Zeitschrift: Gesnerus : Swiss Journal of the history of medicine and sciences
Herausgeber: Swiss Society of the History of Medicine and Sciences
Band: 33 (1976)
Heft: 3-4

Artikel: Wolfgang Pauli und die Entstehung des Spin-Konzepts
Autor: Richter, Steffen
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-521272

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Wolfgang Pauli und die Entstehung des Spin-Konzepts

Von Steffen Richter

In den Jahren unmittelbar vor dem Entstehen der Quantenmechanik 1925/26 harrte neben anderen eine Gruppe von Problemen ihrer Lösung, die in wesentlichen Zügen auch schon vor dem Umschwung, den die Quantenmechanik brachte, zugänglich waren: die Feinstruktur der Spektralterme, insbesondere die Multiplettstruktur, ihre Aufspaltung im Magnetfeld und der Abschluß der Elektronenschalen im Atom mit dem daraus resultierenden Aufbau des Periodensystems der Elemente. Die unübersichtliche Lage in der Atomphysik vor 1925 komplizierte die Entwicklung, denn man versuchte gleichzeitig die erstrebten Grundlagen einer neuen Quantentheorie zu schaffen und die Lösung der genannten Probleme zu erreichen. Auf diesem Wege entstanden das Ausschließungsprinzip und das Konzept des Elektronenspins.

Einer der Hauptbeteiligten an dieser Entwicklung war Wolfgang Pauli. Obwohl er mit seinem Ausschließungsprinzip die Quantentheorie ein beträchtliches Stück vorangetrieben und auch den Boden für das Spin-Konzept bereitet hatte, konnte er sich lange nicht dazu entschließen, diesen nächsten Schritt, den andere tun mußten, zu vollziehen. Die Entwicklung der Paulischen Anschauungen erfolgte hier nicht linear, wie man es auf Grund seiner publizierten Arbeiten rekonstruieren könnte (1, 2–7). Vielmehr läßt sich bei Pauli ein ganz anderer Prozeß feststellen: die neue Theorie stieß bei ihm nicht etwa wegen ihres revolutionären Charakters auf Ablehnung; sie war im Gegenteil in seinen Augen nicht genügend revolutionär – also eine genaue Umkehrung des üblichen Schemas für die Akzeptierung neuer Theorien. Dieser ungewöhnliche Prozeß läßt sich mit Hilfe der erhalten gebliebenen wissenschaftlichen Korrespondenz Paulis verstehen und in seinen Hintergründen und Argumentationsweisen aufhellen (8).

Die Entwicklung des Spin-Konzepts ist eng verknüpft mit der Entstehung des Paulischen Ausschließungsprinzips. Einen Schlüssel zum Verständnis dieser Entwicklung bieten – nach seinem eigenen Zeugnis – Paulis frühe Arbeiten zum anomalen Zeemaneffekt, der hartnäckig allen Deutungsversuchen mit Hilfe der älteren Quantentheorie widerstanden hatte. Pauli befaßte sich seit dem Herbst 1922 intensiver mit diesem ungelösten Problem, gerade in der Zeit, in der Alfred Landé erste Erfolge bei der Ordnung der Multipletts und ihrer Zeemaneffekte erzielte (9). Die ersten Schritte in dieser Richtung unternahm Pauli gemeinsam mit Niels Bohr, seinem Lehrer in Kopenhagen, mit dem er im Frühjahr 1923 eine Arbeit darüber publizieren wollte. Sie hofften darin, in einem «Verzweif-

lungsversuch, den ganzen Quantenzahlen treu zu bleiben» und so der Lösung des Problems näherzukommen (10), denn Landé hatte bei seiner Analyse halbzahlige Quantenzahlen eingeführt, deren Berechtigung vielfach skeptisch beurteilt wurde. Es kamen Pauli und Bohr jedoch bald erhebliche Zweifel an der Richtigkeit ihrer Überlegungen, und so zogen sie im März 1923 ihre Notiz zurück (10,11). Trotz dieses Mißerfolges arbeitete Pauli weiter am Zeemaneffekt und veröffentlichte auf Drängen Bohrs im April eine eigene Arbeit (12), die er jedoch als «unglückselig» und «scheußlich» bezeichnete (13,14) und an der er «wenig Freude» hatte (15). In dieser Arbeit stellte Pauli eine Regel auf, welche es gestattete, die in den Ausdrücken für die Aufspaltung der Energieniveaus in Magnetfeldern auftretenden und zur Beschreibung des anomalen Zeemaneffektes wesentlichen g-Werte (Landé-Faktoren) im Falle kleiner Feldstärken aus den Energiewerten der Termaufspaltungen in starken Magnetfeldern zu berechnen. Die Regel ging als Permanenzgesetz der g-Summen in die Literatur ein und fand später in der Quantenmechanik ihre Bestätigung. Pauli war mit dem Ergebnis seiner Arbeit nicht zufrieden, weil ihm «der physikalische Sinn dieses Prinzips ... völlig unklar» geblieben war (16). Dies bedeutete für ihn damals, daß es ihm nicht geglückt war, eine modellmäßige Deutung anzugeben (17), was er auch in der Arbeit selbst ausdrücklich bemerkte (12):

> «Eine befriedigende modellmäßige Deutung der dargelegten Gesetzmäßigkeiten, insbesondere der in diesem Paragraphen besprochenen formalen Regel ist uns nicht gelungen. Wie schon in der Einleitung erwähnt, dürfte eine solche auf Grund der bisher bekannten Prinzipien der Quantentheorie kaum möglich sein. Einerseits zeigt das Versagen des Larmorschen Theorems, daß die Beziehungen zwischen dem mechanischen und dem magnetischen Moment eines Atoms nicht von so einfacher Art ist wie es die klassische Theorie fordert, indem das Biot-Savartsche Gesetz verlassen oder der mechanische Begriff des Impulsmomentes modifiziert werden muß. Andererseits bedeutet das Auftreten von halbzahligen Werten von m und j bereits eine grundsätzliche Durchbrechung des Rahmens der Quantentheorie der mehrfach periodischen Systeme» (18).

Halbzahlige Quantenzahlen traten nun auch bei Pauli auf. Zur analytischen Beschreibung der empirisch gesicherten Werte der Termaufspaltung unter dem Einfluß starker Magnetfelder bediente er sich einer neuen Darstellungsweise. Er führte zwei neue Zahlen m_1 und μ ein, deren Summe m ergibt:

$$m = m_1 + \mu$$

und mit denen sich die Energiewerte darstellen lassen durch

$$\frac{E}{o\,h} = m_1 + 2\mu,$$

o = Larmorfrequenz, h = Wirkungsquantum

Diese Quantenzahlen m_1 und μ entsprechen in moderner Schreibweise den Quantenzahlen M_L und M_S (19).

Obwohl Pauli in der Arbeit keine Modellvorstellungen angegeben hatte, waren solche doch in seine Überlegungen eingegangen. Er sagte sogar, daß er ohne sie nie zu seinen Ergebnissen gelangt wäre (13). «Aus Vorsicht» hatte er sie aber nicht publiziert (17), jedoch sowohl Sommerfeld als auch Landé davon berichtet. Pauli nahm an, daß die Größen $m_1 \frac{h}{2\,\bar{u}}$ und $\mu \frac{h}{2\,\bar{u}}$ mit den Drehimpulskomponenten des äußeren Elektrons und des Atomrumpfes parallel der Feldrichtung bei starken Feldern zu identifizieren seien. Die Komponente des Gesamtdrehimpulses in Feldrichtung war durch $m \frac{h}{2\,\bar{u}}$ gegeben. Den Übergang von schwachen zu starken Feldern deutete Pauli durch eine Entkoppelung der beiden Drehimpulskomponenten, die also in starken Feldern einzeln zu quanteln sind. Außerdem zog er den Schluß (13):

> «Weiter legt die Form $m_1 + 2\mu$ der Termwerte bei starken Feldern die Annahme nahe, daß das innere System ein doppelt so großes magnetisches Moment besitzt als es ihm gemäß dem Biot-Savartschen Gesetz auf Grund seines Impulsmomentes zukommen würde, während das äußere System magnetisch normal ist.»

Pauli hatte sich also keineswegs von allen modellmäßigen Betrachtungen befreit; sie schienen ihm nur nicht genügend gesichert, so daß er von einer Veröffentlichung vorerst absah. Landé machte jedoch wenig später von Paulis Idee Gebrauch (20, 21), und im Herbst 1923 publizierte Pauli seine Überlegungen auch selbst in einer weiteren Arbeit zum Zeemaneffekt, in der er mit Hilfe seines Modells die Frage der Zuordnung der Komplexstrukturterme in schwachen und starken Magnetfeldern behandelte (22). Er fand das neue Modell jedoch unbefriedigend, da es nicht die Klärung der nach Paulis Meinung wichtigsten Probleme erlaubte: das Auftreten der halben Quantenzahlen und das Versagen des Larmortheorems.

Es dauerte mehr als ein Jahr, ehe Pauli wieder etwas zum engeren Problemkreis des anomalen Zeemaneffektes veröffentlichte. Er hatte sich bewußt für einige Zeit von der Quantentheorie zurückgezogen, da er keine Aussicht auf die von ihm erhofften fundamentalen Fortschritte in der Theorie sah. Inzwischen befaßte er sich – allerdings erfolglos – mit der Wärmeleitung fester Körper. Im

Herbst 1924 – als er an einem längeren Artikel über die Quantentheorie für das renommierte Müller-Pouilletsche Lehrbuch der Physik schrieb – begann er, sich wieder intensiv mit dem alten Problem zu befassen (23). Am 10. November 1924 schrieb er an Landé von «einer komischen, den Zeemaneffekt betreffenden Überlegung» (24). Pauli ging davon aus, daß nach dem von ihm bisher akzeptierten Modell die Komplexstruktur und der anomale Zeemaneffekt der Alkalien durch einen nichtverschwindenden Drehimpuls der Elektronen der K-Schale und durch eine magnetomechanische Anomalie (Versagen des Larmortheorems) derselben Schale verursacht wird. Nun hatte er gefunden, daß bereits durch eine klassische Rechnung infolge der relativistischen Massenabhängigkeit der Elektronen der K-Schale bei Alkalien mit höherer Quantenzahl eine beträchtliche Abweichung vom Larmortheorem verursacht wird. Das relativistische Korrektionsglied würde bei höheren Ordnungszahlen so groß, daß man schon auf diese Weise eine dem anomalen Zeemaneffekt ähnliche Aufspaltung erhalten würde. Dies hätte andere Werte des anomalen Zeemaneffektes als die gewöhnlich beobachteten und eine Abhängigkeit von der Ordnungszahl zur Folge. Pauli glaubte jedoch nicht an die Existenz solcher Abweichungen. Die Messungen von Landé und Ernst Back bestätigten seine Annahme. Da sich auch einige andere Argumente gegen das bisher verwendete mechanische Modell finden ließen, kam Pauli zu dem Schluß (25):

> «Bei den Alkalien macht das Leuchtelektron Komplexstruktur wie anomalen Zeemaneffekt allein. Von einer Mitwirkung des Edelgas-Atomrestes ist (auch bei den anderen Elementen) keine Rede. Das Leuchtelektron bringt es auf eine rätselhafte, unmechanische Weise fertig, in zwei Zuständen (mit dem gleichen k) mit verschiedenen Impulsen zu laufen.»

Dieselbe Zweideutigkeit des Leuchtelektrons, die die Dublettstruktur der Alkalien verursachte, sollte auch für die Anomalie des Zeemaneffektes verantwortlich sein (23). Die ziemlich präzisen Aussagen schwächte Pauli in der Publikation, die er unmittelbar nach Landés experimenteller Bestätigung seiner Vermutungen veröffentlichte, etwas ab (26):

> «Die abgeschlossenen Elektronenkonfigurationen sollen nichts zum magnetischen Moment und zum Impulsmoment des Atoms beitragen. Insbesondere werden bei den Alkalien die Impulswerte des Atoms und seine Energieänderungen in einem äußeren Magnetfeld im wesentlichen als eine alleinige Wirkung des Leuchtelektrons angesehen, das auch als Sitz der magnetomechanischen Anomalie betrachtet wird. Die Dublettstruktur der Alkalispektren, sowie die Durchbrechung des Larmortheorems kommt gemäß diesem Standpunkt durch

eine eigentümliche, klassisch nicht beschreibbare Art von Zweideutigkeit der quantentheoretischen Eigenschaften des Leuchtelektrons zustande.»

Mit dieser «Zweideutigkeit» war das Konzept geboren, das schließlich zum Begriff des Spins der Elektronen führte.

Wie nahe Pauli selbst dem Spin war, zeigt eine Zusammenstellung der von ihm gewonnenen Ergebnisse:

1. Er benutzte auch in der neuen Arbeit die Zerlegung der Drehimpulskomponente des Atoms in Feldrichtung in zwei Bestandteile, die ursprünglich dem Leuchtelektron und dem Atomrumpf zugeschrieben wurden, nämlich
$$m = m_k + m_r$$
$$(m_k = m_1,\ m_r = \mu).$$
2. Er gelangte zu dem Schluß, daß die K-Schale nicht zum Drehimpuls beitrug; mithin konnte also m_r nicht dem Atomrumpf zugeschrieben werden.
3. Schließlich hatte er festgestellt, daß das Leuchtelektron bei gleicher Quantenzahl k sich in zwei Zuständen mit verschiedenem Drehimpuls befinden konnte.

Der Grund, warum Pauli zu diesem Zeitpunkt nicht selbst den Schritt zum Spin-Konzept vollzog, lag darin, daß er prinzipiell allen Modellvorstellungen, auf die er noch kurz vorher seine Hoffnungen gesetzt hatte, mißtraute. An Arnold Sommerfeld schrieb er darüber (27):

«Die Modellvorstellungen befinden sich ja jetzt in einer schweren, prinzipiellen Krise, von der ich glaube, daß sie schließlich mit einer weiteren radikalen Verschärfung des Gegensatzes zwischen klassischer und Quanten-Theorie enden wird.

... Man hat jetzt stark den Eindruck bei allen Modellen, wir sprechen da eine Sprache, die der Einfachheit und Schönheit der Quantenwelt nicht genügend adäquat ist.»

Pauli war davon überzeugt, daß nur eine durchgreifende Änderung der Grundbegriffe zu einem Fortschritt führen könnte, «daß nicht nur der dynamische Kraftbegriff, sondern auch der kinematische Bewegungsbegriff der klassischen Theorie tiefgehende Modifikationen wird erfahren müssen» (23). Und er fährt fort (23):

«Wir dürfen aber nicht die Atome in die Fesseln unserer Vorurteile schlagen wollen (zu denen nach meiner Meinung auch die Annahme der Existenz von Elektronenbahnen im Sinne der gewöhnlichen Kinematik gehört), sondern wir müssen umgekehrt unsere Begriffe der Erfahrung anpassen.»

In dem Brief an Alfred Landé vom 24. November 1924, in dem Pauli zum ersten Male von der «Zweideutigkeit» des Leuchtelektrons schrieb, formulierte er auch zum erstenmal das Gesetz, das seine größte Einzelleistung in der Physik darstellt: das Pauli-Prinzip. Von der Erkenntnis ausgehend, daß das Leuchtelektron bei den Alkalien für die Komplexstruktur und den anomalen Zeemaneffekt verantwortlich ist, ordnete er jedem Elektron zusätzlich zur Hauptquantenzahl n die beiden Nebenquantenzahlen k_1 und k_2 zu. k_1 stimmte mit der üblichen Quantenzahl k überein; k_2 hing mit der Gesamtdrehimpulsquantenzahl zusammen: $j = k_2 - \frac{1}{2}$. In moderner Bezeichnungsweise lauten diese Quantenzahlen:

$$n = n,\ k_1 = l + 1,\ k_2 = j + \frac{1}{2},\ m_1 = m_j\ (= m_l + m_s) \quad (28).$$

Für den Fall starker Magnetfelder ersetzte er die Quantenzahl k_2 durch eine magnetische Quantenzahl m_2, die die Komponente des magnetischen Moments des Leuchtelektrons in Feldrichtung kennzeichnet; für sie gilt:

$$m_2 = m_1 \pm \frac{1}{2}\ (= m_l + 2m_s = m_j + m_s) \quad (28).$$

Pauli konnte so auch im Fall starker Felder einem Elektron einen Satz von vier Quantenzahlen zuordnen:

$$n, k_1, m_1, m_2 .$$

Auf dem Boden dieser Klassifikation formulierte Pauli dann das Ausschließungsprinzip. Bevor er seine Resultate publizierte, suchte Pauli Anfang Januar 1925 Ernst Back und Alfred Landé in Tübingen auf, um an ihrem spektroskopischen Material seine Überlegungen zu prüfen. Da die experimentellen Befunde, insbesondere am Zeemaneffekt des Bleispektrums, seine Aussagen über den Aufbau der Elektronenschalen im Atom bestätigten, veröffentlichte Pauli wenige Tage später seine berühmt gewordene Arbeit mit dem Ausschließungsprinzip und dessen triumphaler Anwendung auf das Periodensystem der Elemente (29). In der Paulischen Originalfassung lautete das Prinzip (29):

> «Es kann niemals zwei oder mehrere äquivalente Elektronen im Atom geben, für welche in starken Feldern die Werte aller Quantenzahlen n, k_1, k_2, m_1 (oder, was dasselbe ist, n, k_1, m_1, m_2) übereinstimmen. Ist ein Elektron im Atom vorhanden, für das diese Quantenzahlen (im äußeren Feld) bestimmte Werte haben, so ist dieser Zustand 'besetzt'.»

Im Zusammenhang mit der Klassifikation der Elektronen stellte Pauli fest (29):

> «Offenbar hängt das Auftreten von halben (effektiven) Quantenzahlen und der durch dasselbe formal bedingte Wert $g = 2$ des Aufspaltungsfaktors beim

s-Term der Alkalien aufs engste mit der Zweifachheit der Termniveaus zusammen.»

Er verzichtete aber an dieser Stelle ausdrücklich auf eine nähere Analyse dieses Zusammenhanges. Pauli hatte sich jeder Deutung des neuen, vierten Freiheitsgrades der Elektronen enthalten, was es für viele Zeitgenossen schwierig machte, seine Überlegungen zu verstehen (7). Den Experten aber machte Paulis Entdeckung großen Eindruck. Paul Ehrenfest und Arnold Sommerfeld äußerten sich enthusiastisch, und Niels Bohr war «begeistert von den vielen neuen Schönheiten» (30, 31, 32). Heisenberg verspottete Pauli freundschaftlich, daß er «den Schwindel auf eine bisher ungeahnte, schwindelhafte Höhe» treibe, wenn er «*einzelne* Elektronen mit *4* Freiheitsgraden» einführe (33).

Der erste, der durch Paulis Entdeckung dazu angeregt wurde, dem vierten Freiheitsgrad des Elektrons eine anschauliche Bedeutung zu geben, war der junge Physiker Ralph Kronig. Er hatte bei Alfred Landé Paulis Brief vom 24. November 1924 gelesen (4). Kronig interpretierte nun den vierten Freiheitsgrad als Drehung des Elektrons um eine eigene Achse und schrieb dem Elektron einen damit verbundenen Eigendrehimpuls zu. Als Pauli Anfang Januar 1925 in Tübingen weilte, berichtete Kronig ihm von seiner neuen Idee und ihrer Anwendung auf das Problem der Dublettstruktur der Spektrallinien. Kronig schilderte später, wie Pauli seinen Gedanken mit der Bemerkung «Das ist ja ein ganz witziger Einfall» kommentierte, aber nicht glaubte, daß er irgendwie der Realität entspräche (34). Es ist sicher, daß eine derartige modellmäßige Deutung Paulis Überzeugungen und seinen Vorstellungen von der weiteren Entwicklung der Quantentheorie zutiefst widersprach. Er hoffte auf grundlegende neue Ideen (35):

«Mich selbst interessieren die Multipletts und der anomale Zeemaneffekt momentan überhaupt nicht mehr. Wenn nicht jemand eine wirklich physikalische Idee hat, wird man da kaum weiter kommen.»

Pauli war zu diesem Zeitpunkt auf Grund seiner eigenen Erkenntnisse und durch Kronigs Vorschlag mit der Möglichkeit des Spin-Konzepts konfrontiert worden, hatte sich aber offenbar bewußt dagegen entschieden. Kronig unterließ daraufhin eine Veröffentlichung seiner Idee (36).

Unabhängig von Kronig hatten etwa zehn Monate später – die Quantenmechanik war inzwischen im Entstehen begriffen – George E. Uhlenbeck und Samuel Goudsmit dieselbe Idee, an Paulis Arbeit zum Ausschließungsprinzip anknüpfend, den vier das Elektron charakterisierenden Quantenzahlen vier Freiheitsgrade mit anschaulicher Deutung zuzuordnen (38). Goudsmit hatte im Sommer 1925 zeigen können, daß sich die Anwendung des Pauli-Prinzips mit den

ursprünglichen Paulischen Quantenzahlen m_l und m_s (in moderner Schreibweise) erheblich vereinfachte (39). Da Pauli sich nicht an eine bestimmte Modellvorstellung gebunden hatte und m_s die Werte $\pm \frac{1}{2}$ annehmen konnte, ordneten sie dem vierten Freiheitsgrad eine Eigenrotation des Elektrons zu. Damit ließen sich dann der anomale Zeemaneffekt und die Dublettstruktur der Spektren erklären (40). Uhlenbeck und Goudsmit veröffentlichten ihre Überlegungen im Herbst 1925 (41,42).

Pauli hat später angenommen, daß über die Arbeit zum Ausschließungsprinzip hinaus Uhlenbeck und Goudsmit bei ihrer Hypothese durch seine Ideen beeinflußt worden seien. In seiner Nobelpreis-Rede bemerkte er (43):

> "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."

Im Sommer 1924 hatte Pauli in einer kleinen Arbeit versucht, die Entstehung der als Satelliten bezeichneten Hyperfeinstrukturen der Spektrallinien durch den zusammengesetzten Bau der Atomkerne und der damit verbundenen Abweichung des Kernfeldes vom Coulomb-Feld zu erklären (44). Über den Kern machte er die bemerkenswerte Annahme (45):

> «Wir wollen überdies (als einzige hier eingeführte besondere Annahme über den Kernbau) voraussetzen, daß der Kern (von etwaigen speziellen Ausnahmefällen abgesehen) ein nichtverschwindendes resultierendes Impulsmoment besitzt.»

Elektronenhülle und Kern sollten sich dann infolge der Wechselwirkung gegeneinander in gequantelten Orientierungen einstellen, wodurch sich die Hyperfeinstruktur energetisch erklären ließ. Pauli sprach dann die zukunftsweisende Vermutung aus, daß sich mit Hilfe der Hyperfeinstrukturen auf rein spektroskopischem Wege Aussagen über den Kern machen lassen müßten. Die Hyperfeinstruktur-Untersuchungen wurden in der Tat bald zu einer wesentlichen Informationsquelle über den Kernbau. Mit seiner Annahme eines nichtverschwindenden Drehimpulses hatte Pauli für zusammengesetzte Kerne die – später so benannte – Hypothese des Kernspins formuliert.

Goudsmit hat auseinandergesetzt, daß Paulis Idee keinen Einfluß auf seine und Uhlenbecks Überlegungen gehabt haben könnte, da er erst 1930 von Paulis Arbeit erfahren habe und diese überhaupt unter den Physikern nicht sehr be-

kannt gewesen sei (3). Pauli hatte seine Hypothese aber in seinem vielgelesenen Artikel über die Quantentheorie im Handbuch der Physik wiederholt, das 1926 erschien (46). Ernst Back, mit dem Goudsmit eng zusammenarbeitete, bemerkte in dem Kapitel «Der Zeemaneffekt» in Müller-Pouillets Lehrbuch der Physik – der Band erschien 1929, war jedoch mit Sicherheit wesentlich früher geschrieben –, daß Goudsmit bei seinen Überlegungen zur Analyse der Hyperfeinstrukturen aus dem Jahre 1928 auf Paulis Hypothese aufgebaut hätte (47). Doch auf die Entstehung der Hypothese des Elektronenspins hat Paulis Arbeit keinen Einfluß gehabt (48).

Einen Tag nach dem Erscheinen der Arbeit von Uhlenbeck und Goudsmit fragte Werner Heisenberg bei Pauli an, was er «als Meister der Kritik» darüber dächte (49). Heisenberg war «von vornherein nicht feindlich gegen die G[oudsmit]sche Theorie» eingestellt; allerdings schien sich aus ihr eine Dublettaufspaltung zu ergeben, die von der Sommerfeldschen relativistischen Formel um einen Faktor 2 abwich. Auf Paulis Rückfrage stellte Heisenberg noch einmal ausführlicher dar, wie er unter Annahme einer rein magnetischen Wechselwirkung zwischen Spin und Bahn zu einer Energieaufspaltung ΔE gelangte, die gerade das Doppelte der aus der relativistischen Feinstrukturformel folgenden Aufspaltung betrug (50):

$$\Delta E = 2 \cdot h \cdot \Delta \nu_{rel}.$$

Heisenberg führte verschiedene «große Bedenken» gegen die Spinhypothese an, unter anderen, daß auch der Kern Impulse haben müßte oder könnte, daß es einfacher sei, wenn das Elektron nur Ladung und Masse, aber keinen Impuls hätte, und daß die Vorstellung einer Struktur des Elektrons «greulich» sei. Heisenberg entschloß sich jedoch, das Spin-Modell mit der neuen Matrizenmechanik zu behandeln.

Im Dezember 1925 traf Pauli in Hamburg und kurz darauf noch einmal in Berlin mit Niels Bohr zusammen (51,52). Bohr war in Leiden durch Einstein, Uhlenbeck und Goudsmit vom Spin-Konzept überzeugt worden (53); es gelang ihm aber nicht, seine Überzeugung auch auf Pauli zu übertragen (54). Immerhin beeinflußte er Pauli und Heisenberg in der Richtung, daß nur eine quantenmechanische Behandlung die Klärung des Problems liefern könne und daß ihre bisherigen Einwände wohl zunächst keine ausschlaggebende Bedeutung hätten (55).

Inwieweit Paulis Bedenken mit denen Heisenbergs übereinstimmten, läßt sich für diesen Zeitpunkt nicht mehr feststellen, da Paulis Antwortbriefe an Heisenberg nicht erhalten sind. In einem Brief an Bohr schilderte er seine Einstellung (52):

«So weit sind wir ja ganz einig über das neue 'Evangelium', daß die Quantenmechanik das Urteil über es zu sprechen haben wird. Ich bin nach neuerlicher Überlegung doch wieder sehr skeptisch und glaube eher, daß Goudsmit auf einem falschen Weg ist. Denn erstens ist es (trotz aller Ihrer Beschwichtigungsversuche) sehr bedenklich, daß man nicht wenigstens im Grenzfall großer k ohneweiteres das Auftreten von Abschirmungsdubletts einsehen kann. Und zweitens macht es bei näherem Zusehen Schwierigkeiten, zu verstehen, warum ein Elektron mit dem Drehimpuls $\frac{1}{2}\frac{h}{2\bar{u}}$ nicht eine viel größere Energie (Masse) besitzt als die tatsächlich festgestellte. Wenn ich auch zugebe, daß etwas Endgültiges erst auf Grund eingehender quantenmechanischer Rechnungen wird ausgesagt werden können und daß momentan gar kein anderer naturgemäßer Weg zu sehen ist, um das Versagen des Larmor-Theorems und die Zweideutigkeit zu begreifen, so kann ich vorläufig über Goudsmits Idee doch nur kopfschüttelnd sagen: 'Die Sache gefällt mir nicht!'»

Heisenberg hatte sogleich mit der quantenmechanischen Behandlung des Problems begonnen (56). Die Berechnung der dafür notwendigen Mittelwerte von $\frac{1}{r^2}$ und $\frac{1}{r^3}$ (r = Bahnradius) bereitete aber zunächst Schwierigkeiten. Er verständigte sich mit Pauli, der ebenfalls das Problem in Angriff genommen hatte, über den Fortgang der Rechnungen, und es gelang ihnen schließlich, die gesuchten Mittelwerte zu berechnen (57, 58, 59). Es ergab sich dann, daß der Energieabstand der Feinstrukturniveaus nach der Quantenmechanik durch die Summe eines relativistischen und eines magnetischen, durch den Spin bedingten Terms gegeben war:

$$E = E_R + E_M.$$

Die quantenmechanischen Rechnungen führten aber nun nach Paulis Meinung zu einer «großen Katastrophe» in bezug auf die Feinstruktur (59). Für punktförmige Elektronen, also solche ohne Eigendrehimpuls, würde lediglich der Term E_R auftreten, der die Beobachtungen nicht richtig wiedergeben konnte. Das führte zu der ersten Konsequenz (59):

«Ich möchte jetzt also beinahe zugeben, daß die Punktelektronen unrettbar sind. Es müßte dann also mit Goudsmit den Elektronen in Gestalt von Impuls und Magnetismus ein weiterer Freiheitsgrad zugesprochen werden.»

Aber auch für den Fall der Uhlenbeck-Goudsmitschen Hypothese ergab sich ein schwerwiegendes Problem (59):

«Die aus der Summe von E_R und E_M berechneten Energiewerte sind völlig falsch und unannehmbar.

... Es würde dies zu einem der Erfahrung völlig widersprechenden Bild der Feinstruktur der Balmerserien führen! Mit dem einfachen Goudsmitschen Modell kommt man also nicht durch.»

Pauli nahm an, daß man die Wechselwirkung der Elektronen untereinander und mit dem Kern nicht einfach mit magnetischen Dipolen darstellen kann. Er sah hier auch die Verbindung zu den tieferliegenden Problemen; er schrieb darüber an Bohr (59):

«Die Frage hängt wohl auch zusammen mit derjenigen nach der Vereinbarkeit der tatsächlichen kleinen Elektronenmasse mit einem Drehimpuls des Elektrons von der Größenordnung $\frac{h}{2\bar{u}}$, über die man nicht so einfach hinweggehen darf. Man muß also jetzt, glaube ich, näher über das Elektron nachdenken. Ich selbst habe dazu nicht den Mut, vielleicht haben ihn aber Sie oder Goudsmit.»

Bei dem Ergebnis ihrer Berechnung des Energieabstandes der Feinstrukturniveaus war Pauli aber eine Merkwürdigkeit aufgefallen (58,59):

«Als gänzlich unverständliche Kuriosität möchte ich nur noch anführen, daß bei Einsetzen der Ausdrücke ... für E_R und E_M die Summe $E_R + \frac{1}{2} E_M$ gerade genau die Werte hat, die man für die Energie des Atoms braucht!»

In diesem Fall galt dann die Sommerfeldsche Feinstrukturformel, an deren Gültigkeit Pauli unter allen Umständen festhalten wollte. Er war überzeugt, daß

«gleichgültig, ob man die Energie nun als relativistisch oder teilweise magnetisch oder sonstwie modellmäßig deutet, ... die [Sommerfeldsche] Formel für die Feinstrukturniveaus von 1916 quantitativ beibehalten werden muß» (60).

Ende Februar 1926 – Pauli arbeitete inzwischen an der Erweiterung des Matrizenformalismus auf nichtperiodische Größen und an der Berechnung der Intensitäten des Wasserstoffspektrums – änderte sich die Lage plötzlich durch die Arbeit des englischen Physikers Llewellyn H. Thomas in Kopenhagen, der neue Rechnungen zu dem noch offenen Problem durchgeführt hatte. Bohr, der weiter von der Richtigkeit «der neuen Irrlehre» – wie Pauli die Spinhypothese nannte – überzeugt geblieben war, teilte Pauli nun «die Überraschung für die gelehrten Relativitätstheoretiker» mit, «daß die ganze Frage des unglücklichen Faktors 2 wahrscheinlich ausschließlich auf einem Fehler in der Berechnung der relativen Bewegung des Elektrons und des Kerns beruht» (61,62). Thomas' Rechnung bezog sich auf die Spin-Bahn-Wechselwirkung und führte zu einer Korrektur des

Terms E_M um einen Faktor $\frac{1}{2}$, gerade so, wie Pauli es vorher gefordert hatte (63). Pauli zweifelte jedoch zunächst an der Stichhaltigkeit der Thomasschen Überlegungen; er hielt sie für zu formal und glaubte weiter, daß grundlegende Änderungen notwendig seien (64):

«Aber ich habe stark das Gefühl, daß mit formaler Gelehrsamkeit da gar nichts zu machen sein wird und daß, falls die Annahme des magnetischen Elektrons wirklich das Richtige trifft, eine eingehendere Untersuchung der Struktur des Elektrons und vor allem eine Theorie der Elektronenmasse (eventuell mit Berücksichtigung der Gravitationsfelder) notwendig sein wird. Einerseits habe ich nicht den Mut, eine solche Untersuchung in Angriff zu nehmen, andererseits halte ich das noch nicht für ein von vornherein hoffnungsloses Unternehmen.»

Bohr wies dann darauf hin, daß der anstehende Problemkomplex zwei Aspekte hätte, die sich einmal auf die grundsätzliche Frage nach der Konstitution und der Dynamik des Elektrons beziehen und zum anderen auf die einheitliche Erklärung der Feinstruktur und des anomalen Zeemaneffektes (65). Nur auf die letzte Frage sollte Thomas' Arbeit eine Antwort geben. Dieser Auffassung schloß sich Pauli an (62):

«Insbesondere teile ich vollkommen Ihre Meinung, daß die Sache zwei verschiedene Seiten hat, indem eine tiefliegendere und eine bescheidenere Aufgabe vorliegt. Zur ersten rechne ich: Theorie der Elektronenmasse, Grundlage für quantitative Berechnung des Abstandes von Singulett- und Triplettermen sowie des Heliumspektrums, physikalische Begründung für das Auftreten von äquivalenten Elektronen im Atom. Die bescheidenere Aufgabe ist der Nachweis, daß die Wasserstoff-Feinstruktur und der anomale Zeemaneffekt aus einheitlichen Annahmen über das Elektron erklärt werden können. Wie weit diese zweite Aufgabe unabhängig von der ersten lösbar ist, kann nur der Erfolg zeigen.»

Hier hatte Pauli nun einen pragmatischen Standpunkt eingenommen, von dem aus zunächst die Lösung der näherliegenden Probleme versucht wird, ohne daß die grundlegenden Fragen aus dem Auge verloren werden. Trotzdem hatte er seine Bedenken noch nicht aufgegeben. Seine – nunmehr aber schon mehr formalen – Einwände schrieb er noch einmal am 8. März 1926 nach Kopenhagen (66). Vier Tage später, nachdem er noch einige erläuternde Bemerkungen zu den Thomasschen Rechnungen erhalten hatte (67), lenkte Pauli schließlich ein (68):

«Jetzt bleibt mir nichts anderes übrig als vollständig zu kapitulieren.

... Es tut mir jetzt sehr leid, daß ich Ihnen durch meine Dummheit so viel Arbeit gemacht habe.

... Somit ist also der erste Programmpunkt des Goudsmitschen Elektrons, die Erklärung der Feinstruktur, über den wir noch in Berlin so eifrig diskutiert haben, zu dessen Gunsten entschieden. Dies spricht wohl sehr dafür, daß man da in der Tat auf dem richtigen Wege ist.»

Pauli hoffte, daß nun auch die anderen von ihm genannten Probleme bald eine Lösung fänden.

Die Thomassche Arbeit erschien im April 1926. Kurz darauf behandelte auch ein Mitarbeiter Paulis in Hamburg, der russische Physiker Jakow Iljitsch Frenkel, dasselbe Problem auf etwas andere Weise (69, 70). Das Spin-Konzept hatte sich damit in der Praxis bewährt, und Pauli gestand das mit rückhaltloser Offenheit ein. Aber noch im Mai 1926 schrieb er (71):

«Ich glaube nur schweren Herzens daran, weil die Schwierigkeiten, die dadurch für die Theorie der Struktur des Elektrons entstehen, sehr beträchtlich sind.»

In seinem Artikel über die Quantentheorie in Müller-Pouillets Lehrbuch der Physik, den er im Jahre 1924 verfaßt hatte, wies er in einem Nachtrag vor Erscheinen des Bandes 1929 auf diese Schwierigkeit hin (72):

«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.»

Pauli sah die Konsequenz seiner Anschauungen durch die Entwicklung bestätigt. Er betonte das selbst in seinem Nobel-Vortrag (7):

"On the other hand, my earlier doubts as well as the cautious expression 'classically non-describable two-valuedness' experienced a certain verification during later developments, since Bohr was able to show on the basis of wave mechanics that the electron spin cannot be measured by classically describable experiments (as, for instance, deflection of molecular beams in external fields) and must therefore be considered as an essentially quantum mechanical property of the electron."

Obwohl Pauli einer der letzten war, die das Spin-Konzept akzeptierten, war er derjenige, der schließlich den Spin in die Quantentheorie integrierte. 1927 führte er in seiner berühmten Arbeit «Zur Quantenmechanik des magnetischen Elek-

trons» den Spin mit Hilfe der Paulischen Spin-Matrizen in die nichtrelativistische Theorie der Schrödinger-Gleichung ein (74). Diese sogenannte Pauli-Gleichung bildete die Grundlage für die Diracsche relativistische Wellengleichung, als deren nichtrelativistischer Grenzfall sich die Pauli-Gleichung erwies. So war Pauli einen weiten Weg gegangen von seiner «klassisch nicht beschreibbaren Art von Zweideutigkeit der quantentheoretischen Eigenschaften des Leuchtelektrons» über die Anerkennung des Spin-Konzepts bis zu seiner letztendlichen Integration in die Quantentheorie.

Für zahlreiche wertvolle Hinweise möchte ich Herrn Priv.-Doz. Dr. Ivo Schneider, München, für die freundliche Erlaubnis zum Abdruck der zitierten Briefstellen Frau Franca Pauli, Zollikon, meinen besten Dank sagen.

Anmerkungen

1) Die Geschichte des Spin-Konzepts wird in einigen Aufsätzen behandelt, in denen teils persönliche Erinnerungen dargestellt (2, 3, 5), teils auch Paulis Haltung zu diesem Problem analysiert wird (5). Pauli hat selbst später aus Anlaß der Verleihung des Nobelpreises dieses Thema berührt (6, 7). Die vorliegende Untersuchung knüpft an die Arbeit van der Waerdens an, mit der sie auch teilweise in der Fragestellung übereinstimmt (5).
   Die gedruckten Arbeiten Paulis finden sich alle in: R. Kronig, V. F. Weisskopf (Hrsg.), *Collected Scientific Papers*, 2 Bde., New York u. a. 1964.
2) Samuel A. Goudsmit, Die Entdeckung des Elektronenspins. In: *Physikalische Blätter 21* (1965) 445–453.
3) Ders., Pauli and Nuclear Spin. In: *Physics Today 14* (1961) 18–21 (Juni).
4) Ralph Kronig, The Turning Point. In: M. Fierz, V. F. Weisskopf (Hrsg.), *Theoretical Physics in the Twentieth Century*, New York 1960, S. 5–39.
5) Barthel L. van der Waerden, Exclusion Principle and Spin. In: *Ebd.*, S. 199 bis 244.
6) Wolfgang Pauli, Remarks on the History of the Exclusion Principle. In: *Science 103* (1946) 213–215.
7) Ders., Exclusion Principle and Quantum Mechanics. In: *Les Prix Nobel en 1946*, Stockholm 1948, S. 131–147.
8) Diese Briefe sind in einer in Vorbereitung befindlichen Edition des wissenschaftlichen Briefwechsels Wolfgang Paulis (Hrsg. A. Hermann und V. F. Weisskopf, Band I: 1919–1930, Bearbeitung S. Richter und K. von Meyenn) enthalten. Die Abkürzungen SHQP und BSC beziehen sich auf die *Sources for History of Quantum Physics* und die *Bohr Scientific Collection* in Kopenhagen (MF = Mikrofilm).
9) Vergleiche dazu: Paul Forman, Alfred Landé and the Anomalous Zeeman Effect, 1919–1921. In: *Historical Studies in the Physical Sciences 2* (1970) 153–261.

10) Brief Bohrs an Landé vom 3.3.1923. BSC, MF 13, auch SHQP, MF 4.
11) Manuskripte dieser Notiz ließen sich nicht auffinden. Daher sind Rückschlüsse auf die verwendeten Methoden und die Art der Zweifel nicht möglich.
12) Wolfgang Pauli, Über die Gesetzmäßigkeiten des anomalen Zeemaneffektes. In: *Zeitschrift für Physik 16* (1923) 155–164 (Eingeg. 26. April 1923).
13) Brief Paulis an Sommerfeld vom 19.7.1923.
14) Paul Ehrenfest, Address on Award of Lorentz Medal to Professor Pauli. In: Ders., *Collected Scientific Papers*, Amsterdam 1959, S. 618–622.
15) Brief Paulis an Sommerfeld vom 6.6.1923.
16) Brief Paulis an Landé vom 10.3.1923.
17) Brief Paulis an Landé vom 23.5.1923.
18) Die von Pauli verwendeten Quantenzahlen entsprechen der magnetischen Quantenzahl M und der Quantenzahl des Gesamtdrehimpulses J.
19) Entsprechend gilt dabei:
$m_1 = 0_1 \pm 1, \ldots, \pm (k-1)$,
$\mu = \begin{cases} \pm \frac{1}{2} & \text{Dubletts,} \\ 0_1 \pm 1 & \text{Tripletts.} \end{cases}$
Die Quantenzahl k hängt mit der Nebenquantenzahl L durch die Beziehung $L = k - 1$ zusammen. Vergleiche auch (18)!
20) Brief Paulis an Landé vom 26.7.1923.
21) Alfred Landé, Termstruktur und Zeemaneffekt der Multipletts. Zweite Mitteilung. In: *Zeitschrift für Physik 19* (1923) 112–123 (Eingeg. 16. Aug. 1923). Hier: S. 116, 119/120.
22) Wolfgang Pauli, Zur Frage der Zuordnung der Komplexstruktur in starken und schwachen äußeren Feldern. In: *Zeitschrift für Physik 20* (1924) 371–387 (Eingeg. 20. Okt. 1923).
23) Brief Paulis an Bohr vom 12.12.1924.
24) Brief Paulis an Landé vom 10.11.1924.
25) Brief Paulis an Landé vom 24.11.1924.
26) Wolfgang Pauli, Über den Einfluß der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Elektronenmasse auf den Zeemaneffekt. In: *Zeitschrift für Physik 31* (1925) 373–385 (Eingeg. 2. Dez. 1924).
27) Brief Paulis an Sommerfeld vom 6.12.1924.
28) Diese Quantenzahl m_1 entspricht der oben verwendeten Quantenzahl m.
29) Wolfgang Pauli, Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppen im Atom mit der Komplexstruktur der Spektren. In: *Zeitschrift für Physik 31* (1925) 765–783 (Eingeg. 16. Jan. 1925).
30) Brief Ehrenfests an Landé vom 7.12.1924. SHQP, MF 4.
31) Brief Sommerfelds an Pauli vom 18.6.1925.
32) Brief Bohrs an Pauli vom 22.12.1924 (Original dänisch).
33) Postkarte Heisenbergs an Pauli vom 15.12.1924.
34) Siehe 4)! Hier: S. 5, 18–21.
Siehe 5)! Hier: S. 209–216. Vergleiche auch: Brief Kronigs an Kramers vom 6.3.1926. SHQP, MF 8.

35) Brief Paulis an Kronig vom 21.5.1925.

36) Der englische Physiker Llewellyn H.Thomas, mit dem Pauli später eine wissenschaftliche Kontroverse auszutragen hatte (siehe unten!), kommentierte dieses Ereignis in einem Brief an Goudsmit (37):
«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. Es scheint, daß Kronig vor mehr als einem Jahr an das rotierende Elektron glaubte und etwas ausgearbeitet hatte. Die erste Person, der er es zeigte, war Pauli. Pauli verspottete die ganze Angelegenheit so weit, daß die erste Person auch die letzte war und niemand sonst etwas davon hörte. All das zeigt, daß die Unfehlbarkeit des göttlichen Wesens sich nicht auf seinen selbsternannten Stellvertreter auf Erden erstreckt.»

37) Siehe 2)! Hier: S. 452. Vergleiche auch das englische Original: Brief Thomas' an Goudsmit vom 25.3.1926. SHQP, MF 60.

38) Über frühere Versuche, dem Elektron eine Eigenrotation zuzuordnen, vergleiche: Max Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, New York u.a. 1966. Hier das Kapitel: Exclusion Principle and Spin, S.133 bis 156. Besonders: S. 148.

39) Samuel Goudsmit, Über die Komplexstruktur der Spektren. In: *Zeitschrift für Physik 32* (1925) 794–798 (Eingeg. 7.Mai 1925).

40) Zum Problem der Dublett-Struktur und seiner Bedeutung für die Entwicklung der Atomphysik vergleiche: Paul Forman, The Doublet Riddle and Atomic Physics circa 1924. In: *Isis 59* (1968) 156–174.

41) George E. Uhlenbeck, Samuel Goudsmit, Ersetzung der Hypothese vom unmechanischen Zwang durch eine Forderung bezüglich des inneren Verhaltens jedes einzelnen Elektrons. In: *Naturwissenschaften 13* (1925) 953 f. (17.Okt. 1925, ausgeg. 20.Nov. 1925).

42) Dieselben, Spinning Electrons and the Structure of Spectra. In: *Nature 117* (1926) 264 f. (Dez. 1925, ausgeg. 20.Febr. 1926).

43) Siehe 7)! Hier: S.137 f.

44) Wolfgang Pauli, Zur Frage der theoretischen Deutung der Satelliten einiger Spektrallinien und ihrer Beeinflussung durch magnetische Felder. In: *Naturwissenschaften 12* (1924) 741–743 (17.Aug. 1924, ausgeg. 12.Sept. 1924).

45) Siehe 44)! Hier: S. 742.

46) Wolfgang Pauli, Quantentheorie. In: *Handbuch der Physik*, Bd. 23, Berlin 1926, S. 1–278. Hier: S. 277.

47) Ernst Back, Der Zeemaneffekt. In: *Müller-Pouillets Lehrbuch der Physik*, Bd. II/2.2, S. 1949–2024. Hier: S. 2021.

48) Aus einem Brief Goudsmits an Bohr aus dem Jahre 1929 könnte man schlußfolgern, daß Goudsmit erst zu diesem Zeitpunkt von Paulis Arbeit erfahren hatte: Brief Goudsmits an Bohr vom 25.5.1929. SHQP, MF 63.

49) Postkarte Heisenbergs an Pauli vom 24.11.1925.

50) Brief Heisenbergs an Pauli vom 24.11.1925.

51) Postkarte Bohrs an Pauli vom 5.12.1925.

52) Brief Paulis an Bohr vom 30.12.1925.
53) Siehe 5)! Hier: S. 214.
54) Brief Bohrs an Pauli vom 24.12.1925 (Original dänisch). Bohr formulierte das ironisch, indem er bedauerte, daß «es dem Propheten nicht geglückt ist, den endgültigen Beweis für das Magnetelektron-Evangelium durch Ihre Bekehrung zu führen.»
55) Brief Bohrs an Ehrenfest vom 22.12.1925. BSC, MF 10.
56) Brief Heisenbergs an Pauli vom 24.12.1925.
57) Briefe Heisenbergs an Pauli vom 7.1.1926, 14.1.1926, 27.1.1926.
58) Brief Paulis an Heisenberg vom 31.1.1926.
59) Brief Paulis an Bohr vom 5.2.1926.
60) Brief Paulis an Sommerfeld vom 9.2.1926.
61) Brief Bohrs an Pauli vom 20.2.1926.
62) Brief Paulis an Bohr vom 5.3.1926.
63) Llewellyn H. Thomas, The Motion of the Spinning Electron. In: *Nature 117* (1926) 514 (20. Febr. 1926, ausgeg. 10. April 1926).
64) Brief Paulis an Bohr vom 20.2.1926.
65) Brief Bohrs an Pauli vom 3.3.1926.
66) Brief Paulis an Kramers vom 8.3.1926.
67) Brief Bohrs an Pauli vom 9.3.1926.
68) Brief Paulis an Bohr vom 12.3.1926.
Vergleiche auch:
Brief Bohrs an Kronig vom 26.3.1926. SHQP, MF 16.
Postkarte Paulis an Goudsmit vom 13.3.1926.
69) Jakow I. Frenkel. In: *Nature 117* (1926) 653 f. (25. März 1926, ausgeg. 8. Mai 1926).
70) Ders., Die Elektrodynamik des rotierenden Elektrons. In: *Zeitschrift für Physik 37* (1926) 243–262 (Eingeg. 2. Mai 1926).
71) Brief Paulis an Wentzel vom 8.5.1926.
72) Wolfgang Pauli, Allgemeine Grundlagen der Quantentheorie des Atombaues. In: *Müller-Pouillets Lehrbuch der Physik,* Bd. II/2.2, S. 1709–1842. Hier: Fußnote 2) auf S. 1794 f.
Vergleiche auch 73)!
73) Charles P. Enz, W. Pauli's Scientific Work. In: J. Mehra (Hrsg.), *The Physicist's Conception of Nature,* Dordrecht 1973, S. 766–799.
74) Wolfgang Pauli, Zur Quantenmechanik des magnetischen Elektrons. In: *Zeitschrift für Physik 43* (1927) 601–623 (Eingeg. 3. Mai 1927).

Summary

Wolfgang Pauli was one of the leading and most creative, but also most critical figures in the process of the development of Quantum Mechanics. His greatest achievement is well known: the discovery of the Pauli Exclusion Principle and its successful application to the Periodic System of the Elements, which resulted from his work on the analysis of the Anomalous Zeemaneffect. Less known, even though it has been discussed by several authors, is Pauli's role in the development of the concept of the electron spin. Though it was based on his ideas, Pauli refused to accept Uhlenbeck's and Goudsmit's introduction of this concept into Quantum Physics, because it did not seem to be revolutionary enough to him. The analysis of Pauli's correspondence sheds new light on this unusual process and Pauli's final acceptance of the new model.

Dr. Steffen Richter
Präsidialamt
Technische Hochschule Darmstadt
Karolinenplatz 5
D-6100 Darmstadt