

Wolfgang Pauli – Leben und Werk

von Wolfgang Steinicke, Umkirch



Einleitung

Wolfgang Pauli ist zweifellos einer der bedeutendsten Physiker des 20. Jahrhunderts – und dies war bekanntlich reich an großen Namen, man denke nur an Einstein, Planck oder Heisenberg. Trotzdem hat es Pauli nicht geschafft, ein ähnlich großes öffentliches Ansehen zu gewinnen. Dieser Umstand drückt sich insbesondere darin aus, dass es bislang keine umfassende Biografie über Pauli gibt – wohingegen andere Physiker mit z.T. mehreren Biografien aufwarten. Paulis Persönlichkeit und Werk ist, im Gegensatz zu Heisenberg, schwer zu fassen. Zum Einem sind viele seiner physikalischen Beiträge nur in Form persönlicher Mitteilungen (Briefe) vorhanden, zum Anderen hat er es auch, mehr als andere, gewagt, die „reine“ Physik mit Psychologie und Philosophie zu verbinden.

Bei Insidern ist Paulis Rang allerdings unumstritten. Und dies trotz (oder gerade wegen) seiner äußerst kritischen, oftmals sarkastischen Art mit Kollegen umzugehen. Deren Bewunderung für das tiefgreifende physikalische Verständnis und den immensen Einfluss Paulis lässt sich in einer einzigen Charakterisierung ausdrücken: „Das Gewissen der Physik“.¹

1 Die Zeit in Wien

Wolfgang Ernst Friedrich Pauli wurde am 25. April 1900 in Wien geboren. Sein Vater Wolf Pascheles (1869-1955) war Jude und stammte aus einer renommierten Prager Verlegerfamilie.² Er studierte in Prag Medizin und besuchte Vorlesungen des Physikers Ernst Mach (1838-1916); Machs Sohn Ludwig war ein Kommilitone. 1893 siedelte er nach Wien über, konvertierte dort 1898 aus beruflichen Gründen zum katholischen Glauben und nannte sich fortan Wolfgang Joseph Pauli. Er wurde Professor für Kolloidchemie in Wien und flüchtete 1938 nach Zürich.



Wolfgang Joseph Pauli

¹ Peierls, R., *Bio. Mem. Fell. Roy. Soc.* **5**, 175 (1960)

² Smutny, F., *Ernst Mach and Wolfgang Pauli's ancestors in Prague*, *Eur. J. Phys.* **11**, 257-261 (1990)

Die Mutter Berta Camilla “Maria” Pauli (1878-1927), geb. Schütz, war eine bekannte Journalistin und aktive Frauenrechtlerin. Die Heirat fand im Mai 1899 in Wien statt. Wolfgang Paulis jüngere Schwester, Hertha Pauli (1906-1973), arbeitete als Schriftstellerin und Schauspielerin und engagierte sich ebenfalls in der Frauenbewegung.

Ernst Mach, seit 1895 Philosophie-Professor in Wien, wurde Paulis Patenonkel. Dies erklärt auch seinen zweiten Vornamen „Ernst“; „Wolfgang“ geht auf den Vater, „Friedrich“ auf den Großvater, Friedrich Schütz, zurück. Über Mach schreibt Pauli später:



Wolfgang mit Mutter 1901



Ernst Mach

„Er war wohl eine stärkere Persönlichkeit als der katholische Geistliche, und das Resultat scheint zu sein, daß ich auf diese Weise antimetaphysisch statt katholisch getauft wurde.“³

Im Elternhaus herrschte eine aufgeschlossene, geistig anregende Atmosphäre. Mit seiner Schwester teilte er die Liebe zur Literatur, beide interessierten sich aber auch für Astronomie.

Nach der Grundschule besuchte Pauli ab 1910 das Humanistische Gymnasium in Wien-Döbling. Er gehörte der „Klasse der Genies“ an: Sie brachte, außer ihm, mit dem gleichaltrigen Richard Kuhn (1900-1967)

einen zweiten Nobelpreisträger (Chemie 1938) hervor. Pauli galt als Wunderkind der Mathematik. Bereits mit 13 las er Werke von Euler und Mach. Einstein studierte er heimlich während des Unterrichts, was auf Kosten des „normalen“ Stoffs ging. Trotzdem schaffte er im Juli 1918 sein Abitur mit Auszeichnung. Kurze Zeit später schrieb er seine erste Abhandlung, worin er sich mit der erweiterten Gravitationstheorie von Hermann Weyl (1885-1955), seinem späteren Kollegen in Zürich und Princeton, auseinandersetzte.⁴ Weyl hatte 1918 das bedeutende, aber schwierig zu lesende Buch „Raum-Zeit-Materie“ geschrieben, das viele junge Physiker (darunter Pauli und Heisenberg) inspirierte.



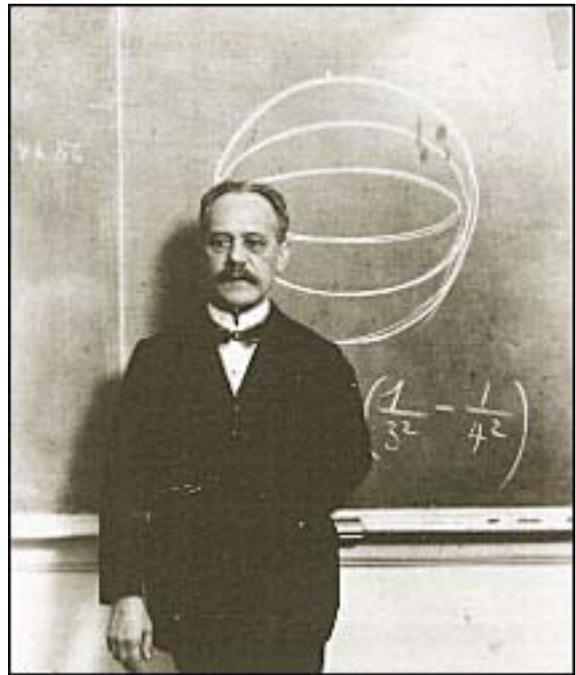
Pauli mit 18

³ Brief an Unbekannt, 31.3.1953; in: Enz, C. P., v. Meyenn, K. (Hg.), *W. Pauli - Das Gewissen der Physik*, Braunschweig 1988, S. 4

⁴ Pauli, W., jun., *Zur Theorie der Gravitation und der Elektrizität von H. Weyl*, *Physik. Zeitschr.* **20**, 457-467 (1919); vgl. auch Weyls Kommentar in: *Science*, 103, 216 (1946)

2 Studium in München

Was sein Studium anging, war Pauli zunächst hin und her gerissen: Sollte er eine literarische oder naturwissenschaftliche Laufbahn einschlagen? Er entschied sich für letztere und ging an die Ludwig-Maximilians-Universität nach München. Dort studierte er bei Arnold Sommerfeld (1868-1951), den er als seinen „eigentlichen“ Lehrer bezeichnete. Pauli bewunderte vor allem dessen enorme mathematisch-physikalische Fähigkeiten und spürte schnell, dass er zur richtigen Zeit am richtigen Ort war. 1915/16 hatte Sommerfeld zusammen mit Niels Bohr (1885-1962), Professor in Kopenhagen, ein neues Atommodell entwickelt. Grundlagen waren Bohrs Postulate für stabile Elektronenbahnen (die Sommerfeld zu Ellipsen verallgemeinerte) und das „Korrespondenzprinzip“, das den Zusammenhang mit der klassischen Physik herstellte. Mit Hilfe der Einsteinschen Energiequantenhypothese („Photonen“) konnten die Übergänge korrekt beschrieben werden. Es entstand ein „hybrides“ Atommodell, eine Kombination von klassischer Physik und Quantentheorie.



Sommerfeld

Sommerfeld war von den atomaren Quantenzahlen fasziniert und spekulierte über deren Bedeutung, was ihm die Bezeichnung „Institut für Atomystik“ einbrachte. Hierzu passt die 1915 von ihm eingeführte Feinstrukturkonstante $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$, die Elektrizität (e), Relativität (c) und Quantenwirkung (h) auf seltsame Weise verbindet. Sie ist (aus heutiger Sicht) die fundamentale Kopplungskonstante der elektromagnetischen Wechselwirkung. Werner Heisenberg (1901-1976) stieß 1920 dazu, mit dem Pauli bis an sein Lebensende verbunden war. Allerdings immer in einer gewissen Distanz, da beide Charaktere sehr verschieden waren. Ein weiterer Münchener Kommilitone war Gregor Wentzel.

Sommerfeld war von den atomaren Quantenzahlen fasziniert und spekulierte über deren Bedeutung, was ihm die Bezeichnung „Institut für Atomystik“ einbrachte. Hierzu passt die 1915 von ihm eingeführte Feinstrukturkonstante $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$, die Elektrizität (e), Relativität (c) und Quantenwirkung (h) auf seltsame Weise verbindet. Sie ist (aus heutiger Sicht) die fundamentale Kopplungskonstante der elektromagnetischen Wechselwirkung. Werner Heisenberg (1901-1976) stieß 1920 dazu, mit dem Pauli bis an sein Lebensende verbunden war. Allerdings immer in einer gewissen Distanz, da beide Charaktere sehr verschieden waren. Ein weiterer Münchener Kommilitone war Gregor Wentzel.

Pauli war das krasse Gegenteil zum Naturburschen Heisenberg; ein Nachtmensch, der das Münchener Leben in vollen Zügen genoss - und manche Morgenvorlesung verpasste. In den Studentenjahren zeigte sich bereits deutlich seine gefürchtete kritisch-ironische, ja bisweilen sarkastische Art. Dabei ging es ihm aber ausschließlich um die Klarheit und Schärfe der physikalischen Aussagen. Sommerfeld war von den Fähigkeiten des jungen Pauli derart beeindruckt, dass er ihn bat, das Kapitel über Relativitätstheorie in der „Enzyklopädie der



Heisenberg

mathematischen Wissenschaften“ zu schreiben⁵ (Einstein hatte wegen Überlastung abgelehnt). Diese Aufgabe beschäftigte ihn 1920 – 1921 und heraus kam ein Werk, das lange Zeit den Standard definierte. Selbst die späte englische Neuauflage⁶ enthält nur wenig Ergänzungen bzw. Änderungen. Einstein schrieb 1922 in einer Rezension:

„Wer dieses reife und groß angelegte Werk studiert, möchte nicht glauben, daß der Verfasser ein Mann von 21 Jahren ist. Man weiß nicht, was man am meisten bewundern soll, das psychologische Verständnis für die Ideenentwicklung, die Sicherheit der mathematischen Deduktion, den tiefen physikalischen Blick, das Vermögen übersichtlicher systematischer Darstellung, die Literaturkenntnis, die sachliche Vollständigkeit, die Sicherheit der Kritik.“⁷



Der wilde Pauli

Danach hat sich Pauli der Quantentheorie zugewandt, die ihn zeitlebens beschäftigen sollte. Bereits nach sechs Semestern, also zum frühest möglichen Zeitpunkt, promovierte er im Juli 1921 („summa cum laude“) mit einer Arbeit über die Elektronenbahnen im H_2^+ -Ion nach der Bohr-Sommerfeldschen Atomtheorie.⁸ Das Ergebnis war aus seiner Sicht enttäuschend, es zeigte klar die Schwächen des Modells – und eine neue Quantentheorie, die alle Phänomene erklärte, war noch nicht in Sicht. Viele Gespräche mit Heisenberg zeugen von seinem Frust.⁹

3 Göttingen und Kopenhagen

Im Oktober 1921 trat Pauli eine Assistentenstelle bei Max Born (1882-1970) in Göttingen an. Born über Pauli:

„Er ist erstaunlich klug und kann sehr viel; einen so guten Assistenten werde ich nie wieder kriegen.“¹⁰



Born und Pauli

⁵ Pauli, W., *Relativitätstheorie*, in: Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften, Bd. 5, Teil 2, Teubner, Leipzig 1920

⁶ Pauli, W., *Theorie of Relativity*, Dover Publ. 1956

⁷ Einstein, A., *Pauli, W., jun., Relativitätstheorie*, Naturwiss. **10**, 184-185 (1922)

⁸ Kronig, R., Weisskopf, V. F. (Hg.), *W. Pauli, Collected Scientific Papers*, Vol. 2, Wiley, New York 1964, S. 70

⁹ siehe z.B. Heisenberg, W., *Der Teil und das Ganze*, Piper, München 1969

¹⁰ Hermann, A., *Lexikon - Geschichte der Physik A-Z*, Aulis-Verlag, Köln 1978, S. 280

Auch hierhin folgte ihm Heisenberg. Pascual Jordan (1902-1980) stößt ebenfalls zu Borns Gruppe junger und äußerst fähiger Theoretiker. Pauli selbst blieb wie gewohnt „locker“, studierte neben der Physik vor allem die Kneipen und verschlief häufig die 11:00 Vorlesung. Seine Eskapaden wurden ihm, angesichts seiner überragenden Beiträge, wohlwollend verziehen.

Mit Bohrs Besuch im Sommer 1922 in Göttingen begann für Pauli eine neue Lebensphase. Die mehrwöchige Vortragsreihe über Atomphysik ist als „Bohr Festspiele“ in die Geschichte eingegangen. Seine intensiven Diskussionen mit Bohr führten zu einer Einladung nach Kopenhagen, wo Pauli ein Jahr verbrachte (1922/23). Bohr war in vielerlei Hinsicht wesensverwandt, etwa im Streben nach allgemeinen Erklärungen. Pauli vereinigte Sommerfelds mathematisches Können mit Bohrs philosophischer Durchdringung.



Bohr und Pauli

4 Hamburg: das Ausschließungsprinzip

Paulis nächste Station war Hamburg, ein idealer Ort zwischen Göttingen und Kopenhagen. Er wurde 1923 „wissenschaftlicher Hilfsarbeiter“ von Wilhelm Lenz (1888-1957), Ordinarius am neu gegründeten Institut für Theoretische Physik. Pauli genoss die weltoffene Stadt – und, nomen est omen, natürlich vor allem St. Pauli.



Lenz

1924 habilitierte er mit einer (immer noch klassisch begründeten) Arbeit über das Periodensystem und fand das Ergebnis wiederum unbefriedigend. Immer stärker forderte er radikale Veränderungen, die aber über bloßes „ad hoc Herumbasteln“ (was er Heisenberg vorwarf) hinausgehen müssten. Die klassisch-mechanische Erklärung der Quantenphänomene (hauptsächlich durch Sommerfeld) lag in ihren letzten Zügen – und Pauli war wesentlich an ihrem Begräbnis beteiligt.

Zur Erklärung der Hyperfeinstruktur postulierte er 1924 ein inneren Drehimpuls des Atomkerns¹¹, der später als „Kernspin“ bezeichnet wurde (man dachte damals noch, der Atomkern bestünde aus Protonen und Elektronen). Im gleichen Jahr befasste sich Pauli mit dem anomalen Zeemann-Effekt.

¹¹ Pauli, W., *Zur Frage der theoretischen Deutung der Satelliten einiger Spektrallinien und ihrer Beeinflussung durch magnetische Felder*, Naturwiss. **12**, 741-743 (1924)

Pieter Zeeman (1865-1943) hatte eine Aufspaltung der Energieteile von Atomen im Magnetfeld beobachtet. Einfach liegen die Verhältnisse beim normalen Zeeman-Effekt. Aufgrund der Singulettzustände hat man es hier allein mit magnetischen Bahnmomenten der Atome zu tun. Paulis Versuch, den anomalen Zeemann-Effekt (die beobachtete komplexe Aufspaltung bei Nichtsingulettatomen) auf klassische Weise zu deuten, offenbarte das ganze Dilemma der Bohr-Sommerfeldschen Atomtheorie. Entscheidend für die Lösung des Problems war die Einführung einer vierten, halbzahligen Quantenzahl (Werte $\pm\frac{1}{2}$), zusätzlich zur bekannten Haupt-, Neben-, und magnetischen Quantenzahl.¹² Pauli spricht hier von einer „klassisch nicht beschreibbaren Art von Zweideutigkeit“, und Bohr erkennt gar einen „unmechanischen Zwang“.¹³

Auf diesem Wege gelangte Pauli Ende 1924 zum Ausschließungsprinzip („Pauli-Prinzip“):

„Es kann niemals zwei oder mehrere äquivalente Elektronen im Atom geben, für welche in starken Feldern die Werte aller Quantenzahlen übereinstimmen.“¹⁴

Mit diesem Postulat, für das er 1945 den Nobelpreis erhalten sollte, ließ sich das Periodensystem, also die Besetzung der Elektronenorbitale der chemischen Elemente (insbesondere die „mystische Zahlenfolge“ 2, 8, 18, 32,... der Anzahl der Zustände), endlich korrekt aufbauen.

Goudsmit und Uhlenbeck interpretierten 1925 die neue Quantenzahl als „Spin“ - eine „klassische Rotation“ des Elektrons. Dies war bereits vorher von Ralph Kronig diskutiert worden, wurde aber (aufgrund von Paulis Bedenken) nicht publiziert. Pauli lehnte eine mechanische Deutung entschieden ab, akzeptierte aber später den Spin als eine innere Eigenschaft des Elektrons, da er sich in der Praxis bewährte.



Pauli 1925

Das Pauli-Prinzip konnte zunächst nur als zusätzliches Grundpostulat der klassischen Atomtheorie betrachtet werden, eine strenge Deduktion fehlte mangels einer neuen, „nicht-klassischen“ Quantentheorie (ein bedeutender Schritt war die von Fermi und Dirac 1926 eingeführte Statistik für Teilchen mit halbzahligen Spin). Paulis Unbehagen drückte sich in dem Satz aus:

„Die Physik ist momentan wieder sehr verfahren, für mich ist sie jedenfalls viel zu schwierig und ich wollte, ich wäre Filmkomiker oder so etwas und hätte nie etwas von Physik gehört. Nun hoffe ich aber noch, daß Bohr uns mit einer neuen Idee retten wird.“¹⁵

¹² Pauli, W., *Zur Frage der Zuordnung der Komplexstrukturterme in starken und schwachen äußeren Feldern*, Z. Phys. **20**, 371-387 (1924)

¹³ Serwer, D., *Hist. Stud. Phys. Sci.* **8**, 189 (1977)

¹⁴ Pauli, W., *Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronenbahnen im Atom mit der Komplexstruktur der Spektren*, Z. Phys. **31**, 765-785 (1925)

Es mag verwundern, dass sich Pauli in dieser wichtigen Phase des Umbruchs fast ein Jahr Zeit nimmt, einen Übersichtsartikel über die „klassische“ Quantentheorie zu schreiben, den er später selbstkritisch als das „Alte Testament“ bezeichnete¹⁶.

5 Die Quantenmechanik

1925 entstand in Göttingen und Kopenhagen die neue Quantentheorie. Pauli stand in ständigem Briefkontakt mit Heisenberg und Bohr, setzte sich, wie gewohnt kritisch mit beiden auseinander und gab viele wichtige Anregungen. Er selbst trat aber nicht an die Öffentlichkeit sondern überließ in dieser dramatischen Zeit anderen das Feld!



Bohr, Heisenberg und Pauli

Die entscheidende Publikation kam schließlich von Heisenberg, in der dieser die „Matrizenmechanik“ entwickelt. Pauli war hier vielleicht, wie so oft in seinem Leben, zu vorsichtig, wollte nicht mit Fragmenten an die Öffentlichkeit. Mit dem Ruhm der Anderen hatte er aber keinerlei Probleme, solange es dabei auch etwas zu kritisieren gab:

„Die Heisenberg'sche Mechanik hat mir wieder Lebensfreude und Hoffnung gegeben. Die Lösung des Rätsels bringt sie zwar nicht, aber ich glaube, daß es jetzt wieder möglich ist, vorwärts zu kommen. Man muss zunächst versuchen, die Heisenberg'sche Mechanik noch etwas mehr vom Göttinger formalen Gelehrten-schwall zu befreien und ihren physikalischen Kern noch besser bloßlegen.“¹⁷

Für Pauli war Heisenbergs phänomenologischer Ansatz - sich in der neuen Theorie allein auf beobachtbare Größen (Observable) zu stützen - durchaus akzeptabel. Er bemängelte aber, dass der direkte physikalische Weg dem mathematischen Formalismus geopfert wurde. Auf Paulis Seitenhiebe reagierte Heisenberg zornig:

„Betreffend Ihrer beiden letzten Briefe muss ich Ihnen noch eine Predigt halten, und Sie entschuldigen, wenn ich auf Bayrisch fortfahre: Es ist wirklich ein Saustall, daß Sie das Pöbeln nicht aufhören können. Ihre ewigen Schimpfereien auf Kopenhagen und Göttingen sind einfach ein schreiender Skandal. Sie werden uns doch lassen müssen, da wir jedenfalls nicht mit bösem Willen die Physik zu ruinieren trachten; wenn

¹⁵ Pauli an Kronig, 21.5.1925, PBW, Bd. 1, Brief 89, S. 215

¹⁶ Pauli, W., *Quantentheorie*, in: Geiger, H., Scheel K. (Hg.), *Handbuch der Physik*, Bd. 23, Berlin 1926. S. 1-278

¹⁷ Pauli an Kronig 9.10.1925

Sie uns vorhalten, daß wir so große Esel seien, daß wir doch nie etwas physikalisch Neues fertig brächten, so mag das richtig sein. Aber dann sind Sie doch ein ebenso großer Esel, weil Sie's auch nicht fertig bringen [...] Nichts für ungut und viele Grüße.“¹⁸

Die Versöhnung folgte aber bereits 1926 als Pauli die Heisenbergsche Matrizenmechanik auf das Wasserstoffatom anwendet, was (aufgrund ihrer komplizierten mathematischen Struktur) zu einem algebraischen Kraftakt ausartet.¹⁹ Pauli gelang es, das Wasserstoffspektrum exakt herzuleiten. Heisenberg, an diesem „einfachen“ Problem selbst gescheitert²⁰, war verblüfft und Pauli überzeugte mit seiner Publikation die Physikergemeinde von der Richtigkeit der neuen Theorie! Im selben Jahr wurde er zum Außerordentlichen Professor der Universität Hamburg ernannt.

Derweil überschlugen sich die Ereignisse. Erwin Schrödinger publizierte 1926 seine „Wellenmechanik“, deren zentrales Element die berühmte „Schrödingergleichung“ ist. Mit dieser Formulierung der Quantentheorie ließ sich das Wasserstoffatom wesentlich leichter behandeln. Es war wiederum Pauli, der als erster zeigen konnte, dass Wellen- und Matrizenmechanik äquivalent sind. Allerdings wählte er, für ihn typisch, das Medium „Brief“²¹ – und Schrödinger erntete mit seiner (späteren) Publikation die Lorbeeren!



Schrödinger

Die „Quantenmechanik“ (die Bezeichnung geht auf von Born zurück) entstand noch im selben Jahr. Der Engländer Paul Dirac (1902-1894), und unabhängig davon Born und Jordan, schufen eine Art Synthese oder Extrakt aus Matrizen- und Wellenmechanik in Form einer „Transformationstheorie“. Der heute gebräuchliche, streng mathematische Formalismus wurde allerdings erst 1932 von Johann von Neumann entwickelt. Hierin werden die Messgrößen (Observable) durch lineare hermitesche Operatoren repräsentiert, die auf Vektoren (Zustände des Quantensystems) im Hilbertraum wirken. Die reellen Eigenwerte der Operatoren, die sich durch unitäre Transformation ergeben, ent-



Pauli und Dirac

¹⁸ Heisenberg an Pauli 12.10.1925

¹⁹ Pauli, W., *Über das Wasserstoffspektrum vom Standpunkt der neuen Quantenmechanik*, Z. Phys. **36**, 336-363 (1926)

²⁰ Fierz, M., Weisskopf, V. (Hg.), *Theoretical Physics in the Twentieth Century, a Memorial Volume to Wolfgang Pauli*, Interscience, New York 1960, S. 43

²¹ Brief an Jordan, in: van der Waerden, B. L., in: Mehra, Jagdish, *The Physicist's Conception of Nature*, Reidel, Dordrecht 1973, S. 276

sprechen den möglichen Messwerten. Damit korrespondieren die möglichen Eigenzustände des Quantensystems.

Bereits 1926 war Pauli aufgefallen, dass Ort und Impuls (q, p) eines Quantensystems eine bemerkenswerte Eigenschaft haben, die kein klassisches Analogon besitzt:

„Man kann die Welt mit dem p -Auge und man kann sie mit dem q -Auge ansehen, aber wenn man beide Augen zugleich aufmachen will, dann wird man irre.“²²

Heisenberg schrieb zurück:

„Dass ich so spät antworte kommt daher, daß Ihr Brief hier dauernd die Runde macht und Bohr, Dirac und [Friedrich] Hund uns darum raufen.“²³

Auf diesem Brief findet sich eine interessante Randbemerkung von Pauli:

„In einem gegenüber der Periode kurzen Zeitintervall hat es keinen Sinn, vom Zustand, d.h. Energiewert zu sprechen.“

Dies ist die Unbestimmtheitsrelation von Energie und Zeit! Das seltsame Verhalten von Ort und Impuls in der Quantenmechanik führte Heisenberg 1927 zur berühmten Unschärferelation. Interessanterweise zitiert Heisenberg in seiner Publikation Paulis Brief nicht. Paulis Reaktion auf Heisenbergs Erkenntnis war überschwänglich: *„Es wird Tag in der Quantentheorie.“²⁴*

Die quantenmechanische Unschärfe, oder besser Unbestimmtheit, von „konjugierten Observablen“ (die als Operatoren nicht vertauschbar sind) ist Grundlage für Bohrs Begriff der „Komplementarität“. Hier wird der Welle-Teilchen-Dualismus zum Prinzip erhoben, was sich in der „Kopenhagener Deutung der Quantentheorie“ niederschlägt. Pauli war von dieser Interpretation überzeugt:



Einstein und Pauli

„Die Phänomene haben eine neue Eigenschaft der Ganzheit, indem sie sich nicht in Teilphänomene zerlegen lassen, ohne das ganze Phänomen dabei wesentlich zu ändern.“²⁵

²² Pauli an Heisenberg, 19.10.1926, PBW

²³ Heisenberg an Pauli, 28.10.1926, PBW

²⁴ Erinnerung von Heisenberg; Brief verloren gegangen

Im intensiven Diskussionsprozess, der zu dieser Deutung führte, agiert Pauli als eine Art „hartnäckiger Schiedsrichter“ zwischen der intuitiven Art Bohrs und der mitunter formalen Sicht Heisenbergs. Letztlich war dies die treibende Kraft zur „Lösung des Quantenrätsels“.

Die Quantenmechanik wurde erstmals 1927 auf den Physikerkongressen in Como und Brüssel diskutiert. Letzterer, auch als 5. Solvay-Kongress berühmt geworden, war geprägt durch den heftigen intellektuellen Schlagabtausch zwischen Einstein und Bohr um die Kopenhagener Deutung. Einstein wollte diese nicht akzeptieren und ersann immer neue Gedankenexperimente, die Bohr allesamt kontern konnte. Pauli war über Einsteins Starrsinn, der sich zeitlebens nicht ändern sollte, entsetzt und sprach von einem „neurotischen Missverständnis“. Er kritisierte später auch Einsteins Versuche einer „einheitlichen Feldtheorie“ scharf, und hielt dessen klassische Vorstellungen für eine „ausgelutschte Zitrone“.



Solvay-Kongress 1927

1927 erschien Paulis Arbeit „Zur Quantenmechanik des magnetischen Elektrons“.²⁶ Hierin werden die 2-komponentigen „Pauli-Matrizen“ σ_x , σ_y , σ_z eingeführt, die auf „Spinoren“ wirken. Damit konnte die Schrödingergleichung auf eine Weise erweitert werden, die den (nunmehr etablierten) Elektronenspin berücksichtigt.

²⁵ Pietschman, H., *Die Physik und die Persönlichkeit von Wolfgang Pauli*, Ascona 1993, S. 4

²⁶ Pauli, W., *Zur Quantenmechanik des magnetischen Elektrons*, *Z. Phys.* **43**, 601-623 (1927)

6 Zürich und das Neutrino

Pauli folgte 1928, nach fünf Jahren in Hamburg, einem Ruf als Ordinarius für Theoretische Physik der ETH Zürich (als Nachfolger von Debye). Institutsleiter war Paul Scherrer, der „seinem Pauli“ die meiste administrative Arbeit abnahm.

Ebenfalls an der ETH wirkten Gregor Wentzel und (bereits seit 1913) Hermann Weyl. Der junge Robert Oppenheimer war 1928 Paulis Schüler. Seine ersten Assistenten waren Ralph Kronig (1928-29), Felix Bloch (1929) und Rudolf Peierls (1929-32). Als bald wurden regelmäßige „Physikalische Wochen“ veranstaltet und Zürich entwickelte sich zu einem bedeutenden Punkt auf der Landkarte der Theoretischen Physik.

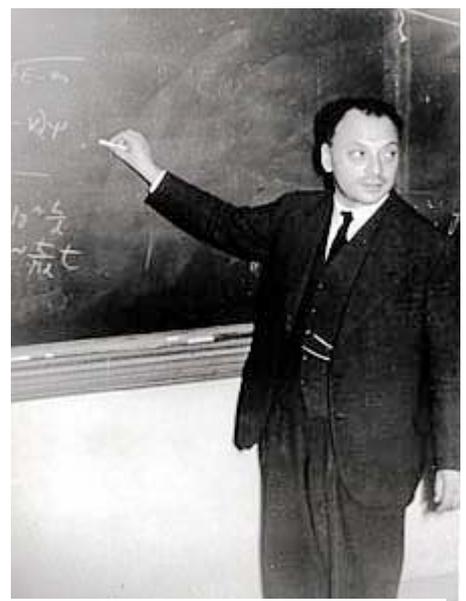


Oben: Physikalisches Institut der ETH Zürich; unten: Scherrer und Pauli

Vorlesungen oder Vorträge zu halten, war nicht Paulis Stärke; dagegen war er ein brillanter Schreiber. Der persönliche Kontakt (vor allem als strenger Lehrer) lag ihm mehr, und so entwickelten sich alle seine Assistenten zu bedeutenden Physikern. Er war, wie auch sein Kollege Weyl, fasziniert von der „Symmetrie“ in den Naturgesetzen. Dagegen zeigte er keinerlei Interesse an Festkörperphysik. Neben der theoretischen Physik beschäftigte er sich auch mit mathematischen, astronomischen und naturphilosophischen Fragen.

Interessant war Paulis Verhältnis zur Experimentalphysik. Als Theoretiker war ihm die Bedeutung des Experiments, als wesentlichem Element der Verifikation, natürlich voll bewusst – nur er selbst wollte und konnte dazu keinen praktischen Beitrag leisten. Er war das krasse Gegenteil eines Experimentalphysikers und bekannte frei:

„Ich verstehe zu wenig von Experimentalphysik.“²⁷



Pauli-Vorlesung

²⁷ Pauli an Klein, 18.2.1929, PBW, Bd. 2

Von Pauli ging eine „*faszinierende und zugleich beunruhigende Wirkung*“ aus (Kronig).²⁸ Dies drückt sich vor allem im legendären „Pauli-Effekt“ aus, der auch (in Anlehnung an seine Nobelpreisarbeit) als das „2. Pauli-Prinzip“ bezeichnet wird:

*„Es ist unmöglich, daß sich Prof. Pauli und ein funktionierendes Gerät im gleichen Raum befinden.“*²⁹

1929 und 1930 erschienen, gemeinsam mit Heisenberg, zwei richtungsweisende Publikationen über die „Quantendynamik der Wellenfelder“.³⁰ Sie beschreiben die Wechselwirkung von Strahlung und Materie und begründeten die relativistische Quantenfeldtheorie.

In dieser Zeit befasste sich Pauli auch intensiv mit der Deutung des radioaktiven Betazerfalls. Die Erklärung, dass das beobachtete kontinuierliche Energiespektrum des Elektrons eine Verletzung des Energieerhaltungssatzes impliziert (Bohr), konnte er nicht akzeptieren. In einem im Dezember 1930 geschriebenen Brief an die „*lieben Radioaktiven Damen und Herren*“³¹, die sich in Tübingen versammelt hatten, postulierte er die Existenz eines leichten, ungeladenen Teilchens mit Spin $\frac{1}{2}$, das er „Neutron“ (ν) nennt. Die konstante Energiesumme $E_e + E_\nu$ sorgt dafür, dass der Energieerhaltungssatz nicht verletzt wird. Als der Astronom Walter Baade, den Pauli aus Hamburg kannte, ihn in Zürich besuchte, gestand er:

*„Heute habe ich etwas Schreckliches getan, etwas, was kein theoretischer Physiker jemals tun sollte. Ich habe etwas vorgeschlagen, was nie experimentell verifiziert werden kann.“*³²

Etwas Ähnliches taten zur selben Zeit Dirac und Oppenheimer mit der Postulierung des Positrons.

1931 war Pauli Gastprofessor an der University of Michigan, Ann Arbor, und stellte seine Hypothese auf einer Konferenz im Juni in Pasadena vor. Die New York Times berichtete am Folgetag (17.6.1931):

„A new inhabitant of the heart of the atom was introduced to the world of physics today when Dr. Pauli of the Institute of Theoretical Physics, Zurich, Switzerland, postulated the existence of particles or entities which he christened as ‘neutrons’.“

Der Name „Neutron“ wurde 1932 an das von Chadwick entdeckte, und mit Paulis ν nicht identische, neutrale Kernteilchen vergeben. 1934 taufte Enrico Fermi das Pauli-Teilchen „Neutrino“ (kleines Neutron). Der experimentelle Nachweis des extrem schwach wechselwirkenden (Elektron-)Neutrinos gelang erst 1956 bei der Untersuchung des inversen Betazerfalls durch Reines und Cowan.

²⁸ Enz, C. P., v. Meyenn, K. (Hg.), *W. Pauli - Das Gewissen der Physik*, Braunschweig 1988

²⁹ Pietschmann, H., *Wolfgang Pauli – eine biographische Notiz*, Vorlesung am Inst. F. Theoretische Physik, Wien, 12. April 2000

³⁰ Pauli, W., Heisenberg, W., *Zur Quantenmechanik der Wellenfelder*, Z. Phys. **56**, 1-61 (1929); Teil II, Z. Phys. **59**, 168-190 (1930)

³¹ Pauli, W., *Zur älteren und neueren Geschichte des Neutrino*, in: Pauli, W., *Physik und Erkenntnistheorie*, Braunschweig 1984, S. 158

³² Hoyle, F., Proc. Roy. Soc. **A301**, 171 (1967)

1931 wurde Pauli in Amsterdam mit der Lorentz-Medaille geehrt. Bedingt durch die radikale Neuorientierung der Quantentheorie, erschien 1933 ein weiterer Übersichtsartikel im Handbuch der Physik, der als das „Neue Testament“ bekannt wurde.³³

Pauli Assistenten waren zu dieser Zeit Hendrik Casimir (1932-33), Victor Weisskopf (1933-36), Guido Ludwig (1936), Nicholas Kemmer (1936), Markus Fierz (1936-39) und Joseph Jauch (1940).



Weisskopf

7 Persönliche Probleme

Die Zeit in Zürich war auch geprägt von persönlichen Problemen. Aufgrund einer Affäre des Vaters nahm sich die Mutter 1927 mit Gift das Leben. Ein Jahr später heiratete der Vater die Bildhauerin Maria Rottler (die „böse Stiefmutter“). 1929 trat Pauli aus der Kirche aus. Bei einer seiner nächtlichen Touren lernte er die Berliner Tänzerin Käthe Margarethe Deppner kennen, die er kurzentschlossen im Dezember 1929 heiratete. Die Ehe verlief aber sehr unglücklich und Pauli ließ sich bereits nach einem Jahr wieder scheiden:

„Mit den Frauen und mir geht es gar nicht, und es wird wohl auch nie mehr etwas werden.“³⁴

1931/32 war der Tiefpunkt erreicht, verbunden mit Alkoholproblemen. Pauli entschloss sich, auf Anraten des Vaters, zu einer psychoanalytischen Behandlung bei Carl Gustav Jung in Zürich. Die Therapie dauerte von 1932-34 und wurde von Jungs Assistentin Erna Rosenbaum durchgeführt. Letztlich entstand eine beachtliche Sammlung von fast 1000 Träumen. Ein



C. G. Jung

wirklicher therapeutischer Erfolg stellte sich allerdings nicht ein.



Franca und Wolfgang Pauli

Wirklich positiv war dagegen das Zusammentreffen mit der Münchenerin Franciska „Franca“ Bertram (1901-1987) auf einem Ball in Zürich. Beide entdeckten schnell ihre Zuneigung und heirateten 1934 in London. Franca Pauli

³³ Pauli, W., *Die allgemeinen Prinzipien der Wellenmechanik*, in: Geiger, H., Scheel, K., (Hg.), *Handbuch der Physik*, Bd. 24, Berlin 1933, S. 83-269

³⁴ Pauli an Wentzel, 7.9.1931, PBW, Bd. 3, Brief 283a, S. 751

war die eigentliche Hilfe bei der Überwindung seiner psychischen Probleme! Die Ehe blieb kinderlos.

Es entwickelte sich eine lebenslange Freundschaft mit C. G. Jung. Psychologie und Naturwissenschaft beeinflussten sich dabei wechselseitig. So zeigte Pauli großes Interesse für die Jungschen Arbeiten, die er oft kritisch durchsah. Vieles davon schlug sich in seinem wissenschaftlichen Weltbild nieder:

„Es ist meine persönliche Meinung, dass ‚Realität‘ in der zukünftigen Wissenschaft weder ‚psychisch‘ noch ‚physisch‘ sondern sowohl beides als auch keines von beiden bedeuten wird.“³⁵

So erschien 1952 seine Arbeit „Der Einfluss archetypischer Vorstellungen auf die Bildung naturwissenschaftlicher Theorien bei Kepler.“³⁶

Die Zeit vor dem Krieg wurde aufgrund der wachsenden Repressalien durch die Nazis gegenüber der Wissenschaft auch für Pauli immer schwieriger. Er war seit 1938, dem „Anschluss“ Österreichs, formell deutscher Staatsbürger. Sein offizieller Status war „Halbjude“ (was allerdings nicht im Pass vermerkt war). Eine Schweizer Staatsbürgerschaft wurde ihm mehrfach verweigert.

8 Amerika und der Nobelpreis

Pauli war der festen Überzeugung, die Nazis brächten das „Ende der Wissenschaft über Europa“. Da in der Tat Deutschland seine Vormachtstellung aufgrund der Emigration vieler bedeutender Physiker mehr und mehr verlor, orientierte er sich Richtung Amerika und Russland. 1935-36 war Pauli Gastprofessor am renommierten Institute for Advanced Study in Princeton. 1936-39 nahm er an internationalen Konferenzen in Kopenhagen, Moskau und Odessa teil.



Kopenhagen 1936

³⁵ Brief an Pais, in: Pais, A.; Wolfgang Ernst Pauli, in: *The Genius of Science*, Oxford 2000, S. 210-262

³⁶ in: Jung, C. G., W. Pauli, *Natureerklärung der Psyche*, Zürich 1952, S. 129

1940 siedelte Pauli, auf Drängen von Johann von Neumann, nach Princeton über. Viele bedeutende Physiker und Mathematiker, darunter Albert Einstein, Eugene Wigner, Hermann Weyl und Kurt Gödel, hielten sich in dieser Zeit in Princeton auf.



Princeton

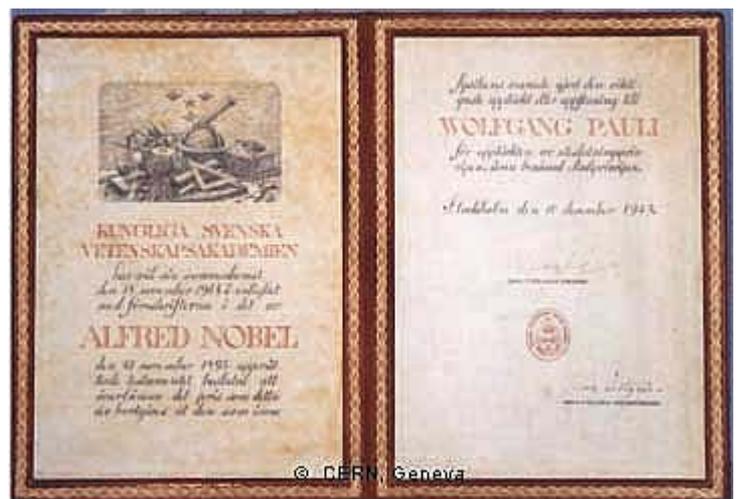


Weyl

Offiziell war Pauli von der ETH „beurlaubt“ (Wentzel vertrat ihn dort). Dieser Status wurde immer wieder (durch Führsprecher) verlängert, obschon zwischenzeitlich sogar der Ausschluss drohte. Im selben Jahr erschien seine bedeutende Arbeit über den „Zusammenhang von Spin und Statistik“.³⁷ Hierin gelang es ihm, das für Teilchen mit halbzahligen Spin (Fermionen) geltende „Pauli-Prinzip“ aus den Symmetrien der Quantenfeldtheorie herzuleiten.

1941 war Pauli erneut Gastprofessor in Ann Arbor und ein Jahr später an der Purdue University in Lafayette, Indiana. Er war als deutscher Staatsbürger nicht mit „Kriegsphysik“ befasst. Robert Oppenheimer, der wissenschaftliche Leiter des „Manhattan Projects“, fand das positiv. So blieben zumindest einige mit der Weiterentwicklung der theoretischen Physik befasst. Pauli beschäftigte sich Mesonen und Kernkräften, worüber er ein Standardwerk schrieb.³⁸

Der Höhepunkt seiner wissenschaftlichen Karriere war zweifellos die Verleihung des Nobelpreises für Physik 1945. Von Einstein nominiert, bekam er den Preis für das Ausschließungsprinzip: „Decisive contribution through his discovery in 1925 of a new law of nature, the exclusion principle or Pauli principle“. Für das Komitee rangierte das Pauli-Prinzip deutlich vor dem Neutrino. Dieses Teilchen war noch hypothetisch und ferner



konnte der Nobelpreis nur für veröffentlichte Arbeiten (nicht für briefliche Mitteilungen) verliehen werden. Pauli reiste, da er keinen gültigen Reisepass mehr besaß, nicht nach Stockholm (die Laudatio hielt

³⁷ Pauli, W., *Connection between Spin and Statistics*, Phys. Rev. **58**, 716-722 (1940)

³⁸ Pauli W., *Meson Theory of Nuclear Forces*, Interscience, New York 1946

Professor I. Waller). Ihm zu Ehren wurde am 10. Dezember in Princeton ein Bankett veranstaltet. In einer spontanen Tischrede bezeichnete Einstein Pauli als seinen „geistiger Nachfolger“.

1946 erhielt Pauli die amerikanische Staatsbürgerschaft. Allerdings war er entsetzt und zornig über den Einsatz der Atombombe. Er stand nun vor der Entscheidung in Amerika zu bleiben oder nach Zürich zurückzukehren. Er schlug Angebote aus Princeton und von der Columbia University (New York) aus und entschied sich schließlich für Zürich. Mit viel Mühe war sein Platz an der ETH freigehalten worden. Auf dem Heimweg machte er 1946 in Stockholm Station um seinen Nobelpreis entgegenzunehmen.

9 Zurück in Zürich

1949 erhielt Pauli endlich die Schweizer Staatsbürgerschaft und konnte unbeschwert arbeiten. Seine Assistenten in der zweiten Züricher Phase waren Rest Jost (1946-49), Robert Schafroth (1949-53), Armin Thellung (1953-56) und Charles Enz (1956-58).

Pauli trat in der Nachkriegszeit öffentlich für Heisenberg ein, und erteilte auch Jordan, immerhin Mitglied der NSDAP und SA, die Absolution (Jordan wurde später CDU-Abgeordneter im Bundestag und 1953 durch Paulis Fürsprache Professor an der Hamburger Universität).



Pauli und Assistenten

1952 erhielt Pauli die Franklin Medaille und reiste im gleichen Jahr nach Indien. 1953 wurde er Fellow of the Royal Society. Er beteiligte sich an der Gründung von CERN (1954), die treibende Kraft war allerdings Paul Scherrer. In den Jahren 1954, 1956 und 1958 war er erneut Gastprofessor in Princeton. 1955 organisierte Pauli in Bern die Tagung „50 Jahre Relativitätstheorie“.

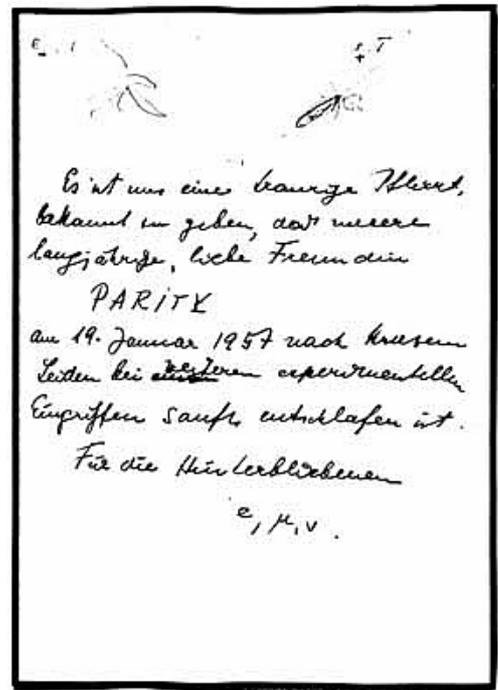
In seinen letzten Jahren beschäftigte sich Pauli hauptsächlich mit der Weiterentwicklung der Quantenfeldtheorie (Renormierung, Symmetrien, Elementarteilchen). Hier ist besonders das PCT-Theorem zu erwähnen. Es besagt die Invarianz der Quantenfeldtheorie gegenüber dem Produkt der diskreten Symmetrioperationen Parität (P), Ladungskonjugation (C) und Zeitumkehr (T). Pauli erkannte als erster, dass es sich dabei um eine generelle Symmetrie handelt (unabhängig davon befasste sich auch Gerhart Lüders mit dem Problem) und lieferte 1955 den Beweis.³⁹ Da Pauli überzeugt war, dass auch die Parität (P) für sich erhalten ist, war es für ihn ein schwerer Schock, als sich 1957 herausstellte, dass P bei schwacher Wechselwirkung verletzt ist (Lee, Yang, Wu). Die New York Times titelte am 16.1.1957:

³⁹ Pauli, W., *Exclusion Principle, Lorentz Group and Reflections of Space-Time and Charge*, in: W. Pauli (Hg.), *Niels Bohr and the Development of Physics*, Pergamon, New York 1955, S. 30

„Basic concept in physics is reported upset in tests“. Und Pauli bemerkte in einem Brief an Jung: „Gott ist doch ein schwacher Linkshänder“.⁴⁰ Man sprach später sogar von Paulis „Spiegelkomplex“.

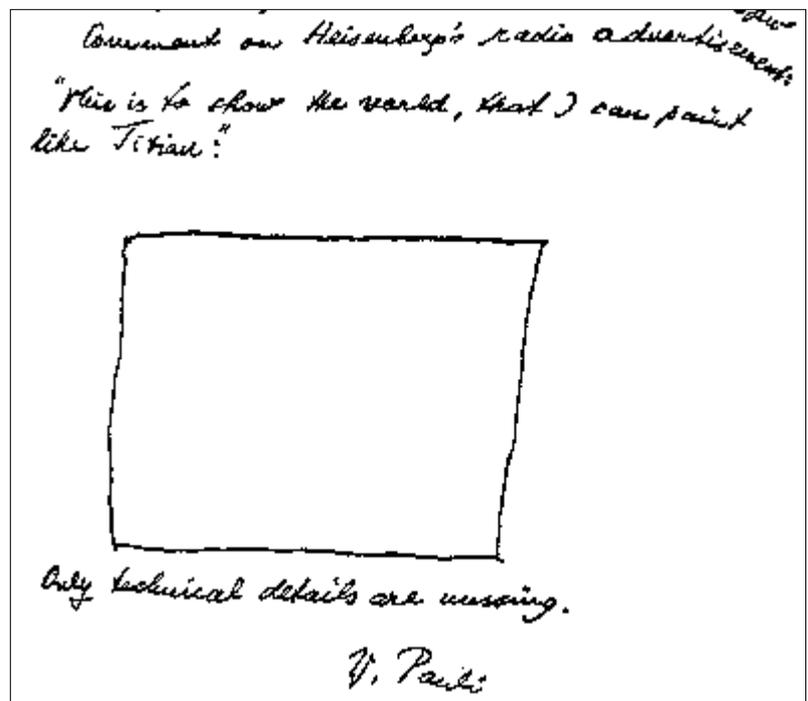
Ab 1953 führte Pauli eine intensive Diskussion mit Heisenberg über die „Einheitliche Feldtheorie der Elementarteilchen“. Sie führte letztlich zu Heisenbergs „Weltformel“, die in einer Variante (Berücksichtigung des Isospins) auch als „Heisenberg-Pauli-Gleichung“ firmiert.

Pauli, bekannt als äußerst kritischer und vorsichtiger Geist, erkannte allerdings immer mehr Schwächen in der Theorie und geriet, insbesondere nach einem USA-Aufenthalt, in Konfrontation mit Heisenberg. Er war sehr erschrocken, als er hörte, Heisenberg habe in einer Rundfunksendung behauptet, eine einheitliche „Heisenberg-Pauli-Theorie“ stehe kurz vor der Vollendung - es blieben nur noch einige technische Einzelheiten auszuarbeiten. Erregt über diese Übertreibung, schickte Pauli am 1. März 1958 eine Karte an George Gamow, auf der er einen leeren Rahmen skizziert hatte neben dem stand:



"Dies soll der Welt zeigen, dass ich wie Tizian malen kann. Es fehlen nur einige technische Einzelheiten."⁴¹

Pauli beendete, sehr zum Ärger Heisenbergs, sein Engagement. Eine gemeinsame Publikation war damit geplatzt. Er ließ seinem alten Weggefährten allerdings freie Hand und wünschte ihm Glück. Kurz vor Paulis Tod kam es noch zu einer Aussprache bei einem Treffen am Genfer See. Heisenbergs „Weltformel“ erwies sich später, wie von Pauli vorhergesehen, als Fehlschlag.



⁴⁰ Pauli an Jung, Briefwechsel S. 161

⁴¹ Gamow, G., *Thirty Years That Shook Physics*, Garden City, New York 1966, S. 165

Sich selbst sparte er von der Kritik natürlich nicht aus, und so schrieb er 1957:

„Man wird uns zur Physikergeneration zählen, der eine Synthese der ART und der QT nicht gelungen ist und die so wesentliche Probleme wie Atomistik der Elektrizität, Selbstenergie des Elektrons ungelöst zurückließ. Allmählich gewöhne ich mich an den Gedanken, einen wirklichen Fortschritt nicht mehr zu erleben.“⁴²

1958 erhielt Pauli die Max Planck Medaille und wurde Ehrendoktor der Hamburger Universität. Am 5. Dezember 1958 erlitt er bei einer Vorlesung eine Schmerzattacke. Am nächsten Tag wurde Pauli ins Züricher Rote-Kreuz-Hospital eingeliefert – und war entsetzt als er seine Zimmernummer sah: 137! Wolfgang Pauli starb am 15. Dezember im Alter von 58 Jahren an einem Magengeschwür und wurde in seinem Wohnort Zollikon beerdigt.



Pauli wird Ehrendoktor

10 Rückblick auf Wolfgang Pauli

Paulis physikalisches Werk war geprägt vom Streben nach Vollständigkeit und maximaler Symmetrie. Zeitlebens wehrte er sich gegen „schlampige Physik“. Sein Lieblingsphilosoph war Schopenhauer.

Paulis Eigenschaften lassen sich wie folgt beschreiben: humorvoll, hilfsbereit, integer, unkonventionell, oft beißend kritisch zu Fachkollegen (der „fürchterliche Pauli“, die „Geißel Gottes“). Er war ein Perfektionist, dabei aber nicht auf Anerkennung aus und frei von Konkurrenzdenken. Er war sparsam mit politischen Äußerungen. Seine sprichwörtliche technische Unbegabtheit drückte sich auch darin aus, dass er 100 Fahrstunden für seinen Führerschein benötigte.

Pauli war kein brillanter Redner, dafür ein umso besserer Autor. Allerdings war er relativ sparsam mit Publikationen: Er schrieb 93 Artikel und 11 Bücher. Dagegen sind über 2000 Briefe erhalten!⁴³ Pauli hat viele Dinge als erster erkannt. Die meisten Ideen finden sich lediglich in persönlichen Mitteilungen bzw. Fußnoten. Dazu passt sein Kommentar: „*Ich kann es mir leisten, nicht zitiert zu werden.*“⁴⁴ Beispiele dazu sind: Eichtheorie, Energie-Zeit-Unschärfe, Paramagnetismus⁴⁵, Wahrscheinlichkeitsinterpretation, Vertauschungsrelationen⁴⁶, Goldene Regel und Quantenstatistik⁴⁷

⁴² Pauli an Schrödinger 9.8.1957, PBW, Bd. 1, S.26

⁴³ siehe den von Enz und v. Meyenn herausgegeben wissenschaftlichen Briefwechsel im Literaturverzeichnis

⁴⁴ Enz, C. P., v. Meyenn, K., *W. Pauli, Das Gewissen der Physik*, Braunschweig 1988, S. 7

⁴⁵ Jammer, M., *Naturwissenschaftliche Rundschau* 37, 1 (1984)

⁴⁶ ter Haar, D., *Master of Modern Physics*, Princeton Univ. Press, Princeton 1998, S. 150

Zu den vielen Ehrungen, die Pauli erhielt, gehört auch der Mondkrater „Pauli“ (Durchmesser 84 km, 44.5° S, 136.4° E), der Kleinplanet (13093) „Wolfgangpauli“ und eine Schweizer Briefmarke.



Abschließend noch einige Zitate über Pauli.

Kronig und Weisskopf: „Seine Veröffentlichungen enthalten aber, wie dies bei der ungewöhnlich kritischen Einstellung Paulis begreiflich ist, nur einen kleinen Teil der wirklich von ihm geleisteten Arbeit. Pauli berichtete in seinen Abhandlungen über fertige Ergebnisse, aber nicht über den langen, oft mühevollen Weg, der zu ihnen geführt hatte, und auch nicht über unfertige Versuche. Ein Teil seiner im Stillen geleisteten Arbeit hat sich in seinem umfangreichen Briefwechsel niedergeschlagen.“⁴⁸

Heisenberg: „Ich habe nie eine Arbeit veröffentlicht, ohne dass Pauli sie vorher gelesen hatte.“⁴⁹

Weisskopf: „Was würde Pauli dazu sagen?“ „Das würde Pauli nicht akzeptieren!“⁵⁰

Klein: „Er war allmählich zu einer Institution geworden, der man seine Einfälle vorlegte ohne ausweichende Höflichkeit befürchten zu müssen.“⁵¹



Pauli und Heisenberg

Born: „Ich wusste, dass er ein Genie war, nur vergleichbar mit Einstein. Als Wissenschaftler war er vielleicht sogar größer als Einstein. Aber er war ein völlig anderer Typ Mensch, der in meinen Augen nicht Einsteins Größe erreichte.“⁵²

Franca Pauli: „Er war leicht verletzlich und verbarg sich hinter einem Vorhang.“

⁴⁷ Pauli, W. jun., *Über das H-Theorem vom Anwachsen der Entropie vom Standpunkt der neueren Quantenmechanik*, in: Sommerfeld Festschrift, *Probleme der Modernen Physik*, Leipzig 1928, S. 30-45

⁴⁸ Kronig, R., Weisskopf, V. F. (Hg.), *W. Pauli, Collected Scientific Papers*, Wiley, New York 1964

⁴⁹ PBW, Bd. 1, A. Hermann, S. XLII

⁵⁰ Weisskopf, V. F., Trauerrede am 20.12.1958 in Zürich, in: Pauli, W., *Physik und Erkenntnistheorie*, Braunschweig 1984, S. 25

⁵¹ Hermann, A., *Lexikon - Geschichte der Physik A-Z*, Aulis-Verlag 1978, S. 33

⁵² Einstein, A., Born, M., *Briefwechsel 1916-1955*, Nymphenburger Verlagshandlung, München 1969, S. 226

Literatur

- Bleuler, K., *Wolfgang Pauli - Über sein Werk und seine Ideen zu den Grundlagen der Physik*, Geometry and theoretical physics, Berlin 1991, S. 298-303 und S. 304-310
- Heathcote, N., *Wolfgang Pauli, Nobel prize winners in physics, 1901-1950*, New York 1953, S. 411-421
- de Riedmatten, T., *Wolfgang Pauli: Physik als Philosophie*, Diplomarbeit, Wien 1996
- Duck, I., Sudarshan, E. C. G., *Pauli and the spin-statistics theorem*, River Edge, New York 1997
- Eisenberg, W., Fütting F., Krause, E., *Wolfgang Pauli - mehr als nur ein Klassiker der modernen Physik*, Wiss. Z. Martin-Luther-Univ. Halle-Wittenberg Math.-Naturwiss. Reihe **39** (2), 127-136 (1990)
- Eisenberg, W., *Zu den Wirklichkeitsauffassungen der Physiker Wolfgang Pauli und Ludwig Boltzmann (Vergleich)*, in: Mathematik und Wirklichkeit, 1991, S. 47-54
- Enz, C. P., *Wolfgang Pauli*, Phys. in u. Zeit 31, 268 (2000)
- Enz, C. P. (Hg.), *Pauli Lectures on Physics*, 6 Vol, MIT Press Cambridge 1973
- Enz, C. P., *W. Pauli's Scientific Work*, in: J. Mehra (Hg.), *The Physicist's Conception of Nature*, Reidel, Dordrecht, 1973, S. 766-799
- Enz, C. P., *The space, time and field concepts in Wolfgang Pauli's work*, Symposium on the foundations of modern physics, Singapore 1985, S. 127-145
- Enz, C. P., *Wolfgang Pauli, physicist and philosopher*, Symposium on the foundations of modern physics, Singapore 1985, S. 241-255
- Enz, C. P., *50 years ago Pauli invented the neutrino*, Helv. Phys. Acta **54**, 411-418 (1981)
- Enz, C. P., v. Meyenn, K. (Hg.), *W. Pauli, Writings on Physics and Philosophie*, Springer, Berlin 1994
- Enz, C. P., v. Meyenn, K. (Hg.), *Wolfgang Pauli – Wissenschaftlicher Briefwechsel (PBW)*, Bd. 1, 1919-29, 242 Briefe (1979), Bd. 2, 1930-39, 364+15 (1985), Bd. 3, 1940-49, 486+67 (1993), Bd. 4a, 1950-52, 450 (1996), Bd. 4b, 1953-54, 450, Bd. 4c, 1955-56 (Ende 2004), Bd. 4d, 1957-58 (in Vorb.)
- Finkelburg, W., *Einführung in die Atomphysik*, Springer-Verlag, Berlin 1967
- Fischer, E. P., *An den Grenzen des Denkens. Wolfgang Pauli - Ein Nobelpreisträger über die Nachtseiten der Wissenschaft*, Herder, Freiburg 2000

- Giannetto, E. A., Pozzi, F., *Non-separability and synchronicity: Pauli, Jung and a new historical, philosophical perspective on quantum physics*, in: *The foundations of quantum mechanics*, Lecce, 1998
River Edge, New York 2000, S. 251-259
- Hendry, J., *The creation of quantum mechanics and the Bohr-Pauli dialogue*, Dordrecht: Reidel, 1984
- Laurikainen, K., *Beyond the atom: the philosophical thought of Wolfgang Pauli*, Berlin 1988
- Laurikainen, K., *Wolfgang Pauli's conception of reality*, Symposium on the foundations of modern physics, Singapore 1985, S. 209-228
- Laurikainen, K., *Wolfgang Pauli and the Copenhagen philosophy*, in: Joensuu, *Symposium on the foundations of modern physics*, Singapore 1985, S. 273-287
- Pauli, W., *On the Earlier and More Recent History of the Neutrino (1957)*, in: Winter, K. (Hg.), *Neutrino Physics*, Cambridge Univ. Press 1991
- Pauli, W., *Fünf Arbeiten zum Ausschließungsprinzip und zum Neutrino*, in: *Texte zur Forschung*, Vol. 27, Wiss. Buchges. Darmstadt 1977
- Richter, S., *Wolfgang Pauli: die Jahre 1918 – 1930. Skizzen zu einer wissenschaftlichen Biographie*, Sauerländer, Aarau 1979
- Rosenfeld, L., *Men and ideas in the history of quantum theory*, Arch. Hist. Exact Sci. **7**, 69 (1971)
- Schücking, E., *Jordan, Pauli, politics, Brecht ... and a variable gravitational constant*, Phys. Today
- Szalek, M. A., *Pauli versus the Maxwell equations and the Biot-Savart law*, Phys. Essays **10**, 95-117 (1997)
- v. Meyenn, K., *Pauli, Schrödinger and the conflict about the interpretation of quantum mechanics*, in: Joensuu, *Symposium on the Foundations of Modern Physics*, Singapore 1985, S. 289-302
- v. Meyenn, K., *Pauli's belief in exact symmetries*, in *Symmetries in physics (1600-1980)*, San Feliu de Gu'xols, 1983 (Barcelona 1987, S. 329-360)

Internetseiten:

Pauli-Ausstellung, ETH: www.ethbib.ethz.ch/exhibit/pauli/pauli_frame.html

Pauli-Archiv, CERN: library.cern.ch/archives/pauli/paulimain.html