

■ Brownsche Bewegung in Farbe

Präzisionsmessungen mithilfe optischer Fallen an einzelnen Kolloiden weisen Korrelationen in den thermischen Kräften erstmals direkt nach.

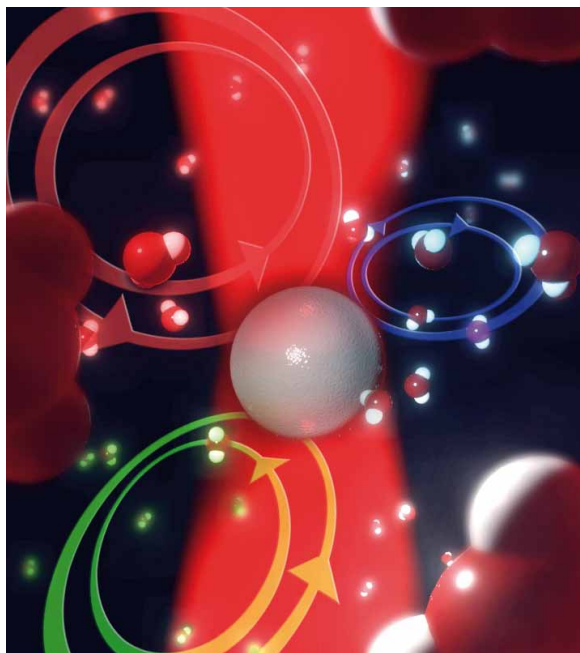
Der Botaniker Robert Brown entdeckte 1827 das irreguläre Zappeln von in Wasser gelösten kleinsten Samenkörnern unter dem Lichtmikroskop. Er konnte nicht ahnen, dass seinen Beobachtungen eine Schlüsselrolle in einer Revolution der Physik Anfang des 20. Jahrhunderts zukommen würde. Heute stellt die nach ihm benannte Brownsche Bewegung eine der Säulen der theoretischen Physik dar. Die Anwendungen reichen von astrophysikalischen Fragen bis hin zu biologischen Prozessen [1, 2].

In seiner Doktorarbeit formulierte Einstein 1905 eine molekular-kinetische Interpretation der Brownschen Bewegung und stellte einen Zusammenhang zwischen der Diffusionskonstanten D des Partikels und der Viskosität η der umgebenden Flüssigkeit her [3]:

$$D = (k_B T) / (6 \pi \eta R),$$

wobei R den Teilchenradius bezeichnet und T die Temperatur der Flüssigkeit. Dieser Zusammenhang ist heute als Stokes-Einstein-(Smoluchowski)-Relation bekannt. Entscheidend daran ist das Auftreten der Boltzmann-Konstanten k_B , die Planck erst im Jahr 1900 im Zusammenhang mit der Schwarzkörperstrahlung eingeführt hatte.

Einsteins Arbeit und die parallel dazu entwickelte Beschreibung von Marian von Smoluchowski eröffnete völlig neue Perspektiven, verband sie doch die Welt der deterministischen Antwort auf äußere Störungen (hier die Stokes-Reibung) mit der Welt der stochastischen Fluktuationen, vermittelt durch die universelle Naturkonstante k_B . Die Relation ist von ähnlicher Qualität wie der fundamentale Zusammenhang zwischen Energie und Frequenz $E = h \nu$ in der Quantenmechanik (an der Einstein ebenfalls maßgeblich beteiligt war), der die klassischen Gebiete der Punktmechanik mit der Theorie der Wellen verbindet. Die Stokes-Einstein-Relation ist in der Tat eine



Christoph Hohmann

Abb. 1 Ein Teilchen in einer optischen Falle erzeugt Wirbelanregungen, die in die umgebende Flüssigkeit abgestrahlt und dort unterschiedlich stark gedämpft werden [8].

erste Formulierung des allgemeiner gültigen Fluktuations-Dissipations-Theorems [4].

Als direkte Anwendung schlug Einstein eine genaue Bestimmung der Avogadro-Konstanten vor. Dies gelang Jean Perrin und seinen Studenten eindrucksvoll in mühsamer Kleinstarbeit durch das Vermessen einzelner Teilchenbahnen (Nobelpreis 1926).

Diffusion mit Gedächtnis

Hundert Jahre nach diesen Pionierexperimenten haben nun mehrere Gruppen die Brownsche Bewegung genauer unter die Lupe genommen. Die experimentellen Anordnungen bestehen schlicht darin, ein einzelnes Kolloidteilchen in einer optischen Falle festzuhalten und seine Fluktuationen zu beobachten – ganz im Sinne Einsteins. Erst nach langjährigen Forschungsarbeiten gelang es, einen Versuchsaufbau zu konzipieren, der lange Beobachtungszeiten ermöglicht und mittels ultrasensitiver Detektoren zudem Ortsauflösungen unterhalb der Nanometerskala und eine Zeitauflösung bis zu 20 Nanosekunden.

Damit ließ sich 2005 erstmals direkt beobachten [5], dass sich der Bereich diffusiver Teilchenbewe-

gung viel langsamer einstellt, als dies eine einfache Beschreibung durch eine Langevin-Gleichung nahelegt [4]. Die ursprüngliche Formulierung von Langevin nimmt an, dass die Reibungskraft direkt proportional zur Teilchengeschwindigkeit ist ($F = 6\pi\eta R v$), d. h. die Kraft nur von der aktuellen Geschwindigkeit abhängt. Tatsächlich aber ergeben sich aus der Kopplung der Teilchenbewegung an die langsame Diffusion von Wirbeln in der umgebenden Flüssigkeit persistente Gedächtniseffekte. Diese bewirken, dass die Kraft von der kompletten Vorgeschichte der Teilchenbewegung abhängt (*hydrodynamic memory*) und die Teilchengeschwindigkeit sich an die Bewegung zu früheren Zeiten „erinnert“. Dieses Gedächtnis äußert sich in der Geschwindigkeitsautokorrelation als eine Langzeitanomalie proportional zu $t^{-3/2}$. Obwohl diese Anomalien bereits seit einiger Zeit als „Alder-Tails“ aus Computersimulationen zu Flüssigkeiten bekannt sind, gelang es erst mit einem eigens entwickelten Versuchsaufbau, sie experimentell zu beobachten [6]. Für sehr kurze Zeiten spielt hingegen Reibung keine Rolle. In diesem Zeitfenster erwartet man einen

Übergang zu einer ballistischen Teilchenbewegung, die sich kürzlich mittels spezieller Detektoren erstmalig experimentell studieren ließ [7].

Überträgt man die gleichen physikalischen Überlegungen für die Zitterbewegung des Teilchens in den Frequenzraum, sollte auch die auf das Teilchen wirkende Reibung von der Frequenz abhängen. Dies geht im Wesentlichen mit der Anregung von Wirbeln (Schervortizes) in der Flüssigkeit einher, die das Brownsche Teilchen „abstrahlt“ (Abb. 1). Aufgrund der kleinen Reynolds-Zahl entstehen die Wirbel im laminaren Regime und zeigen ein dipolartiges Strömungsprofil. Je höher die Frequenz dieser Vortizes ist, desto stärker dämpft die Viskosität sie, sodass die Reibung mit steigender Frequenz wächst. Das Fluktuations-Dissipations-Theorem besagt dann, dass auch das Spektrum der thermischen Kräfte diese Frequenzabhängigkeit widerspiegeln sollte [4]. Mit anderen Worten: Das Rauschen bleibt nicht mehr weiß, gemäß der einfachen Beschreibung nach Langevin, sondern wird farbig.

Rauschen in der Falle

Eine Kollaboration aus Erlangen und Lausanne konnte nun zeigen, dass sich starke optische Fallen eignen, um die Farbe des Rauschens direkt sichtbar zu machen [8]. Die experimentelle Herausforderung bestand darin, geeignete Materialien für das Teilchen mit einer dazu kompatiblen niedrig viskosen Flüssigkeit zu finden, damit der Laser das Teilchen hinreichend gut lokalisiert, die umgebende Flüssigkeit aber nicht zu stark heizt. Den Forschern ist beides auf ein-drucksvolle Weise gelungen, ohne dabei Genauigkeit und Stabilität der Messung einzubüßen. Eine überraschende Folge des farbigen Rauschens ist eine Resonanz, also ein Maximum im Fluktuationsspektrum der Zitterbewegung der Teilchenposition – ganz im Gegensatz zu der durch Reibungseffekte dominierten überdämpften Dynamik aus der einfachen Langevin-Beschreibung. Dieser überdämpfte

Grenzfall stellt sich jedoch aufgrund der Diffusion von Wirbeln nie ein. Vielmehr überschwingt das Teilchen in der Falle, um sich anschließend langsam seiner Gleichgewichtslage anzunähern. In Rechnungen und Computersimulationen zeigen die Autoren darüber hinaus, dass eine periodische Modulation der Fallenstärke die Resonanz sogar verstärken kann. Dieses Phänomen der parametrischen Resonanz ist Kindern beim Schaukeln gut bekannt: Moduliert wird dort die Pendellänge, welche die Eigenfrequenz der Schwingung bestimmt.

Dieses farbige Rauschen besitzt großes Potenzial für Anwendungen, unter anderem eröffnet sich die Möglichkeit, den aus Kolloid, Flüssigkeit und Falle bestehenden Resonator zu einem ultrasensitiven Detektor für biophysikalische Methoden zu entwickeln. Typische Anwendungen sind die Mikrorheologie, in der es gilt, viskoelastische Eigenschaften eines komplexen biologischen Materials, beispielsweise Lösungen aus Filamenten des Zytoskeletts, frequenzabhängig zu vermessen. Besonders vielversprechend scheint darüber hinaus, das Teilchen zu funktionalisieren, um damit das Andocken von Proteinen zu ermöglichen, was die beobachtbare Resonanz verschieben würde [8].

Erwin Frey

- [1] P. Hänggi und F. Marchesoni, *Chaos* **15**, 026101 (2005)
- [2] E. Frey und K. Kroy, *Annalen der Physik* **14**, 20 (2005)
- [3] A. Einstein, *Annalen der Physik* **322**, 549 (1905)
- [4] R. Kubo, M. Toda und N. Hashitsume, *Statistical Physics II, Nonequilibrium Statistical Mechanics*, Springer, Berlin und Heidelberg (1991)
- [5] B. Lukic, S. Jeney, C. Tischer, A.J. Kulik, L. Forró und E.-L. Florin, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 160601 (2005)
- [6] S. Jeney, B. Lukic, J.A. Kraus, T. Franosch und L. Forró, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 240604 (2008)
- [7] R. Huang, I. Chavez, K.M. Tautz, B. Lukic, S. Jeney, M.G. Raizen und E.-L. Florin, *Nature Physics* **7**, 576 (2011)
- [8] T. Franosch, M. Grimm, M. Belushkin, F.M. Mor, G. Foffi, L. Forró und S. Jeney, *Nature* **478**, 85 (2011)