

Zürcher Beiträge zur modernen Physik

In den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts haben die Relativitätstheorie und die Quantentheorie das wissenschaftliche Weltbild grundlegend verändert. Hier werden einige Aspekte dieser Entwicklung beleuchtet, die mit Mitgliedern und Publikationen der NGZH zusammenhängen.

Im Jahr 1900 stellte der deutsche Physiker *Max Planck (1858-1947)* seine Strahlungsformel vor und bemerkte, dass diese nur mit Hilfe von hypothetischen Energiequanten verstanden werden kann, die über die damals bekannten physikalischen Gesetze hinausgingen. Der vermutlich erste Physiker, der die Quanten als real beurteilte, war der 26-jährige ETH-Physiker *Albert Einstein (1879-1955)*, damals ein unbekannter Angestellter im Berner Patentamt. In einer seiner vier Publikationen im «Annus mirabilis» 1905 begründete er den damals bekannten, aber unverständenen Photoeffekt (aus Metallen durch Licht «herausgeschlagene» Elektronen) mit realen Lichtquanten oder Lichtteilchen und widersprach damit der gängigen Auffassung von Licht als kontinuierliche elektromagnetische Wellen. Damit kam die Quantentheorie ins Rollen.

Für Einstein war jedoch seine Relativitätstheorie wichtiger, für die er sich, ab 1909 als Dozent für theoretische Physik an der Universität Zürich, mit grossem Engagement einsetzte. Sein Studienfreund Marcel Grossmann unterstützte ihn in mathematischen Belangen und ermöglichte ihm die Weiterentwicklung der speziellen Relativitätstheorie zur allgemeinen Relativitätstheorie, die auch Gravitationsfelder einschliesst. Obschon die vollständige Theorie erst 1916 in Berlin publiziert wurde, entstanden die Grundlagen dazu in Zürich, wo Einstein 1912-14 (nach einem Abstecher nach Prag) an der ETH theoretische Physik lehrte (vgl. dazu VJS 4|2015 S. 11-15).

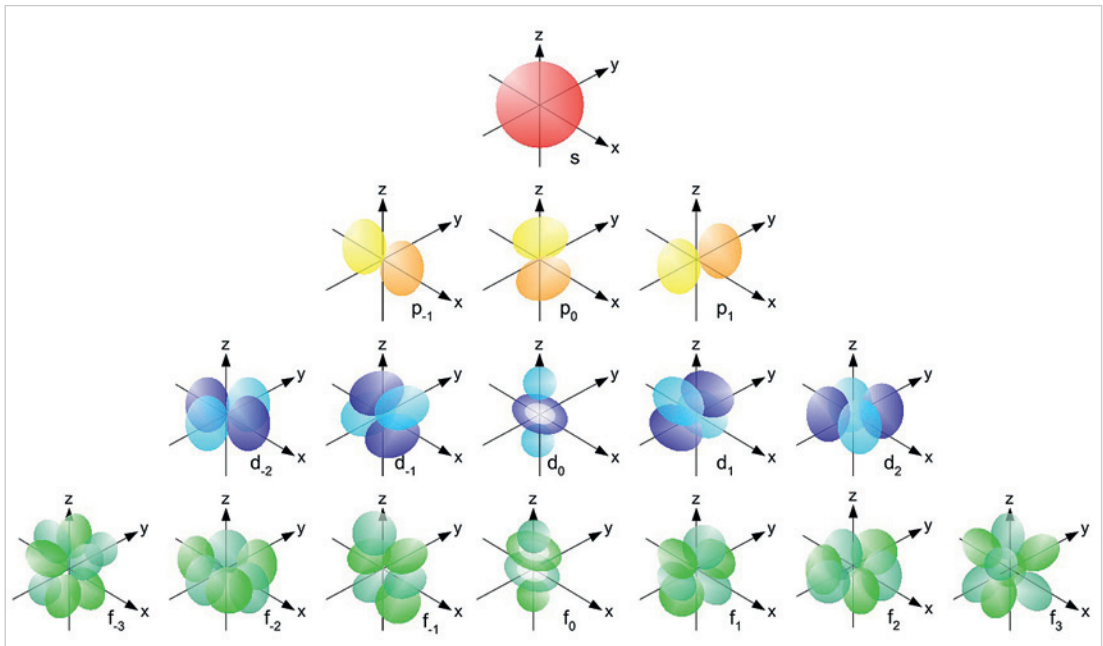
Einsteins Publikationen in der VJS
Obwohl 1887 die Physikalische Gesellschaft Zürich und 1908 in Glarus die Schweizerische Physikalische Gesellschaft (SPG) gegründet wurde, blieben viele Physiker der Vierteljahrsschrift der NGZH treu, die sich zu einer etablierten Zeitschrift

entwickelt hatte. Für Einstein als «korrespondierendes Mitglied der NGZH» war es naheliegend, neben den Annalen der Physik auch die Vierteljahrsschrift für die Publikation der noch unfertigen Theorie der Gravitation zu verwenden.

Ein erster Artikel «Die Relativitätstheorie» (VJS 1-2|1911 S. 1-14) war die schriftliche Fassung seines Vortrages bei der NGZH vom 16.1.1911, in der die spezielle Relativitätstheorie von 1905 erläutert wird. Im Artikel «Physikalische Grundlagen einer Gravitationstheorie» (VJS 3-4|1913 S. 284-290) werden die Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie dargelegt, gefolgt von einem Artikel von Marcel Grossmann über «Mathematische Begriffsbildungen zur Gravitationstheorie» (S. 291-297). Beide Artikel sind gespickt mit Differenzialgleichungen und stellen hohe Anforderungen an die mathematischen Kenntnisse der Leser. Eine vereinfachte Beschreibung beider Theorien findet sich im Neujahrsblatt auf das Jahr 2020 (S. 61-72).

Zürich als Brutstätte der «Wellenmechanik»
Um 1900 existierte nur eine rudimentäre Theorie der Atome, die Eigenschaften wie die Absorption und Emission von Licht (Spektrallinien) oder die Veränderung der spezifischen Wärmen bei unterschiedlichen Temperaturen nicht erklären konnte. Ebenso konnte das Periodensystem der Elemente nicht durch physikalische Prinzipien verstanden werden.

Die Quantentheorie wurde 1925-26 in zwei mathematisch unterschiedlichen «Darstellungen» gefunden. Die «Matritzentheorie» wurde in Göttingen und Leipzig durch Werner Heisenberg (1901-1976) mit seiner Unschärferelation als zentralem Element gefunden. Die mit Hilfe von Differenzialgleichungen formulierte «Wellentheorie» wurde in Zürich durch Erwin Schrödinger aufgestellt. Der englische Physiker Paul Dirac konnte zeigen, dass beide Theorien ineinander übergeführt werden können und deshalb äquivalent sind. Man bezeichnet sie deshalb heute gemeinsam als Quantentheorie. Wesentliche Beiträge zur Entwicklung der «Wellentheorie» wurden an den beiden Zürcher Hochschulen durch Mitglieder der NGZH geleistet, was im Folgenden kurz skizziert werden soll.



Die Schrödinger-Gleichung für die Zustände (Orbitale) eines Elektrons im elektrischen Feld eines Protons ergibt Lösungen für 3 Quantenzahlen n , k und m . Dargestellt sind die s -, p -, d -, f -Orbitale, die den Quantenzahlen $k = 0, 1, 2, 3$ entsprechen. In jedem Orbital können sich nach dem Pauli-Prinzip maximal 2 Elektronen aufhalten. Zuoberst liegt das rot dargestellte kugelsymmetrische Orbital mit Quantenzahlen $n=1, k=0, m=0$, das für H und He zutrifft. Alle Elemente des Periodensystems können mit den 3 Quantenzahlen beschrieben werden. So hat He 2 Elektronen im Zustand s (d.h. $k=0$) in der 1. Schale und wird abgekürzt als $1s^2$. Mit Li beginnt die Besetzung der 2. Schale: $1s^2 2s^1$. N mit total 7 Elektronen wird $1s^2 2s^2 2p^3$, etc. Daraus folgt die Struktur des Periodensystems wie auch die bekannte «Oktettregel» für einfache chemische Bindungen. (Bild: <https://chem.libretexts.org/@go/page/1650>)

Pierre Weiss (1865-1940), geboren in Mulhouse, war ab 1902 NGZH-Mitglied und Direktor des Physik Institutes der ETH bis ca. 1915. Er hat sich auf dem Gebiet des Magnetismus einen Namen gemacht und entwarf eine fruchtbare Theorie des Ferromagnetismus. Er publizierte diese in der Vierteljahrsschrift: «Anschauungen über Magnetismus, ihre Beziehungen zur Molekularphysik und das Magneton» (VJS 1911|1-2 S. 213-228). Er vermutete, dass bestimmte Bausteine im Aufbau der Materie von unveränderlichem magnetischem Moment, die Magnetonen, das magnetische Verhalten der Substanzen bestimmen. Die Quantentheorie hat später gezeigt, dass seine Magnetonen mit den Spins der Teilchen zu identifizieren sind, die tatsächlich unveränderlich sind.

Peter Debye (1884-1966) aus Maastricht, Assistent von Arnold Sommerfeld, trat 1911 als Extraordinarius für theoretische Physik an der Universität Zürich die Nachfolge von Einstein an. Dort hat er seine bekannte Theorie der spe-

zifischen Wärme fester Körper verfasst (Annalen der Physik, Juli 1912), zog aber bereits im Sommer 1912 weiter an die Universität Utrecht. Weltweit bekannt geworden durch die Debye-Scherrer-Pulvermethode zur Strukturanalyse von Kristallen mittels Röntgenstrahlen, wurde er 1920 zusammen mit seinem Assistenten Paul Scherrer an die ETH berufen. Dadurch gewann die Physik an der ETH eine gänzlich neue Richtung und zahlreiche internationale Beziehungen. Debye war ab 1921 korrespondierendes Mitglied und Scherrer Mitglied der NGZH. In der Hauptversammlung der NGZH im Zürichhorn im Juni 1921 führte Debye in das elektrische Planetensystem der Moleküle ein (Bohrsches Atommodell von 1913); jedes Mitglied konnte sich auf seinen Apparat stellen, auf dem man in eine zwangsläufige Rotation versetzt wurde (Festschrift zum 200 Jahr-Jubiläum).

Debye forschte zum elektrischen Dipolmoment von Ionen in Lösungen und seine Zusammenhänge mit der chemischen Wertigkeit

bildeten eine Brücke zwischen Physik und Chemie. Er wechselte 1927 an die Universität Leipzig, zusammen mit seinem in Zürich geborenen Assistenten *Felix Bloch (1905-1983)*. Bloch schrieb dort bei Heisenberg eine Dissertation «Über die Quantenmechanik der Elektronen in Kristallgittern». Die später als Bloch-Zustände bezeichneten Elektronen- und Löcherwellen in Halbleiter-Kristallen bildeten die theoretische Basis für die Entwicklung der Halbleitertechnologie (vgl. VJS 2020|4 S. 8-11).

Erwin Schrödinger (1887-1961) wurde 1922 auf den vakanten Lehrstuhl für theoretische Physik an der Universität Zürich berufen. Er war korrespondierendes NGZH-Mitglied und pflegte intensiven Austausch mit seinen Kollegen an der ETH. Er befasste sich mit der neuen Quantenmechanik, die durch Heisenberg bei Niels Bohr in Kopenhagen und Max Born in Göttingen in den Jahren 1924-25 entwickelt wurde. Schrödinger störte sich daran, dass die verwendeten Matrizen in erster Linie die stationären Energieniveaus der Elektronen beschrieben, zwischen denen sie abrupt wechseln. Es schwebte ihm eine kontinuierliche Formulierung auf der Basis von Differenzialgleichungen vor, die ihm physikalisch adäquater als die «Quantenspringerei» erschien.

Der Funke sprang beim Jahreswechsel 1925-26 über und wurde durch ein Seminar Anfang Dezember über die Dissertation des französischen Physikers Louis de Broglie vorbereitet. Dieser äusserte die kühne Idee, der Welle-Teilchen-Dualismus sei nicht nur auf Licht, sondern auf jegliche Materie anzuwenden. Da de Broglie die Wellen nicht mit einer Differenzialgleichung formulierte, meinte Debye etwas verächtlich, die Behandlung von Wellen sei bei de Broglie «ziemlich kindisch», man bräuchte eine Wellengleichung.

Beim nächsten Seminar zu diesem Thema nach dem Jahreswechsel begann Schrödinger seinen Vortrag mit den Worten: «*Mein Kollege Debye wandte ein, dass man eine Wellengleichung bräuchte. Nun, ich habe eine gefunden!*» und schrieb die heute «Schrödinger Gleichung» genannte Formel an die Wandtafel (Moore 1994). Damit war die heute am besten bekannte Form der Quantentheorie geboren, die die stationären Energieniveaus der Elektronen in einem Atom durch Eigenwerte einer Differenzialgleichung ausdrückt.

Wolfgang Pauli (1900-1958), ein österreichischer Physiker, erhielt 1928 einen Lehrstuhl für theoretische Physik an der ETH. Ab 1935 arbeitete er auch teilweise am Institute for Advanced Study in den USA. Seine Einbürgerung in die Schweiz wurde vorerst nicht bewilligt, sondern erst, als er 1945 den Nobelpreis für die Entdeckung des «Pauli-Prinzips» erhielt. Er kehrte 1946 als US-Schweizer Doppelbürger nach Zürich zurück, wo er auch der NGZH beitrug. Das «Pauli-Prinzip» beschränkt die Besetzung der Energieniveaus in Atomen auf maximal zwei Elektronen mit unterschiedlichem Spin, aber gleichen Quantenzahlen. Erst durch diesen Zusatz kann die Schrödinger-Gleichung das Periodensystem der Elemente korrekt wiedergeben. Pauli beschrieb in einem NGZH-Vortrag «Die Geschichte des periodischen Systems der Elemente» und publizierte die schriftliche Fassung in der VJS 1952|2 S. 137-142.

Paul Scherrer (1890-1969) aus Herisau studierte an der ETH Mathematik und Physik und promovierte in Göttingen mit Arbeiten zum Faraday-Effekt. Ab 1921 lehrte er an der ETH Experimentalphysik und war Mitglied der NGZH. 1925 organisierte er den ersten internationalen Physikerkongress nach dem ersten Weltkrieg. 1927 trat er die Nachfolge von Debye an und fokussierte die Forschung am Physikalischen Institut auf die neue Kernphysik.

Unter seiner Federführung wurde 1940 der erste Zyklotron-Teilchenbeschleuniger an der ETH gebaut. Zudem war er 1954 an der Gründung des CERN bei Genf sowie wenig später an der Gründung der Reaktor AG in Würenlingen beteiligt, deren Ziel es war, einen Schweizer Kernreaktor zur Stromerzeugung zu entwickeln. Scherrers Neujahrsblatt 1957 «Atomenergie» ist Zeuge dieser Anstrengungen. Knapp 20 Jahre nach seinem Unfalltod wurde 1988 entschieden, das Eidg. Institut für Reaktorforschung und das Schweiz. Institut für Nuklearforschung in das neue «Paul Scherrer Institut» überzuführen.

Fritz Gassmann

Literatur

Moore W. J. 1994. Erwin Schrödinger – Eine Biographie. Primus Verlag, ISBN 978-3-534-24047-0, 423 Seiten.