Was ist Spin?

THEORIE EINFACH ERKLÄRT

Drehen Sie eine Tasse einmal um ihre Achse, sieht sie danach genauso aus wie vorher. Das ist so selbstverständlich, dass niemand darüber nachdenkt. Bei einem Elektron stimmt es nicht. Nach einer vollen Umdrehung um 360 Grad hat sich sein Zustand verändert, erst nach zwei Umdrehungen, also 720 Grad, ist es wieder ganz das alte. Verantwortlich dafür ist eine Eigenschaft, die Spin heißt und für die es im Alltag kein passendes Bild gibt.

Trotzdem steckt Spin in Dingen, die wir täglich benutzen: im MRT-Gerät, in Festplatten, in jedem Magneten an der Kühlschranktür. Und ohne Spin hätte das Periodensystem eine ganz andere Gestalt, und Sie und ich würden nicht existieren.

Silberatome, die sich nicht entscheiden wollen

Die erste Spur fanden Otto Stern und Walther Gerlach 1922 in Frankfurt, und das, ohne nach Spin zu suchen [1]. Sie schickten einen Strahl Silberatome durch ein ungleichmäßiges Magnetfeld (Abb. 1). Jedes Atom verhält sich wie ein winziger Magnet, und in einem solchen Feld wird ein Magnet je nach seiner Ausrichtung nach oben oder unten abgelenkt. Weil die Atome aus einem heißen Ofen kamen, sollten ihre kleinen Magnete in alle möglichen Richtungen zeigen. Auf dem Schirm hätte also ein breiter, verschmierter Streifen entstehen müssen.

Stattdessen fanden Stern und Gerlach zwei scharf getrennte Flecke. Die Atome wurden entweder ein bestimmtes Stück nach oben abgelenkt oder dasselbe Stück nach unten, nie etwas dazwischen. Gerlach soll das Ergebnis Niels Bohr auf einer Postkarte mitgeteilt haben, mit einem Foto der Flecke und Glückwünschen zur Bestätigung seiner Theorie. Ganz richtig war das allerdings nicht, denn erklären konnte man die zwei Flecke damals noch nicht.

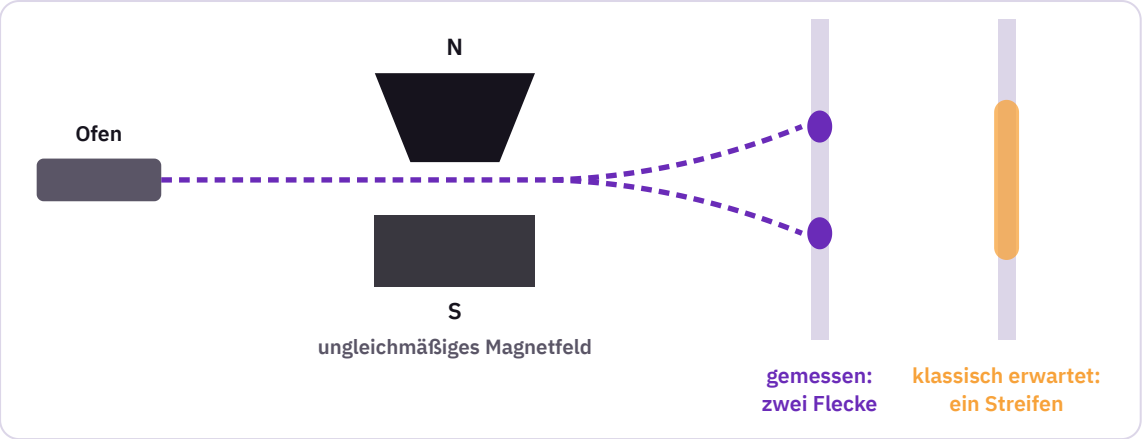


Abb. 1: Der Stern-Gerlach-Versuch, schematisch. Eigene Darstellung nach [1].

Zwei Studenten und eine Dummheit

Die Erklärung kam 1925 aus Leiden, von zwei jungen Doktoranden namens George Uhlenbeck und Samuel Goudsmit. Sie schlugen vor, dass das Elektron selbst einen eigenen Drehimpuls und ein eigenes magnetisches Moment besitzt, so als würde es sich um seine eigene Achse drehen [2]. Ihr Betreuer Paul Ehrenfest fand die Idee gut und reichte sie bei einer Zeitschrift ein. Dann fragten die beiden noch den großen Hendrik Antoon Lorentz, der ausrechnete, dass sich die Oberfläche eines solchen Elektrons schneller als das Licht drehen müsste. Erschrocken wollten sie die Arbeit zurückziehen, doch Ehrenfest hatte sie schon abgeschickt. Er beruhigte sie, sie seien beide jung genug, um sich eine Dummheit leisten zu können. Goudsmit hat die Geschichte fünfzig Jahre später erzählt [3].

Lorentz hatte recht, und Uhlenbeck und Goudsmit auch. Das Elektron dreht sich nicht wirklich. Es besitzt einen Drehimpuls, ohne dass sich irgendetwas dreht, eine Eigenschaft, die es ebenso unveränderlich mit sich trägt wie seine Masse und seine Ladung. Der Name „Spin“, englisch für Drehung, ist ein Überbleibsel des ersten, falschen Bildes.

Was Spin ausmacht

Wenn man den Spin eines Elektrons entlang irgendeiner Richtung misst, kommen immer nur zwei Werte heraus:

$$S_z = \pm \frac{\hbar}{2} \tag{1}$$

Dabei ist ħ das reduzierte Plancksche Wirkungsquantum. Man spricht deshalb von Spin ½, und die beiden Möglichkeiten heißen kurz „Spin auf“ und „Spin ab“. Das Erstaunliche ist das Wort „irgendeiner“: Ganz gleich, ob man senkrecht, waagrecht oder schräg misst, das Ergebnis ist immer einer dieser beiden Werte. Ein Elektron, dessen Spin senkrecht nach oben zeigt, hat für die waagrechte Richtung keinen bestimmten Wert. Misst man dort,

kommt mit je fünfzig Prozent Wahrscheinlichkeit links oder rechts heraus. Spin ist das einfachste Quantensystem überhaupt, und gerade deshalb lässt sich an ihm alles Seltsame der Quantenmechanik zeigen, von der Überlagerung bis zur Verschränkung.

Mit dem Spin ist ein magnetisches Moment verbunden, und dessen Stärke ist eine der am genauesten gemessenen Zahlen der Physik. Der sogenannte g-Faktor des Elektrons, der das Verhältnis beschreibt, liegt dem Betrag nach bei 2,002 319 304 360 92, mit einer Unsicherheit erst in der dreizehnten Nachkommastelle [4]. Dass er so nahe bei 2 liegt, folgte 1928 aus Paul Diracs relativistischer Gleichung für das Elektron, die kleine Abweichung von 2 aus der Quantenelektrodynamik. Theorie und Messung stimmen hier auf zwölf Stellen überein.

Zweimal herum

Und die 720 Grad aus der Einleitung? Die folgen direkt aus der Mathematik des Spin ½: Dreht man den Zustand um 360 Grad, bekommt er ein Minuszeichen. Bei einer einzelnen Messung merkt man davon nichts, weil nur das Quadrat zählt. Aber wenn man einen gedrehten mit einem ungedrehten Zustand überlagert, macht das Minuszeichen einen Unterschied, so wie zwei Wellen sich je nach Vorzeichen verstärken oder auslöschen.

1975 haben das zwei Gruppen gleichzeitig nachgewiesen, eine davon in Wien mit dem jungen Anton Zeilinger. Sie teilten einen Strahl von Neutronen, die ebenfalls Spin ½ haben, in zwei Wege auf, drehten auf einem Weg die Spins mit einem Magnetfeld und brachten beide Strahlen wieder zusammen. Das Interferenzmuster zeigte eindeutig: Erst nach 720 Grad war alles wie vorher [5],[6].

Warum die Welt ohne Spin anders aussähe

Noch im selben Jahr 1925 formulierte Wolfgang Pauli die Regel, dass zwei Elektronen in einem Atom nie in allen Quantenzahlen übereinstimmen dürfen [7]. Mit dem Spin als vierter Quantenzahl passen genau zwei Elektronen in jedes Orbital, eines mit Spin auf, eines mit Spin ab. Daraus ergibt sich die ganze Schalenstruktur der Atome und damit das Periodensystem. Ob ein Teilchen halbzahligen oder ganzzahligen Spin hat, entscheidet außerdem, ob es zu den Fermionen oder Bosonen gehört, und damit, ob es sich wie Materie oder wie Licht verhält.

Technisch ist Spin längst Alltag. Die Kernspintomographie liest die Spins von Wasserstoffkernen im Körper aus. Die Leseköpfe von Festplatten nutzen den Elektronenspin, ein Gebiet, das man Spintronik nennt. Und viele Ansätze für Quantencomputer verwenden einzelne Spins als Qubits, weil sie von Natur aus genau zwei Zustände haben.

Zum Weiterlesen

QED. Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie

Richard P. Feynman · Piper, 2018 · ISBN 978-3-492-31316-2

Feynman erklärt, wie die Quantenelektrodynamik den g-Faktor des Elektrons auf so viele Stellen genau vorhersagt.

Bei Amazon ansehen*

Grundkurs Theoretische Physik 5/1: Quantenmechanik – Grundlagen

Wolfgang Nolting · Springer, 2013 · ISBN 978-3-642-25402-4

Für alle, die den Spin mit Pauli-Matrizen selbst durchrechnen wollen.

Bei Amazon ansehen*

* Werbelink: Kaufen Sie über diesen Link, erhalten wir von Amazon eine kleine Provision, am Preis ändert sich für Sie nichts. Mehr Empfehlungen auf unserer Seite Bücher zur Quantenphysik.

Quellen

1. W. Gerlach, O. Stern: *Der experimentelle Nachweis der Richtungsquantelung im Magnetfeld.* In: Zeitschrift für Physik 9 (1922), S. 349–352, doi:10.1007/BF01326983.
2. G. E. Uhlenbeck, S. Goudsmit: *Ersetzung der Hypothese vom unmechanischen Zwang durch eine Forderung bezüglich des inneren Verhaltens jedes einzelnen Elektrons.* In: Die Naturwissenschaften 13 (1925), S. 953–954, doi:10.1007/BF01558878.
3. S. Goudsmit: *It might as well be spin.* In: Physics Today 29 (1976), Heft 6, S. 40–43, doi:10.1063/1.3023518.
4. P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor, E. Tiesinga: *CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2022.* In: Reviews of Modern Physics 97 (2025), 025002, doi:10.1103/RevModPhys.97.025002.
5. H. Rauch, A. Zeilinger, G. Badurek, A. Wilfing, W. Bauspiess, U. Bonse: *Verification of coherent spinor rotation of fermions.* In: Physics Letters A 54 (1975), S. 425–427, doi:10.1016/0375-9601(75)90798-7.

6. S. A. Werner, R. Colella, A. W. Overhauser, C. F. Eagen: *Observation of the Phase Shift of a Neutron Due to Precession in a Magnetic Field.* In: Physical Review Letters 35 (1975), S. 1053–1055, doi:10.1103/PhysRevLett.35.1053.
7. W. Pauli: *Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppen im Atom mit der Komplexstruktur der Spektren.* In: Zeitschrift für Physik 31 (1925), S. 765–783, doi:10.1007/BF02980631.

Zitiervorschlag

```
quanten.de: Was ist Spin?. Stand: Oktober 2026. URL:
https://quanten.de/spin.html (PDF:
https://quanten.de/pdf/spin.pdf)
```

Texte und Abbildungen © 2026 quanten.de. Nutzung mit Quellenangabe und Link gern, kommerzielle Nutzung nach Absprache: info@quanten.de

Weiterlesen: Fermionen und Bosonen · Kernspintomographie · Spintronik · Die Schrödinger-Gleichung