



Werner Ebeling, Dieter Hoffmann

## Vorlagen Einsteins 1924/25 in der Preussischen Akademie der Wissenschaften gelten als Grundlage der modernen Quantenstatistik

**Nach einer Vorlage in der Klasse Naturwissenschaften und Technikwissenschaften der Leibniz-Sozietät am 11.12.2014**

Nachdem Einstein 1914 in die Preussische Akademie der Wissenschaften gewählt und nach Berlin umgezogen war, führte er die großen Traditionen der Berliner Physik weiter (Treder, 1983; Ebeling und Hoffmann, 1991) und nutzte auch rege die Möglichkeit, wissenschaftliche Vorlagen in der Klasse der Akademie mit Kollegen zu diskutieren und rasch drucken zu lassen (Simon, 2005). Einige dieser Vorlagen haben Weltbedeutung erlangt, wie z.B. die Vorlagen zur Begründung der allgemeinen Relativitätstheorie, die er 1915, genau vor 100 Jahren einreichte, die unser Weltbild nachhaltig veränderten. Zwar weniger spektakulär, aber doch durchaus von ähnlicher Bedeutung für die Physik war die Vorlage, die Einstein 1924, d.h. vor 90 Jahren, auf der Sitzung der Phys. Math. Klasse machte, und eine weitere Arbeit, die er im Januar 1925 einreichte. Diese Vorlagen und die nachfolgenden Publikationen begründeten die moderne Quantenstatistik und zählten ebenso wie die allgemeine Relativitätstheorie zu den größten Leistungen der Physik des 20. Jahrhunderts. Allerdings dauerte es 70 Jahre, bis die Einsteinsche Vorhersage makroskopischer Quanteneffekte und eines neuen Kondensationsphänomens bei sehr tiefen Temperaturen überzeugend experimentell nachgewiesen werden konnte. Die Vorlage, die durch Albert Einstein eingereicht wurde, war so neuartig und überraschend, dass sie in der Klasse auf den heftigen Protest von Ehrenfest, Planck und anderen Kollegen stieß. Einstein wurde durch die Kritik angespornt, eine noch tiefere Begründung seiner neuen Theorie und eine Analyse der Konsequenzen zu geben, die im Januar 1925 der Klasse vorlegte. Beide Vorlagen lösten einen Umbruch der bis dahin geltenden physikalischen Vorstellungen zur Quantenphysik aus, und sie hatten also durchaus eine ähnliche Bedeutung wie die Einsteinschen Akademie-Vorlagen von 1915.

Zur Vorgeschichte der Vorlage von 1924: Das Problem der Gasentartung bei tiefen Temperaturen wurde nicht von Einstein als erstem aufgeworfen, es stammt schon von Walther Nernst. Dieser hatte schon bald nach der Begründung seines „Wärmesatzes“, des 3. Hauptsatzes der Thermodynamik, gesehen, dass die klassische statistische Theorie der Gase im Widerspruch zu seinem „Wärmesatz“ steht und revidiert werden muss. Im Nernstschen Buch „Zum neuen Wärmesatz“ (1918) findet sich ein Abschnitt „Allgemeine Theorie der Gasentartung. Grundannahmen“ (S. 157f). Dort verweist er auf den Aufsatz „Die Anwendung des Wärmesatzes auf Gase“ (Nernst, 1914). An anderer Stelle des Buches (S. 62) gibt es auch einen Hinweis auf eine noch frühere Arbeit (Nernst, 1912), die wahrscheinlich die Ersterwähnung der sogenannten Gasentartung beinhaltet. In einer Neuauflage des Buches „Theoretische Chemie“ (Nernst, 1921) sagt Nernst zu diesem Begriff: (S. 287): „*Man nennt den, in seinem Wesen noch ganz dunklen Zustand, in den alle Gase bei tiefen Temperaturen gelangen müssen, „Entartung der Gase“; es scheint, dass die tiefere Erkenntnis über diesen Zustand uns mancherlei neue Aufschlüsse bringen wird.*“ Nernst war damit ein Wegbereiter der neuen Theorie.

Einstein hatte im Frühjahr 1924 die Arbeit „Planck's law and the hypothesis on light quanta“ des indischen Physikers Satyendranath Bose auf Wunsch des Autors beurteilt und diese ins Deutsche übersetzt. Bose war ein begabter junger bengalischer Physiker, 27 Jahre alt und Mitarbeiter der Universität Dacca. Einstein schreibt in einer

„Anmerkung des Übersetzers: Boses Ableitung der Planckschen Formel bedeutet nach meiner Mei-

nung einen wichtigen Fortschritt. Die hier benutzte Methode liefert auch eine Quantentheorie der idealen Gase, wie ich an anderer Stelle ausführen will.“

Nur 8 Tage nach dem Eingang der Arbeit von Bose legte Einstein am 10. Juli in der Sitzung der Preussischen Akademie eine eigene Arbeit dazu vor. Im Protokoll heißt es:

„4. Herr Einstein legte die Arbeit: Quantentheorie des einatomigen idealen Gases vor“.

In den Sitzungsberichten wurden laut Inhaltsverzeichnis 3 Arbeiten abgedruckt:

Einstein: Quantentheorie des einatomigen idealen Gases. 1. Berlin 1924  
Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften.  
Phys. Math. Klasse. 1924. S. 261-267

Einstein: Quantentheorie des einatomigen idealen Gases. 2. Berlin 1924  
Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften.  
Phys. Math. Klasse. 1925. S. 3-14

Einstein: Zur Quantentheorie des idealen Gases. Berlin 1925  
Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften.  
Phys. Math. Klasse. 1925. S. 18-25

Was Einstein an der Bose-Arbeit sofort als den wesentlichen Punkt ausmachte, war Boses neue Methode der Abzählung von Wahrscheinlichkeiten für Lichtquanten (Photonen). Einstein erkannte, dass Boses Methode auf der Nichtunterscheidbarkeit, d.h. Identität der Partikel beruhte und dass diese Methode sich auf Gase anwenden ließ. Wir müssen unterstreichen, dass die Worte „identity“ oder „indistinguishability“ in Boses Original überhaupt nicht vorkommen, das war allein die Erkenntnis Einsteins. Es ist somit die große Leistung Einsteins, erstmalig die Bedeutung der Identität/Nichtunterscheidbarkeit der Atome und anderer Mikropartikel für die Quantentheorie erkannt zu haben. Einstein hatte ein fundamentales neues Prinzip entdeckt und musste sich sogleich massiver Kritik von Seiten von Planck, Ehrenfest und anderen aussetzen. Planck soll in der Diskussion gesagt haben: „Aber lieber Herr Einstein, diese ganzen Sachen sind ja absolut unmöglich; denn sie haben falsch gezählt“ (nach Treder, 1983). Einsteins Antwort zeigte, dass er eines der tiefsten Prinzipien der Quantenphysik richtig erfasst hatte: „Gerade das ist offensichtlich das Prinzip der Quantenmechanik, daß die ‚Teilchen – Komplexionen‘ eben nur einmal zu zählen sind, weil sie ununterscheidbar sind. Der Unterschied der klassischen Teilchen von denen der Quantenphysik ist gerade, daß letztere als Monaden nicht mehr unterscheidbar sind“ (zitiert wieder nach Treder, 1983).

Wir finden es interessant, dass Einstein hier auf den Leibnizschen Begriff der Monaden als metaphysische Atome zurückgreift. Damit gebührt Einstein das Verdienst, eine der tragenden Säulen der Quantenmechanik und Quantenstatistik, die Konsequenz von Identität und Symmetrie der Atome und anderer Mikroteilchen als Erster verstanden zu haben, die laut Meinung von H.J. Treder „die wohl wichtigste und tiefsinnigste Konsequenz der Quantentheorie überhaupt“ ist (Treder, 1983). Von Interesse ist auch, dass sich Einstein in der Begründung seiner Vorstellungen auf die Hypothese der Materiewellen von De Broglie bezog, womit er Schrödingers Aufmerksamkeit auf diese Wellen lenkte.

Die zweite Säule der modernen Quantentheorie, die Einführung der Quantenzustände im Hilbertraum und ihre Dynamik, wurde erst im Folgejahr 1925 von Heisenberg, Born, Jordan u.a. in Göttingen formuliert und in einer anderen Form, die auf De Broglie's Materiewellen basierte, von Schrödinger in Zürich gefunden. Die Vereinigung zu einer vollständigen Quantentheorie der Vielteilchensysteme gelang dann erst Pauli, Dirac, Fermi, Fock, Landau und Von Neumann mehrere Jahre später. Einstein war der Vorreiter der Quantenstatistik und war strengster Kritik von Seiten derer ausgesetzt, die sich gegen eine neue Revolution in der Physik wehrten. Wissenschaftshistorisch gesehen, scheint es ungerecht, dass auch in späteren Jahren häufig die Beiträge von Einstein zur Quantentheorie herabgesetzt und ihm nachgesagt wurde, er hätte die Quantentheorie nie recht verstanden.

In einer ersten Reaktion auf harsche Kritik, z.B. von Seiten Ehrenfests, machte Einstein am 8. Januar eine zweite Vorlage in der Akademie, in der er die Konsequenzen aus der neuen Theorie darlegte, u.a. die Möglichkeit einer Art Kondensation bei tiefen Temperaturen. Dieses Phänomen wird heute Bose-Kondensation genannt und ist erst 1995 experimentell nachgewiesen und umgehend mit

Nobelpreisen gewürdigt worden. Eigentlich sollte das Phänomen Einstein-Kondensation heißen, denn in der Arbeit von Bose sind keine Aussagen über Kondensation zu finden. Wie sich die Autoren erinnern, wurde noch in den 50er bis 70er Jahren an den Universitäten und in Lehrbüchern die Meinung vertreten, der Kondensationseffekt wäre ein Artefakt der Theorie idealer Quantengase und entspräche nicht der Realität der Gase.

Die ersten Bose-Einstein-Kondensate in Gasen wurden 1995 experimentell von Cornell, Wieman, Ketterle, Davis und Mewes bei sehr tiefen Temperaturen hergestellt. Im Jahr 2001 erhielten Cornell, Wiemann und Ketterle dafür den Nobelpreis für Physik. Diese Experimente haben ohne Zweifel bewiesen, dass Einstein auch hier mit seinen Vorhersagen Recht hatte. Weitere theoretische Entwicklungen durch Landau, Ginsburg u.a. haben auch gezeigt, dass die Kondensation nur ein erster Vertreter einer ganzen Klasse „makroskopischer Quantenphänomene“ war. Es ist von großem historischen Interesse, dass solche Phänomene schon 1923/24 in der Klasse diskutiert wurden. Treder zitiert eine Äußerung von Planck: „Lieber Herr Einstein, wenn Sie recht haben, dann gibt es nicht nur mikroskopische Effekte der Quantentheorie, sondern auch grobe Makroeffekte, beispielsweise so etwas wie eine makroskopische Flüssigkeit ohne Zähigkeit, wenn wir genügend viele Atome und dabei genügend tiefe Temperaturen haben“ (Tredner, 1983). Damit wurde die hohe Bedeutung der Vorlagen von 1924/25 nachgewiesen und gezeigt, dass die Diskussionen in der Klasse Physik der Preußischen Akademie den Entwicklungen der theoretischen Physik weit voraus eilten und dass ohne jeden Zweifel Einstein der ganz große Pionier der Quantentheorie war, der den so fruchtbaren Zweig der makroskopischen Quanteneffekte begründete.

#### Literatur:

- W. Ebeling, D. Hoffmann: The Berlin school of thermodynamics founded by Helmholtz and Clausius, Eur. J. Phys. 12 (1991) 1-9
- W. Nernst: Zum Energieinhalt der Gase. Physikal. Z. 13 (1912), 1064-1069
- W. Nernst: Die Anwendung des Wärmesatzes auf Gase, Z. Elektrochem. 20 (1914), 357-360
- W. Nernst: Zum neuen Wärmesatz, Verlag Knapp, Halle 1918
- W. Nernst: Theoretische Chemie, 8.-10. Auflage, Verlag Enke, Stuttgart 1921
- D. Simon (Hrsg.): Albert Einstein: Akademie-Vorträge. Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften 1914 - 1932. Wiley-VCH 2005
- H.-J. Treder: Große Physiker und ihre Probleme. Studien zur Geschichte der Physik. Akademie-Verlag, Berlin 1983

Adressen der Verfasser: [Werner\\_Ebeling@web.de](mailto:Werner_Ebeling@web.de), [dh@mpiwg-berlin.mpg.de](mailto:dh@mpiwg-berlin.mpg.de)