

■ Selbstorganisiert und reversibel

Ein Experiment weist einen Phasenübergang für Teilchen in einer gerührten Flüssigkeit nach.

Wer Kaffee mit Milch trinkt, kann einen elementaren irreversiblen Vorgang beobachten: Unterstützt von der turbulenten Bewegung, verteilt sich die Milch gleichmäßig im Kaffee. Auf den umgekehrten Vorgang, bei dem sich die Milch wieder entmischt, wird man allerdings vergeblich warten. In hochviskosen Flüssigkeiten ist das schon anders: Wegen der hohen Reibung entfällt die Turbulenz, und ein „Milchtropfen“ lässt sich verrühren, aber auch wieder „entrühren“ [1].*)

Einen einfachen, aber eindrucksvollen Aufbau zur Demonstration dieses Effekts hat Geoffrey I. Taylor populär gemacht [1, 3]: Die Flüssigkeit (meist Glycerin) befindet sich zwischen zwei konzentrischen Zylindern und wird durch die Rotation des Innenzylinders in Bewegung versetzt (Abb. 1). Ein Farbklecks, der

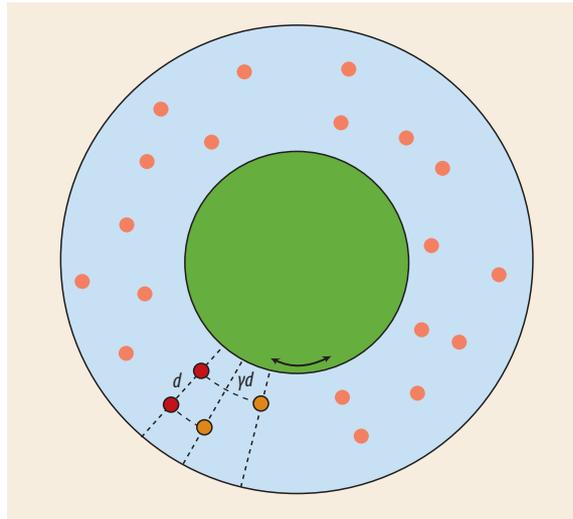


Abb. 1 Zwischen zwei konzentrischen Zylindern befinden sich kleine Kugeln in einer hochviskosen Flüssigkeit. Einige wenige Kugeln sind farblich markiert und lassen sich beobachten. Eine Oszillation des Innenzylinders (grün) versetzt Flüssigkeit und Teilchen in Bewegung. Dabei werden die beiden markierten Teilchen (rote Kreise) im radialen Abstand d unter der Scherung azimuthal um yd versetzt (orange Kreise).

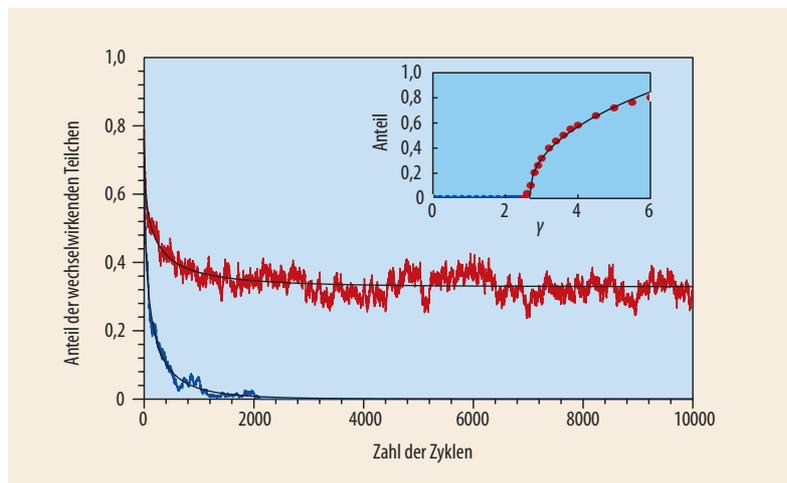
die Milch ersetzt, wird bei Rotation des Innenzylinders erst gestreckt, dann bei Umkehrung der Drehrichtung wieder zusammengeführt. Das Experiment lässt sich über längere Zeit wiederholen, erst nach sehr langer Zeit wird der Klecks auf-

grund der molekularen Diffusion immer verschwommener.

In einer originellen Variante des Versuchsaufbaus von Taylor haben Pine et al. nun die Farbe durch viele $230\ \mu\text{m}$ kleine Mikrokügelchen ersetzt, die etwa 30 Prozent des Flüs-

*) Die Wiederkehr des Tropfens ist ein Beispiel für ein Echo in einem Vielteilchensystem und den bekannten Spin- oder Stromechos ähnlich [2].

Abb. 2 Anteil der wechselwirkenden Teilchen gegenüber der Zahl der Perioden in einer numerischen Simulation: Bei kleiner Scheramplitude γ (blaue Linie und Punkte) organisiert sich das System in einem Zustand nichtwechselwirkender Teilchen mit reversibler Bewegung. Bei größerer Amplitude (rote Linien und Punkte) bleibt ein Bruchteil der Teilchen in Wechselwirkung, die Reversibilität geht verloren. Das Inset zeigt den Bruchteil wechselwirkender Teilchen gegenüber der Scheramplitude und dokumentiert den Phasenübergang bei ca. $\gamma = 2,5$.



sigkeitsvolumens einnehmen [4, 5]. Bei dieser Dichte bleibt genügend Flüssigkeit als Schmierstoff, sodass sich die Teilchen beim Verscheren zwar in Bewegung setzen und sich über die Flüssigkeit auch gegenseitig beeinflussen, aber nicht mit den Oberflächen berühren. Wegen der hohen Viskosität ist die Bewegung der Teilchen überdämpft, und die Brownsche Bewegung wird schwächer, dafür induzieren die Teilchen aber Strömungen, welche die Wechselwirkung verstärken. Man könnte also erwarten, dass einzelne Teilchenbahnen chaotisch, die Dynamik irreversibel und eine Wiederkehr unmöglich werden müsste. Um die Dynamik zu analysieren, beobachtet eine Kamera einige we-

nige farblich markierte Teilchen [3]. Die Bewegung des Zylinders ist so langsam, dass der genaue Zeitablauf keine Rolle spielt, was durch Variation der Periode verifiziert wurde.

Über den mittleren Abstand zwischen den Teilchen kommen eine Länge und damit eine Abhängigkeit von der Scheramplitude ins Spiel. Relevant ist der dimensionslose Parameter γ , die maximale Wegstrecke des Innenzylinders dividiert durch die Spaltbreite: Zwei Teilchen, deren radialer Abstand d beträgt, werden azimuthal um γd auseinander gezogen (**Abb. 1**). Für kleines $\gamma \leq 1$ bewegen sich die Teilchen so wenig, dass Nachbarschaftsbeziehungen erhalten bleiben, für größeres γ werden sie

aufgebrochen. Eine Wechselwirkung (Stoß) zwischen zwei Teilchen wird unterstellt, wenn der Abstand zwischen ihnen unter einen vorgegebenen Wert fällt. Bei den vorgegebenen Dichten sind die Reichweiten und die mittleren Abstände vergleichbar.

Bei einer zufälligen Anfangsverteilung stoßen auch bei kleiner Scheramplitude einige Teilchen zusammen, allerdings in der Regel nur einmalig, da sie dabei versetzt werden und in der nächsten Periode nicht mehr kollidieren. Damit geht die Quasistationarität des Taylor-Experiments verloren. Bei geringer Scheramplitude stellt sich dann nach mehreren Perioden ein Zustand ein, in dem es auch bei

URALTE ÖLGEMÄLDE

Künstler, die auf der legendären Seidenstraße unterwegs waren, haben bereits im 7. Jahrhundert mit Ölfarben auf Höhlenwänden gemalt – rund 800 Jahre vor der vermeintlichen Erfindung dieser Technik in Europa. Zu dieser überraschenden Erkenntnis kam ein internationales Forscherteam, das Proben aus Wandgemälden in der afghanischen Region Bamiyan mithilfe von Synchrotronstrahlung untersucht hat. Die Gemälde befinden sich in Höhlen hinter den Resten der riesigen Buddha-Figuren, welche die Taliban 2001 gesprengt haben. Die Gemälde zeigen Buddhas in zinnberroten Roben zwischen Palmblättern und mythischen Wesen. Durch die Kombination verschiedener Techniken mit hoher Ortsauflösung wie Röntgenfluoreszenz, -absorptionsspektroskopie und -streuung sowie Infrarotspektroskopie gelang es den Forschern, die Zusammensetzung der verschiedenen Farbschichten zu analysieren.



Einige der Schichten enthalten demnach Öle, vermutlich aus Walnüssen oder Mohnsamen. Andere Schichten bestanden aus Naturharzen oder Proteinen, z. B. durch die Verwendung von

Eiern. Zu den nachgewiesenen Pigmenten gehört auch das seit der Antike bekannte Bleiweiß. (SJ) M. Cotte et al., J. Anal. At. Spectrom. (2008), DOI: 10.1039/b801358f

Scherung keine Wechselwirkung zwischen den Teilchen gibt. Alle Teilchen folgen dann der Scherung und kehren in die Ausgangsposition zurück: In diesem selbstorganisierten Zustand ist die Bewegung reversibel.

Bei größerer Scheramplitude finden immer noch Verschiebungen zwischen den Teilchen statt, allerdings können sich nicht alle Teilchen so anordnen, dass sie Stößen aus dem Weg gehen. Die Zahl der miteinander wechselwirkenden Teilchen nimmt zwar mit der Zahl der Perioden ab, fällt aber nicht mehr auf Null (Abb. 2). Beim Überschreiten der kritischen Scheramplitude steigt sie schnell an, und verhält sich damit wie ein Ordnungsparameter bei einem Phasenübergang. In der Nähe des Übergangspunktes beobachtet man ein algebraisches Anwachsen der Zahl wechselwirkender Teilchen und der Relaxationszeit mit Exponenten $\beta = 0,45$ bzw. $\nu = 1,1 \pm 0,3$.

Da die Dynamik des Systems stark überdämpft ist, handelt es sich um einen Phasenübergang in einem dissipativen System. Für diese Systeme gibt es eine umfangreiche Theorie und eigene Universalitätsklassen [6]. Allerdings stimmen die hier beobachteten Exponenten mit keiner bekannten Klasse überein.

Die strukturellen Veränderungen schlagen sich auch in den rheologischen Eigenschaften des Systems nieder: Die in dem selbstorganisiert reversiblen Zustand fehlende Wechselwirkung zwischen den Teilchen führt zu einer deutlich erniedrigten Scherviskosität. Diese Beobachtung zeigt, wie eine strukturelle Selbstorganisation unter wiederholter Belastung die mechanischen Eigenschaften beeinflussen kann und sollte für mikro- und nanostrukturierte Materialien von Bedeutung sein.

Für die Untersuchung von Phasenübergängen in überdämpften Systemen eröffnen die Experimente

neue Realisierungs- und Untersuchungsmöglichkeiten. Mit den Unterschieden zu den etablierten Modellen werfen sie aber auch die Frage nach den definierenden Eigenschaften und den möglichen Universalitätsklassen auf. Zudem ist mit dem Phasenübergang von reversiblen zu irreversiblen Verhalten eine neue Facette in der Dynamik von Vielteilchensystemen entdeckt worden.

Bruno Eckhardt

Prof. Dr. Bruno Eckhardt, Fachbereich Physik, Universität Marburg, Renthof 6, 35032 Marburg

- [1] G. M. Homsy et al, Multi-media Fluid Mechanics CD, Cambridge University Press, Cambridge (2004)
- [2] T. Meier und P. Thomas, Physik Journal, März 2003, S. 53
- [3] Filme finden sich in [1] und zu den neueren Experimenten unter www.physics.nyu.edu/pine/research/hydroreverse.html
- [4] D. J. Pine, J. P. Gollub, J. F. Brady und A. M. Leshansky, Nature **438**, 997 (2005)
- [5] L. Corté, P. M. Chaikin, J. P. Gollub und D. J. Pine, Nature Physics **4**, 420 (2008)
- [6] H. Hinrichsen, Adv. Phys. **7**, 815 (2000)