

Hans Peter Dreyer
Ebnat-Kappel, hp.dreyer@thurweb.ch

Vom Spin der theoretischen Physik zum MRI im Spital

Wie kann man glücklich aussehen, wenn man an den anomalen Zeeman-Effekt denkt? antwortete W. Pauli auf die Frage eines Passanten 1923 in Kopenhagen. (Überliefert von C. Enz)

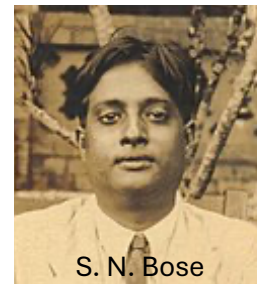
Sie sind beide jung genug, um sich eine Dummheit leisten zu können. (P. Ehrenfest zu S. Goudsmit und G. Uhlenbeck wegen des Elektronenspins, den sie Ende 1925 in den *Naturwissenschaften* publizierten.)

Ich glaube, dass Du und Uhlenbeck grosses Glück gehabt haben, dass Eure Arbeit über das rotierende Elektron veröffentlicht und diskutiert wurde, bevor Pauli davon gehört hatte. (L. H. Thomas an S. Goudsmit, 1926)

Der Spin, der in vielen theoretischen Betrachtungen, aber auch in vielen Anwendungen wie dem Magnetresonanz-Imaging (MRI) eine Rolle spielt, hat eine komplexe Entdeckungsgeschichte. Friedrich Hund, der mitgewirkt hat, schreibt 1984 in seiner «Geschichte der Quantentheorie»: *Die Zeitgenossen [von Pauli] konnten nicht wissen, dass zur Erfassung der Grundlagen der neuen Quantenmechanik die komplizierten Eigenschaften der Spektren nicht nötig waren und dass zum Verständnis dieser (...) Spektren die Grundlagen der Quantenmechanik wenig beitrugen. So hemmten sich die beiden Entwicklungen gegenseitig; in den Dingen, die man hauptsächlich betrachtete, waren immer mehrere Schwierigkeiten verwoben: Grundlagen der Quantentheorie, Spin und Abschlussprinzip [Ausschlussprinzip].*



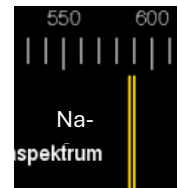
Während sich Wolfgang Pauli im kühlen Kopenhagen vorerst erfolglos mit dem anomalen Zeeman-Effekt herumschlägt, begründet im heissen Dhaka **Satyendra Nath Bose** Plancks Strahlungsformel auf eine neue Art. Er sendet einen Artikel an das *Philosophical Magazine*, das diesen ablehnt. Deshalb wendet er sich an Einstein mit der Bitte: *Respected Sir, I have ventured to send you the accompanying article for your perusal and opinion. I am anxious to know what you think of it. You will see that I have tried to deduce the coefficient $8\pi \nu^2/c^3$ in Planck's Law independent of classical electrodynamics, only assuming that the ultimate elementary region in the phase-space has the content h^3 . I do not know sufficient German to translate the paper. If you think the paper worth publication I shall be grateful if you arrange for its publication in Zeitschrift für Physik.* Einstein erkennt die Neuheit der Idee, im Phasenraum zu zählen, übersetzt die Arbeit eigenhändig und lässt sie unter Boses Namen mit dem Titel *Plancks Gesetz und Lichtquantenhypothese* erscheinen. Bose arbeitet also nicht mehr mit dem Wellenaspekt des Lichts, indem er die Anzahl stehender Wellen abzählt, sondern mit dem Teilchenaspekt. Diesen zweifelt Niels Bohr 1924 immer noch an. Erst nachdem Comptons Experiment offensichtlich die Energie- und Impulserhaltung beim Stoss eines Lichtquants auf ein Elektron belegt, ändert er seine Meinung.



Damit das Ergebnis stimmt, muss Bose einen «Polarisationsfaktor» 2 einführen. Man stelle sich ein Teilchen mit zweierlei Polarisationszuständen vor, bevor es den Elektronenspin gibt! Nicht grundlos schreibt Einstein an Ehrenfest über Boses Arbeit: *Ableitung elegant, aber Wesen bleibt dunkel.* Zwei Jahre später, nach der Entdeckung des Elektronenspins, bittet Ehrenfest seinen Freund, ihm zu sagen, *wie die analoge Hypothese relativistisch richtig formuliert für 'Licht-Corpuskeln' [Spin des Photons]* lautet. Einstein erkennt, dass in der Statistik die Photonen als voneinander unabhängig und ununterscheidbar vorausgesetzt werden müssen, dass aber *eine gegenseitige Beeinflussung der Moleküle [Quantenobjekte] von vorläufig ganz rätselhafter Art* vorhanden sei. Er ist mit seinem Verständnis des Lichtquants nicht zufrieden und schreibt Lorentz, dass am geplanten Solvay-Kongress von 1927 an seiner Stelle *Herr Fermi in Bologna oder Langevin* Besseres zu berichten hätten. Zwischenzeitlich hat Enrico Fermi im Anschluss an Paulis Ausschlussprinzip eine Statistik für Elektronen gefunden: Fermionen sind «Individualisten», während Bosonen «Kollektivist» sind. Während die Einzelheiten der Bose-Einstein- und der Fermi-Dirac-Statistik sich nicht für die Behandlung im Gymnasium eignen, ist die Geschichte der Rückweisung der revolutionären Idee eines Unbekannten, der abseits der grossen Wissenschaftszentren arbeitet, ebenso ein Musterbeispiel für «Nature of Science», wie Einsteins selbstkritische Einschätzung seines Verständnisses des Lichtquants.

Im Gegensatz zum Spin des Photons scheint der Spin des Elektrons auf der Hand zu liegen: Jeder Planet kreist um die Sonne und rotiert um die eigene Achse. Wo liegt das Problem bei der Übertragung aufs Atom?

Die Vielfalt der Spektren kann 1923 mit einer vierten Quantenzahl immer besser erfasst werden. Dem wenig bekannten Alfred Landé gelingt es, mit einem Vektormodell eine anschauliche Basis für noch mehr spektroskopischen Fakten zu schaffen, allerdings unter Inkaufnahme von halben Quantenzahlen. Gleichzeitig zeigen sich viele Schwächen des anschaulichen Bohr-Sommerfeld-Modells. Besonders Pauli und Heisenberg sind sehr bestrebt, im Bereich der Atomphysik die Anschauung zu verlassen. Das Verhalten der einfachen Alkali-Atome irritiert Pauli, der 1924 an Landé schreibt: *Das Leuchtelektron bringt es auf eine rätselhafte, unmechanische Weise fertig, in zwei Zuständen (mit dem gleichen k) mit verschiedenen [Dreh]-Impulsen zu laufen.* Dies vernimmt der amerikanische Gaststudent Ralph Kronig und äussert den Gedanken, das Elektron besitze eine Rotation um die eigene Achse. Der kritische Pauli redet ihm diese Idee, die wohl den Nobelpreis gebracht hätte, aus: Das Elektron müsste mit Überlichtgeschwindigkeit rotieren, um das von der Rotation erzeugte magnetische Moment in der beobachteten Grösse zu erzeugen.



Pauli bekämpft den anschaulichen Elektronenspin, den Goudsmit und Uhlenbeck in Leiden unter der Obhut des unabhängigen Ehrenfest publizieren dürfen auch dann noch, als Einstein und Bohr überzeugt sind. *So kann ich vorläufig zu Goudsmits Idee doch nur kopfschüttelnd sagen: 'Die Sache gefällt mir nicht!'* 'Die Sache' gefällt Pauli unter anderem deshalb nicht, weil sie mit der Spin-Bahn-Kopplung in Widerspruch zu sein scheint. Mit der Matrizenmechanik ist inzwischen eine echte Quantenmechanik aufgetaucht, mit der er und Heisenberg die Alkali-Dubletts mit dem Spin, gemäss der «neuen Irrlehre», d. h. mit Spin, rechnen und auf andere Widersprüche stossen. Doch im Februar 1926 meldet Bohr spitzbübisch eine «Überraschung für die gelehrten Relativitätsphysiker». Sein englischer Gast Llewellyn Thomas hat eine relativistisch korrekte Berechnung angestellt. Nun erst antwortet Pauli: *Jetzt bleibt mir nichts anderes übrig als vollständig zu kapitulieren. (...) Es tut mir leid, dass ich Ihnen durch meine Dummheit so viel Arbeit gemacht habe. (...) Somit ist also der erste Programmpunkt des Goudsmitschen Elektrons [Spin] zu dessen Gunsten entschieden.*

Im Gymnasium wird man aus Zeitgründen direkt **George Uhlenbeck und Samuel Goudsmit** als Erfinder des



Elektronenspins nennen. Das Foto zeigt Uhlenbeck links und Goudsmit rechts von Hendrik Kramers. Postdoc Goudsmit arbeitet in Leiden mit dem Neuling Uhlenbeck für Ehrenfest den Stand der Forschung auf. Die beiden jungen Forscher stossen auf den **Elektronenspin**, für den sie nie einen Nobelpreis erhalten werden. Sie wandern in die USA aus, arbeiten an der Radarentwicklung und forschen später an bedeutenden Universitäten. Goudsmit wird mit der ALSOS-Operation berühmt. Er muss die deutschen Kernphysiker, namentlich Werner Heisenberg, festnehmen und zum Verhör nach England bringen. Deren Kenntnisse dürfen nicht in die Hände der Russen fallen!

Die Lernenden werden den Spin zweifellos im Chemieunterricht begegnen. Für den Physikunterricht stellt sich das Dilemma der Veranschaulichung. Pauli schreibt dazu 1929: *In einer mehr die kinematischen Verhältnisse ins Auge fassenden Weise wird auch von einem 'rotierenden Elektron' (englisch: spin-electron) gesprochen. Die Vorstellung eines rotierenden materiellen Gebildes halten wir aber nicht für wesentlich und sie empfiehlt sich auch nicht wegen der Überlichtgeschwindigkeiten, die man dann in Kauf nehmen muss.* – Dem bleibt hinzuzufügen, dass der Spin als Vektorgrösse schlecht mit dem Wellenaspekt des Elektrons zu vereinbaren ist. Während Masse und Ladung durch das Orbitalbild mit der Wahrscheinlichkeitsverteilung in Übereinstimmung gebracht werden können, gilt das für den Spin nicht. Er entzieht sich der Anschauung, ebenso wie die Matrizen, die Pauli 1927 zu seiner quantenmechanischen Beschreibung im komplexen Phasenraum erfindet.

Es passt zum krummlinigen Entwicklungsweg des Elektronenspins, dass sich Pauli und Goudsmit hinsichtlich der Priorität widersprechen. Pauli sagt in seiner Nobelpreisrede 1946: *I may include the historical remark that already in 1924, before the electron spin was discovered, I proposed to use the assumption of a nuclear spin to interpret the hyperfine structure of spectral lines. This proposal met on the one hand strong opposition from many sides but influenced on the other hand Goudsmit and Uhlenbeck in their claim of an electron spin.*

Der ebenso militante Goudsmit betont die Rolle von Ehrenfest und schreibt 1965 in den *Physikalischen Blätter[n]*: *Paulis Artikel vom Jahre 1924 kann sicher nicht als die Einführung des Spinbegriffs, der eine Eigenschaft eines einzelnen Elementarteilchens ist, betrachtet werden. Pauli erwartete nur für zusammengesetzte Kerne einen Drehimpuls, der von Bahnbewegungen herrührte.*

Goudsmit fährt fort: *In der Tat wurde der Spin des Protons erst 1927 entdeckt, und zwar nicht als Resultat von Feinstrukturüberlegungen. Der **Protonspin** ist von Hund eingeführt und bald danach von Dennison in seiner genialen Erklärung des abnormalen Verhaltens der spezifischen Wärme des molekularen Wasserstoffs bestätigt worden* – und nicht etwa von Pauli. Hund selbst ist in seiner «Geschichte der Quantentheorie» bescheidener und betont die vorangegangenen Symmetrieüberlegungen von Heisenberg. Dieser erhält 1932 den Nobelpreis, *for the creation of quantum mechanics, the application of which has, inter alia, led to the discovery of the allotropic forms of hydrogen* [verschiedene Formen von H₂].

Es ist bemerkenswert, dass der typisch quantenphysikalische Spin des Protons nicht durch ein Kern- oder Atomphysikalisches Experiment entdeckt wurde, sondern durch die Analyse von etwas Makroskopischem, der spezifischen Wärme von flüssigem Wasserstoff. Beginnend mit Einsteins Überlegungen zur spezifischen Wärme von Diamant 1907 war eine Quantenmechanik mitsamt Zustandskonzept entstanden. Ohne Einzelheiten zu kennen, machte Heisenberg Symmetriebetrachtungen mit Zuständen, in denen der Kernspin eine Rolle spielte. Später erkannte Dennison, dass gewöhnlicher Wasserstoff ein Gemisch aus **Ortho-** (mit entgegengesetzten Kernspins) und **Parawasserstoff**-Molekülen (mit parallelen Kernspins) ist. Flüssiger Wasserstoff bei 21 K, erstmals 1898 hergestellt, besteht praktisch nur aus Parawasserstoff.

Bis 1932 das Neutron entdeckt wurde, dachte man sich den Atomkern aus Protonen und Elektronen zusammengesetzt. Das erschwerte die Erfassung des kollektiven Kernspins, der für die Feinstruktur der Atomspektren wesentlich ist, die Pauli zehn Jahre früher Kummer bereitet hatte. Nicht zuletzt durch die Atombombenforschung entwickelte sich die Kernphysik sehr schnell. Mit dem Radar machte auch die Hochfrequenztechnik grosse Fortschritte. Sie ermöglichte, Elektronen- und Kernspins in statischen Magnetfeldern anzuregen und nach Resonanzen zu suchen (ESR und NMR).

Zwei Schweizer haben für ihre Beiträge zum **MRI** aus den 70er Jahren einen Chemie-Nobelpreis erhalten. 1991 Richard Ernst und 2002 Kurt Wüthrich. Beide



RICHARD ERNST, UM 1970

bildeten sich in den USA weiter (rechts Wüthrich als Postdoc in Berkeley) und wurden Professor an der ETH (links Ernst als Privatdozent). Ihre Nobelpreis-Biografien verraten, dass zwei unterschiedliche Menschen im gleichen Forschungsgebiet zur Brücke von der Wissenschaft in die medizintechnischen Anwendungen beigetragen haben: Ernst, kunstliebend, von Nepal fasziniert und selbstkritisch; Wüthrich, zuerst Sportlehrer und Spitzensportler, begeistert vom Fischen in Neuseeland, selbstbewusst.



KURT WÜTHRICH
1966

Die Lernenden kennen MRI als «Röhre». Vielleicht eignet sie sich als motivierender Unterrichtseinstieg. Die Geschichte beginnt mit Isidor Rabi, der 1927 aus den USA nach Europa kommt, um bei Schrödinger, Sommerfeld und Pauli Quantenphysik zu studieren. In Hamburg lernt er bei Otto Stern die Molekularstrahlmethode kennen. Zurück an der Columbia-University untersucht er magnetische Momente von Atomkernen. In einem äusseren Magnetfeld richten sie sich parallel oder antiparallel aus. Das mit einer Energieänderung ΔE verbundene Umkippen erreicht Rabi mit Hochfrequenzquanten gemäss der Bedingung $hf = \Delta E_{\text{magnetisch}}$. Das gilt auch für Protonen in einem H₂O- oder Eiweiss- oder Fett-Molekül, also im biologischen Umfeld.

Moderne MRI-Geräte besitzen supraleitende Magnete, die ein homogenes Feld von einigen Tesla Stärke erzeugen, so dass f im Radiobereich liegt. Im Unterschied zu den Röntgenquanten bewirken Radioquanten keine biologische Strahlenbelastung. Dem starken Magnetfeld werden hochfrequente Zusatzfelder überlagert, so dass – unerlaubt anschaulich gesprochen – die Kernmagnetchen zum Kreisel kommen. Dann überlässt man sie sich selbst. Sie strahlen die Energie $\Delta E = hf^*$ ab, kommen zum Stillstand und werden erneut angeregt. Das laute Rattern beim MRI entsteht durch variierende Magnetfelder, welche die räumliche Auflösung der Signale ermöglichen: Weil an verschiedenen Orten das Magnetfeld unterschiedlich stark ist, ist es auch das f^* , das man auffängt. Zusätzlich hängt die Relaxationszeit, in der die Magnetchen zum Stillstand kommen, von der Umgebung ab. Die Protonen besitzen eine vom Molekül-Typus abhängige Relaxationszeit. Die abgestrahlte Energie wird aufgefangen und mit sehr viel Rechen-Aufwand zu 3D-Bildern verarbeitet. Mit ihnen kann die Ärztin auf die Gewebeart schliessen, aus der das Signal kommt, und so beispielsweise ein gerissenes Kreuzband im Kniegelenk erkennen. Einerseits sind die mathematischen Methoden und andererseits die Rechnerleistungen so verbessert worden, dass es möglich ist, einem Gehirn in Echtzeit «beim Denken» zuzuschauen. Was würde wohl Pauli, den psycho-physische Parallelität interessiert hat, zu dieser Entwicklung sagen?