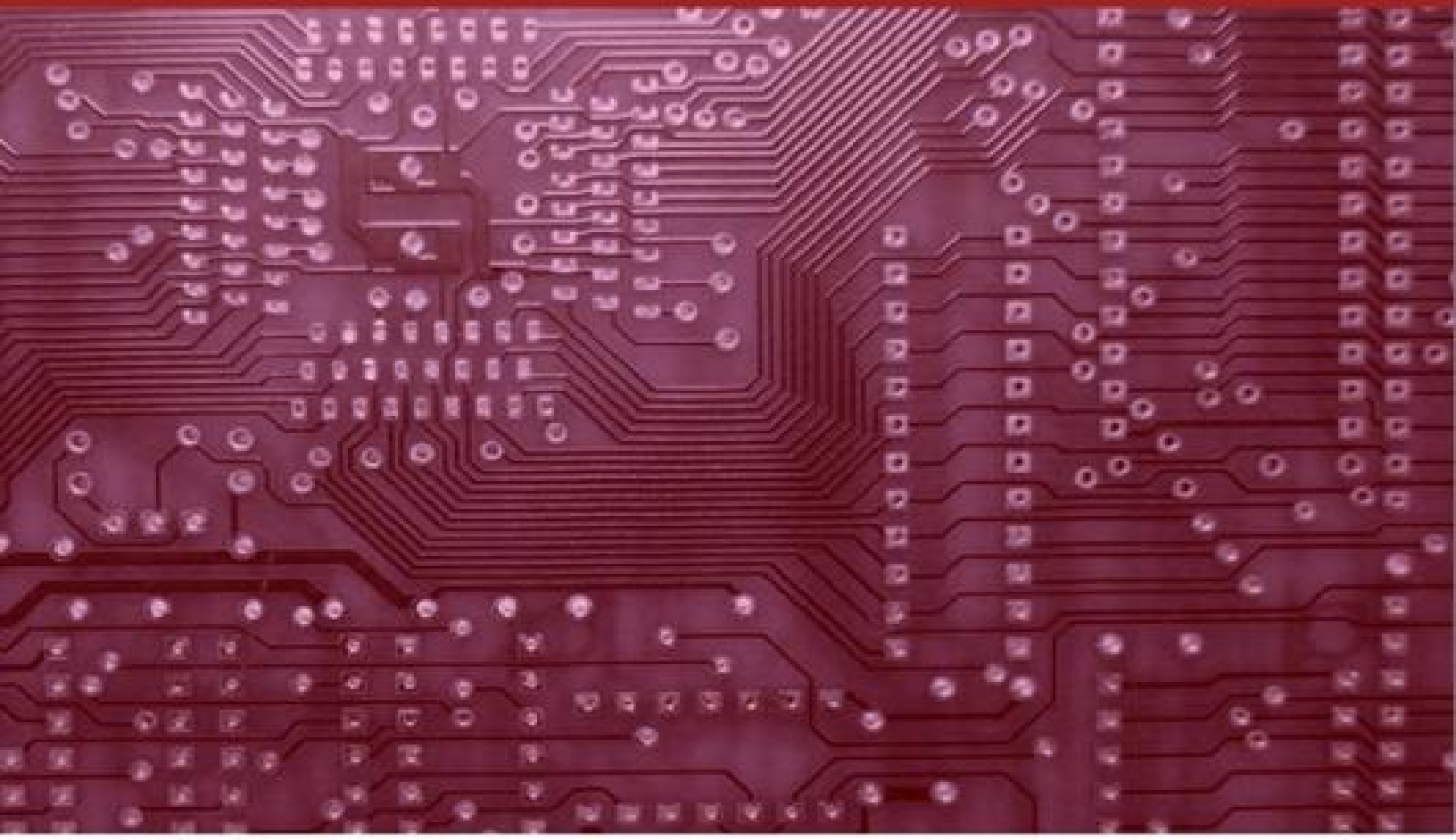


Grundlagen der Elektrotechnik

Grundlagen der Feldtheorie

Version 4.0

M. Koch - J. Patzke



Grundlagen der Elektrotechnik Grundlagen der Feldtheorie

von

Prof. Dr.-Ing. Michael Koch
Prof. Dr.-Ing. Joachim Patzke

Version 4.0

Grundlagen der Elektrotechnik – Grundlagen der Feldtheorie
Michael Koch, Joachim Patzke
Copyright: © 2021 M. Koch;J. Patzke

Benutzungshinweise zum eBook

Aktuelle eBook-Formate sind für die Darstellung naturwissenschaftlicher Inhalte nicht optimal geeignet, da Sie auf einer Fließtextstruktur basieren. Bilder, Grafiken und Formeln werden in der Regel mit einer festen Größe dargestellt. Der Text ist hingegen skalierbar, sodass eine feste Zuordnung zwischen Text- und Bildgröße nicht erzwungen werden kann. Es bleibt daher dem Benutzer überlassen, beim Lesen eine sinnvolle Textgröße zu wählen, die in einer guten Relation zu Bildern und Formeln steht und darüber hinaus zu einer übersichtlichen Formatierung der enthaltenen Tabellen führt.

Inhalt

1 Felder

- 1.1 Physikalische Felder
- 1.2 Zeitlicher Verlauf der Felder
- 1.3 Arten von Feldquellen
- 1.4 Darstellung von Feldern

2 Elektrisches Feld und Strömungsfeld

- 2.1 Allgemeine Zusammenhänge
- 2.2 Stromdichte und Strom
 - 2.2.1 Beispiel 1
 - 2.2.2 Aufgabe 1
- 2.3 Vorgehen bei Widerstandsberechnungen
 - 2.3.1 Aufgabe 2
 - 2.3.2 Aufgabe 3
- 2.4 Ladungserhaltungssatz
- 2.5 Verhalten der Stromdichte an Grenzflächen
 - 2.5.1 Aufgabe 4
- 2.6 Coulombkraft
- 2.7 Elektrische Feldstärke
 - 2.7.1 Beispiel 2
 - 2.7.2 Coulombintegral
- 2.8 Das elektrische Potential
 - 2.8.1 Aufgabe 5
- 2.9 Verschiebungsflussdichte und Gaußscher Satz
 - 2.9.1 Beispiel 4
 - 2.9.2 Aufgabe 6
 - 2.9.3 Aufgabe 7
- 2.10 Kapazität
 - 2.10.1 Vorgehen bei Kapazitätsberechnungen
 - 2.10.2 Beispiel 5
 - 2.10.3 Aufgabe 8
 - 2.10.4 Platten-, Zylinder- und Kugelkondensator
- 2.11 Kapazitäten in Schaltungen
- 2.12 Parallel- und Reihenschaltung von Kapazitäten
 - 2.12.1 Parallelschaltung
 - 2.12.2 Reihenschaltung

- [2.12.3 Aufgabe 9](#)
- [2.12.4 Aufgabe 10](#)
- [2.12.5 Aufgabe 11](#)
- [2.12.6 Aufgabe 12](#)
- [2.12.7 Zusammenschaltung geladener Kondensatoren](#)
- [2.12.8 Beispiel 6](#)
- [2.12.9 Aufgabe 13](#)
- [2.12.10 Aufgabe 14](#)
- [2.13 Verhalten an Grenzflächen](#)
 - [2.13.1 Verschiebungsflussdichte an Grenzflächen](#)
 - [2.13.2 Elektrische Feldstärke an Grenzflächen](#)
 - [2.13.3 Brechungsgesetz der elektrischen Feldgrößen](#)
 - [2.13.4 Längsgeschichtete Dielektrika](#)
 - [2.13.5 Quergeschichtete Dielektrika](#)
 - [2.13.6 Aufgabe 15](#)
 - [2.13.7 Aufgabe 16](#)
 - [2.13.8 Aufgabe 17](#)
- [2.14 Energie im elektrostatischen Feld](#)
 - [2.14.1 Aufgabe 18](#)
 - [2.14.2 Aufgabe 19](#)
- [3 Magnetfeld](#)
 - [3.1 Historie](#)
 - [3.2 Beobachtungen bei Magnetfeldern](#)
 - [3.3 Feld eines Dauermagneten](#)
 - [3.3.1 Feldlinienbild](#)
 - [3.3.2 Magnetischer Dipol](#)
 - [3.3.3 Ursache des Magnetfelds](#)
 - [3.4 Magnetfeld stromdurchflossener Leiter](#)
 - [3.4.1 Kraftwirkung zweier paralleler Leiter](#)
 - [3.4.2 Aufgabe 20](#)
 - [3.4.3 Aufgabe 21](#)
 - [3.4.4 Kraftwirkung auf eine bewegte Ladung](#)
 - [3.4.5 Aufgabe 22](#)
 - [3.4.6 Halleffekt](#)
 - [3.4.7 Überlagerung von Magnetfeldern](#)
 - [3.5 Magnetische Feldstärke und Durchflutungsgesetz](#)
 - [3.5.1 Magnetische Feldstärke](#)

- [3.5.2 Durchflutungsgesetz](#)
- [3.5.3 Beispiel 7](#)
- [3.5.4 Elektrische Durchflutung](#)
- [3.5.5 Die magnetische Spannung](#)
- [3.5.6 Beispiel 8](#)
- [3.5.7 Aufgabe 23](#)
- [3.5.8 Aufgabe 24](#)
- [3.5.9 Aufgabe 25](#)
- [3.6 Materie im Magnetfeld](#)
 - [3.6.1 Dia- und Paramagnetismus](#)
 - [3.6.2 Ferromagnetismus](#)
 - [3.6.3 Aufgabe 26](#)
- [3.7 Verhalten an Grenzflächen](#)
- [3.8 Der magnetische Fluss](#)
 - [3.8.1 Beispiel 9](#)
 - [3.8.2 Aufgabe 27](#)
- [3.9 Magnetische Kreise](#)
 - [3.9.1 Berechnung magnetischer Kreise](#)
 - [3.9.2 Beispiel 10](#)
 - [3.9.3 Einflussgrößen bei magnetischen Kreisen](#)
 - [3.9.4 Aufgabe 28](#)
 - [3.9.5 Vereinfachte Berechnung für konstante Permeabilität](#)
 - [3.9.6 Aufgabe 29](#)
- [3.10 Induktionsgesetz](#)
 - [3.10.1 Bewegungsinduktion](#)
 - [3.10.2 Beispiel 11: Bewegter Leiter - Teil 1](#)
 - [3.10.3 Beispiel 12: bewegter Leiter - Teil 2](#)
 - [3.10.4 Ruheinduktion](#)
 - [3.10.5 Richtungszuordnung der Induktionswirkung](#)
 - [3.10.6 Beispiel 13](#)
 - [3.10.7 Aufgabe 30](#)
 - [3.10.8 Flussverkettung](#)
 - [3.10.9 Richtungszuordnung in der Netzwerkmaschine](#)
- [3.11 Selbstinduktion und Selbstinduktivität](#)
 - [3.11.1 Beispiel 14](#)
 - [3.11.2 Aufgaben 31](#)

- [3.11.3 Aufgabe 32](#)
- [3.12 Energie im Magnetfeld](#)
- [3.13 Gegeninduktion und Gegeninduktivität](#)
 - [3.13.1 Aufgabe 33](#)
 - [3.13.2 Aufgabe 34](#)
 - [3.13.3 Das Vorzeichen in Maschengleichungen](#)
 - [3.13.4 Aufgabe 35](#)
- [4 Anhang](#)
 - [4.1 Verwendete Formelzeichen](#)
 - [4.2 Abbildungsverzeichnis](#)
 - [4.3 Tabellenverzeichnis](#)
 - [4.4 Literaturverzeichnis](#)
 - [4.4.1 Skriptum](#)
 - [4.4.2 Weiterführende Literatur](#)

1 Felder

1.1 Physikalische Felder

Ein physikalisches Feld ist ein besonderer Zustand des Raumes, der durch physikalische Größen beschrieben werden kann. Nachgewiesen wird ein Feld durch seine Wirkung auf einen Probekörper. Der Probekörper darf dabei das Feld nicht stören und damit verfälschen. Dies ist ein großes Problem bei Feldmessungen.

Felder können wie folgt unterteilt werden.

Physikalische Felder

Skalarfelder

Jedem Punkt des Raumes wird eine skalare physikalische Größe zugeordnet

Beispiel: Temperatur

$$T = T(x, y, z, t)$$

Vektorfelder

Jedem Punkt des Raumes wird ein Vektor (Betrag und Richtung) zugeordnet.
Beispiel: Elektrisches und magnetisches Feld

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_x(x, y, z, t) \\ E_y(x, y, z, t) \\ E_z(x, y, z, t) \end{pmatrix}$$

Vektorfelder sind komplexer als Skalarfelder. Man muss mit 3 Funktionen statt mit nur einer rechnen.

Manche Vektorfelder lassen sich jedoch aus einem Skalarfeld ableiten. Man kann daher mit dem „einfacheren“ Skalarfeld arbeiten und erst zum Schluss aus dem Skalarfeld das gesuchte Vektorfeld berechnen. Das übergeordnete Skalarfeld nennt man dann ein Potential des Vektorfeldes, das Vektorfeld wird auch als Potentialfeld bezeichnet. Das elektrische Feld \vec{E} lässt sich zum Beispiel aus dem elektrischen Potential φ ableiten.

1.2 Zeitlicher Verlauf der Felder

Man unterscheidet die folgenden Zeiteigenschaften elektrischer und magnetischer Felder.

Statisch:

Keine Bewegung, alle Ladungen sind in Ruhe. Die Anordnung ist verlustlos, das Feld bleibt ohne weitere Energiezufuhr erhalten.

Beispiel:

Elektrostatisches Feld (z.B. Plattenkondensator)

Stationär:

Ladungen bewegen sich, die Bewegung ändert sich aber nicht mit der Zeit. Treten Verluste auf, so ist ständige Zufuhr von Energie notwendig, um das Feld aufrecht zu erhalten.

Beispiel:

Strömungsfeld bei

Gleichstrom

Quasistationär:

Im elektrischen Sinn langsam veränderliche Felder, die sich ähnlich wie stationäre Felder behandeln lassen.

Beispiel:

Strömungsfeld bei 50 Hz Wechselstrom

Schnellveränderliche Felder:

Felder in der Hochfrequenztechnik. Energie kann nach außen abgestrahlt werden.

Beispiel:

Wellenausbreitung (Licht)

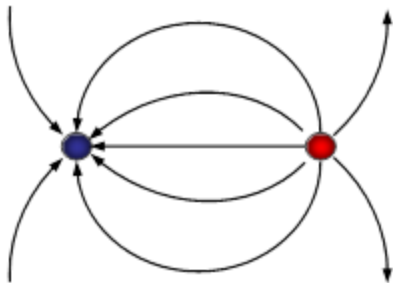
1.3 Arten von Feldquellen

Man unterscheidet die folgenden Feldarten

Quellenfelder

Die Feldlinien treten aus den Quellen aus und verschwinden in den Senken. Sie haben Anfang und Ende.

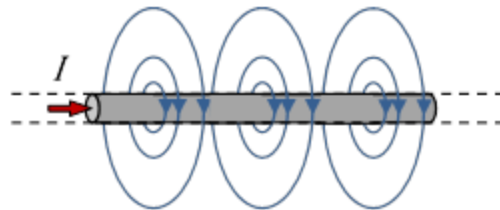
Beispiel:
Elektrostatisches
Feld



Wirbelfelder

Die Feldlinien sind in sich geschlossen und haben weder Anfang noch Ende

Beispiel: Magnetfeld



1.4 Darstellung von Feldern

Mit zunehmender Komplexität (2-/3-dimensional, Skalar-/Vektorfeld) wird die grafische Darstellung von Feldern schwieriger und erfordert ein zunehmend hohes Maß an Abstraktions- und Vorstellungsvermögen [3].

2 Elektrisches Feld und Strömungsfeld

2.1 Allgemeine Zusammenhänge

Schon in der Gleichstromtechnik [1] wurden die meisten physikalischen Größen des elektrischen Felds für homogene Felder und stationäre Vorgänge eingeführt. Für den Fall beliebiger Feldverteilungen und zeitveränderlicher Vorgänge bedürfen die beschriebenen Zusammenhänge einer allgemeingültigen Erweiterung. Diese liegt im Wesentlichen darin, dass fundamentale Größen wie Strom, Spannung und Ladung nicht mehr durch einfache Multiplikation, sondern durch Integration berechnet werden müssen.

Tabelle 2-1 Größen des el. Felds

Physikalische Größe		Einheit	Homogen / stationär	Inhomogen / zeitveränderlich
Spannung	U	V	$U = E \cdot \ell$	$U = \int \vec{E} \cdot d\vec{\ell}$
Strom	I	A	$I = S \cdot A$	$I = \iint \vec{S} \cdot d\vec{A}$
Widerstand	R	Ω	$R = \frac{U}{I}$	$R = \frac{\int \vec{E} \cdot d\vec{\ell}}{\iint \vec{S} \cdot d\vec{A}}$
Ladung	Q	C	$Q = I \cdot t$	$Q = \int i \cdot dt$

2.2 Stromdichte und Strom

Der Strom durch eine Fläche A berechnet sich als Flächenintegral der Stromdichte.

$$I = \iint_A \vec{S} \cdot d\vec{A} \quad (2-1)$$

Ist die Stromdichte ungleichmäßig über einen Leiterquerschnitt verteilt (z.B. durch den Skineneffekt), dann kann u.U., je nach analytischer Beschreibung der Verteilung, das Integral gelöst werden.