

Einfache Experimente zur Brownschen Molekularbewegung

Matthias Ducci, Jana Reitter, Marco Oetken

Wer war Robert Brown und was hat er gesehen?

Robert Brown (21.12.1773 – 10.6.1858) war ein renommierter schottischer Botaniker. Er studierte an der Universität Edinburgh und diente beim Militär, bevor er sich ganz seiner Leidenschaft, der Botanik, widmete. Brown ist bekannt für seine genauen mikroskopischen Untersuchungen, in Zuge derer er als Cytoplasmastrom und entdeckte grundlegende Unterschiede bei der Befruchtung von Bedecktsamern (Angiospermen) und Nacktsamern (Gymnospermen). Im Jahre 1801 ergab sich für

einer der Ersten den Zellkern beschrieb und benannte.

Des Weiteren machte er Beobachtungen zum

Robert Brown die Chance unter dem Kommando

Matthew Flinders an einer Expedition teilzunehmen. Mit

der *Investigator* segelte er nach Australien, wobei es

Browns Aufgabe war, Pflanzen zu sammeln um diese

später beschreiben und klassifizieren zu können. Durch

das Sammeln von mehreren tausend Pflanzenarten und

die Taxonomierung und Klassifizierung vieler neuer

Arten, leistete Brown hier einen großen Beitrag [1].

Seine wohl wichtigste Entdeckung machte Brown im

Sommer 1827 als er Pollen des Mandelröschens (*Clarkia pulchella*), einer Pflanze aus der Gattung der Nachtkerzengewächse (*Onagraceae*), unter seinem Mikroskop studierte. Dabei fiel ihm auf, wie kleinste Partikel eine eigenartige, kontinuierlich zitternde Bewegung im Wasser vollführen.

Heute wird angenommen, dass die von Robert Brown beobachteten winzigen, länglichen und rundlichen Partikel Amyloplasten, Stärkeorganellen, und Sphärosomen, Fettorganellen, gewesen sind [2]. Bei weiteren Versuchen stellte sich heraus, dass alle Partikel [*he*] could reduce to a powder sufficiently fine to be temporarily suspended in water („die er zu einem feinen Pulver zerreiben und in

Abb. 1: Robert Brown in 1827



Wassers suspendieren konnte“) diese von ihm beobachtete, charakteristische Bewegung vollführen [3, S.472], welche heute in seinen Ehren unter dem Namen Brownsche Bewegung bekannt ist. Brown ging ursprünglich, fälschlicher Weise wie wir heute wissen, davon aus, dass es sich bei den von ihm beobachteten Partikeln um die kleinsten Bausteine des Lebens handelt. Im Jahre 1828 veröffentlichte Robert Brown seine Beobachtungen und Ideen in *A Brief Account of Microscopical Observations made in the Months of June, July, and August, 1827, on the Particles contained in the Pollen of Plants; and on the General Existence of Active Molecules in Organic and Inorganic Bodies* [3].

Was hat Brown beobachtet?

Zunächst soll das erstmals im Jahr 1827 von Robert Brown beobachtete und in *A Brief Account of Microscopical Observations made in the Months of June, July, and August, 1827, on the Particles contained in the Pollen of Plants; and on the General Existence of Active Molecules in Organic and Inorganic Bodies* [3] beschriebene Phänomen bei der mikroskopischen Betrachtung von in Wasser suspendierten Pollenbruchstücken in einem Versuch nachgestellt werden.

In seinen Aufzeichnungen spricht Robert Brown meist von *molecules* wenn er die kleinen Partikel die er unter dem Mikroskop beobachtet beschreibt. Da dieser Begriff nicht gleichzusetzen ist mit der deutschen Übersetzung *Moleküle*, werde ich den passenderen Term *Partikel* verwenden. Synonym dazu kann auch von Pollen-Bruchstücken, kleinen, beziehungsweise kleinsten Partikeln oder Teilchen gesprochen werden. Moleküle im deutschen Sprachgebrauch bedeutet mehratomige Teilchen die durch chemische Bindungen zusammengehalten werden. Ein Beispiel hierfür sind Wassermoleküle die man, wie andere Moleküle auch, nicht unter einem einfachen Mikroskop sieht. Selbst die kleinsten Partikel in den Versuchen zur Brownschen Bewegung sind groß genug um sie unter dem Mikroskop erkennen zu können.

Versuch 1: Untersuchung von Pollenbruchstücken auf die Brownsche Bewegung

Geräte und Chemikalien:

Mörser, Pistill, Mikroskop mit einer bis zu 400-fachen Vergrößerung (hier wurde das Motic BA210 verwendet), Mikroskopkamera oder Smartphone mit Kamera, gegebenenfalls Stativmaterial, Objektträger, Deckglas, Becherglas, Wasser, Einwegpipette, Spatel, Pollen von frischen Blüten (hier wurden Pollen des Hibiskus benutzt)

Durchführung:

Eine Spatelspitze Pollen werden im Mörser mit 0,5ml Wasser fein verrieben. Mit einer Einwegpipette werden 2-3 Tropfen der Suspension auf einen Objektträger gegeben und mit einem Deckgläschen blasenfrei abgedeckt. Dann mikroskopiert man bei 400facher Vergrößerung und geringer Beleuchtungsstärke. Durch die Mikroskopkamera oder die mit dem Stativmaterial vor dem Okular befestigte Kamera des Smartphones kann die Probe nun beobachtet und gegebenenfalls aufgezeichnet werden.

Beobachtung:

Neben größeren Pollenbruchstücken lässt sich eine Vielzahl kleinster Bruchstücke beobachten, die sich in einer regellosen Zitterbewegung befinden (siehe Videoaufnahme 1). Einige größere und mittelgroße Bruchstücke bewegen sich nicht oder nur sehr wenig.

Am besten ist die Bewegung der kleinen Partikel bei 400facher oder größerer Vergrößerung zu erkennen. Da die meisten Schulmikroskope nur bis zu maximal 400facher Vergrößerung vergrößern, kommt uns hier die Zoomfunktion unserer Handykamera zugute. Mit der Handykamera kann das Bild zusätzlich noch weiter vergrößert werden.

Auswertung:

Brown beschreibt seine Beobachtung mit den Worten *„Als ich die Gestalt dieser, in Wasser getauchten Partikeln untersuchte, bemerkte ich, dass viele von ihnen sichtlich in Bewegung waren. Ihre Bewegung bestand nicht bloß aus einer Ortsveränderung in der Flüssigkeit (...) einige wenige Partikelchen sah man sich um ihre eigene Achse*

drehen. ...die kleinen sphärischen Partikel zeigten sich in beträchtlicher Anzahl und in offener Bewegung, nebst einigen der größeren Partikel, deren Bewegung weniger augenscheinlich und zuweilen nicht zu beobachten war.“ [5, S.296]. Das passt genau zu dem, was hier auch beobachtet werden konnte. An einigen Stellen haben sich Partikelhaufen gebildet oder Partikel waren nicht vollständig suspendiert und klebten am Objektträger beziehungsweise am Deckgläschen und wurden dadurch in der Ausführung einer Bewegung behindert.

Versuch 1.1: Einfluss der Partikelgröße auf die Brownsche Bewegung

Geräte und Chemikalien:

Mikroskop mit einer bis zu 400-fachen Vergrößerung (hier wurde das Motic BA210 verwendet), Mikroskopkamera oder Smartphone mit Kamera, gegebenenfalls Stativmaterial, Objektträger, Deckglas, Becherglas, Wasser, Einwegpipette, Spatel, Pollen von frischen Blüten (hier wurden Pollen des Hibiskus benutzt)

Durchführung:

Eine Spatelspitze Pollen werden unzerrieben mit 0,5ml Wasser vermischt. Mit einer Tropfpipette werden 2-3 Tropfen der Suspension auf einen Objektträger gegeben und mit einem Deckgläschen blasenfrei abgedeckt. Dann mikroskopiert man bei 400facher Vergrößerung und geringer Beleuchtungsstärke. Durch die Mikroskopkamera oder die mit dem Stativmaterial vor dem Okular befestigte Kamera des Smartphones kann die Probe nun beobachtet und gegebenenfalls aufgezeichnet werden.

Beobachtung:

Die erkennbaren Partikel sind sehr viel größer als die zuvor mikroskopierten zerriebenen Pollen. Dies wird bei einem Größenvergleich der Pollen, Bild 1, mit den Partikeln auf den Bildern 2-4 deutlich. Es ist keine Zitterbewegung bei den ganzen Pollen zu erkennen.

Auswertung:

In einigen ungenauen Versuchsanleitungen aus Internetquellen oder Schulbüchern liest man mitunter von Pflanzenpollen die mikroskopiert werden sollen, was dazu verleiten kann, ganze Pollen unter dem Mikroskop zu betrachten. Die Partikel sind dann, wie in diesem Versuch gesehen, viel größer als die zuerst im Mörser fein

zerriebenen Pollenkörner. Bei großen Bruchstücken oder ganzen Pollen ist keine Brownsche Bewegung erkennbar. Diese wird am besten sichtbar, wenn die zu betrachtende Probe im Mörser zuerst fein zerrieben wird. Dadurch entstehen viele kleinste Partikel bei denen die charakteristische Bewegung sichtbar wird.

Aus diesem Versuch lässt sich schließen, dass die Partikelgröße ein entscheidender Faktor bei der Brownschen Bewegung ist. Wie man schon in Versuch 1 erkennen konnte, ist die Bewegung umso deutlicher und schneller je kleiner die Partikel in einer Probe sind. Brown schreibt in seinen Beobachtungen eine Bewegung bei Partikeln von einer Größe von ungefähr $13\mu\text{m}$ gesehen zu haben [3, S.481].

Was verursacht die Zitterbewegung bei Pollenbruchstücken? Wie lässt sich das Phänomen erklären?

Bis jetzt haben wir uns frische Pollen, also organisches Material von Lebewesen, angeschaut. Dort setzt auch Browns erste Überlegung zur Erklärung des Phänomens an, als er vorschlägt, dass es sich bei seinen Beobachtungen um die Eigenbewegung von Kleinstlebewesen handelt. SchülerInnen stellen ebenfalls häufig diese Hypothese auf, wenn man sie nach einer möglichen Erklärung für die Ursache der Brownschen Bewegung fragt. Diese Hypothese lässt sich im Unterricht schnell und einfach überprüfen, indem man statt „lebendem“ Material als nächstes „totes“ Material, wie zum Beispiel Aktivkohle oder Glas zerreibt und mikroskopiert. Brown ging seiner Zeit genauso vor: *„Nachdem ich bei den Partikeln des Pollens aller von mir untersuchten lebenden Pflanzen eine Bewegung beobachtet hatte, wurde ich zunächst zu der Untersuchung geführt, ob dieselbe auch nach dem Tode der Pflanzen fortbestände, und auf wie lange (...). Ich hoffte daher, diese Partikel in allen organischen Körpern zu finden, und untersuchte daher eine Menge animalischer und vegetabilischer Gewebe.“* [5, S. 299]

Versuch 2: Untersuchung verschiedener Stoffe auf die Brownsche Bewegung

Geräte und Chemikalien:

Mörser, Pistill, Mikroskop mit einer bis zu 400-fachen Vergrößerung (hier wurde das Motic BA210 verwendet), Mikroskopkamera oder Smartphone mit Kamera, gegebenenfalls Stativmaterial, Objektträger, Deckglas, Becherglas, Wasser,

Einwegpipette, Spatel, Aktivkohle, Glas (Deckglas)

Durchführung:

Eine Spatelspitze Aktivkohle oder ein Deckglas wird im Mörser mit 1ml Wasser fein verrieben. Mit einer Einwegpipette werden 2-3 Tropfen der Suspension auf einen Objektträger gegeben und mit einem Deckgläschen blasenfrei abgedeckt. Dann mikroskopiert man bei 400facher Vergrößerung und geringer Beleuchtungsstärke. Durch die Mikroskopkamera oder die mit Stativmaterial vor dem Okular befestigte Kamera des Smartphones kann die Probe nun beobachtet und gegebenenfalls aufgezeichnet werden.

Beobachtung:

Sowohl bei der Aktivkohle als auch beim Glas lässt sich eine deutliche Zitterbewegung der kleinen Partikel erkennen. Die Art der Bewegung entspricht der in Versuch 1 bei den Pollenbruchstücken beobachteten regellosen Zitterbewegung. Einige der größeren Partikel zeigen keine Bewegung.

Auswertung:

Da die regellose Zitterbewegung genauso wie bei den zuvor betrachteten Pollenbruchstücken in Versuch 1 auch hier erkennbar war kann man sagen, dass das Phänomen nicht nur bei „lebendem“ Material, sondern auch bei „toter“ Material wie Aktivkohle oder industriell gefertigtem Glas beobachtbar ist. Damit lässt sich ausschließen, dass es sich um die Eigenbewegung von Kleinstlebewesen oder die dem organischen Material innewohnende „Lebenskraft“ handelt. Die Ursache der beobachteten Bewegung ist also nicht biologischer Natur.

Die nächste naheliegende Hypothese für die Brownsche Bewegung ist die, dass die Bewegung der kleinen Partikel durch Erschütterungen am Mikroskop entsteht. Dies lässt sich ebenfalls einfach nachprüfen indem man während dem Mikroskopieren äußere Erschütterungen am Mikroskop produziert und die Bewegung der Partikel weiterhin beobachtet.

Versuch 3: Einfluss von Erschütterungen auf die Zitterbewegung

Geräte und Chemikalien:

Es können dieselben Materialien und Proben (Aktivkohle oder Glas) wie in Versuch 2 verwendet werden. Besonders gute Ergebnisse erzielt man mit Fetttropfchen aus Sahne oder Milch wie in Versuch 5 beschrieben wird.

Durchführung:

Während der Betrachtung der Brownschen Bewegung der kleinen Partikel produziert man selbst Erschütterungen am Mikroskop und beobachtet die dadurch entstehenden Bewegungen.

Beobachtung:

Die Bewegung, die man während der Erschütterung beobachten kann, unterscheidet sich deutlich von der charakteristischen Brownschen Bewegung. Bei einer Erschütterung bewegen sich alle Partikel gleichförmig. Besonders während der ruhigen Phase zwischen zwei verursachten Erschütterungen kann man gut erkennen, wie bei der Brownschen Bewegung die kleinen Partikel unabhängig voneinander ihre eigene regellose Bewegung ausführen ganz im Gegensatz zu der Art der Bewegung bei Erschütterungen.

Auswertung:

Die Bewegung der Partikel während der Erschütterung war unterschiedlich zu dem was man als Brownsche Bewegung im erschütterungsfreien Zustand wie in den Versuchen 1 und 2 beobachten kann. Demnach lassen sich äußere Erschütterungen ebenfalls als Ursache und mögliche Erklärung der Bewegung ausschließen.

Eine weitere Hypothese macht Strömungseffekte durch die Verdunstung des Wassers für die Bewegung der kleinen Partikel verantwortlich. Um diese Idee zu überprüfen kann man die Verdunstung unterbinden indem man die Probe der in Wasser suspendierten Partikel abdichtet. Marian van Smoluchowski schreibt dazu: „*Man mag die Flüssigkeit mit einem Deckgläschen [luftdicht] bedecken, um die Verdampfung zu verhindern.*“ [6, S. 4].

Versuch 4: Untersuchung von Strömungseffekten durch Verdunstung von Wasser als Ursache für die Brownsche Bewegung

Geräte und Chemikalien:

Mörser, Pistill, Mikroskop mit einer bis zu 400-fachen Vergrößerung (hier wurde das Motic BA210 verwendet), Mikroskopkamera oder Smartphone mit Kamera, gegebenenfalls Stativmaterial, Objektträger (idealerweise mit Vertiefung), Deckglas, Becherglas, Wasser, Einwegpipette, Spatel, Kleber, Glas (Deckglas)

Durchführung:

Ein Deckglas wird im Mörser mit 1ml Wasser fein verrieben. Mit einer Einwegpipette werden 2-3 Tropfen der Suspension auf einen Objektträger gegeben. Der Rand des Deckgläschens wird nun mit dem Kleber versehen und vorsichtig auf den Objektträger zum Trocknen gelegt. Überschüssiges Wasser lässt sich mit einem Taschentuch absaugen. Nach dem Trocknen wird mit 400facher Vergrößerung und geringer Beleuchtungsstärke mikroskopiert. Durch die Mikroskopkamera oder die mit Stativmaterial vor dem Okular befestigte Kamera des Smartphones kann die Probe nun beobachtet und gegebenenfalls aufgezeichnet werden.

Beobachtung:

Es lässt sich eine deutliche Zitterbewegung der kleineren Partikel erkennen. Die Art der Bewegung entspricht der zuvor bei Versuch 1 und 2 beobachteten regellosen Zitterbewegung wie sie charakteristisch ist für die Brownsche Bewegung.

Auswertung:

Trotz der unterbundenen Verdunstung von Wasser und der dadurch ebenfalls unterbundenen Strömungseffekte durch Verdunstung ist die typische Brownsche Bewegung auch bei dieser Versuchsvariante zu erkennen. Dass die Verdunstung des Wassers wirklich unterbunden ist und die Probe abgedichtet ist, erkennt man leicht,

wenn auch nach mehreren Stunden noch Wasser unter dem Deckglas ist. Demnach lassen sich Strömungseffekte durch Verdunstung als Erklärung ebenfalls ausschließen.

Um das Deckgläschen dicht und flach auf den Objektträger aufzukleben ist etwas Fingerspitzengefühl nötig. Eine Strömung wäre außerdem gerichtet was man nachstellen kann, indem man zum Beispiel beim folgenden Versuch 5 etwas Wasser am Rand des Deckgläschens mit einem Papiertuch weg saugt. Dadurch entsteht eine Strömung des Wassers die wir anhand der Bewegung Partikel, in dem Versuch der Fetttröpfchen, beobachten können. Die Art der Bewegung der Partikel sieht hierbei anders aus als in den Versuchen 1 und 2 beobachtbar.

Genauso wie bei zerriebenen Feststoffen kann man die Brownsche Bewegung auch bei in Wasser suspendierten Fetttröpfchen erkennen. Diese Variante eignet sich besonders gut, da sie einfach durchzuführen ist und sehr gute Ergebnisse erzielt.

Versuch 5: Brownsche Bewegung bei Fetttröpfchen in Wasser

Geräte und Chemikalien:

Mikroskop mit einer bis zu 400-fachen Vergrößerung (hier wurde das Motic BA210 verwendet), Mikroskopkamera oder Smartphone mit Kamera, gegebenenfalls Stativmaterial, Objektträger, Deckglas, Wasser, Einwegpipette, Schnappdeckelglas, Sahne

Durchführung:

Es werden 1ml Sahne im Schnappdeckelglas mit 5ml Wasser geschüttelt. Mit einer Einwegpipette werden 2-3 Tropfen der Suspension auf einen Objektträger gegeben und mit einem Deckglas blasenfrei abgedeckt. Dann wird mit 400facher Vergrößerung und geringer Beleuchtungsstärke mikroskopiert. Durch die Mikroskopkamera oder die mit Stativmaterial vor dem Okular befestigte Kamera des Smartphones kann die Probe nun beobachtet und gegebenenfalls aufgezeichnet werden.

Beobachtung:

Bei den viele kleinen in Wasser suspendierten Fetttröpfchen aus der Sahne kann, genauso wie zuvor bei den Versuchen 1 und 2, eine Bewegung der kleinen Tröpfchen entsprechend der Brownschen Bewegung beobachtet werden. Die Fetttröpfchen sind

zahlreich, gleichmäßig und klein in ihrer Gestalt und eignen sich daher ausgezeichnet für Beobachtungen zur Brownschen Bewegung.

Auswertung: Dieser Versuch zeigt, dass die Brownsche Bewegung nicht nur bei feinen Partikeln zerriebener Feststoffe zu beobachten ist, sondern auch bei Fetttropfen welche in Wasser suspendiert sind.

Erklärung des Phänomens der Brownschen Bewegung

Wie kommt es nun zur Brownschen Bewegung und was sehen wir, wenn wir unter dem Mikroskop die kleinen, zitternden Partikel betrachten?

Als Robert Brown die zitternde Bewegung der kleinen Partikel erstmals im Jahre 1827 unter seinem Mikroskop bei Pollenbruchstücken beobachtete, gab es noch keine Erklärung für dieses Phänomen. Er selbst unternahm in den darauffolgenden Jahren mehrere Versuche mit dem Ziel das Rätsel hinter der später nach ihm benannten Brownschen Bewegung endlich zu lösen und eine gültige Erklärung für die Ursache der Zitterbewegung zu finden. Einige seiner Hypothesen, wie die Annahme es handelt sich um eine den Pollenkörnern innewohnende „Lebenskraft“, musste Brown kurze Zeit später wieder revidieren, nachdem er die Bewegung bei Staubkörnern und anderen kleinsten Partikeln unbelebter Materie ebenfalls beobachten konnte [8, S.2]. Die Ursache der Bewegung ist also physikalischer und nicht biologischer Natur.

Die Diskussionen, ob Materie aus Atomen und Molekülen besteht, dauerten noch bis zum Jahr 1905 an: Da veröffentlichte der theoretische Physiker Albert Einstein (1879 - 1955) seine Arbeit mit dem Titel *Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen* [9] und festigte damit die Vorstellung des molekularen Aufbaus von Körpern. Die Teilchen, auf die Einstein sich hier bezieht, sind jene, die Brown fast 80 Jahre zuvor erstmals in *A Brief Account of Microscopical Observations made in the Months of June, July, and August, 1827, on the Particles contained in the Pollen of Plants; and on the General Existence of Active Molecules in Organic and Inorganic Bodies* [3] beschrieben hat. Seine Arbeit beginnt Einstein mit den Worten: *"In dieser Arbeit soll gezeigt werden, dass nach der molekularkinetischen Theorie der Wärme in Flüssigkeiten suspendierte Körper von mikroskopisch sichtbarer Größe infolge der*

Molekularbewegung der Wärme Bewegungen von solcher Größe ausführen müssen, dass diese Bewegungen leicht mit dem Mikroskop nachgewiesen werden können" [9,S.549].

Weitere wichtige theoretische und experimentelle Beiträge zur Erklärung der Brownschen Bewegung erarbeiteten der polnische Physiker Marian von Smoluchowski (1872 - 1917) und der französische Physiker Jean Baptiste Perrin (1870 – 1942). Perrin wurde 1926 für seine Leistung zur diskontinuierlichen Struktur der Materie mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet. Durch die herausragende Arbeit der drei Physiker konnte nicht nur das Phänomen der Brownschen Bewegung endlich erklärt werden, sondern auch die Vorstellung eines diskontinuierlichen, also atomaren Aufbaus der Materie erlebte einen Durchbruch und regte zu einem radikalen Umdenken in den Naturwissenschaften an.

Generell ist die charakteristische regellose, schwankende, andauernde, ungeordnete oder auch zitternde Bewegung bei allen kleinen mikroskopischen und amikroskopischen Partikeln, wie zum Beispiel auch Staub- oder Rauchpartikeln sowie Zellfragmenten, die von einem Gas umgeben oder in einer Flüssigkeit suspendiert sind, möglich zu beobachten.

Bei der Brownschen Bewegung hält die thermische Energie der Flüssigkeitsmoleküle die Wassermoleküle ständig in Bewegung [10]. Dies führt zu Zusammenstößen dieser kleinen Moleküle mit den schwereren suspendierten Partikeln. Die Partikel die in den vorangegangenen Versuchen zur Brownschen Bewegung in Wasser suspendiert wurden, stammen von zerriebenem Glas, Aktivkohle oder Pollen oder sind Fetttropfchen aus der Sahne beziehungsweise Milch. Werden diese Partikel nun von den Wassermolekülen angestoßen, so kommt es zu Impulsüberträgen. Dabei gleichen sich die momentanen, lokalen Impulsüberträge nicht genau aus, wodurch die suspendierten Partikel die charakteristische Brownsche Bewegung ausführen. Die Lösungsmittelteilchen geben Stöße aus allen verschiedenen Richtungen auf die Partikel ab. Es ist folglich keine gerichtete Bewegung, sondern eine regellose Bewegung zu erkennen.

Es wird eine Verschiebung der Partikel in Form einer Zickzackbewegung sichtbar, genau wie Brown sie schon im Jahr 1827 beschrieb. Zeichnet man die Bahn eines in Wasser suspendierten Partikels nach, so entsteht folgende Skizze:

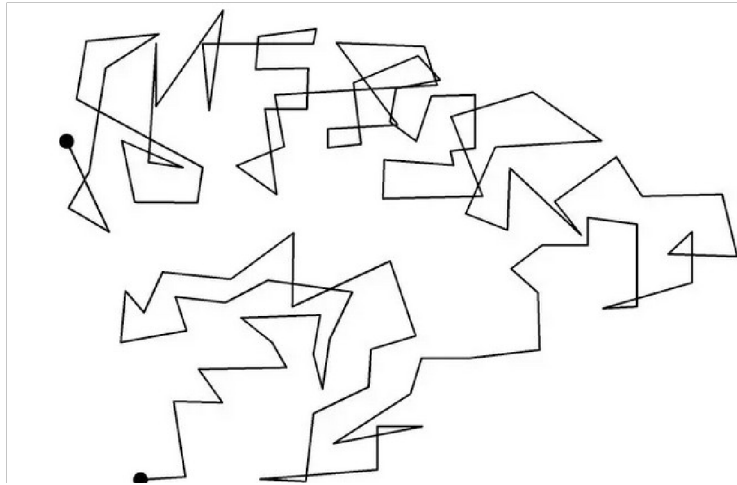


Abb. 2: Bahn eines in Wasser suspendierten Teilchens

Je wärmer das Wasser, desto schneller bewegen sich auch die Wassermoleküle und desto heftiger sind die Zusammenstöße mit den suspendierten Partikeln. Die sichtbare Bewegung dieser ist resultierend daraus schneller und heftiger. Andererseits ist die sichtbare Bewegung der Partikel umso geringer, je kälter das Wasser ist. Abgesehen von einer niedrigeren Temperatur bedingen auch ein größerer Radius der Partikel sowie eine höhere Viskosität der Flüssigkeit eine langsamere Bewegung der unter dem Mikroskop sichtbaren Partikel [11].

Die Bewegung der Partikel, eine beobachtbare Größe, gibt indirekt also Aufschluss über die thermische Bewegung, eine unbeobachtete Eigenschaft, der stoßenden Wassermoleküle, welche selbst wegen ihrer Kleinheit auch unter dem Mikroskop unsichtbar sind. Unter dem Mikroskop lässt sich bei hinreichender Partikelgröße einzig die Bewegung der Partikel beobachten, die durch die Eigenbewegung, und dadurch entstehenden Stöße der nicht sichtbaren Wassermoleküle, verursacht wird. Aus welchem Stoff die Partikel dabei stammen ist nicht relevant [12].

Die Brownsche Bewegung wird als Bestätigung für eine ständige ungerichtete Bewegung der Teilchen eines Stoffes angesehen. Sie lässt sich als Ursache der Diffusion und dem damit verbundenen Ausgleich der Konzentrationen zweier Lösungen verschiedener Konzentration feststellen [13].

Literaturverzeichnis

- [1] Robert Brown (botanist, born 1773): [https://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Brown_\(botanist,_born_1773\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Brown_(botanist,_born_1773)) (27.07.2022)
- [2] Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "Robert Brown". *Encyclopedia Britannica*: <https://www.britannica.com/biography/Robert-Brown-Scottish-botanist> (10.08.2022)
- [3] R. BROWN: A brief account of microscopical observations made in the months of June, July & August, 1827, on the particles contained in the pollen of the plants; and on the general existence of active molecules in organic and inorganic bodies. <https://sciweb.nybg.org/science2/pdfs/dws/Brownian.pdf> (10.07.2022)
- [4] P. Van der der Pas, The Discovery of the Brownian Motion: <https://dspace.library.uu.nl/handle/1874/293495> (04.08.2022)
- [5] R. BROWN: Mikroskopische Beobachtungen über die im Pollen der Pflanzen enthaltenen Partikeln, und über das allgemeine Vorkommen activer Molecüle in organischen und unorganischen Körpern. - Ann. d. Phys. u. Chem. 14 (1828) 294313.
- [6] M. VON SMOLUCHOWSKI: Zur kinetischen Theorie der Brownschen Molekularbewegung und der Suspensionen. – in Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften Band 199 Reprint der Bände 199 und 207, Frankfurt: Harri Deutsch 1997.
- [7] Experiment Brownian Motion, Collection of Physics Experiments: <http://physicsexperiments.eu/1944/brownian-motion> (27.07.2022)
- [8] Brownsche Bewegung, TU Dresden, Physik: <https://tu-dresden.de/mn/physik/ressourcen/dateien/studium/lehrveranstaltungen/praktika/pdf/BB.pdf?lang=de>
- [9] Einstein, A.: Über die von molekularkinteischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung vonin ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/andp.19053220806> (05.08.2022)

- [10] Spektrum der Wissenschaft, Brownsche Bewegung nicht immer vorschriftsmäßig <https://www.spektrum.de/news/brownsche-bewegung-nicht-immervorschriftsmaessig/1002883> (08.08.2022)
- [11] Spektrum der Wissenschaft, Einstein der Revolutionär und die Pollen: <https://www.spektrum.de/kolumne/einstein-der-revolutionaer-und-die-pollen/1546213> (05.08.2022)
- [12] Spektrum der Wissenschaft, Brownsche Bewegung, Lexikon der Physik: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/brownsche-bewegung/2040> (05.08.2022)
- [13] Spektrum der Wissenschaft, Brownsche Bewegung, Lexikon der Chemie: <https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/brownsche-bewegung/1375> (08.08.2022)