

# Elektrodynamik



Torsten Fließbach

# Elektrodynamik

Lehrbuch zur Theoretischen Physik II

7. Auflage

Springer Spektrum Verlag Heidelberg · Berlin · Oxford

Torsten Fließbach  
Starnberg, Deutschland  
fliessbach@physik.uni-siegen.de

# Vorwort

Das vorliegende Buch ist Teil einer Vorlesungsausarbeitung [1, 2, 3, 4] des Zyklus Theoretische Physik I bis IV. Es gibt den Stoff meiner Vorlesung Theoretische Physik II über die Elektrodynamik wieder.

Die Darstellung bewegt sich auf dem durchschnittlichen Niveau einer Kursvorlesung in Theoretischer Physik. Der Zugang ist eher intuitiv anstelle von deduktiv; formale Ableitungen und Beweise werden ohne besondere mathematische Akribie durchgeführt.

In enger Anlehnung an den Text, teilweise aber auch zu dessen Fortführung und Ergänzung werden über 100 Übungsaufgaben gestellt. Diese Aufgaben erfüllen ihren Zweck nur dann, wenn sie vom Studenten möglichst eigenständig bearbeitet werden. Diese Arbeit sollte unbedingt vor der Lektüre der Musterlösungen liegen, die im *Arbeitsbuch zur Theoretischen Physik* [5] angeboten werden. Neben den Lösungen enthält das Arbeitsbuch ein kompaktes Repetitorium des Stoffs der Lehrbücher [1, 2, 3, 4].

Der Umfang des vorliegenden Buchs geht etwas über den Stoff hinaus, der während eines Semesters in einem Physikstudium üblicherweise an deutschen Universitäten behandelt wird. Der Stoff ist in Kapitel gegliedert, die im Durchschnitt etwa einer Vorlesungsdoppelstunde entsprechen. Natürlich bauen verschiedene Kapitel aufeinander auf. Es wurde aber versucht, die einzelnen Kapitel so zu gestalten, dass sie jeweils möglichst abgeschlossen sind. Damit wird einerseits eine Auswahl von Kapiteln für einen bestimmten Kurs (etwa in einem Bachelor-Studiengang) erleichtert, in dem der Stoff stärker begrenzt werden soll. Zum anderen kann der Student leichter die Kapitel nachlesen, die für ihn von Interesse sind.

In der Theoretischen Physik ist es von grundlegender Bedeutung, dass die Maxwellgleichungen relativistisch sind. Das Cover dieses Buch betont das durch Wiedergabe der inhomogenen Maxwellgleichungen in kovarianter Form (also durch Lorentztensoren und -vektoren ausgedrückt). Für das Verständnis sind Vorkenntnisse der Speziellen Relativitätstheorie hilfreich (etwa in Teil IX meiner *Mechanik* [1]). Wichtige Punkte werden aber wiederholt (die Lorentztensoren in Kapitel 4, und das Relativitätsprinzip in Kapitel 18).

In der Mechanik nimmt der Lagrangeformalismus eine zentrale Rolle ein; für verschiedene Systeme werden die unterschiedlichen Lagrangefunktionen aufgestellt. In der Elektrodynamik gibt es dagegen genau eine *Lagrangedichte* für die elektromagnetischen Felder; die zugehörigen Lagrangegleichungen sind dann die kovarianten Maxwellgleichungen (Kapitel 19). Die Kovarianz der Maxwellgleichungen ist nicht nur eine zentrale theoretische Eigenschaft, sondern auch der Ausgangspunkt für verschiedene Anwendungen. Hieraus folgt insbesondere die Transformation der Felder beim Übergang von einem Inertialsystem zu einem anderen. Praktisch lassen sich damit dann die Felder von bewegten Ladungen berechnen.

Es gibt viele gute Darstellungen der Elektrodynamik, die sich für ein vertiefendes Studium eignen. Ich gebe hier nur einige wenige Bücher an, die ich selbst bevorzugt zu Rate gezogen habe und die gelegentlich im Text zitiert werden. Als Standardwerk möchte ich die *Klassische Elektrodynamik* von Jackson [6] hervorheben. Empfohlen sei auch die *Klassische Feldtheorie* der Lehrbuchreihe von Landau-Lifschitz [7]. Im Übrigen sollte jeder Physikstudent einmal die *Feynman Lectures* [8] gelesen haben.

Bei Christopher Künstler, Fabian Samad und anderen Lesern früherer Auflagen bedanke ich mich für wertvolle Hinweise. Anregungen oder Kritik sind jederzeit willkommen, etwa über den Kontaktlink auf meiner Homepage [www2.uni-siegen.de/~flieba/](http://www2.uni-siegen.de/~flieba/). Auf dieser Homepage finden sich auch eventuelle Korrekturlisten.

November 2021

Torsten Fließbach

## Literaturangaben

- [1] T. Fließbach, *Mechanik*, 8. Auflage, Springer Spektrum Verlag, Heidelberg 2020
- [2] T. Fließbach, *Elektrodynamik*, 7. Auflage, Springer Spektrum Verlag, Heidelberg 2022 (dieses Buch)
- [3] T. Fließbach, *Quantenmechanik*, 6. Auflage, Springer Spektrum Verlag, Heidelberg 2018
- [4] T. Fließbach, *Statistische Physik*, 6. Auflage, Springer Spektrum Verlag, Heidelberg 2018
- [5] T. Fließbach und H. Walliser, *Arbeitsbuch zur Theoretischen Physik – Repetitorium und Übungsbuch*, 4. Auflage, Springer Spektrum Verlag, Heidelberg 2020
- [6] J. D. Jackson, *Klassische Elektrodynamik*, 4. Auflage, de Gruyter, Berlin 2006
- [7] L. D. Landau, E. M. Lifschitz, *Lehrbuch der theoretischen Physik*, Band II, *Klassische Feldtheorie*, 12. Auflage, Harri Deutsch Verlag, 1997
- [8] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. I – III, Addison-Wesley Publishing Company, Reading 1989. Deutsche Übersetzung: *Feynman Vorlesungen über Physik*, 2. Auflage, Oldenbourg Verlag, München 2007

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>I Tensoranalysis</b>	<b>3</b>
1 Gradient, Divergenz und Rotation . . . . .	3
2 Tensorfelder . . . . .	13
3 Distributionen . . . . .	21
4 Lorentztensoren . . . . .	30
<b>II Elektrostatik</b>	<b>37</b>
5 Coulombgesetz . . . . .	37
6 Feldgleichungen . . . . .	48
7 Randwertprobleme . . . . .	59
8 Anwendungen . . . . .	68
9 Legendrepolynome . . . . .	80
10 Zylindersymmetrische Probleme . . . . .	89
11 Kugelfunktionen . . . . .	99
12 Multipolentwicklung . . . . .	108
<b>III Magnetostatik</b>	<b>117</b>
13 Magnetfeld . . . . .	117
14 Feldgleichungen . . . . .	126
15 Magnetischer Dipol . . . . .	135
<b>IV Maxwellgleichungen: Grundlagen</b>	<b>145</b>
16 Maxwellgleichungen . . . . .	145
17 Allgemeine Lösung . . . . .	156
18 Kovarianz . . . . .	163
19 Lagrangeformalismus . . . . .	176

<b>V</b>	<b>Maxwellgleichungen: Anwendungen</b>	<b>181</b>
20	Ebene Wellen . . . . .	181
21	Hohlraumwellen . . . . .	196
22	Transformation der Felder . . . . .	206
23	Beschleunigte Ladung . . . . .	218
24	Dipolstrahlung . . . . .	228
25	Streuung von Licht . . . . .	239
26	Schwingkreis . . . . .	248
<b>VI</b>	<b>Elektrodynamik in Materie</b>	<b>257</b>
27	Mikroskopische Maxwellgleichungen . . . . .	257
28	Linearer Response . . . . .	263
29	Makroskopische Maxwellgleichungen . . . . .	269
30	Erste Anwendungen . . . . .	277
31	Dielektrische Funktion . . . . .	284
32	Permeabilitätskonstante . . . . .	296
33	Wellenlösungen . . . . .	302
34	Dispersion und Absorption . . . . .	313
<b>VII</b>	<b>Elemente der Optik</b>	<b>325</b>
35	Huygenssches Prinzip . . . . .	325
36	Interferenz und Beugung . . . . .	331
37	Reflexion und Brechung . . . . .	339
38	Geometrische Optik . . . . .	352
	<b>Anhänge</b>	<b>361</b>
A	MKSA-System . . . . .	361
B	Physikalische Konstanten . . . . .	365
C	Vektoroperationen . . . . .	367
	<b>Register</b>	<b>369</b>