

Vorwort zu Band 3, 4. Auflage

Der traditionelle Aufbau der klassischen Elektrodynamik beginnt in vielen Vorlesungen und Lehrbüchern mit einer ausführlichen Behandlung von Elektrostatik, Magnetostatik und stationären Strömen, wendet sich dann erst den vollen, zeitabhängigen Maxwell'schen Gleichungen in deren lokaler Form und einer Reihe von klassischen Anwendungen aus Nachrichtentechnik und Optik zu. In diesem Band schlage ich einen etwas anderen Weg ein: Ausgehend von den Maxwell'schen Gleichungen in integraler Form, d. h. von der phänomenologischen, experimentell erwiesenen Basis der Elektrodynamik, werden die lokalen Gleichungen aufgestellt und von Anfang an in ihrer vollen, zeit- und raumabhängigen Form diskutiert. Statische oder stationäre Verhältnisse erscheinen als Spezialfälle, bei denen die Maxwell'schen Gleichungen in zwei unabhängige Gruppen zerfallen und daher bis zu einem gewissen Grad entkoppelt werden.

Großes Gewicht lege ich auf die Symmetrien der Maxwell'schen Gleichungen und insbesondere auf ihre Kovarianz unter Lorentz-Transformationen. Ihre Einbettung in den Rahmen der klassischen Feldtheorie mittels einer Lagrangedichte und über das Hamilton'sche Extremalprinzip ist ein zentrales Thema des Buches. Damit erleben die allgemeinen Prinzipien, die in der Mechanik entwickelt wurden, eine vertiefte und verallgemeinernde Anwendung, die als Modell und Vorbild für jede klassische Feldtheorie dienen. Auch die Notwendigkeit, bei den raum- und zeitabhängigen Feldern der Maxwell-Theorie den traditionellen Rahmen der Tensoranalysis im \mathbb{R}^3 auf den äußeren Kalkül über \mathbb{R}^4 zu erweitern, habe ich hoffentlich klar genug dargestellt. Die ehrwürdige Vektor- und Tensoranalysis, die auf dreidimensionale, Euklidische Räume zugeschnitten ist, reicht nicht aus und muss auf höhere Dimensionen und auf Minkowski-Signatur verallgemeinert werden. So wie das äußere Produkt die Verallgemeinerung des Kreuzprodukts im \mathbb{R}^3 ist, so liefert die Cartan'sche äußere Ableitung die natürliche Verallgemeinerung der Rotation des \mathbb{R}^3 und fasst zugleich die vertrauten Operationen Gradient und Divergenz mit der (verallgemeinerten) Rotation zusammen.

Unter den Anwendungen habe ich einige charakteristische und, wie mir scheint, heute besonders relevante Beispiele ausgewählt, darunter eine ausführliche Diskussion von Polarisation elektromagnetischer Wellen, die Beschreibung von sog. Gauß'schen Strahlen (analytische Lösungen der Helmholtz-Gleichung in paraxialer Näherung) und die Optik von Metamaterialien mit negativem Brechungsindex. Für andere, traditionellere Anwendungen verweise ich auf die gut eingeführten und

bewährten Lehrbücher der deutschen und der internationalen Literatur, von C. Schäfer, A. Sommerfeld, R. Becker und F. Sauter, L. D. Landau und E. M. Lifshits bis zu J. D. Jacksons Klassiker.

Im fünften Kapitel verfolge ich – als Novum – eine weitere, heute sehr wichtige Richtung: die Konstruktion von nicht-Abel'schen Eichtheorien. Solche sog. Yang-Mills-Theorien¹ sind für unser heutiges Verständnis der fundamentalen Wechselwirkungen der Natur wesentlich und unverzichtbar. Obwohl solche Theorien, die die Grundlage des sog. Standardmodells der Elementarteilchenphysik bilden, tief in die *quantisierte* Feldtheorie hineinführen, sind ihr Aufbau und ihre wesentlichen Züge rein *klassischer* Natur, solange man nur die Strahlung, d. h. das Analogon der Maxwell-Felder und klassische skalare Felder betrachtet, die fermionischen Materiebausteine aber außer Acht lässt. Nicht-Abel'sche Eichtheorien werden getreulich nach dem Vorbild der Maxwell-Theorie konstruiert und weisen viele Ähnlichkeiten, aber auch physikalisch bedeutsame Unterschiede zu dieser auf. Sogar das Phänomen der spontanen Symmetriebrechung, das vor dem Ausufern zu zahlreicher masseloser Felder rettet, ist im Wesentlichen auf klassischer Ebene definiert. Angesichts der universalen Bedeutung von Eichtheorien in unserem Verständnis der fundamentalen Wechselwirkungen wäre es schade, wenn man diesen Schritt nicht vollziehen würde, der sich auf natürliche Weise an die Maxwell'sche Theorie anschließt.

Das sechste Kapitel gibt eine vertiefte phänomenologische und geometrische Einführung in die Allgemeine Relativitätstheorie und rundet damit die Beschreibung der fundamentalen Wechselwirkungen im Rahmen der klassischen Feldtheorie ab. Auch hier verwende ich konsequent eine moderne geometrische Sprache, die – nach einer Anfangsinvestition in etwas Differentialgeometrie – eine transparentere und besser auf das Wesentliche konzentrierte Beschreibung der Einstein'schen Gleichungen zulässt als die ältere Tensoranalysis in Komponentenschreibweise. Die vorliegende vierte Auflage wurde weiter überarbeitet und ergänzt. Insbesondere in das sechste Kapitel habe ich den neuen Abschn. 6.6 (Cartan'sche Strukturgleichungen), eine überarbeitete und erweiterte Fassung von Abschn. 6.7 (Konstruktion und Tests der Schwarzschild-Lösung) sowie als neue Teile Abschn. 6.8 (Schwarze Löcher und rotierende Lösungen) und Abschn. 6.9 (Gravitationswellen) eingefügt.

Vieles von dem, was in diesen Band aufgenommen wurde, habe ich in zahlreichen Vorlesungen erprobt, die ich an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz im Laufe der Jahre gehalten habe. Ich danke daher an dieser Stelle den Studentinnen und Studenten, die diese Vorlesungen gehört haben, sowie den getreuen Assistentinnen und Assistenten, die viele Übungsgruppen und Seminare mit Eifer und Engagement betreut haben, für kritische Fragen, Kommentare und viele Anregungen.

Meinem Kollegen Immanuel Bloch danke ich herzlich für Gespräche über moderne optische Anwendungen der Maxwell-Theorie und

¹ Erste Ideen hierzu wurden von Oskar Klein, Z. Physik **37** (1926) 895, und der Überlieferung nach von Wolfgang Pauli entwickelt.

für die Anregung, die Beschreibung Gauß'scher Strahlen und das faszinierende Gebiet der Metamaterialien mit negativem Brechungsindex in dieses Buch aufzunehmen. Besonders erwähnen möchte ich Mario Paschke, der immer wieder originelle Ideen in die Diskussion warf und auf interessante, manchmal zu Unrecht vergessene Literatur aufmerksam machte, sowie Nikolaos Papadopoulos und Rainer Häußling, die Teile des Entwurfs gelesen und wichtige oder nachdenkliche Anregungen gegeben haben. Herrn Maximilian Becker danke ich für seine sorgfältige Korrektur von Kapitel 6 und einige wertvolle Anregungen dazu.

Die Zusammenarbeit mit den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Springer-Verlags in Heidelberg sowie mit der LE-TeX GbR in Leipzig war wie immer ausgezeichnet und effizient. Hierfür danke ich Bianca Alton, Margit Maly, besonders aber Herrn Dr. Thorsten Schneider bei Springer sowie dem Team bei der LE-TeX GbR.

Mainz, August 2016

Florian Scheck

Theoretische Physik 3

Klassische Feldtheorie: Von Elektrodynamik,
nicht-Abelschen Eichtheorien und Gravitation

Scheck, F.

2017, XVI, 438 S. 69 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-662-53638-4