

# Ein Pionier der Magneto-Optik

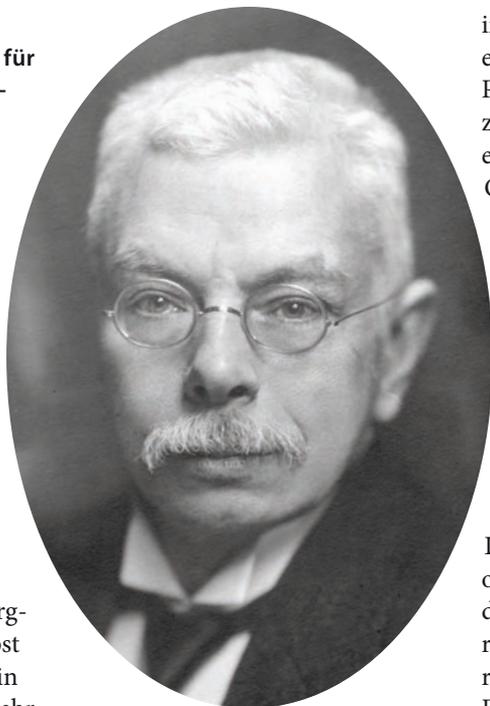
Vor 150 Jahren wurde der niederländische Physiker und Nobelpreisträger Pieter Zeeman geboren.

Anne J. Kox

Pieter Zeeman gehörte zu der kleinen Zahl von Physikern, die für den großartigen Ruf der niederländischen Physik um 1900 verantwortlich waren. Zusammen mit seinem Kollegen Johannes Diderik van der Waals dominierte er über viele Jahre die Physik an der Universität von Amsterdam.

**G**eboren wurde Zeeman am 25. Mai 1865 in der Kleinstadt Zierikzee, in der niederländischen Provinz Zeeland, als Sohn eines evangelischen Pfarrers. Bereits in jungen Jahren zeigte sich sein Talent für systematische und sorgfältige Beobachtungen. Im Herbst 1882 war in den Niederlanden ein Nordlicht zu beobachten – ein sehr seltenes Phänomen in diesen Breiten, das Zeeman über viele Stunden fasziniert beobachtete. Seine Aufzeichnungen sandte er an einen Physiklehrer, der diese in zwei Artikeln über das Nordlicht in der Zeitschrift *Nature* erwähnte. Das führte dazu, dass Zeeman einige Zeit darauf einen Brief erhielt, welcher an „Professor Zeeman“ adressiert war und den Nachdruck eines weiteren Artikels enthielt, in dem Zeemans Beobachtungen erwähnt wurden. Diesen Umschlag bewahrte Zeeman sein ganzes Leben lang sorgfältig auf.

Nach Abschluss der weiterführenden Schule ging Zeeman an die Universität Leiden, um Physik zu studieren. Dort wurde er nach seinem Abschluss Assistent am Physikalabor. 1893 promovierte Zeeman bei Heike Kamerlingh Onnes mit einer Dissertation zum Kerr-Effekt. Während eines Forschungsaufenthalts in Straßburg wandte er sich der experimentellen Untersu-



Pieter Zeeman (1865 – 1943)

chung der Ausbreitung elektrischer Schwingungen in Flüssigkeiten zu.

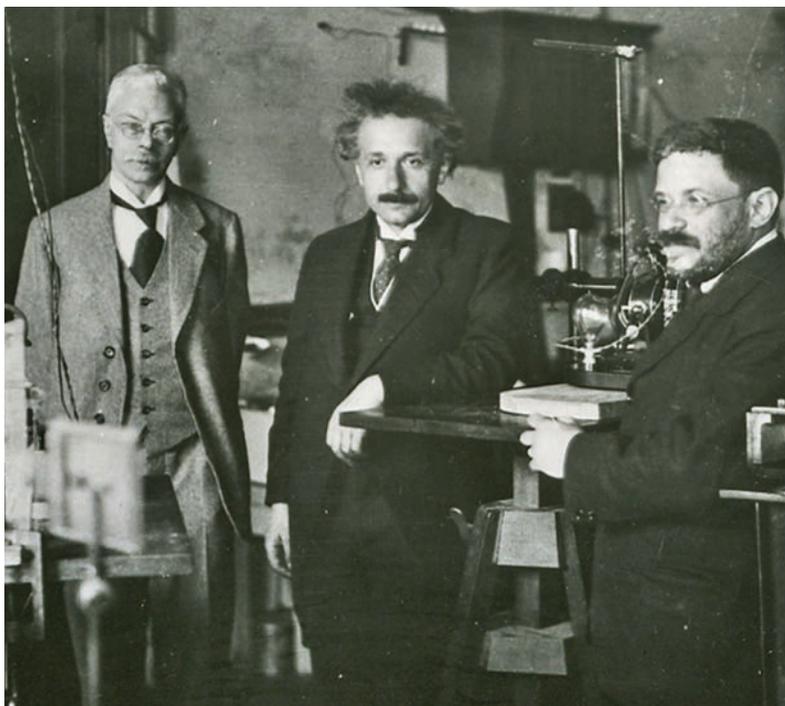
Nach seiner Rückkehr nach Leiden richtete sich Zeemans Interesse auf die mögliche Auswirkung eines Magnetfeldes auf Form und Position von Spektrallinien. Die Wahl dieses neuen Forschungsgebiets war durch Michael Faraday inspiriert, den Zeeman sehr bewunderte. Faraday selbst war es nicht gelungen, einen solchen Effekt nachzuweisen, doch da Zeeman wesentlich modernere experimentelle Mittel zur Verfügung standen, entschied er, dass ein neuer Versuch die Mühe wert sei.

Wir können Zeemans experimentelle Aktivitäten genau nachvollziehen, da er seine Labortagebücher jener Zeit sehr sorgfältig aufbewahrte. Er begann seine Arbeit im Herbst 1896. Am 2. September trank er ein Stück Asbest

in Haushaltssalz und hielt es über eine Flamme, die zwischen den Polen eines Elektromagneten platziert war. Das Licht wurde durch ein Gitter gebeugt und durch ein Okular beobachtet. Zeeman schrieb über die beiden gelben Natrium-D-Linien: „Die Linien sind sehr scharf. Wenn man den Magneten anschaltet, werden die Linien breiter, etwa 2- bis 3-mal so breit.“ Heute können wir dies als die Entdeckung des Zeeman-Effekts interpretieren – die Aufspaltung von Spektrallinien unter dem Einfluss eines Magnetfeldes. Doch Zeeman benötigte weitere Beobachtungen, um sicher zu stellen, dass das Magnetfeld die Verbreiterung bewirkte und nicht etwa andere äußere Störungen. Nach einigen Folgeexperimenten war er sich sicher, dass das Magnetfeld die beobachteten Veränderungen auslöste, und stellte am 31. Oktober eine Publikation zu dem neuen Effekt bei der Tagung der Niederländischen Akademie der Wissenschaften vor.

Nur wenige Tage später schlug Hendrik A. Lorentz eine Erklärung des Phänomens vor. Er nahm an, dass alle Atome geladene, harmonisch schwingende Teilchen enthielten. Liegt ein externes Magnetfeld an, wirkt die daraus resultierende Lorentz-Kraft auf die Teilchen und verändert die Schwingungsfrequenzen. Ausgehend von der naheliegenden Annahme, dass die Frequenzen der beobachteten Spektrallinien mit den Frequenzen der schwingenden Ladungen korrespondieren, sagte Lorentz voraus, dass ein Magnetfeld eine Spektrallinie in drei Komponenten aufspaltet, wenn die Beobachtung im rechten Winkel zum Magnetfeld erfolgt: eine mittlere Linie in der ursprünglichen Lage sowie zwei

Prof. Dr. Anne J. Kox, Institute for Theoretical Physics, University of Amsterdam, Science Park 904, 1090 GL Amsterdam, Niederlande



Albert Einstein (Mitte) und Paul Ehrenfest (rechts) besuchten Pieter Zeeman 1920 in seinem Labor in Amsterdam.

Linien symmetrisch rechts und links davon. Entlang des Feldes sind jedoch nur zwei Linien sichtbar, beide abseits der ursprünglichen Linie. In beiden Fällen ist das Ausmaß der Verschiebung der Linien proportional zum Magnetfeld. Lorentz schloss, dass die Verbreiterung der Linie, die Zeeman anstelle einer klaren Aufspaltung beobachtet hatte, auf einem zu geringen Magnetfeld beruhte. Die beiden Formen des Effekts wurden als transversaler bzw. longitudinaler Zeeman-Effekt bekannt.

Die Theorie von Lorentz enthielt eine wichtige Vorhersage: Die zwei Linien des longitudinalen Effekts sind zirkular polarisiert, in entgegengesetzte Richtungen. Zeeman testete diese Vorhersage und fand sie bestätigt. Zu jenem Zeitpunkt gab es keinen Zweifel mehr, dass er einen neuen Effekt entdeckt hatte. Zudem unterstützte die Erklärung des Zeeman-Effekts experimentell die von Lorentz sehr viel weiter gefasste allgemeine Theorie des Elektromagnetismus. In dieser auf einem atomistischen Weltbild basierenden Theorie spielten neutrale und geladene Teilchen eine zentrale Rolle. Zeemans Entdeckung stützte insbesondere die atomistische Grundlage dieser Theorie.

Anhand seiner Beobachtungen konnte Zeeman das Verhältnis von Ladung und Masse der schwingenden Teilchen berechnen. Seltsamerweise stellte sich dieses Verhältnis als sehr viel größer heraus als bei anderen experimentell bekannten geladenen Teilchen (z. B. chemischen Ionen). Nicht lange nach dieser Entdeckung zeigte der britische Physiker J. J. Thomson, dass Kathodenstrahlen aus geladenen Teilchen bestehen, die das gleiche Ladung-Masse-Verhältnis aufweisen wie die Partikel in der Lorentz-Theorie. Ein neues Teilchen, das Elektron, war entdeckt. Die Lorentzsche Theorie wurde schnell als „Elektronentheorie“ bekannt.

In den Jahren nach 1896 führten sowohl Zeeman als auch andere Physiker viele Experimente zum Zeeman-Effekt durch. Bald entdeckte man komplexere Formen mit Aufspaltungen in mehr als drei bzw. zwei Komponenten. Es dauerte bis zur Entwicklung der Quantenmechanik in den 1920er-Jahren und bis zur Einführung des Konzepts des Elektronenspins, bis eine befriedigende Erklärung dieses „anomalen“ Zeeman-Effekts gefunden wurde.

1897 wurde Zeeman als Dozent nach Amsterdam berufen. Er arbeitete weiter am Zeeman-Effekt

und blieb in engem Kontakt mit Lorentz. In Korrespondenz und persönlichen Gesprächen diskutierten die beiden die Ergebnisse neuer Experimente anderer Wissenschaftler und hielten einander über den Stand der eigenen Forschungsarbeit auf dem Laufenden. Erstaunlicherweise versuchte sich der Theoretiker Lorentz in jenen Jahren auch selbst an Experimenten.

## Der Nobelpreis

Während seiner Amsterdamer Jahre erwarb sich Zeeman schnell internationales Ansehen. Er lernte ausländische Kollegen kennen und erhielt mehrere Ehrungen und Preise. Der wichtigste war natürlich der Nobelpreis, den er 1902 zusammen mit Lorentz erhielt. Zeeman mit einzuschließen war eine Entscheidung in letzter Minute: Einflussreiche Kräfte hatten zu erreichen versucht, dass Lorentz den Preis für seine Arbeit zum Elektromagnetismus allein erhielt. Aber das Nobelkomitee war dazu nicht bereit. Denn die Statuten des Preises schreiben klar vor, diesen für eine Erfindung oder Entdeckung zu vergeben. Indem man Zeeman für seine Entdeckung auszeichnete, war die Verleihung des Nobelpreises an Lorentz für dessen Erklärung gerechtfertigt. Die Würdigung erwähnt allgemeiner ihre Beiträge zur Magneto-Optik.

Trotz aller Preise und Ehrungen entwickelte sich Zeemans Universitätskarriere zunächst schleppend. 1900 wurde er als außerordentlicher Professor berufen, doch seine Beförderung zum ordentlichen Professor folgte erst 1908, sechs Jahre nach dem Nobelpreis. Und auch dazu hatte es massiver Drohungen Zeemans bedurft, Amsterdam für eine attraktivere Position andernorts zu verlassen. Zeitgleich mit der Ernennung zum ordentlichen Professor kam die zum Direktor des Physiklabors der Universität Amsterdam – als Nachfolger des emeritierten Diderik van der Waals. Von da an war Zeeman die führende Figur der Amsterdamer Physik. Nach 1908 interessierte er sich zunehmend für

andere Themen als die Magneto-Optik, beispielsweise die Messung der Lichtgeschwindigkeit in fließendem Wasser und sich bewegendem Glas sowie die Ermittlung des Verhältnisses zwischen träger und schwerer Masse für Kristalle und radioaktive Substanzen. Albert Einstein würdigte die Experimente zur Messung der Lichtgeschwindigkeit, da sie ihm zufolge die spezielle Relativität unterstützten.

Einer der Gründe, warum sich Zeeman anderen Forschungsgegenständen zuwandte, war die schlechte Ausstattung des Labors, die exakte spektroskopische Messungen in einer schwingungsfreien Umgebung verhinderte. Seit seiner Beförderung zum Direktor hatte Zeeman von einem neuen, modernen Labor geträumt, in dem er seine ehrgeizigen Ziele verwirklichen könnte. Doch es dauerte bis 1923, ehe ein neues Gebäude eingeweiht wurde. Dieses „Laboratorium Physica“ konnte sich der allermodernsten Einrichtung rühmen, einschließlich sehr schwerer, vibrationsfreier Tische – der schwerste wog rund 250 Tonnen. Nun konnte Zeeman endlich die spektrografische Arbeit wieder aufnehmen und zum Beispiel die Hyperfeinstruktur von Spektrallinien ermitteln. Leider hat die Universität das wunderschöne Labor vor einigen Jahren an einen Unternehmer verkauft, der es in ein Wohnhaus umgewandelt hat.

Nach Zeemans Ausscheiden 1935 blieb sein Lehrstuhl fünf Jahre lang vakant, da es sich als schwierig herausstellte, einen Nachfolger zu finden, der den Erwartungen der Universitätsleitung, der Naturwissenschaftlichen Fakultät und des Physikalischen Instituts entsprach. Schließlich berief man den Experimentalphysiker Cornelis Gorter. Zeeman war enttäuscht, weil Gorter kein Spektroskopiker war. Unter seiner Führung verlor die Spektroskopie, Zeemans Lebenswerk, ihre zentrale Stellung im Labor. Dass das Labor in „Zeeman Laboratorium“ umbenannt wurde, kann wohl nur ein schwacher Trost für Zeeman gewesen sein.

Pieter Zeeman war ein freundlicher, aber etwas distanzierter

Mensch, der sich selbst und anderen viel abverlangte. Ihm gelangen durch seine Ausdauer und Hingabe bedeutende Beiträge zur Physik, und er erreichte auch sein Ziel eines eigenen Labors, in dem er völlig unabhängig war und nach eigenen Wünschen, ohne Beeinflussung von außen, arbeiten konnte.

Pieter Zeemans letzte Jahre waren überschattet durch die Kriegsumstände und nachlassende Gesundheit. Er starb am 9. Oktober 1943 nach kurzer Krankheit. Drei Tage später wurde er in Haarlem begraben, nicht weit vom Grab seines Mit-Nobelpreisträgers Lorentz.

\*

Die Übersetzung dieses Artikels aus dem Englischen besorgte Jutta Pistor.

### Weiterführende Literatur

- P. Zeeman*, Verhandelingen over Magneto-optische Verschijnselen, Eduard Ijdo, Leiden (1921), <https://archive.org/details/verhandelungen00zeemgoog>
- E. P. Lewis* (Hrsg.), The Effects of a Magnetic Field on Radiation. Memoirs by Faraday, Kerr, and Zeeman, American Book Company, New York (1900), <https://archive.org/details/effectsamagneti-00zeemgoog>
- A. J. Kox*, The Discovery of the Electron: II. The Zeeman Effect, European Journal of Physics **18**, 139 (1997)
- A. J. Kox*, Zeeman and his Contemporaries, in: *H. B. van Linden van den Heuvell, J. T. M. Walraven und M. W. Reynolds* (Hrsg.), Atomic Physics 15, Zeeman Effect Centenary, World Scientific, Singapur (1997) S. 212
- A. J. Kox*, Pieter Zeeman's Experiments on the Equality of Inertial and Gravitational Mass, in: *J. Earman, M. Janssen und J. D. Norton* (Hrsg.), The Attraction of Gravity, Birkhäuser, Boston (1993), S. 172

### DER AUTOR

**Anne J. Kox** war bis zu seiner Emeritierung 2013 Pieter Zeeman Professor für Physikgeschichte an der Universität Amsterdam. Er ist Herausgeber des wissenschaftlichen Briefwechsels von Hendrik A. Lorentz und schreibt an dessen Biographie. Außerdem ist er seit 1985 Mitarbeiter des Einstein Paper Project. In diesem Zusammenhang ist er zurzeit Gastwissenschaftler am Caltech. 2014 wurde ihm der königlich-niederländische Verdienstorden „Officier in de Orde van Oranje-Nassau“ verliehen.

