

Die Frühzeit der Feinstruktur

Spektroskopische Instrumente und der Weg zur Entdeckung der Lamb-Verschiebung

Timo Mappes, Wolfgang Wimmer und Michael Kaschke

Das fundamentale Wechselspiel zwischen Durchbrüchen in der Mess- und Gerätetechnik und grundlegenden Erkenntnissen ist in der Wissenschaftsgeschichte beispielhaft untersucht worden, gerade in der Optik. Man denke an das Fernrohr und seine Bedeutung für das kopernikanische Weltbild oder das Michelson-Experiment für die Relativitätstheorie. Für die exakte Analyse der atomaren Feinstruktur spielte die Entwicklung hochpräziser Spektrographen eine entscheidende Rolle.

In der optischen Spektroskopie [1] gab es im 19. und bis weit in das 20. Jahrhundert hinein zahlreiche Beispiele für Erkenntnisfortschritte, die nur durch ein enges Zusammenspiel von Instrumentenentwicklung, Experimentiertechnik und Theorie möglich wurden [2, 3]. Das wohl bekannteste Beispiel ist die Beschreibung der dunklen und später nach Joseph von Fraunhofer benannten Spektrallinien im Sonnenspektrum.¹⁾ Erst 1859 gelang es Gustav Kirchhoff, den Zusammenhang von Absorptions- und Emissionswellenlängen der Fraunhoferschen Linien zu beschreiben und gemeinsam mit Robert Bunsen kurz danach die Spektralanalyse zu entwickeln.

Hier möchten wir ein weiteres Beispiel aus der Spektroskopie diskutieren: die Entdeckung der Lamb-Verschiebung in der Feinstruktur des Wasserstoffspektrums. Wir befinden uns damit im Kontext der Quantenphysik, die sich in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts sehr dynamisch entwickelte. Das betraf sowohl die Theorie als auch die in diesem Kontext stehenden Experimente und den Bau der dafür erforderlichen Instrumente. Das führte zu immer wieder wechselnden Interpretationen der exper-

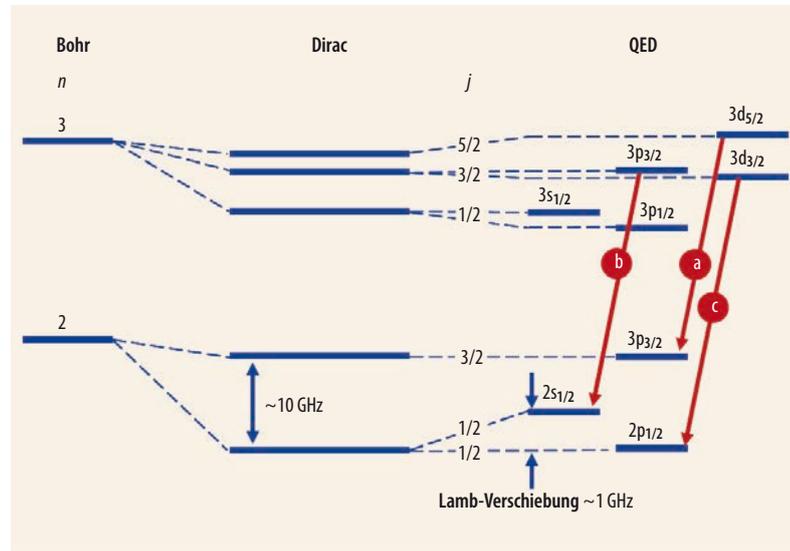


Abb. 1 Das Termschema des atomaren Wasserstoffs wurde von den Modellen von Bohr über Dirac bis zur QED immer komplexer. Die Hauptlinien sind als Übergänge $3d_{5/2}$ auf $2p_{3/2}$ (a) und $3d_{3/2}$ auf

$2p_{1/2}$ (c) gekennzeichnet, die Lamb-Verschiebung zwischen den Energieniveaus $2s_{1/2}$ und $2p_{1/2}$ lässt sich aus dem Übergang $3p_{3/2}$ auf $2s_{1/2}$ (b) bestimmen.

rimentellen Ergebnisse und damit einem eher ungewöhnlichen Verlauf in der Theorieentwicklung.

Als Willis Eugene Lamb 1955 den Physik-Nobelpreis für seine Entdeckungen zur Feinstruktur des Wasserstoffspektrums erhielt, konnte die Spektroskopie des Wasserstoffs auf eine lange Geschichte zurückblicken. 1868 hat Anders Jonas Ångström als erster die Spektrallinien des Wasserstoffs als Teil des Sonnenspektrums genau vermessen. Johann Jakob Balmer stellte 1885 eine empirische Gleichung auf, mit der er die vier sichtbaren Spektrallinien des Wasserstoffs (Balmer-Serie) beschreiben konnte:

$$\lambda = A \cdot \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad (n = 3, 4, 5, 6),$$

wobei A die von Balmer bestimmte empirische Konstante darstellt.

Bereits im Jahr 1887 suchten Albert Michelson und Edward Morley nach einer geeigneten Wellenlänge, um den Meter zu definieren. Wäh-

rend ihrer Messungen entdeckten sie, dass die Balmer-Linie für $n = 3$ (die rote $H\alpha$ -Linie) eine Doppelstruktur hat, die allgemeiner als Feinstruktur beschrieben wurde [4]. Seitdem kommen die Wasserstofflinien zur Eichung und für Präzisionsmessungen mit Spektrometern und Interferometern zum Einsatz.

Während sich die Balmer-Gleichung problemlos durch das 1913 von Niels Bohr eingeführte Modell des Wasserstoff-Atoms mit n als einziger Quantenzahl und $n \geq 2 + 1$ erklären ließ und auch durch die spätere Quantenmechanik nach Schrödinger und Heisenberg bestätigt wurde, war eine relativistische Theorie des Elektrons nötig, um diese Doppelstruktur zu erklären. Eine erste Rechnung (noch ohne Kenntnis des Spins) dazu lieferte Arnold Sommerfeld [5].

Paul Dirac entwickelte 1928 die grundlegende Quantentheorie für das relativistische Fermion mit einem Spin $1/2$ [6]. Aus der Dirac-

1) Vgl. dazu J. Teichmann, Physik Journal, Oktober 2017, S. 53

Prof. Dr.-Ing. Timo Mappes, Deutsches Optisches Museum, Carl-Zeiss-Platz 12, 07743 Jena;
Dr. Wolfgang Wimmer, ZEISS, Carl-Zeiss-Promenade 10, 07745 Jena;
Prof. Dr. Michael Kaschke, Carl Zeiss AG, Carl-Zeiss-Str. 22, 73447 Oberkochen

Gleichung leiten sich die Wasserstoff-Niveaus ab:

$$E_{jn} = -m_e c^2 \times \left[1 - \left(1 + \left[\frac{\alpha}{n - j - \frac{1}{2} + \sqrt{(j + \frac{1}{2})^2 - \alpha^2}} \right]^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \right]$$

mit Hauptquantenzahl n , Gesamtdrehimpuls j , Lichtgeschwindigkeit c , Elektronenmasse m_e und Feinstrukturkonstante α .

Nach Dirac folgte damit für das Elektron des Wasserstoffs der gleiche energetische Zustand (in der jeweiligen Hauptquantenzahl n) für $n s_{1/2} = n p_{1/2}$, die Energie ist also unabhängig von der „Bahn“-Drehimpulsquantenzahl l und hängt nur vom Gesamtdrehimpuls j ab.

Lambs Interesse an einer noch genaueren Auflösung der Feinstruktur der Wasserstofflinien wurde durch die Veröffentlichung der Versuche von Betz 1932 und von Haase 1935 geweckt, welche ihrerseits Wasserstofflinien mit Mikrowellen ($\lambda = 3 - 30 \text{ cm}$) [7, 8] zu charakterisieren versuchten [9, 10]. Um die Feinstruktur weiter zu

analysieren, entwarf Lamb an der Columbia University zwischen 1945 und 1946 einen experimentellen Aufbau, mit dem er dank einer Technik, die im Zweiten Weltkrieg für das Mikrowellenradar entwickelt worden war, das Wasserstoffatom bei Wellenlängen von 2 bis 20 cm vermessen konnte. Er veröffentlichte seine ersten Ergebnisse zur Feinstruktur der Wasserstofflinien im Jahr 1947. [11] Während die Dirac-Gleichung dieselbe Energie für Wasserstoff $2s_{1/2}$ und $2p_{1/2}$ vorhersagt, zeigten die Experimente von Lamb einen eindeutigen Energieunterschied abhängig vom Bahndrehimpuls des Elektrons mit $E(2s_{1/2}) > E(2p_{1/2})$ (Abb. 1). Später zeigte sich, dass diese Verschiebung auch für die Hauptquantenzahl $n = 3$ gilt: $E(3s_{1/2}) > E(3p_{1/2})$. Also war eine Erweiterung der Dirac-Theorie nötig.

Lambs Versuchsergebnisse gelten als eine der experimentellen Grundlagen der modernen Quantenelektrodynamik (QED), die Freeman Dyson, Richard Feynman, Julian Schwinger und Sin-Itiro

Tomonaga ausformulierten [12]. Anlässlich Lambs 65. Geburtstags hielt Dyson in seiner Laudatio auf ihn fest [13]: „You were the first to see that this tiny shift, so elusive and hard to measure, which would clarify our thinking about particles and fields.“

Während Lamb tatsächlich der erste war, der die Wasserstofflinien mit dieser Genauigkeit im Mikrowellenbereich vermessen konnte, war er jedoch nicht der erste, der diese Unterschiede in den Energieniveaus des atomaren Wasserstoffs bemerkte. Lamb war sich einiger Versuche anderer Wissenschaftler voll bewusst und verwies auch in seinem Nobelpreis-Vortrag darauf [9]: „We now know that the work of Houston and Williams indicated a discrepancy which should have been taken seriously.“

William Vermillion Houston hatte 1937 am California Institute of Technology (Caltech) eine 2-prozentige Abweichung der $H\alpha$ -Linie von den nach der Dirac-Theorie erwarteten Werten gemessen [14]. Ein Jahr später wiederholte Simon Pasternack diese Versuche am Caltech und bestimmte Abweichungen von bis zu 8 Prozent. Als Erklärung schlug er vor, lediglich den $2s$ -Term ein wenig nach höheren Energien zu verschieben, ohne jedoch die dazu notwendige Änderung der Theorie auszuführen [15]. Robley C. Williams veröffentlichte eine Abweichung von ungefähr 3 Prozent nach Messungen im sichtbaren Spektralbereich mit einem „Zeiss triple-prism spectrograph“ (Abb. 2) an der Cornell University [16].

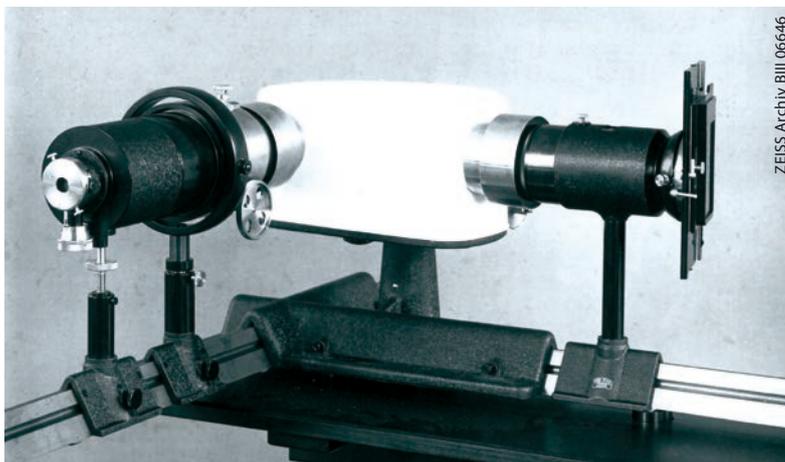
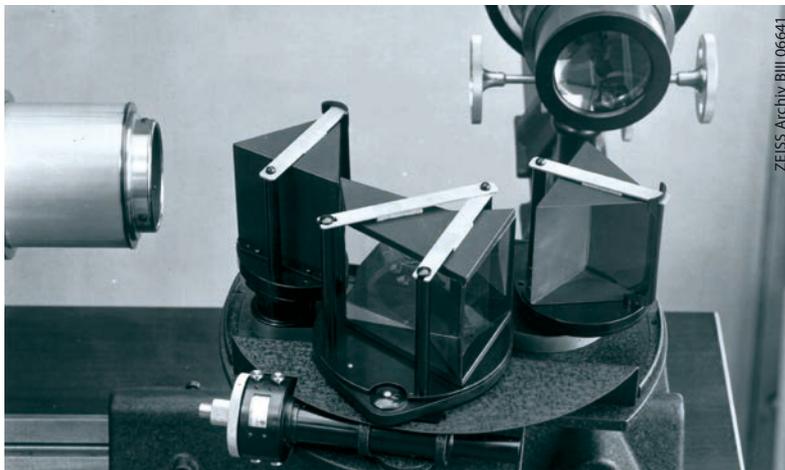


Abb. 2 Der lichtstarke ZEISS-Spektrograph mit drei Prismen wurde von Gerhard Hansen entworfen und in dieser Form von Robley C. Williams verwendet. Oben ist die Anordnung der Prismen, unten das komplette Instrument zu sehen.

Präzise vermessen

Es war das spätere Mitglied der ZEISS-Geschäftsführung Gerhard Hansen, der bereits im vierten Studiensemester 1921/22 bei Karl Försterling an der Universität Jena die ersten hochauflösenden Spektralmessungen am Wasserstoff vornahm und seine Ergebnisse der Auffälligkeiten der $H\alpha$ -Linien in seiner Dissertation zur Feinstruktur der Balmer-Linien 1925 veröffentlichte. Hansen stellte darin fest, dass

„die an Ha gefundene Unsymmetrie auf einen komplexen Bau zum mindesten dieser Linie hindeutet [17].“ Ihm war wie allen Spektroskopikern klar, dass die durch die Eigenbewegung des Atoms gegebene Doppler-Verbreiterung der Spektrallinien ein erhebliches, wenn nicht unüberwindbares Hindernis zur weiteren Hochauflösung der Spektrallinien im sichtbaren Bereich darstellten [18].

Hansen hoffte daher, mit tief gekühltem Wasserstoff genauere Messungen durchführen zu können. Dafür entwarf er auf Grundlage von Hinweisen von Försterling einen Prismenspektrographen, der durch Befürwortung von Max von Laue aus Mitteln der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft durch ZEISS gebaut wurde. Seine Experimente führte Hansen an der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (PTR) in Berlin durch. Da die dort mögliche bessere Kühlung jedoch auch keine größere Auflösung der Feinstruktur des Wasserstoffs mit sich brachte, widmete sich Hansen 1926/27 der Feinstrukturanalyse der Heliumlinien, die wegen der nicht-linearen Abhängigkeit der Feinstrukturaufspaltung von der Kernladungszahl eine größere Chance auf eine erfolgreiche Messung versprach. Der Übergang zu einem anderen Wellenlängenregime war zu dieser Zeit beim Stand der Mikrowellentechnik ausgeschlossen. Der PTR-Aufbau von Hansens Prismenspektrograph wurde später von ZEISS in ein Seriengerät überführt²⁾, eines davon setzte Williams an der Cornell University ein.

Die Veröffentlichung der Arbeit Hansens initiierte zahlreiche Versuche, die bei Ha gefundene Unsymmetrie der Doppellinie experimentell näher zu erschließen. Mit ähnlichen Methoden bzw. unter Einsatz eines Fabry-Pérot-Interferometers folgten ab 1926 die ersten Arbeiten von Housten [19] sowie 1927 von Kent, Taylor und Pearson [20]. Alle bestätigten Hansens Experimente.

Gerhard Hansen trat 1927 bei ZEISS ein und nutzte seine Erkenntnisse der hochaufgelösten Wasserstofflinien für die Charak-

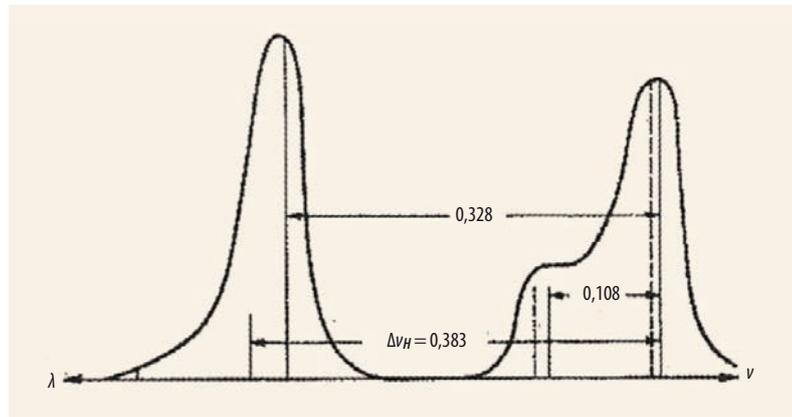


Abb. 3 Sommerfeld stellte 1940 die qualitative Intensitätsverteilung der Messungen von Hansen und Williams bei Ha bzw. Da dar und verglich die photometrischen Messungen und die angenommenen theoretischen Intensitäten (senkrechte Striche) [26].

terisierung von optischen Präzisionsinstrumenten. Die Leistungsfähigkeit der ZEISS-Instrumente wurde bis in die 1940er-Jahre hinein standardmäßig auf Basis der Spektrallinien des Wasserstoffs nachgewiesen.³⁾ Dabei nutzte Hansens Team besonders den Übergang $3d_{5/2} \rightarrow 2p_{3/2}$ und $3d_{3/2} \rightarrow 2p_{1/2}$.

Im Jahr 1925 interpretierte Gerhard Hansen die auffällige Asymmetrie bei der Doppellinie des Wasserstoffs im Rahmen des Bohr-Sommerfeldschen Atommodells, also im Rahmen der klassischen Quantenphysik. Zu eben dieser Zeit entwickelte sich die Quantenphysik dynamisch weiter. Die Jahre 1925 und 1926 waren entscheidend für die Formulierung der Quantenmechanik. Einer der treibenden Physiker, Paul Dirac, erzählte gern eine Geschichte, die er von Erwin Schrödinger gehört hatte ([12], S. 633): Als Schrödinger 1925 die erste Idee für seine berühmte Formel gehabt hatte, wendete er diese auf das Elektron im Wasserstoffatom an, erhielt aber Ergebnisse, die nicht mit den Experimenten im Einklang waren. Diese Diskrepanz lag darin begründet, dass zu dieser Zeit noch unbekannt war, dass das Elektron einen Spin hat. Schrödinger war enttäuscht und ließ die Arbeit an seiner Theorie einige Monate ruhen, bevor er sie schließlich in einer genäherten Weise anwendete, ohne die Verfeinerungen durch die Relativitätstheorie zu berücksichtigen. Doch damit waren Schrödingers Berechnungen immerhin im Einklang mit den Beobachtungen. Für Dirac hieß das, dass die Messergebnisse der Feinstruktur des Wasserstoffs die Entwicklung der Theorie

der Quantenmechanik wesentlich beeinflussten.

Ungeklärter Widerspruch

Obwohl die Quantenmechanik die Messergebnisse an den Wasserstofflinien nicht vollständig erklären konnte, setzte sie sich als wissenschaftliche Theorie durch. Der Widerspruch blieb jedoch ständig auf der wissenschaftlichen Tagesordnung. Dafür sorgte Arnold Sommerfeld, der die experimentellen Ergebnisse anderer Gruppen zusammenführte und stets überarbeitete Interpretationen veröffentlichte. Die Feinstruktur des Wasserstoffs diskutierte er im Februar 1926 noch ohne Berücksichtigung der Wellenmechanik [21]. Bereits im Juni korrigierte er seine entsprechende Veröffentlichung jedoch unter Berücksichtigung des gerade erschienenen Artikels zur Wellenmechanik von Schrödinger [22]. Hier erklärte Sommerfeld die Anomalien des von Hansen gemessenen Spektrums mit der Einführung einer „Metastabilität des 2s-Terms“ [23]. Bis 1931 verwarf Sommerfeld diese Interpretation und bezeichnete Hansens Messungen als „Verwaschenheit“, die sich im Wesentlichen aus einer Kombination von Wärmebewegung, Doppler-Effekt und Stark-Effekt ergebe [24].

1939 schreibt Arnold Sommerfeld „über die experimentelle Prüfung der Feinstruktur-Formel sind die Akten immer noch nicht geschlossen [25].“ Er betont, dass W. V. Housten der experimentelle Nachweis einer kleinen Abweichung von der Theorie gelang. 1940

2) Laut Fabrikationsliste wurde ein erstes Exemplar im April 1926 an Hansen geliefert, das zweite Exemplar erst über ein Jahr später. Hansen war also ein echter Lead-User. Zwischen 1928 und 1943 wurden weitere 150 Exemplare ausgeliefert (ZEISS Archiv BACZ 7750, Fol. 200-203). Siehe auch: G. Hansen, Gesammelte Veröffentlichungen I, Carl Zeiss, Oberkochen (1983)

3) B. Wilhelmi, persönliche Mitteilung, 7. September 2017

4) In einer Anwenderliste von 1933 (BACZ 964/46: Zeiss Dreiprismen-Spektrograph, Benutzer-Verzeichnis, Mess 262 Ref.) ist das Physikalische Institut der Cornell-Universität aufgeführt.

hebt Sommerfeld die sehr genau bestimmte Unsymmetrie der kurzwelligen Erhebung im Photometerbild Gerhard Hansens für $H\alpha$ in einem Zeitschriftenartikel hervor. Dieser Nachweis des spektralen „Buckel“ sei Houston allerdings nur für Deuterium $D\alpha$ gelungen. Sommerfeld stellt beide Ergebnisse qualitativ dar (Abb. 3) [26].

In derselben Veröffentlichung diskutiert er den Vorschlag Pasternacks, lediglich den 2s-Term ein wenig nach höheren Energien zu verschieben und findet keine den Vorschlag unterstützende Theorie. Sommerfeld scheint dies keine Ruhe gelassen zu haben, denn er beschäftigte sich 1941 in zwei weiteren Veröffentlichungen mit Pasternacks Vorschlag [27, 28]. Wieder findet er nur Erklärungen, die nicht mit dem

Experiment vereinbar sind. Tatsächlich war Pasternack mit seinem Vorschlag auf dem richtigen Weg – denn genau diese 2s-Verschiebung zeigte Lamb später.

Offenbar hatten auch Houston und Williams keine theoretische Erklärung für ihre experimentellen Hinweise auf Abweichungen von den Feinstrukturlinien des Wasserstoffspektrums. Sie vertrauten jedoch auf die Ergebnisse ihrer Versuche. Williams setzte bei seinen Experimenten an der Cornell University den von Hansen konzipierten und von ZEISS gebauten Prismenspektrographen ein.⁴⁾

Lamb gebührt der Verdienst, statt im sichtbaren Spektralbereich die Wasserstoffenergieniveaus mit der zu seiner Zeit deutlich verbesserten Mikrowellentechnik vermessen zu haben und den direkten Radiofrequenzübergang zwischen den Zuständen $2s_{1/2}$ und $2p_{1/2}$ beschrieben zu haben. Da für Radiowellenfrequenzen die Doppler-Verbreiterung deutlich kleiner ist als für optische Frequenzen, konnte Lamb unter Nutzung der Radiofrequenzübergänge die Doppler-Verbreiterung experimentell umgehen. So war es ihm möglich, ein tieferes Verständnis der Spektrallinien zu liefern, was Ausgangspunkt eines noch tieferen Verständnisses der Atom- und Quantenphysik werden sollte. Diesen Verdienst würdigte Sommerfeld in einem Brief vom 30. Mai 1950 an Lamb und Retherford [29]: „Es war sehr aufmerksam von Ihnen, dem 81-jährigen Urgroßvater der Feinstruktur Ihre wundervolle Arbeit vor dem Druck zuzuschicken [...] Ich bewundere die Vollständigkeit, mit der Sie alle Beobachtungsmöglichkeiten und alle Beobachtungs-Fehler diskutiert haben, und die Sorgfalt in der Berücksichtigung aller vorhandenen Literatur. Die ungeheure Arbeit, die Sie in das Problem gesteckt haben, ist durch Ihr Resultat belohnt worden.“

Erst die Erfindung des Lasers und seine Anwendung in einer vollkommen neuen Klasse des optischen Gerätebaus ermöglichte den direkten Nachweis der Wasserstofffeinstruktur im sichtbaren Spektrum. 1971 gelang es so Theo-

dor Hänsch im Labor von Arthur Leonard Schawlow, mit einem gepulsten durchstimmbaren Farbstofflaser die Lamb-Verschiebung unterhalb der Doppler-Verbreiterung direkt im sichtbaren Bereich zu messen (Abb. 4) [30]. Wieder war es der Fortschritt im Gerätebau, der den Beweis für eine grundlegende Theorie erbringen konnte.

Zusammenfassung

Seit jeher befruchten sich Fortschritte in der Gerätetechnik in der Wissenschaft und Grundlagenforschung wechselseitig. Leistungsfähigere Instrumente führen zu neuen Beobachtungen, die ihrerseits in neue Fragestellungen münden. Umgekehrt ergeben die aus neuen Modellen abgeleiteten Testexperimente oft ein neues experimentelles Instrumentarium. Die Ergebnisse solcher Experimente erlauben es, die gestellten Fragen zu beantworten oder neue Fragen an die Theorie aufzuwerfen.

Im hier dargestellten Beispiel war allerdings der Vorsprung der Experimente gegenüber der Theorie so groß, dass die neue theoretische Beschreibung ins Stocken geriet. Erst über 20 Jahre später war die Theorie so weit, dass sie das ursprüngliche Experiment erklären konnte.

Retrospektiv erscheinen oft viele Zusammenhänge als naheliegend oder gar als offensichtlich. Aber nur, wenn man die in den Naturwissenschaften geltenden Grundregeln beachtet, gelangt man zu wesentlichen, neuen Erkenntnissen oder gar Paradigmenwechseln. Zu diesen Grundregeln gehört, dass bei allem Vertrauen in die eigene experimentelle Technik und Befunde es oft hilfreich ist, in eine andere Methodik zu wechseln, falls man experimentell an eine technische Grenze stößt. Von großem Vorteil ist zudem, wenn Auffälligkeiten bei den Experimenten sehr offen mit Theoretikern diskutiert werden, auch über Instituts- oder Einrichtungsgrenzen hinweg. Dadurch werden Sprünge im Erkenntnisgewinn beschleunigt oder gar erst ermöglicht.

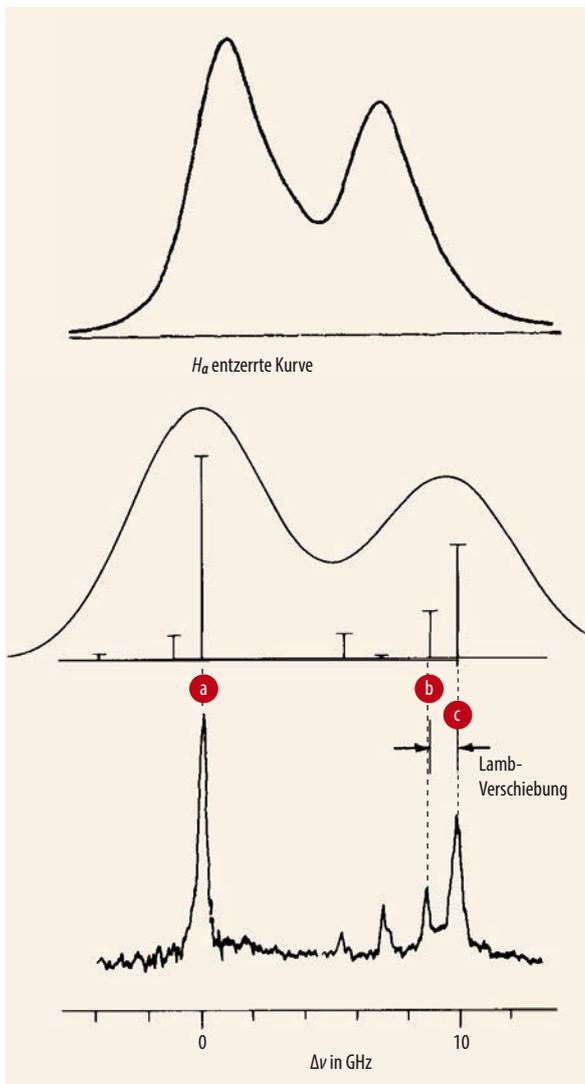


Abb. 4 Die $H\alpha$ -Linie im Vergleich: aus der Dissertation von Hansen 1925 (oben) [17], als Doppler-Profil (Mitte) [31] und als dopplerfreies Spektrum (unten) [29] mit deutlich zu erkennender Lamb-Verschiebung (Bezeichnung der Übergänge wie in Abb. 1)

*
Wir widmen diesen Artikel Bernd
Wilhelmi (1938 – 2018), dem wir
den Hinweis auf das hier diskutierte
frühe Experiment zur Beschreibung
der Feinstruktur verdanken. Er war
seit jeher ein überzeugter Verfechter
der Teamarbeit zwischen theo-
retischen und experimentellen Phy-
sikern und zwischen industrieller
und akademischer Forschung und
hatte immer ein großes Interesse
am wissenschaftlichen Gerätebau.

Literatur

- [1] *K. Hentschel*, Mapping the Spectrum, Oxford University Press, Oxford (2002)
- [2] *W. McGucken*, Nineteenth-Century Spectroscopy, Johns Hopkins Press, Baltimore & London (1969)
- [3] *K. Hentschel*, Zum Zusammenspiel von Instrument, Experiment und Theorie, Verlag Dr. Kovac, Hamburg (1998)
- [4] *H. G. Gale*, Astrophys. J. **74**, 1-9 (1931)
- [5] *A. Sommerfeld*, Atombau und Spektrallinien, Vieweg, Braunschweig (1919)
- [6] *P. A. M. Dirac*, Proc. Roy. Soc. (London) **117**, 610 (1928)
- [7] *O. Betz*, Ann. Physik **15**, 321 (1932)
- [8] *T. Haase*, Ann. Physik **23**, 657 (1935)
- [9] *W. E. Lamb*, www.nobelprize.org/prizes/physics/1955/lamb/lecture/
- [10] *W. E. Lamb*, Transactions of the New York Academy of Science **38**, 82 (1977)
- [11] *W. E. Lamb und R. C. Retherford*, Phys. Rev **72**, 241 (1947)
- [12] *S. S. Schweber*, QED And The Men Who Made It, Princeton University Press, Princeton (1994)
- [13] *L. Cohen, M. Scully und R. Scully*, Willis E. Lamb, Jr. 1913-2008 – A Biographical Memoir (2009): <https://bit.ly/2w4djXg>
- [14] *W. V. Houston*, Phys. Rev. **51**, 446 (1937)
- [15] *S. Pasternack*, Phys. Rev. **54**, 1113 (1938)
- [16] *R. C. Williams*, Phys. Rev. **54**, 558 (1938)
- [17] *G. Hansen*, Ann. Phys. **78**, 45 (1925)
- [18] *J. Becquerel*, Le Radium **4**, 328 (1907)
- [19] *W. V. Houston*, Astron. J. **64**, 81 (1926)
- [20] *N. A. Kent*, L.B. Taylor, H. Pearson, Phys. Rev. **30**, 266 (1927)
- [21] *A. Sommerfeld und A. Unsöld*, Z. Phys. **36**, 259 (1926)
- [22] *E. Schrödinger*, Ann. Physik **79**, 734 (1926)
- [23] *A. Sommerfeld und A. Unsöld*, Z. Phys. **38**, 237 (1926)
- [24] *A. Sommerfeld*, Atombau und Spektrallinien, Bd. I, 5. Aufl., Vieweg, Braunschweig (1931)
- [25] *A. Sommerfeld*, Atombau und Spektrallinien, Bd. II, 2. Aufl., Vieweg, Braunschweig (1939)
- [26] *A. Sommerfeld*, Naturw. **28**, 417 (1940)
- [27] *A. Sommerfeld*, Z. Phys. **118**, 295 (1941)
- [28] *A. Sommerfeld*, Naturw. **29**, 286 (1941)
- [29] *M. Eckert und K. Märker (Hrsg.)*, Arnold Sommerfeld: Wissenschaftlicher Briefwechsel, Bd 2: 1919 – 1951, GNT Verlag, Berlin (2004), S. 644/45
- [30] *T. W. Hänsch, I. S. Shahin und A. L. Schawlow*, Nat. Phys. Sc. **235**, 63 (1972)
- [31] *A. I. Schawlow*, www.nobelprize.org/prizes/physics/1981/schawlow/lecture/

DIE AUTOREN

Timo Mappes promovierte 2006 im Maschinenbau und habilitierte sich 2011 am KIT in Karlsruhe. 2012 wechselte er zu ZEISS und leitete ab 2015 die Forschung & Entwicklung der Vision Care Business Group. Seit Sommer 2018 ist er Professor für Geschichte der Physik an der FSU und Gründungsdirektor des Deutschen Optischen Museums.



Wolfgang Wimmer promovierte 1993 zur Geschichte und Ökonomie von Innovationen der Pharma-Industrie an der FU Berlin. Nach einem Referendariat am Landesarchiv in Berlin leitet er seit 1996 als Wissenschaftlicher Archivar das ZEISS Archiv.



Michael Kaschke promovierte 1986 an der FSU Jena. Danach leitete er ein Forschungs-

labor am Max-Born-Institut in Berlin und war Gastwissenschaftler am IBM Research Center in Yorktown Heights, USA. Seit 1992 arbeitet er für ZEISS und wurde 2000 Mitglied und ab 2011 Vorsitzender des Vorstandes der Carl Zeiss AG. Er lehrt seit 2009 als Honorarprofessor am KIT.

