Stelle ist auch erwähnenswert, daß die Maxwellschen Gleichungen zwei Vektorfelder mit ihren Wechselwirkungen, das elektrische und das magnetische Feld, auf die eleganteste und einfachste denkbare Art und Weise beschreiben. Man kann nämlich beweisen und sich auch anschaulich klar machen, daß ein Vektorfeld durch Angabe aller Quellen und Wirbel vollständig und eindeutig beschrieben ist (das ist der Inhalt des in einem Anhang behandelten Helmholtzschen Theorems). Genau diesem Zweck dienen die Maxwellschen Gleichungen in bewundernswerter Weise. Zwei von ihnen beschreiben die Quellen und Wirbel des elektrischen, zwei die des magnetischen Feldes. Die Zusammenhänge sind allerdings materialabhängig, weshalb noch drei weitere Gleichungen erforderlich sind, die Aussagen über Leitfähigkeit, Polarisierbarkeit und Magnetisierbarkeit der beteiligten Medien zum Inhalt haben.

Die erwähnte Geschlossenheit der elektromagnetischen Feldtheorie ist eine formale. Inhaltlich steht sie keineswegs für sich allein und isoliert da. Sie hängt im Gegenteil eng mit der ganzen Physik zusammen, besonders mit der Relativitäts- und der Quantentheorie. Darüber hinaus ist keineswegs klar, ob sie nicht eines Tages im Lichte neuer Erkenntnisse modifiziert werden muß. Wie jede Theorie, kann sie Geltung nur im Rahmen aller bisher gemachten Erfahrungen und Experimente und der dabei erzielten Meßgenauigkeit beanspruchen. Wer sich mit elektromagnetischer Feldtheorie beschäftigt, wird bald erkennen, daß es viele und zum Teil sehr wesentliche noch offene Fragen gibt. Es war dem Autor wichtig, dies deutlich werden zu lassen. Im Text wird mehrfach auf solche Fragen hingewiesen, von denen einige in Anhängen etwas vertieft werden (wobei dann dort, allerdings auch nur dort, einiges aus der Quantenmechanik vorausgesetzt wird, da diese Fragen anders nicht vertieft werden können). So steht, um ein Beispiel zu nennen, das Coulombsche Gesetz schon in der Schule fast am Anfang aller Beschäftigung mit Feldtheorie und Physik überhaupt. Man könnte deshalb geneigt sein, es für endgültig und selbstverständlich zu halten. In Wirklichkeit ist das keineswegs der Fall, wenn auch bis heute Abweichungen davon nicht nachgewiesen werden konnten. Andererseits hätte es sehr merkwürdige Konsequenzen, sollte das Coulombsche Gesetz doch nicht exakt gelten. So wäre dann z. B. die Ruhmasse von Photonen nicht exakt Null, und es gäbe auch keine elektromagnetische Strahlung beliebig kleiner Frequenz. Und ist es nicht auch merkwürdig, daß die bisher genaueste Überprüfung des Coulombschen Gesetzes auf Satellitenmessungen am magnetischen Dipolfeld des Planeten Jupiter beruht? Diese grundsätzliche Offenheit der elektromagnetischen Feldtheorie (wie jeder Theorie) bedeutet jedoch nicht, daß die bisherigen Erkenntnisse fraglich seien. Sie sind so oft überprüft und bestätigt worden, daß sie (im Rahmen der bisher erreichten Meßgenauigkeit) keinen Zweifel unterliegen. Der denkbare Fortschritt zu neuen Erkenntnissen führt nicht dazu, daß die bisherigen Theorien ungültig werden, sondern dazu, daß sie in neuen, umfassenderen Theorien aufgehen, wobei dann unter Umständen alte Begriffe eine Revision erfahren und in einem neuen, manchmal sehr unerwarteten Licht erscheinen (wie z. B. der Begriff des Vektorpotentials durch den Bohm-Aharonov-Effekt). So ist die elektromagnetische Feldtheorie trotz dieser Offenheit eine sehr solide Grundlage der Naturwissenschaft und der Technik, der sich der konstruierende Ingenieur in allen gegenwärtigen und zukünftig absehbaren Bereichen der Technik in vollem Umfang anvertrauen kann.

Letzten Endes kann der Autor nur hoffen, daß das vorliegende Lehrbuch seinen Lesern die Schönheit und die Nützlichkeit der elektromagnetischen Feldtheorie – beides hängt eng zusammen – näherbringen kann.

Es ist dem Autor ein Bedürfnis, allen zu danken, die zur Realisierung dieses Lehrbuches beigetragen haben, sowohl im Springer-Verlag als auch im Institut für Theorie der Elektrotechnik der Universität Stuttgart. Mein Dank gilt insbesondere auch Herrn Dipl.-Ing. H. Maisch für die Durchsicht des Manuskripts und die Unterstützung bei der Herstellung vieler Figuren sowie Frau K. Schmidt und Frau H. Stängle für ihre Arbeit am Manuskript.

Stuttgart, im Sommer 1990 Günther Lehner

Inhaltsverzeichnis

Symbol-Liste

Allgemeines

$\sim$	(z. B. $\tilde{f}$) bezeichnet eine aus f durch eine Integraltransformation entstehende Funktion (Fourier-, Hankel- oder Laplace-Transformation).
$*$	(z. B. z^*, w^*) bezeichnet die jeweils konjugiert komplexe Größe (z. B. zu z, w) oder eine dual zugeordnete Größe (z. B. $\mathbf{A}^*$ zu $\mathbf{A}$, (φ^* zu φ).
n, $\perp$	als Index bezeichnet senkrechte Komponenten.
t, $\|$	als Index bezeichnet tangentiale Komponenten.
$\oint$	ein Kreis im Integralzeichen kennzeichnet die Integration über einen geschlossenen Weg (bei einem Linienintegral) oder die Integration über eine geschlossene Oberfläche (bei einem Flächenintegral).
∇	bezeichnet den Nabla-Operator $[\nabla = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z})]$
$\hat{}$	(z. B. $\hat{H}$) kennzeichnet quantenmechanische Operatoren.

Lateinische Buchstaben

$\mathbf{a}$, a_x, a_y, a_z	Vektor und seine kartesischen Komponenten
A	Fläche
A	Arbeit
$\mathbf{A}$	magnetisches Vektorpotential
$\mathbf{A}^*$	elektrisches (zum magnetischen duales) Vektorpotential
arg(z)	Argument (Phasenwinkel) einer komplexen Zahl.
ber(), bei()	Kelvinsche Funktionen
$\mathbf{B}$	magnetische Induktion
$\mathbf{B}_0$	Amplitude der magnetischen Induktion einer elektromagnetischen Welle
B_n	senkrechte (normale) Komponente von $\mathbf{B}$
B_t	tangentiale Komponente von $\mathbf{B}$

c	Lichtgeschwindigkeit, auch Vakuumlichtgeschwindigkeit
c_{G}	Gruppengeschwindigkeit des Lichts
c_{Ph}	Phasengeschwindigkeit des Lichts
c_{ik}	Influenzkoeffizienten
C_{ik}	Kapazitätskoeffizienten
C	Kapazität
C'	Kapazität pro Längeneinheit
cos(), cosh()	Cosinus, Hyperbelcosinus
$\mathbf{D}$	dielektrische Verschiebung
D_{n}	senkrechte (normale) Komponente von $\mathbf{D}$
D_{t}	tangentiale Komponente von $\mathbf{D}$
$\mathrm{d}\mathbf{A}$, $\mathrm{d}\mathbf{a}$	Vektor des Flächenelements
$\mathrm{d}A$, $\mathrm{d}a$	Betrag des Flächenelements
$\frac{\partial}{\partial t}, \frac{\partial}{\partial x}, \ldots$	partielle Ableitungen nach $t, x, \ldots$
$\frac{\partial \phi}{\partial \mathrm{n}}$	senkrechte Komponente des Gradienten der Funktion ϕ
$\mathrm{d}t$	Differential der Zeit t
$\mathrm{d}\mathbf{s}$	vektorielles Linienelement
$\mathrm{d}s$	Betrag des Linienelementes
$\mathrm{d}\tau$	Volumenelement
$\mathrm{d}\Omega$	Raumwinkelelement
$\mathrm{d}\alpha$	Winkelelement
d	Abstand, Schichtdicke, Skintiefe
$\operatorname{div}\mathbf{a}$	Divergenz des Vektors $\mathbf{a}$
$\mathbf{E}$	elektrische Feldstärke
E	Betrag der Feldstärke oder komplexe Feldstärke, $E = E_{\mathrm{x}} + \mathrm{i}E_{\mathrm{y}}$
E_{n}	senkrechte (normale) Komponente von $\mathbf{E}$
E_{t}	tangentiale Komponente von $\mathbf{E}$
$\mathbf{E}_0$	Amplitude der elektrischen Feldstärke einer elektromagnetischen Welle
$\mathbf{E}_{\mathrm{e0}}$, $\mathbf{E}_{\mathrm{r0}}$, $\mathbf{E}_{\mathrm{g0}}$	Amplituden der einfallenden, reflektierten, gebrochenen Welle
$\mathbf{E}_{\mathrm{e}}$	eingeprägte Feldstärke oder Feldstärke der einfallenden elektromagnetischen Welle
$E\left(\frac{\pi}{2}, k\right)$	vollständiges elliptisches Integral 2. Art
$\mathbf{e}_{\mathrm{u}}$	Einheitsvektor in Richtung der Koordinate u
e	elektrische Elementarladung
e	die Zahl e (Basis der natürlichen Logarithmen)
$\exp(x) = \mathrm{e}^{\mathrm{x}}$	Exponentialfunktion
erf()	Fehlerfunktion
erfc()	komplementäre Fehlerfunktion [1 − erf()]
$f()$	Funktion
$\mathbf{F}$	Kraft
F	Betrag der Kraft
F	Potential (neben φ und ϕ)

$F = (F_{\mathrm{ik}})$	Feldtensor
$\mathbf{f}, \mathbf{f}'$	Dreierkraft im Bezugssystem Σ bzw. Σ'
G	Newtonsche Gravitationskonstante
$g_{\mu\nu}$	metrischer Tensor
G	Leitwert
G'	Leitwert pro Längeneinheit
$G\,(\mathbf{r}; \mathbf{r}_0)$	Greensche Funktion
$G_{\mathrm{D}}(\mathbf{r}; \mathbf{r}_0)$	Greensche Funktion des Dirichletschen Randwertproblems
$G_{\mathrm{N}}(\mathbf{r}; \mathbf{r}_0)$	Greensche Funktion des Neumannschen Randwertproblems
$\mathbf{g}, \mathbf{g}_{\mathrm{e}}$	elektrische Stromdichte
$\mathbf{g}_{\mathrm{m}}$	zu $\mathbf{g}_{\mathrm{e}}$ duale magnetische Stromdichte
$\mathbf{g}_{\mathrm{magn}}$	Magnetisierungsstromdichte
grad f	Gradient der Funktion f
h	Plancksche Konstante
$\hbar$	Plancksche Konstante dividiert durch $2\pi (h/2\pi)$
$\mathbf{H}$	magnetische Feldstärke
$\mathbf{H}_0$	Amplitude der magnetischen Feldstärke einer elektromagnetischen Welle
H_{n}	senkrechte (normale) Komponente von $\mathbf{H}$
H_{t}	tangentiale Komponente von $\mathbf{H}$
$H(x - x_0)$	Heavisidesche Sprungfunktion
H	Hamilton-Funktion
$\hat{H}$	Hamilton-Operator
I	Stromstärke
$I_{\mathrm{m}}()$	modifizierte Bessel-Funktion 1. Art zum Index m
i	imaginäre Einheit $\sqrt{-1}$
$J_{\mathrm{m}}()$	Bessel-Funktion zum Index m
$K_{\mathrm{m}}()$	Modifizierte Bessel-Funktion 2. Art zum Index m
$K\left(\frac{\pi}{2}, k\right)$	vollständiges elliptisches Integral 1. Art
$\mathbf{k}$	Flächenstromdichte
$\mathbf{k}_{\mathrm{magn}}$	Magnetisierungsflächenstromdichte
$\mathbf{k}$	Wellenvektor = Wellenzahlvektor
k	Wellenzahl, Betrag des Wellenvektors
$k = 8\pi G/c^4$	Proportionalitätskonstante in der Einsteinschen Feldgleichung
L, l	Länge
l	Wellenzahl
L_{ik}	Induktionskoeffizient
L, L_{il}	Selbstinduktivität
L'	Selbstinduktivität pro Längeneinheit
ln()	natürlicher Logarithmus
$L = (L_{\mathrm{ik}})$	Lorentz-Transformation
L^{-1}	inverse Lorentz-Transformation

L^T	transponierte Lorentz-Transformation
$\mathcal{L}(f)$	Laplace-Transformierte der Funktion f
$\mathcal{L}^{-1}(\tilde{f})$	inverse Laplace-Transformation
m	ganze Zahl
m	Masse
m_0	Ruhmasse
m_s, m_t	schwere Masse, träge Masse
$\mathbf{m}$	magnetisches Dipolmoment
m	Betrag des magnetischen Dipolmoments
$\mathbf{M}$	Magnetisierung (räumliche Dichte von **m**)
n	Brechungsindex
n	ganze Zahl
n	Zahl der Windungen pro Längeneinheit
N	Gesamtwindungszahl
N	Abkürzung für die häufig vorkommende Größe $N = \varepsilon\mu\omega^2 - \mu\kappa\mathrm{i}\omega - k_\mathrm{z}^2$
$N_\mathrm{m}()$	Neumannsche Funktion zum Index m
P	Punkt im Raum
P	Leistung
$\mathbf{P}$	Polarisation (räumliche Dichte von **p**)
$\mathbf{p}$	elektrisches Dipolmoment
p	Betrag des elektrischen Dipolmoments
$\mathbf{p}$	Impulsvektor
p	Betrag des Impulses
$\hat{\mathbf{p}}$	Operator des Impulsvektors
p_k	kanonische Impulskomponente
p	komplexe Zahl (besonders bei Laplace-Transformationen)
$P_\mathrm{n}^\mathrm{m}()$	zugeordnete Kugelfunktionen
$P_\mathrm{n}() = p_\mathrm{n}^0()$	Kugelfunktionen
p_ik	Potentialkoeffizienten
Q, Q_e	elektrische Ladung
Q_m	magnetische Ladung
q	elektrische Linienladungsdichte
Q_magn	fiktive magnetische Ladung
q_k	kanonische Ortskoordinate
R	Widerstand
R'	Widerstand pro Längeneinheit
R_magn	magnetischer Widerstand
R	Reflexionskoeffizient
R_s	Strahlungswiderstand
$R^\mathrm{k}{}_\mathrm{ars}$	Riemann-Christoffel-Krümmungstensor
R_ij	Ricci-Tensor
R	skalare Krümmung

$r_s = 2GM/c^2$	Schwarzschildradius
$\mathbf{r}$	Ortsvektor
$\dot{\mathbf{r}}$	Geschwindigkeit (Zeitableitung von $\mathbf{r}$)
$\ddot{\mathbf{r}}$	Beschleunigung (2. Zeitableitung von $\mathbf{r}$)
$\mathbf{r}, \mathbf{r}'$	Ortsvektor im Bezugssystem Σ bzw. Σ'
r, R	Radius in Kugelkoordinaten (zusammen mit θ, φ)
r	Radius in Zylinderkoordinaten (zusammen mit φ, z)
$\operatorname{rot} \mathbf{a}$	Rotation des Vektors $\mathbf{a}$
$\mathbf{S}$	Poynting-Vektor
sin(), sinh()	Sinus, Hyperbelsinus
tan()	Tangens
t	Zeit
t_0	Diffusionszeit
t_r	Relaxationszeit
$T_{\mu\nu}$	Energie-Impuls-Tensor
U	potentielle Energie
U	Spannung
U_{21}	Spannung zwischen zwei Punkten 1 und 2
u_i	induzierte Spannung
$\mathbf{u}, \mathbf{u}'$	Geschwindigkeit im Bezugssystem Σ bzw. Σ'
u	Leistungsdichte
u	Realteil einer komplexen Funktion $u + \mathrm{i}v$
u_1, u_2, u_3	allgemeine Koordinaten
V	Volumen
V_{eff}	effektives Potential im Schwarzschild-Gravitationsfeld
$\mathbf{v}$	Geschwindigkeit
v	Betrag der Geschwindigkeit
v_{Ph}	Phasengeschwindigkeit
v_{G}	Gruppengeschwindigkeit
W	Energie
w	Energiedichte
w	komplexe Funktion, komplexes Potential
x	kartesische Koordinate
x_μ	kovariante Vektorkomponente
x^μ	kontravariante Vektorkomponente
y	kartesische Koordinate
Y_n^m	Kugelflächenfunktion
z	kartesische Koordinate
z	komplexe Zahl $x + \mathrm{i}y$
z^*	konjugiert komplexe Zahl $x - \mathrm{i}y$
Z	Wellenwiderstand

Z_0	Wellenwiderstand des Vakuums
Z_m	Zylinderfunktion zum Index m

Griechische Buchstaben

α	Winkel
α	Dämpfungskonstante (negativer Imaginärteil der komplexen Wellenzahl $k = \beta - \mathrm{i}\alpha$)
α	Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante ($\alpha = \frac{e^2}{2h}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \approx \frac{1}{137}$)
β	Winkel
β	Phasenkonstante, Realteil der komplexen Wellenzahl $k = \beta - \mathrm{i}\alpha$
β	in der Relativitätstheorie übliche Abkürzung für v/c
$\Gamma^{\mathrm{k}}{}_{\mathrm{ij}}$	Christoffelsymbol 2. Art
δ_{ik}	Kroneckersymbol
$\delta(x - x_0)$	eindimensionale δ-Funktion
$\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)$	dreidimensionale δ-Funktion
Δ	Differenz
Δ	Laplace-Operator (z. B. $\Delta = \frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z^2} = \nabla^2$)
Δ_2	Laplace-Operator in der Ebene (z. B. $\Delta_2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$)
ε	Dielektrizitätskonstante
ε_0	Dielektrizitätskonstante des Vakuums
ε_r	relative Dielektrizitätskonstante
$\boldsymbol{\varepsilon}$	tensorielle Dielektrizitätskonstante
$\varepsilon_{\mathrm{ik}}, \varepsilon_{\mathrm{xy}}$	Komponenten von ε
ζ	dimensionslose kartesische Koordinate $\frac{z}{l}$
η	dimensionslose kartesische Koordinate $\frac{y}{l}$
η	Realteil der Kreisfrequenz $\omega = \eta + \mathrm{i}\sigma$
ϑ	Winkel
θ	Winkel der Poldistanz (Kugelkoordinaten)
κ	spezifische elektrische Leitfähigkeit
κ	Compton-Wellenzahl, $\kappa = \frac{m_0 c}{\hbar} = \frac{2\pi}{\lambda_c}$
λ	Wellenlänge
λ_g	Grenzwellenlänge
λ_c	Compton-Wellenlänge
λ_{mn}	n. Nullstelle von $J_\mathrm{m}(x)$
Λ	kosmologische Konstante
μ	Permeabilität
μ_0	Permeabilität des Vakuums
μ_r	relative Permeabilität
$\boldsymbol{\mu}$	tensorielle Permeabilität

μ_{ik}, μ_{xy}	Komponenten von $\boldsymbol{\mu}$
μ_{mn}	n. Nullstelle der Ableitung $J'_m(x)$
ν	Frequenz
ξ	dimensionslose Koordinate $\frac{x}{l}$
π	Ludolphsche Zahl
Π_e	elektrischer Hertzscher Vektor
Π_m	magnetischer Hertzscher Vektor = Fitzgerald-Vektor
ρ, ρ_e	elektrische Raumladungsdichte
ρ_m	magnetische Raumladungsdichte
ρ_{magn}	fiktive magnetische Raumladungsdichte
σ	elektrische Flächenladungsdichte
σ_{magn}	fiktive magnetische Flächenladungsdichte
σ	Imaginärteil der Kreisfrequenz $\omega = \eta + i\sigma$
$\sum_{i=1}^{n}$	Summe von $i = 1$ bis $i = n$
Σ, Σ'	Bezugssysteme, Inertialsysteme
τ	dimensionslose Zeit
τ	relativistische Eigenzeit
τ	Flächendichte des elektrischen Dipolmoments
φ	Azimutwinkel bei Zylinder- und Kugelkoordinaten
φ	Phasenwinkel
φ	skalares Potential
Φ	skalares Potential
Φ	magnetischer Fluß
χ	elektrische Suszeptibilität
χ_m	magnetische Suszeptibilität
Ψ	Stromfunktion
Ψ	skalares magnetisches Potential
Ψ	quantenmechanische Wellenfunktion
ω	Winkelgeschwindigkeit, Kreisfrequenz $2\pi\nu$
ω_g	Grenzfrequenz
ω_{amp}	Eigenfrequenzen eines Hohlraumresonators (n, m, p ganze Zahlen)
Ω	elektrischer Fluß
Ω	Raumwinkel
Ω	dimensionslose Kreisfrequenz