

Ein fast vergessener Pionier

Die von Otto Stern entwickelte Molekularstrahlmethode ist essenziell für Physik und Chemie

Horst Schmidt-Böcking und Wolfgang Trageser

Mit seinen Arbeiten legte Otto Stern, Nobelpreisträger und Pionier der Atom- und Kernphysik, die Grundlage für die Kernspinresonanzmethode, den Maser und die Atomuhr. Rund zwanzig weitere Nobelpreise in Physik und Chemie beruhen auf seiner Molekularstrahlmethode, mit der sich innere Struktureigenschaften von Atomen, Molekülen und Kernen bestimmen und auch nutzen lassen. Gemeinsam mit Walther Gerlach gelang es ihm damit, erstmals die magnetischen Momente von Atomen zu messen und die Richtungsquantelung der Quantenobjekte nachzuweisen.

Fast jeder Physiker kennt das Stern-Gerlach-Experiment. Doch welche Beiträge hat Otto Stern darüber hinaus in der Physik geleistet? Und wer war der Mensch Otto Stern? Max Born berichtet in seinen Lebenserinnerungen: „Ich hatte das Glück, in Otto Stern einen Privatdozenten von höchster Qualität zu finden, einen gutmütigen, fröhlichen Mann, der bald ein guter Freund von uns wurde. Die Arbeit in meiner Abteilung wurde von einer Idee Sterns beherrscht. Er wollte die Eigenschaften von Atomen und Molekülen in Gasen mit Hilfe molekularer Strahlen [...] nachweisen und messen. Sterns erstes Gerät sollte experimentell das Geschwindigkeitsverteilungsgesetz von Maxwell beweisen und die mittlere Geschwindigkeit messen. Ich war von dieser Idee so fasziniert, dass ich ihm alle Hilfsmittel meines Labors, meiner Werkstatt und die mechanischen Geräte zur Verfügung stellte.“ [1]

Otto Stern wurde am 17. Februar 1888 in Sohrau/Oberschlesien geboren. Nach dem Abitur studierte er zwölf Semester physikalische Chemie. Im April 1912 wurde er an



P. Toschek, F. Thieme, U. Hamburg

Abb. 1 Otto Stern war von Haus aus zwar Theoretiker, entwickelte sich aber zum einfallreichen Experimentator. Die Zigarre durfte offenbar nicht fehlen.

der Universität Breslau zum Doktor promoviert. Anschließend wechselte er durch Vermittlung Fritz Habers zu Albert Einstein nach Prag, dem er Ende 1912 an die ETH in Zürich folgte. Als erster und damals einziger Mitarbeiter Einsteins entwickelte sich zwischen beiden eine lebenslange enge Freundschaft. Einsteins Art, Dinge zu hinterfragen, haben Stern entscheidend beeinflusst und ihn zu einem „Querdenker“ gemacht [2]. Als Einstein 1913 an das Kaiser-Wilhelm-Institut in Berlin ging, wechselte Stern als Privatdozent für theoretische Physik zu Max von Laue an die Universität Frankfurt. Nach dem Dienst als Kriegsfreiwilliger und einem kurzen Aufenthalt in Berlin kam er zurück nach Frankfurt, wo inzwischen Max Born Direktor des theoretischen Instituts geworden war. Obwohl er seiner Ausbildung nach ein theoretischer Chemiker war, wandte sich Stern nun mehr und mehr der Experimentalphysik zu (Abb. 1).

Im Institut für theoretische Physik standen Max Born mit seinen Mitarbeitern nur zwei Arbeitsräume zur Verfügung. Otto Stern ar-

beitete in dem kleineren der Räume mit seinen Experimenten. Seine erste große Leistung bestand darin, für ein Gas bei einer konstanten Temperatur T die Geschwindigkeitsverteilung der Moleküle zu vermessen und damit die von Maxwell vorhergesagte Verteilung erstmals zu bestätigen [3]. Hierfür baute Stern eine genial einfache Apparatur auf, die es ihm erlaubte, die Atome oder Moleküle eines Strahls in einem genau definierten Impulszustand zu präparieren und Impulsänderungen mit hoher Genauigkeit zu bestimmen (Abb. 2). Dies war die Voraussetzung dafür, um an einzelnen Teilchen Quanteneigenschaften messen zu können.

In Walther Gerlach fand Stern einen ausgezeichneten Experimentalphysiker und idealen Partner. Zusammen begannen sie Anfang 1921 in Frankfurt, das Experiment zum Nachweis der Richtungsquantelung magnetischer Momente von Atomen in äußeren Feldern zu planen und auszuführen. Ausgehend vom 1896 entdeckten Zeeman-Effekt, hatten 1916 Peter Debye und zeitgleich Arnold Sommerfeld [4] gefordert, dass sich die inneren ma-

Prof. Dr. Horst Schmidt-Böcking, Dr. Wolfgang Trageser, Institut für Kernphysik, Johann Wolfgang Goethe-Universität, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt/M.

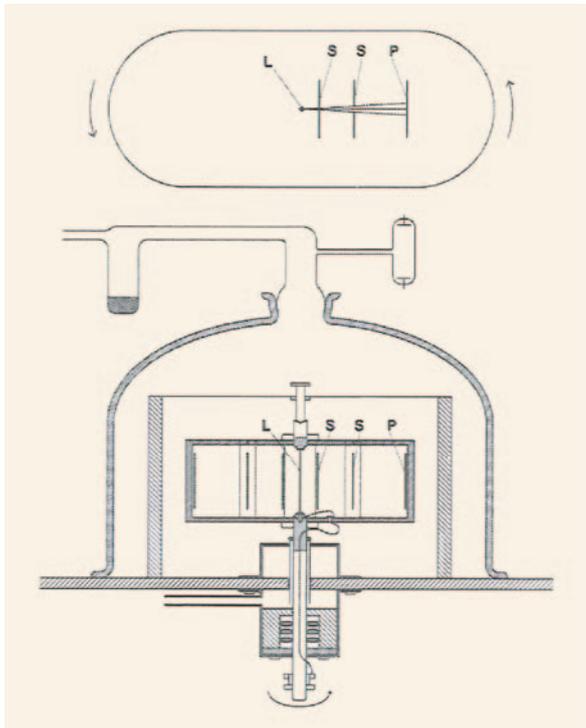


Abb. 2 Draufsicht (oben) und Seitenansicht (unten) der Apparatur, mit der Stern die Geschwindigkeitsverteilung von Gasmolekülen bestimmte. Als Quelle diente ein dünner Platindraht (L), der mit Silberpaste bestrichen und erhitzt wurde. Das verdampfte Silber flog im Vakuum geradlinig nach außen, wurde mit sehr engen Schlitzen (S) ausgeblendet und auf einer Auffangplatte (P) kondensiert. Unter dem Mikroskop ließ sich der Silberfleck anschließend sehr genau vermessen. Rotiert die gesamte Apparatur mit dem Draht als Drehpunkt, so krümmt sich der Strahl wegen der Coriolis-Kraft. Aus der Verschiebung des Silberflecks konnte Stern die mittlere radiale Geschwindigkeit der Atome oder Moleküle bestimmen.

gnetischen Momente von Atomen in einem äußeren magnetischen Feld nur unter diskreten Winkeln einstellen können [4]. Nur so gelang es beiden, die scharfen Linienbreiten der Zeeman-Spektralübergänge im Bohrschen Atommodell zu erklären.

Das „Absurde“ an der Richtungsquantelung ist, dass diese von der Richtung des Magnetfelds abhängt. Woher können die Atome „wissen“, welche Richtung der Experimentator zufällig wählt? Selbst Debye sagte zu Gerlach:⁺⁾ „Sie glauben doch nicht, dass die Einstellung der Atome etwas physikalisch Reelles ist, das ist eine Rechenvorschrift, das Kursbuch der Elektronen.“ Max Born bekannte später: „Ich dachte immer, daß die Richtungsquantelung eine Art symbolischer Ausdruck war für etwas, was wir eigentlich nicht verstehen.“ Er versuchte daher vergebens, Stern das Experiment auszureden. Auch

Stern hatte Bedenken, wie einer Vorveröffentlichung zur experimentellen Machbarkeit zu entnehmen ist [6], wollte durch sein Experiment aber zeigen, dass sich Debye und Sommerfeld irren.

Enorme Herausforderungen

Die eigentliche Apparatur des Stern-Gerlach-Experiments war nicht viel größer als ein Kugelschreiber und beinhaltete den Ofen zur Erzeugung des Dampfstrahls, Schlitze zum Ausblenden des Strahls, die Ablenkung des Strahles im Magnetfeld sowie eine Auffangplatte. Die Herausforderungen waren enorm, denn der heiße Ofen und die kalte Auffangplatte mussten auf kleinem Raum geschickt verbunden werden. Außerdem erforderte die zu erwartende geringe Ablenkung eine hohe mechanische Präzision. Wilhelm Schütz, der als Doktorand bei Gerlach an diesem Experiment mitarbeiten durfte, erinnerte sich 1969: „Wer es nicht miterlebt hat, kann sich gar nicht vorstellen, wie groß die Schwierigkeiten damals waren, in einer nicht ausheizbaren Apparatur mit verhältnismäßig viel nichtvakuumgeschmolzenem Metall und einem Öfchen zum Erhitzen des Silbers auf ca. 1300° K ein Vakuum von 10⁻⁵ Torr herzustellen und stundenlang aufrecht zu erhalten.“

Obwohl Stern im Herbst 1921 einem Ruf auf eine außerordentliche Professur für Theoretische Physik an die Universität Rostock folgte, gingen die gemeinsamen Arbeiten zur Messung der magnetischen Momente von Atomen mit Walter Gerlach in Frankfurt weiter. Im Februar 1922 gelang es schließlich, die Aufspaltung eines Silberstrahls im inhomogenen Magnetfeld zu beobachten (Abb. 3), und am 1. März 1922 reichten Walther Gerlach und Otto Stern ihre berühmte Arbeit „Der experimentelle Nachweis über die Richtungsquantelung im Magnetfeld“ bei der Zeitschrift für Physik ein [7].

Damit war auch die wichtige Frage beantwortet, in welche und wie viele Richtungen sich die ma-

gnetischen Momente einstellen. Debye und Sommerfeld hatten für die auf der Bahn umlaufenden Elektronen eine Ausrichtung des magnetischen Momentes parallel, antiparallel und senkrecht zum äußeren Magnetfeld vorhergesagt und damit eine dreifache Aufspaltung des Atomstrahls. Bohr hingegen erwartete nur eine Zweifachaufspaltung nach oben und unten, da klassisch ein Elektron auf einer Bahn nur rechts oder links herum rotieren kann. Die beobachtete Dublettaufspaltung schien Bohr recht zu geben. Wie wir heute allerdings wissen, irrten alle drei, denn die Ursache für die Aufspaltung war der damals noch unbekanntelektronenspin.

Der junge Alfred Landè, der als unbezahlter Privatdozent in dem zweiten Arbeitsraum neben dem Labor saß, hätte dies erkennen können, denn ihm war es 1921 gelungen, in zwei kurz aufeinanderfolgenden Publikationen die Multiplettstrukturen des Zeeman-Effektes semiempirisch zu erklären [8]. Er erkannte, dass der normale und der anomale Zeeman-Effekt die gleiche Ursache haben und dass man zur Beschreibung des Zeeman-Effektes eine vierte Quantenzahl $k = 1/2$ und noch bedeutsamer einen g -Faktor einführen musste, der anders als in der klassischen Physik ungleich eins sein konnte.

Viele Physiker, Stern eingeschlossen, waren überrascht, dass die Richtungsquantelung wirklich existiert. Wolfgang Pauli schrieb in einer Postkarte an Gerlach: „Jetzt wird wohl auch der ungläubige Stern von der Richtungsquantelung überzeugt sein.“ Dem war aber nicht so, wie sich Stern 1961 erinnerte [2]: „Das war absolut nicht zu verstehen. Das ist auch ganz klar, dazu braucht man nicht nur die neue Quantentheorie, sondern gleichzeitig auch das magnetische Elektron. Diese zwei Sachen, die damals noch nicht da waren. Ich war völlig verwirrt.“ In den Osterferien 1922 setzten Stern und Gerlach ihre Messungen fort und bestimmten mit guter Genauigkeit das magnetische Moment des Silberatoms – es stimmte inner-

^{+) Die Quellen für die nachfolgenden Zitate sowie zahlreiche weitere Referenzen sind in der Biografie [5] zu finden.}

halb einer Fehlergrenze von zehn Prozent mit einem Bohrschen Magnetron überein. Damit waren Otto Sterns experimentelle Tätigkeiten in Frankfurt für immer beendet.

Anfang 1923 wurde Otto Stern auf ein Ordinariat für experimentelle Physikalische Chemie an die Universität Hamburg berufen. Trotz Inflation und schlechter Ausstattung baute er dort eine sehr erfolgreiche Arbeitsgruppe auf, die sich durch viel beachtete Pionierarbeiten auf dem Gebiet der Atom-, Molekül- und Kernphysik weltweit höchste Reputation erworben hat. Einige seiner Mitarbeiter begründeten andere große Forschungszentren, wie Immanuel Estermann in Pittsburgh und später London, Isidor Rabi an der Columbia University in New York und später am MIT in Boston, Emilio Segré in Berkeley, Robert Otto Frisch in Cambridge. Frisch, der Neffe von Lise Meitner, erinnerte sich an seine außerordentlich erfolgreiche dreijährige Zusammenarbeit mit Stern wie folgt „Meine erste Erinnerung an das Laboratorium ist etwas, das aussah wie ein gläserner Wald, eine Art von Alptraum des Glasbläfers. [...] Ich kann mich noch heute erinnern, wie Stern sich verhielt, wenn alles umzukippen drohte; er hob beide Arme in die Höhe, so wie einer der sich ergibt, und wartete.



P. Toschek, F. Thieme, U Hamburg

Abb. 4 Otto Stern mit der offenbar unvermeidlichen Zigarre im Labor.

Er erklärte mir: ‚Der Schaden ist kleiner, wenn man das Ding fallen lässt, als wenn man es aufzufangen versucht‘. Dennoch war Stern, von einer höheren Warte beurteilt, ein großartiger Experimentator. Beim Einsatz einer neuen Apparatur wurde nichts dem Zufall überlassen. Alles war vorher ausgearbeitet worden.“ (Abb. 4).

Der für die Weiterentwicklung der Molekularstrahlmethode und damit für die Physik schlechthin wichtigste Mitarbeiter Sterns war Isidor Rabi. In den Vereinigten Staaten baute er eine Physikschule auf, die an Bedeutung weltweit in der Atom- und Kernphysik ihres Gleichen sucht und viele Nobelpreisträger hervorgebracht hat.

Pionierarbeiten in Hamburg

1929 berichtete Otto Stern erstmals über die Beugung der Atomstrahlen an Kristalloberflächen. Er hatte die Apparatur so verbessert, dass er bei festem Einfallswinkel des Atomstrahls die Orientierung der Kristalloberfläche verändern konnte, und beobachtete eine starke Abhängigkeit der Reflexion von der Orientierung – ein eindeutiger Hinweis auf Beugung. Ein Jahr später publizierte er mit Immanuel Estermann erste quantitative Ergebnisse, die den eindeutigen Beweis lieferten, dass auch Atom- und Molekülstrahlen Welleneigenschaften haben [9]. Die erstmalige absolute Bestimmung der de Broglie-Wellenlänge bestätigte auch das Welle-Teilchen-Konzept der Quantenphysik in überzeugender Weise. Stern selbst betrachtete dieses Experiment als seinen wichtigsten Beitrag zur damaligen Quantenphysik und bemerkte dazu später [2]: „Dies Experiment lieb ich besonders, es wird aber nicht richtig anerkannt.“

In weiteren Pionierarbeiten gelang es Stern in Hamburg, die innere Struktur von Proton und Deuteron zu untersuchen. Die Molekularstrahlmethode erlaubte es erstmals, experimentell zu überprüfen, ob die positive Elementarladung im Proton dieselbe magnetische Struktur hat wie die negative Elementarladung, das Elektron. Stern ging davon aus, dass das mechanische Drehimpulsmoment des Protons identisch zu dem des Elektrons sein

Niels Bohr Archiv, Kopenhagen

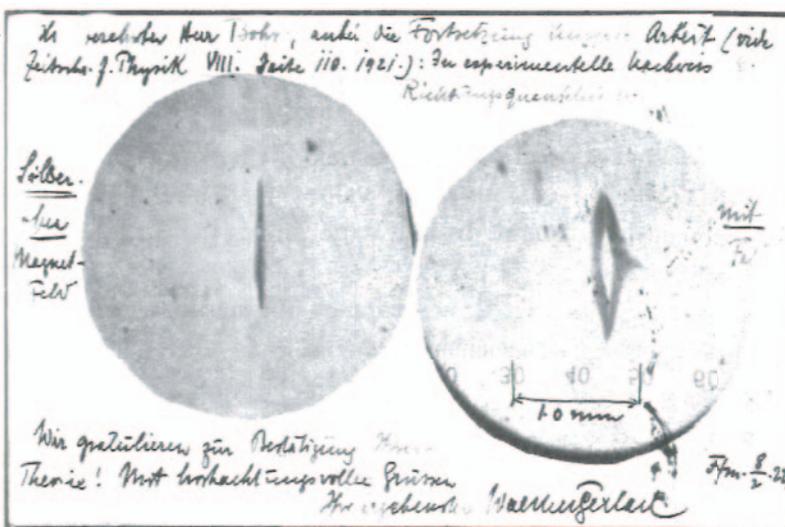


Abb. 3 Am 8. Februar 1922 informierte Gerlach mit dieser Postkarte Niels Bohr über den Nachweis der Richtungsquantelung. Ohne Magnetfeld (links) bildet der Silberstrahl nur die Spaltöffnung ab. Mit Magnetfeld (rechts) ergibt sich ein

Fleck, der einem Kussmund ähnelt. Da der Spalt zur Kollimation (senkrecht zum Magnetfeld) wesentlich breiter als die Spitze der Magnetschneide war, wurde der Strahl nur direkt unter der Schneide aufgespalten, aber nicht zur Seite hin.

P. Toschek, F. Thieme, U. Hamburg



Abb. 5 Zu Sterns Arbeitsgruppe in Hamburg gehörten 1928 (v.l.) Friedrich Knauer, Otto Brill, Stern, Ronald Fraser, Isidor Rabi, John B. Taylor und Immanuel Estermann.

muss. Nach der damals schon allgemein anerkannten Dirac-Theorie musste das magnetische Moment des Protons wegen des Massenverhältnisses 1836-mal kleiner als das des Elektrons sein. Die von Dirac berechnete Größe wird Kernmagneton μ_N genannt. Stern wurde damals zwar „stark von theoretischer Seite beschimpft, da man glaubte zu wissen, was rauskam“ [2], für das magnetische Moment des Protons erhielten er, Frisch und Estermann aber schließlich einen Wert von $2,5 \mu_N$ bei einem Fehler von ca. zehn Prozent – ein klarer Widerspruch zur Dirac-Theorie [10]. Dieser Wert weicht nur wenig vom heute gültigen Wert $2,79 \mu_N$ ab und belegt klar, dass die damaligen Vorstellungen über die innere Struktur des Protons falsch waren. Diese Sternschen Arbeiten sind die Geburtsstunde der Kernstruktur-, ja sogar der Elementarteilchenphysik.

Rücktritt und Emigration

Nach der Machtübernahme der Nationalsozialisten 1933 wurde Otto Sterns Arbeitsgruppe ohne Rücksicht auf ihre Erfolge praktisch von einem Tag auf den andern zerschlagen (Abb. 5). Alle Assistenten Sterns (außer Knauer) waren jüdischen Glaubens und wurden entlassen. Da Stern Weltkriegsteilnehmer war, war er von den Nürnberger Gesetzen ausgenommen und hätte seine Professur vorerst behalten können. Da seine Entlassung aber nur ei-

ne Frage der Zeit gewesen wäre, reichte Stern zum 1. Oktober 1933 ein Rücktrittsgesuch ein. Zuvor hatte er mit Estermann noch die Zeit genutzt, um auch das magnetische Moment des Deutons (später Deuteron) zu messen [11]. Sie stellten fest, dass es kleiner ist als beim Proton. Dies ist nur möglich, wenn das neutrale Neutron ebenfalls ein magnetisches Moment hat, das dem des Protons entgegen gerichtet ist.

Otto Stern nahm ein Angebot auf eine Forschungsprofessur am Carnegie Institute of Technology in Pittsburgh/Pennsylvania an und baute dort zusammen mit seinem langjährigen Mitarbeiter Estermann eine neue Arbeitsgruppe auf, allerdings bedingt durch die Depression mit sehr beschränkten

Mitteln. Dennoch entstanden auch dort eine Reihe wichtiger Publikationen. Das weltweite Zentrum der Molekularstrahltechnik hatte sich allerdings zu Rabis Labor an der Columbia-University in New York bzw. ab 1940 an das MIT in Boston verlagert.

Nachdem Otto Stern zwischen 1925 und 1944 insgesamt 81-mal für den Nobelpreis nominiert wurde, erhielt er diese Auszeichnung schließlich 1944, rückwirkend für 1943 für „seinen Beitrag zur Entwicklung der Molekularstrahlmethode und die Entdeckung des magnetischen Momentes des Protons“. Nicht lange danach ließ er sich im Alter von 58 Jahren emeritieren und zog nach Berkeley. Nach dem Krieg besuchte Otto Stern fast jedes Jahr Europa, sein zweites Zuhause wurden Zürich und die Schweizer Berge. Deutschen Boden hat er nur noch selten betreten, meist auf der Durchreise. Obwohl er viele Einladungen von Freunden bekam (unter anderem zu Max Plancks 90. Geburtstag in Göttingen), kam er nicht mehr zu offiziellen Anlässen nach Deutschland. Sein ihm zustehendes Emeritusgehalt von der Universität Hamburg, das ihm nach dem Krieg wieder angeboten wurde, lehnte er ab.

Stern hatte zwar mit Deutschland für immer gebrochen, aber nicht mit seinen Freunden und der deutschen Kultur. Aus den



Abb. 6 Diese Gedenktafel der Frankfurter Universität würdigt die wissenschaft-

lichen Verdienste von Otto Stern und Walther Gerlach.

erhaltenen Briefen geht hervor, dass er Max von Laue und Hans Jensen direkt nach Kriegsende oft mit Care-Paketen bedacht hat. Die vielen Briefe, die Laue und Stern in der Nachkriegszeit austauschten, zeugen von Laues Versuch, Stern wieder stärker an die deutschen Physiker zu binden. In seinem Brief vom 11. Juni 1947 schreibt Laue: „Sehr schmerzlich war es mir, neu-lich in der Akademie (Göttingen) zu hören, daß Sie und einige andere ehemalige Mitglieder der Akademie jetzt nicht wieder beitreten wollen. Es mag ja sein, daß es Ihnen eine gewisse Überwindung gekostet hätte, aber solche Überwindung müssen wir jetzt alle üben, und zwar recht oft, wenn die Zukunft der Welt überhaupt wieder friedlich aussehen soll.“

Am 17. August 1969 starb Stern während eines Kinobesuchs in Berkeley an einem Herzinfarkt. In einem Nachruf in den Physikalischen Blättern schrieb Gerlach [12]: „Wer ihn (Stern) kannte, schätzte seine Aufgeschlossenheit – er war ein Grandseigneur! –, seine unbedingte Zuverlässigkeit, die bei seiner schnellen Reaktion oft nicht einfachen, aber fruchtbaren Diskussionen und – wer Sinn dafür hatte – seine bis zum sarkastischen gehenden, stets überlegten Urteile über Sachen und Personen; bonzenhaftes, aber auch schlechtes Benehmen waren ihm zuwider. Obwohl von Haus aus Theoretiker, war Stern voll experimenteller Ideen, nie verlegen um einen neuen Vorschlag, wenn die Durchführung des ersten misslang.“ An diesen

Pionier erinnert seit 2002 eine Gedenktafel an der Universität Frankfurt (Abb. 6).

*

Die Autoren sind Diana Templeton-Killen (Stanford) und Alan Templeton (Oakland), die den Nachlass ihres Großonkels Otto Sterns verwalten, sowie Karin Reich für die Unterstützung bei der Erstellung der Otto Stern-Biografie zu großem Dank verpflichtet. Es würde zu weit führen, alle anderen Unterstützern hier persönlich zu danken. Die Biografie [5] enthält eine ausführliche Danksagung und Auflistung aller Archive und Kollegen, die bei ihrem Entstehen geholfen haben.

Literatur

- [1] M. Born, Mein Leben, Die Erinnerungen des Nobelpreisträgers, Nymphenburger Verlag, München (1975)
- [2] Alan Templeton und Diana Templeton-Killen, Nachlass Otto Sterns und ETH-Bibliothek Zürich, Archive, <http://www.sr.ethbib.ethz.ch/>, Otto Stern tape-recording Folder »ST-Misc.«, 1961 at E.T.H. Zürich by Res Jost
- [3] O. Stern, Physik. Zeitschrift **21**, 582 (1920); O. Stern, Z. Physik **2**, 49 (1920); Nachtrag dazu: *ibid* **3**, 417 (1920)
- [4] P. Debye, Göttinger Nachrichten 1916 und A. Sommerfeld, Physik. Zeitschrift **17**, 491 (1916)
- [5] H. Schmidt-Böcking und K. Reich, Otto Stern – Physiker, Querdenker, Nobelpreisträger, Societätsverlag, Frankfurt (2011)
- [6] O. Stern, Z. Physik **7**, 249 (1921)
- [7] W. Gerlach und O. Stern, Z. Physik **9**, 349 (1922)
- [8] A. Landé, Zeit. f. Phys. **5**, 231 (1921) und **7**, 398 (1921)
- [9] I. Estermann und O. Stern, Z. Physik **61**, 95 (1930)
- [10] I. Estermann, O. R. Frisch und O. Stern, Nature **132**, 169 (1933); R. Frisch und O. Stern, Z. Phys. **85**, 4 (1933)
- [11] I. Estermann und O. Stern, Z. Physik **86**, 132 (1934)
- [12] W. Gerlach, Phys. Blätter **25**, 412 und 472 (1969)

DIE AUTOREN

Horst Schmidt-Böcking (FV Atomphysik) studierte Physik in Würzburg und Heidelberg, wo er 1969 promovierte. Nach einigen „Wanderjahren“ wurde er 1982 auf eine Professur an die Universität Frankfurt berufen, wo er bis zu seiner Pensionierung im Jahre 2004 blieb. Seine Arbeiten zur Spektroskopie von langsamen Rückstoßionen führten zur Entwicklung der COLTRIMS-Methode. 2008 erhielt er als erster Deutscher den renommierten Davison-Germer-Preis der American Physical Society, 2010 die Stern-Gerlach-Medaille der DPG.



Wolfgang Trageser (FV Geschichte der Physik sowie Gravitation und Relativitätstheorie) studierte Physik, Mathematik und Philosophie in Frankfurt/M., wo er auch über das Stern-Gerlach-Experiment promovierte. Seine Arbeitsgebiete sind die theoretischen Grundlagen der Atomphysik und die Geschichte der Quantenphysik.

