

**„Bafög“-  
Ausgabe**

**et**  
elektrotechnik



**Pascal Leuchtmann**

# Einführung in die elektromagnetische Feldtheorie

# **Einführung in die elektromagnetische Feldtheorie**

# Elektromagnetische Feldtheorie

## Inhaltsverzeichnis

Einführung in die elektromagnetische Feldtheorie

Inhaltsübersicht

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

Kapitel 1 Elektrostatik

1.1 Von den Anfängen bis zur Theorie von Coulomb

1.1.1 Elektrisierung durch Reibung

1.1.2 Zur Theorie der Erscheinungen

1.1.3 Die Kraft als Maß für die Elektrisierung

1.1.4 Isolatoren und Leiter

1.1.5 Die Verteilung von Ladung auf mehrere Leiter

1.1.6 Die Influenz auf Leitern

1.1.7 Positive und negative Ladungen; die Ladungserhaltung

1.1.8 Kraftwirkungen zwischen Ladungen; das Gesetz von Coulomb

1.1.9 Die Maßeinheit für die Ladung; das Elektrometer

1.1.10 Aufgaben

1.2 Folgerungen aus dem Coulomb'schen Gesetz

1.2.1 Mehrere geladene Körper; das Superpositionsprinzip

1.2.2 Das elektrische Feld

1.2.3 Die Darstellung des Feldes; Feldlinien

1.2.4 Die Materie als Träger von Ladungen

1.2.5 Vorläufige Thesen zu Materie und Ladung

1.2.6 Aufgaben

1.3 Die Bedeutung des  $1/r^2$ -Verhaltens

1.3.1 Das Cavendish-Experiment

# Inhaltsverzeichnis

- 1.3.2 Der Satz von Gauß in der Elektrostatik
- 1.3.3 Das Substitutionsprinzip (Äquivalenzprinzip)
- 1.3.4 Aufgaben

## 1.4 Energie und Potential

- 1.4.1 Die mechanische Arbeit beim Aufbau einer Ladungsverteilung
- 1.4.2 Das elektrostatische Potential
- 1.4.3 Der Zusammenhang zwischen Feld und Potential
- 1.4.4 Die Darstellung des Potentials; Äquipotentiallinien
- 1.4.5 Aufgaben

## 1.5 Der Begriff der Kapazität

- 1.5.1 Elektrodenpotentiale und -ladungen
- 1.5.2 Das Zweileitersystem
- 1.5.3 Die Spannung  $U$  und die Kapazität  $C$
- 1.5.4 Der Kondensator als Energiespeicher
- 1.5.5 Mehr als zwei Leiter: die Kapazitätskoeffizienten
- 1.5.6 Aufgaben

## 1.6 Der Einfluss des Materials

- 1.6.1 Die Polarisierung des Materials
- 1.6.2 Das Feld eines Dipols
- 1.6.3 Die Dipoldichte bzw. die Polarisation  $P$
- 1.6.4 Die elektrische Suszeptibilität
- 1.6.5 Das dielektrische Verschiebungsfeld  $D$
- 1.6.6 Homogen linear isotropes Material
- 1.6.7 Aufgaben

## 1.7 Numerische Methoden

- 1.7.1 Die Teilflächenmethode
- 1.7.2 Das Bildladungsverfahren
- 1.7.3 Aufgaben

## Kapitel 2 Das Verhalten des Gleichstroms

### 2.1 Die Entdeckung des Gleichstroms

# Inhaltsverzeichnis

## 2.2 Der galvanische Strom

2.2.1 Das Feld der elektrischen Stromdichte

2.2.2 Die Konsequenzen der Zeitunabhängigkeit

2.2.3 Der Zusammenhang zwischen  $J$  und  $E$ : das Ohm'sche Gesetz

2.2.4  $J$  als Wirkung des elektrischen Feldes auf das Material

2.2.5 Aufgaben

## 2.3 Energie als Bindeglied verschiedener Disziplinen der Physik

2.3.1 Die Wärmewirkung des elektrischen Stromes

2.3.2 Die endgültige Verbindung zwischen Elektrostatik und Galvanismus

2.3.3 Das Feld der Leistungsdichte

## 2.4 Der elektrische Widerstand

## 2.5 Die konkrete Problemstellung zur Berechnung von $J$

2.5.1 Die Widerstandsnetzwerk-Methode zur Berechnung elektrischer Felder

2.5.2 Aufgaben

## Kapitel 3 Magnetostatik

### 3.1 Die Kräfte der Magnete

3.1.1 Die magnetischen Phänomene aus technischer Sicht

3.1.2 Das Coulomb'sche Gesetz der Magnetik

3.1.3 Das magnetische Feld

### 3.2 Die magnetischen Pole als Materialeigenschaft

3.2.1 Die magnetische Induktion  $B$  und die Magnetisierung  $M$

3.2.2 Der Zusammenhang zwischen  $H$  und  $M$

### 3.3 Die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes

3.3.1 Der Einfluss des elektrischen Stromes auf die Magnethöhle

3.3.2 Das Durchflutungsgesetz

3.3.3 Aufgaben

### 3.4 Die Äquivalenz von Magnet und Strom

3.4.1 Die Kraftwirkungen zwischen Strömen

# Inhaltsverzeichnis

3.4.2 Vergleich der Kräfte auf Magnetpole und Ströme

3.4.3 Die Felder von Kreisstrom und magnetischem Dipol

## 3.5 Der magnetische Kreis

3.5.1 Die Analogie zwischen Magnetfeld und Strömungsfeld

3.5.2 Der magnetische Widerstand

3.5.3 Aufgaben

## 3.6 Die Magnetostatik als eigenständige Disziplin

3.6.1 Der Aufbau einer Stromverteilung

## Kapitel 4 Die Wirkung zeitvariabler Magnetfelder

### 4.1 Der Feldbegriff von Michael Faraday

### 4.2 Die elektromagnetische Induktion

4.2.1 Die elektromotorische Kraft EMK

4.2.2 Das Induktionsgesetz

4.2.3 Die Ursachen der Induktion

4.2.4 Die Selbstinduktion

4.2.5 Aufgaben

### 4.3 Die Induktivität und die magnetische Energie

4.3.1 Die Leiterschleife als Zweipol

4.3.2 Die Gegeninduktivität

4.3.3 Die Induktivität als Energiespeicher

4.3.4 Das Feld als Energieträger

4.3.5 Die mechanisch-elektrische Energiewandlung

4.3.6 Aufgaben

## Kapitel 5 Die Maxwell-Gleichungen

### 5.1 Die physikalischen Grundlagen der Maxwell'schen Theorie

5.1.1 Die Wahl der Grundgrößen

5.1.2 Zusammenstellung der bisher gefundenen Feldgleichungen

5.1.3 Der Verschiebungsstrom

5.1.4 Die Integralform der Maxwell-Gleichungen

5.1.5 Aufgaben

# Inhaltsverzeichnis

## 5.2 Die Maxwell-Gleichungen als lokale Beziehungen

### 5.2.1 Die räumlichen Ableitungen grad, rot und div

#### 5.2.1.1 Der Operator rot (Rotation")

#### 5.2.1.2 Der Operator div (Divergenz")

#### 5.2.1.3 Der Operator grad (Gradient")

### 5.2.2 Die Koordinatendarstellungen der Differentialoperatoren

### 5.2.3 Die Integralsätze von Gauß und Stokes

### 5.2.4 Die Differentialformen der Maxwell-Gleichungen

### 5.2.5 Was fehlt in der Maxwell'schen Theorie

### 5.2.6 Aufgaben

## Kapitel 6 Maxwell-Gleichungen lösen

### 6.1 Der unmittelbare Gehalt der Maxwell-Gleichungen

#### 6.1.1 Die direkte Aussage der Maxwell-Gleichungen

#### 6.1.2 Die implizite Aussage der Maxwell-Gleichungen: die Ladungserhaltung

#### 6.1.3 Aufgaben

### 6.2 Die Materialgleichungen

#### 6.2.1 Die Anzahl der unbekannten Funktionen in den Maxwell- Gleichungen

#### 6.2.2 Zusätzliche Beziehungen zwischen den Feldgrößen

#### 6.2.3 Aufgaben

### 6.3 Die Konsequenzen blicher Materialverteilungen

#### 6.3.1 Stückweise homogenes Material

#### 6.3.2 Flächenladungen und -ströme auf den Grenzen

#### 6.3.3 Die Grenzbedingungen

#### 6.3.4 Die Abhängigkeit der Grenzbedingungen untereinander

#### 6.3.5 Die Grenzbedingungen in numerischen Verfahren

#### 6.3.6 Zusammenfassung der Grenzbedingungen

#### 6.3.7 Aufgaben

### 6.4 Die Entkopplung der Maxwell-Gleichungen

#### 6.4.1 Zweifache Ableitungen: der Laplace-Operator

# Inhaltsverzeichnis

6.4.2 Die homogene Wellengleichung

6.4.3 Die Lösung der homogenen skalaren Wellengleichung

6.4.4 Die Herleitung von Maxwell-Lösungen aus den Lösungen der skalaren Wellengleichung

6.4.5 Die inhomogene Wellengleichung

6.4.6 Die Lösung der inhomogenen Wellengleichung

6.4.7 Aufgaben

## 6.5 Die Potentiale des elektromagnetischen Feldes

6.5.1 Die Einführung der Potentiale

6.5.2 Die Eichung der Potentiale

6.5.3 Die Wellengleichungen für die Potentiale

6.5.4 Der Hertz'sche Vektor

6.5.5 Aufgaben

## 6.6 Die Behandlung von Nichtlinearitäten und das allgemeine Äquivalenzprinzip

## 6.7 Numerische Lösungsmethoden

6.7.1 Die allgemeine Problemstellung

6.7.2 Die Ansatzmethoden

6.7.3 Die Gebietsmethoden Finite Differenzen, Finite Integration und Finite Volumen

# Kapitel 7 Die Maxwell-Gleichungen in Spezialfällen

## 7.1 Der stationäre Zustand

7.1.1 Die Maxwell-Gleichungen im stationären Fall

7.1.2 Die Grenzbedingungen (stationär)

7.1.3 Die Lösung der homogenen Maxwell-Gleichungen

7.1.4 Die Lösung der inhomogenen Gleichung im homogenen Material

7.1.5 Diskussion des Wellenverhaltens

7.1.6 Aufgaben

## 7.2 Die statischen Felder

7.2.1 Das allgemeine Lösungsverfahren und die Grenzbedingungen



# Inhaltsverzeichnis

7.2.2 Die Aufteilung der Statik in drei Teilbereiche

7.2.3 Aufgaben

## 7.3 Die Elektrostatik

7.3.1 Die Grundgleichungen der Elektrostatik

7.3.2 Die Lösung der skalaren Poisson-Gleichung

7.3.2.1 1. Allgemeine Lösung

7.3.2.2 2. Partikuläre Lösung

7.3.3 Typische Probleme der Elektrostatik

7.3.4 Die Äquivalenz von physikalischer und mathematischer Lösung

7.3.5 Aufgaben

## 7.4 Die Magnetostatik

7.4.1 Feldprobleme mit Permanentmagneten

7.4.2 Das magnetostatische Feld von Stromdichteverteilungen

7.4.3 Das Biot-Savart'sche Integral

7.4.4 Aufgaben

## 7.5 Die Stromlehre

## 7.6 Zusammenfassende Bemerkungen zur Statik

7.6.1 Die Bedeutung statischer Lösungen in der Dynamik

7.6.2 Aufgaben

# Kapitel 8 Die Energie im elektromagnetischen Feld

## 8.1 Die bisherigen Energiekonzepte

## 8.2 Das Poynting'sche Energiekonzept

8.2.1 Die elektrische Energiedichte

8.2.2 Die magnetische Energiedichte

8.2.3 Die Energieflussdichte

8.2.4 Aufgaben

## 8.3 Das Poynting-Theorem

8.3.1 Der allgemeine (zeitabhängige) Fall

8.3.2 Das komplexe Poynting-Theorem

## 8.4 Der Eindeutigkeitssatz

# Inhaltsverzeichnis

## 8.5 Die statische Berechnung der Gesamtenergien

8.5.1 Die elektrostatische Gesamtenergie

8.5.2 Die magnetostatische Gesamtenergie

8.5.3 Aufgaben

## 8.6 Die quasistatische Berechnung des Energieinhalts

8.6.1 Die Abstrahlung von Energie

8.6.2 Die quasistatischen Situationen

8.6.3 Der Zusammenhang zwischen den quasistatischen Feldern

## Kapitel 9 Die Berechnung der Zweipolparameter aus den Feldern

### 9.1 Vergleich zwischen Feldtheorie und Netzwerktheorie

### 9.2 Die Zustandsgrößen $U$ , $I$ und $P$

9.2.1 Die Spannung  $U$  und die Maschenregel

9.2.2 Der Strom  $I$  und die Knotenregel

9.2.3 Die Leistung  $P$

9.2.4 Weitere Bemerkungen zu den Zustandsgrößen

### 9.3 Die Kenngrößen der elementaren Zweipole $C$ , $L$ und $R$

9.3.1 Die Kapazität  $C$

9.3.2 Die Induktivität  $L$

9.3.3 Der Widerstand  $R$

9.3.4 Die Linearität der elementaren Zweipole

9.3.5 Die Grenzen des statischen Modells

9.3.6 Aufgaben

### 9.4 Der allgemeine Zweipol aus feldtheoretischer Sicht

9.4.1 Die Speisung eines Zweipols

9.4.2 Die Zweipolcharakteristik bei beliebigem Zeitverlauf

### 9.5 Der Zweipol im stationären Zustand und die Impedanz $Z$

9.5.1 Die allgemeinen Impedanzen  $Z$  und Admittanzen  $Y$

9.5.2 Die Impedanzdarstellung mit elementaren Zweipolen

9.5.3 Zur Konstruktion eines Netzwerks aus einem Feld

# Inhaltsverzeichnis

## 9.5.4 Aufgaben

## Kapitel 10 Die Mehrpole und die Reziprozität

### 10.1 Die allgemeinen Mehrpole

#### 10.1.1 Vom n-Pol zum m-Tor ( $m < n$ )

#### 10.1.2 Die Charakteristik der Mehrtore

### 10.2 Die allgemeinen Zweitore

### 10.3 Die linearen Zweitore

#### 10.3.1 Das Ohm'sche Zweitor

#### 10.3.2 Das lineare Zweitor im stationären Fall

#### 10.3.3 Die Anwendung der Reziprozität

#### 10.3.4 Aufgaben

### 10.4 Die statische Berechnung der Gegeninduktivität

### 10.5 Die Teilkapazitäten

## Kapitel 11 Die Führung elektromagnetischer Wellen

### 11.1 Die zweidimensionale Formulierung der Theorie

#### 11.1.1 Die Separation der z-Abhängigkeit

#### 11.1.2 Die Zerlegung der Feldgrößen und der Differentialoperatoren

#### 11.1.3 Die zweidimensionalen Integralsätze

#### 11.1.4 Die zweidimensionalen Maxwell-Gleichungen

### 11.2 Die Lösung der zweidimensionalen Maxwell-Gleichungen

#### 11.2.1 Die Eigenschaften der TEM-Wellen

#### 11.2.2 Die Quasi-TEM-Näherung

#### 11.2.3 Die zweidimensionale Helmholtz-Gleichung

#### 11.2.4 Das Bestimmen der Fortpflanzungskonstante; die Wellentypen

#### 11.2.5 Aufgaben

## Kapitel 12 Abstrahlung und Streuung elektromagnetischer Felder

### 12.1 Die Strahlungsfelder

#### 12.1.1 Das elektromagnetische Modell zur Felderzeugung

# Inhaltsverzeichnis

12.1.2 Die Formulierung des Feldproblems

12.1.3 Die Multipolentwicklung des Strahlungsfeldes

12.1.4 Der Hertz'sche Dipol

12.1.5 Aufgaben

12.2 Die Streuung elektromagnetischer Felder (Scattering)

## Kapitel 13 Prüfungsaufgaben

13.1 Aufgaben aus der Elektrostatik

13.2 Aufgaben mit Feldern im freien Raum

13.3 Aufgaben mit Joule'schem Energieumsatz

13.4 Aufgaben zur Reziprozität

13.5 Aufgaben mit Magnetfeldern

13.6 Vermischte Aufgaben

## Anhang A Antworten zu den Aufgaben

A.1 Aufgaben aus Kapitel 1

A.2 Aufgaben aus Kapitel 2

A.3 Aufgaben aus Kapitel 3

A.4 Aufgaben aus Kapitel 4

A.5 Aufgaben aus Kapitel 5

A.6 Aufgaben aus Kapitel 6

A.7 Aufgaben aus Kapitel 7

A.8 Aufgaben zu Kapitel 8

A.9 Aufgaben aus Kapitel 9

A.10 Aufgaben aus Kapitel 10

A.11 Aufgaben aus Kapitel 11

A.12 Aufgaben aus Kapitel 12

A.13 Aufgaben aus Kapitel 13

## Anhang B Koordinatensysteme und Vektoren

B.1 Koordinatensysteme

# Inhaltsverzeichnis

B.2 Vektoren

B.3 Produkte von Vektoren

## Anhang C Strom, Spannung, Leistung (stationär und komplex)

C.1 Die Darstellung sinusoidaler Zeitfunktionen

C.2 Die Zuordnung komplexer Zahlen zu sinusoidalen Zeitfunktionen

C.3 Das Produkt sinusoidaler Zeitfunktionen

C.4 Komplexe Leistungen

C.5 Vektoren mit komplexen Komponenten

## Anhang D Die Eigenschaften der Zylinderfunktionen

D.1 Die Hankel-Funktionen erster Gattung

D.2 Die Hankel-Funktionen zweiter Gattung

D.3 Die Bessel-Funktionen  $J_n$

D.4 Die Neumann-Funktionen  $N_n$

D.5 Die Beziehungen zwischen Zylinderfunktionen gleicher Ordnung

D.6 Die Modifizierten Zylinderfunktionen und die Kelvin-Funktionen

D.7 Die physikalische Interpretation der Zylinderwellen

## Anhang E Strahlung einer beliebig bewegten Punktladung

E.1 Die Berechnung der Felder

E.2 Diskussion des Feldes

E.2.1 Ruhende Ladung

E.2.2 Gleichförmig bewegte Ladung

E.2.3 Beschleunigte Ladungen

E.2.4 Der nicht relativistische Fall

E.2.5 Kurzzeitig linear beschleunigte Ladung

# Inhaltsverzeichnis

Anhang F Symbole und Zeichen

Anhang G Griechische Buchstaben

Anhang H Literaturverzeichnis

H.1 Elektromagnetische Felder

H.2 Mathematische Formelsammlungen

Register

A

B

C

D

E

F

G

H

I

J

K

L

M

N

O

P

Q

R

S

T

U

# **Inhaltsverzeichnis**

V

W

Y

Z

Ins Internet: Weitere Infos zum Buch, Downloads, etc.

Copyright

# Copyright

Daten, Texte, Design und Grafiken dieses eBooks, sowie die eventuell angebotenen eBook-Zusatzdaten sind urheberrechtlich geschützt. Dieses eBook stellen wir lediglich als **persönliche Einzelplatz-Lizenz** zur Verfügung!

Jede andere Verwendung dieses eBooks oder zugehöriger Materialien und Informationen, einschließlich

- der Reproduktion,
- der Weitergabe,
- des Weitervertriebs,
- der Platzierung im Internet, in Intranets, in Extranets,
- der Veränderung,
- des Weiterverkaufs und
- der Veröffentlichung

bedarf der **schriftlichen Genehmigung** des Verlags. Insbesondere ist die Entfernung oder Änderung des vom Verlag vergebenen Passwortschutzes ausdrücklich untersagt!

Bei Fragen zu diesem Thema wenden Sie sich bitte an: [info@pearson.de](mailto:info@pearson.de)

## Zusatzdaten

Möglicherweise liegt dem gedruckten Buch eine CD-ROM mit Zusatzdaten bei. Die Zurverfügungstellung dieser Daten auf unseren Websites ist eine freiwillige Leistung des Verlags. **Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.**

## Hinweis

Dieses und viele weitere eBooks können Sie rund um die Uhr und legal auf unserer Website herunterladen:

**<http://ebooks.pearson.de>**