

Werner Ebeling

## **Einstein und die Brownsche Bewegung**

### **1. Die erratische Bewegung kleiner Partikel in Suspension**

Eine ungeordnete Bewegung kleiner Partikel in Suspension wurde zuerst 1785 bei mikroskopischen Studien durch den holländischen Arzt Jan Ingenhousz beobachtet. Diese Bewegung kleiner Teilchen wurde ab 1827 bei mikroskopischen Beobachtungen der Bewegung suspendierter Pollen wiederentdeckt und im Detail durch den schottischen Botaniker Robert Brown studiert. Brown vertrat zunächst die Hypothese, es handele sich um „lebende Moleküle“. Eine entsprechende briefliche Anfrage an Charles Darwin trug von der Sache her nicht zur Klärung bei. In einer Folgearbeit sprach Brown von „aktiven Molekülen“. Der Titel seiner Arbeit von 1929 lautete: „Additional remarks on active molecules“. Verschiedene theoretische Deutungsversuche wurden später durch Desaulx (1877), Gouy (1889) und Exner (1900) geleistet. Den entscheidenden Schritt tat Albert Einstein im „Wunderjahr 1905“ mit seiner fundamentalen Arbeit „Über die von der molekular-theoretischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen“ (*Annalen der Physik* 17 (1905) 549–560). Um Einsteins Leistung zu verstehen, beleuchten wir die Entwicklung der Thermodynamik und kinetischen Theorie vor Einstein, wobei wir uns besonders auf den Standort Berlin konzentrieren (Mendelssohn, 1976; Treder, 1983, Ebeling und Hoffmann, 1990,1991).

### **2. Thermodynamik und kinetische Theorie vor Einstein**

Wir beginnen mit einer Untersuchung der Beiträge von Helmholtz und Clausius, die zu den bedeutendsten Pionieren zählen. Hermann v. Helmholtz (1821–1894) studierte in Berlin Physiologie und Physik, dann diente er als Militär-Chirurg in Potsdam. In seiner Freizeit führte er Experimente in Berlin am Kupfergraben im Laboratorium von Professor Magnus durch. Es handelte sich um Untersuchungen von sehr speziellen biologischen Prozessen, wie Gä-

rung und Muskelaktivität. Dabei kam Helmholtz zu weitreichenden Schlüssen, die ihn zum Energie-Erhaltungssatz führten. Als Mitglied der jungen „Berliner Physikalischen Gesellschaft“ trug er 1847 über seine Schlussfolgerungen vor. Die daraus resultierende Abhandlung (Helmholtz, 1847) trug den Titel „Über die Erhaltung der Kraft, eine physikalische Abhandlung.“ In den folgenden Jahrzehnten wirkte Helmholtz als Professor für Physiologie an verschiedenen deutschen Universitäten. Zu ähnlichen Schlüssen wie Helmholtz gelangten unabhängig Mayer und Joule. Das Gesamtkonzept des ersten Hauptsatzes und die mathematische Formulierung war bei Helmholtz mit der größten Klarheit formuliert (Ebeling und Hoffmann, 1990, 1991).

Den zweiten Hauptsatz verdanken wir den Untersuchungen von Rudolf Clausius und William Thomson (Lord Kelvin). Rudolf Clausius studierte Physik in Berlin und war dann als Lehrer tätig, in seiner Freizeit nahm er am Seminar von Professor Magnus teil. Nach einem Seminarvortrag über die Lehren von Carnot und Helmholtz gelangte er zu grundsätzlich neuen Einsichten, die ihn 1850 zum zweiten Hauptsatz der Wärmelehre führten. In der Folgezeit befasste er sich vorwiegend mit der Ausarbeitung einer kinetischen Begründung und des Konzeptes der Entropie (Ebeling und Orphal, 1990).

Nach dem Tode von Magnus wurde Helmholtz als Nachfolger berufen. Er schuf hier eine Schule von Weltbedeutung, die zwischen 1871 und 1933 eine zentrale Rolle in der Entwicklung der Naturwissenschaften spielte (Treder, 1983). Helmholtz war seit 1871 Professor für Physik an der Berliner Universität und Direktor des neugebauten Institutes am Reichstagsufer. Er zeichnete verantwortlich für spätere Rufe an Kirchhoff, Boltzmann (diese Berufung kam nicht zustande) und Planck. Helmholtz hatte einen enormen Einfluss, er wurde häufig ironisch als Reichskanzler für Physik bezeichnet

Zu seinen Schülern zählten unter anderen Hertz, Kurlbaum, Blasius, Lummer, Paschen, Rubens und Börnstein. Die Liste seiner Kollegen und Angehörigen der von ihm gegründeten Schule in Berlin umfasst u.a. Kirchhoff, Planck, Wien, Kundt, Michelson, Wiedemann, Drude, Nernst, Einstein, von Laue, Warburg, Eucken, Lindemann, Caratheodory, Haber, Schottky, Hahn, Meitner, Schrödinger, Bose, Saha, von Neumann, Gabor, Szilard, Wigner und Delbrück,

Die Abrundung der Thermodynamik erfolgte in Berlin im wesentlichen durch Planck und Nernst und ihre Schüler im Hinblick auf neue Anwendungen und die Behandlung neuer Probleme. Max Planck wurde 1889 als Nachfolger von Kirchhoff berufen, er entwickelte eine Thermodynamik der Lösungen und eine neuen Theorie der Strahlung. Im Jahre 1905 erfolgte die

Berufung von Walter Nernst, er fand gleich das „fehlende Glied der Thermodynamik“, den dritten Hauptsatz, von Nernst auch „mein Wärmesatz“ genannt. Nernst zufolge verschwindet die Differenz zwischen innerer Energie und freier Energie bei tiefen Temperaturen. In der Planckschen Formulierung lautet er: Die Entropie von thermodynamischen Systemen im Gleichgewicht verschwindet am Nullpunkt der Temperatur.

Die Thermodynamik hat in der Folgezeit wichtige Entdeckungen in der Physik beeinflusst: Dazu gehören:

- Die Theorie der Brownschen Bewegung, darauf gehen wir noch ein;
- die Quantentheorie: Plancks Quantenhypothese beruhte auf einer thermodynamischen Analyse der Messdaten aus dem Helmholtz-Institut;
- die Tieftemperaturphysik: Die Thermodynamik gab den Messungen und der Geräteentwicklung eine neue Richtung (Nernst, Lindemann, Meissner, Kamerlingh-Onnes), die Grundlagen der Theorie gehen auf Einstein, Bose und Debye zurück;
- die moderne Kosmologie: Die Theorie vom Big Bang hat wesentlich thermodynamische Wurzeln.

### **3. Begründung der Statistik und Theorie der Brownschen Bewegung**

Nach Clausius' Arbeiten zur kinetischen Theorie und Maxwells fundamentalen Beiträgen dazu, leistete besonders Boltzmann Pionierarbeiten. Er wurde 1888 zum Akademiemitglied gewählt, die vorgesehene Berufung nach Berlin kam aber nicht zustande. Ab 1889 entwickelte Planck als Nachfolger von Kirchhoff (nachdem Boltzmann abgesagt hatte) die statistische Thermodynamik und Theorie der Strahlung weiter. In Amerika leistet Josiah Williard Gibbs fundamentale Beiträge dazu. Ab 1902/03 beginnt Einstein als Mitarbeiter des Berner Patentamtes sich mit der kinetischen Theorie des thermischen Gleichgewichtes und des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik zu befassen. Er entwickelt unabhängig von Gibbs die Ensemble-Theorie und die Theorie wechselwirkender Systeme. Gleichzeitig arbeitet er an einer Dissertation über Fragen der Molekularbewegung. Im Band 17 der Annalen der Physik publiziert er drei fundamentale Arbeiten:

1. Zur Lichtquantenhypothese: „Über einen die Erzeugung und Umwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Standpunkt“ (Ann. Physik 17, 132–184). Einführung von Lichtquanten, lichtelektrischer Effekt.
2. Zur Theorie der Brownschen Bewegung: „Über die von der molekulartheoretischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen“ (Ann. Physik 17, 549–560). Ein-

stein leitet hier experimentell prüfbare Aussagen für die mittlere Verschiebung bei Brownscher Bewegung und die Avogadro-Zahl ab. Diese Arbeit bedeutete den endgültigen Sieg des Atomismus, ihr schärfster Gegner Ostwald resigniert.

3. Zur speziellen Relativitätstheorie: „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“, Ann. Physik 17, 891–921. In dieser Arbeit entwickelt er neue Vorstellungen zu Raum und Zeit sowie zum Zusammenhang von Masse und Energie.

Weiterhin reicht Einstein im “Wunderjahr 1905“ (am 30. Juni 1905) an der Universität Zürich seine Dissertation „Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen“ ein, sie hängt eng mit seiner Theorie der Brownschen Bewegung zusammen.

In der vorliegenden Studie wollen wir nur die weitere Entwicklung der Untersuchungen zur Brownschen Bewegung verfolgen. Sofort eingeleitete experimentelle Untersuchungen u.a. von Svedberg, Siedentopf, Gouy zeigen: Die neue Theorie von Einstein beschreibt quantitativ die Brownsche Bewegung. Dem französischen Forscher Perrin verdanken wir systematische, quantitative, experimentelle Analysen. Perrin misst auch die Avogadro-Loschmidt Zahl und Plancks Konstante mit neuer Präzision. Perrins Arbeiten werden viel zitiert und er erhält dafür den Nobelpreis. Die Weiterentwicklung der Theorie wird durch Smoluchowski und Langevin vorangetrieben.

Smoluchowski entwickelt eine neue partielle Differentialgleichung für die Verteilungsfunktionen. Wie er (zu Recht) behauptet, ist seine Methode in mancher Hinsicht direkter und einfacher als die von Einstein. Das trifft auch zu für die neue Methode von Langevin, der stochastische Differentialgleichungen mit Rauschquellen verwendet.

Von Fokker wird in einer Schweizer Dissertation und einer Kurzpublikation eine neue partielle Differentialgleichung für Verteilungsfunktionen im Phasen-Raum abgeleitet. Von Planck stammt eine genauere Ableitung und Verallgemeinerung. Klein und Kramers formulieren die allgemeine Theorie dieser „Fokker-Planck-Gleichung“ für die Brownsche Bewegung. Die Forscher Ornstein, Uhlenbeck, Debye (AM), Onsager und Falkenhagen (AM) behandeln in der Folgezeit spezielle stochastische Prozesse mit großem Erfolg und leiten neue experimentell prüfbare Aussagen ab (Ebeling und Sokolov, 2005).

#### **4. Einstein und die Akademie der Wissenschaften**

Im Jahre 1913 gelang es der Akademie auf Betreiben besonders von Planck und Nernst, Einstein nach Berlin zu holen. Wir zitieren aus der Begründung für die Aufnahme als Mitglied, die von Planck stammt und das Datum 12. Juni 1913 trägt: “Die unterzeichneten Mitglieder beehren sich, ... Dr. Albert Einstein, zum OAM, mit einem besonderen persönlichen Gehalt von 12000 M., zu beantragen. ... Am weitesten ist sein Name bekannt geworden ... durch das Prinzip der Relativität ... er ist gelegentlich auch über das Ziel hinausgeschossen, wie z.B. in seiner Hypothese der Lichtquanten, ... er hat aus den Boltzmannschen Sätzen über die Schwankungen ... eine Anzahl Folgerungen gezogen, welche die experimentelle Forschung befruchtet haben, so die schönen Perrinschen Untersuchungen der Brownschen Molekularbewegung ...“ (Unterschriften: Planck, Nernst, Rubens, E. Warburg).

Nach der Berufung an die Akademie hat Einstein folgende fundamentale Beiträge zur Physik geleistet:

- Entwicklung der allgemeine Relativitätstheorie,
- Beiträge zu einer allgemeinen Feldtheorie,
- Grundlagen der kinetischen Theorie der Strahlungsübergänge (Laser-Theorie),
- Begründung der Bose-Einstein-Statistik.

Alle diese Arbeiten wurden in Sitzungen der Akademie diskutiert. Wir möchten behaupten, dass neben Einsteins Arbeit am Berner Patentamt, die Tätigkeit an der Akademie die fruchtbarste Periode seines Schaffens war. Die kritischen Diskussionen in der Akademie, besonders mit Planck, Nernst und Schwarzschild haben Einstein zu immer neuen theoretischen Ansätzen getrieben.

Neben seiner Tätigkeit in der Akademie war Einstein sehr aktiv in der Physikalischen Gesellschaft und an der Universität tätig. Insbesondere nahm er regelmäßig am Physikalischen Kolloquium teil. Wir zitieren dazu Kurt Mendelssohn: „Das Berliner Kolloquium, wie dieses (von Magnus gegründete) wöchentliche Treffen genannt wurde, war kein Ort für müßiges Gerede und höfliche Umschreibungen ... Neben Nernst waren da Einstein, Planck, von Laue, Schrödinger, Hertz, Hahn und Meitner. Das einzige, was für sie zählte war Physik, und es ging dabei hart her bei dieser Diskussion um Physik.“ (Mendelssohn, 1976).

Weitere Aktivitäten von Einstein in Berlin sind vielfach dargestellt worden, wir müssen hier darauf verzichten.

## 5. Zusammenfassung

Einsteins Arbeiten zur Brownschen Bewegung bilden den Ausgangspunkt und ein Kernstück seines Lebenswerkes.

Diese Forschungen stehen in der Tradition der Arbeiten von Helmholtz, Clausius, Planck, Nernst, Gibbs u.a. zur Begründung der Thermodynamik und statistischen Physik.

Einsteins Arbeiten zur Brownschen Bewegung gaben die korrekte Deutung eines gut beobachtbaren Effektes, bedeuteten – nach ihrer experimentellen Betätigung – den endgültigen Sieg der Atomistik.

Einsteins Voraussagen wurden vielfach experimentell überprüft, diese experimentellen Arbeiten bildeten den Ausgangspunkt für eine neue experimentelle Technik der Mikrountersuchungen, die Theorie bildete den Ausgangspunkt für die Entwicklung des großen Gebietes der physikalischen Stochastik.

## 6. Literatur

- [1] K. Mendelssohn: Walter Nernst und seine Zeit. Physik Verlag, Weinheim 1976
- [2] H. J. Treder: Große Physiker und ihre Probleme. Akademie-Verlag, Berlin 1983
- [3] W. Ebeling, D. Hoffmann: Die Berliner Schule der Thermodynamik. *Wiss. Z. Humboldt-Univ. Berlin* 39 (1990) 264–276
- [4] W. Ebeling, J. Orphal: Rudolf Clausius in Berlin. *Wiss. Z. Humboldt-Univ. Berlin* 39 (1990) 210–223
- [5] W. Ebeling, D. Hoffmann: The Berlin school of thermodynamics founded by Helmholtz and Clausius, *Eur. J. Phys.* 12 (1991) 1–9
- [6] W. Ebeling, I. Sokolov: *Statistical thermodynamics and stochastic theory of nonequilibrium systems*, World Scientific 2005