

Eine direkte Messung der thermischen Molekulargeschwindigkeit.

Von **Otto Stern.**

(Vorläufige Mitteilung.) — Mit drei Abbildungen.

(Eingegangen am 27. April 1920.)

Einleitung. Es ist die Grundhypothese der kinetischen Gasteorie und der ganzen Molekulartheorie, daß die Moleküle sich ständiger Bewegung befinden, deren Energie nur von der Temperatur abhängt. Die mittlere Energie der fortschreitenden Bewegung eines Moleküls ist nach dieser Hypothese:

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} k T, \quad v = \sqrt{\frac{3 k T}{m}} = \sqrt{\frac{3 R T}{M}} = 157,9 \sqrt{\frac{T}{M}} \frac{\text{m}}{\text{sec}}$$

worin m die Masse des Moleküls, v seine mittlere Geschwindigkeit (Quadratwurzel aus dem Mittel des Geschwindigkeitsquadrates).



Der Strahl der Erkenntnis

Vor 100 Jahren entwickelte Otto Stern die bahnbrechende Molekularstrahlmethode.

Horst Schmidt-Böcking und Wolfgang Trageser

Extrem genau präparierte Strahlen aus Atomen bzw. Molekülen gehören heute zum unverzichtbaren Werkzeug in Atom-, Molekül-, Cluster- und Oberflächenphysik. Otto Stern entwickelte dafür ab 1919 seine Molekularstrahlmethode, die sich sehr rasch als wegweisend für die Quantenmechanik erweisen sollte, nicht zuletzt als Grundlage für das Stern-Gerlach-Experiment.

Im Jahr 1911 machte der französische Physiker Louis Du-noyer eine wichtige Beobachtung: Die Moleküle eines Gases, die von einem höheren Druckbereich durch eine kleine Öffnung in ein Vakuum (Druck $< 10^{-3}$ Torr) strömen, bewegen sich geradlinig. Das überraschte eigentlich nicht, denn aufgrund der Gesetze der klassischen Physik muss sich jedes Molekül wegen der Impulserhaltung so lange geradlinig bewegen, bis es durch ein Kraftfeld oder durch Stoß mit einer anderen Masse seinen Impuls und damit Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit ändert. Entscheidend war jedoch, dass Du-noyer auf diese Weise erstmals einen Atomstrahl erzeugen konnte [1].

Aufbauend auf dieser Beobachtung begann Otto Stern 1919 in Frankfurt mit der Entwicklung der Molekularstrahlmethode (MSM), die auf einer präzisen transversalen Kollimation eines gasförmigen Atom- oder Molekülstrahls beruht. Damit sollte es möglich sein, den Ablenkwinkel und damit den Transversalimpuls eines im Vakuum fliegenden

Teilchens mit extrem hoher Genauigkeit zu präparieren und somit mit hoher Genauigkeit messen zu können. Man kann nur spekulieren, ob ihm damals bewusst war, welche Impulsauflösung die Molekularstrahlmethode einmal liefern würde.

Ausgangspunkt für Sterns Experiment war ein Gasstrahl, der durch Verdampfen im Ofen entsteht und durch eine Reihe von Blenden transversal kollimiert ins Vakuum expandiert. Um absolute Impulsänderungen und damit absolute Energieunterschiede aus dem Ablenkwinkel zu bestimmen, muss jedoch die absolute Geschwindigkeit der Gas-Atome bekannt sein. Stern musste also wissen, ob die von Maxwell und Boltzmann 1860 berechnete Geschwindigkeitsverteilung von Gas-Atomen mit dem Experiment übereinstimmt. Bis 1919 hatte dies niemand messen können. Sterns erstes Experiment in Frankfurt war daher die Messung der thermischen Molekulargeschwindigkeit von Silberdampf. Er überlegte sich dazu eine einfache, aber geniale Messapparatur.

Die Originalapparatur bestand aus einem runden Glaskolben, der auf einer Eisenplatte montiert war und sich auf ein Vakuum von unter 10^{-4} Torr evakuieren ließ (Abb. 1). Im Glaskolben befand sich die eigentliche Messapparatur, in der feststehenden Halterung drehbar aufgebaut. Damit Stern die Geschwindigkeit der Atome bestimmen konnte, musste er den Rahmen mit den Schlitzen und Auffangplat-

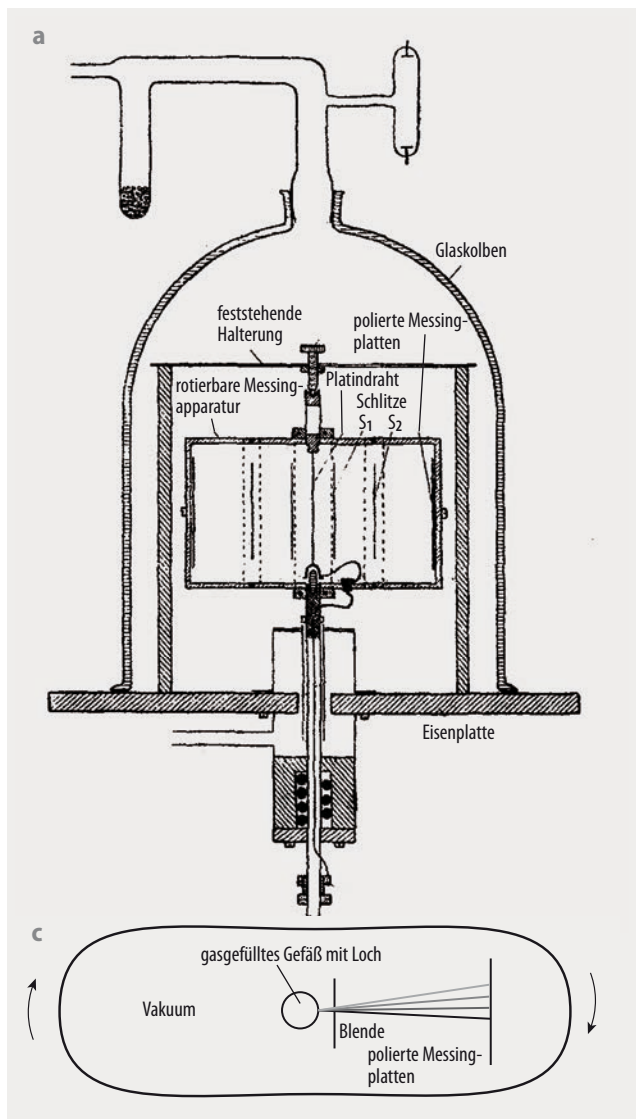
ten gemeinsam mit einer Frequenz von etwa 25 Hz rotieren lassen. Dazu diente ein Motor. Bei nicht rotierender Apparatur liegen Draht, Schlitze, Blende und Auftreffort exakt auf einer Geraden. Rotiert die Apparatur, verschiebt sich der Auftreffort auf der Platte, da die Atome je nach Geschwindigkeit unterschiedliche Zeit von Blende zur Platte brauchen und die Detektor-Platte sich in dieser Zeit ein Stück weiter gedreht hat. Die Atome werden scheinbar nach oben abgelenkt. Der Atomstrahl wurde mit einem gespannten dünnen Platindraht, der mit Silber beschichtet war, erzeugt. Wenn Strom durch den Draht floss, erhitze er sich, und das Silber verdampfte. Hinter einem der beiden vertikal ausgerichteten Schlitze (S2) entstand ein eng kollimierter Gasstrahl (symmetrisch auf beiden Seiten zum Rahmen der Messapparatur), der auf den polierten Messingplatten aus feiner vertikaler Strich kondensiert (Abb. 2).

Der Aufbau war zwar prinzipiell einfach, aber mit den kurz nach dem Ende des Ersten Weltkrieges verfügbaren Mitteln nur sehr schwer zu verwirklichen. Hinzu kam, dass Otto Stern als Theoretiker Mitarbeiter im Institut für theoretische Physik war. Nur durch Zufall stand ihm der 26-jährige Feinmechaniker Adolf Schmidt zur Verfügung, der die Apparatur aufbauen und „zum Laufen“ bringen

musste. Dafür galt es, den rotierenden Innenteil präzise zu lagern und jede Unwucht zu beseitigen, um konstante Drehzahlen zu erhalten. Die Durchführung der Motorwelle in der Bodenplatte diente gleichzeitig als Vakuumdichtung, die Stern als „diffizilsten“ Teil der Apparatur beschreibt. Da es immer nur wenige Minuten dauerte, bis das Silber auf dem Draht verdampft war, musste der Draht ständig nachgespannt werden. Die Drahtposition war nicht ausreichend reproduzierbar, sodass der nahe Schlitz S1 dazu diente, das Quellbild des Gasstrahles zu fixieren.

Sterns Auswertung der Abstände der Silber-Niederschläge auf den Auffangplatten ergab bei einer Verdampfungstemperatur von 961 °C (Schmelzpunkt des Silbers) für den Atomstrahl eine mittlere Geschwindigkeit von rund 600 m/s. Nach der Gastheorie hätte sie aber 534 m/s betragen sollen. Trotzdem war Stern mit dem Ergebnis zufrieden und begründete diese Differenz vor allem mit der ungenauen Temperaturmessung [2].

Albert Einstein brachte in Berlin nach einem Referat von Walter Grotian allerdings Einwände gegen Sterns Analyse vor (Abb. 3): Er stellte fest, dass es einen Unterschied macht, ob man ein Volumenelement des Gases oder die Geschwindigkeitsverteilung durch ein Loch betrachtet,



nach [2]. Foto: H. Schmidt-Böcking

Abb. 1 Bei nicht rotierender Apparatur (a, Nachbau: b) liegen Platindraht, Schlitze S1 und S2 (bzw. Blende) und Auftreffort auf der Messingplatte exakt auf einer Geraden. Rotiert die Apparatur (Aufsicht: c), verschiebt sich der Auftreffort auf der Platte, da die Atome je nach Geschwindigkeit von Blende zur Platte unterschiedliche Zeiten benötigen und die Detektor-Platte sich in dieser Zeit ein Stück weiter gedreht hat, d. h. in dieser Abbildung werden die Atome scheinbar nach oben abgelenkt.



Abb. 2 Silbernieder-
schläge auf den polier-
ten Auffangplatten

da mehr schnellere Gasatome durch den Schlitz gehen als langsame. Stern erkannte, dass Einstein recht hatte und korrigierte seine Analyse, die dann sehr gut mit der Theorie übereinstimmte [3].

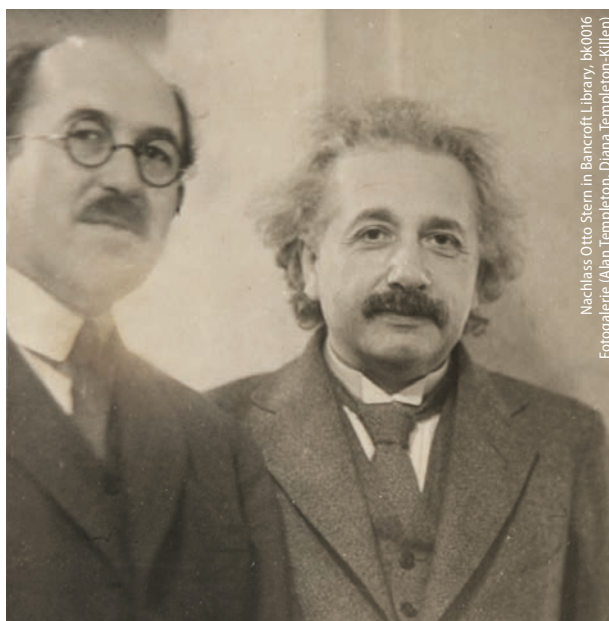
Die Molekularstrahlmethode versprach, inneratomare Energiezustände von Atomen, die sich nur um wenige μeV unterscheiden, experimentell trennen zu können – vorausgesetzt, die Atome werden im Gasstrahl aufgrund einer Wechselwirkung zwischen inneratomarer Struktur und einer äußeren Kraft um wenige Millirad unterschiedlich abgelenkt. Das zeigt sich an einer einfachen Abschätzung für die transversale Impulsgenauigkeit bei Silber, das Stern für den Gasstrahl seines ersten Experiments genutzt hatte: Wird der aus dem Ofen austretende Ag-Strahl durch zwei Kollimatoren im Abstand d mit den Öffnungsbreiten b in transversaler x -Richtung ausgeblendet, ergibt sich eine maximale Winkeldivergenz des Atomstrahls (bei $50\ \mu\text{m}$ Blendenbreite und $60\ \text{mm}$ Blendenabstand) von $\Delta\alpha = 0,0017\ \text{rad}$. Damit ist der Transversalimpuls mit einer Genauigkeit von $\Delta p_x < 0,09\ \text{a.u.}$ bzw. die transversale kinetische Energie E_x mit einer Genauigkeit von $1,2\ \mu\text{eV}$ bestimmt.

Otto Stern hatte also ein Verfahren zur hochauflösenden Impulsmessung von sich im Vakuum bewegendem Quantenteilchen eingeführt. Die Molekularstrahlmethode sollte sich als sehr wichtig für Physik und Chemie erweisen und zudem Meilensteinexperimente in der Quantenphysik ermöglichen.

Freie Weglänge und Richtungsquantelung

Die erste erfolgreiche Anwendung dieser Methode gelang Max Born und Elisabeth Bormann 1920 in Frankfurt [4]. Für einen Ag-Strahl, verdampft bei der Schmelztemperatur, konnten sie die freie Weglänge λ in Luft bestimmen. Der kollimierte Strahl durchflog eine Kaskade von runden Kupfer-Blenden, in die in der Mitte jeweils ein Loch für den Strahlendurchgang gebohrt war. Wurde der Luftdruck im Vakuum in Stufen erhöht, streuten mehr Silberatome an den Luftmolekülen und lagerten sich verstärkt auf den Blenden ab, die hintereinander in definierten Abständen montiert waren. Diese Blenden dienten somit als einfache Detektoren für die an den Luftmolekülen gestreuten Ag-Atome. Aus der sorgfältig gemessenen Ablagerungsmenge ließ sich mittels eines theoretischen Streumodells nach Jeans [5] erstmals die „Freie Weglänge“ λ der Ag-Atome für den bestimmten Druck messen.

Das von 1920 bis 1922 in Frankfurt durchgeführte Stern-Gerlach-Experiment [6, 7] zeigte dann in beeindruckender Weise, was die Molekularstrahlmethode als Impulsmesssystem leisten kann. Stern konnte sich mit Sommerfelds und Debyes Hypothese der „Richtungsquantelung“ [8] nicht anfreunden, denn diese Hypothese widersprach für ihn dem gesunden Menschenverstand. Er war damals allerdings der Einzige, der diese Hypothese mit seiner neuen Methode überprüfen konnte. Max Born erinnerte sich [9]: „Ich habe versucht, Stern zu überzeugen, dass es keinen Sinn macht, ein solches Experiment durchzuführen. Aber er sagte mir, es ist es wert, es zu versuchen.“ Otto Stern bekannte später, dass er selbst nicht an die Existenz einer solchen Richtungsquantelung geglaubt hatte [10]. Am 26. August 1921 reichte er bei der Zeitschrift für Physik als alleiniger Autor eine Publikation [6] ein, in der er den Weg zur experimentellen Überprüfung der Richtungsquantelung und die Machbarkeit des Experiments zeigte. Ihm gelang es, Walther Gerlach zu überzeugen, sich an der Durchführung zu beteiligen, denn Stern brauchte dazu einen sehr erfahrenen Experimentator. Die zu erwartende geringe Ablenkung des Strahls erforderte eine hohe mechanische Präzision. Da Stern am 1. Oktober 1921 seine Professur in Rostock angetreten hatte, versuchte Gerlach, das Experiment allein durchzuführen. Anfang November 1921 sah er erstmals eine Verbreiterung des Strahlflecks, wenn er das Magnetfeld einschaltete. In der Nacht vom 7. auf den 8. Februar 1922 gelang es Gerlach nach weiter verbesserter Strahlgeometrie erstmals, die vorausgesagte diskrete Aufspaltung des Silberstrahls zu sehen. Das Experiment erbrachte die erhoffte Auflösung von $0,1\ \text{a.u.}$ beim Transversalimpuls. Einstein schrieb an Born: „Das Interessanteste aber ist gegenwärtig das Experiment von Stern und Gerlach. Die Einstellung der Atome ohne Zusammenstöße ist nach den jetzigen Überlegungs-Metho-



Nachlass Otto Stern in Bancroft Library, bk0016
Fotografie (Alan Templeton, Diana Templeton-Killen)

Abb. 3 Otto Stern war 1912 zu Albert Einstein an die Prager Universität gegangen und ihm anschließend nach Zürich gefolgt. Beide Physiker (hier auf einem Foto von 1930) verband eine lebenslange Freundschaft. Sie arbeiteten besonders bei Problemen der statistischen Mechanik zusammen.

den durch Strahlung nicht zu verstehen; eine Einstellung sollte von Rechts wegen mehr als 100 Jahre dauern.“

Das Stern-Gerlach-Experiment hatte eine Reihe von fundamentalen Meilensteinergebnissen gebracht, sodass es als eines der wichtigsten Experimente für die Entwicklung der Quantenphysik anzusehen ist. Im Stern-Gerlach-Experiment erreichte die Molekularstrahlmethode erstmals eine subatomare Impulsauflösung von 0,1 a.u., was 2 μeV Energieauflösung entspricht. Damit ließ sich nachweisen, dass Atome im Grundzustand magnetische Momente besitzen und sich deren Größe absolut messen lässt. Das Stern-Gerlach-Experiment verifizierte Peter Debyes und Arnold Sommerfelds Hypothese der Richtungsquantelung von atomaren magnetischen Momenten in einem äußeren magnetischen Feld und lieferte den ersten direkten Beweis, dass der inneratomare Drehimpuls in Einheiten von $\hbar = h/2\pi$ quantisiert ist. Das Experiment zeigte für Silber-Atome eine Duplett-Aufspaltung. Wie wir heute wissen, ergab sich damit der direkte Beweis für die Existenz des Elektronenspins. Ferner lieferte es einen zu 100 Prozent spinpolarisierten Atomstrahl. Dieser ist die Grundlage für die Populationsinversion und damit für die Entwicklung des Masers.

Weitreichende Weiterentwicklungen

Stern gelang es ab 1923 mit seiner Gruppe in Hamburg, die Methode entscheidend weiter zu entwickeln [11] und eine Impulsauflösung von 0,001 a.u. zu erreichen. Mittels zweier rotierender Zahnräder konnte er den Strahl in scharfe zeitliche Pakete zerhacken und damit den Longitudinalimpuls präzise einstellen. Mit diesem Verfahren bestimmte er erstmals das magnetische Moment von Proton und Deuteron. Er wurde so zum Pionier der Elementarteilchen- und Kernstrukturphysik. Otto Robert Frisch wies in Sterns Gruppe den von Einstein vorausgesagten Photonenrückstoßimpuls nach, womit ihm das Pionierexperiment der Laserkühlung gelang. Stern brachte fast gleichzeitig mit Clinton Davisson und Lester Germer He-Strahlen zur Interferenz und verifizierte die Richtigkeit der de-Broglie-Gleichung mit einem Prozent Genauigkeit. Stern selbst betrachtete dieses Experiment als sein bedeutendstes überhaupt. Er war mit seiner Gruppe in Hamburg bis 1933 auf dem Gebiet der Physik mit weitem Abstand führend.

Nach Sterns 1933 erzwungener Emigration übernahm die Gruppe von Isidor Rabi die Führung auf diesem Gebiet. Rabi hatte von 1927 bis 1929 bei Stern in Hamburg als Fellow gearbeitet, ging dann an die Columbia University und war ab 1940 Professor am MIT. Er führte vor allem mittels mehrstufiger Stern-Gerlach-Apparaturen neue Techniken wie Manipulation der Atome durch Photon-Resonanz-Absorption in die Molekularstrahlmethode ein. Daraus entwickelten sich die heute so bedeutenden Gebiete der Kernspin- und Elektronenspinresonanz, die zu wichtigen Methoden der Festkörperphysik, Chemie und auch Medizin geworden sind. Rabis Schüler Norman Ramsey hat mithilfe seiner „Separated Oscillating Field“-Technik an Atomstrahlen die Grundlagen der Atomuhr entwickelt. Damit lässt sich heute die Frequenz so präzise bestimmen,

dass Zeitmessungen mit Genauigkeiten von 10^{-18} möglich sind. Aus den Atomstrahlarbeiten mit Massenspektrometern entstand die Fallentechnik, die Massen und Ladungen mit fast 10^{-12} Genauigkeit vermessen kann.

Stern erhielt erst nach vielen Nominierungen und langem Warten den Physik-Nobelpreis 1943, Gerlach ging leer aus. Das Stern-Gerlach-Experiment hatte aber allen Physikern gezeigt, was und wie genau man mithilfe der Molekularstrahlmethode die Kinematik von Teilchen im Vakuum messen kann. Die wachsende Bedeutung von Otto Sterns Entwicklung lässt sich schon daran ermessen, dass über 20 Physiker und Chemiker einen Nobelpreis für Arbeiten erhalten haben, die auf der Molekularstrahlmethode aufbauen.

Literatur

- [1] L. Dunoyer, *Le Radium* **8**, 142 (1911)
- [2] O. Stern, *Z. Physik* **2**, 49 (1920)
- [3] O. Stern, *Z. Physik* **3**, 417 (1920)
- [4] M. Born und E. Bormann, *Phys. Zeitschr.* **2**, 578 (1920)
- [5] J. H. Jeans, *The Dynamical Theory of Gases*, Cambridge University Press, Cambridge (1904), Ch. XI. § 284, 233
- [6] O. Stern, *Z. f. Phys.* **7**, 249 (1921)
- [7] W. Gerlach und O. Stern, *Z. Physik* **9**, 349 (1922); W. Gerlach und O. Stern, *Ann. Physik* **74**, 673 (1924)
- [8] P. Debye, *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, S. 142 (1916); A. Sommerfeld, *Physikalische Zeitschrift* **17**, 491 (1916)
- [9] P. P. Ewald, Interview with Max Born (1. Juni 1960), Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4522-1
- [10] O. Stern, Tape-recording Folder „ST-Misc.“ (1961) by R. Jost, ETH-Bibliothek Zürich, Archive, www.sr.ethbib.ethz.ch/, und A. Tempelton „O. Stern Nachlass“
- [11] H. Schmidt-Böcking und K. Reich, *Otto Stern: Physiker, Querdenker, Nobelpreisträger*, Societäts Verlag, Frankfurt (2011); H. Schmidt-Böcking und W. Trageser, *Physik Journal*, März 2012, S. 47

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 2004 blieb. Seine Arbeiten zur Spektrosko-

pie von langsamen Rückstoßionen führten zur Entwicklung der COLTRIMS-Methode. 2008 erhielt er den Davisson-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 über das Stern-Gerlach-Experiment promovierte. Seine Arbeitsgebiete sind die theoretischen Grundlagen der Atomphysik und die Geschichte der Quantenphysik.



Prof. Dr. Horst Schmidt-Böcking und **Dr. Wolfgang Trageser**; Institut für Kernphysik, Goethe Universität Frankfurt, Max von Laue Str. 1, 60438 Frankfurt