

ARNOLD SOMMERFELD UND SEINE SCHÜLER ALS WEGBEREITER DER PHYSIK

*Vortrag zum 125. Geburtstag (am 5.12.1993) des großen Physikers und Lehrers
der theoretischen Physik, gehalten am 30.11.1993 an der Universität Leipzig*

Helmut Rechenberg

Max-Planck-Institut für Physik, Werner-Heisenberg-Institut, Föhringer Ring 6,
D-80805 München

Zusammenfassung

Der am 5. Dezember 1868 in Königsberg geborene ARNOLD SOMMERFELD, der in Göttingen, Claus-thal, Aachen und München Mathematik, technische Mechanik und theoretische Physik lehrte, gilt in erster Linie als Begründer des letztgenannten Faches, das er durch wesentliche Beiträge zur Mechanik, Elektrodynamik, Relativitätstheorie und besonders zur Quantentheorie der Atome und Festkörper entscheidend bereicherte. Seine Schüler vertieften und erweiterten die Ergebnisse des Forschers und Lehrers und trugen den Ruhm der SOMMERFELD-Schule in alle Welt, auch an die Universität Leipzig, wo die mit dem Chemie- bzw. dem Physik-Nobelpreis ausgezeichneten PETER DEBYE und WERNER HEISENBERG und der gleichfalls hervorragende GREGOR WENTZEL wirkten.

Als ich die Einladung zu diesem Vortrag erhielt, habe ich trotz gewichtiger Terminarbeiten aus mehreren Gründen zugesagt. Vor allem ist mir der durch diese Jubiläumsveranstaltung Geehrte persönlich als „geistiger Großvater“ verbunden. So kenne ich ihn aus den Erzählungen meiner Lehrer FRITZ BOPP und WERNER HEISENBERG außer aus eigenen physikalischen Untersuchungen zur Geschichte der Quantentheorie sehr gut [1]. In diesem Vortrag will ich nun aus dem Leben und Werk dieses großen Münchener Universitätslehrers - dessen Institut und Arbeitszimmer ich noch am alten Ort in der Amalienstraße erlebt habe, einschließlich der in Schränken gelagerten Bücher und Zeitschriftenbände, hinter denen Mäuse nisteten - berichten und seine Wirkung durch seine Schüler, nicht zuletzt die „Leipziger“ PETER DEBYE, WERNER HEISENBERG und GREGOR WENTZEL, darlegen.

1 Leben - Daten und Stichworte

1868, 5. Dezember: ARNOLD JOHANNES WILHELM SOMMERFELD (A. S.) wird in Königsberg als Sohn des Arztes Dr. FRANZ S. („Sammler von Naturalien - Bernstein, Muscheln, Mineralien, Käfern etc. - und großer Freund der Naturwissenschaften“) und seiner Frau CÄCILIE MATHIAS aus Potsdam („geistvoll und energisch“) geboren.



ARNOLD SOMMERFELD im Alter von etwa 80 Jahren
(Original im Besitz von HELMUT RECHENBERG, München)

- 1877-86:** A. S. besucht das Altstädtische Gymnasium (ältere Mitschüler H. MINKOWSKI, M. und W. WIEN) und hat gleichmäßig gute Interessen an Literatur, Geschichte, Naturwissenschaften und den klassischen Sprachen (Abiturzeugnis).
- 1886-90:** A. S. studiert Mathematik, Philosophie, Nationalökonomie usw. an der Universität Königsberg und ist zugleich Burschenschaftler. („Vorzügliche Besetzung der mathematischen Lehrstühle - LINDEMANN als Ordinarius, HURWITZ als Extraordinarius, HILBERT als Privatdozent - hinderten mich, die Universität zu wechseln“). Daneben hört er bei P. VOLKMANN und E. WIECHERT theoretische Physik.
- 1891:** A. S. erwirbt den Dr. phil. bei LINDEMANN (Dissertation „Die willkürlichen Funktionen in der mathematischen Physik“).
- 1892:** Nach dem Lehrerexamen leistet er Militärdienst in der Infanterie.
- 1893:** A. S. kommt im Oktober nach Göttingen ans mineralogische Institut als Assistent bei T. LIEBSCH und hört Spezialvorlesungen bei FELIX KLEIN.
- 1894:** Er wird Assistent bei KLEIN im mathematischen Lesezimmer und arbeitet dessen Vorlesungen aus.
- 1895, März:** A. S. habilitiert sich mit der exakten Lösung des Diffraktionsproblems.

- 1895-97:** Als Privatdozent liest er über projektive Geometrie und partielle Differentialgleichungen der Physik (Schüler O. BLUMENTHAL) und bearbeitet KLEINS „Kreiseltheorie“.
- 1897:** A. S. wird im Herbst als Ordinarius für Mathematik an die Bergakademie Clausthal berufen. Am 27. Dezember heiratet er JOHANNA HÖPFNER (Tochter des Kurators der Universität Göttingen). Im folgenden Jahr beginnt er mit der Herausgabe des Bandes V („Physik“) der *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften* (beauftragt vom Herausgeber F. KLEIN, abgeschlossen 1926).
- 1900,** Januar: A. S. erhält die Professur für theoretische Mechanik an der Technischen Hochschule Aachen, wo er über Schmiermittelreibung und Elektronentheorie zu arbeiten beginnt.
- 1906,** Juli: Er nimmt das Angebot auf den Lehrstuhl für theoretische Physik an der Universität München an und erhält eine Ausstattung mit Laboratorium, Assistenten und Mechaniker (Antritt Oktober).
- 1911,** Oktober: A. S. nimmt an der I. Solvay-Konferenz teil.
- 1912,** März: In seinem Laboratorium wird die Röntgenstrahlbeugung entdeckt (M. v. LAUE, W. FRIEDRICH, P. KNIPPING).
- 1916,** Januar: A. S. wird als Nachfolger von F. HASENÖHRL nach Wien berufen (lehnt im Juli 1917 ab).
- 1922-23:** A. S. lehrt als CARL-SCHURZ-Professor in Madison (Wisconsin) und reist anschließend nach Kalifornien und an die Ostküste der USA.
- 1927,** 24. März: A. S. erhält das Angebot, die Nachfolge von M. PLANCK an der Universität Berlin anzutreten. Er bleibt, aber gleichzeitig beginnt die Kampagne gegen den „Juden Sommerfeld“ in München.
- 1928-29,** August-Mai: Auf einer Weltreise besucht A. S. Indien, China, Japan und die USA.
- 1933:** Als die Nationalsozialisten im Deutschen Reich die Regierung übernehmen, zwingen sie viele Schüler SOMMERFELDS in die Emigration.
- 1935:** Im April wird die Verlängerung seiner Professur abgelehnt; A. S. wünscht P. DEBYE oder W. HEISENBERG als Nachfolger: ersterer sagt sofort ab, letzterer zu.
- 1936-39:** Nationalsozialistische Kreise hetzen gegen HEISENBERG („weißer Jude“). Der Aerodynamiker W. MÜLLER wird schließlich am 1. Dezember 1939 Nachfolger von A. S.
- 1946,** Anfang: A. S. nimmt die Lehre wieder auf und bemüht sich um einen Nachfolger (W. HEISENBERG, H. BETHE, K. BECHERT).
- 1947:** FRITZ BOPP kommt als Extraordinarius nach München (1952 Ordinarius)
- 1951,** 26. April: A. S. stirbt an den Folgen eines Autounfalls in München.

2 Werk - Vom Mathematiker über den technischen Mechaniker zum Meister der theoretischen Physik

SOMMERFELDSs Lebenswerk, das eng an seine berufliche Laufbahn anschließt, ist außerordentlich reichhaltig. Er begann als angewandter Mathematiker, wurde dann unter FELIX KLEINs Einfluß zum Statthalter und glänzenden Vertreter mathematischer Methoden in der Technik und baute schließlich seine eigene Schule der theoretischen Physik auf, durch die er Weltruhm erlangte. Ebenso vielfältig sind die wissenschaftlichen Themen, die er aufgriff oder durch seine Schüler behandeln ließ: die Theorie des Kreisels und der Schmiermittelreibung, die Fortpflanzung elektro-magnetischer Strahlung und die Erzeugung von Röntgenstrahlen, Fragen der Elektronentheorie und der Quantenmechanik, vor allem aber Atomstruktur und emittierte bzw. absorbierte Spektren und schließlich die Quantenmechanik der Metallelektronen. Neben die vielen Originalarbeiten treten noch umfassende Berichte über einzelne Fachgebiete und Lehrbücher und nicht zuletzt die Herausgabe des physikalischen Bandes der *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften*.

SOMMERFELDSs berufliche Tätigkeit erstreckte sich über fast sechs Jahrzehnte: sie begann 1891 mit der Doktorarbeit und endete 1951 nach einem Verkehrsunfall im Krankenhaus. Dort diktierte er seiner Sekretärin den zuletzt erschienenen Thermodynamik-Band 5 der *Vorlesungen*. Trotz der anhaltenden Vielseitigkeit seiner Produktion lassen sich in bestimmten Zeitperioden jeweils umfangreiche Arbeitsgruppen erkennen, die folgenden Themen gewidmet sind [2]:

- Mathematische Funktionen der Physik (1891-1911);
- Theorie des Kreisels (1897-1910);
- Technische Mechanik (1901-1913);
- Fortpflanzung elektromagnetischer Wellen (1899-1911);
- Herausgabe des V. Encyklopädie-Bandes (1899-1926);
- Beugung und Erzeugung von Röntgenstrahlen (1901-1911);
- Elektronen- und Relativitätstheorie (1904-1914);
- Frühe Quanten- und Atomtheorie (1911-1914);
- Atombau und Spektrallinien (1915-1926);
- Elektronentheorie der Metalle (1927-1937);
- Vorlesungen über theoretische Physik (1943-1952).*

MAX BORN, der kongeniale Kollege, urteilte in seinem Nachruf für die Royal Society über SOMMERFELDSs Lebenswerk:

„His gift was not so much the divination of new fundamental principles from apparently insignificant indications or the daring combination of two different fields and phenomena into a higher unit, but the logical and mathematical penetration of established or problematic theories and the derivation of consequences which might lead to their confirmation or rejection. Yet it is true that in his later, spectroscopic period, he developed a gift for the divining or guessing of mathematical relations from experimental data.”

2.1 Angewandte Mathematik

FELIX KLEIN bestärkte den ausgebildeten Mathematiker SOMMERFELD, sich auf die zahlreichen Probleme der Anwendung zu werfen, die sich häufig aus den Beiträgen zu „seinem“ Physikband der *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften* ergaben.

Mathematische Funktionen der Physik (1891-1911)

Der sechste Band der SOMMERFELDSchen *Vorlesungen über theoretische Physik* von 1947 trägt den Titel „Partielle Differentialgleichungen der Physik“. Mit den Kapiteln über „Fouriersche Reihen und Integrale“, „Partielle Differentialgleichungen“, „Randwertaufgaben in der Wärmeleitung“, „Zylinder- und Kugelprobleme“, „Eigenfunktionen und Eigenwerte“ sowie „Probleme der drahtlosen Telegraphie“ enthält er gewichtige Auszüge aus dem Lebenswerk des Autors, besonders aus dessen erstem Abschnitt. Wir weisen insbesondere auf folgende umfangreiche Arbeiten hin:

- *Die willkürlichen Funktionen in der mathematischen Physik* (Dissertation 1891), die auf die Darstellung willkürlicher Funktionen durch Kreis-, Zylinder- und Kugelfunktionen eingeht, Anwendungen auf die analytische Theorie der Wärmeleitung und die Beugungserscheinungen elektromagnetischer Wellen diskutiert und schließlich die Methode der komplexen Integration darlegt;
- *Mathematische Probleme der Diffraction* (Habilitationsschrift 1895), in der die Erweiterung der KIRCHHOFFSchen Theorie durch POINCARÉ „über die Näherung kleiner Wellenlängen hinaus“ fortgesetzt wird;
- *Über komplexe Integraldarstellungen* (mit L. HOPF 1911);
- *Anwendungen der Vektorrechnung auf die Grundlagen der geometrischen Optik* (mit I. RUNGE 1911).

Über die Theorie des Kreisels (1897-1910)

Die vier Hefte (1. *Die kinetischen Grundlagen der Theorie*; 2. *Durchführung der Theorie im Falle des schweren symmetrischen Kreisels*; 3. *Die störenden Einflüsse. Astronomische und astrophysikalische Anwendungen*; 4. *Die technischen Anwendungen der Kreiselttheorie*) gehen von FELIX KLEINS Vorlesungen über den Gegenstand aus (KLEIN ist Koautor), erweitern sie aber wesentlich (besonders im letzten, von SOMMERFELDS Schüler F. NOETHER bearbeiteten Heft).

Technische Mechanik (1901-1913)

In einem programmatischen Vortrag auf der Naturforscherversammlung von 1903 („Die naturwissenschaftlichen Ergebnisse und Ziele der technischen Mechanik“) umriß SOMMERFELD einige Probleme in der mechanischen Anwendung der mathematisch-theoretischen Physik: Elastizitätseigenschaften, Erddruck, Reibung, Formänderung, HERTZsche Theorie der Berührung fester Körper, Dynamik des Kurbelmechanismus, turbulente Flüssigkeiten und Lagerreibung. Viele dieser Probleme bearbeitete er selbst weit über seine Aachener Zeit hinaus, vor allen in den Aufsätzen:

„Beiträge zum dynamischen Aufbau der Festigkeitslehre“ (1901: Resonanzerscheinungen an Platten, Maschinen usw.);

„Zur hydrodynamischen Theorie der Schmiermittelreibung“ (1904) - sie wurde bei Lokomotiven durch Regierungs-Bauführer E. BECKER überprüft;

„Knicksicherheit von Walzprofilen“ (1908);

„Ein Beitrag zur hydrodynamischen Erklärung turbulenter Strömungen“ (1908) - hier werden die ORR-SOMMERFELD-Gleichungen eingeführt (HEISENBERG'S Dissertation von 1923 knüpft an die Fragestellungen an);

„Die Deformation der Segmentmembran“ (1913, mit O. FRANK vom Physiologischen Institut, München).

Der Schüler PAUL EWALD erinnert sich im Nachruf (1951):

„The papers of this period, on viscous flow lubrication, on friction, on the beats between generators working on the same grid, are among those to which Sommerfeld liked to look back in a spirit of satisfaction not unlike that of Goethe's Faust when he speaks of the improvements he is bringing to the country by constructing canals and irrigation.“

2.2 Der Übergang zur Physik

Gleichzeitig mit der Redaktionsarbeit am Physikband der Encyklopädie drang SOMMERFELD zunehmend in physikalische Problemstellungen ein, die er in einer Reihe von theoretischen Arbeiten behandelte und so seine Münchner Berufung (als Nachfolger LUDWIG BOLTZMANN'S) rechtfertigte.

Fortpflanzung elektromagnetischer Wellen (1899-1911)

Ausgehend von einer mathematischen Behandlung (Lösung einer komplizierten komplexen transzendenten Gleichung) in Über die Fortpflanzung elektromagnetischer Wellen längs eines Drahtes (1899), wandte sich SOMMERFELD später besonders den praktischen Fragen drahtloser Telegraphie zu (z. B. in Über die Ausbreitung von Wellen in der drahtlosen Telegraphie 1909 - der Autor diskutierte Oberflächen- und Raumwellen - bzw. 1911; hier wurde der Einfluß der Bodenbeschaffenheit behandelt).

Beugung und Erzeugung von Röntgenstrahlen (1901-1911)

Die von W. C. RÖNTGEN 1895 beobachteten X-Strahlen wurden von E. WIECHERT und G. STOKES 1896 als kurze, starke „Ätherstörungen“ interpretiert, die sich mit Hilfe der MAXWELL'Schen Gleichungen beschreiben lassen. SOMMERFELD'S Arbeiten ordnen sich in diese Vorstellungen ein, etwa die folgenden:

„Theoretisches zur Beugung von Röntgenstrahlen“ (1901) - hier werden unter Benützung der verzweigten Lösung der komplexen Integrationstheorie die Beugungsbeobachtungen mit Röntgenstrahlen von H. HAGA und C. H. WIND analysiert; es ergeben sich Impulsbreiten von 10^{-8} cm;

„Über die Verteilung der Intensität bei der Emission von Röntgenstrahlen“ (1909) - die klassische Theorie der „Bremsstrahlung“ liefert eine asymmetrische Ausstrahlung der Antikathode (im Widerspruch zu J. STARK'S Behauptung, daß dazu die Lichtquantenvorstellung herangezogen werden müsse);

„Über die Struktur der γ -Strahlen“ (1911) - in dieser Bremsstrahlungstheorie wird die PLANCKsche Konstante h eingeführt, um die Wirkung des Vorganges zu bestimmen.

Herausgabe des Bandes V (Physik) der Encyklopädie (1899-1926)

Die Arbeit am KLEINSchen Projekt brachte SOMMERFELD mit vielen berühmten Physikern seiner Zeit, besonders L. BOLTZMANN, H. A. LORENTZ und W. WIEN, in engeren brieflichen Austausch. So kam er auf wichtige Probleme der theoretischen Physik und begann, sie mit seiner mathematischen Erfahrung zu lösen. Dabei folgte SOMMERFELD eher seinem „*Vertrauen auf die prästabilisierte Harmonie zwischen Formeln und Naturvorgängen, auch über logische Beweismöglichkeiten hinaus*“. Später „*hat er stets seine Schüler ermahnt, sich beim ersten Durchdenken eines theoretisch-physikalischen Problems nicht durch übertriebene mathematische Skrupel behindern zu lassen und die strenge mathematische Nachprüfung erst in Angriff zu nehmen, wenn das Ergebnis die Fruchtbarkeit der Methode erkennen ließ. Sie sollen sich nicht darum kümmern, ob das Integral konvergiert, Sie sollen es ausrechnen!*“ ist einer seiner vielzitierten *Aussprüche*“ (O. SCHERZER 1951).

2.3 Aufstieg zum Relativitäts- und Quantentheoretiker

Zwischen 1905 und 1911 schloß sich SOMMERFELD den beiden modernen Theorien seiner Zeit an, der Relativitätstheorie von A. EINSTEIN und der Quantentheorie von M. PLANCK; er wurde für sie ein ebenso eifriger wie wirksamer Verkünder und Lehrer.

Elektronen- und Relativitätstheorie (1904-1914)

Der Umgang mit den Autoren für seinen Encyklopädie-Band machte SOMMERFELD auch mit einigen der wichtigsten physikalischen Probleme des beginnenden zwanzigsten Jahrhunderts vertraut, die in der Elektronentheorie auftraten. Er setzte sich mit ihnen ausführlich in einer dreiteiligen Arbeit auseinander: „Zur Elektronentheorie. I, II, III“ (eingegangen 5. März und 23. Juli 1904 sowie 25. Februar 1905). Hier entwickelte er eine (noch vorrelativistische) Elektronentheorie mit Überlicht- und Unterlichtgeschwindigkeit (in ersterer erhalten gebremste Elektronen größere Geschwindigkeit: „Tachyonen“). Etwa zwei Jahre nach EINSTEINS Pionierarbeit ging er über zur Relativitätstheorie, für die er später eine elegante vierdimensionale Vektoralgebra und -analysis mit Vierervektoren und -tensoren sowie Sechservektoren etc. schuf („Zur Relativitätstheorie. I, II“ 1910). Das bereits 1907 in einer kurzen Notiz für die Fortpflanzung von Röntgenstrahlen in Materie (Brechungsindex kleiner als 1) festgehaltene Prinzip „Signalgeschwindigkeit ist stets kleiner als Lichtgeschwindigkeit“ begründete er 1912 durch die Annahme einer *analytischen* Streuamplitude („Über die Fortpflanzung von Licht in divergierenden Medien“): diese Arbeit enthält den ersten Hinweis auf den Zusammenhang von analytischer Streuamplitude und Kausalität, der später etwa in den Dispersionsrelationen der Elementarteilchenphysik eine Rolle spielte. SOMMERFELD wurde einer der einflußreichsten Propagatoren der Relativitätstheorie: er gab z. B. (ab der 2. Auflage) die grundlegende Aufsatzsammlung „Das Relativitätsprinzip“ heraus und wollte mit WOLFGANG PAULI den Artikel über die Theorie für die Encyklopädie schreiben, nachdem EINSTEIN seine ursprüngliche Zusage zurückzog (PAULI schrieb ihn schließlich allein).

Frühe Quantentheorie und klassische Atomtheorie (1911-1914)

Anfang 1911 ging SOMMERFELD auch dazu über, zur Quantentheorie beizutragen, nachdem ihm sein Schüler PETER DEBYE vorausgeeilt war (1910 mit der Ableitung der PLANCKschen Strahlungsformel). Man hat als Grund vermutet, daß er unbedingt zur elitären „Solvay-Konferenz“ eingeladen werden wollte. Jedenfalls hielt er einen ersten umfassenden Vortrag („Das

PLANCK'sche Wirkungsquantum und seine allgemeine Bedeutung für die Molekülphysik“) bereits im September 1911 bei der Karlsruher Naturforscherversammlung, ehe er seinen vielbeachteten Solvay-Bericht im Oktober in Brüssel vorlegte. In Karlsruhe verkündete er drei Grundsätze: 1. die Größe h definiert das Zeitmaß τ (in $\int_0^\tau H dt$ mit H Hamilton-Funktion) bei reinen atomaren oder molekularen Prozessen; 2. das gilt auch im relativistischen Fall ($\int H dt = \int c^2 m \sqrt{1 - \beta^2} dt$); 3. das Wirkungsquantum bestimmt auch die Größe der Atome (Moleküle). Anschließend an die Diskussion des Atommodells von A. HAAS (1910) meinte er prophetisch:

„Vielmehr möchte ich den umgekehrten Standpunkt bevorzugen: daß h nicht aus den Moleküldimensionen zu erklären, sondern die Existenz der Moleküle als eine Funktion und Folge der Existenz eines elementaren Wirkungsquantums. Eine elektromagnetische oder mechanische 'Erklärung' des h erscheint mir ebensowenig angezeigt und aussichtsvoll, wie eine mechanische 'Erklärung' der Maxwell'schen Gleichung“.

Während die Anwendungen seiner molekularen Zeitmaßidee ($\tau E \sim h$, mit E übertragene Energie) beim lichtelektrischen Effekt (Arbeit mit DEBYE 1913) experimentell (von W. GERLACH und E. MEYER) widerlegt wurden, beschäftigte sich SOMMERFELD weiter mit einer quantentheoretischen Lösung der Probleme der freien Wellenlänge (in der „Kinetischen Gastheorie-Woche“ in Göttingen 1913). Für die Erklärung des anomalen ZEEMAN-Effektes der Atome zog er allerdings nur die klassische Theorie der anisotropen Oszillatoren eines Göttinger Kollegen heran („Zur VOIGT'schen Theorie des ZEEMAN-Effektes“ 1914).

2.4 Der reife SOMMERFELD: Quantentheorie der Atome und der Metall-elektronen

Am Ende seiner Arbeit zur VOIGT'schen Theorie (eingereicht am 7. März 1914) wies SOMMERFELD darauf hin, daß es durch eine weitere Vereinfachung der angegebenen quasiklassischen Beschreibung der ZEEMAN-Effekte gelingen würde, zu einem „wirklichen Verständnis“ der dazugehörigen Atomvorgänge zu kommen. Dazu benötigte man dann freilich die Quantentheorie in den von NIELS BOHR aus Kopenhagen entwickelten Vorstellungen der Atomstruktur („On the constitution of atoms and molecules. Part I, II, III“, publiziert in *Philosophical Magazine* vom Juli, September und November 1913). Nach Erhalt einer Kopie von Part I schrieb SOMMERFELD an den dänischen Autor: „Das Problem, die Rydberg-Ritz'sche Constante durch das Planck'sche h auszudrücken, hat mir schon lange vorgeschwebt ... Wenn ich auch vorläufig noch etwas skeptisch bin gegenüber den Atommodellen überhaupt, es liegt in der Berechnung jener Constanten fraglos eine große Leistung vor“ (4. September 1913). Zwei Jahre später erweiterte er gerade jene BOHR'schen Atommodelle und wurde ihr Meister, bis die Quanten- und Wellenmechanik sie ablösten; dann gelang SOMMERFELD 1927 die Lösung des Problems der Metallelektronen, an der sich schon in seinem Göttinger Vortrag von 1913 versucht hatte.

Atombau und Spektrallinien (1915-1926) [3]

Trotz seiner ursprünglichen Skepsis gegenüber „Atommodellen überhaupt“ beschäftigte sich SOMMERFELD bereits in der *Elster-Geitel-Festschrift* („Die allgemeine Dispersionsformel nach dem BOHR'schen Modell“ 1915) mit einem solchen für Moleküle - die später auftretenden Schwierigkeiten sollten allerdings 1922 den ersten Hinweis geben, die gesamten Modellvorstellungen zu verlassen. Nach seinen Vorlesungen über die BOHR'sche Atomtheorie im Wintersemester 1914/15 und einigen Abklärungen (z. B. mit A. EINSTEIN bezüglich des vernachlässigbaren Ein-

flusses der Allgemeinen Relativitätstheorie auf die Elektronenbewegungen im Atom) veröffentlichte SOMMERFELD seine weiterführenden Ideen in drei grundlegenden Arbeiten, die eine erfolgreiche Quantentheorie des Atombaus und der Spektrallinien eigentlich erst ermöglichten (denn BOHR selbst kam nicht wesentlich über das Ein-Elektron-Atom hinaus, seine Theorie befand sich Ende 1915 in einer Krise):

„Zur Theorie der Balmerischen Serie“ (1915);

„Die Feinstruktur der Wasserstoff- und Wasserstoff-ähnlichen Linien“ (1915);

„Zur Theorie des Zeemaneffektes der Wasserstofflinien, mit einem Anhang über den Starkeffekt“ (1916).

Im ersten Aufsatz führte der Autor die zweiquantigen KEPLER-Bahnen der Atomelektronen ein; in der zweiten erklärte er die Feinstruktur mit Hilfe der Relativitätstheorie („Feinstrukturkonstante“), und in der dritten gab er die erfolgreiche und elegante Methode der komplexen Integration bei der Berechnung der quantentheoretischen Phasenintegrale an. „*Ich glaube nicht, daß ich je etwas gelesen habe, welches mir so viel Freude gemacht hat, und ich brauche nicht zu sagen, daß nicht nur ich, sondern alle hier das größte Interesse für Ihre bedeutungsvollen und schönen Resultate gehabt haben*“, schrieb NIELS BOHR Anfang 1916 nach München.

Bald gelang es SOMMERFELD und einer wachsenden Anzahl seiner Schüler, die hier entwickelten Methoden auf Röntgenspektren und komplizierte Atome auszudehnen („Atombau und Röntgenspektren. I“ 1918; „Auswahlprinzip und Verschiebungssatz bei den Serienspektren“ 1919 mit W. KOSSEL). Bereits 1919 erschien sein epochales Meisterwerk *Atombau und Spektrallinien*, das die BOHR-SOMMERFELDSche Atomtheorie in alle Welt trug. Kurz darauf wandte sich der Autor dem Problem der anomalen ZEEMAN-Effekte zu, die zwar mit formal quantentheoretischen Beziehungen beschrieben werden konnten („Ein Zahlenmysterium in der Theorie des Zeemaneffektes“ 1920; „Allgemeine spektroskopische Gesetze, insbesondere ein magnetooptischer Zerlegungssatz“ 1920; „Quantentheoretische Umdeutung der Voigtschen Theorie des anomalen Zeemaneffektes“ 1922; „Die Intensitäten der Mehrfachlinien und ihre Zeemankomponenten“ mit W. HEISENBERG 1922), aber zusammen mit der Molekülstruktur und den Mehrelektronenspektren („Über reguläre und irreguläre Dubletts“ mit G. WENTZEL 1921; „Über die Deutung verwickelter Spektren (Mangan, Chrom) nach der Methode der inneren Quantenzahlen“ 1923) entscheidend dazu beitragen, daß das BOHR-SOMMERFELDSche Atommodell schließlich aufgegeben werden mußte.

In der vierten Auflage von *Atombau und Spektrallinien* (1924) wies SOMMERFELD selbst auf einen wichtigen Teil der endgültigen Lösung hin: die neue von E. STONER vorgeschlagene Organisation der Elektronenbahnen (besser Zuordnung der Quantenzahlen), die sein früherer Schüler W. PAULI dann durch das „Ausschließungsprinzip“ mit der vierten Quantenzahl begründete und schließlich G. UHLENBECK und S. A. GOUDSMIT als Elektronenspin deuteten (1925). SOMMERFELD verfaßte dann noch einige wichtige spektroskopische Arbeiten („Über die Intensität von Multiplettlinien“ mit H. HÖNL 1925; „Über das Spektrum des Wasserstoffs“ mit A. UNSÖLD), ehe er in der letzten („Über das Spektrum des Wasserstoffs“ mit A. UNSÖLD 1926) die neue, endgültige Atomtheorie, nämlich die Wellenmechanik, anwandte. Es war die alternative, aber äquivalente Form zur Göttinger Quantenmechanik seines Schülers HEISENBERG. Siehe auch seinen späteren *Wellenmechanischen Ergänzungsband* (1929).

Elektronentheorie der Metalle (1927-1937)

Im November 1926 benutzte PAULI erstmalig die FERMI-Statistik, um den Paramagnetismus von Metallelektronen zu erklären. Sein Erfolg veranlaßte SOMMERFELD, sich systematisch mit

den durch Elektronen verursachten Metalleigenschaften zu beschäftigen; so wurde er zum eigentlichen Vater der quantenmechanischen Metallelektronentheorie, die die letzte große Leistung des Altmeisters der theoretischen Physik darstellt. Als wichtigste Arbeiten seien genannt:

„Zur Elektronentheorie der Metalle“ (1927) - hier wird grundsätzlich gezeigt, wie man elektrische und Wärmeleitung, Kontaktpotentiale und thermoelektrische Effekte aus der Entartung des FERMI-Gases der Elektronen verstehen kann;

„Zur Elektronentheorie der Metalle“ (1928) - hier wird eine wellenmechanische Deutung des RICHARDSON-Effektes und der Leitfähigkeit in Abhängigkeit von Temperatur und Druck sowie der Richtungsabhängigkeit von Leitfähigkeit und Thermokraft von Einkristallen geboten;

„The statistical theory of thermoelectric, galvanoelectric and thermomagnetic phenomena in metals“ (1931 mit N. H. FRANCK);

„Über die longitudinale Widerstandsänderung im Magnetfelde nach der elementaren Theorie“ (1935 mit B. W. BARTLETT).

Als eine Krönung des SOMMERFELDSchen Programms darf man den gewaltigen Artikel ansehen, den er mit seinem Schüler HANS ALBRECHT BETHE über die Elektronentheorie der Metalle für das *Handbuch der Physik* (1933) verfaßte.

2.5 Der Lehrer der theoretischen Physik

Der über siebzigjährige SOMMERFELD entschloß sich während des Zweiten Weltkriegs, „auf Anregung ehemaliger Schüler meine allgemeinen Vorlesungen über theoretische Physik herauszugeben, die ich während einer 32jährigen Lebrtätigkeit an der Münchener Universität in regelmäßigem Turnus gehalten habe“. Die sechs Bände erschienen zwischen 1943 und 1952, nämlich:

Band 1: *Mechanik* (1943);

Band 2: *Mechanik der deformierbaren Medien* (1945);

Band 3: *Elektrodynamik* (1948);

Band 4: *Optik* (1950);

Band 5: *Thermodynamik und Statistik* (1952);

Band 6: *Partielle Differentialgleichungen in der Physik* (1945).

Diese Bände legen, neben dem Spezialwerk über den Atombau, das er nach der quantenmechanischen Revolution umarbeitete und 1930 durch den *Wellenmechanischen Ergänzungsband* vervollständigte, das beste Zeugnis für den großen Lehrer ab, der einst zu Recht in der theoretischen Physik der „Praeceptor Germaniae“ genannt wurde. Vielleicht sollte man nur auf eine - Jahre nach seinem Tode erfolgte - wichtige Anwendung von SOMMERFELDS Weisheit aus dem sechsten Band hinweisen: TULLIO REGGE zog 1959 die SOMMERFELD-WATSON-Transformation heran, als er den Begriff der Drehmomente für quantentheoretische Systeme in die komplexe Ebene fortsetzte und damit eine neue Richtung in der Elementarteilchenphysik, die sogenannte REGGE-POL-Theorie, auslöste.

3 Wirkung - Die SOMMERFELD-Schule

ARNOLD SOMMERFELD hat von jeher hervorragende Schüler ausgebildet. Bereits einer der frühesten, OTTO BLUMENTHAL, bemerkte über den nachhaltigen Eindruck einer Vorlesung über projektive Geometrie: „*Sie war sehr gut und brachte eine große Menge Material*“. Die bereits hier angesprochene übersichtliche Darstellung des Stoffes und die vielen gebrachten Anwendungen zeichneten stets seinen Lehrstil aus. Außerdem hatte der aufstrebende Professor nie Schwierigkeiten, Themen für Doktorarbeiten zu vergeben; er erzog Mathematiker und Techniker ebenso wie später theoretische Physiker. „*Sommerfeld widmete einen großen Teil seiner Tagesarbeit den Schülern*“, urteilte HEISENBERG, „*und er verband im Umgang mit ihnen die ernste Strenge des Lehrers, die auch das persönliche Leben des Schülers mit freundschaftlichem Interesse betrachtet, mit der beiteren Gelassenheit des Münchener Professors, der gern bereit ist, mit einem Scherzwort Spannungen zu überbrücken oder über Unzulänglichkeiten hinwegzusehen*“.

Eine sicher unvollständige Liste der wichtigsten Schüler zählt folgende Namen auf (etwa in der Reihenfolge ihres Studiums oder Aufenthalts bei SOMMERFELD):

WALTER ROGOWSKI (Student, Aachen); PETER DEBYE (Dr. phil. 1908);
LUDWIG HOPF (Dr. phil. 1909); RUDOLF SEELIGER (Dr. phil. 1910);
FRITZ NOETHER (Dr. phil. 1911); WILHELM LENZ (Dr. phil. 1911);
MAX V. LAUE (Assistent 1909-12); WALTER FRIEDRICH (Assistent 1912);
PETER PAUL EWALD (Dr. phil. 1912); LÉON BRILLOUIN (Gast 1913/14);
WALTHER KOSSEL (Assistent bei J. ZENNECK 1913-1921);
ALFRED LANDÉ (Dr. phil. 1914); PAUL EPSTEIN (Dr. phil. 1914);
KARL GLITSCHER (Dr. phil. 1917); ADALBERT RUBINOWICZ (Assistent 1914-18);
ERWIN FUES (Dr. phil. 1920); ALFRED KRATZER (Dr. phil. 1920);
KARL HERTZFELD (Privatdozent 1920-24); GREGOR WENTZEL (Dr. phil. 1921);
WOLFGANG PAULI (Dr. phil. 1921); WERNER HEISENBERG (Dr. phil. 1923);
OTTO LAPORTE (Dr. phil. 1924); ERNST GUILLEMIN (Gast 1924-25);
VICTOR GUILLEMIN (Gast 1924-25); HEINRICH OTT (Dr. phil. 1925);
HANS GRIMM (Mitarbeiter 1926); HELMUT HÖNL (Dr. phil. 1926);
LINUS PAULING (Gast 1926); ALBRECHT UNSÖLD (Dr. phil. 1927);
WALTER HEITLER (Dr. phil. 1927); EDWARD CONDON (Gast 1926-27);
EDWIN KEMBLE (Gast 1927); CARL ECKART (Gast 1927-28);
WILLIAM HOUSTON (Gast 1927-28); RUDOLF PEIERLS (Student 1927-28);
HANS BETHE (Dr. phil. 1928); ISIDOR RABI (Gast 1928);
NATHAN FRANK (Gast 1929); PHILIP MORSE (Gast 1929);
HERBERT FRÖHLICH (Dr. phil. 1930); KARL BECHERT (Dr. phil. 1931);

OTTO SCHERZER (Dr. phil. 1931); JOSEF MEIXNER (Dr. phil. 1931);
FRIEDRICH MAUE (Dr. phil. 1931); WALTER HENNEBERG (Dr. phil. 1933);
HEINRICH WELKER (Habilitation 1938).

Sogar eine experimentelle Entdeckung ersten Grades gelang an SOMMERFELDS Lehrstuhl, als WALTER FRIEDRICH und PAUL KNIPPING (an W. C. RÖNTGENS Institut) auf Vorschlag MAX V. LAUES bei der Durchstrahlung von Einkristallen 1912 Interferenzen fanden, die zugleich die Wellennatur des Röntgenlichtes und die atomistische Gitterstruktur der Festkörper bewiesen.

Drei der bekanntesten SOMMERFELD-Schüler haben an der Universität Leipzig gewirkt, nämlich PETER DEBYE sowie GREGOR WENTZEL und WERNER HEISENBERG, letztere aus der großen Periode der BOHR-SOMMERFELDSchen Atomtheorie um 1920. Ich will meine Ausführungen über SOMMERFELD und seine Schüler mit einigen Anmerkungen über diese herausragenden Leipziger Lehrer beenden, wobei ich mit dem beginne, der zuerst hierher kam.

Gregor Wentzel wurde am 17. Februar 1898 in Düsseldorf geboren. Er studierte Physik in Freiburg (1916-19 bis auf die Militärdienstzeit 1917/18), Greifswald (1919/20) und München (1920/21) und promovierte 1921 mit einer Arbeit über die Röntgenspektren. Der 1922 habilitierte WENTZEL beteiligte sich an der Aufgabe, die BOHR-SOMMERFELDSche Quantentheorie auszubauen und insbesondere zur Erklärung von Details des emittierten Röntgenlichtes heranzuziehen. Nach der Entdeckung der Quantenmechanik durch HEISENBERG erweiterte er sie Anfang 1926 auf mehrfach-periodische Systeme. Im selben Jahr nahm er den Ruf auf das Leipziger Extraordinariat für theoretische Physik an, als Nachfolger von GEORGE JAFFÉ, der nach Gießen gegangen war. In Leipzig behandelte WENTZEL Probleme der Wellenmechanik, etwa die Berechnung der Linienintensitäten und die Theorie des photoelektrischen Effektes. Bereits 1928 holte ihn die Universität Zürich als Nachfolger für den nach Berlin berufenen ERWIN SCHRÖDINGER, und er wurde Kollege seines Freundes WOLFGANG PAULI von der ETH. In den Züricher Jahren wandte er sich vor allem der relativistischen Quantentheorie zu und schuf grundlegende Beiträge zum Verständnis der Kernkräfte. 1948 verließ er Zürich und Europa - auch die Nachfolge seines Lehrers SOMMERFELD konnte ihn nicht locken - und wirkte zwanzig Jahre lang an der University of Chicago. Nach seiner Emeritierung kehrte er in die Schweiz zurück, nach Ascona, wo er am 12. August 1978 starb. WENTZEL gehörte sicher zu den begabtesten und selbständigsten Schülern SOMMERFELDS, und seine Arbeiten spiegeln die Sauberkeit und Beweglichkeit der Methoden des Meisters wider. Vielleicht fehlte ihm nur das gehörige Glück, um mit so großen eigenen Leistungen in die Physikgeschichte einzugehen, wie es den beiden anderen „Leipzigern“ DEBYE und HEISENBERG gelang.

Peter Joseph William Debye (Debije) stammte aus dem niederländischen Maastricht, wo er am 24. März 1884 geboren wurde. Von 1901 bis 1905 studierte er an der Technischen Hochschule in Aachen Elektrotechnik, blieb aber nach dem Diplom als SOMMERFELDS Assistent in der Forschung und kam nach München mit, wo er Anfang 1909 seine Dissertation über den Lichtdruck auf Kugeln von beliebigem Material abschloß. Früher als der Lehrer arbeitete DEBYE über die Quantentheorie, als er im Oktober 1910 das PLANCKSche Strahlungsgesetz mit Hilfe von quantisierten Ätherschwingungen ableitete. SOMMERFELD sicherte seinem ersten Meisterschüler 1911 das vorher von EINSTEIN besetzte Extraordinariat an der Universität Zürich. Wieder gelang DEBYE ein großer Wurf mit einer Theorie der Festkörper, in der er vor allem das Verhalten bei tiefen Temperaturen quantentheoretisch richtig beschrieb (1912). Dann wechselte er auf ein Ordinariat in Utrecht (1912-1914) und nahm schließlich den ehrenvollen Ruf nach Göttingen an, wo er nicht nur seine wichtigen theoretischen Untersuchungen über polare Moleküle und Röntgenstrahlinterferenzen fortsetzte, sondern auch mit dem Schweizer Schüler PAUL SCHERRER ein experimentelles Verfahren zur Röntgenstrukturuntersuchung polykristalliner Proben erfand, die DEBYE-SCHERRER-Methode (1915). Daneben beteiligte sich DEBYE an der Anwendung der

BOHR-SOMMERFELDSchen Atomtheorie, z. B. 1916 auf den ZEEMAN-Effekt. 1923 - er war seit 1920 den schlechten Forschungsbedingungen im Nachkriegsdeutschland durch den Wechsel (mit SCHERRER) an die ETH Zürich ausgewichen - sagte er unabhängig von ARTHUR COMPTON theoretisch dessen Effekt voraus. Sein wissenschaftliches Hauptinteresse hatte sich seit langem auf Strukturuntersuchungen verlagert, wenn ihm auch anderweitig vielbeachtete Erfolge gelangen, etwa mit der DEBYE-HÜCKELschen Theorie starker Elektrolyte (1923) oder dem Vorschlag, die Entmagnetisierung paramagnetischer Substanzen auszunützen, um tiefste Temperaturen zu erreichen (1926). Im Wintersemester 1927/28 trat er die Nachfolge OTTO WIENERS als Experimentalphysiker in Leipzig an. Hier baute er, zusammen mit den Theoretikern HEISENBERG (dem Nachfolger THEODOR DES COUDRES') und FRIEDRICH HUND (der 1929 für GREGOR WENTZEL kam), ein neues Zentrum der Atomphysik auf, das viele Schüler und Gäste anzog. 1935 nahm DEBYE den Ruf zum Direktor des in Berlin-Dahlem neuerrichteten Kaiser-Wilhelm-Institutes für Physik an, das neben der Strukturforschung von Molekülen, Flüssigkeiten und Festkörpern - der Direktor erhielt dafür 1936 den Chemie-Nobelpreis - vor allem Untersuchungen auf den Gebieten der Atomkern- und der Tieftemperaturphysik betreiben sollte. Ehe die Arbeiten so richtig in Gang kamen, brach der Krieg aus, und DEBYE konnte als Holländer das an seinem Institut eingerichtete geheime Uranprojekt nicht leiten. Er ging im Januar 1940 als Gastprofessor an das Chemistry Department der Cornell University in Ithaca, New York, wo er 1950 emeritiert wurde und am 2. November 1966 starb.

Über *Werner Heisenberg*, den SOMMERFELD unter seinen Schülern - neben DEBYE und WOLFGANG PAULI - am höchsten schätzte, brauche ich nicht viel zu sagen. Vor gerade zwei Jahren haben wir hier in Leipzig mit einer umfangreichen Konferenz seines 90. Geburtstages gedacht und dabei sein Leben und seine Beiträge zur Physik des 20. Jahrhunderts beleuchtet, die ihm wohl den Rang unter den ganz Großen der Naturwissenschaften aller Zeiten sichern [4].

Lassen Sie mich abschließend anführen, daß die Lebensarbeit SOMMERFELDS trotz aller glänzenden Erfolge als Schöpfer und Lehrer der theoretischen Physik - in der Tat kann man sagen, daß seine Schule fortwirkt, wo immer in der Welt diese Wissenschaft auf hohem Niveau getrieben wird - besonders durch die politischen Schläge beeinträchtigt wurde, die seine deutsche Heimat seit 1914 erlitt. Selbst ein echter Patriot, der bis 1918 durchaus auch nationalistische Meinungen vertrat, wuchs er immer stärker in den internationalen Wissenschaftsbetrieb hinein. Die Aktionen der Nationalsozialisten, die in ihm bereits seit 1927 einen Juden sahen, trafen ihn und seine Schule besonders hart: fast die Hälfte gerade seiner bedeutendsten Studenten konnte schließlich, als direkte oder indirekte Folge des Rassenwahns, nicht mehr in der Heimat arbeiten. Als Beispiel sei der spätere Nobelpreisträger HANS BETHE genannt, der seinem Professor am 19. April 1933 schrieb:

„Sie werden wahrscheinlich nicht wissen, daß meine Mutter Jüdin ist. Ich bin also nach dem neuen Beamtengesetz ‚nichtarischer‘ Abstammung und folglich nicht würdig, Beamter des deutschen Reiches zu sein“.

Der alte SOMMERFELD hat sich den unwissenschaftlichen Auseinandersetzungen mannhaft gestellt und die Schlacht um die Nachfolge auf seinem Lehrstuhl (statt HEISENBERG wurde der unfähige Parteigenosse WILHELM MÜLLER Theorieordinarius) verloren, aber den Krieg gegen die „arische Physik“ mitgewonnen. Die Verluste der unseligen Politik des Dritten Reiches freilich beklagen wir noch heute.

Literaturverzeichnis

[1] SOMMERFELDS Leben und Werk wird in folgenden Büchern dargestellt:

A. Sommerfeld: Autobiographische Skizze. In: A. Sommerfeld, *Gesammelte Schriften*, Band IV, Braunschweig: Vieweg, 1968. S. 673-682;

U. Benz: *Arnold Sommerfeld - Lehrer und Forscher an der Schwelle zum Atomzeitalter 1868-1951*. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsanstalt, 1975;

M. Eckert: *Die Atomphysiker. Eine Geschichte der theoretischen Physik am Beispiel der Sommerfeldschule*. Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg, 1993;

M. Eckert, W. Pricha, H. Schubert und E. Torkar: *Geheimrat Sommerfeld - Theoretischer Physiker* (Ausstellungskatalog). München: Deutsches Museum, 1984

- [2] Das wissenschaftliche Werk ist weitgehend vereint in *Arnold Sommerfeld: Gesammelte Schriften*, Band I-IV / herausgegeben von F. Sauter. Braunschweig: Vieweg, 1968
- [3] Details über SOMMERFELDS Pionierbeiträge zur Atomstruktur werden wissenschaftshistorisch behandelt in J. Mehra und H. Rechenberg: *The Historical Development of Quantum Theory. Band 1 und 2*. New York: Springer, 1982
- [4] Siehe den Konferenzband: *Werner Heisenberg - Physiker und Philosoph* / herausgegeben von B. Geyer, H. Herwig und H. Rechenberg. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1993
- [5] Siehe etwa H. Rechenberg: „Deutsche“ kontra „Jüdische Physik“ - *Persönlichkeiten und Ideologien* (Vortrag an der Volkshochschule München). München: Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik, 1989