

# Eine Entdeckung von ganz außerordentlicher Tragweite

Schrödingers Briefwechsel zur Wellenmechanik und zum Katzenparadoxon

Bearbeitet von  
Karl von Meyenn

1st Edition. 2010. Buch. xxxviii, 1437 S. Hardcover

ISBN 978 3 642 04334 5

Format (B x L): 15,5 x 23,5 cm

Gewicht: 1672 g

[Weitere Fachgebiete > Physik, Astronomie > Physik Allgemein > Geschichte der Physik](#)

Zu [Inhaltsverzeichnis](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

  
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung [beck-shop.de](http://beck-shop.de) ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

## Kapitel II

# Aushilfsassistent im Exnerschen Institut: 1911–1920 – Dynamische und statistische Gesetzmäßigkeiten in der Molekularphysik

9	Radioaktive Zerfälle und Schweidlersche Schwankungen	20
10	Röntgenstrahlinterferenzen und Molekulartheorie der festen Körper	23
11	Brownsche Molekularbewegung und Ehrenhafts Subelektronen	27
12	Paradoxien der Lichtquanten	30
13	Statistische Gesetze in der Strahlungstheorie	32
14	Neue Perspektiven. Czernowitz	36

## Aushilfsassistent im Exnerschen Institut: 1911–1920

*Wie kann man überhaupt aus der Betrachtung von Vorgängen, deren Verlauf im ganzen wie im einzelnen vorläufig noch vollständig dem blinden Zufall überlassen bleibt, wirkliche Gesetze ableiten? ... Denn während ein dynamisches Gesetz dem Kausalbedürfnis vollständig genügt und daher einen einfachen Charakter trägt, stellt jedes statistische ein Zusammengesetztes vor, bei dem man niemals stehen bleiben kann, da es stets noch das Problem der Zurückführung auf seine einfachen dynamischen Elemente in sich birgt. Die Lösung derartiger Probleme bildet eine der Hauptaufgaben der fortschreitenden Wissenschaft.*

Planck (1914)

*1. Wie ist es möglich, daß sich der Effekt des Zufalls berechnen lasse, daß also zufällige Ursachen gesetzmäßige Wirkungen haben? 2. Wie kann der Zufall entstehen, wenn alles Geschehen nur auf regelmäßige Naturgesetze zurückzuführen ist? oder mit anderen Worten: Wie können gesetzmäßige Ursachen eine zufällige Wirkung haben?*

von Smoluchowski (1918)

*Aber vergessen wir nicht, daß sich uns das Kausalitätsprinzip und das Kausalitätsbedürfnis ausschließlich durch die Erfahrung an makrokosmischen Vorgängen aufgedrängt hat und daß eine Übertragung derselben auf mikrokosmische Erscheinungen, also die Voraussetzung, daß jedes Einzelereignis strenge kausal bedingt sei, keine auf Erfahrung basierte Berechtigung mehr hat. ... Wir können natürlich auch nicht behaupten, daß die Einzelereignisse wirklich zufällig, d. h. ohne Ursache*

*verlaufen, wir wollen uns nur dagegen verwahren, daß, wie es so häufig geschieht, das Gegenteil positiv behauptet wird. Die Frage, ob Zufall, ob Kausalität im Mikrokosmos herrscht, sollte offenbleiben, bis vielleicht einmal eine Entscheidung wird getroffen werden können.*

Exner (1919)

## 9 Radioaktive Zerfälle und Schweidlersche Schwankungen

Schrödingers erste wissenschaftliche Veröffentlichung war das Ergebnis einer Experimentaluntersuchung *Über die Leitung der Elektrizität auf der Oberfläche von Isolatoren an feuchter Luft*,<sup>1</sup> die der 22-jährige im Frühjahr 1910 unter Anleitung von Egon von Schweidler im Exnerschen Institut zum Abschluß brachte. Das Thema derselben stand in einem engen Zusammenhang mit den damals am Institut betriebenen Forschungen über atmosphärische Elektrizität, Höhenstrahlung und Radioaktivität, an denen sich auch Schrödinger beteiligte.<sup>2</sup> Mit dieser Arbeit, die im Urteile Hasenöhrls *wie alle Arbeiten Schrödingers, ein sehr gut fundiertes, ausgebreitetes Wissen und eine bedeutende Begabung* erkennen läßt,<sup>3</sup> wurde Schrödinger am 20. Mai 1910 zum Doktor der Philosophie promoviert.<sup>4</sup>

Besonders aber die radioaktiven Strahlungen gaben der Forschung jener Jahre noch zahlreiche Rätsel auf, die zum Teil erst durch die Erkenntnis des universellen Charakters des Welle-Teilchen-Dualismus aller Arten von Strahlung eine allgemeine Erklärung erhielten und die deshalb im Hinblick auf die Entwicklung von Schrödingers Denkweise bedeutungsvoll sind.<sup>5</sup>

Aus diesem Grunde sollen hier auch Egon von Schweidlers grundlegenden Beiträge zu diesem Gegenstand etwas ausführlicher besprochen werden. Von Schweidler hatte während des internationalen Radiologenkongresses in Liège im Jahre 1905 das Auftreten von Schwankungen bei den Zerfallsraten radioaktiver Umwandlungsprozesse zuerst festgestellt und damit einen neuen Zugang zur quantitativen Beschreibung der Zerfallsgesetze eröffnet.<sup>6</sup> Sofern man nämlich den Zerfall selbst als ein statistisches Phänomen auffaßte, sollte die mittlere Schwankungsbreite der Zerfälle pro Zeiteinheit mit abnehmender Anzahl der noch vorhandenen Mutter-

<sup>1</sup> Schrödinger (1910).

<sup>2</sup> Einen guten Überblick über den Stand der Kenntnisse auf diesem Gebiete vermittelt der 1914 von Walter Kaufmann, Alfred Coehn und Alfred Nippoldt herausgegebene Band **IV**, 2. und 3. Teil von *Müller-Pouillet's Lehrbuch der Physik*.

<sup>3</sup> Vgl. *Kommissionsbericht betreffend das Habilitationsgesuch des Herren Dr. Erwin Schrödinger* vom 27. Mai 1913, Universitätsarchiv Wien. Siehe auch von Meyenn (1984, S. 89).

<sup>4</sup> Gemäß der Personalakte Schrödingers an der Universität Wien.

<sup>5</sup> Siehe hierzu die ausführliche historische Studie von Wheaton [1983].

<sup>6</sup> von Schweidler (1905).

kerne in gesetzmäßiger Weise anwachsen.<sup>7</sup> Obwohl bei diesen Überlegungen die Voraussetzung eines statistischen Ereignisses nur als ein Behelf für die Unkenntnis des eigentlichen Zerfallsmechanismus angesehen wurde, ist hiermit der Vorstellung akausaler Vorgänge im Molekularbereich der Weg bereitet worden.<sup>8</sup> Die experimentelle Bestätigung der Schweidlerschen Schwankungen wurde kurz darauf durch Schrödingers Studienfreund Fritz Kohlrausch geliefert,<sup>9</sup> der in Anerkennung dieser Leistung 1911 die durch von Schweidlers Wegberufung nach Innsbruck freiwerdende Hauptassistentenstelle bei Exner erhielt. Eine gründliche theoretische Analyse dieser Meßergebnisse wurde jedoch erst ein Jahrzehnt danach durch Schrödinger vorgenommen, der zuvor für diesen Zweck eine statistische Theorie der Meßanordnungen aufgestellt hatte.<sup>10</sup> Für diese Arbeiten wurde Schrödinger 1920 von der Österreichischen Akademie der Wissenschaften mit dem Haitinger-Preis ausgezeichnet.<sup>11</sup>

Die Schwankungserscheinungen wurden aber auch zur Untersuchung grundlegender Fragen in anderen physikalischen Forschungsbereichen herangezogen. So glaubte von Schweidler z. B. noch im Jahre 1910 mit ihrer Hilfe den andauernden Disput über die wahre Natur der Kern- $\gamma$ -Strahlung beilegen zu können. Diese Strahlung sollte nämlich nach Rutherfords Meinung aus elektromagnetischen Ätherimpulsen bestehen, die – ähnlich wie die Röntgenstrahlung – durch die plötzliche Beschleunigung der bei den Kernzerfällen ausgeschleuderten  $\beta$ -Elektronen entstehen. Der an der australischen Universität von Adelaide wirkende Physiker William Henry Bragg hingegen vertrat eine Korpuskularhypothese. Er behauptete, daß es sich bei den  $\gamma$ -Strahlen um einen Strom neutraler und nahezu gewichtsloser Partikelchen handle.<sup>12</sup> Eine weitere intermediäre Alternative hatte Johannes Stark vorgeschlagen, der den Entstehungsvorgang der  $\gamma$ -Strahlung ähnlich wie Rutherford voraussetzte, doch ihre Ausbreitung gemäß der Quantenhypothese in Form von kleinen gerichteten Energiepaketen annahm.<sup>13</sup>

<sup>7</sup> Wenn  $z$  die mittlere Anzahl der pro Zeiteinheit zerfallenden Kerne ist, so gilt für die mittlere Schwankung  $\delta z/z = 1/\sqrt{z}$ .

<sup>8</sup> Siehe hierzu insbesondere die historischen Untersuchungen von Amaldi (1977) und van Brakel (1984).

<sup>9</sup> Kohlrausch (1906). – Siehe hierzu auch die zeitgenössischen Übersichtsreferate über das Studium der Schwankungserscheinungen von Meyer (1908/09), von Bortkiewicz [1913] und die spätere Darstellung von Kohlrausch [1926].

<sup>10</sup> Schrödinger (1918a; 1919a).

<sup>11</sup> Dieser 1904 von dem Industriellen Ludwig Camillo Haitinger gestiftete Preis wurde abwechselnd für die beste chemische bzw. physikalische Arbeit verliehen, die in den letzten drei Jahren veröffentlicht worden war. Der Preis für das Jahr 1920 fiel zu gleichen Teilen auf Schrödinger und Hans Thirring.

<sup>12</sup> Siehe Rutherford [1907, S. 188f.] und Bragg (1910). Einen zusammenfassenden Übersichtsbericht über die  $\gamma$ -Strahlung enthält das damalige Standardwerk von Kohlrausch [1927].

<sup>13</sup> Stark (1909a, b). Starks Verdienste um die frühe Quantentheorie werden zuweilen im Hinblick auf seine spätere Agitator- und Querulantenrolle unterschätzt. Schrödinger hat jedoch seine Rolle für sehr bedeutend gehalten und ihn einmal den eigentlichen *Begründer des  $h\nu$*  genannt (siehe hierzu von Meyenn (1988a)).

Von Schweidlers Vorschlag zur Klärung der Frage nach der Natur der  $\gamma$ -Strahlung bestand in der folgenden Überlegung:<sup>14</sup> Handelt es sich bei der  $\gamma$ -Strahlung um eine Wellenstrahlung, so sollten sich die Strahlungsimpulse kugelförmig und kontinuierlich über den ganzen Raum ausbreiten. Mit einer Ionisationskammer könnte man dann die Anzahl der Strahlungsimpulse unabhängig von der jeweils erfaßten Strahlungsmenge registrieren. Folglich wäre auch das Zählergebnis von der Entfernung zwischen der aufgestellten Registrierapparatur und der Strahlungsquelle unabhängig. Eine gerichtete Korpuskularstrahlung hingegen würde eine Ortsabhängigkeit der registrierten Impulse ergeben. Von Schweidlers Vorschlag wurde durch Edgar Meyer, der damals noch als Privatdozent bei Johannes Stark in Aachen tätig war, experimentell durchgeführt. Das Experiment entschied zunächst für den gerichteten Charakter der Strahlung, doch das Resultat wurde in der Folge wegen verschiedener



**Abb. 6** Schrödinger zu Beginn seines Studiums an der Universität Wien

---

<sup>14</sup> E. von Schweidler (1910a, b).

experimenteller Mängel nicht als entscheidend angesehen.<sup>15</sup> Zwei Jahre darauf haben Rutherford und Andrade den Wellencharakter der  $\gamma$ -Strahlung durch Nachweis ihrer Interferenzfähigkeit und die Bestimmung ihrer Wellenlänge erbracht.<sup>16</sup>

Als Registriergeräte für derartige Messungen verwendete man vorzugsweise das Elektrometer, das in den verschiedenartigsten Ausführungen zur Verfügung stand.<sup>17</sup> Exner, der zusammen mit Julius Elster und Hans Geitel zu den Pionieren der luftelektrischen Forschung gehörte,<sup>18</sup> hatte einen transportablen Satz von solchen Apparaten zur Messung der Luftelektrizität zusammengestellt. Die Elektrometer erlangten große Bedeutung, als Viktor Hess und andere Forscher in den folgenden Jahren bei der Untersuchung der Luftelektrizität die Höhenstrahlung entdeckten. Doch alle diese luftelektrischen Messungen waren anfangs noch mit großen Unsicherheiten behaftet. Infolge der variablen Luftfeuchtigkeit und anderer Verunreinigungen an den Instrumenten traten Nebeneffekte auf, weshalb manche Forscher das ganze Phänomen der luftelektrischen Zerstreung als eine Folge solcher Störeffekte ansah. Erst nachdem das 1907 von Theodor Wulf eingeführte Zweifadenelektrometer einen großen Teil dieser Mängel beseitigte, konnte man genauere und zuverlässigere Daten gewinnen.

Schrödingers oben genannte systematische Untersuchung des Einflusses der Luftfeuchtigkeit auf die Leitfähigkeit der in den Elektrometern verwendeten Isolatormaterialien wurde deshalb als ein wichtiger Beitrag zu der damals an den Wiener Instituten im Gange befindlichen Forschung angesehen, auch wenn uns heute eine solche begrenzte experimentelle Arbeit ziemlich uninteressant erscheinen mag. Darüber hinaus gelangte er auf diese Weise in einen engeren Gedankenaustausch mit dem als führender Fachmann auf dem Gebiete der Anwendung der statistischen Methoden in der Strahlungsforschung geltenden Egon von Schweidler und qualifizierte sich so für eine erfolgreiche Mitarbeit am Exnerschen Institut.

## 10 Röntgenstrahlinterferenzen und Molekulartheorie der festen Körper

Als Schrödinger im Herbst 1911 nach Beendigung seines Militärdienstes die neue Hilfsassistentenstelle bei Exner antrat, konnte er neben der ihm gemeinsam mit Fritz Kohlrausch übertragenen Praktikumsbetreuung der Lehramtskandidaten auch eigenen Forschungen nachgehen. In diesen drei Jahren vor dem Kriege entstanden mehrere Arbeiten in einem engen Zusammenhang mit den Forschungsaktivitäten im Exnerschen Institut und in dem 1910 gegründeten *Institut für Radiumforschung*.

<sup>15</sup> Vgl. hierzu Kohlrausch [1927, S. 5f. und 21f.] und Wheaton [1983, S. 147ff.].

<sup>16</sup> Rutherford und Andrade (1914). Siehe auch das genannte Werk von Kohlrausch [1927, S. 3].

<sup>17</sup> Solche Elektrometer sind in der zeitgenössischen Literatur noch ausführlich beschrieben. {Vgl. beispielsweise Müller-Pouillet, Band IV [1909/14, S. 126ff. und 1394ff.]} Insbesondere mußten die mit dem Elektrometer gewonnenen Fluktuationmessungen von Kohlrausch erst mit anderen Verfahren wiederholt werden, bevor man ihnen in Fachkreisen Glauben schenkte.

<sup>18</sup> Siehe hierzu Bergwitz (1915).

Ähnlich wie die fast gleichzeitig im Deutschen Reich gegründeten *Kaiser-Wilhelm-Institute* war auch das *Radiuminstitut* eine neuartige, den zunehmenden wissenschaftlichen Bedürfnissen der Industrie und der Technik entsprechende und nur der Forschung dienende Einrichtung.<sup>19</sup>

Obwohl das Radiuminstitut in formaler Hinsicht Exner unterstand, so übernahm doch von Anfang an sein erster Assistent Stefan Meyer die Leitung desselben. Dieser berichtete sogar, Exner sei *seit der Eröffnung des Instituts (bis 1920) nie in dasselbe gekommen*, obwohl er sich *immer über alles erzählen lassen* hat.<sup>20</sup>

Zu den in Wien bevorzugten Forschungsgebieten gehörte neben der Höhenstrahlung vor allem auch die Theorie der Dielektrika und des Magnetismus. Durch die Entdeckung der Röntgenstrahlinterferenzen im Jahre 1912 erhielt die ganze Festkörperphysik einen bedeutenden Aufschwung, weil jetzt mit der detaillierteren Kenntnis der Kristallstrukturen auch der Rahmen für ein genaueres theoretisches Verständnis gegeben war. Im Herbst 1913 während der Naturforscherversammlung in Wien erhielten die Wiener Physiker durch Max von Laue und Walter Friedrich einen zusammenfassenden Bericht dieser Entdeckungen aus erster Hand.

Weitere Anregungen zur Beschäftigung mit der Theorie des festen Körpers empfing Schrödinger offenbar während einer Begegnung mit Paul Ehrenfest. Als dieser sich im Februar 1912 zur Stellungssuche in Wien aufhielt, besuchte er das Physikalische Institut der Universität. Dort führte er längere Gespräche mit dem Privatdozenten Philipp Frank und Boltzmanns Nachfolger Fritz Hasenöhr. Ehrenfest hat seine Erlebnisse immer sorgfältig in seinen Tagebüchern festgehalten. Dadurch sind wir über viele Einzelheiten unterrichtet, die auch sein Biograph Martin Klein später ausgewertet hat. Am 19. Februar 1912 besuchte Ehrenfest die Wiener Institutsbibliothek.<sup>21</sup>

„One morning, when Ehrenfest arrived at the university, the only one present in the Boltzmann library was the assistant to Professor Franz Exner, a young man named Erwin Schrödinger who had received his degree in Vienna a year or so earlier. He immediately enticed Schrödinger to go out to have some lunch with him. They talked about the opportunities for study in Vienna, and Ehrenfest stressed the need to study elsewhere, too. Then Ehrenfest dragged Schrödinger off to a coffee house where they could talk physics freely since one could scribble equations in pencil on the little white marble tops of the tables – an ideal substitute for the blackboard. He discovered that Schrödinger had not heard of the new work in the theory of magnetism done by Paul Langevin and Pierre Weiss, and proceeded to give him an impromptu lecture on the subject. Schrödinger was so swept up by Ehrenfest's enthusiasm that he went on to study the subject thoroughly, give some seminars on it, and then write a paper of his own on diamagnetism.“

<sup>19</sup> Siehe hierzu den Bericht von Fritz Paneth (1915), die historischen Beiträge von St. Meyer (1950), V. F. Hess (1950) und F. Paneth (1950) zur *Vierzig-Jahr-Gedenkschrift des Radiuminstitutes* und die durch Berta Karlik (1979) gesammelte umfangreiche wissenschaftliche Korrespondenz von St. Meyer. Frau Karlik möchte ich an dieser Stelle auch für die Überlassung von Sonderdrucken und Briefkopien aus dem von ihr geordneten *Stefan Meyer Nachlaß* danken.

<sup>20</sup> St. Meyer (1950, S. 26).

<sup>21</sup> Vgl. M. J. Klein [1970, S. 175].

Ehrenfest hatte zuvor Peter Debye in Zürich aufgesucht und dessen neueste Untersuchungen über die kinetische Theorie des dielektrischen Verhaltens von Festkörpern kennengelernt. Debye hatte in Analogie zu der Langevin-Weisschen Theorie des Magnetismus eine sich auf die Annahme beweglicher elektrischer Dipole stützende Theorie der Dielektrika entwickelt, die unterhalb einer kritischen (Curie-) Temperatur zu einer spontanen Ausrichtung der Dipole führte.<sup>22</sup>

Schrödinger griff diesen Gedanken in einer weiterführenden Untersuchung auf. Er deutete aber das Ergebnis in einem anderen Sinne, indem er das Einsetzen der freien Drehbarkeit der Dipolmoleküle mit dem Schmelzvorgang des dielektrischen Körpers in Zusammenhang brachte.<sup>23</sup> In einem Schreiben vom 2. November 1912 bedankte er sich bei Ehrenfest für die Anregung: *Ich habe nämlich die Ideen, die Debye heuer in der Physikalischen Zeitschrift betreffs einer Übertragung der [Langevin-Weiss-] Theorie auf Dielektrika geäußert hat, aufgegriffen und glaube, daß sich ein sehr weites Tatsachengebiet damit umspannen läßt. Ich glaube nämlich, daß das elektrische Analogon des Curieschen Punktes, wovon Debye spricht, der Schmelzpunkt ist, so daß feste (kristallisierte) Dielektrika ein permanentes (sehr hohes) elektrisches Moment besitzen. ... Und die Größenordnung aller dieser Phänomene läßt sich ohne alle speziellen Annahmen aus der Theorie berechnen und stimmt gut mit der Erfahrung.*

Schrödinger veröffentlichte seine Ergebnisse in den Wiener Akademieberichten und legte sie im April 1913 dem Professorenkollegium der Philosophischen Fakultät als Habilitationsschrift vor. Exner stellte daraufhin am 23. Mai in einer Kommissionssitzung die Arbeiten und das Wirken *des mit 25 Jahren zwar noch sehr jungen, aber ungewöhnlich vielversprechenden* Kandidaten vor und beantragte gemeinsam mit Hasenöhr die Zulassung zur Habilitation.<sup>24</sup> Nach einem am 15. Oktober 1913 gehaltenen Probevortrag über *Das Magneton* wurde ihm am 31. Oktober die *venia legendi* für Physik erteilt. Am 9. Januar 1914 wurde sie vom Ministerium bestätigt.

Zum Sommersemester 1914 konnte nun der junge Privatdozent seine Vorlesungstätigkeit aufnehmen. In seiner ersten Veranstaltung behandelte er als neuesten Forschungsgegenstand die Interferenzerscheinungen der Röntgenstrahlen, mit denen man sich auch während der Sitzungen des letztjährigen zweiten Solvaykongresses in Brüssel befaßt hatte. Dem gleichen Thema sind auch weitere seiner Veröffentlichungen aus dieser Zeit gewidmet.<sup>25</sup>

Das immer engere Zusammenspiel von Theorie und Experiment hatte inzwischen der zur Jahrhundertwende noch umstrittenen atomistischen Betrachtungsweise vollends zum Siege verholfen. Im zweiten Jahrzehnt des vergangenen Jahrhunderts galt es schon längst nicht mehr, die Existenz der Atome unter Beweis zu

<sup>22</sup> Debye (1912). Siehe hierzu auch von Meyenn (1987b).

<sup>23</sup> Schrödinger (1912b). Noch zehn Jahre nach Schrödingers Veröffentlichung erklärte Karl-Ferdinand Herzfeld in seinem Werk über die kinetische Wärmetheorie [1925, S. 229], diese Vorstellungen enthielten *den Kern des Schmelzvorganges*. Siehe auch den Kommentar zum Brief [001†].

<sup>24</sup> Universitätsarchiv Wien, Protokoll vom 23. Mai 1913. Der bei dieser Gelegenheit eingereichte *Lebenslauf* ist unter dem 5. Abschnitt wiedergegeben.

<sup>25</sup> Siehe hierzu Rechenberg (1987).

stellen. Man befaßte sich jetzt mit der Untersuchung der inneren Struktur der Atome und ihren Wechselwirkungen. Während das Problem der Atomstruktur besonders durch Niels Bohr in Angriff genommen wurde,<sup>26</sup> entwickelten fast gleichzeitig Max Born und sein Mitarbeiter Theodor von Kármán die *Dynamik der Kristallgitter*. Anlässlich einer Rezension des grundlegenden Werkes, das Max Born über diesen Gegenstand 1915 veröffentlicht hatte, machte Arnold Sommerfeld folgende programmatische Feststellung: *Die einzelnen Schritte zum Wege der Herrschaft der Atomistik sind etwa die folgenden: Das Studium der Brownschen Bewegung und ihre restlose theoretische Erklärung, die Erfolge der Mikroatome, genannt Elektronen, die genaue Bestimmung der Atomgrößen aus der Strahlungstheorie, zuletzt, aber für den Atomismus des festen kristallinen Zustandes besonders bedeutsam, die Lauesche Entdeckung.*<sup>27</sup>

Außerdem betonte Sommerfeld nachdrücklich die Überlegenheit der statistischen über die phänomenologische Methode, die auf die eigentliche Kausalität im mechanischen oder elektrodynamischen Sinne von vornherein verzichtete. *Die Thermodynamik antwortet nur auf das Was, nicht aber auf das Warum und Wie. Anders die auf dem Atomismus aufgebaute Gastheorie und ihre Verallgemeinerungen, die Theorie der Lösungen und die Statistik überhaupt, welche mechanische Wärmetheorien im eigentlichen Wortsinne sind. Diese Theorien bilden spezielle Bilder, welche im typischen Falle der harten elastischen Kugeln der Gastheorie sogar bewußtermaßen zu speziell sind. Das Verhalten dieser speziellen Systeme wird teils kausal-mechanisch, teils überschläglic und statistisch untersucht, wobei ein voller Einblick in das Warum oder mindestens in das Wie erzielt wird.*<sup>28</sup>

Die Gitterdynamik entwickelte sich rasch zu einem fruchtbaren Anwendungsgebiet der noch jungen Atomtheorie und hat diese im weiteren Verlauf der Entwicklung maßgeblich beeinflußt. Auch die jüngeren Wiener Physiker beteiligten sich an ihrem Ausbau. Hierzu gehören sowohl Schrödingers Arbeiten zu Theorie der anomalen Dispersion und ein großes, noch kurz vor Kriegsbeginn fertiggestelltes Übersichtsreferat über *Dielektrizität*, das er für das Graetzsche *Handbuch der Elektrizität und des Magnetismus* anfertigte.<sup>29</sup>

Während des ersten Solvay-Kongresses im Herbst 1911 standen die Fragen nach einer Erweiterung der Quantentheorie im Mittelpunkt der Diskussionen. Henri Poincaré hatte bei dieser Gelegenheit auch nach einer Quantentheorie für Systeme mit mehreren Freiheitsgraden gefragt. Während das Problem der inneren Atomstruk-

---

<sup>26</sup> Ein erster Bericht über Bohrs Erfolge bei der Deutung der Atomspektren erschien Anfang 1914 in der Zeitschrift *Die Naturwissenschaften*. Er war von dem Sommerfeldschüler Rudolf Seeliger (1914) angefertigt worden, der damals in Berlin an der *Physikalisch-Technischen Reichsanstalt* als Assistent tätig war.

<sup>27</sup> Vgl. hierzu P. Debyes Beitrag (1922) zur Laue-Festschrift in den *Naturwissenschaften*.

<sup>28</sup> Sommerfeld (1915, S. 669–670).

<sup>29</sup> Die Aufforderung zur Mitarbeit an diesem ehrgeizigen Unternehmen geht wahrscheinlich auf Egon von Schweidler zurück, der selbst einen entsprechenden Beitrag für das *Handwörterbuch der Naturwissenschaften* verfaßt und auch jetzt mehrere Beiträge für das Graetzsche Handbuch übernommen hatte.

tur weitgehend durch die Quanten bestimmt war,<sup>30</sup> konnte die Wechselwirkung der Atome untereinander bei den Gasen und im Kristallverband vielfach noch mit den Methoden der klassischen Physik behandelt werden. Hier lag deshalb das ideale Arbeitsgebiet für Physiker, die der Quantentheorie entweder noch mit einer gewissen Skepsis gegenüberstanden oder die, – wie etwa die jungen Privatdozenten –, aus taktischen Gründen gewisse Rücksichten auf die konservative Einstellung ihrer unmittelbaren wissenschaftlichen Umgebung nehmen mußten. So mag auch Schrödingers anfängliche Zurückhaltung gegenüber den Quanten durch seine damalige Stellung am Exnerschen Institut bedingt gewesen sein. Nach Ausscheiden des namhaftesten Vertreters der Quantentheorie Fritz Hasenöhl, der am 7. Oktober 1915 an der Front gefallen war,<sup>31</sup> gab man in Wien trotz aller Fortschritte in der Atom- und Elektronentheorie immer mehr quantitativen Messungen und phänomenologischen Beschreibungen den Vorzug.<sup>32</sup> Die Quantentheorie, von der Max Born damals sagte, daß *der Physiker, der sich selbst gemüht hat, ohne die Quanten auszukommen, schließlich eine Art Verzweiflung verspürt, in der er sich den bisher gehaßten Feinden in die Arme wirft und sie als Bundesgenossen annimmt, ohne sein Gewissen damit zu belasten, ob er eigentlich noch Herr der Situation ist,*<sup>33</sup> galt in diesen Kreisen noch als eine spekulative Wissenschaft, der man tunlichst aus dem Weg ging.

Trotz dieser Zurückhaltung war Schrödinger natürlich von Anfang an durch seine frühen Kontakte mit Hasenöhl und dessen Assistenten Hans Thirring mit dem Quantenproblem vertraut.<sup>34</sup> Auch in seinen ersten Vorlesungen ist er dieser Problematik keineswegs ausgewichen. So kündigte er beispielsweise zum Wintersemester 1914/15 eine Vorlesung über *Ausgewählte Kapitel aus der statistischen Mechanik und Quantentheorie* an. Doch der Ausbruch des Krieges verhinderte ihn an ihrer Durchführung.

## 11 Brownsche Molekularbewegung und Ehrenhafte Subelektronen

Der Kriegsbeginn und die Einberufung zur Festungsartillerie hat eine solche Neuorientierung in Schrödingers Schaffen sicherlich noch mehr hinausgezögert. An der

---

<sup>30</sup> Einen zeitgenössische Übersichtsartikel über den Stand der Quantenphysik lieferte Hilberts damaliger Assistent Alfred Landé (1915).

<sup>31</sup> Vgl. hierzu den Nachruf von St. Meyer (1915). Bezeichnenderweise war Hasenöhl (außer Einstein, der damals in Prag wirkte) der einzige österreichische Physiker, der zu dem zur Förderung der Quantentheorie einberufenen ersten Solvay-Kongress eingeladen wurde.

<sup>32</sup> Erst nachdem er sich 1917 anlässlich eines Referats über die Atom- und Molekularwärmen von dem Versagen des Boltzmannschen Äquipartitiontheorems im Gebiete der tiefen Temperaturen überzeugt hatte, griff Schrödinger Einsteins „glücklichen Gedanken“ zur Lösung des Quantenproblems bei den spezifischen Wärmen auf. {Vgl. Schrödinger (1917a, S. 541 und 1919b, S. 424 und 523)}.

<sup>33</sup> Born (1915), anlässlich einer Besprechung der ersten, für ein breiteres Publikum angelegten Darstellungen der Quantentheorie von Siegfried Valentiner [1914a, b].

<sup>34</sup> Siehe Anm. 33.

Front konnte er sich nur gelegentlich mit wissenschaftlichen Fragen befassen und dann meistens nur mit solchen Problemen, die er ohne große Literaturstudien bewältigen konnte.

Auch während dieser Kriegszeit standen die befreundeten Physiker ständig miteinander in brieflichen Kontakt und tauschten Informationen über das Schicksal ihrer Kameraden miteinander aus. Am 25. April 1916 berichtete beispielsweise der Hasenöhr-Schüler Karl-Ferdinand Herzfeld seinem Kollegen Otto Stern: *Schrödinger ist am Isonzo als schwerer Artillerist, Kottler war Anfangs des Krieges mit Mörsern in Belgien. Ebenso rasch sprach sich auch Hasenöhrls Tod herum und dämpfte die anfängliche Kriegsbegeisterung der jungen Physiker: Hasenöhr war anfangs als Automobilist in Krakau, hat es aber zu Beginn des italienischen Krieges durchgesetzt, daß er zur Infanterie kam (er war Oberleutnant), wurde im Juni durch einen Gewehrshuß verwundet, rückte im September wieder ein und fiel im Oktober, als*



**Abb. 7** Erwin Schrödinger zur Zeit seiner Verlobung mit Annemarie Bertel (1896–1965). Eine Aufnahme aus dem Jahre 1919

*er als Kompagniekommandant die Italiener aus einem eroberten Graben in einem kritischen Moment wieder herauswarf.*

Schrödingers erste während seines Frontaufenthaltes im Sommer 1915 durchgeführte wissenschaftliche Untersuchung war ein Beitrag zur Theorie der Brownschen Molekularbewegung, die er noch vor seiner Verlegung vom ungarischen Komárom nach Görz an die italienische Isonzo-Front zur Veröffentlichung in der *Physikalischen Zeitschrift* einreichte. Das Studium solcher Schwankungserscheinungen spielte bei der Durchsetzung der atomistischen Betrachtungsweise zu Beginn des vergangenen Jahrhunderts eine große Rolle. Kleine, in einer Flüssigkeit suspendierte Teilchen zeigen nämlich genau die ihnen von der kinetischen Gastheorie zugesprochene Bewegung und dienten somit als ein sichtbarer Beweis für die Richtigkeit der ihnen zugrundeliegenden Hypothese. Besonders die sorgfältigen Experimentalbeobachtungen von Jean Perrin waren in völliger Übereinstimmung mit der von Einstein und Marian von Smoluchowski hergeleiteten Formel für das mittlere Verschiebungskadrat. Damit war schließlich alle Kritik gegen die Atomvorstellung zum Schweigen gebracht.<sup>35</sup> In speziellen Fällen ließen sich mit Hilfe der statistischen Wärmetheorie sogar beobachtbare Abweichungen von den phänomenologischen Gesetzen der Thermodynamik vorhersagen, womit die Überlegenheit der anfangs noch umstrittenen statistisch-molekularen Methode erwiesen war.<sup>36</sup>

Ebenso gehen die ersten Versuche zur Erweiterung des Anwendungsbereiches der Quantentheorie von statistischen Überlegungen über die Struktur und die Eigenschaften des Phasenraumes aus. Diese frühen Vorarbeiten sollten später bei der Entwicklung der Wellenmechanik große Bedeutung erlangen. Insbesondere auch die Methode der Schwankungsanalyse galt eine Zeit lang als das bevorzugte Forschungsinstrument zur Untersuchung atomarer Einzelprozesse.

Die *Wiener Schule*, der wir auch Paul Ehrenfest (Leiden), Marian von Smoluchowski (Lemberg, dann ab 1913 in Krakau) und Reinhold Fürth (Prag) zurechnen, hatte an dieser Entwicklung einen maßgeblichen Anteil.<sup>37</sup> Wir sahen bereits, in wie vielfältiger Weise sich Egon von Schweidler, Stefan Meier und andere Wiener Physiker an der Erforschung der radioaktiven Zerfallsgesetze beteiligten. Die Untersuchung von Schwankungserscheinungen spielte aber auch bei der Frühentwicklung der Quantentheorie eine bedeutsame Rolle. Zu den wichtigsten Ergebnissen gehörte hier die berühmte, wesentlich auf eine Schwankungsbetrachtung des Strahlungsfeldes gestützte Einsteinsche Lichtquantenhypothese.<sup>38</sup>

---

<sup>35</sup> Siehe hierzu die historischen Studien von M. J. Klein (1980), M. Jo Nye [1972] und die älteren Darstellungen von Einstein (1915), Dorn (1915/25) und Fürth [1923].

<sup>36</sup> Dieses war insbesondere das Verdienst des Boltzmann-Schülers Marian von Smoluchowski. Auch für stark verdünnte Gase ergaben sich bei tiefen Temperaturen bemerkenswerte Abweichungen von den Gasgesetzen, die von dem dänischen Physiker Martin Knudsen (1911) experimentell festgestellt werden konnten.

<sup>37</sup> Vgl. hierzu Fürth [1920].

<sup>38</sup> Siehe hierzu Ezawa (1979), Klein (1982), sowie Bergia und Navarro (1988).

## 12 Paradoxien der Lichtquanten

Wie alle begrifflichen Entwicklungen hat auch die Lichtquantenhypothese ihre Vorläufer gehabt, bevor sie durch Einstein ihre definitive Fassung erhielt. Bei der Aufstellung seines Strahlungsgesetzes hatte Wilhelm Wien zunächst eine lineare Beziehung zwischen der Strahlungsenergie  $\varepsilon$  und ihrer Frequenz  $\nu$  angenommen.<sup>39</sup> In einer viel bestimmteren Form wurde sie dann durch die Einsteinsche Beziehung  $\varepsilon = h\nu$  in die Quantentheorie eingeführt.<sup>40</sup> Ebenso bedeutungsvoll war aber Einsteins Feststellung, daß Strahlung im Gültigkeitsbereich des Wienschen Strahlungsgesetzes ( $h\nu \gg kT$ ) sich wie ein aus unabhängigen Korpuskeln der Energie  $\varepsilon = h\nu$  bestehendes Gas benimmt. 1909 erfolgte dann die überraschende Entdeckung, daß die Strahlung – unter Voraussetzung der Gültigkeit des Planckschen Strahlungsgesetzes im gesamten Spektralbereich – außer dieser Korpuskulareigenschaft auch noch einen Wellencharakter aufweist, der sich besonders deutlich im langwelligen Rayleigh-Jeansschen Bereich des Strahlungsgesetzes ( $h\nu \ll kT$ ) bemerkbar macht.

Diesen Sachverhalt konnte Einstein durch eine einfache Schwankungsbetrachtung zeigen. Wenn

$$\bar{E} = \frac{\int E e^{-E/kT} d\Omega}{\int e^{-E/kT} d\Omega}; \quad d\Omega = dp_1 \dots dp_f dq_1 \dots dq_f$$

$f$ : Anzahl der Freiheitsgrade des Systems

der gemäß der Gibbsschen statistischen Methode über den Phasenraum gemittelter Wert der Strahlungsenergie ist, so ergibt sich (durch Differenzieren dieses Ausdruckes nach  $T$ ) für ihr mittleres Schwankungsquadrat

$$\overline{\varepsilon^2} = \overline{(E - \bar{E})^2} = \overline{E^2} - (\bar{E})^2 = kT^2 \frac{d\bar{E}}{dT}.$$

Ersetzen von  $\bar{E} = \nu \rho(\nu, T) d\nu$  ( $\nu$  ist ein kleines Teilvolumen des abgeschlossenen Strahlungshohlraumes) gemäß der Planckschen Strahlungsformel

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi}{c^3} \nu^2 \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1},$$

führt zum Einsteinschen Schwankungsquadrat<sup>41</sup>

$$\overline{\varepsilon^2} = \left( h\nu + \frac{c^3}{8\pi\nu^2} \rho \right) \bar{E}.$$

Während der erste Summand das mittlere Schwankungsquadrat der unabhängigen Lichtkorpuskel darstellt,<sup>42</sup> entspricht der zweite Summand (wie H. A. Lorentz

<sup>39</sup> Wien (1896). – Siehe hierzu auch Hund [1967, S. 20f.].

<sup>40</sup> Einstein (1905a).

<sup>41</sup> Einstein (1909, S. 497).

<sup>42</sup> Vgl. hierzu Reiche [1921, S. 178ff.] und Klein (1980, S. 176).

1916 in einer ausführlichen Betrachtung<sup>43</sup> zeigte) dem Energieschwankungsquadrat der sich einander durchkreuzenden elektromagnetischen Wellenzüge.

Eine konsequente Strahlungstheorie, welche von diesem widersprüchlichen Welle-Teilchen-Dualismus der Strahlungserscheinungen Rechenschaft ablegen wollte, mußte notwendigerweise mit einer Revision der bisherigen klassischen Elektrodynamik einhergehen.<sup>44</sup> Obwohl Einstein die Notwendigkeit einer solchen Umgestaltung der physikalischen Grundlagen schon frühzeitig erkannt hatte, war auch er mit ihrer Durchführung nur sehr langsam vorangekommen.<sup>45</sup>

Die Entwicklung der Quantentheorie ist in dieser frühen Phase verschiedene Wege gegangen. Während man in der Atom-, Molekül- und Festkörperphysik nach neuen Vorschriften für die mechanische Behandlung von wechselwirkenden Teilchensystemen suchte (Einstein, Debye, Born-von Kármán, Bohr), konzentrierten sich die Anstrengungen einer anderen Forschungsrichtung (Planck, Einstein, Lorentz, Ehrenfest) auf das Strahlungsfeld selbst oder solche Vorgänge, die mit der Wechselwirkung von Strahlung und Materie (Emission und Absorption) zu tun haben.

Zu den wenigen Physikern, die Einsteins Lichtquanten von Anbeginn an ernst nahmen und an ihre reale Existenz glaubten, gehörte Johannes Stark. Nach Einsteins Hauptvortrag<sup>46</sup> während der Salzburger Naturforscherversammlung im September 1909 hatte er das Wort ergriffen und darauf hingewiesen, daß gebündelte Energiequanten, – *auch da, wo sie losgelöst von der Materie auftreten* –, eine notwendige Forderung seien, wenn man verstehen will, wie ein als elektromagnetische Welle aufgefaßter Röntgenimpuls *selbst in großen Distanzen, bis zu 10 m, noch konzentriert zur Wirkung kommen kann*.<sup>47</sup> Doch Starks Versuch, die beobachtete Asymmetrie der Röntgenstrahlung mit Hilfe der Lichtquanten zu erklären blieb erfolglos, zumal Arnold Sommerfeld den Effekt auch ohne Quanten rein elektromagnetisch deuten konnte.<sup>48</sup> Starks Einsatz hat eher dazu beigetragen, die Idee der Lichtquanten bei den Physikern zunächst in Mißkredit zu bringen.

Als überzeugendes Argument gegen die Lichtquanten galt für lange Zeit Plancks Bemerkung, daß *die Interferenzen bei den kolossalen Gangunterschieden von Hunderttausenden von Wellenlängen* nur schwer zu begreifen sind. *Wenn ein Quantum mit sich interferiert*, erklärte er weiter, *dann müßte es eine Ausdehnung von Hunderttausenden von Wellenlängen haben. Das ist eine gewisse Schwierigkeit*. Einsteins Vorschlag, man könne *die Quanten vielleicht als eine Singularität umgeben von einem großen Vektorfeld* auffassen, konnte Plancks Einwand natürlich nicht entkräften.<sup>49</sup>

<sup>43</sup> Lorentz [1916, S. 114ff.].

<sup>44</sup> Diese begrifflichen Schwierigkeiten der Strahlungstheorie wurden schon damals in dem Lehrbuch über *Moderne Elektrizitätslehre* des englischen Physikers Norman Campbell [1913, S. 321ff.] eingehend erörtert.

<sup>45</sup> Vgl. auch Einstein, *Collected Papers*, Band II, S. 139–148.

<sup>46</sup> Einstein (1909).

<sup>47</sup> Vgl. *Physikalische Zeitschrift* 10, 826 (1909).

<sup>48</sup> Sommerfeld (1909). Vgl. hierzu Wheaton auch (1981, S. 381ff.) und [1983, S. 120–132].

<sup>49</sup> Vgl. die Diskussionsbemerkungen zu Einsteins Salzburger Vortrag, *Physikalische Zeitschrift* 10, 826 (1909).

Trotz solcher Bedenken hat die Lichtquantenhypothese schon damals ein allmähliches begriffliches Umdenken in den Grundlagen der Physik eingeleitet und geholfen, den Boden für die sprunghafte Entwicklung der Atom- und Quantentheorie der frühen 20er Jahre vorzubereiten. Eine große Rolle bei diesem Umdenkprozeß spielte auch die neue Einstellung zum Kausalitätsbegriff, die besonders in Plancks Reden und Schriften wirkungsvoll zum Ausdruck gebracht wurde.<sup>50</sup>

### 13 Statistische Gesetze in der Strahlungstheorie

Während einer feierlichen Ansprache an der Berliner Universität erörterte Max Planck im Sommer 1914 vor einem großen Publikum die Bedeutung von Zufall und statistischer Gesetzmäßigkeit in den neueren physikalischen Theorien. Das Studium der radioaktiven Zerfälle und der Brownschen Bewegung habe gezeigt, daß selbst atomare Elementarprozesse sich in sinnvoller Weise mit Hilfe des Wahrscheinlichkeitsbegriffes beschreiben lassen, ohne daß dabei die prinzipielle Determiniertheit dieser Prozesse selbst vorausgesetzt zu werden brauche. Durch diese statistische Betrachtungsweise sei aber ein Dualismus von dynamischer (d. h. streng kausaler) und statistischer Gesetzmäßigkeit in alle physikalische Theorien hineingetragen worden. Diese könne nur beseitigt werden, wenn man *die absolute Gewissheit bzw. Unmöglichkeit überhaupt leugnet und nur noch größere oder geringere Grade von Wahrscheinlichkeit zuläßt*.<sup>51</sup> Eine derartige Konzession wollte Planck jedoch nur als ein Provisorium für Erscheinungen gelten lassen, *deren gesetzlicher Zusammenhang einstweilen noch völlig im Dunklen bleibt*.

Als Max Planck diese Rede hielt, war sein neuer Kollege Albert Einstein noch immer mit der Suche nach einer konsequenteren Strahlungstheorie beschäftigt, welche der von ihm aufgedeckten quantenartigen Struktur der Strahlung Rechnung tragen sollte. Aus Einsteins Korrespondenz mit Max von Laue geht hervor, daß offenbar auch er zuweilen von Zweifeln an seiner Lichtquantenhypothese geplagt war. Max von Laue schreibt am 27. Dezember 1907:<sup>52</sup> *Daß ich mich über Ihr Aufgeben der Lichtquantenhypothese sehr gefreut habe, will ich Ihnen doch noch schreiben. Ich habe, wie Sie wissen, nie viel für sie übrig gehabt. Überhaupt halte ich eine statistische Theorie zu finden für keine leichte Aufgabe*. Offensichtlich hatte Einstein schon zu diesem Zeitpunkt mit der Suche nach einer statistischen Formulierung der

<sup>50</sup> Seine vor allem in öffentlichen Reden (1908, 1912 und 1914) und Auslandsvorträgen [1910] geäußerten Anschauungen hat Planck später auch in Buchform [1922] herausgegeben. In einer Besprechung der *Acht Vorträge*, die Planck im Frühjahr 1909 an der *Columbia University* gehalten hatte, bemerkte Ehrenfest (1912, S. 627), es sei *reizvoll* zu verfolgen, wie Planck das inzwischen hinzugekommene Nernstsche Wärmetheorem (dem er abermals *universelle Tragweite* zuspricht), zusammen mit den anderen fundamentalen Problemen „wie die des radioaktiven Zerfalls, der Ausstrahlung der Spektrallinien, der reversiblen Verwandlung des Lichtes in chemische und elektrische Energie, des Zusammenhanges der Gravitationsenergie mit anderen Energieformen“ künftig in das theoretische Gefüge einzupassen gedenkt.

<sup>51</sup> Planck (1914, S. 62).

<sup>52</sup> Albert Einstein, *Collected Papers*, Band 5, S. 83.



**Abb. 8** Aufnahme aus dem Jahre 1899 während der Feier der Habilitation von Fritz Hasenöhl und Stefan Meyer (1872–1949), dem Leiter des im Herbst 1910 eröffneten Instituts für Radiumforschung. Von links nach rechts, stehend: Egon von Schweidler, Hans Benndorf (1870–1953), Felix Exner (1876–1930), Gustav Jäger (1865–1938), Franz Serafin Exner, Cesar Pomeranz (geb. 1860) und Anton Lampa (1868–1938)

Strahlungstheorie begonnen. Wie Planck war allerdings auch er der Auffassung, daß man zu den statistischen Methoden greifen müsse, solange die Vorgänge *so verborgener Natur waren*, daß eine gesetzmäßige Beschreibung vorläufig undurchführbar ist.<sup>53</sup>

Im Oktober 1916 konnte Einstein schließlich mit einer von speziellen Hypothesen befreiten statistischen Formulierung der Strahlungstheorie aufwarten, die auch mit der Lichtquantentheorie im Einklang war. Die wesentliche Neuerung in dieser Theorie war die Einführung eines dem radioaktiven Zerfallsgesetz nachgebildeten statistischen Ansatzes für die mit Ein- und Ausstrahlung verbundenen induzierten und spontanen Übergangsprozesse zwischen den Quantenzuständen der *Resonatoren*. Zu Einsteins großer Genugtuung konnte man jetzt mit Hilfe einer einfachen Im-

<sup>53</sup> Reiche (1913b, S. 553). – Einen weiteren Hinweis auf einen so frühen Entstehungszeitpunkt des Einsteinschen statistischen Ansatzes für das Strahlungsgesetz lieferte Walter Schottky, der *öfter über solche Dinge mit Einstein zu sprechen den Vorzug hatte*, mit seiner Bemerkung, daß die Annahme spontaner Änderungen in der Materie etwa seit 1914 von Einstein diskutiert worden sei. {Schottky (1921, S. 511)}. – Aber auch Planck (1911a, S. 687) hatte schon damals sprunghafte Quantenübergänge in Erwägung gezogen. Siehe hierzu auch Bergia und Navarro (1988).

pulsbetrachtung auch zeigen, daß diese Ein- und Ausstrahlungen tatsächlich gerichtete Vorgänge („Nadelstrahlung“) waren. Aufgrund der für jeden Elementarprozeß postulierten Energie- und Impulserhaltung und des von ihm eingeführten Ansatzes für die Wechselwirkung von Strahlung und Materie mußte die atomistische Struktur der Materie notwendigerweise eine atomistische Struktur der Strahlung zur Folge haben. *Die Schwäche der Theorie liegt darin*, bemerkte Einstein abschließend, *daß sie uns dem Anschluß an die Undulationstheorie nicht näherbringt, andererseits darin, daß sie Zeit und Richtung der Elementarprozesse dem „Zufall“ überläßt; trotzdem hege ich das volle Vertrauen in die Zuverlässigkeit des eingeschlagenen Weges.*<sup>54</sup>

Und Einstein sollte in der Tat recht behalten. Trotz der von ihm empfundenen Unvollkommenheit erwies sich sein statistischer Ansatz als die für die weitere Entwicklung der Quantentheorie entscheidende Begriffsbildung.

Die durch Planck eingeleitete und besonders von Einstein, Lorentz und Ehrenfest fortgeführte Entwicklung der Quantentheorie, die von dem Problem der Hohlraumstrahlung ausgegangen war, hatte sich bisher nur mit geringen Berührungen neben der von Bohr aufgestellten Atomtheorie entfaltet. Während bei den Strahlungsercheinungen der kontinuierliche Aspekt der Vorgänge stärker zum Vorschein kam, wurden in der Bohrschen Fassung der Quantentheorie die in den sogenannten Quantensprüngen ihre hervorstechendsten Eigenschaften zeigenden Diskontinuitäten betont.<sup>55</sup> Die Vor- und Nachteile beider Gesichtspunkte wurden treffend durch Sommerfeld charakterisiert. Er sagte, daß *die klassische Wellentheorie nicht ganz falsch und die Quantentheorie der Strahlung noch nicht ganz richtig sei. Worauf es in der Zukunft ankommt, ist, zwischen beiden die Brücke zu schlagen.*<sup>56</sup>

Einsteins Wahrscheinlichkeitskoeffizienten stellten jetzt die Möglichkeit einer Verbindung zwischen diesen beiden Entwicklungslinien her. Der Bohr-Schüler Hans Kramers war auf den glücklichen Gedanken gekommen, diese Wahrscheinlichkeitskoeffizienten mit dem Bohrschen Korrespondenzprinzip so zu verbinden, daß der Zusammenhang der Quantenerscheinungen mit ihrem klassischen Grenzfall sichtbar gemacht und für die praktische Behandlung von Problemen systematischer genutzt werden konnte. In seiner 1919 veröffentlichten Dissertation berechnete er auf dieser Grundlage die Häufigkeit von Atomübergängen, welche die Intensitäten der Spektrallinien festlegen.<sup>57</sup>

<sup>54</sup> Einstein (1917, S. 128).

<sup>55</sup> Eine solche unterschiedliche Grundeinstellung machte sich auch in der damaligen Lehrbuchliteratur zur Quantentheorie bemerkbar. So ist beispielsweise in den ersten historischen Darstellungen über Ursprung und Entwicklung der Quantentheorie durch Plancks ehemaligen Assistenten Fritz Reiche (1913b; 1918) mehr die Strahlungstheorie in den Vordergrund gestellt worden. {Vgl. auch das aus diesen Aufsätzen hervorgegangene Buch von Reiche [1921].} In Sommerfelds vielgelesenem Standardwerk über *Atombau und Spektrallinien* hingegen kommen vor allem die atomtheoretischen Aspekte der neuen Theorie zur Geltung. Bezeichnend für diese Einstellung ist auch seine bis zur Entdeckung des Comptoneffektes andauernde Gegnerschaft zur Lichtquantenvorstellung, obwohl ihm natürlich die Problematik des Welle-Teilchen-Dualismus durchaus vertraut war.

<sup>56</sup> Sommerfeld [1921, S. 475].

<sup>57</sup> Kramers (1919). – Siehe hierzu Sommerfeld, *Atombau und Spektrallinien*, 4. Auflage [1924, S. 334f.] und Max Dresdens Kramers-Biographie [1987, S. 107ff.].

In der bisherigen Bohrschen Theorie war allein die mit einem solchen Übergang einhergehende Strahlungsfrequenz durch die Frequenzbedingung  $h\nu = E' - E''$  festgelegt. Der Übergang selbst, der wegen der Schärfe der Spektrallinien als sprunghaft angenommen werden mußte, war als ein wesentlich unanschauliches Element in die Theorie eingeführt worden. Einsteins *a priori probability*-Ansatz dagegen erlaubte – auch ohne näheres Eingehen auf den Mechanismus des Übergangs – quantitative Aussagen über die Häufigkeit solcher Prozesse zu machen. Nun ließen sich die quantentheoretischen Übergangswahrscheinlichkeiten den korrespondierenden klassischen Schwingungsamplituden zuordnen, so daß die Polarisation und die Intensitäten der einzelnen Spektrallinien berechnet werden konnte.<sup>58</sup> Allerdings erforderte der Umgang mit dieser korrespondenzmäßigen Methode großes Geschick und auch einiges Glück, weshalb Sommerfeld sie gerne mit einem Zauberstab verglich.<sup>59</sup>

Mit den Wahrscheinlichkeitskoeffizienten hatte man einen Übersetzungsschlüssel gefunden, mit dem die Begriffe der klassischen Teilchenmechanik (wie Bahn- und Geschwindigkeit) in die Sprache der den Übergängen zugeordneten Quanten übertragen werden konnten. Am Ende dieser Entwicklungslinie stand die Heisenbergsche Matrizenmechanik.

Der in der Lichtquantenhypothese enthaltene Welle-Teilchen-Dualismus führte umgekehrt auch zur Einführung der de Broglieschen Materiewellen, deren Verhalten durch Schrödingers Wellenmechanik bestimmt ist. Der Äquivalenzbeweis beider Theorien und die Dirac-Jordansche Transformationstheorie zeigten schließlich, daß trotz der unterschiedlichen Leitgedanken beide Wege zum gleichen Ziel führten.

Diese mehr als ein Jahrzehnt andauernde Debatte über die wahre Natur der Strahlung hatte natürlich auch Schrödingers Interesse erregt. Zumal dadurch so grundsätzliche Fragen wie die der Rolle der Kausalität in der Mikrophysik berührt waren, entstand auch eine Beziehung zu seinen eigenen Arbeiten über die Theorie der radioaktiven Zerfälle und die der Brownschen Bewegung.<sup>60</sup>

---

<sup>58</sup> Solche Intensitätsberechnungen waren bisher nur aufgrund der Planckschen Strahlungsdämpfung möglich gewesen. Mit diesem Problem hatten sich beispielsweise Karl-Ferdinand Herzfeld (1916), Arnold Sommerfeld (1917a) und Fritz Reiche (1913a) befaßt.

<sup>59</sup> Sommerfeld [1921, S. 400 und 534f.] – Sommerfeld und sein polnischer Schüler Adalbert Rubinowicz suchten entsprechende Ergebnisse durch Anwendung der Erhaltungssätze von Energie und Impuls auf das System Atom plus Strahlungsfeld vor und nach der Emission zu erzielen, obwohl sie, wie Sommerfeld selber (auf S. 398 des zitierten Werkes) zugestand, durch Bohr *zum Teil noch wesentlich überholt* seien. Insbesondere gelang es ihm, auf diese Weise bestimmte Auswahl- und Polarisationsregeln herzuleiten. {Vgl. Sommerfeld [1921, S. 374–408]}.

<sup>60</sup> Schrödinger legte damals mehrere Notizbücher an über *Schwankungsoपालeszenz* (etwa Ende 1914), *Besprechung der letzten Arbeiten von M. von Smoluchowski* (etwa 1915/16) und *Brownsche Bewegungen* (etwa 1918). Vgl. den Anhang, Kapitel XIVb.

## 14 Neue Perspektiven. Czernowitz

An der Front hatte er hinreichend Muße, um weiterhin seinen wissenschaftlichen Interessen nachzugehen. Im Frühjahr 1916, als er noch in Prosecco oberhalb von Triest stationiert war, lernte er Einsteins soeben im Druck erschienene Abhandlung über die allgemeine Relativitätstheorie kennen.<sup>61</sup> Sie regte ihn sogleich zu einigen weiterführenden Rechnungen an, die er Ende 1917, als er in der Nähe von Wien Quartier bezog, zur Publikation einreichte. Aus dieser Zeit stammen umfangreiche Aufzeichnungen, die auf eine eingehende Auseinandersetzung mit dem tensoranalytischen Formalismus hinweisen.<sup>62</sup> Offenbar entstand schon damals der Wunsch, diese allgemeinen Gesichtspunkte zur allgemeinen Relativitätstheorie mit denen der Quantentheorie in eine engere Verbindung zu bringen.<sup>63</sup> Doch diese Ideen konnte er unabhängig von dem schwedischen Physiker Oskar Klein erst während seiner Züricher Periode ausbauen.

Weitere Manuskripte aus dieser Zeit deuten auf eine andauernde Auseinandersetzung mit einer Vielzahl von philosophischen Themen hin. Es handelt sich dabei aber nur um lose Aufzeichnungen und keine ausgearbeiteten Ergebnisse, die, ungeachtet ihrer möglichen Bedeutung für die Entwicklung seiner eigenen Ideenwelt, sich zunächst einer genaueren historischen Analyse entziehen.

In einem der offenbar durch die Lektüre philosophischer und erkenntnistheoretischer Schriften angeregten Manuskripte wird auch das Problem der mikrophysikalischen Kausalität erörtert. Besonders aufmerksam beobachtete Schrödinger hier den Standortwechsel bei Hermann von Helmholtz, der sich im Laufe seiner wissenschaftlichen Entwicklung von Kants dogmatisch „a priori gegebenen Formen der Anschauung“ allmählich gelöst hatte.<sup>64</sup> In Anbetracht der zunehmenden Bedeu-

<sup>61</sup> Schrödinger [1985, S. 33]. – Schrödinger gibt hier das Jahr 1915 an. Weil Einsteins Publikation erst im Mai 1916 ausgegeben wurde und Schrödinger im Juni 1916 bereits zum Urlaub nach Wien reiste, kommt für eine solche Beschäftigung an der Front, wenn überhaupt, nur der Mai 1916 in Frage.

<sup>62</sup> Es handelt sich um drei Notizbücher mit der Aufschrift *Tensoranalytische Mechanik I, II, III* und ein Manuskript mit der Überschrift *Hertzsche Mechanik und Einsteinsche Gravitationstheorie* (vgl. Anhang, Kapitel XIVb). Unter diesen etwa 180 Seiten umfassenden Aufzeichnungen befindet sich auch ein Kapitel mit der Überschrift *Analogien zur Optik, Huygensches Prinzip und Hamiltonsche partielle Differentialgleichung*. – Siehe hierzu Raman und Forman (1969, S. 303) und Mehra und Rechenberg [1987, S. 220ff.]; bei letzteren ist auch eine kurze Inhaltsbeschreibung der Notizbücher gegeben.

<sup>63</sup> Vgl. hierzu Audretsch (1987) und Rüger (1988).

<sup>64</sup> Insbesondere in der Einleitung zu seiner berühmten Schrift *Über die Erhaltung der Kraft* (1847) hatte sich von Helmholtz zum Kausalitätsproblem geäußert. In einem späteren Zusatz zu einer Neuausgabe dieser Schrift [1881, S. 53] revidierte er jedoch seine frühe, noch durch Kant beeinflusste Ansicht: *Ich habe mir erst später klargemacht, hieß es jetzt, daß das Prinzip der Kausalität in der Tat nichts Anderes ist als die Voraussetzung der Gesetzlichkeit aller Naturerscheinungen. Das Gesetz als objektive Macht anerkannt, nennen wir Kraft*. – Vgl. hierzu auch die auf Arnold Berliners Anregung hin von P. Hertz und M. Schlick zum 100. Geburtstag im Jahre 1921 besorgte Neuausgabe von *Hermann von Helmholtz Schriften zur Erkenntnistheorie*. Sie haben, wie die Herausgeber in ihrer Vorrede verkündeten, jetzt *eine Bedeutung erlangt, die damals noch nicht vorausgesehen wurde*.

tung der statistischen Naturbeschreibung vermochte auch Schrödinger sich nicht der Kantschen Auffassung anzuschließen. Viel zeitgemäßer erschienen ihm der Standpunkt von Hume, der in der Natur keine Notwendigkeit für die Forderung eines Kausalzusammenhangs erkennen konnte.<sup>65</sup> Wahrscheinlich knüpfte Schrödinger an diese Gedanken an, als er das Kausalproblem später zum Thema seiner Züricher Antrittsrede wählte.

In den letzten beiden Kriegsjahren hatte Schrödinger vorwiegend meteorologische Aufgaben beim Militär zu verrichten, die mit einem häufigen Standortwechsel einhergingen und ihm Gelegenheiten gaben, zeitweise im Wiener Institut zu arbeiten und sich auf die weitere wissenschaftliche Laufbahn vorzubereiten.

Die Aussicht auf eine Professur an einer österreichischen Hochschule war damals denkbar schlecht, denn mit dem Zusammenbruch der Donaumonarchie hatte sich die Anzahl der verbleibenden österreichischen Hochschulen merklich verringert. Bei dem bekannten Experimentalphysiker Josef von Geitler (1870–1923) in Czernowitz war 1915 durch Michael Radakowic (geb. 1866) Berufung nach Graz eine Professur für theoretische Physik freigeworden und es war so gut wie ausgemacht, daß Schrödinger an seine Stelle treten sollte. Doch das physikalische Institut dieser Universität mußte schon bald nach Kriegsbeginn seine Aktivitäten infolge der Kriegseignisse einstellen. Schrödingers Hoffnung auf die Berufung nach Czernowitz war endgültig dahingeschwunden, nachdem diese Stadt nach dem Kriege dem rumänischen Staate einverleibt worden war.

Die Enttäuschung darüber war für Schrödinger um so bedrückender, als sich auch die wirtschaftliche Grundlage der Familie im Laufe des Krieges verschlechtert hatte. Sofern er nicht nach zehnjähriger wissenschaftlicher Tätigkeit weiterhin auf der schlecht bezahlten Assistentenstelle verharren wollte, mußte er sich jetzt nach einer Stellung außerhalb Österreichs umsehen.

Sein umfassendes Referat über den neuesten Stand der Theorie der Wärmekapazität des festen Körpers war im Herbst 1919 in der *Physikalischen Zeitschrift* erschienen und hatte ihn als einen hervorragenden Kenner auf diesem Gebiete ausgewiesen. Er zeigte, daß er nicht nur den Gegenstand beherrschte, sondern auch mit kritischem Blick die Schwachstellen der bisherigen Theorien herauszuarbeiten wußte. Bei dieser Gelegenheit hatte er auch einen ausgezeichneten Überblick über die gegenwärtigen Probleme der Quantentheorie gegeben,<sup>66</sup> der ohne Zweifel die Aufmerksamkeit der anerkannten Autoritäten auf diesem Gebiete wie Arnold Sommerfeld und Niels Bohr erregte. Schon zum 21. November des gleichen Jahres erhielt Schrödinger eine Einladung zu einem Vortrag im Münchener physikalischen Mittwochskolloquium.<sup>67</sup>

<sup>65</sup> Vgl. Anhang, Kapitel XIVb.

<sup>66</sup> Schrödinger (1919b, insbes. S. 5–8).

<sup>67</sup> Die Einladung erfolgte am 3. November 1919 durch ein offizielles Schreiben A. Sommerfelds: *Als Bevollmächtigter der Anschütz-Kaempfe-Stiftung habe ich die Ehre, Sie zur Abhaltung wissenschaftlicher Vorträge in der Zeit vom 19. bis 21. November für das hiesige physikalische Kolloquium ganz ergebenst einzuladen. Wir werden uns erlauben, Ihnen die Kosten für Reise und Aufenthalt zurückzuerstatten. – Ich hoffe, daß die Behörden im Interesse des engen wissenschaftlichen*

Als Vortragsthema wählte er *Einsteins Theorie der Strahlung (Nadelstrahlung)*, das natürlich gerade in München großes Interesse erregen mußte. Sommerfeld hatte in seinem soeben fertiggestellten Werke über *Atombau und Spektrallinien* die Frage der Existenz der Lichtquanten infolge seiner noch andauernden Skepsis als eines der *unerledigten* Probleme der modernen Atomtheorie bezeichnet.<sup>68</sup> Schrödinger stellte in seinem Vortrag ein von ihm ersonnenes *experimentum crucis* zum Nachweis der Nadelstrahlung vor,<sup>69</sup> bei dem das von einem Atom in einem Emissionsakt in verschiedene Richtungen emittierte Licht zur Interferenz gebracht werden sollte. Obwohl Schrödinger schon während seines Vortrages zugestehen mußte, daß sein Experiment aus meßtechnischen Gründen nicht gegen die Existenz der Lichtquanten ausgelegt werden könne, so scheint es in Fachkreisen die Diskussion über Lichtquanten neu belebt zu haben.<sup>70</sup>

Auch Einstein sprach darüber in einem Schreiben an seinen Freund Ehrenfest: *Es ist gut, daß ich soviel Ablenkungen habe, denn sonst hätte mich das Quantenproblem längst in's Irrenhaus gebracht. Daß Licht, was nach diametral verschiedenen Richtungen emittiert ist, interferieren kann, soll einwandfrei nachgewiesen sein. Wie soll das mit der energetischen Gerichtetheit der Elementarvorgänge zusammengereimt werden? Wie armselig steht der theoretische Physiker vor der Natur und vor – seinen Studenten?*

Die Begegnung mit Sommerfeld war der Beginn einer andauernden und fruchtbaren Zusammenarbeit. Sommerfelds großem Einfluß bei der Besetzung der Lehrstühle für theoretische Physik war es auch zu verdanken, daß Schrödingers Name in den folgenden Jahren häufig auf den Berufungslisten genannt wurde.<sup>71</sup>

---

*und persönlichen Zusammenwirkens der Universitäten Wien und München Ihre Reise begünstigen werden.*

<sup>68</sup> Sommerfelds kritische Haltung gegenüber den Lichtquanten tritt besonders deutlich in dem Zusatz 6 seines Buches [1919, S. 476–477] zutage. Die vorangegangene Diskussion zwischen Sommerfeld und Einstein wird besonders deutlich in einem von Eckert und Pricha (1984) veröffentlichten Briefwechsel der beiden Gelehrten beleuchtet.

<sup>69</sup> Schrödinger (1919c). – Vgl. hierzu auch von Meyenn (1984, S. 90).

<sup>70</sup> Vgl. z. B. Oseen (1922).

<sup>71</sup> Außer in Jena, Stuttgart, Breslau und Kiel wurde Schrödinger auch an 3. Stelle in der Vorschlagsliste für eine Professur für theoretische Physik an der neugegründeten Hamburgischen Universität genannt. Nachdem der erstgenannte Max von Laue dort ablehnte, erging der Ruf an den Sommerfeldschüler Wilhelm Lenz.