

Schon im 18. Jahrhundert war bekannt, daß sich in teilevakuierten Glasröhren Funkenüberschläge, d.h. Entladungen über relativ große Entfernungen produzieren ließen. Mit Erstaunen hatte man die sie begleitenden lebhaften Lichterscheinungen studiert. Faraday war offenbar der erste, der sie genauer beschrieb. Er unterschied 1838 zwischen dem Leuchten, das sich von dem positiven Pol, der Anode, bis in die Nähe des negativen Pols, der Kathode, erstreckte, und dem die Kathode umhüllenden Glimmen. Nach der Erfindung der Quecksilbervakuumpumpe (1855), mit der die Evakuierung der Röhren drastisch verbessert werden konnte, wurden dann Ende der 50er Jahre weitergehende Untersuchungen der Entladungserscheinungen möglich. So konnte der Bonner Physiker Julius Plücker (1801-1868) 1858 feststellen, daß bei fortschreitender Verringerung des Drucks in der Röhre das Leuchten der Anode immer weiter zurückwich, während sich das Glimmen der Kathode zunehmend ausdehnte. Offenbar handelte es sich bei beiden Erscheinungen um zwei verschiedene und voneinander unabhängige Effekte, denn eine magnetische Kraft hatte auf beide verschiedene Wirkungen (Turpin 1982, S.122). Zudem stellte Plücker ein Fluoreszieren des Glases in der Nähe der Kathode fest, was bald zu einer weiteren Entdeckung führte. Plückers Schüler Hittorf beobachtete 1869, daß ein vor der Kathode platzierter Gegenstand einen Schatten auf das Glas der Röhre warf. Deshalb erklärte er das Glimmen mit einer besonderen Art von Strahlung, die offenbar von der Kathode geradlinig ausging und, wo sie auf Glas traf, dieses fluoreszieren ließ. Eugen Goldstein (1850-1930) führte 1876 für diese Strahlung die Bezeichnung "Kathodenstrahlen" ein.

Durch die Untersuchungen von Plücker, Hittorf, Goldstein und des Briten William Crookes (1832-1919) waren Ende der 70er Jahre folgende Eigenschaften der Kathodenstrahlen bekannt:

- (i) Sie werden in einer evakuierten Röhre von der Kathode und zwar im Allgemeinen senkrecht zu deren Oberfläche ausgesandt.
- (ii) Sie bewegen sich geradlinig.
- (iii) Sie lassen Glas fluoreszieren.
- (iv) Sie werden durch Magnetfelder abgelenkt.
- (v) Ihre Eigenschaften sind vom verwendeten Kathodenmaterial unabhängig.
- (vi) Sie können unter Umständen chemische Reaktionen auslösen.
- (vii) Wenn sie auf eine dünne Folie gerichtet werden, können sie die bis zur Glut erhitzen, d.h. sie transportieren Energie.

(viii) Wenn sie auf Gegenstände fallen, üben sie auf diese Kräfte aus (Anderson 1964, S.23ff).

Über die Natur der Strahlen war damit allerdings noch nichts ausgesagt und in dieser Frage gingen in den nächsten 20 Jahren die Meinungen auseinander: Crookes faßte sie als Teilchenstrahlung auf. Seiner Meinung nach bestand der Kathodenstrahl aus Molekülen des noch in der Röhre vorhandenen Restgases, die an der Kathode negativ geladen und dann von ihr abgestoßen wurden. Das Leuchten in der Röhre entstand durch Kollisionen der beschleunigten Moleküle mit ruhenden, wobei ihre kinetische Energie in Licht umgewandelt wurde. Bei guter Evakuierung der Röhre konnten sie die Glaswand erreichen und dort durch den Aufprall das bekannte Leuchten erzeugen (Turpin 1980, S.130). Diese Theorie konnte die bekannten Eigenschaften der Kathodenstrahlen im Wesentlichen erklären. Sie wurde in England allgemein anerkannt (Turpin 1980, S.134).

In Deutschland wurden verschiedenen Auffassungen vertreten: Einige Physiker folgten Crookes, andere, besonders Goldstein, Eilhard Wiedemann (1852-1928), Hertz und sein Schüler Philipp Lenard (1862-1947) vertraten die Position, Kathodenstrahlen seien eine Art Welle. Sie faßten die Entladung als Ätherbewegung oder Ätherschwingung auf, die die Moleküle des Restgases in Vibrationen versetzte. Von ihnen ging dann das sichtbare Leuchten aus. Die Schwäche dieser Theorie bestand darin, daß weder jemand präzisieren konnte, um welche Art von Ätherbewegung es sich bei einer Entladung handelte, noch in der Lage war, diese Bewegungen nachzuweisen (Turpin 1980, S.143ff). Doch auch diese Theorie konnte den bekannten Eigenschaften im wesentlichen Rechnung tragen, und vor allem legten ihre Anhänger Hertz und Lenard beeindruckende Argumente gegen die Korpuskulartheorie vor: Bisher hatte niemand eindeutig elektrostatische Effekte von und auf Kathodenstrahlen nachweisen können. Zudem konnten Kathodenstrahlen - dies hatte Hertz experimentell gezeigt - dünne Metallfolien durchdringen, was offenbar im Widerspruch zur Hypothese einer Teilchennatur stand.

Die Theorie der Teilchenstrahlung war harten Angriffen ausgesetzt, als J.J. Thomson in den 90er Jahren begann, sich mit Kathodenstrahlen zu beschäftigen. Thomson hatte in Cambridge studiert, war Maxwellianer, Anhänger des mechanistischen Naturbildes und ab 1884 Direktor des

Cavendish-Laboratoriums. Anfang der 80er Jahre hatte er im Rahmen einer Preisarbeit die Eigenschaften von W. Thomsons Wirbelatomen untersucht und war dabei besonders auch der Frage nachgegangen, in welchen Konfigurationen sich mehrere Wirbelatome zu stabilen Molekülen assoziieren konnten. Eines seiner Ergebnisse war, daß jede Störung des Bewegungszustands des Äthers, also auch elektrische Felder, die Verbindung zweier Wirbelatome auflösen konnte. Die entstandenen Ionen konnten dann beispielsweise elektrische Entladungen auslösen (Heilbron 1976, S.365). Wie die meisten seiner Landsleute glaubte Thomson an die Teilchennatur der Kathodenstrahlen. Anders als Crookes war er jedoch der Ansicht, daß die Restgasmoleküle an der Kathode nicht geladen, sondern seinen Untersuchungen über Wirbelatome entsprechend in Ionen zerlegt wurden. Das negative Ion wurde dann wie in Crookes Theorie von der Kathode weggeschleudert (Turpin 1980, S.180).

Zur Konsolidierung der Teilchentheorie versuchte Thomson, elektrostatische Effekte auf oder mit Kathodenstrahlen zu produzieren, was ihm schließlich mit Hilfe besonders hoher Evakuierungen auch gelang: Er konnte demonstrieren, daß sie einerseits getroffene Gegenstände negativ aufluden und andererseits durch elektrostatische Kräfte abgelenkt wurden. Zwar waren ähnliche Effekte schon zuvor beobachtet worden; Thomson stellte sie jedoch eindeutiger dar und interpretierte sie im Rahmen des Teilchenkonzepts. Um nun auch der Natur der hypothetischen Teilchen auf die Spur zu kommen, versuchte er ihre spezifische Ladung mit Hilfe der bekannten Methode der magnetischen Ablenkung von Kathodenstrahlen zu bestimmen (Abb. 3.8.1). Es zeigte sich, daß die Bahn der Teilchen, d.h. die Form des abgelenkten Strahls bei konstanter Anodenspannung von der Art des Restgases unabhängig und in Übereinstimmung mit der Theorie stets kreisförmig war. Überraschenderweise erwies sich bei diesen Messungen die spezifische Ladung der Teilchen als etwa 1000-mal größer als die von Wasserstoffionen. Also mußte entweder ihre Ladung viel größer oder ihre Masse viel kleiner als die Ladung bzw. Masse der Wasserstoffionen sein.

Damals herrschte die Meinung vor, Atome seien nicht weiter zerlegbare Teilchen und das Wasserstoffatom von ihnen das kleinste (Owen 1955, S.174f). Andere Physiker, die vor Thomson die spezifische Ladung der hypothetischen Teilchen gemessen hatten, hatten deshalb ihren Meßwerten nicht getraut. Thomson dagegen nahm an, die Kathodenstrahl-

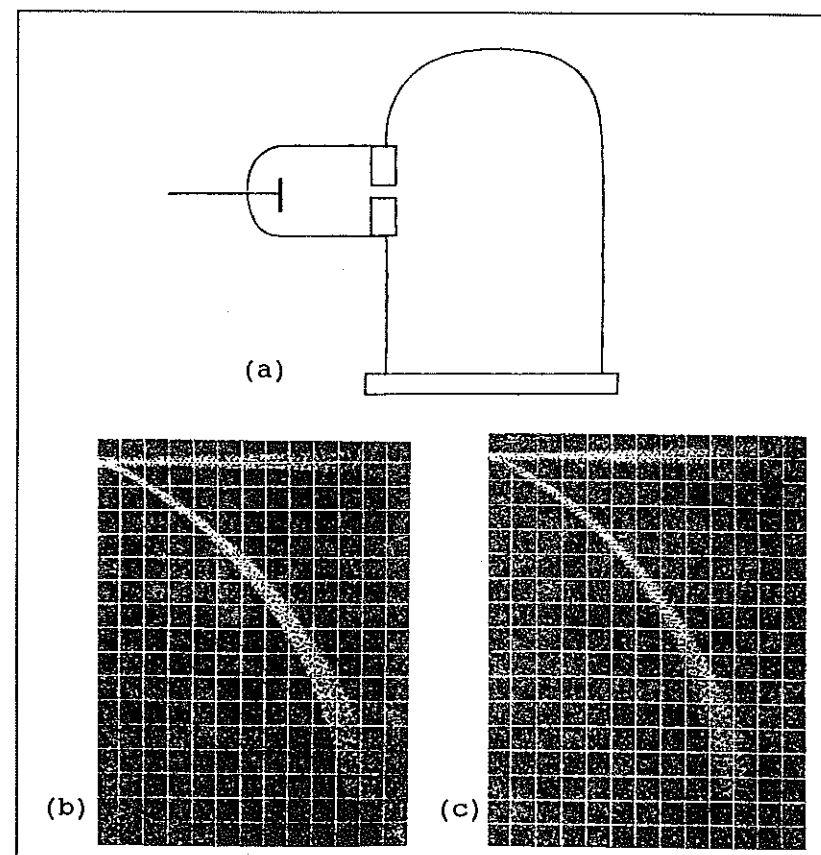


Abb. 3.8.1 Versuch zur Messung der spezifischen Ladung der hypothetischen Kathodenstrahlteilchen (J.J. Thomson 1897). (a) Skizze des Aufbaus: Die Kathode befindet sich links im Seitenarm der evakuierten Glasglocke; die Anode ist das geschlitzte Metallplättchen in der Öffnung des Seitenarms. Durch sie fallen Kathodenstrahlen in die Glasglocke, wo sie eine (nicht gezeichnete) Glasplatte mit quadratischem Raster streifen. Die Apparatur befindet sich zwischen zwei Spulen, die ein zur Zeichenebene senkrechtes Magnetfeld erzeugen. Es krümmt die Strahlen und spreizt sie fächerartig auf. (b) und (c) Fotos der Strahlen bei Wasserstoff bzw. Luft als Restgas: Die waagerechten Zweige interpretierte Thomson als Effekte ungeladener Restgasmoleküle. Die Krümmungen der abgelenkten Zweige unterschieden sich bei verschiedenen Restgasen nicht. Zur Berechnung der spezifischen Ladung der Teilchen wurde durch die Erwärmung eines bestrahlten Thermoelements ihre kinetische Energie, mit einem Elektrometer ihre Ladung, ferner der Radius der Krümmung und die magnetische Feldstärke gemessen. Thomson erhielt Werte um $0,5 \cdot 10^{-7}$, mit einem anderen Aufbau um $1,3 \cdot 10^{-7}$ Gramm pro elektromagnetische Ladungseinheit (vgl. Thomson 1897, S.300ff, ders. 1948).

teilchen hätten eine 1000-mal kleinere Masse als Wasserstoffatome, wären mithin subatomare Teilchen. Die Idee war tragfähig: Sie stand in Einklang mit seiner Zerlegungstheorie, wenn man annahm, an der Kathode würden nicht Moleküle, sondern Atome in ihre Bestandteile zerlegt. Sie erklärte, warum die spezifische Ladung der Teilchen von der Art des Restgases unabhängig war, da es sich bei ihnen um invariante Bausteine der Materie handelte. Schließlich machte sie auch die Durchdringung von Metallfolien verständlich. Denn bei diesen Größenverhältnissen war es denkbar, daß die Teilchen durch die Poren im Atomverband hindurchschlüpfen.

Diese Argumente reichten 1897 noch nicht aus, um die physikalische Welt von der Existenz subatomarer Teilchen zu überzeugen. Die Situation änderte sich jedoch in den nächsten Jahren, als es gelang, auch durch Bestrahlung von Metallen mit ultraviolettem Licht sowie mit Hilfe glühender Kohlefäden elektrische Teilchen zu erzeugen. Ihre spezifische Ladung konnte gemessen werden und stimmte jeweils mit der von Thomsons Kathodenstrahlteilchen überein. Unklar war jedoch nach wie vor, welche absolute Ladung die Teilchen besaßen. Die von elektrolytisch erzeugten Wasserstoffionen getragene - offenbar die kleinste vorkommende Ladungsmenge - die "atomare Ladungseinheit", war bislang nur ungenau bestimmt worden. Thomson gelang es nun, sie mit einer neuen Meßmethode an Ionen, die durch Röntgenstrahlen erzeugt worden waren, exakter zu bestimmen (Abb. 3.8.2). Mit einer ähnlichen Methode ließ sich auch die Ladung der durch Bestrahlung mit ultraviolettem Licht erzeugten Teilchen bestimmen. Sie stimmte mit der atomaren Ladungseinheit überein; hier lagen offenbar Teilchen vor, die die gleiche absolute Ladung wie Wasserstoffionen besaßen und die gleiche spezifische wie die Kathodenstrahlteilchen (vgl. Romer 1942/43, S.158f).

Obwohl ein direkter Beweis für die Existenz subatomarer Teilchen auch mit diesen Experimenten nicht gegeben wurde, stützten sie doch die These, allen diesen Phänomenen lägen mit der atomaren Ladungseinheit geladenen Teilchen mit 1000-mal kleinerer Masse als der von Wasserstoffatomen zugrunde. Alle Ergebnisse ließen sich im Einklang mit Lorentz' Theorie erklären. So wurden Lorentz' Teilchen mit Thomsons identifiziert; für das negative Teilchen bürgerte sich der Name "Elektron" ein, den der Ire Johnstone Stoney (1826-1911) im Jahre 1874 für die atomare Ladungseinheit geprägt hatte.

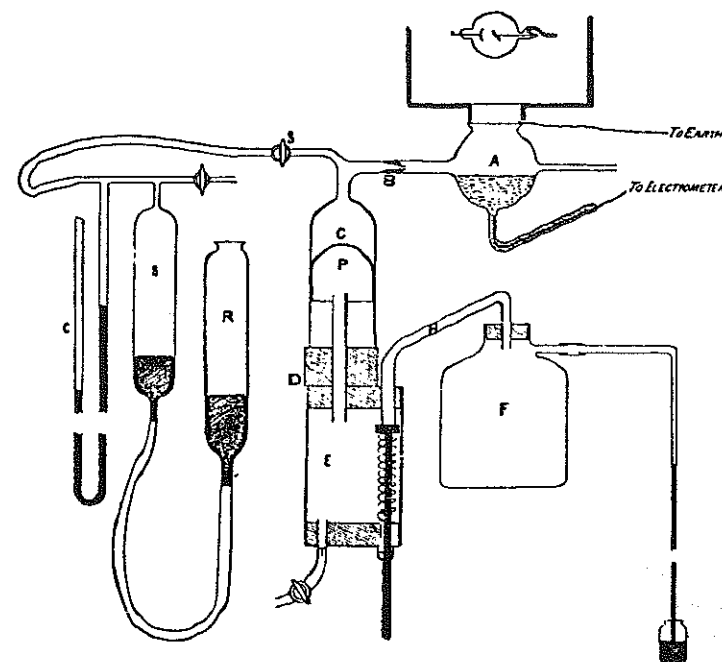


Abb. 3.8.2 Versuch zur Messung der atomaren Ladungseinheit (J.J. Thomson 1898). Zentral ist das Gefäß A. Die in ihm befindliche Luft wird durch Röntgenstrahlung ionisiert und dann ihre Leitfähigkeit gemessen. Dazu wird das Wasser im unteren Teil von A geladen und der zeitliche Spannungsverlust am Elektrometer verfolgt. Aus der Leitfähigkeit ergibt sich die im Glas insgesamt vorhandene Ladungsmenge. Der Rest des Aufbaus dient dazu, schnelle Druckminderungen in A herbeizuführen. Das Gefäß F ist evakuiert; nach Öffnen des Ventils in E schnellst der Kolben P nach unten. Dadurch wird der Druck in A um einen mit den Gefäßen S und R einstellbaren Betrag herabgesetzt. Die kontrollierte Expansion erzeugt eine definierte Abkühlung des Gases in A; durch sie kondensiert eine berechenbare Menge Wasserdampf in Tröpfchen an den einzelnen Gasionen. Aus der Sinkgeschwindigkeit der so entstandenen Wolke läßt sich die Größe der Tropfen und damit auch ihre Anzahl bestimmen. Aus der bekannten Gesamtladung und der Tröpfchenzahl ergibt sich die Ladung der einzelnen Gasionen. Thomson erhielt einen Wert von etwa $6,5 \cdot 10^{-10}$ elektrostatischen Ladungseinheiten, was mit dem damals nur grob abgeschätzten Wert für die Ladung elektrolytisch erzeugter Wasserstoffionen übereinstimmte (vgl. Thomson 1898, Romer 1942/43)

Das ausgehende 19. Jahrhundert war die Blütezeit des mechanistischen Weltbildes, in der sich schon sein Niedergang abzeichnete. Einerseits schienen die Erfolge der Maxwellschen Elektrodynamik wie die der kinetischen Gastheorie das Programm der mechanischen Welterklärung

zu bestätigen. W. Thomsons "Baltimore Lectures" (1884) oder Boltzmanns "Vorlesungen über Maxwells Theorie der Elektrizität und des Lichtes" (1891/93) markierten dramatisch inszenierte Höhepunkte dieser Bewegung (vgl. Klein 1972, S.72f). Andererseits wurde auf dem Kontinent schon seit den 70er Jahren vereinzelt Kritik am mechanistischen Reduktionismus geübt, die sich schließlich 1895 in einer öffentlichen Diskussion auf der Naturforscherversammlung in Lübeck verdichtete. Aber der Hauptimpuls zur Aufgabe des mechanistischen Weltbildes kam aus der Elektrodynamik: Lorentz betrachtete den Äther zwar noch als Sitz dynamischer Phänomene, hatte aber Ladung als Grundbegriff wiedereingeführt und dem Äther jede mechanische Wechselwirkung mit Materie abgesprochen. Die Konstruktion der Feldgleichungen auf der Basis der Mechanik wurde nun zunehmend irrelevant, denn sie lieferte keine neuen Einsichten und der Erfolg der Theorie war von ihr unabhängig (Klein 1972, S.78). Zudem kam Lorentz im Zuge seiner Untersuchungen nicht umhin, den elektrischen Teilchen wie dem Äther auch nicht-mechanische Eigenschaften zuzusprechen (siehe McCormach 1970, S.471ff). So verband sich mit der um die Jahrhundertwende erfolgten Anerkennung der Elektronentheorie die Abkehr vom mechanistischen Weltbild. Die aufkommende Hoffnung auf eine elektrodynamische Welterklärung bedeutete eine gewisse Rückkehr zu Weberschen Visionen.

"Diese Erwägungen zeigen uns auch, warum gewisse Theorien, die man endgültig verlassen und vom Experiment widerlegt glaubte, plötzlich wieder aus ihrer Asche auferstehen und ein neues Leben beginnen. Darum, weil sie wahre Beziehungen ausdrückten; und weil sie nicht aufgehört hatten, das zu thun, als man aus dem einen oder anderen Grunde dieselben Beziehungen in einer anderen Sprache ausdrücken zu müssen glaubte. Sie hatten so eine Art latenten Lebens bewahrt. Noch vor kaum 15 Jahren gab es keinen lächerlicheren, mehr überwundenen Standpunkt, als die Fluida Coulombs; und siehe da, sie erscheinen heute unter dem Namen Elektron wieder. ... Es wäre kühn, zu behaupten, dass der Glaube an die Elektrons nicht einst wieder erschüttert würde. Das würde nicht weniger seltsam sein, wie diese unerwartete Wiedergeburt zu konstatieren." (Poincaré 1900, S.186)

Literaturverzeichnis

Literatur zu Kapitel 2

- Alonso, M.; Finn, E. J.: Fundamental University Physics. Vol. II: Fields and Waves, 10. Auflage, Reading/Mass. 1979
- Bernal, J. D.: Sozialgeschichte der Wissenschaften. Bd.2: Die Geburt der modernen Wissenschaft. Wissenschaft und Industrie. Reinbek bei Hamburg 1978
- Bevilacqua, F.: The Principle of Conservation of Energy and the History of Classical Electromagnetic Theory (1845 - 1903). Diss. Cambridge 1983
- Black, M.: Models and Metaphors. Studies in Language and Philosophy. 4. Auflage Ithaka, New York 1968
- Böhme, G.; Daele, W.v.d.; Hohlfeld, R.; Krohn, W.; Schäfer, W.; Spengler, T.: Starnberger Studien I. Die gesellschaftliche Orientierung des wissenschaftlichen Fortschritts. Frankfurt/M. 1978
- Breger, H.: Die Natur als arbeitende Maschine. Zur Entstehung des Energiebegriffs in der Physik 1840 - 1850. Frankfurt/M. 1982
- Brouwer, W.; Singh, A.: The Historical Approach to Science Teaching. In: The Physics Teacher April 1983, S.230 - 236
- Bruhn, J.: Lernschwierigkeiten im Physikunterricht. Modelle und Konsequenzen. In: physica didactica Bd.13, Heft 1 (1986a), S.35 - 47
- Bruhn, J.: Wissenschaftsgeschichte im Physikunterricht - Historische Analyse eines didaktischen Prinzips. In: physica didacta Bd.13 Sonderheft 1986b, S.23 - 32
- Brush, S. G.: Kinetische Theorie I. Die Natur der Gase und der Wärme. Einführung und Originaltexte. Braunschweig 1970
- Brush, S. G.: The Role of History in the Teaching of Physics. In: The Physics Teacher, Mai 1969, S.271 - 280
- Brush, S. G.; King, A. L. (Hrsg.): History in the Teaching of Physics. Proceedings of the International Working Seminar on the Role of the History of Physics in Physics Education. Hanover/New Hampshire 1972
- Brush, S. G.: Should the History of Science Be Rated X? The way scientists behave (according to historians) might not be a good model for students. In: Science. Bd.183 (1974), S.1164 - 1172
- Buchwald, J. Z.: The Hall Effect and Maxwellian Electrodynamics in the 1880's. Part I: The Discovery of a New Electric Field. In: Centaurus Bd.23 (1980), S.51 - 95
- Bunge, M.: Analogy in Quantum Theorie: From Insight to Nonsense. In: British Journal for the Philosophy of Science Bd.18 (1967), S.265 - 286
- Bunge, M.: Philosophy of Physics. Dordrecht 1973
- Collins, H. M.; Shapin, S.: Experiment, naturwissenschaftlicher Unterricht und die neue Geschichte und Soziologie der Naturwissenschaft. In: physica didactica Bd.11 (1984), S.33 - 46
- Devons, S.; Hartmann, L.: A History-of-Physics Laboratory. In: Physics Today Bd.23, Heft 2 (1970), S.44 - 49
- Diedrich, W. (Hrsg.): Theorien der Wissenschaftsgeschichte. Beiträge zur diachronischen Wissenschaftstheorie. Frankfurt/M. 1974

CIP-Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Meya, Jörg:

Elektrodynamik im 19. Jahrhundert : Rekonstruktion ihrer
Entwicklung als Konzept einer redlichen Vermittlung / Jörg

Meya. — Wiesbaden : Dt. Univ.-Verl., 1990

(DUV : Wissenschafts- und Technikgeschichte : Technik)

Zugl.: Oldenburg, Univ., Diss., 1990

ISBN 3-8244-2011-2



91 H 15

Der Deutsche Universitäts-Verlag ist ein Unternehmen der
Verlagsgruppe Bertelsmann International.

© Deutscher Universitäts-Verlag GmbH, Wiesbaden 1990



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Druck und Buchbinder: difo-druck Bamberg
Printed in Germany

ISBN 3-8244-2011-2

Vorwort

Nicht selten erschöpft sich das Physiklernen im Grundstudium an der Hochschule doch mehr oder minder im "blinden" Lernen von Fakten, Gleichungen und Formalismen. "Lernen durch Gewöhnung" ersetzt ein Lernen, das sich mit einem tiefergehenden Verstehen der Zusammenhänge verbindet. Es geht fast vollständig verloren, daß auch physikalische Fakten und Theorien immer erst vermutet, erdacht, produziert und gegen denkbare Alternativen durchgesetzt werden müssen und daß diese Prozesse stets auch durch kultur- und sozialgeschichtliche Gegebenheiten beeinflußt werden. - Diese Ideen waren Anlaß und Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit, die als Dissertation am Fachbereich Physik der Universität Oldenburg eingereicht und genehmigt wurde. Sie setzt sich das Ziel, Material für Kurse bereitzustellen, in denen den genannten Gesichtspunkten am Beispiel der Geschichte der Elektrodynamik nachgegangen werden kann. Zudem soll die Struktur der klassischen Elektrodynamik durch Schilderung ihrer Genese aufgeschlüsselt und damit transparent gemacht werden. Dabei gilt es, die Geschichte nicht unzulässig zu vereinfachen, vielmehr sie in wissenschaftshistorisch vertretbarer Form darzulegen.

Ich danke allen, die durch Anregungen, Diskussionen, Kritik und handwerkliche Hilfe zum Werden meiner Arbeit beigetragen haben. Meinem Lehrer Dr. Falk Rieß bin ich für seine Geduld und seine Ratschläge zu besonderem Dank verpflichtet. Besonderer Dank gilt gleichfalls dem Evangelischen Studienwerk Villigst, das durch seine großzügige Förderung die Anfertigung der Arbeit überhaupt erst ermöglichte.