## Vorwort zur 1. Auflage

Die Theorie des klassischen Elektromagnetismus bildet zusammen mit der Mechanik und Quantenmechanik den Kern einer modernen theoretischen Ausbildung eines Physikstudenten in Anfangs- und Fortgeschrittenensemestern. Eine fundierte Kenntnis dieses Stoffes ist Voraussetzung für eine weitergehende Ausbildung und Spezialisierung.

Ein Anfängerkurs über Elektrizität und Magnetismus besteht im allgemeinen aus zwei bis drei Semestern, in denen über die elementare Physik hinausgegangen wird. Die Betonung liegt dabei auf den Grundgesetzen, dem experimentellen Nachweis und der Erarbeitung ihrer Konsequenzen, ferner auf dem Studium von Stromkreisen sowie der Untersuchung einfacher Wellenphänomene und der Strahlung. Zu dem benutzten mathematischen Apparat gehören neben Vektorrechnung, gewöhnlichen Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten und Fourier-Reihen möglicherweise auch Fourier- oder Laplace-Transformationen, partielle Differentialgleichungen, Legendre-Polynome und Bessel-Funktionen.

Eine zweisemestrige Vorlesung über die Theorie des Elektromagnetismus steht i.a. am Anfang der Fortgeschrittenensemester. Für sie ist mein Buch gedacht. Bei einer solchen Vorlesung verfolge ich mindestens drei Ziele. An erster Stelle steht mein Wunsch, die grundlegenden Fakten als ein kohärentes Ganzes darzustellen mit der Betonung auf der Einheit von elektrischen und magnetischen Phänomenen, und zwar sowohl in physikalischer Hinsicht wie in der mathematischen Beschreibungsweise. Mein zweites und damit einhergehendes Ziel ist es, eine Reihe von Hilfsmitteln aus der mathematischen Physik zu entwickeln und zu benutzen, die nicht nur in der Theorie des Elektromagnetismus, sondern auch in der Wellenmechanik gebraucht werden. Hierzu gehören der Greensche Satz und die Greenschen Funktionen, die Entwicklung nach orthogonalen Funktionen, Kugelfunktionen sowie zylindrische und sphärische Bessel-Funktionen. Mein

drittes und vielleicht wichtigstes Ziel besteht in der Behandlung neuer Themen, und zwar besonders solcher, die die Wechselwirkung relativistischer geladener Teilchen mit dem elektromagnetischen Feld betreffen. In diesen Bereich gehen natürlich
persönlich bedingte Vorlieben und Vorbehalte stark ein. Die
Wahl der von mir behandelten Themen wurde bestimmt durch die
Frage, was ich für wichtig und nützlich für einen Studenten
halte, der nicht nur an der theoretischen Physik im allgemeinen
interessiert ist, sondern auch an experimenteller Kern- und
Hochenergiephysik und an einem so unklar definierten Gebiet wie
dem der Plasmaphysik.

Das Buch beginnt in traditioneller Weise mit der Elektrostatik. Die ersten sechs Kapitel sind der Maxwellschen Theorie des Elektromagnetismus gewidmet. Vieles von den benötigten mathematischen Hilfsmitteln wird nebenher entwickelt. besonders in den Kapiteln 2 und 3, in denen ausführlich Randwertprobleme diskutiert werden. In der vorliegenden Darstellung werden zunächst das elektrische Feld E und die magnetische Induktion B betrachtet, während die makroskopischen Felder D und H als abgeleitete, aus der Mittelung über ein Ensemble von Atomen und Molekülen definierte Größen eingeführt werden. Bei der Diskussion von Dielektrika werden auch einfache klassische Modelle für die atomare Polarisierbarkeit erörtert, während analoge Modelle für magnetische Materialien aus der Diskussion ausgespart bleiben. Dies geschieht einerseits aus Platzgründen, andererseits deswegen, weil rein klassische Modelle für die magnetische Suszeptibilität nicht möglich sind. Darüberhinaus würde eine Erläuterung des interessanten Phänomens des Ferromagnetismus fast ein ganzes Buch für sich allein in Anspruch nehmen.

Die folgenden drei Kapitel (7 - 9) illustrieren verschiedene elektromagnetische Phänomene, meist makroskopischer Art. Ebene Wellen in verschiedenen Medien, einschließlich Plasmen, sowie auch die Dispersion und die Ausbreitung von Pulsen sind Gegenstand von Kapitel 7. Die Diskussion von Wellen- und Hohlleitern

in Kapitel 8 erstreckt sich auf Systeme beliebigen Querschnitts. Die in Hohlleitern auftretenden Verlustprobleme und der Gütefaktor eines Hohlleiters werden in sehr allgemeiner Form behandelt, die die daran beteiligten physikalischen Prozesse deutlich werden läßt. Die elementare Theorie der Multipolstrahlung lokalisierter Quellen und die Beugung werden in Kapitel 9 besprochen. Da die einfache skalare Beugungstheorie in vielen Lehrbüchern der Optik behandelt wird und auch in einführenden Lehrbüchern über Elektrizität und Magnetismus, wird in diesem Buch die Theorie der Beugung in einer genaueren, wenn auch immer noch approximativen Form diskutiert, die sich nicht auf den skalaren, sondern vektoriellen Greenschen Satz stützt.

Physiker und Astrophysiker schenken in zunehmendem Maße der Magnetohydrodynamik und Plasmaphysik ihre Aufmerksamkeit. Einen Überblick über dieses komplexe Gebiet gibt das Kapitel 10, in dem der Leser in die meisten darin eingehenden Vorstellungen eingeführt wird.

Die ersten neun bis zehn Kapitel beschreiben die Grundphänomene des klassischen Elektromagnetismus. Ein Physikstudent im Fortgeschrittenensemester wird einen großen Teil des hier behandelten Stoffes bereits in Anfängervorlesungen gehört haben, wenn auch vielleicht in elementarerer Form. Doch er gewinnt hier einen tieferen Einblick und ein besseres Verständnis und erlangt auch beachtliche Fertigkeiten in analytischen Lösungsmethoden, wenn er die Probleme auf dem Niveau dieses Buches neu durchdenkt. Er hat dann das nötige Rüstzeug, um an schwierigere Aufgaben heranzugehen. Der über die Anfangsgründe hinausgehende Stoff, der hier behandelt wird, betrifft zur Hauptsache die Wechselwirkung geladener Teilchen miteinander und mit elektromagnetischen Feldern, insbesondere bei relativistischer Bewegung.

Die spezielle Relativitätstheorie hatte ihren Ursprung in der klassischen Elektrodynamik. Letztere stellt auch heute noch, sechzig Jahre nach Aufstellung der speziellen Relativitätstheorie, ein ebenso eindrucksvolles wie faszinierendes Beispiel

für die Kovarianz physikalischer Gesetze unter Lorentz-Transformationen dar. Die spezielle Relativitätstheorie wird in Kapitel 11 behandelt. In ihm wird nicht nur der notwendige formale Apparat entwickelt, sondern auch verschiedene kinematische Konsequenzen werden hier untersucht und die Kovarianz der Elektrodynamik nachgewiesen. Das folgende Kapitel ist der relativistischen Kinematik und Dynamik von Teilchen gewidmet. Wenngleich die Dynamik geladener Teilchen im elektromagnetischen Feld als reines Problem der Elektrodynamik betrachtet werden kann, so mag sich der Leser doch fragen, ob auch Probleme wie die kinematischen Transformationen bei Stoßprozessen als Teil der Elektrodynamik anzusehen sind. Meine Antwort darauf ist, daß diese Beispiele in natürlicher Weise auftreten, sobald man die Vierervektoreigenschaften von Teilchenimpuls und -energie nachgewiesen hat. Darüberhinaus dienen sie als nützliche Übung im Umgang mit Lorentz-Transformationen, und die Endresultate sind nicht nur wertvoll, sondern oft auch schwer auf anderem Wege herzuleiten.

In Kapitel 13, über Stoßprozesse zwischen geladenen Teilchen, liegt der Hauptakzent auf dem Energieverlust und der
Streuung. In ihm werden auch Begriffe entwickelt, die für die
späteren Kapitel sehr wichtig sind. Es werden hier das erste
Mal halbklassische Argumente herangezogen, die auf dem Unschärfeprinzip basieren, um so aus den klassischen Ergebnissen Ausdrücke für den Energieverlust etc. herzuleiten, die näherungsweise auch quantenmechanisch gültig sind. Diese Näherung, die
Niels Bohr und E. J. Williams mit so viel Erfolg anwandten,
macht deutlich, wie und wann quantenmechanische Effekte die
klassische Betrachtungsweise zu modifizieren beginnen.

Das wichtige Gebiet der Strahlungsemission beschleunigter Punktladungen wird ausführlich in den Kapiteln 14 und 15 besprochen. Das Hauptgewicht wird dabei auf relativistische Effekte gelegt. Die Formeln, die für die Frequenz- und Winkelabhängigkeit der emittierten Strahlung hergeleitet werden, sind von hinreichend allgemeiner Gültigkeit, um auf alle uns

interessierenden Strahlungseffekte angewandt werden zu können. Die behandelten Beispiele reichen von der Synchrotronstrahlung bis zur Bremsstrahlung und der Strahlung beim Beta-Zerfall. Die Tscherenkow-Strahlung und die Weizsäcker-Williams-Methode virtueller Quanten werden ebenfalls diskutiert. Bei atomaren und nuklearen Stoßprozessen werden wiederum halbklassische Argumente benutzt, um näherungsweise zu quantenmechanischen Ergebnissen zu gelangen. Ich betone diesen Punkt deswegen so sehr, weil es meiner Meinung nach für den Studenten wichtig ist zu sehen, daß Strahlungseffekte wie die Bremsstrahlung fast rein klassischer Natur sind, obwohl hieran mikroskopische Stoßprozesse beteiligt sind. Ein Student, der von der Bremsstrahlung das erste Mal im Zusammenhang mit quantenfeldtheoretischen Berechnungen etwas hört, versteht nicht ihr physikalisches Wesen.

Multipolfelder bilden den Gegenstand von Kapitel 16. Bei der Entwicklung der skalaren und vektoriellen Felder nach sphärischen Lösungen der Wellengleichung werden nur Grundprinzipien benutzt und Einschränkungen hinsichtlich der relativen Dimensionen von Quelle und Wellenlänge nicht gemacht. Anschließend werden die Eigenschaften der elektrischen und magnetischen Multipolstrahlungsfelder untersucht. Nach Darlegung des Zusammenhangs mit den Multipolmomenten der Quelle werden dann sowohl Beispiele von Multipolstrahlung in Atomen und Kernen diskutiert als auch die Strahlung einer makroskopischen Quelle untersucht, deren räumliche Ausdehnung mit der Wellenlänge vergleichbar ist. Die Streuung einer ebenen elektromagnetischen Welle an einer Kugel wird recht ausführlich behandelt, um ein Randwertproblem mit Vektorkugelfunktionen zu illustrieren.

Gegenstand des letzten Kapitels ist das komplizierte Problem der Strahlungsrückwirkung. Die Behandlung ist mehr physikalischer als mathematischer Art, und besonderer Wert wird darauf gelegt, die Grenzen abzustecken, innerhalb derer die näherungsweise Berechnung von Strahlungskorrekturen angemessen ist. Auch soll herausgefunden werden, an welcher Stelle und aus welchem Grund die existierenden Theorien fehlschlagen müssen. Sowohl

die ursprüngliche Abraham-Lorentz-Theorie der Selbstkraft wie auch neuere klassische Überlegungen werden hier besprochen.

Das Buch schließt mit einem Anhang über Einheiten und Dimensionen sowie einer Bibliographie. Im Anhang wird versucht, die logischen Schritte aufzuzeigen, die der Entwicklung eines Einheitensystems zugrundeliegen, ohne den Leser mit weitläufigen Argumenten für die Vorzüge des in diesem Buch benutzten Einheitensystems zu langweilen. Der Anhang enthält auch zwei hoffentlich nutzbringende Tabellen. Die erste soll dazu dienen, ohne Schwierigkeiten von Gleichungen und Symbolen in dem einen System zu ihren Analoga im anderen übergehen zu können. Die zweite soll die entsprechende Aufgabe erleichtern, wenn es um bestimmte Beträge einer physikalischen Größe geht. In der Bibliographie sind alle diejenigen Bücher aufgezählt, die ich zum Nachschlagen und zur Vertiefung des Stoffes empfehle. Diese Bücher werden auch in den Literaturhinweisen am Ende eines jeden Kapitels genannt, dort allerdings nur unter dem Namen der jeweiligen Autoren.

Das vorliegende Buch ist aus einer Fortgeschrittenenvorlesung über klassische Elektrodynamik hervorgegangen, die ich in den letzten elf Jahren wiederholt an der Universität von Illinois und an der McGill-Universität gehalten habe. Meinen Kollegen und Studenten an beiden Universitäten danke ich für ihre zahllosen wertvollen Kommentare und Diskussionsbeiträge. Besonders erwähnen möchte ich in diesem Zusammenhang Professor P. R. Wallace von der McGill-Universität, der mir die Gelegenheit und Ermutigung zu einer damals noch recht unorthodoxen Vorlesung über Elektrodynamik gab, ferner die Professoren H. W. Wyld und G. Ascoli von der Universität von Illinois, die mir in äußerst großzügiger Weise zahlreiche nützliche Vorschläge für die Behandlung verschiedener Themen unterbreiteten. Mein Dank qilt auch Herrn Dr. A. N. Kaufmann für die Durchsicht und Kommentierung des vorläufigen Manuskripts sowie Herrn G. L. Kane für seine eifrige Hilfe beim Zusammenstellen des Sachregisters.

Urbana, Illinois Januar 1962