



Staats- und
Universitätsbibliothek
Bremen

Staats- und Universitätsbibliothek Bremen

DFG Projekt Die Grenzboten

Die Grenzboten

Berlin u.a., 1841 - 1922

Kirchberger: Die Brownsche Molekularbewegung.

urn:nbn:de:gbv:46:1-908

Die Brownsche Molekularbewegung.

Von Prof. Dr. Kirchberger (Berlin-Nikolassee).

1.

Ob der Spruch: Nichts in der Welt ist unbedeutend in dem Sinne gilt, wie ihn Seni im Wallenstein auffaßt, kann man wohl billig bezweifeln. Aber daß sehr vieles, was dem ungeübten Blick ganz unbedeutend und nichtsagend aussieht, in den Händen der Wissenschaft weittragende Bedeutung gewinnen kann, das ist auch sicher. Ein ungewöhnlich lehrreiches Beispiel dieser Art bildet eine Beobachtung, die ein englischer Arzt namens Brown im Jahre 1827 machte: Er bemerkte beim Mikroskopieren allerlei sonderbare, hin- und her-zuckende Bewegungen, die irgendwelche, in der Mikroskopierflüssigkeit befindliche Teile ausführten. Man sieht dergleichen unter dem Mikroskop nicht selten, aber die wenigsten ahnen wohl, welche grundsätzliche Bedeutung diese gänzlich unscheinbaren, regellos durcheinandergehenden Bewegungen im Laufe der letzten Jahre gewonnen haben. Sie sind von entscheidender Wichtigkeit geworden für einen Grundpfeiler unserer ganzen heutigen Naturanschauung, nämlich den Atomismus und können auch als Schulbeispiel dafür gelten, wie ein zuerst völlig aussichtslos erscheinendes Problem geradezu restlos gelöst werden kann.

Die Bewegungen rühren nämlich her von den Stößen, die kleine lose umherschwimmende Teilchen von der Bewegung der Moleküle empfangen, die wir uns untrennbar mit der Wärme verbunden denken. Es ist ähnlich wie wenn man aus weiter Ferne einen Kahn betrachtet, der auf bewegtem Wasser schaukelt. Die Wasserwellen sind vielleicht viel zu unbedeutend um wahrgenommen zu werden. Aber an der von ihnen veranlaßten Bewegung des Kachens können sie erkannt werden. Nun nimmt die Physik recht schnelle Bewegungen der Moleküle an, beispielsweise erfordert die Theorie für Luftteilchen unter gewöhnlichen Umständen Geschwindigkeiten von etwa 400—500 Meter in der Sekunde, also erheblich mehr, als die Schallgeschwindigkeit beträgt. Eine noch weiter gesteigerte Geschwindigkeit ist das, was wir als erhöhte Temperatur empfinden. Wenn wir nun auch über die innere Natur der Flüssigkeiten nicht so gut unterrichtet sind wie über die der Gase, so ist doch sicher, daß auch innerhalb flüssiger ebenso übrigens wie innerhalb fester Stoffe ähnliche Molekularbewegungen stattfinden, und sie also sind es, die die unter dem Mikroskop sichtbare Bewegung veranlaßt haben.

Nun denkt vielleicht der Leser: Also schön, dann weiß ich ja Bescheid und kann nun meines Weges ziehen. Ich bedaure aber, ihn trotzdem vorläufig noch nicht entlassen zu können. Eine derartige Antwort, wie ich sie hier gegeben habe, würde nämlich keinen Physiker befriedigen. Er würde sagen: Ein ganz hübscher Einfall vielleicht, aber doch noch keine Theorie. Von einer Theorie verlange ich, daß sie die Anwendung der Mathematik und Ausrechnung von Zahlen gestattet, und diese will ich durch das Experiment nachprüfen. Im vorliegenden Fall also ist es Aufgabe der Theorie festzustellen, wie die Bewegung sich ändert, wenn die Temperatur höher oder niedriger wird, welchen Einfluß die Größe der bewegten Teilchen selbst auf ihre Geschwindigkeit hat und auch was die Natur der Flüssigkeit in der sich der ganze Vorgang abspielt, für eine Rolle dabei spielt. Denn wie sich der Kahn des obigen Beispiels in klarem

Wasser anders bewegen wird als etwa in schlammigem Moor, so wird auch hier die Fähigkeit der suspendierenden Flüssigkeit, wie man sagt, ein bald schnelleres, bald langsameres Hin- und Herzucken gestatten.

Die Schwierigkeit des ganzen Problems beruht nun darin, daß es ganz unmöglich ist, die Bewegung so aufzufassen, wie sie in Wirklichkeit verläuft. Die Teilchen tanzen in eigentümlicher, ganz regelloser Weise hin und her. Es kommt uns so vor als ob dieser Tanz aus lauter gradlinigen Stücken zusammengelekt sei. Würden wir nun aber ein einzelnes gradliniges Stück unter die Lupe nehmen und etwa kinematographische Aufnahmen von ihm machen, so oder 20 in der Sekunde, so würden wir sehen, daß es nichts weniger als gradlinig ist vielmehr für die feinere Beobachtung ebenso aus einzelnen Stücken besteht wie für uns die ganze Bewegung. Und für noch schärfer bewaffnete Sinne würde sich wiederum jedes einzelne Stück als ein höchst zusammengelekttes Hin- und Herzucken herausstellen u. s. f. ohne Ende. Man sieht also keine Möglichkeit, eine feste Handhabe für eine Messung zu gewinnen.

Es war nun Albert Einstein, der zunächst theoretisch den Weg aus dieser Schwierigkeit wies. Der Hauptstützpunkt seiner Theorie war die völlige Regellosigkeit der Bewegung. Werden wirklich die Bewegungen von Molekülstößen veranlaßt, so folgen in einer einzigen Sekunde viele Milliarden dieser Stöße, und diese werden dem sogenannten Gesetz der großen Zahlen gehorchen. Man versteht darunter folgendes: Werfe ich 10 mal mit einem Würfel, so kann es sich natürlich sehr wohl einmal so treffen, daß ich doppelt so oft 6 als 1 oder vielleicht auch dreimal so oft 1 als 5 werfe. Tue ich aber 1000 Würfe, so ist das ausgeschlossen, und der Ausgleich wird relativ um so vollkommener, je größer die Würfzahl. Hingegen absolut genommen ist die Sache gerade umgekehrt. Bei 1000 Würfeln kann es schon vorkommen, daß etwa vier Augen etwa um 20 mal öfter vorkommen als drei, bei 10 Würfeln ist dies selbstverständlich ausgeschlossen. Alle diese Gesetze der „großen Zahlen“ sind nun mathematisch höchst sorgfältig erforscht und namentlich von dem englischen Physiker Maxwell in eine feste mathematische Form gebracht worden. — Indem nun Einstein solche Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen auf die Brownsche Bewegung anwandte, gelang es ihm tatsächlich zu zeigen, daß es nicht nötig sei, den völlig aussichtslosen Versuch zu machen, die wirkliche Geschwindigkeit der Teilchen zu messen. Er tat das, daß es genüge, viele Teilchen zu beobachten und dabei festzustellen, wie weit in einer bestimmten Zeit jedes einzelne sich von seinem Ausgangspunkt entfernt habe. Alles Weitere folgt dann von selbst aus Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen nach der Einsteinschen Theorie.

Mit Aufstellung dieser Theorie freilich war die Arbeit erst halb getan. Ihre experimentelle Erprobung erforderte in diesem Fall nicht etwa nur außerordentlich großes Geschick und Sorgfalt, sondern auch eine Geduld von einer Größe, wie sie nur ein geschulter Naturforscher aufzubringen vermag. — Als der französische Physiker Perrin von der Einsteinschen Theorie hörte, machte er sich sogleich ans Werk. Er unterrichtete zunächst, woher er die geeignetsten „Teilchen“ bekommen könne, monatelange Arbeit erforderte alsdann das Sortieren, denn die benutzten Teilchen mußten alle möglichst genau gleich groß sein, dann wurde diese Größe selbst wieder nach den verschiedenartigsten Methoden festgestellt (sie betrug Bruchteile eines Tausendstel Millimeter) und endlich konnte die eigentliche Hauptarbeit beginnen, nämlich die Beobachtung und Auszählung der Bewegung dieser Teilchen unter dem Mikroskop und unter den verschiedenartigsten Bedingungen. Der leitende Gedanke war dabei, aus der

Größe der Teilchen und der Lebhaftigkeit ihrer Bewegung einen Rückschluß zu machen auf die Größe der Moleküle durch deren Stoß sie so veranlaßt war. Auf diese Weise kam Perrin zu dem Resultat, daß beim Wasserstoff, der die leichtesten Moleküle hat, von denen ein jedes wieder in zwei Atome zerfällt, etwa 680 000 000 000 000 000 000 Atome auf ein Gramm gingen. Nun kann man diese Zahl, die sogen. „Loschmidtsche Zahl“, auf den verschiedenartigsten anderen Wegen erhalten. Und es ist neuerdings einem österreichischen Physiker namens Erich Schmiel gelungen, durch weiter verbesserte Versuche eine Zahl zu erhalten, die mit anderen Messungen noch sehr viel genauer stimmt als die von Perrin.

So sind nicht wenige Naturforscher die bisher an der Richtigkeit unserer Vorstellungen über den atomistischen und molekularen Bau unserer Materie noch zweifelten gerade durch das Studium der Brownschen Bewegung von ihr überzeugt worden. Der so unscheinbar und unbedeutend aussehende Tanz hat uns, nachdem er Jahre lang erste Forscher in Atem gehalten hat, den Weg in das Herz des rätselhaften Prinzips gewiesen, das wir Materie nennen.

2.

Nun hat die Sache aber noch eine zweite, sozusagen philosophische Seite! Es war einer der größten Fortschritte, die die Naturerkenntnis machte, als sie umkehrbare und nicht umkehrbare Vorgänge zu unterscheiden begann.

Das Gesetz von der Erhaltung der Energie ist uns allen in Fleisch und Blut übergegangen; wir wissen daß es in der Natur so wenig wie im wirtschaftlichen Leben etwas „umsonst“ gibt, wissen daß wir Kohle oder auch Wasserkraft opfern müssen, wenn wir eine Kraft z. B. eine Bewegung erzeugen wollen. Wir lachen jeden Erfinder aus, der uns ein perpetuum mobile konstruieren will. Aber so unendlich wertvoll diese Erkenntnis für die Naturwissenschaft und wenn man will auch für das Patentamt ist, man überzeugt sich leicht, daß sie durchaus noch einer Ergänzung bedarf. Dem Gesetz von der Erhaltung der Energie würde es z. B. nicht im Geringsten widersprechen, wenn ein Schiff die zu seiner Fortbewegung nötige Energie dem Wärmeverrat des Weltmeers entnähme. Denn auch Wärme stellt eine Energiequelle dar, und wie man sieht, steht sie an sich in jeder beliebigen Menge kostenlos zur Verfügung. Von Energiegesetz wegen könnte also ruhig ein Erfinder kommen und behaupten, er habe eine Maschine konstruiert, die ein Schiff ohne Kohlenverbrauch von Hamburg nach New York brächte, und da wir doch schon mal am Erfinden sind, so könnte die etwaige übermäßige Sommerhitze in den Kabinen auch gleich hübsch konzentriert und dazu verwandt werden, in der Schiffsküche die Braten gar zu machen. Auch dies kann das Energiegesetz nicht hindern, denn die Wärme stellt die gleiche Energiemenge dar, ob sie nun in einem ganzen Wohnraum zerstreut oder in einem Kochtopf konzentriert ist. Wie man sieht, hat die Wissenschaft also die Pflicht, das Patentamt auch vor solchen „Erfindern“ zu schützen.

Das geschieht nun allerdings! Der sog. „zweite Hauptsatz der Wärmelehre“ — der erste ist eben das Gesetz von der Erhaltung der Energie — behauptet, daß sich wohl Arbeit ohne Weiteres und restlos in Wärme, dagegen nicht umgekehrt Wärme in Arbeit verwandeln lasse. Die Wärme eines Körpers, der ebenso warm oder kühler als seine Umgebung ist, läßt sich nicht in Arbeit umsetzen, bei einem warmen Körper ist dies zwar möglich, aber keineswegs restlos. Bekanntlich kann es auch bei sorgfältigster Konstruktion nicht gelingen, die

Wärme eines Dampfkessels ohne Verluste in Arbeit überzuführen. Der größte Teil zerstreut sich vollkommen nutzlos in die Luft, nur ein ziemlich kleiner Teil — er dürfte höchstens etwa ein Fünftel der durch das Kohlenfeuer erzeugten Wärme betragen — wird wirklich in nutzbare Bewegung umgesetzt.

Die Natur hat sozusagen ein Ausgleichsbestreben. Wasser fließt freiwillig nur den Berg hinunter, nicht hinauf; Wasserkräfte würden, wenn ihnen keine andern entgegenständen, allmählich alle Berge abtragen und den Erdball nivellieren. So auch gleichen sich alle Wärmeunterschiede von selbst aus. In diesem Sinne hat man sogar vom „Wärmetod“ des Universums gesprochen. Haben alle die unzähligen Sonnen ihre Wärme ausgestrahlt und haben sich allmählich alle Temperaturunterschiede ausgeglichen, dann ist nicht abzusehen, wie noch irgendeine Bewegung oder Energieäußerung möglich sein sollte. — Ob nun unser Satz in dieser extremen Form seiner Anwendung auf das All zutrifft, möchten wir dahingestellt sein lassen, nach neueren Forschungen ist es kaum wahrscheinlich. Der Schluß vom Endlichen aufs Unendliche erfordert überhaupt immer eine ganz besondere Vorsicht; Helmholtz, Boltzmann u. A. aber haben an diesen Wärmetod des Universums geglaubt.

Nun zur Brownschen Molekularbewegung! Diese ist deshalb so merkwürdig weil sie ja, allerdings im kleinsten Maßstab, eine Verwandlung von Wärme in Arbeit darstellt. Denn die Molekularbewegung, die die Triebfeder des Ganzen ist, gilt uns ja als Wärmebewegung, als Wärme. Was wir aber unter dem Mikroskop sehen können, läßt sich nicht mehr als solche auffassen, wir müssen es als wirkliche „Bewegung“ anerkennen und wir hätten also in unserm sonderbaren, mikroskopischen Tanz die doch von unserm „zweiten Hauptsatz“ für unmöglich erklärte Verwandlung von Wärme in sichtbare Bewegung, wenn auch nur in kleinstem Maßstab.

Tatsächlich lag hier nun für die Physik eine sehr große Schwierigkeit vor. Den zweiten Hauptsatz, der sich als ein ungemein wichtiger, ja schlechthin unentbehrlicher Satz bewährt hatte, aufzugeben, ging nicht an. Aber ebenso wenig war es möglich zu leugnen, daß sich hier eine Ausnahme für seine Geltung gezeigt hatte. Ein Naturgesetz mit Ausnahmen ist nun immer eine sehr unangenehme Sache; eigentlich ein Hinweis, daß hier etwas noch nicht in Ordnung ist und daß die Wissenschaft noch nicht die endgültige Formulierung ihrer Sätze gefunden hat.

Die Lösung unserer Frage ist vor allem das Verdienst des österreichischen Physikers Ludwig Boltzmann. Seinen Gedankengang können wir am besten verstehen wenn wir an obige Bemerkung anknüpfen, daß die Ausnahme von unserem Satz sich doch eben nur in aller kleinstem Ausmaß abspiele. Die ganze Bewegung kommt dadurch zustande, daß zufällig mal auf der einen Seite eines Teilchens eine größere Zahl von Molekülen aufprallt wie auf der entgegengesetzten. Stellen wir uns vor, daß das Teilchen größer wird, so werden sich die Molekülstöße infolge ihrer größeren Zahl schon viel besser ausgleichen, von einer Bewegung werden wir jetzt sehr viel weniger wahrnehmen, und sie wird ganz ausbleiben, wenn wir uns gewöhnlichen, mit bloßem Auge sichtbaren Größenverhältnissen nähern. Das alles folgt aus dem Gesetz der großen Zahlen, oder wie wir strenger sagen wollen, aus Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen. Es wäre für unsere ganze Naturauffassung peinlich, ja unerträglich, wenn wir ohne tieferen Grund annehmen müßten, daß in kleinen Dimensionen andere Gesetze gelten könnten, als in großen; die Wahrscheinlichkeitsrechnung zeigt uns, daß es tatsächlich dieselben Gesetze

sind, daß sie sich aber infolge der verschiedenen Ausgleichsmöglichkeiten verschieden äußern. — Haben wir eine Anzahl kleiner Teilchen in einer Flüssigkeit, die an sich infolge ihrer Schwere niedersinken würden, so wird es infolge der Brownschen Bewegung immer mal vorkommen, daß das eine oder andere Teilchen entgegen der Schwere nach oben fliegt, weil es zufällig gerade auf seiner unteren Seite eine größere Zahl von Molekülstößen auffängt als auf der oberen. Auch wenn wir nur ein einziges Teilchen verfolgen, werden wir vermutlich nicht allzulange zu warten brauchen, bis dieser Zufall eintritt und es der Schwere entgegen nach oben wirbelt, wenn auch natürlich das Gegenteil häufiger vorkommt. — Nun aber denken wir uns einen Stein in freier Luft fallen. Jetzt ist es natürlich sehr viel unwahrscheinlicher, daß Ungleichheiten der Molekülstöße auf die so viel größere Schwerkraft irgendeinen Einfluß gewinnen sollten. Immerhin, wenn wir durch astronomische Zeiten hindurch, also sagen wir durch Billionen von Jahren den Stein fallen lassen, aufheben und aufs neue fallen lassen würden, dann ist es durchaus wahrscheinlich, daß unter der Trillion angestellter Versuche sich auch wohl einer finden würde, bei dem der Stein nach oben fliegt anstatt der Schwere folgend nach unten.

Durch solche Betrachtungen und nur durch sie kommt es zu einer Ausöhnung der „Brownschen Bewegung“ mit unserer sonstigen Naturauffassung und insbesondere mit dem „zweiten Hauptsatz“. Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen, die schon früher in der Statistik, der Versicherungswissenschaft usw. eine große Rolle spielten, sind nunmehr auch, und zwar insbesondere durch Boltzmann, ganz unentbehrlich in der Naturwissenschaft.

Eine Art Lieblingsobjekt für physikalische Sonntags- oder Feierabendbetrachtungen war immer die Frage, ob eine technische Ausnutzung der Brownschen Bewegung möglich sei, und ob sie der Lehre vom Wärmetod widersprächen. So teilt uns Boltzmann ein ganz artiges Gespräch mit, das er mit zwei gleichfalls sehr bedeutenden Fachgenossen, Stefan und Loschmidt über diese Frage geführt habe. Loschmidt habe behauptet, wenn auch die ganze Welt dem Wärmetod verfallen sei, so könnten doch noch etwaige intelligente Mollusken sich die Brownsche Bewegung zunutze machen, indem sie sorgfältig die nach oben wirbelnden Teile auswählten und dann ihr Herunterfallen infolge der Schwere technisch verwerteten. Boltzmann widersprach dem aber, indem er meinte, das Funktionieren der Intelligenz setze selbst schon Temperaturunterschiede voraus; in einem gleichmäßig temperierten Keller könnten intelligente Wesen auf die Dauer nicht existieren. Es ist uns leider nicht überliefert, ob sich Loschmidt damit zufrieden gab. Aber als ich neulich Gelegenheit hatte, mit einem unserer ersten Physiker, Herrn v. L., über diese Frage zu sprechen, meinte dieser, unzweifelhaft habe Loschmidt recht und Boltzmann unrecht gehabt. Denn da man über das Zustandekommen der Intelligenz nichts wisse, so könne man auch nicht sagen, daß sie Temperaturunterschiede voraussetze. Zweitens aber, wenn man schon intelligente Mollusken annähme, so könne man ihnen auch schon zutrauen, daß sie die Brownsche Bewegung selber wieder zum Aufrechterhalten von Temperaturunterschieden ausnützten, ehe es dazu ein für allemal zu spät sei.