

Sources  
in the History of Mathematics and  
Physical Sciences

18

Editor: G. J. Toomer



WOLFGANG PAULI im Herbst 1957



WOLFGANG PAULI  
Verleihung des Ehrendoktors in Hamburg  
am 21. November 1958

# WOLFGANG PAULI

Wissenschaftlicher Briefwechsel mit  
Bohr, Einstein, Heisenberg u.a.  
Band IV, Teil IV, A: 1957

Scientific Correspondence with  
Bohr, Einstein, Heisenberg, a.o.  
Volume IV, Part IV, A: 1957

*Herausgegeben von / Edited by*

Karl von Meyenn

 Springer

Professor Dr. Karl von Meyenn  
Abteilung Theoretische Physik  
Universität Ulm  
Albert-Einstein-Allee 11  
89069 Ulm

Herausgegeben mit Unterstützung  
der Deutschen Forschungsgemeinschaft,  
des Schweizerischen Nationalfonds  
und der ETH Zürich

Gedruckt mit Unterstützung  
der Deutschen Forschungsgemeinschaft

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek.  
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie;  
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

ISSN 0172-6315  
ISBN 3-540-40296-9 Springer Berlin Heidelberg New York

This work is subject to copyright. All rights are reserved, whether the whole or part of the material is concerned, specifically the rights of translation, reprinting, reuse of illustrations, recitation, broadcasting, reproduction on microfilm or in any other way, and storage in data banks. Duplication of this publication or parts thereof is permitted only under the provisions of the German Copyright Law of September 9, 1965, in its current version, and permission for use must always be obtained from Springer. Violations are liable for prosecution under the German Copyright Law.

Springer is a part of Springer Science+Business Media  
[springeronline.com](http://springeronline.com)

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005  
Printed in Germany

The use of general descriptive names, registered names, trademarks, etc. in this publication does not imply, even in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protective laws and regulations and therefore free for general use.

Typesetting: Data conversion by Kurt Mattes, Heidelberg  
Cover production: *design & production* GmbH, Heidelberg  
Printed on acid-free paper SPIN 10769606 55/3141/ba – 5 4 3 2 1 0

# Inhaltsverzeichnis

## Teil A

Einleitung: Die Anfänge der modernen Physik im Spiegel des Paulischen Briefwechsels . . . . .	VII
I. Das Jahr 1957	
Paritätsverletzung und schwache Wechselwirkung . . . . .	1

## Teil B

II. Das Jahr 1958	
Letzte Zusammenarbeit mit Heisenberg. Die Spinortheorie der Elementarteilchen und die Genfer Hochenergiekonferenz . . . . .	769
III. Anhang	
1. Editorisches Nachwort . . . . .	1373
2. Zeittafel 1957–1958 . . . . .	1381
3. Literaturverzeichnis . . . . .	1385
a. Allgemeine Literatur . . . . .	1385
b. Schriften von W. Pauli aus den Jahren 1957–1959 . . . . .	1477
4. Verzeichnis der Korrespondenten . . . . .	1480
5. Briefverzeichnisse . . . . .	1483
a. Chronologisches Verzeichnis: 1957–1958 . . . . .	1483
b. Alphabetisches Verzeichnis: 1957–1958 . . . . .	1499
6. Personenregister . . . . .	1519
7. Sachwortregister . . . . .	1539

# Die Anfänge der modernen Physik im Spiegel des Paulischen Briefwechsels\*

Karl von Meyenn

## Die Bedeutung der Briefe

Mit den hier vorliegenden Briefen aus Paulis beiden letzten Lebensjahren schließt sich auch ein großes Kapitel der Physikgeschichte, das mit der Entschlüsselung der Atomgesetze in den frühen zwanziger Jahren begann und mit den ersten Versuchen zur Formulierung einer Theorie der letzten Bausteine der Materie, den Elementarteilchen, Ende der fünfziger Jahre endete. Inmitten aller dieser Bestrebungen gehörten Paulis Briefe stets zu den anspornenden Kräften, welche bei den entscheidenden Fragen entweder die Ursache der angehäuften Schwierigkeiten aufdecken oder durch geeignete Begriffsbildungen den Weg zu neuen Fortschritten bereiten halfen. Seine Briefe dienten nicht nur als ein Kommunikationsmittel, sondern waren vielmehr auch Diskussionsforum für noch unfertige oder hypothetische Fragen, die für eine Veröffentlichung noch nicht die nötige Reife besaßen. Die Briefe sind deshalb ein wichtiges Medium des historischen Erkenntnisprozesses gewesen und ihre Lektüre kann uns aufschlußreiche Einblicke in den Entstehungsvorgang wissenschaftlicher Ideen und Begriffe gewähren.

Eine scharfe Trennung zwischen sicherer Erkenntnis, und unfertigem noch in der Schwebelage befindlichem Wissen, hatte einst der große Mathematikerfürst Carl Friedrich Gauß, von dem man sagte, er habe *früher rechnen als sprechen* gelernt, durch seinen Leitspruch *Pauca sed matura* (nur Weniges, aber Reifes) als Norm der exakten Naturforschung vorgegeben.<sup>1</sup> Auch Sommerfeld hat ihn seinen Schülern zu vermitteln versucht: Nur theoretisch und experimentell abgesicherte Erkenntnisse sollten zur Publikation gelangen; unabgeklärte und unfertige Forschungsergebnisse und der Weg, der zu ihnen führte, sollten dagegen nur dem persönlichen Gespräch, der öffentlichen Diskussion in Seminaren und nach Vorträgen oder auch den Briefen vorbehalten bleiben.

Diesem dem Geiste der modernen theoretischen Physik naturgemäßen Verfahren fühlte sich Pauli verpflichtet. Den Gegensatz dazu bildete sein lebenslanger wissenschaftlicher Partner Werner Heisenberg, der mit seinen unkonventionellen Ideen und phantasiereichen Vorschlägen viel eher bereit war, mit bereits als gefestigt geltenden Prinzipien zu brechen, wenn es unübersteigbar scheinende Hindernisse zu bewältigen galt. Doch gemeinsam bildeten die beiden so ver-

---

\* In eckige Klammern gesetzte Zahlenangaben im Text verweisen auf die entsprechenden Briefnummern dieser Edition.

<sup>1</sup> Vgl. hierzu Kurt-R. Biermann: *Carl Friedrich Gauß. Der „Fürst der Mathematiker“ in Briefen und Gesprächen*. Leipzig, Jena, Berlin 1990 oder Walter Kaufmann-Bühler: *Gauss. A biographical study*. Berlin, Heidelberg, New York 1981.

anlagten Physiker für die Aufgaben, welche die damalige Atomtheorie für sie bereithielt, eine ideale Einheit.<sup>2</sup> Als am Ende seiner wissenschaftlichen Laufbahn Pauli abermals den Eindruck hatte, daß die konventionelle Forschung in eine Sackgasse zu geraten drohte, formulierte er nochmals seine Auffassung über die geeignetste Forschungsstrategie [2997]: „Mathematische Virtuosität, Funktionentheorie (einer oder mehrerer komplexer Veränderlicher) etc. scheinen mir zwar gut bei der Herleitung von Folgerungen (Integration) aus logisch abgeschlossenen mathematischen Theorien. Wenn es sich jedoch darum handelt, neue Naturgesetze mit neuen Grundbegriffen zu finden, braucht es eine andere Art der Intuition und der Einfühlung. Ich glaube nicht, daß ein Forschertypus wie Lehmann, Wightman, Källén etc. dabei von großem Nutzen sein kann.“

Paulis Einfluß auf die Entwicklung der Physik läßt sich anhand seiner publizierten Schriften nur in sehr unvollkommener Weise ermessen. Sein ehemaliger Assistent Rudolf Peierls hat in seinem 1960 verfaßten Nachruf insbesondere auf die Rolle der Briefe hingewiesen und – als bekanntestes Beispiel – auf die Neutrinohypothese, „which was put forward in private discussions and in letters ...; but it would be impossible to list all the ideas, constructive or critical, by which he has influenced the work of pupils and colleagues in innumerable letters. Some of these letters are written in reply to requests for advice. Others were spontaneous and written either by way of comment on somebody else’s work or when he had arrived at some new thoughts to somebody who he knew would be interested to hear of them. All of his pupils and friends are familiar with these letters, invariably written by hand, invariably relating to problems of crucial importance at the time, pungent of criticism. In these letters, as well as in conversation, he would often discuss conjectures and intuitive judgements, which went far beyond anything he would regard as worthy of publication, but he would draw a clear distinction between knowledge and conjecture.“

Darüber hinaus hat Peierls auch auf den ungeheuren Einfluß hingewiesen, der von Pauli und seinen Briefen als letzter kritischer Instanz auf die Forschung ausgeübt wurde. „These letters supplemented the profound influence he exerted personally on his pupils and collaborators and on many others who came to him for advice. To discuss some unfinished work or some new and speculative ideas with Pauli was a great experience, because of the clarity of his understanding and of his high standard of intellectual honesty, which would never let a slipshod or superficial argument get by. At critical times in physics, when it was not clear whether some new ideas should be taken seriously, one tended naturally to ask ‚What does Pauli say about it?‘“

Um den Zugewinn an Erkenntnissen zu illustrieren, welchen die Briefe und anderen *nicht öffentlichen* Quellen für die historische Forschung bedeuten, wollen wir im folgenden einige Episoden aus Paulis Entwicklungsjahren und aus der frühen Geschichte der Quantentheorie darstellen, die in ihrem Höhepunkt zur Entdeckung des Ausschließungsprinzips und zur Formulierung einer rationalen Atommechanik geführt haben.

---

<sup>2</sup> Eine sehr treffende Darstellung seines komplementären Verhältnisses zu Heisenberg hat Pauli in einem Schreiben [54] an Bohr gegeben.



### Eine unschätzbare *Treibkraft der neueren theoretischen Forschung*

Als der mit Pauli befreundete Paul Ehrenfest seine Festansprache zur Verleihung der Lorentzmedaille am 31. Oktober 1931 durch die *Amsterdamer Akademie der Wissenschaften* vorbereitete, rühmte er nicht nur Paulis wissenschaftlichen Verdienste, sondern vor allem auch seine Geradlinigkeit und sein unbestechliches wissenschaftliches Urteil [271]: „Aber vielleicht noch von viel größerem Gewicht als diese Publikationen sind die unzähligen, unverfolgbaren Beiträge, die er zur Entwicklung der neueren Physik durch mündliche Diskussionen oder Briefe geliefert hat. Die enorme Schärfe seiner Kritik, seine außerordentliche Klarheit und vor allem die rücksichtslose Ehrlichkeit mit der er stets den Nachdruck auf die ungelösten Schwierigkeiten legt (ganz besonders, wenn es sich um seine eigenen Arbeiten handelt!), bewirkt, daß er als unschätzbare Treibkraft innerhalb der neueren theoretischen Forschung gelten muß.“

Wie aus dem Pauli gewidmeten Nachruf des sowjetischen Physiker Lev Davidovich *Landau* hervorgeht, trifft dieses Urteil über den noch jungen Pauli ebenso für seine späteren Jahre zu: „Pauli was always greatly interested in the basic problems of physics and had a clear grasp of them. Along with this he hated with all his heart every sort of scientific showiness, deeply despised those papers in which the absense of real content is concealed behind learned definitions and *rigorous* arguments, and ridiculed their authors with extraordinary venom, calling them *basic thinkers* and *new-foundation layers*.“

### *Das briefliche Publikationsverfahren*

Neben seinen Veröffentlichungen sind Paulis Beiträge also vor allem in diesen Briefen enthalten, die er ausgewählten Personen zusandte und die dann oft in wissenschaftlichen Kreisen die Runde machten. Als er im Oktober 1926 Heisenberg den „physikalischen Sinn des Bornschen Formalismus“ der Streutheorie erklärte, bedankte sich Heisenberg [144] „für Ihren langen Brief. Daß ich so spät antworte, kommt daher, daß Ihr Brief dauernd hier die Runde machte und Bohr, Dirac und Hund uns darum raufen.“ Das hier genannte Schreiben leitete einen Denkprozeß ein, der mit Heisenbergs Unschärferelation und Bohrs Komplementaritätsidee schließlich zur *Kopenhagener Interpretation* und damit zu einem vorläufigen Abschluß der Quantenmechanik führte.

Weiteres Beispiele für Paulis „briefliche Publikationsverfahren“ [53, 140] sind im Brief [46] und in dem am 24. November 1924 an Landé verschickten Schreiben [71] enthalten; in dem letzteren hatte Pauli ihm die Entdeckung seines *Ausschließungsprinzips* übermittelt. Als Pauli von Landés Absicht erfuhr, Ehrenfest in Leiden aufzusuchen, bat er ihn um mündliche Weitergabe seiner Mitteilungen: „Wenn Sie es Ehrenfest in Holland erzählen, soll es mich freuen.“ Offenbar hatte Landé das Schreiben mit nach Leiden genommen, denn am 7. Dezember sendete ihm Ehrenfest dasselbe „mit vielem Dank“ zurück: „Es war ein enormer Genuß für mich, ihn abermals durchzulesen,“ kommentierte er, „Pauli ist ein brillanter, artistischer Physiker.“ Paulis nächstes Schreiben an

Landé [75] zeigt, daß die Nachricht sich inzwischen rasch über Holland nach Kopenhagen ausgebreitet hatte: „Ihr Besuch in Holland hat bereits zur Folge gehabt, daß ich von Bohr einen Brief bekam, er hätte gehört, ich hätte was Neues (auf dem Wege: Landé → Coster → Kramers → Bohr) und möchte gerne wissen, was es sei.“

### Bekämpfung von *Irrlehren*

Aber Paulis Wirken bestand nicht nur in seinen positiven wissenschaftlichen Erkenntnissen, sondern auch in seinen Versuchen, die Verbreitung von *Irrlehren* [121, 124, 127] zu verhindern. Wir erinnern nur an die neue Strahlungstheorie von Bohr, Kramers und Slater mit ihrem Verzicht auf eine Energieerhaltung beim Einzelprozeß, die, wie Kronig am 5. Juni 1925 Goudsmit berichtete, Bohr „erst wieder nach vieler Diskussion und namentlich unter dem katalytischen Einfluß von Pauli“ aufzugeben bereit war. Heisenberg nannte Pauli einen „Meister der Kritik“ [107], dem er seine Manuskripte vorlegte, bevor er sie zur Veröffentlichung einreichte.

Im Jahre 1933 richtete Pauli auf Ehrenfests Wunsch hin sogar einen „Nachrichtendienst für Physiker der älteren Generation“ ein, der ihnen durch Versendung sog. „Abschlacht-Listen“ [295] das nutzlose Studium rein formaler und physikalisch inhaltsloser Abhandlungen ersparen sollte: „Der Leichenberg, hinter dem allerlei Gesindel Deckung sucht, hat einen Zuwachs erfahren,“ heißt es in einer dieser Nachrichten [313]. „Es wird gewarnt vor der Arbeit von Levi-Civita“ über Diracsche und Schrödingersche Gleichungen, die gerade in den Berliner Akademieberichten erschienen war. „Alle sollten abgehalten werden, diese Arbeit zu lesen oder gar zu versuchen, sie zu verstehen. Ferner gehören sämtliche auf S. 241 dieser Arbeit zitierten Arbeiten dem Leichenberg an.“<sup>3</sup>

Es gibt aber auch bekannte Beispiele, bei denen Pauli über das Ziel hinausschoß und wertvolle Ideen ablehnte oder sogar im Keime erstickt hat. Wir erinnern nur an seinen anfänglichen Widerstand gegen die Spinhypothese [118, 119, 122 und 125],<sup>4</sup> an seine wiederholten Angriffe auf Louis de Broglies Vorstellungen einer *Pilotwelle* [168, 1337, 1352, 1353 und 1368] oder an seine Ablehnung von Hermann Weyls *Zweikomponententheorie* [235]. Doch in den meisten Fällen handelte es sich um situationsbedingte Eingriffe, welche die augenblickliche Forschungsstrategie festlegen sollten und deshalb auch nicht von bleibender Bedeutung zu sein brauchten. Außerdem ist natürlich selbst ein Genie nicht vor Irrtümern sicher!

Oft wird in diesem Zusammenhang auch die Frage gestellt, ob es in einer wissenschaftlichen Darstellung der Leistungen großer Persönlichkeiten überhaupt erlaubt oder zweckmäßig sei, auf solche sich über den normalen Ton hinwegsetzende Formen des Umgangs mit anderen Personen einzugehen. Wilhelm Ostwald

<sup>3</sup> Unter den hier zitierten Abhandlungen befand sich allerdings auch Weyls Untersuchung „Elektron und Gravitation“, in welcher die später berühmt gewordene *Zweikomponententheorie* eingeführt wird!

<sup>4</sup> Eine eingehendere Untersuchung dieser Angelegenheit findet man bei von Meyenn (1988).

hat anlässlich einer Besprechung der häufig vorgenommenen „Reinigungen“ von Briefaufgaben hierzu ein klares Wort gesprochen: „Nachdem inzwischen wohl die allermeisten Menschen, von denen in jenen Briefen die Rede ist, gestorben sind, kommen Rücksichten persönlicher Art nicht mehr in Betracht, und gerade die Rücksichtslosigkeit, mit der sich die Freunde einander gegenüber geäußert haben, stellt einen unschätzbaren Wert dieser Äußerungen dar.“

### Die Geißel Gottes

Pauli scheute sich nicht, im Einklang mit dem ihm von Ehrenfest verliehenen Titel einer *Geißel Gottes* [125, 211], gelegentlich auch seine Kollegen und großen wissenschaftlichen Vorbildern anzugreifen und Kritik an ihnen zu üben. Selbst seine angesehensten Zeitgenossen reizte er – zuweilen auch in einer verletzenden Form – mit seinen spöttischen Kommentaren.<sup>5</sup> Doch stets ging es ihm dabei um die Sache und nicht um die Personen, die er stets achtete, sofern sie in ehrlicher Absicht handelten. Als sich Schrödinger einmal gekränkt fühlte, weil Pauli seine Deutung der  $\psi$ -Funktion als „Züricher Lokalaberglauben“ bezeichnet hatte, erklärte Pauli [148]: „Ich möchte Dich sehr bitten,“ die Bemerkung „nicht als persönliche Unfreundlichkeit Dir gegenüber, sondern als Ausdruck der sachlichen Überzeugung anzusehen, daß die Quantenphänomene in der Natur solche Seiten zeigen, die nicht mit den Begriffen der Kontinuumsphysik (Feldphysik) allein erfaßt werden können.“

Unbarmherzig rügte er einmal seinen ehemaligen Lehrer Sommerfeld, als dieser ihm die brieflich mitgeteilten Methoden zur Berechnung von Linienintensitäten [64] ohne Rücksprache einfach publizierte.<sup>6</sup> „Sollte ich einmal zu faul sein eine Sache selbst zu publizieren,“ schrieb er [70] im November 1926 seinem Lehrer voller Ironie, „oder dies aus irgendwelchen sachlichen Bedenken nicht gerne tun wollen, wollte ich es aber dennoch ganz gerne sehen, wenn die Sache allgemein bekannt wird, so werde ich sie Ihnen brieflich mitteilen.“

Pauli hatte im Sommer 1930 auch Born und dessen gemeinsam mit Jordan verfaßtes Buch *Elementare Quantenmechanik* mit beißender Kritik überzogen, weil die Behandlung der Wellenmechanik darin vertagt und so „Ziel und Sinn des  $n$ .ten Bandes durch die virtuelle Existenz eines  $(n + 1)$ .ten Bandes deutlich gemacht“ worden war.<sup>7</sup> Denn „viele Resultate der Quantentheorie (wie z. B. Richtungsverteilung der Photoelektronen, Intensität der kontinuierlichen Spektren, Comptoneffekt, Theorie der Metallelektronen sowie die Diracsche Theorie des Spinelektrons) können nämlich mit den ... elementaren Mitteln gar nicht,

<sup>5</sup> Pauli konnte gegenüber empfindsamen Personen auch rücksichtsvoll sein. Auf eine besondere Bitte von Ehrenfest hin pflegte er Uhlenbeck „besonders sanft“ zu behandeln [137].

<sup>6</sup> Aber auch andere Physiker scheuten sich nicht, Paulis briefliche Mitteilungen gelegentlich in ihren Publikationen mit aufzunehmen (siehe *briefliches Publikationsverfahren*).

<sup>7</sup> Borns als erster Band der Serie unter Mitwirkung seines Assistenten Friedrich Hund herausgegebene *Vorlesungen über Atommechanik* war bereits „etwas von oben herab“ scharf durch Sommerfeld kritisiert worden, wie Born am 15. Januar 1925 voller Ärger nach Kopenhagen meldete: „Es fängt gleich so an: ‚Ihr Buch ist, wie ich es erwartet habe, ziemlich Bohr-fromm.‘“

andere wiederum nur unbequem und mit indirekten Methoden abgeleitet werden. (Zu den letzteren gehört z. B. die Herleitung der Balmerterme, die matrizentheoretisch im Anschluß an eine frühere diesbezügliche Arbeit von Pauli durchgeführt wird. Man wird hier dem Referenten also nicht vorwerfen können, daß er die Trauben deshalb sauer findet, weil sie ihm zu hoch hängen.)“

Born beklagte sich daraufhin bei Sommerfeld über „die Böartigkeit des Angriffs“ und suchte Paulis „nicht sehr erfreuliches“ Verhalten in einem an Sommerfeld gerichteten Schreiben vom 1. Oktober 1930 auf seine Weise zu begründen: „Als ich im Jahre 1925 die Darstellung der Heisenbergschen Ideen durch Matrizen und die Vertauschungsregel (heute meist Heisenbergsche genannt) gefunden hatte, suchte ich einen Mitarbeiter, da Heisenberg für längere Zeit unerreichbar war, und fragte Pauli bei einer Gautagung, ob er mitmachen wollte. Dabei hat er mich in seiner bekannten schnöden Weise beschimpft und meine Idee furchtbar heruntergerissen. Darauf habe ich ihn sitzen gelassen und Jordan als Mitarbeiter gewonnen. Seitdem sich Pauli auf diese Weise ausgeschaltet hatte, hat er furchtbare Wut auf Göttingen und läßt sie bei jeder Gelegenheit durch boshafte Bemerkungen aus. Aber ich kann das auch überstehen.“

### Das große Selbstbewußtsein der jungen Physiker

Aus diesen Zeilen wird verständlich, warum junge und selbstbewußte Physiker nur ungern mit dem so empfindlich veranlagten Born zusammenarbeiteten. Auch Pauli hatte es bei ihm in Göttingen nur ein Semester lang ausgehalten. Dazu kam, daß der sich seiner intellektuellen Überlegenheit bewußte Pauli sowohl im persönlichen Gespräch als auch in der öffentlichen Diskussion seinen wissenschaftlichen Partnern in jeder Hinsicht gewachsen fühlte. Selten dürfte er in die Verlegenheit gekommen sein, sich in die Enge getrieben zu fühlen. Kritik bedeutete für ihn eine wissenschaftliche Bereicherung und willkommene Gelegenheit zur Vorführung seiner geistigen Fähigkeiten; der 18 Jahre ältere Born empfand sie dagegen oft nur als eine Herabwürdigung seiner zweifellos großen wissenschaftlichen Verdienste.

Daß solche Motive dem unterschiedlichen Verhalten der beteiligten Personen tatsächlich zugrunde lagen, wird aus dem Briefwechsel des amerikanischen Physikers Raymond Birge mit seinem Kollegen John van Vleck deutlich. In einem Schreiben vom 10. März 1927 stellte er folgende allgemeine Beobachtungen über das Verhalten der europäischen Physiker an: „Did you visit Dirac while in Europe? I am always interested in personal touches. I just now have a letter from Condon, saying that Dirac is at Göttingen and the real master of the situation. When he talks Born just sits and listens to him open-mouthed. That Dirac thinks of absolutely nothing but physics. Finally, that Condon asked him if he would like to visit America, and he replied, ‚There are no physicists in America‘. That is worse than Pauli, whom I understand credits America with only two, whom I understand are Epstein and yourself. Did you have that impression of Dirac? Also did you get an impression of general snobbiness toward America, when you were in Europe?“ Als Pauli sich im Sommer 1931 in Ann Arbor aufhielt und dort zwar unter großer Hitze, nicht aber gerade unter „Trockenheit“ leidete,

weil „Laporte und Uhlenbeck ausgezeichnet mit Alkohol versorgt sind,“ machte auch er die damit übereinstimmende Feststellung [279]: „Physik (und Physiker) gibt es hier sehr viel, aber ich finde sie zu formal.“

### *Größenordnungsphysik*

Besonders aber seine Mitarbeiter und Assistenten suchte Pauli davor zu bewahren, sich nicht durch allzu langwierige Literaturstudien oder andere ihm bedeutungslos erscheinende „Problemchen“ von ihrer eigentlichen Forschungsaufgabe ablenken zu lassen. Als sein Assistent Rudolf Peierls ihm im Sommer 1931 während seiner Abwesenheit in den USA ein Manuskript seiner Untersuchung über den elektrischen Widerstandes bei tiefen Temperaturen zuschickte, riet ihm Pauli vehement von einer Publikation ab [279]: „Erstens halte ich es für schädlich, wenn die jüngeren Physiker sich an die Größenordnungsphysik gewöhnen. Zweitens ist der Restwiderstand ein Dreckeffekt und im Dreck soll man nicht wühlen. Drittens schwebt die Theorie stark in der Luft ... Viertens sollten Sie doch vernünftiger Fragestellungen haben als solche kleinen Problemchen; ich finde, Sie verzetteln sich in letzter Zeit zu sehr in Kleinigkeiten.“ Doch dann, wieder etwas milder gestimmt, fügte er hinzu: „Ich bin nicht so wie die Bolschewisten, die die Kirchen, nachdem sie sie geschlossen haben, auch noch in die Luft knallen. Also zerreiße ich Ihr Manuskript nicht, sondern sende es Ihnen zurück, aber mit dem ausdrücklichen Rat, es vorläufig in Ihrer Schublade liegend aufzubewahren. Vielleicht schreiben Sie einmal irgendein größeres zusammenfassendes Referat, dann können Sie es ja verwenden.“ Peierls folgte Paulis Ratschlag und publizierte seine Ergebnisse im Schlußparagrafen eines Übersichtsreferats über die „Elektronentheorie der Metalle“, das er gerade für die *Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften* anfertigte. In einer Besprechung desselben bedauerte Pauli nochmals, „daß die Resultate der Theorie vielfach den Charakter der *Größenordnungsphysik* tragen, die sich mit einem qualitativen theoretischen Verständnis des Mechanismus der betreffenden Effekte begnügen muß.“

Aber selbst vor Einstein machte Pauli nicht Halt. Er bedachte ihn mit herber Kritik, als dieser nicht von seiner einheitlichen Feldtheorie ablassen wollte und entgegen dem allgemeinen Trend der damaligen Quantenphysik alle physikalischen Erscheinungen wieder auf eine rein klassische Feldtheorie zurückzuführen suchte. „Nun ist die Stunde der Rache für Sie gekommen,“ verkündete er am 26. August 1929 in einem Schreiben [235] an Hermann Weyl, „jetzt hat Einstein den Bock des Fernparallelismus geschossen, der auch nur reine Mathematik ist und nichts mit Physik zu tun hat, und Sie können schimpfen! ... Also auf zur Quantelung der Felder und nieder mit dem Fernparallelismus!“ Aber auch Einstein selbst verhehlte er nicht seine Enttäuschung über den damit einhergehenden „weitgehenden Abbau der allgemeinen Relativitätstheorie“ [239]: „Ich halte an dieser schönen Theorie fest, selbst wenn sie von Ihnen verraten wird!“ Doch Einstein, der Paulis scharfe Zunge kannte und deshalb sein aufrichtiges Wesen um so mehr zu schätzen wußte, erteilte er ihm nur den weisen Ratschlag [240]: „Vergessen Sie, was Sie gesagt haben, und vertiefen Sie sich einmal mit solcher

Einstellung in das Problem, wie wenn Sie soeben vom Mond heruntergekommen wären.“

Besonders häufig wurde aber auch Paulis wohl schärfster Konkurrent Dirac zur Zielscheibe seiner Kritik. Als es Pauli im November 1925 gelungen war, die Balmerformel „vom Standpunkt der neuen Göttinger Quantentheorie“ herzuleiten [104, 106],<sup>8</sup> hatte auch schon Dirac solche H-Atom-Rechnungen begonnen. Ralph H. Fowler, Diracs ehemaliger *Supervisor* am *St. John's College* in Cambridge, zeigte sich überrascht (in einem Schreiben vom 4. Dezember 1925 an Bohr), als er von Paulis raschen Fortschritten erfuhr: „Thanks to Dirac I have expected rapid development on those lines (d. h. Heisenberg's new theory), but Pauli's work on hydrogen has got ahead magnificently – much faster than I expected to hear of at first.“

Doch schon bei der Erweiterung der Quantenmechanik zur Behandlung auch unperiodischer Bewegungen und bei der Ableitung von Intensitätsformeln für das H-Atom waren Dirac und Schrödinger den Matrizenmechanikern bereits mit ihren Veröffentlichungen zuvorgekommen [118, 140]. Pauli bedauerte nur [125], „auf diese Weise soviel Zeit verloren“ zu haben. „Da hätte ich ja inzwischen gut etwas anderes machen können!“ Er fügte jedoch kommentierend hinzu: „Diracs Rechnungen über das H-Atom sind allerdings unnötig umständlich, das kann man nach den Methoden von Wentzel und mir einfacher machen.“ Eine Übertragung des von Dirac nach der Heisenbergschen Methode behandelten Compton-Effektes „in die Schrödingersche Sprache“ [140] mußte er ebenfalls zurückstellen, weil Dirac selbst und Paulis neuer im Oktober 1926 aus Berlin zu Peter Paul Koch nach Hamburg gekommener Kollege Walter Gordon diese Aufgabe auch schon erledigt hatten.

Nachdem Heisenberg und Pauli 1929 im Anschluß an Dirac ein allgemeines Verfahren zur Quantelung der Wellenfelder vorgeschlagen hatten, waren zahlreiche unüberwindliche Schwierigkeiten aufgetreten, welche ihre Anwendung auf konkrete Fälle problematisch machten. Das Problem der Übergänge in Zustände negativer Energie wurde von Pauli als ein besonders schwerwiegender Mangel der Diracschen Theorie empfunden. Paulis Abneigung gegen die sog. *Löchertheorie* sollte noch lange anhalten [312] und er begrüßte jede Gelegenheit, wenn er dieser Theorie „wieder eins anhängen“ konnte [373].

Die oft reinigende Wirkung seiner Kritik wurde auch von vielen anderen Zeitgenossen wohlwollend anerkannt. Als Dirac während der Kopenhagener Osterkonferenz 1932 „eine noch ganz unfertige Idee“ über eine alternative relativistische Quantenfeldtheorie vorstellte, rief er bei den Teilnehmern „nur allgemeines Schütteln des Kopfes“ hervor: „Er skizzierte eine Theorie,“ berichtete der anwesende Ehrenfest,<sup>9</sup> „in die man im Beginn wohl die Wirkung von Wellenfeldern auf Elektronen hineinsteckt, aber *nicht* die Wirkung der Elektronen auf die Felder. Dann aber kommt durch Herumzaubern mit Nichtkommutativität dennoch a

<sup>8</sup> „Die Paulische Balmerarbeit z. B. ist geradezu entsetzlich,“ erklärte Max von Laue, der ebenso wie viele andere ältere Physiker mit dem Matrixformalismus Schwierigkeiten hatte, am 12. Oktober 1926 in einem Brief an Schrödinger.

<sup>9</sup> In einem Schreiben vom 26. April 1932 an Epstein. Pauli war zu dieser Konferenz nicht gekommen, weil er noch an seinem Artikel über *Wellenmechanik* für das Springersche Handbuch arbeitete.

posteriori so etwas heraus, das so ungefähr wie eine Rückwirkung der Elektronen auf die Felder riecht. So hofft er von den berüchtigten 4–5 Schwierigkeiten der Pauli-Heisenberg-Elektrodynamik wenigstens eine vermeiden zu können: Die Feldsingularität des Punktelektrons. ... Pauli war abwesend. Also ertrank die Diskussion in einem Sumpf von Höflichkeit.“

Aber auch für die von vielen Wissenschaftlern heiß umkämpften Prioritätsansprüche soll Pauli wenig Verständnis gezeigt haben, wie Peierls in einem Interview berichtete. „Pauli always used to say: I can't understand why people have such strong feelings about priorities. If something is so obvious that somebody else is doing it at the same time as you, than it's not worth doing. It's the ideas that occur to you and that nobody else has thought about that are really satisfying.“

### Quantenmechanik als wissenschaftliche Revolution: An den Grenzen der Anschaulichkeit

Die Physik des frühen 20. Jahrhunderts hat bei ihrem Eindringen in den sich immer mehr dem unmittelbaren Wahrnehmungsvermögen entziehenden Mikrobereich zunehmend auf die bisher gewohnte Führung durch unsere Anschauung verzichten müssen. Nachdem alle Versuche ausgeschöpft waren, mit Hilfe von Modellen und anderen Sinneswerkzeugen das Verhalten der Atome und ihrer Spektren zu beschreiben, konnten sich die theoretischen Physiker bei ihrer Suche nach den dort herrschenden Naturgesetzen in wachsendem Maße nur noch durch mathematische Gesetzmäßigkeiten und einige universell bewährte Prinzipien (wie Symmetrie- und Invarianz-Prinzipien) leiten lassen. Entsprechend waren die Physiker jener Zeit in zwei Lager gespalten. Die Physiker der älteren Generation, zu der unter anderen noch Max Planck, Albert Einstein, Max von Laue, Arnold Sommerfeld, Max Born, Erwin Schrödinger und, bis zu einem gewissen Maße, sogar auch noch Niels Bohr gehörten, waren weiterhin von einer Unverzichtbarkeit der Anschaulichkeit als wichtigstes Erkenntnismittel überzeugt. Die jungen Physiker der Nachkriegsgeneration – und unter ihnen ganz besonders die eigentlichen Begründer einer *neuen* Quantenmechanik wie Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Pascual Jordan, Paul Dirac und Paul Wigner, zeigten dagegen eine viel größere Bereitschaft, diese Betrachtungsweise ganz aufzugeben und zur Beschreibung jener *unsichtbaren Realität*<sup>10</sup> schließlich nur noch formale Gesichtspunkte und durch die Beobachtung gewährleistete Begriffe und Größen gelten zu lassen.<sup>11</sup>

Als Pauli am 20. September 1923, kurz vor seiner Rückkehr aus Kopenhagen, Eddington seine Meinung über die von der Quantentheorie geforderten *Modifikationen* der klassischen Vorstellungen unterbreitete [45], wies er auf die

<sup>10</sup> „Atome und Elektronen sind ja eine unsichtbare Realität,“ erklärte Pauli später [1158], „nur die Wirkungen – d. h. was wir so interpretieren – sind sichtbar.“

<sup>11</sup> Paulis Forderung, „in die Physik nur prinzipiell beobachtbare Größen einzuführen“, erschien schon in der Anfang November 1919 eingereichten Untersuchung über Weyls Gravitationstheorie zum ersten Mal im Druck.

Schwierigkeit bei den Interferenzerscheinungen des Lichtes hin, „z. B. beim lichtelektrischen Effekt stets in Energiequanten  $h\nu$  disponibel zu bleiben.“ Die Widersprüche „kommen nur daher, daß wir zwar die Gesetze der klassischen Theorie aufgeben, aber doch noch immer mit den Begriffen dieser Theorie operieren.“ Bereits hier erwähnte Pauli, daß zwar die Bewegung eines Elektrons *prinzipiell beobachtbar* sei, *nicht* aber der *Ort* des Elektrons.

So hat auch der ältere Pauli dieses Umdenken rückblickend bewertet, als er im Januar 1955 seinen Standpunkt gegenüber Schrödinger nochmals darlegte [1992]: Die „logische und mathematische Struktur“ bei einer physikalischen Theorie sei ihm „(mindestens) ebenso wichtig wie ihre Beziehung zur Empirie“. Als er im Frühjahr 1955 – im Vorgefühl der sich anbahnenden Entwicklungen in der Elementarteilchenphysik – in seiner sog. *Reflexionsarbeit*<sup>12</sup> die neue Rolle der Spiegelungssymmetrien analysierte, hob er nochmals die Bedeutung dieses Verzichts auf eine bildhafte Darstellung bei der Entwicklung der Quantenphysik hervor:<sup>13</sup> „After a brief period of spiritual and human confusion, caused by a provisional restriction to *Anschaulichkeit*, a general agreement was reached following the substitution of abstract mathematical symbols, as for instance  $\psi$ , for concrete pictures. Especially the concrete picture of rotation has been replaced by mathematical characteristics of the representations of the group of rotations in three dimensional space. This group was soon amplified to the Lorentz group in the work of Dirac.“ Ganz besonders erwähnte Pauli in diesem Zusammenhang auch die Rolle seines *Ausschließungsprinzips*, das nun „in a new and surprising way“ mit Diracs Ideen kooperieren konnte.

Der endgültige Durchbruch zu einer neuen Quantenmechanik, die man zuweilen auch eine *Knabenphysik* genannt hat, war im wesentlichen dieser jugendlichen und vorurteilsfreien Physikergeneration zu verdanken. Die ersten Nachkriegsjahre, in denen diese Entwicklung stattfand, gehören zu den glanzvollsten Jahren der gesamten Physikgeschichte, weshalb man auch gerne von einem *goldenen Zeitalter* der Weimarer Physik spricht. Wie sich im weiteren Verlauf zeigte, vermochte diese unanschaulich-abstrakte Quantentheorie im Bereich der Atome und der Elementarteilchen tatsächlich auch das zu leisten, was der Newtonschen Mechanik und der Maxwell'schen Elektrodynamik bisher nur für den makroskopischen Erscheinungsbereich gelungen war. Damit hatte sich schließlich ein 1916 von Sommerfeld zitierter Ausspruch des Spektroskopikers Carl Runge bewahrheitet: „Einmal wird auch der Spektroskopie ihr Newton entstehen.“ Nur statt *eines* hatte es dazu *mehrerer* „Newtons“ bedurft.

In dem oben bezeichneten Sinne stellen die frühen 20er Jahre also für das sich neu konstituierende Physikverständnis eine Zeit des Übergangs dar. Diesen Prozeß hatte vor allem der dänische Physiker Niels Bohr in Gang gesetzt. Durch Einführung seines *Korrespondenzprinzips* hatte er eine Art Leitfaden geschaffen, mit dessen Hilfe man in einigen paradigmatischen Fällen eine Verbindung zwischen der klassischen und der Quantenwelt herstellen konnte.<sup>14</sup> Andererseits

<sup>12</sup> So bezeichnete Pauli (vgl. S. 145) seinen Beitrag (1955d) zur *Bohr-Festschrift*.

<sup>13</sup> Pauli (1955d, S. 30).

<sup>14</sup> Bohr versuchte ganz bewußt, die Anwendung seines vielbewährten Prinzips durch eine zu enge Formulierung einzuschränken. In der Literatur sind deshalb verschiedene Fassungen desselben zu



waren aber auch schon während der lang anhaltenden Suche nach einer *definitiven* Atommechanik die erkenntnistheoretischen und mathematischen Hilfsmittel bereitgestellt worden, welche diese Bestrebungen entscheidend förderten.<sup>15</sup>

Die Bedeutung dieses geistigen Umbruchs auch für das gesamte geistige und kulturelle Umfeld wurde bisher nur von einigen wenigen unter den Beteiligten erkannt. Wahrscheinlich werden auch noch viele Jahre vergehen und viele inner- und außerwissenschaftliche Auseinandersetzungen stattfinden, bevor diese dem Uneingeweihten so fremdartig anmutenden Erkenntnisse in das allgemeine Bewußtsein einzudringen vermögen. Man kann aber davon ausgehen, daß sie das Denken und Handeln der Menschen im Laufe der Zeit noch viel tiefgreifender *umwälzen* werden, als es die *kopernikanische Revolution* mit allen ihren erkenntnistheoretischen, kulturellen, gesellschaftlichen und politischen Implikationen je vermocht hat.

Aus einer solchen *welthistorischen* Perspektive heraus verdient das Leben und Wirken eines der am Aufbau dieser neuartigen Wissenschaft maßgeblich beteiligten Physikers, dessen gesamter Briefwechsel hier ausbreitet wird, um so mehr unsere ganze Aufmerksamkeit. Im folgenden sollen einige prägende Ereignisse, aus dem Leben des noch jungen Pauli, welche diese Entwicklung eingeleitet haben, auf der Grundlage noch vorhandener Quellen herausgestellt werden.

### Die Wiener Schulzeit. Machs Anleitung zum kritischen Denken

Eine zentrale Rolle bei diesem Unternehmen fiel dem jungen Pauli zu. Durch äußere Umstände begünstigt, brachte er für seine Aufgabe ideale Voraussetzungen mit. Es waren dies eine überragende mathematische Begabung, die schon bei seinen Gymnasiallehrern große Erwartungen weckte, gepaart mit einer erkenntnistheoretischen Skepsis, die erforderlich war, wenn man die gewohnten und so vielfach bewährten Grundlagen der klassischen Physik verlassen wollte.<sup>16</sup>

Paulis natürlichen Veranlagungen wurden von seinem von großem Wissensdrang beseelten Vater gefördert, der neben seiner Tätigkeit als viel beschäftigter

---

finden. Zum ersten Mal (in deutscher Sprache) kommt die Bezeichnung *Korrespondenzprinzip* in seinem in der *Zeitschrift für Physik* 2, S. 423 (1920) veröffentlichten Aufsatz „Über die Serienspektren der Elemente“ vor. Auch Pauli, der schon in seiner Dissertation einen Verallgemeinerungsversuch unternommen hatte, ging in seinem ersten Handbuchartikel über *Quantentheorie* [1926, S. 41–53] ausführlich auf die Komplexität und Tragweite dieses von Sommerfeld (z. B. in *Atombau und Spektrellinien*, 2. Auflage, S. 400 und 534) oft als Bohrscher „Zauberstab“ bezeichneten Prinzips ein.

<sup>15</sup> Die Bedeutung Hilberts und der Göttinger Mathematiker für die Entstehungsgeschichte der Quantenmechanik hat Arne Schirrmacher kürzlich in seinem Aufsatz „Planting in his neighbor's garden: David Hilbert and early Göttingen quantum physics“ in *Physics perspectives* 5, 4–20 (2003) behandelt.

<sup>16</sup> Möchte man sich jedoch auf Attribute wie Frühreife, selbständiges Studium von Büchern, frühzeitige Höchstleistungen und dauerhafter Bestand der gewonnenen Erkenntnisse festlegen, mit denen Wilhelm Ostwald 1909 in seinem bekannten Werk *Grosse Männer* versucht hat, die *Klassiker* von den *Romantikern* der Wissenschaft zu unterscheiden, so fällt es schwer, Pauli in eindeutiger Weise in dieses Schema einzuordnen.

Arzt auch eigenen wissenschaftlichen Interessen nachging und vor allem chemische Studien betrieb. Als hingebungsvoller Verehrer seines ehemaligen Prager Lehrers Ernst Mach<sup>17</sup> hatte er diesen zum Paten seines hochbegabten Sohnes erkoren und sich durch ihn auch bei dessen weiteren wissenschaftlichen Ausbildung leiten lassen.

Zunächst sollte der Sohn offenbar eine chemische Laufbahn einschlagen, bot sie doch eher Aussicht auf eine materiell gesicherte Zukunft. Der Vater selbst hatte inzwischen eine aussichtsreiche Karriere als Chemiker an der Wiener Universität begonnen und war von der grundlegenden Bedeutung der von ihm mitbegründeten Disziplin der Kolloidchemie überzeugt.<sup>18</sup>

In einem Schreiben [2761] an den Generalsekretär der *Chemical Society*, die ihn 1957 zum Ehrenmitglied ernannte, deutete Pauli diese ursprüngliche Absicht seines Vaters an: „During my study in Munich I decided already after one term to give up my study of chemistry in favour of theoretical physics. In my doctor examination, which, besides physics, also comprehended mathematics and astronomy, chemistry was not contained.“

Verantwortlich für diesen Richtungswechsel dürfte die ihm stark imponierende Persönlichkeit des Münchener Physikprofessors Arnold Sommerfeld gewesen sein. Trotz seines eher respektlosen Verhaltens gegenüber Autoritäten und anderen angesehenen Personen<sup>19</sup> hat Pauli eine stets anhaltende Verehrung für seinen ersten wissenschaftlichen Mentor bewahrt. Besonders deutlich kam dies auch noch bei späteren Gelegenheiten in seinem persönlichen Umgang mit Sommerfeld zum Ausdruck.<sup>20</sup> So konnte Arnold Berliner,<sup>21</sup> der Herausgeber der Zeitschrift *Die Naturwissenschaften*, auch noch im Sommer 1935 anlässlich einer wissenschaftlichen Kontroverse über die quantentheoretische Interpretationsfrage in einem an Sommerfeld gerichteten Schreiben feststellen, daß Heisenberg ebenso „zu Ihrem Kreise gehört wie Pauli oder Bethe, die Ihnen beide wohl auch heute noch auf das Wort parieren.“ Aber auch Pauli selbst hat in einem Gratulationsschreiben zu Sommerfelds 70. Geburtstag den Respekt erwähnt, den ihm „jenes strenge Stirnrunzeln“ seit dem Jahr 1918 einflößte, in welchem er Sommerfeld zum ersten Mal begegnet war [537a].

---

<sup>17</sup> Der Vater hatte Mach bei der Herausgabe seiner Werke unterstützt und ihm auch mehrfach beim Korrekturlesen seiner Bücher geholfen.

<sup>18</sup> Siehe hierzu E. I. Valkos Würdigung zum 80. Geburtstag des Vaters in der *Österreichischen Chemiker-Zeitung* **50**, 183–184 (1949) und Manfred Jacobis im *Gesnerus* **57**, 222–237 (2000) und in der *Naturwissenschaftlichen Rundschau* **54**, 411–416 (2001) erschienene Aufsätze „Wolfgang Paulis familiärer Hintergrund“ und „Wegbereiter der Kolloidchemie. – Die wissenschaftliche Karriere von Wolfgang Joseph Pauli.“

<sup>19</sup> Autoritäres Auftreten von Wissenschaftlern lehnte Pauli ab und sprach bei Kollegen, bei denen sie in Erscheinung trat, auch von einer „Verbonzung“ (vgl. z. B. Band **II**, S. 149).

<sup>20</sup> Über Paulis respektvollen Umgang mit seinem Lehrer hat sich insbesondere auch sein späterer Assistent V. F. Weisskopf in seinen Erinnerungen geäußert (vgl. Enz und von Meyenn [1988, S. 86]).

<sup>21</sup> In einem Schreiben vom 28. August 1935 an Sommerfeld.

## Im Sommerfeldschen Institut für theoretische Physik

Als Pauli das Studium an der *Ludwig Maximilians Universität* in München aufnahm, herrschten dort noch die chaotischen Zustände der letzten Kriegsmonate. München wurde Schauplatz wichtiger politischer Ereignisse, die der junge Student infolge seiner emsigen Vertiefung in seine Studien offenbar nur am Rande wahrgenommen hat. Am 14. September 1918 hatte der österreichische Kaiser Karl I. gerade einen Friedensappell an die Alliierten gerichtet und um Waffenstillstandgespräche auf der Grundlage des Wilsonschen 14-Punkte Programms nachgesucht. Nachdem sich schließlich auch die Deutsche Reichsregierung zu solchen Verhandlungen bereit erklärte, war am 11. November das Waffenstillstandsabkommen zustande gekommen, das den Kriegshandlungen ein definitives Ende setzte.

Währenddessen war in München der Sozialdemokrat Kurt Eisner an die Spitze eines Arbeiter-, Bauern- und Soldatenrates getreten. Nach seiner Ermordung durch einen fanatisierten Offizier wurde am 21. Februar 1919 die *Bayerische Räterepublik* ausgerufen. Diese konnte sich jedoch bis zu ihrer Auflösung durch die Reichswehr nur einen Monat halten. Pauli hatte also häufig Gelegenheiten, bei seinem Weg von der Wohnung in der Theresienstraße 66 zum Sommerfeldschen Institut das aufgeregte politische Treiben und die allgemeine Not dieser Jahre zu beobachten. In späteren Gesprächen mit seiner Frau Franca erinnerte er sich jedoch nur gelegentlich an einzelne Episoden, wie die langen Schlangen, die sich vor den Volksküchen bei der Essensausgabe an die hungerleidende Bevölkerung bildeten. Eine direkte Kunde von den damals in München herrschenden Zuständen aus Paulis eigener Hand besitzen wir jedoch nicht.

Pauli verkehrte aber in München mit verschiedenen Personen, die solche Berichte über diese bewegte Zeit hinterlassen haben. Unter diesen finden wir bekannte Namen wie Werner Heisenberg, Otto Laporte, Wilhelm Lenz, Gregor Wentzel, Erwin Fues, Adolf Kratzer, Karl Bechert und Peter Paul Ewald. Sie alle gehörten damals zum engeren Mitarbeiterkreis des Sommerfeldschen Institutes.<sup>22</sup> Unter Sommerfelds frühen Meisterschülern befand sich auch noch der Holländer Peter Debye, der München zwar schon 1911 verlassen hatte und sich um diese Zeit in Göttingen aufhielt, der aber dennoch enge Kontakte mit Sommerfeld unterhielt. Zu Sommerfelds weiteren Favoriten gehörte sein Assistent Ewald, dem er auch freundschaftlich nahestand und mit dem Pauli nun ebenfalls in eine nähere Beziehung treten sollte.<sup>23</sup> Schon als Doktorand hatte Ewald entscheidende Ideen zu von Laues Entdeckung der Röntgenstrahlinterferenzen beigesteuert, die den außerordentlichen Ruf des Münchener Institutes mitbegründen halfen und Laue den Nobelpreis des Jahres 1914 eintrugen. Eines der ersten Weihnachtsfeste außerhalb der gewohnten elterlichen Umgebung verbrachte Pauli in Ewalds Münchener Wohnung in der Leopoldstraße 70 und hier bei ihm soll er auch zum ersten Mal von seiner ihm bis dahin nicht bewußten jüdischen Abstammung seines Vaters aufgeklärt worden sein.

<sup>22</sup> Vgl. hierzu Eckert [1993] und die Hinweise zur *Sommerfeld-Schule* in Band II, S. 704–708.

<sup>23</sup> Pauli hatte im Wintersemester 1919/20 und im Sommer 1920 Ewalds Vorlesungen über „Dynamik der Kristallgitter“ und „ausgewählte Kapitel der Elektronenoptik“ belegt.

## Revolutionäres Zeitgeschehen aus der Sicht eines Augenzeugen

Angesichts dieser engeren Beziehung zu Pauli mag auch ein Lagebericht von Interesse sein, den Ewald seinem gerade als Privatdozent nach Zürich berufenen Kollegen Paul Sophus Epstein zukommen ließ:<sup>24</sup> „Das Zwischensemester war eigentlich sehr nett“, schrieb er am 11. Mai 1919. „Das Lesen hat mir Freude gemacht und war recht lehrreich, zumal in der stündlichen Abwechslung mit Sommerfeld. Der Semesterschluß war schon stürmisch. Der ersten Räterepublik stand ich nicht gerade feindlich gegenüber, da ich von mehreren ordentlichen Leuten wußte, die dabei waren, obwohl ich die Methode, die Demokratie auch nur vorübergehend zu verlassen, um eine Demokratie zu schaffen, für verkehrt hielt. ... Ich fuhr öfters in die Stadt, um mir die Dinge anzusehen, und fand alles nicht so arg, wie sie draußen erzählt wurden. ... Inzwischen arbeiteten sich die weißen Garden der roten Hoffmann-Regierung nahe an die Stadt. Den großen Sieg der *Roten* bei Dachau erlebte ich auf einem meiner Stadtbesuche. ... Es tat dem Auge wohl, nach dem verkommenen Gesindel, das sich Münchener Garnison nannte und das jeder Regierung nachlief, die zwei oder mehr Tagelohn bot, wieder einige ordentliche Truppen auf der Straße zu sehen. Es sind Preußen und Württemberger dabei. Im Institut kam plötzlich Laue als Funkerleutnant; er liegt mit seiner Station auch in Giesing; wir hatten aber einen netten Abend bei Sommerfelds (übrigens unter Begleitung von Maschinengewehrknattern und Handgranatenlärm in der Feilitzschule). Im Ganzen scheinen die letzten 8 Tage etwa 500 Tode gekostet zu haben. Natürlich ist augenblicklich die Reaktion wieder hoch und der Gegensatz zwischen Gebildeten und Arbeitern größer als je. ... Auf mich macht den tiefsten Eindruck die absolute Ohnmacht des nicht organisierten Bürgertums. Die Bekanntgabe der Friedensbedingungen, die uns als Großmacht bescheidensten Umfangs vernichtet, ja, nur vor Verpflichtungen überhaupt kaum wieder aufatmen lassen soll, trägt das ihre dazu bei, eine Atmosphäre zu schaffen, die das Waffenhandwerk als das vornehmste selbst so friedlich veranlagten Menschen wie mir erscheinen läßt. ... Aber das früher oder später Frankreichs chauvinistischer und maßloser Wille gebrochen werden muß, wenn es uns so knebelt, ist klar.“

Eine solche deutsch-nationale Sichtweise der politischen Verhältnisse der frühen Nachkriegszeit dürfte in den meisten Akademikerkreisen vorgeherrscht haben. Paulis fast zwei Jahre jüngerer Studienkollege Werner Heisenberg, der zu diesem Zeitpunkt noch das Münchener Maximiliansgymnasium besuchte und dann – mit einer Phasenverzögerung von vier Semestern – ebenfalls in Sommerfelds Arbeitskreis eintrat, beschrieb die Münchener Zustände in seiner Autobiographie *Der Teil und das Ganze* in ganz ähnlicher Weise.<sup>25</sup> Doch Personen wie Epstein selbst, Kasimir Fajans, Karl Ferdinand Herzfeld, Pauli und manch andere, die aus den östlichen Teilen des Reiches zum Studium oder zur Fortbildung nach München gekommen waren, haben sicherlich eine viel kritischere Haltung gegenüber der in diesem Brief vertretenen Einstellung eingenommen.

<sup>24</sup> Vgl. K. von Meyenn, Hrsg.: *Quantenmechanik und Weimarer Republik*. Braunschweig und Wiesbaden 1994. Dort S. 25f.

<sup>25</sup> Heisenberg [1969, S. 19f.].

Solche Differenzen und Spannungen zwischen den verschiedenen Personengruppen kommen auch in einer Äußerung Borns zum Ausdruck, der sich in einem Schreiben vom 31. Oktober 1922 über das Verhalten des inzwischen nach Amerika ausgewanderten Epstein beschwerte: „Daß Epstein jetzt überall verbreitet, Paulis und meine Arbeit sei falsch und seine richtig, ist eine rechte Niederträchtigkeit. . . . Er hat mir einen ganz unverschämten Brief geschrieben, in dem er behauptet, daß wir unpublizierte Arbeiten von ihm angegriffen hätten. . . . Dabei hat der Kerl wesentlich durch meine Empfehlungen seine schöne Anstellung in Amerika bekommen. Ich habe mir vorgenommen, in Zukunft für östliche Ausländer keine westlichen Empfehlungen mehr zu geben“.

Bemerkungen über das Zeitgeschehen kommen in den wenigen erhaltenen Briefen aus Paulis frühen Jahren fast überhaupt nicht vor. Daß ihn diese Ereignisse überhaupt nicht berührt hätten, kann man daraus natürlich nicht schließen. Von einem starken politischen Engagement des jugendlichen Pauli unterrichtet nämlich ein ehemaliger Schulkamerad, dessen Schreiben [3142] den Abschluß dieser Briefausgabe bildet. Dort heißt es, während der Schulzeit sei „nach Ausbruch des Ersten Weltkrieges“ bei Pauli „ein leidenschaftliches Interesse für Politik erwacht, das sichtlich auch von seiner sozialistisch orientierten und schriftstellerisch tätigen Mutter genährt wurde. Je länger der Krieg dauerte, desto schärfer wurde seine Opposition gegen ihn und überhaupt . . . gegen das ganze *Establishment*.“<sup>26</sup>

### Rückzug aus dem Alltagsleben und vollständige Hingabe an die Wissenschaft

Unter dem Eindruck der menschlichen Schicksale vieler Kriegsteilnehmer und des Bewußtseins der Ohnmacht des Einzelnen gegenüber dem Zeitgeschehen hatte Pauli sich offenbar zunehmend von der Außenwelt abgekapselt und in der rein wissenschaftlichen Tätigkeit Ablenkung gesucht. Aus „großer Angst vor allem Gefühlsmäßigen“ erklärte er ein Jahrzehnt später, sei auch dieses gänzlich aus seinem Leben verdrängt worden [380].

Paulis sprichwörtlich gewordene Abneigung gegen das Zeitungslesen [56] und seine anhaltende Skepsis gegenüber öffentlichen Meinungsäußerungen sind diesen Erfahrungen entsprungen.<sup>27</sup> Von öffentlichen Friedensappellen oder an-

<sup>26</sup> Pauli hat sich auch später noch – trotz einer grundsätzlich kritischen Einstellung gegenüber seiner Heimat – stets für die Geschichte Österreichs interessiert. Als ihm die Kahlers den ersten Band der 1955 von Hannah Ahrendt unter dem Titel *Dichten und Erkennen* herausgegebenen Essays des ebenfalls durch Mach beeinflussten Hermann Broch zukommen ließen, bedankte er sich: „Die *fröhliche Apokalypse Wiens um 1880* hat mir besonderen Spaß gemacht. Band 2 wäre sehr erwünscht.“

<sup>27</sup> Bevor Pauli am 29. April 1925 mit dem Fluzeug von einem Besuch in Kopenhagen nach Hamburg zurückkehrte, lud er Kronig ein, ihn im Juni in Hamburg zu besuchen. Dieser berichtete (in einem Schreiben an Erik Rüdinger vom 21. Dezember 1979) folgendes über diesen Aufenthalt: „At a party, I believe in the house of Minkowski, Pauli fell asleep in an armchair and somebody put a newspaper between his hands. Pauli was very angry when he awoke, because he had a great contempt for newspapers and never read them at that time.“

deren Formen der Einflußnahme von Wissenschaftlern auf das politische Geschehen, wie sie schon damals an der Tagesordnung waren, versprach er sich keinen wirklichen Erfolg [2067, 2079 und 2080]. Bohrs spätere Bemühungen, durch einen *offenen Brief* an die *Vereinten Nationen* die öffentliche Meinung zu beeinflussen oder Deklarationen zur Abwendung eines Atomkrieges der *Rot- und Weiß-Besternten*, wie die sog. *Mainauer Kundgebung* [2216], lehnte Pauli deshalb als *verkehrte Mittel* ab [1147, 1158 und 1187]. „Everything which is ‚large scale‘ is too inhuman to be accessible to my sentiment,“ schrieb er im Sommer 1950 angesichts der sich anbahnenden Oppenheimer-Affaire [1120], „so I prefer to think about *individual* destinies, to stay human and to look how these individual fates are reflecting also a larger collective situation.“

Dabei stützte er sich auf die von Laotse vertretene taoistische Lebensweisheit, der zufolge der Einzelne nur durch *indirekte* Einwirkung das öffentliche Geschehen zu beeinflussen suchen sollte.<sup>28</sup> Staatsgebilde „funktionieren am besten,“ heißt es bei Richard Wilhelm,<sup>29</sup> „wenn man von ihrem Räderwerk gar nichts bemerkt. Herrscht ein ganz Großer, so wissen die Leute kaum, daß er da ist. Die Werke werden vollbracht, die Arbeit wird getan, und die Leute denken alle: wir sind frei. So ist die Freiheit, die Selbständigkeit das Grundprinzip der Staatsordnung des Laotse. Die Leute gewähren lassen, machen lassen, sich nicht einmischen, nicht regieren: das ist das Höchste.“

Eine solche Hinwendung zur östlichen Weisheitslehre und zur Auseinandersetzung mit den emotionalen Hintergründen seiner eigenen wissenschaftlichen Produktivität waren aber auch eine Reaktion auf die psychische Krise, die Pauli am Ende seiner ersten großen Schaffensperiode zu Beginn der 30er Jahre durchmachte. Die Mutter hatte ihm einen allzu verstandesmäßigen Umgang mit seinen Erlebnissen vorgeworfen und sogar wegen zu großer Gefühlskälte getadelt. Zu Beginn seiner Analyse bei dem Züricher Psychologen C. G. Jung im März 1932 erklärte er: „Meine Mutter machte mir früher oft Vorwürfe, ich hätte keine Gefühle, kein *Herz*, wie sie sagte, ich sei zu wenig zärtlich zur Mutter, könne sie zu wenig lieben. (Dies trat schon bald nach der Geburt der Schwester ein.) Meine bewußte verstandesmäßige Haltung dem gegenüber war Trotz: ‚ich brauche auch gar keines zu haben.‘ In dem Jahr vor ihrem Tod schrieb ich ihr noch einen sehr spitzfindigen Brief, worin ich *bewies*, daß es ein Schutz, ein Glück sei, kein Herz und keine Gefühle zu haben.“ Auch seinem ehemaligen Assistenten Ralph Kronig, der ihm im Sommer 1934 zu seiner neuen, zweiten Heirat gratulierte und Kritik an seiner früheren Lebenshaltung übte, erklärte er: früher habe er „große Angst vor allem Gefühlsmäßigen“ gehabt und dieses daher zu verdrängen versucht [380]. Dabei machte er die Unterscheidung zwischen *persönlichem* und einem „in wissenschaftlich-schöpferischer Produktion angewandtem Gefühl.“

<sup>28</sup> Vgl. hierzu auch die Bemerkungen in Band IV/2, S. XV.

<sup>29</sup> Um Bohr von seinem Standpunkt zu überzeugen, hatte ihm Pauli die von Richard Wilhelm verfaßte Schrift über *Lao-tse und der Taoismus* zum 65. Geburtstag geschenkt [1158], aus der auch diese (in Paulis eigenem Exemplar auf S. 63 angestrichene) Textstelle entnommen wurde. – Weitere Einzelheiten hierzu findet man auch in der durch von Meyenn et al. [1985, S. 348–351] herausgegebenen Sammlung von Bohrs Schriften.

## Das früh erkannte Genie

Der Wiener Theoretiker Hans Thirring war von den ungewöhnlichen mathematischen Fähigkeiten des jungen Pauli schon frühzeitig unterrichtet worden. In einer Rundfunkansprache anlässlich von Paulis frühzeitigem Tod berichtete er:<sup>30</sup> „Ähnlich wie mehr als ein Jahrhundert vor ihm der große Mathematiker Gauß schon als Schüler an der Schwelle zwischen Kindheit und Jugend eine außerordentliche Begabung zeigte,“ sei eine solche Begabung auch bei Pauli frühzeitig in Erscheinung getreten. „Es war im ersten Weltkrieg, so um 1915 oder 1916, als ein jüngerer Fachkollege von mir, Dr. Bauer,<sup>31</sup> der damals als Mittelschullehrer am Gymnasium im XIV. Bezirk tätig war, eines Tages zu mir sagte: ‚Stellen Sie sich vor, Herr Dozent, da haben wir in der V. Klasse einen Schüler, der eine so phänomenale Begabung für Mathematik und Physik zeigt, daß da ein neuer Gauß oder Boltzmann heranzuwachsen verspricht.‘<sup>32</sup> Der junge Mann war der Sohn des österreichischen Universitätsprofessors Wolfgang Pauli, der sich als Kolloidchemiker einen internationalen Ruf erworben hat und durch die praktische Anwendung seiner Forschungen mehr Segen für die Allgemeinheit angestiftet hat als der Laie weiß.“

Damit in Übereinstimmung befindet sich auch ein Schreiben vom 12. Januar 1914, welches der Vater von seinem einstigen Lehrer und Vorbild Ernst Mach empfing. Darin äußerte sich dieser auch zu den beeindruckenden Fortschritten des Sohnes, dessen Patenschaft und wissenschaftliche Erziehung er bereitwillig übernommen hatte:<sup>33</sup> Es „hat mich sehr gefreut, insbesondere was Sie über Ihren Sohn, mein Patenkind schreiben. Die *Introductio in analysin infinitorum*,<sup>34</sup> wohl der lateinische Titel des Buches, welches Ihr Sohn studiert hat, ist jedenfalls ein sehr geistvolles und anregendes Buch, welches fast alle Leser, namentlich die jungen begabten und sanguinisch veranlagten begeistert hat und noch begeistert.“ Weil jedoch „die Werte der bestimmten Integrale“ in Eulers verdienstvollem Werk „falsch oder doch größtenteils falsch“ angegeben seien, sollte man bei dem Studium desselben „einen älteren erfahrenen Mathematiker zu Rate ziehen.“ Als solchen empfahl Mach „den von der Royal Society mit dem Sylvesterpreis

<sup>30</sup> In einer Gedächtnisrede vom 19. Dezember 1958 für Pauli im 2. Programm des *Österreichischen Rundfunks*. Ein Manuskript der Ansprache befindet sich in der *Zentralbibliothek für Physik in Wien*. Wolfgang Kerber danke ich für den Hinweis auf dieses Dokument.

<sup>31</sup> Es handelte sich um den theoretischen Physiker Hans Adolf Bauer (1891–1953), der sich damals mit der allgemeinen Relativitätstheorie beschäftigte und Pauli privaten Physikunterricht erteilt hatte. Der später als Professor an der Technischen Hochschule und der Universität in Wien wirkende Physiker veröffentlichte 1938 auch eine in mehreren Auflagen gedruckte Einführung in die *Grundlagen der Atomphysik*.

<sup>32</sup> Der 14jährige Gauß war wegen seiner auffallenden mathematischen Begabung dem Herzog von Braunschweig vorgestellt und daraufhin von diesem gefördert worden.

<sup>33</sup> Pauli sprach später (in seinem Schreiben [1544] an C. G. Jung) von einer „antimetaphysischen statt katholischen“ Taufe, die er auf diese Weise durch Mach empfangen habe (vgl. Band IV/2, S. XVI f.).

<sup>34</sup> L. Euler: *Introductio in analysin infinitorum*. 3 Teile, Lausanne 1748. Vgl. hierzu auch E. A. Fellmanns Bemerkungen [1995, S. 67 ff.] über dieses für die mathematische Entwicklung so bedeutsamen Werkes.

ausgezeichneten Prof. Wirtinger.<sup>35</sup> Übrigens werden Sie auch unter den jüngeren Dozenten an der Universität Leute finden, die Ihnen in der fraglichen Sache genaue Auskunft geben können.“

Als dann der Sohn im Sommer 1914 vom Vater persönlich dem Paten in seinem Altersdomizil in Haar bei München „als großes mathematisches Genie“ vorgestellt wurde, reagierte Mach viel zurückhaltender. Er fühlte sich an seinen eigenen hochbegabten Sohn Heinrich erinnert, „der sich [1894, kurz nach seiner Promotion] in Göttingen umgebracht hat.“ Auch Mach hatte sich große Illusionen gemacht, „es war aber eine durch eine Psychose vorgespiegelte Täuschung.“ Er riet deshalb, erst einmal „die Pubertätsentwicklung abzuwarten, bevor man darüber urteilen kann.“

Doch glücklicherweise nahm die Entwicklung bei Pauli einen ganz anderen Verlauf und er sollte die vom Vater in ihn gesetzten Erwartungen noch weit übertreffen. Bereits während seiner drei Studienjahre verfaßte er einen noch zu besprechenden Enzyklopädieartikel und klärte einige wichtige atomphysikalische Probleme, welche die bevorstehende Entwicklung vorbereiteten.

### Erste Veröffentlichungen zur allgemeinen Relativität und zur Weylschen Gravitationstheorie

Seine ersten drei Publikationen galten jedoch noch der Weiterbildung der allgemeinen Relativitätstheorie, die besonders auch in Wien mit großem Interesse verfolgt wurde. An die Untersuchungen seines Lehrers Hans Bauer<sup>36</sup> und des damals noch als Privatdozent am *II. Physikalischen Institut* der Universität Wien tätigen Erwin Schrödinger anknüpfend, leitete Pauli die „Energiekomponenten des Gravitationsfeldes“ für den allgemeinen Fall eines beliebigen Koordinatensystems her und deckte damit einen Mangel der Einsteinschen Formulierung auf. Diese Untersuchung wurde noch im September 1918 zur Veröffentlichung eingereicht, kurz bevor er sich zum Studium nach München begab. Die beiden anderen im Juni und November 1919 eingereichten Veröffentlichungen setzten sich mit Hermann Weyls Gravitationstheorie auseinander und enthalten bereits erste Hinweise auf die notwendige Existenz von Antiteilchen und die Grenzen des Feldbegriffes im Inneren eines Elementarteilchens [45].

Laut dem *Kollegienbuch*, das ein Studierender der philosophischen Fakultät der *Universität München* zu führen hatte, belegte Pauli im ersten Winter-Halbjahr 1918/19 neben einer 5stündigen Vorlesung über *Experimentalphysik I* (Einkleitung, Wärme, Elektrizität) des kurz vor seiner Emeritierung stehenden Leo Graetz auch die *Unorganische Experimentalchemie* (ebenfalls 5 Stunden) von

<sup>35</sup> Es handelte sich um den 1865 in Ybbs geborenen und seit 1903 als Ordinarius in Wien lehrenden Mathematiker Wilhelm Wirtinger, der sich auch an der Herausgabe der *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften* beteiligte und Teile von Riemanns Werken edierte.

<sup>36</sup> Hans Bauer hatte schon Anfang März 1918 in der *Physikalischen Zeitschrift* **19**, 163–165 (1918) auf eine von der speziellen Wahl der Koordinaten abhängige Definition der Energiekomponenten hingewiesen, die inzwischen auch schon von Schrödinger und von Einstein selbst bemerkt worden war.



Richard Willstätter, der 1915 mit dem Chemienobelpreis ausgezeichnet worden war. Dazu kamen eine Vorlesung über *Theoretische Astronomie* (4 Stunden) bei Ritter Hugo von Seeliger, Sommerfelds Vorlesung *Atombau und Spektrallinien* und dessen Seminar: *Übungen zur Thermodynamik* (je 1 Stunde).

Im darauf folgenden Sommersemester 1919 besuchte Pauli vorwiegend Vorlesungen mathematisch-physikalischen Inhalts, darunter die *Theorie der linearen Differentialgleichungen* von Ferdinand Lindemann (4 Stunden), *Theorie der analytischen Funktionen* von Alfred Pringsheim (4 Stunden), *Quantentheorie* von Wilhelm Lenz (2 Stunden), *partielle Differentialgleichungen der Physik* (4 Stunden) und *Relativitätstheorie* (2 Stunden) von Sommerfeld sowie ein ebenfalls von Sommerfeld geleitetes *theoretisch-physikalisches Seminar* (1 Stunde).

Als Pauli im Sommer 1920 seine Eltern in Wien aufsuchte, nutzte er die Gelegenheit, sich dort mit dem Privatdozenten Hans Thirring im Institut für theoretische Physik der Universität zu treffen. Auch über diese Begegnung hat Thirring in der oben erwähnten Radioansprache berichtet: „Ich hatte im Jahr 1918 im Zusammenhang mit der neuen Gravitationstheorie Einsteins eine Arbeit über den Einfluß der Eigenrotation der Sonne auf die Bewegung der Planetenbahnen publiziert,<sup>37</sup> die Paulis besonderes Interesse erweckte. Er kam zu mir, nicht als Fragender sondern mit einem konkreten Vorschlag zur Weiterführung einiger damit im Zusammenhang stehender recht verzwickter Rechnungen, an die ich noch nicht recht anbeißen wollte, und meinte, daß müsse man doch sofort angehen. Wir setzten uns jeder für sich an einen Tisch und rechneten darauf los, daß uns die Köpfe rauchten. Wir kamen auch zum gleichen Ergebnis, nur mit dem Unterschied, daß er viel eleganter und geschickter anpackte und dementsprechend auch viel früher fertig war als ich. Selten ist mir die geniale Überlegenheit eines Fachkollegen so deutlich geworden wie bei der Begegnung mit dem damals 20jährigen Studenten Pauli.“

Sommerfeld veranstaltete regelmäßig sein sog. *Münchener physikalische Mittwochs-kolloquium*, das später zum Vorbild ähnlicher Einrichtungen an den meisten deutschsprachigen Hochschulen diente.<sup>38</sup> Im Rahmen dieser Veranstaltungen behandelte Sommerfeld am 23. September 1918 Fragen „Über allgemeine Relativitätstheorie“. Für Pauli war das ein ihm bereits vertrautes Gebiet, so daß er am 10. Dezember mit „Bemerkungen zur allgemeinen Relativität“ nochmals zur Diskussion dieses damals sehr aktuellen Themas beitragen konnte.

Doch schon zuvor, am 29. November 1918, hatte Pauli seinen ersten Kolloquiumsvortrag über „Die neuen He-Serien bei starken elektrischen Feldern“

<sup>37</sup> Thirring war bei seiner Anfang 1918 in der *Physikalischen Zeitschrift* **19**, S. 33–39 publizierten Untersuchung über „Die Wirkung rotierender ferner Massen in der Einsteinschen Gravitationstheorie“ außerdem ein „kleines rechnerisches Versehen“ unterlaufen, das außer Pauli auch Max von Laue (vgl. seine an Thirring gerichteten Schreiben vom 18. Juni und 14. Juli 1920) bemerkt hatte. Thirring reichte daraufhin am 15. Oktober 1920 eine Berichtigung ein, in der er auf Laues und Paulis Mitteilungen hinwies. (Siehe hierzu Thirrings Erinnerungen in den *Physikalischen Blättern* **14**, 212–214 (1958)). – Pauli hatte außerdem in seinem Sonderdruck der Thirringschen Abhandlung einen mehrseitigen Entwurf mit Rechnungen über *Das Elementargesetz der Gravitation in der allgemeinen Relativitätstheorie* abgelegt.

<sup>38</sup> Vgl. hierzu Michael Eckerts ausgezeichnete Darstellung *Die Atomphysiker. Eine Geschichte der theoretischen Physik am Beispiel der Sommerfeldschule*. Braunschweig/Wiesbaden 1993.

gehalten. Die Teilnehmer waren durch seine erstaunlichen Kenntnisse offenbar beeindruckt, denn von nun genöß er den Ruf eines *Wunderkindes*, dem Sommerfeld sein ganz besonderes Vertrauen schenkte. Bei dieser Gelegenheit berichtete Pauli über die neuen, die üblichen Auswahlregeln für optische Übergänge durchbrechenden Kombinationslinien, auf deren Erscheinen Niels Bohr im ersten der am 27. April 1918 von der Kopenhagener Druckerei ausgelieferten Teil seiner drei grundlegenden Abhandlungen *On the quantum theory of line spectra* aufmerksam gemacht hatte.<sup>39</sup> Dieses war für Pauli wohl der erste Anlaß, durch die Lektüre dieser Schriften tiefer in Bohrs neuartiges Gedankengebäude einzudringen. Später, während seines Aufenthaltes in Kopenhagen, sollte Pauli die Frage des Auftretens solcher neuer Kombinationslinien unter dem Einfluß äußerer elektrischer Felder nochmals aufgreifen und – in Abstimmung mit den experimentellen Ergebnissen der dortigen Experimentatoren – durch eine theoretische Untersuchung ihrer Intensitäten abschließen. „Vielleicht kann ich das zu einer Habilitationsschrift ausbauen,“ schlug er Sommerfeld im Juni 1923 vor [37].

### Pauli wird mit der Abfassung des *Relativitätsartikels* betraut

Sommerfeld wirkte auch als Organisator und Herausgeber des Physikbandes bei der großen *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften* mit, der „wertvollsten *Encyklopädie* der theoretischen Physik“ und eine Art Vorläufer des ab 1926 beim *Springer-Verlag* in Berlin erscheinenden „blauen“ *Handbuches der Physik*.<sup>40</sup> „Geboren kurz vor der Jahrhundertwende aus dem stolzen Streben, sich Rechenschaft über den gesicherten Schatz an mathematischer Forschung zu geben,“ war diese *Encyklopädie* durch „Felix Kleins umfassenden Geist und organisatorische Tatkraft auf die breiteste Basis gestellt.“ In diesem dreigeteilten Physikband sollten, als ihr vornehmstes Ziel, die grundlegenden Gebiete der Physik in ihrer mathematischen Behandlung durch „die hervorragendsten Forscher, z. Teil die eigentlichen Schöpfer der zu bearbeitenden Gebiete als Berichterstatter“ vorgestellt werden.

Schon frühzeitig hatte Sommerfeld mit der Verwirklichung des Werkes begonnen<sup>41</sup> und sich deshalb auch Einsteins Zusage zur Mitarbeit bei einem Referat

<sup>39</sup> Auch Sommerfeld hat (auf S. 413) in der zweiten im September 1920 fertiggestellten Auflage von *Atombau und Spektrallinien*, bei der ihm Pauli geholfen hatte, auf eine solche Durchbrechung des Auswahlprinzips beim ionisierten Helium hingewiesen.

<sup>40</sup> Aus einer Besprechung von P. P. Ewald in der *Physikalischen Zeitschrift* **24**, 491 (1923). – Den unvorhergesehenen Erfolg gleich nach dem Start des Unternehmens führte Klein {in einem Bericht in der *Physikalischen Zeitschrift* **2**, 90–96 (1900)} auf ein bereits latent vorhandenes Bedürfnis nach einem solchen enzyklopädischen Werk der mathematischen Wissenschaften zurück.

<sup>41</sup> Sommerfeld hat in seiner *Vorrede zum fünften Bande* auch über Entstehungsgeschichte des ganzen Werkes berichtet, das „fast 25 Jahre in Anspruch genommen hat“ und somit auch die frühesten Anfänge der Relativitäts- und Quantentheorie dokumentiert. – Vgl. hierzu auch Michael Eckerts Darstellung [1993, S. 28–36] in seiner Geschichte der Sommerfeldschule.

über die *Relativitätstheorie* verschafft.<sup>42</sup> Wegen zu großer wissenschaftlicher Anspannung war Einstein aber wieder zurückgetreten, so daß diese Aufgabe nun allein auf Sommerfeld zurückfiel.

Besonders durch die Aufsehen erregenden Berichte über die Bestätigung der von der allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagten Effekte während der Sonnenfinsternis vom 29. Mai 1919 war das Bedürfnis nach einer kompetenten Darstellung immer dringender geworden; und an eine weitere Aufschiebung war jetzt nicht mehr zu denken. Um so erfreuter war Sommerfeld über seinen neuen Schüler, der dieses Gebiet so vollständig meisterte, daß er ihn – wahrscheinlich nicht ohne sich vorher mit Einstein und Klein abgesprochen zu haben – zur Mitarbeit an dem *Relativitätsartikel* einladen konnte.

Doch auch dieser Plan mußte bald wieder geändert werden, weil Sommerfeld immer stärker durch die raschen Fortschritte in der Atomphysik in Anspruch genommen wurde. Dazu kam die Vorbereitung einer zweiten Auflage seines Werkes *Atombau und Spektrallinien*, das, einem Ausspruch Schrödingers zufolge, bald als „our standard work at present in Germany in all question of the atom“ gelten sollte. Seit dem Frühjahr 1920 wurde deshalb die Redaktion des Relativitätsartikels Pauli alleine überlassen.<sup>43</sup>

Weil Pauli schon bei seinem Studienantritt den üblichen Vorlesungsstoff weitgehend beherrschte, bot ihm die Arbeit an diesem Encyklopädieartikel während des bis zu seiner Promotion vorgeschriebenen Zeitraumes von sechs Semestern die notwendige Muße, intensive mathematische und physikalische Literaturstudien zu betreiben. Durch das Studium der mathematischen Literatur zur Relativitätstheorie konnte er sich auch von Anfang an mit den in ihr zum Tragen kommenden invariantentheoretischen Methoden und Gesichtspunkten vertraut machen, die von nun an eine zunehmende Rolle in der gesamten Physik zu spielen begannen. Ein frühes Beispiel dafür war das bei der Ordnung der komplizierten Spektren von Paulis Münchener „Praktikums-Leidgenossen“ Otto Laporte festgestellte Auftreten nicht kombinierender *gerader* und *ungerader* Terme [53], das Paul Wigner später als einen ersten Hinweis auf die Bedeutung der *Parität* für das Verständnis von Atomvorgängen angesehen hat.

Durch diese Tätigkeit kam Pauli nun auch mit einigen der führenden Forscher seiner Zeit in eine nähere Verbindung. Wie Sommerfeld in seiner *Vorrede zum fünften Bande* der *Encyklopädie* besonders hervorhob, hatte „Herr Klein noch in jüngster Zeit beim Artikel über Relativitätstheorie den Schatz seiner wissenschaftlichen Erfahrung uns aufs freigebigste zur Verfügung gestellt“.<sup>44</sup> Unter anderem hatte ihnen Klein seine Hefte mit Aufzeichnungen überlassen

<sup>42</sup> Vgl. W. Lorey: *Das Studium der Mathematik an den deutschen Universitäten seit Anfang des 19. Jahrhunderts*. Leipzig und Berlin 1916. Dort S. 233.

<sup>43</sup> Sommerfeld berichtete in seinem Begründungsschreiben für Paulis Ernennung zum *korrespondierenden Mitglied* der *Bayerischen Akademie der Wissenschaften* (vgl. Band IV/1, S. 265), er habe nach Einsicht in Paulis ersten Entwürfe für den Relativitätsartikel „auf jede Mitwirkung verzichtet.“

<sup>44</sup> Von Kleins 11 Schreiben an Pauli sind nur vier, z. T. nur in Auszügen, in Band I aufgenommen. In Anbetracht ihrer Bedeutung für die Entstehungsgeschichte der allgemeinen Relativitätstheorie sollen auch diese Briefe nun vollständig im *Supplementband* wiedergegeben werden.

und Pauli sogar gestattet [10], sie „so lange zu behalten, bis die ganze Arbeit an dem Encyklopädieartikel erledigt ist“.

### Richtungsquantelung und erste Beiträge zur Quantentheorie des Magnetismus

Das Erscheinen des Relativitätsartikels im September 1921 fällt nahezu mit Paulis Studienabschluß zusammen, für den er als Dissertationsschrift eine systematische Untersuchung des Wasserstoffmolekülions gemäß der Bohr-Sommerfeldschen Quantentheorie der Periodizitätssysteme angefertigt hatte. Zuvor hatte er aber auch schon durch Anwendung der Quantentheorie auf das Problem der diamagnetischen und dielektrischen Eigenschaften der Gase einige wegweisende Erkenntnisse gewonnen. Besonders sein österreichischer Weggefährte Erwin Schrödinger, der sich zu jener Zeit mit ähnlichen Fragen in Jena befaßte, freute sich [8] „zu hören, daß Sie sich dem armen, seit längerer Zeit vernachlässigten Magnetismus zugewendet haben.“

Pauli war es aufgefallen, daß die Vorstellung kreisender Elektronen bei den damaligen Atommodellen mit dem Auftreten permanenter magnetischer Momente einhergeht, obwohl bei vielen einatomigen Gasen im allgemeinen kein Paramagnetismus beobachtet wurde. Bohr war deshalb „der Ansicht, daß die Elektronentheorie des Magnetismus (das Biot-Savartsche Gesetz) bei Anwendung auf atomare Vorgänge versagt.“<sup>45</sup> Eine weitere solche *magnetomechanische Anomalie* sollte auch in der Theorie der *anormalen* Zeemaneffekte auftreten. Die damit zusammenhängenden Probleme konnten aber erst in den folgenden Jahren durch Alfred Landé und Pauli schrittweise aufgeklärt und schließlich auf ihre Ursachen (Elektronenspin und Quantenmechanik) zurückgeführt werden.

Zunächst mußte die schon im Jahre 1916 von Sommerfeld und Debye zur Erklärung der *normalen* Zeemaneffekte eingeführte Idee der *Richtungsquantelung* weiter ausgebaut werden. Im September 1920, während der Nauheimer Naturforscherversammlung, führte Pauli den Begriff des *Bohrschen Magnetons* als eine neue Elementareinheit des Magnetismus ein. Er zeigte, daß sie bei der Berechnung der paramagnetischen Suszeptibilität von Molekülen zu einer Korrektur der auf klassischem Wege gewonnenen Langevinschen Formel führte.<sup>46</sup> In einer weiteren noch im Juli 1921 eingereichten Abhandlung wendete er die Idee der räumlichen Quantelung auch auf den elektrischen Fall an und gelangte so zu einem neuen Ausdruck der Debyeschen Formel für die Dielektrizitätskonstante von Dipolgasen.

<sup>45</sup> Siehe hierzu G. Wentzels Referat über die „Fortschritte der Atom- und Spektraltheorie“ in den *Ergebnissen der exakten Naturwissenschaften* **1**, 298–314 (1922), dort S. 303. Sogar in seinem Gratulationsschreiben vom 21. Januar 1923 zur Verleihung des Nobelpreises konnte Sommerfeld sich nicht enthalten, Bohr diese „fürchterliche Vorstellung vom Magnetismus“ vorzuwerfen.

<sup>46</sup> W. Pauli: Quantentheorie und Magneton. *Physikalische Zeitschrift* **21**, 615–617 (1920). – Vgl. W. Gerlach. „Magnetismus und Atombau“. *Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften* **2**, 124–146 (1923), dort S. 137.

Durch diese Vorarbeiten hat Pauli dazu beigetragen, daß die grundlegende Bedeutung der Richtungsquantelung auch für die Analyse der Atomstruktur Ernst genommen wurde und in den entsprechenden Anwendungen durch Sommerfeld (Einführung einer *dritten* Gesamtdrehimpuls-Quantenzahl  $j$ )<sup>47</sup> und Alfred Landé (Einführung des *Vektormodells* und des *g-Faktors*)<sup>48</sup> zur Geltung kam. Als Otto Stern gemeinsam mit Walther Gerlach das berühmte Experiment zum Nachweis der Richtungsquantelung bei Atomstrahlen in Frankfurt vorbereiteten und damit die später von Stern in Hamburg so erfolgreich fortgesetzte Serie von Molekularstrahlenexperimenten zum Nachweis der Quantenstruktur der Materie eröffnete [87], hat Pauli auch den zunächst noch „ungläubigen Stern“ von der Existenz eines solchen Quanteneffektes zu überzeugen versucht [16a, 20].<sup>49</sup>

### Die Dissertation über das $H_2^+$ -Molekülion

Zu den brennendsten Fragen der damaligen Quantentheorie gehörte die Frage, ob Bohrs beim Wasserstoffatom bewährtes Quantisierungsverfahren auch bei anderen Atomsystemen eine widerspruchsfreie Beschreibung der Tatsachen ermöglichte. Sommerfeld hatte die Bohrsche Theorie zunächst für Systeme mit mehreren Freiheitsgraden erweitert und erfolgreich zur Beschreibung der Feinstruktur des H-Atoms verwendet. Es war aber noch nicht geklärt, ob das angewendete Quantisierungsverfahren auch *generell* bei anderen Periodizitätssystemen richtige Ergebnisse zu liefern vermochte.

Während Bohr bei der Suche nach einer solchen allgemeinen Theorie – trotz seiner allgemeinen Skepsis – weiterhin Korrespondenz- und Stabilitätsbetrachtungen heranzog, setzte Sommerfeld vielmehr, um zu einer solchen rationalen „Quantenmechanik“<sup>50</sup> zu gelangen, „die größere Hoffnung auf die Zauberkraft der Quanten“ [72].<sup>51</sup> Die anschaulichen Modelle, die er zur Illustration der neuen Atomtheorie noch in den ersten Auflagen von *Atombau und Spektrallinien* heranzog, hatten bereits bei den einfachsten Bohrschen Ringmodellen versagt – wie beim  $H_2^+$ -Molekülion und beim He-Atom – indem sie instabile Bahnen und falsche Werte der empirisch bestimmten Ionisierungsspannung ergaben.

Um die geeignete Methode zur Ermittlung der stationären Zustände bei komplizierteren Atomstrukturen herauszufinden, sollte Pauli in seiner Dissertation

<sup>47</sup> A. Sommerfeld: Allgemeine spektroskopische Gesetze, insbesondere ein magnetooptischer Zerlegungssatz. *Annalen der Physik* **63**, 221–263 (1920).

<sup>48</sup> Siehe hierzu Landés Bericht über die „Fortschritte beim Zeemaneffekt“ in den *Ergebnissen der exakten Naturwissenschaften* **2**, 147–162 (1923), dort S. 155f.

<sup>49</sup> Einzelheiten zur Geschichte dieses Experimentes sind in einem Aufsatz von Bretislav Friedrich und Dudley Herschbach im Dezemberheft 2003 von *Physics Today* zusammengestellt.

<sup>50</sup> Diese Bezeichnung war nicht erst – wie öfters behauptet – durch Max Born eingeführt, sondern auch schon viel früher in München üblich (vgl. z. B. S. 298 in Wentzels oben genannten Referat aus dem Jahre 1922).

<sup>51</sup> In einem Schreiben vom 3. März 1920 an Sommerfeld hatte Born dessen unkritische Darstellung in der 1. Auflage von *Atombau und Spektrallinien* gerügt: „Sie stellen manche Sachen so dar, daß der Laie glauben muß, alles wäre in Ordnung; aber das ist doch oft nicht so. Z. B. die Molekülmodelle  $H_2$  etc., ferner die ganze Theorie der Röntgenspektren.“

eine gründliche Untersuchung des  $H_2^+$ -Molekülions durchführen.<sup>52</sup> Im Gegensatz zur bisherigen Vorgehensweise mit ihren mehr oder weniger willkürlich eratenen Elektronenkonfigurationen (wie ring- oder würfelförmige Anordnungen oder sog. *Ellipsenvereine*) wollte er mit Hilfe allgemeiner theoretischer Prinzipien die Gesamtheit aller mechanisch möglichen Bahnen systematisch ermitteln, um dann unter ihnen die stabilen Quantenbahnen aussondern zu können.

Dieses ließ sich bei dem Modell des  $H_2^+$ -Molekülions mit zwei festliegenden Kernen und einem frei beweglichen Elektron in guter Näherung ausführen. Ein solches Zweizentrensystem stellt ein *separierbares* Periodizitätssystem dar, das bereits im 19. Jahrhundert durch Carl Gustav Jacobi exakt behandelt worden war. Nachdem Pauli in Übereinstimmung mit Bohrs Kriterien solche Bahnen, die im Laufe ihrer Bewegung den beiden Kernen beliebig nahe kommen, *ausgeschlossen* hatte, blieben noch *drei* verschiedene im Endlichen verlaufende und nicht miteinander zusammenhängende Bahntypen übrig: die *in* der Mittelebene zwischen den beiden Kernen liegenden *ebenen* Bahnen, und zwei weitere räumliche Bahntypen, die entweder *symmetrisch* zur Mittelebene oder gänzlich *asymmetrisch* auf einer der beiden Seiten der Mittelebene verlaufen. Mit Hilfe von Stabilitätsüberlegungen konnte Pauli zeigen, daß alle in der Mittelebene gelegenen Bahnen instabil sind und deshalb ausscheiden. Er konzentrierte sich deshalb auf die durch drei Quantenzahlen charakterisierbaren *symmetrischen* Bahnen, deren Stabilität nachweisbar war. Unter diesen Bahnen bestimmte er die Bahn kleinster Energie als *Grundzustand*. Die mögliche Existenz weiterer solcher stabiler Zustände bei den *asymmetrischen* Bahnen blieb in seiner Untersuchung allerdings noch offen.

Diese von Pauli nach allen Regeln der damaligen Theorie sorgfältig berechneten und auf ihre Stabilität hin geprüften Quantenzustände waren jedoch mit der Ionisierungsspannung und anderen empirisch bestimmten Eigenschaften des Molekülions ebensowenig vereinbar wie bei den inzwischen gewonnenen Erfahrungen bei den He-Atomen.<sup>53</sup> Offenbar hinterließ dieses enttäuschende Ergebnis bei Pauli und Heisenberg einen so tiefen Eindruck,<sup>54</sup> daß sie jetzt an der Theorie

<sup>52</sup> Pauli legte im Juli 1921 seine 43 Schreibmaschinenseiten umfassende *Inaugural-Dissertation* der Philosophischen Fakultät der Universität München vor. Eine verbesserte und erweiterte Fassung reichte er erst im März 1922 in den *Annalen der Physik* zur Veröffentlichung ein.

<sup>53</sup> Dieses Ergebnis wurde jedoch {von Martin C. Gutzwiller, *American Journal of Physics* **66**, 309 (1998)} einer falschen Behandlung der Drehimpulsquantisierung zugeschrieben. Um so bemerkenswerter ist es, daß Sommerfeld trotz dieser Unsicherheiten am 9. Januar 1924 dem *Deutschen Museum* in München auf Anfrage „genaue Angaben über das Modell des Wasserstoffions“ in Kürze zur Verfügung zu stellen versprach. „Ich muß nur noch an Dr. Pauli nach Hamburg wegen einiger Details schreiben.“ – Eine korrekte Berechnung der unteren Elektronenzustände dieses  $H_2^+$ -Modells haben M. P. Strand und W. P. Reinhardt 1979 im *Journal of Chemical Physics* **70**, S. 3812–3827 veröffentlicht.

<sup>54</sup> In seinen „Erinnerungen an die Zeit der Entwicklung der Quantenmechanik“ (1960, S. 41) schrieb Heisenberg: „Ein erstes Ergebnis von entscheidender Bedeutung war der von Pauli (im Sommer 1922) geführte Nachweis, daß man durch Anwendung der Bohr-Sommerfeldschen Quantenbedingungen auf das Wasserstoffmolekül-Ion nicht zu den richtigen stationären Zuständen kommen konnte.“ – C. Jensen hat dagegen {in einem in den *Historical Studies in the Physical Sciences* **15**, 81–106 (1984) erschienenen Aufsatz} nachzuweisen gesucht, das die Bedeutung von Paulis Ergebnis für die Entwicklung der Quantentheorie im Nachhinein stark überschätzt wurde.