

(K)eine klassische Karriere?

Lucy Mensing (1901 – 1995) war eine Pionierin der Quantenmechanik.

Gernot Münster

Nach der Formulierung der Quantenmechanik durch Heisenberg, Born und Jordan 1925/26 wandten Wolfgang Pauli und Lucy Mensing die neue Theorie erstmals auf reale physikalische Systeme an. Mensing fand dabei als erste die zulässigen Werte für den quantenmechanischen Bahndrehimpuls. Ende der Zwanzigerjahre beendete sie ihre wissenschaftliche Karriere.

In der klassischen Mechanik ist der Drehimpuls eines Teilchens oder Teilchensystems eine reelle vektorwertige Größe, die beliebige Werte annehmen kann. In der Quantenmechanik hingegen ist der Drehimpuls quantisiert. Sein Betrag ist charakterisiert durch eine Quantenzahl l , die nur gewisse diskrete Werte annehmen kann. Ausgehend von den algebraischen Beziehungen der Drehimpulskomponenten untereinander lässt sich zeigen, dass die Quantenzahl l nur ganzzahlige ($0, 1, 2, 3, \dots$) oder halbzahlige Werte ($1/2, 3/2, 5/2, \dots$) annehmen kann. Wir sind heute mit der Bedeutung der halbzahligen Werte vertraut, aber wie stand es damit in der Zeit der Entwicklung der Quantenmechanik?

Nach ersten Schritten von Max Born in Richtung einer quantentheoretischen Formulierung der Mechanik [1] gelang Werner Heisenberg während eines Aufenthalts auf der Insel Helgoland der Durchbruch. In seiner 1925 veröffentlichten berühmten Arbeit führte er die quantenmechanischen Größen ein, die an die Stelle der klassischen Variablen Ort, Impuls etc. treten und postulierte die Rechengesetze für diese Größen [2]. Born und sein Assistent Pascual Jordan in Göttingen erkannten darin die Regeln der Matrizenrechnung und bauten den Formalis-



Lucy Mensing
um 1928

alle Fotos: Dr. D. Roloff, Dresden

mus weiter aus [3]. In der „Drei-Männer-Arbeit“ von 1926 erweiterten Born, Heisenberg und Jordan die Theorie auf Systeme mit vielen Freiheitsgraden [4]. Hier findet sich insbesondere in einem von Jordan geschriebenen Kapitel die Quantisierung des elektromagnetischen Feldes, also der Beginn der Quantenfeldtheorie. Die Arbeit befasst sich auch ausführlich mit dem quantenmechanischen Drehimpuls, der bei der Deutung der Atompektren eine wichtige Rolle spielt. Die Autoren fanden die algebraischen Beziehungen zwischen den drei Komponenten L_i des Drehimpulses, deren Multiplikation von der Reihenfolge der Faktoren abhängt. Ausgehend von dieser „Drehimpuls-Algebra“ $[L_1, L_2] = i\hbar L_3$, und zyklisch vertauscht, zeigten sie, dass das Quadrat \vec{L}^2 des Drehimpulses Werte von der Form $\hbar^2 l(l+1)$ annehmen kann. Hierin ist $\hbar = h/2\pi$ das „reduzierte“ Plancksche Wirkungsquantum h , und die Quantenzahl l kann, wie oben gesagt, ganzzahlige und halbzahlige Werte annehmen.

Zu diesem Zeitpunkt war die Bedeutung dieser Werte für die Erklärung der Atomspektren noch nicht klar. Auch der anomale Zeeman-Effekt bereitete noch Kopfzerbrechen. In der vorquantenmechanischen Zeit hatten Landé (1921) und Heisenberg (1922) im Rahmen des Bohr-Sommerfeldschen Atommodells Drehimpulse vom Betrag $\hbar/2$ in Betracht gezogen, um empirische Tatsachen durch mehr oder weniger ad hoc postulierte Formeln zu beschreiben. Dabei dachten sie jedoch an Bahndrehimpulse. Klarheit in die Frage, welche Werte der quantenmechanische Bahndrehimpuls tatsächlich annehmen kann, wurde aber bald nach der „Drei-Männer-Arbeit“ gebracht. „Lucy Mensing, die damals im Göttinger Institut an ersten Anwendungen der



Lucy Mensing (2. von links) und ihr späterer Mann Wilhelm Schütz (rechts) bei einem Ausflug in die Berge um 1927. In der Mitte steht vermutlich Lise Meitner.

neuen quantenmechanischen Methode arbeitete, konnte beweisen, daß für ein Elektron, welches als Massenpunkt zu bezeichnen wäre, nur die ganzzahligen Werte in Betracht kommen konnten“ erinnerte sich Jordan 1975 [5]. Dieses Ergebnis wurde bestens ergänzt durch die Hypothese des Elektronenspins, dessen Existenz kurz zuvor George Uhlenbeck und Samuel Goudsmit im November 1925 postuliert hatten [6], wobei dessen Drehimpuls $\hbar/2$ betragen sollte. Diese Sachverhalte bildeten den Schlüssel, um etliche bis dahin rätselhafte Eigenschaften der Atomspektren mit äußeren Feldern und ohne solche zu erklären.¹⁾

Doch wer war die Frau, die in Göttingen an der neuen Quantenmechanik arbeitete? Der Name Lucy Mensing ist heute den meisten Physikern nicht bekannt. Mit ihrem oben genannten Ergebnis über die Drehimpulse hat sie jedoch als Erste einen für die Quantenphysik fundamentalen wichtigen Sachverhalt aufgedeckt. Entstanden war dieses Resultat im Rahmen einer der ersten Anwendungen der damals neuen, abstrakten Quantenmechanik auf wichtige reale physikalische Systeme, wovon noch die Rede sein wird. Angesichts der Tatsache, dass diese Leistungen bisher nur in physikhistorischer Fachliteratur Würdigung gefunden haben, sollen sie in diesem Artikel nun auch in breiterem Rahmen vorgestellt werden. Aus einem weiteren Grund sind Arbeit und Leben dieser Physikerin interessant: Der Werdegang von Lucy Mensing zeigt exemplarisch, welche Schwierigkeiten die seinerzeit herrschenden gesellschaftlichen Konventionen für die wissenschaftliche Karriere einer Frau mit sich brachten.

1) In Lehrbüchern findet man häufig eine Argumentation für die Ganzzahligkeit des Bahndrehimpulses, welche die Eindeutigkeit der Wellenfunktion postuliert. Diese ist jedoch falsch [7, 8]. Ein algebraischer Beweis der Ganzzahligkeit findet sich in [9], siehe auch [10].

Promotion in Hamburg

Lucy Mensing wurde am 11. März 1901 in Hamburg als Tochter des Kaufmanns Hermann Mensing und seiner Frau Martha geboren. Nach dem Abitur an der Klosterschule St. Johannis entschloss sie sich, an der ein Jahr zuvor eröffneten Universität Hamburg Mathematik, Physik und Chemie zu studieren, in der damaligen Zeit ein bemerkenswerter Schritt für eine junge Frau. Im Studium wandte sie sich der theoretischen Physik zu. Sie fertigte im Wintersemester 1923/24 im Institut für theoretische Physik eine Arbeit über zweiatomige Moleküle an, die sie im September 1925 zur Veröffentlichung in der Zeitschrift für Physik einreichte, wo sie publiziert wurde. Diese Arbeit hatte sie noch im Rahmen der „alten Quantentheorie“ durchgeführt, d. h. auf Grundlage der Bohr-Sommerfeldschen Theorie, die von Elektronenbahnen ausging. In diesem Bereich war auch das Thema ihrer Doktorarbeit angesiedelt, die sie bei Wilhelm Lenz in Hamburg anfertigte und im Januar 1925 abschloss. Für die Dissertation und in den drei mündlichen Promotionsprüfungen erhielt sie jeweils die Note „sehr gut“ und auf Vorschlag von Lenz den „1. Preis“ für ihre Promotion.

In der Doktorarbeit von Lucy Mensing ging es um die Verbreiterung der Spektrallinien von Atomen aufgrund des Stark-Effekts der atomaren bzw. molekularen Felder in einem Gas. Ein Auszug der Dissertation erschien 1925 in der Zeitschrift für Physik. Lenz konnte aufgrund seiner fragilen Gesundheit die Betreuung nicht in der nötigen Weise leisten, sodass Wolfgang Pauli dies übernahm, der zu dieser Zeit Assistent von Lenz und Privatdozent in Hamburg war [11]. Während ihrer Promotion lernte Lucy Mensing auch Ernst Ising kennen, der 1924 bei Lenz über das Modell des Ferromagnetismus promovierte, das Lenz vorgeschlagen hatte, aber allgemein als Ising-Modell bekannt geworden ist.

Quantenmechanik der Moleküle in Göttingen

Im Jahr, in dem Lucy Mensing promovierte, formulierte Werner Heisenberg die Quantenmechanik und arbeitete sie mit Born und Jordan in Göttingen in Gestalt der Matrizenmechanik weiter aus. Daher war es ein Glücksfall für Mensing, dass sie – wohl auf Empfehlung von Pauli – Gelegenheit bekam, nach Göttingen zu kommen und sich an der Entwicklung der Quantenmechanik zu beteiligen. Sie widmete sich der Anwendung der Matrizenmechanik auf das Rotations-Schwingungs-Spektrum zweiatomiger Moleküle, wie O_2 , N_2 oder CO . Währenddessen behandelte Pauli in Hamburg das Problem des quantenmechanischen Energiespektrums des Wasserstoffatoms, und es gelang ihm, mit rein algebraischen Methoden die Rydberg-Formel herzuleiten. Nach diesem Erfolg war die Arbeit von Lucy Mensing die zweite Anwendung der Quantenmechanik auf ein physikalisches System.

Experimentell war seit dem frühen zwanzigsten Jahrhundert das sogenannte Bandenspektrum von Molekülen im Infraroten bekannt (**Infokasten**). Die Annahme der alten Quantentheorie war, dass der Drehimpuls eines zweiatomigen Moleküls als Vielfaches $L = l\hbar$ des Wirkungsquantums quantisiert ist. Die entsprechende Rotationsenergie beträgt $\hbar^2 l(l+1)/(2ma^2)$, wobei a der Gleichgewichtsabstand der Moleküle ist. Damit sollten die Frequenzen der Spektrallinien für die Übergänge $l \rightarrow l-1$ ($l \geq 1$) proportional zu $l^2 - (l-1)^2 = 2l-1$ und für $l \rightarrow l+1$ ($l \geq 0$) proportional zu $l^2 - (l+1)^2 = -2l-1$ vom Zentrum verschoben sein. Allerdings stellte sich heraus, dass dies unter Berücksichtigung der Intensitäten nicht zu den experimentellen Befunden passte. Stattdessen musste die Formel für die Rotationsenergie ad hoc derart abgeändert werden, dass an die Stelle der Quadratzahlen l^2 der Ausdruck $(l+1/2)^2$ trat. Auf diese Weise kamen halbzahlige Quantenzahlen ins Spiel, was sich nicht erklären ließ.

Lucy Mensing studierte nun das Rotations-Schwingungs-Spektrum der zweiatomigen Moleküle mit den Methoden der Matrizenmechanik. Dabei stand ihr Pascual Jordan mit Rat zur Seite. In niedrigster Näherung ergab sich für die Schwingungsenergien keine Änderung gegenüber dem früheren Ausdruck, jedoch trat bei der Rotationsenergie nun der Ausdruck $l(l+1)$ an die Stelle von l^2 . Außerdem fand Mensing, wie oben bereits erwähnt, dass nur die ganzzahligen Werte für die Quantenzahl l infrage kommen. Das resultierende Spektrum passte genau zum experimentellen Befund, und wegen $l(l+1) = (l+1/2)^2 - 1/4$ war nun die Erklärung für die scheinbaren halbzahligen Quantenzahlen gefunden. In ihrer Arbeit berechnete Lucy Mensing weiterhin die Intensitäten der Spektrallinien, die proportional zu den entsprechenden Matrixelementen sind, was für den Vergleich mit dem experimentellen Spektrum wichtig ist. Sie ging dabei über die niedrigste Näherung hinaus, indem sie mittels der quantenmechanischen Störungstheorie die Korrekturen aufgrund von Kopplungen zwischen Schwingungen und Rotationen und von anharmonischen Beiträgen zu den Schwingungen berechnete. Ihre Ergebnisse erschienen 1926 in der Zeitschrift für Physik [12].

Neben Lucy Mensing wandten viele andere Physiker die neue Quantenmechanik auf Moleküle an. So publizierten im Jahr 1926 beispielsweise Erwin Schrödinger, Erwin Fues, Robert Oppenheimer, Igor Tamm und der erst 18-jährige Lew Landau Ergebnisse zum Rotations-Schwingungs-Spektrum zweiatomiger Moleküle. Mensings Arbeit war aber nicht nur die erste, sondern auch systematischer und besser als die ihrer Kollegen. Sie berücksichtigte als einzige die Beiträge über die niedrigste Ordnung hinaus, berechnete die Intensitäten und zeigte, dass die Linien im Bandenspektrum keinen linearen Stark-Effekt aufweisen sollten, in Übereinstimmung mit dem Experiment [11, 13–15].

Arbeit mit Pauli

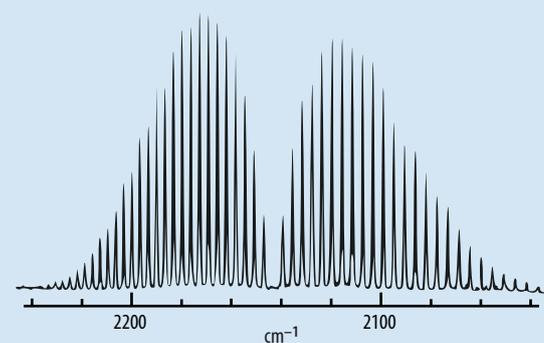
Die klare und meisterliche Behandlung des Problems durch Lucy Mensing gefiel Pauli sehr und er lud sie ein, mit ihm über ein anderes Thema der Molekülphysik zu arbeiten: die Berechnung der elektrischen Polarisierbarkeit von Gasen aus zweiatomigen Molekülen [11]. Pauli hatte sich damit bereits 1921 im Rahmen der Bohr-Sommerfeldschen Quantentheorie beschäftigt. In der klassischen Physik war der temperaturabhängige Beitrag 1912 von Debye zu $C\mu^2 N/(kT)$ berechnet worden, wobei die Konstante μ das molekulare Dipolmoment und N die Teilchendichte der Moleküle bezeichnen. Die Konstante C besitzt den Wert $1/3$. In der Quan-

Bandenspektren von Molekülen

Das Bandenspektrum zweiatomiger Moleküle im Infraroten besteht aus einer Reihe von Spektrallinien in gleichen Abständen, wobei die zentrale Linie fehlt. Bjerrum und Nernst folgerten bereits 1911 aus halbklassischen Überlegungen, dass diese Linien von Übergängen stammen, bei denen die Moleküle gleichzeitig ihren Schwingungszustand und ihren Rotationszustand ändern, weshalb sie als Rotationsbanden bezeichnet werden. Die Quantenmechanik liefert in niedrigster Näherung für die Eigenwerte der Energie die Summe aus Schwingungs- und Rotationsenergie

$$E_{nl} = \hbar\omega \left(n + \frac{1}{2}\right) + \frac{\hbar^2 l(l+1)}{2ma^2} + \text{const.},$$

wobei die Quantenzahl n den Schwingungszustand und die Quantenzahl l den Bahndrehimpuls charakterisiert, m die reduzierte Masse und a der Gleichgewichtsabstand der Moleküle sind. Für elektrische Dipolstrahlung gelten die Übergangsregeln $n \rightarrow n-1$ und $l \rightarrow l \pm 1$, woraus die Gestalt des Bandenspektrums folgt.



Rotations-Schwingungs-Spektrum von CO

tentheorie ändert sich die Temperaturabhängigkeit, analog zum Planckschen Strahlungsgesetz. Pauli hatte aber auch einen anderen Wert für den Vorfaktor C gefunden, sodass sich im Grenzfall hoher Temperaturen das klassische Ergebnis nicht reproduzieren ließ, was aber der Fall sein sollte. Pauli und Mensing studierten nun die Polarisierbarkeit in einer sorgfältigen matrizenmechanischen Rechnung, die auf die Matricelemente aufbaute, die Mensing in ihrer vorigen Arbeit bestimmt hatte. Sie leiteten eine Formel für die Polarisierbarkeit her, in der sich der fragliche Vorfaktor als der klassische $C = 1/3$ erwies, sodass im Hochtemperatur-Grenzfall das Korrespondenzprinzip gerettet war. Die resultierende Publikation [16] stellt einen weiteren Meilenstein in der Anwendung der Quantenmechanik dar. Wiederum war dieselbe Thematik auch von anderen Physikern in Angriff genommen worden, wie von Van Vleck, Kronig und Manneback, was zu mehreren späteren, thematisch verwandten Publikationen führte [11, 13, 14, 17].

In Hamburg wandte sich Lucy Mensing anschließend einem Problem der Spektroskopie zu, nämlich dem partiellen Paschen-Back-Effekt. Dieser Effekt beinhaltet das unerklärte Fehlen von Linien im Zeeman-Triplett bei genügend starken Magnetfeldern. Mensing bestimmte die relevanten Matricelemente und konnte 1926 in einer Publikation die Erklärung für den Effekt präsentieren.

Quantenmechanische Karriere mit klassischem Ende

Zu dieser Zeit war Tübingen mit Alfred Landé und Ernst Back die Hochburg der Spektroskopie in Deutschland, und Walther Gerlach hatte dort Anfang 1925 die Nachfolge von Friedrich Paschen angetreten. Die anspruchsvollen und klaren Arbeiten von Lucy Mensing hatten Aufmerksamkeit erregt, und Landé bot ihr eine Stelle an. Pauli schrieb am 2. Juni 1926 in einer Postkarte an Landé: „Von Fr. Mensing hörte ich, daß Sie die Absicht haben, sie als Assistentin zu holen. Darüber bin ich sehr froh, es wird für sie sehr gut sein!“ [18]. Lucy Mensing trat in Tübingen eine Stelle an, die von der „Notgemeinschaft der deutschen Wissenschaft“, der Vorgängerin der Deutschen Forschungsgemeinschaft, finanziert wurde. Mittlerweile hatte sie sich mit der Wellenmechanik Schrödingers vertraut gemacht und befasste sich mit einem Thema aus der wellenmechanischen Streutheorie, nämlich der Streuung langsamer Elektronen an Atomen, worüber sie 1927 eine Publikation verfasste. In Tübingen machte sie Bekanntschaft mit Sam Goudsmit, einem der beiden Physiker, welche die Existenz des Elektronenspins postuliert hatten. Goudsmit befand sich dort zu einem Forschungsaufenthalt und fand in Mensing eine Ansprechpartnerin für Fragen der theoretischen Physik. Der Kontakt blieb bestehen und wurde auch noch nach dem zweiten Weltkrieg brieflich fortgesetzt.

In Tübingen lernte sie auch den Experimentalphysiker Wilhelm Schütz kennen. Er war als erster Doktorand Gerlachs 1923 in Frankfurt promoviert worden und diesem 1925 als Mitarbeiter nach Tübingen gefolgt. Schütz war mit den publizierten Ergebnissen der Doktorarbeit von Lucy Mensing vertraut. Darauf hatte er bei der Interpretation von spektroskopischen Messungen Bezug genommen und



Lucy Mensing mit Wilhelm Schütz (2. von rechts), Alfred Landé (rechts) und Mitarbeitern in Tübingen um 1928

diskutierte nun physikalische Fragen mit ihr in Tübingen. Aus dem wissenschaftlichen Kontakt wurde mehr: Im September 1928 heirateten die beiden. Ein Jahr später nahm Gerlach eine Professur in München an, und Schütz folgte ihm wiederum, begleitet von seiner Frau. Dort entstand im Februar 1930 der letzte Zeitschriftenaufsatz von Lucy Mensing; eine Arbeit über die Verbreiterung von Spektrallinien, die sie unter dem Namen Schütz-Mensing in der Zeitschrift für Physik veröffentlichte.

Zu jener Zeit war nicht an eine „dual career“ zu denken. Lucy Schütz hatte keine Anstellung in München und nach der Geburt des ersten Sohnes im November 1930 fiel ihr die Aufgabe zu, sich um die wachsende Familie zu kümmern. Die Vereinbarkeit von wissenschaftlicher Karriere und Familie mit Kindern war in der damaligen Zeit für eine Frau nicht gegeben. Bei fast allen Wissenschaftlerinnen in der ersten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts sehen wir, dass eine erfolgreiche wissenschaftliche Tätigkeit es erforderte, auf eine Familiengründung zu verzichten. Beispiele dafür sind Lise Meitner, Emmy Noether, Hertha Sponer, Marietta Blau oder Hertha Wambacher. Lucy Schütz entschied sich für die Familie. In ihrer Rolle als Hausfrau und Mutter befasste sie sich gleichwohl weiterhin mit Physik und verfolgte das aktuelle Geschehen auf diesem Gebiet. Für den von ihrem Mann verfassten Band des „Handbuchs der Experimentalphysik“ [19], der 1936 erschien, schrieb sie einen Abschnitt über die quantenmechanische Theorie des Faraday-Effekts. Wilhelm Schütz erhielt 1936 einen Ruf nach Königsberg und zog mit Frau und zwei Söhnen Ende 1936 dorthin. Zwei Töchter wurden dort geboren und komplettierten die Familie, um die sich Lucy Schütz kümmerte.

Flucht, Deportation und späteres Leben in Jena

Kurz vor Ende des Weltkrieges floh die Familie westwärts und fand sich im Sommer 1945 in Jena wieder, wo Wilhelm Schütz eine Außenstelle seines Instituts eingerichtet hatte. Die Zeit war sehr schwierig: Um die Familie zu ernähren, ging Lucy Schütz „stoppeln“ (Feldfrüchte aufsammeln) und arbeitete als Putzfrau. Die Einstellung als „Volontär-Assistentin“ am mathematischen Institut ab März 1946 brachte etwas Erleichterung.



Lucy Mensing (Mitte) im Gespräch mit Werner Heisenberg auf der gemeinsamen Tagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaften in Berlin 1952.

Der Oktober 1946 bedeutete für die Familie Schütz einen drastischen Einschnitt. Nach dem Abzug der amerikanischen Streitkräfte aus Thüringen hatten die Sowjets das Regiment übernommen. Am 22. Oktober wurden im Rahmen der Aktion Ossawakim rund 2000 Techniker und Wissenschaftler mitsamt ihren Familien aus der sowjetisch besetzten Zone in die Sowjetunion deportiert, um dort als Reparationsleistungen Mitwirkungen am Wiederaufbau von Industrie und Forschung zu erbringen [20]. Unter ihnen war neben Mitarbeitern von Zeiss in Jena auch Wilhelm Schütz mit seiner Familie, die auf eine Insel im Seligersee in der Nähe der Stadt Ostaschkow verbracht wurde. Dort war Lucy Schütz als Lehrerin für Deutsch und Geschichte an einer Schule für die Kinder der deutschen Internierten tätig. Erst im Juni 1952 konnte die Familie nach Jena zurückkehren, wo Wilhelm Schütz bis zu seiner Emeritierung 1965 einen Lehrstuhl für Experimentalphysik inne hatte.

Auch nachdem sie nicht mehr als Wissenschaftlerin beschäftigt war, verfolgte Lucy Schütz das Geschehen in der Physik. Sie unterstützte ihren Mann bei seiner Arbeit und fertigte unter anderem Skripte seiner Vorlesungen an. Kontakt zu einigen Kollegen, wie Sam Goudsmit, Wilhelm Hanle, Max Steenbeck und Kurt Mothes, dem Präsidenten der Leopoldina, gab es über viele Jahre. Mit Ernst Ining, der 1939 emigrierte und ab 1947 in den USA lebte, hat sie eine lebenslange Freundschaft verbunden. Im Jahr 1981 besuchte sie ihn in den USA.

Ihr besonderes Interesse galt bedeutenden Wissenschaftlerinnen wie Marie Curie, Emmy Noether und Lise Meitner. Zu ihrer Haltung zur Gleichberechtigung der Frauen schreibt ihre Tochter Dorothea [21]: „Sie war aber keine Frauenrechtlerin, für sie waren die Gleichberechtigung der Geschlechter und das Recht auf Bildung eine Selbstverständlichkeit und sie hat schwer unter der Realität gelitten,

die dem so gar nicht entsprach.“ Am 28. April 1995 starb Lucy Schütz in Meiningen, wo ihre ältere Tochter wohnt.

*

Ich danke Dr. Dorothea Roloff für viele Informationen zu ihrer Mutter Lucy Schütz und die Übersendung von Fotografien. Priv.-Doz. Dr. Georg Bergner, Prof. Dr. Andreas Wipf und Prof. Dr. Ernst Schmutzer danke ich für die Unterstützung bei der Recherche.

Literatur

- [1] M. Born, *Z. Phys.* **26**, 379 (1924)
- [2] W. Heisenberg, *Z. Phys.* **33**, 879 (1925)
- [3] M. Born und P. Jordan, *Z. Phys.* **34**, 858 (1925)
- [4] M. Born, W. Heisenberg und P. Jordan, *Z. Phys.* **35**, 557 (1926)
- [5] P. Jordan, *Physikalische Blätter* **31**, 97 (1975)
- [6] G. E. Uhlenbeck und S. Goudsmit, *Naturwissenschaften* **47**, 953 (1925)
- [7] C. Noack, *Physikalische Blätter* **41**, 283 (1985)
- [8] W. Pauli, *Helv. Phys. Acta* **12**, 147 (1939)
- [9] M. Born und P. Jordan, *Elementare Quantenmechanik*, Springer, Berlin (1930)
- [10] G. Münster, *Quantentheorie*, 3. Auflage, de Gruyter, Berlin (2020)
- [11] J. Mehra und H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory*, Bd. 3, Springer (1982), S. 187
- [12] L. Mensing, *Z. Phys.* **36**, 814 (1926)
- [13] J. Mehra und H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory*, Bd. 4/II, Springer (1982), S. 236–244, 266–272
- [14] J. Mehra und H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory*, Bd. 5/II, Springer (1987), S. 689–699, 842–850
- [15] D. Cassidy, *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* **37**, 247 (2007)
- [16] L. Mensing und W. Pauli, *Physik. Z.* **27**, 509 (1926)
- [17] Ch. Midwinter und M. Janssen, in: *Research and Pedagogy*, hrsg. v. M. Badino und J. Navarro, Max Planck Institute for the History of Science (2013); bit.ly/2z39R3j
- [18] A. Hermann, K. von Meyenn und V. F. Weisskopf (Hrsg.), *Wolfgang Pauli – Wissenschaftlicher Briefwechsel*, Bd. 1, Springer, Heidelberg (1979), S. 327 f.
- [19] W. Schütz, *Magnetooptik (ohne Zeemanneffekt)*, *Handbuch der Experimentalphysik* Bd. 16. 1. Teil, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig (1936)
- [20] N. Schmidt, *Dissertation*, Universität Leipzig (2015); nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:15-qucosa-223889
- [21] D. Roloff, persönliche Mitteilung (2020)

Der Autor



Gernot Münster (FV Teilchenphysik / Theoretische und Mathematische Grundl. der Physik) war von 1990 bis 2019 Professor für theoretische Physik an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster. Seine Arbeitsgebiete sind einerseits Quantenfeldtheorie und Theorie der Elementarteilchen

mit dem Schwerpunkt Feldtheorie auf dem Gitter und andererseits Statistische Feldtheorie. Er war mehrere Jahre Vorsitzender des Wissenschaftlichen Rates des John von Neumann-Instituts für Computing (NIC), Jülich. Er interessiert sich auch für Wissenschaftstheorie und Geschichte der Physik und ist Mitglied des wissenschaftlichen Beirates des Zentrums für Wissenschaftstheorie an der Universität Münster.

Prof. Dr. Gernot Münster, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Wilhelm-Klemm-Straße 9, 48149 Münster