



**A**ls der berühmte amerikanische Nobelpreissträger Richard Feynman 1988 starb, hinterließ er auf einer Tafel eine kurze Liste mit ungelösten Problemen der Physik. Ein Punkt auf dieser Liste war ein Phänomen, dem wir überall in Natur und Technik begegnen: die Turbulenz. Tatsächlich ist diese wissenschaftlich harte Nuss bis heute nicht richtig geknackt. „Auf Schüler wartet da eine spannende Aufgabe“, sagt Eberhard Bodenschatz augenzwinkernd. Der Direktor am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen forscht selbst schon lange auf dem Gebiet.

wenn wir Milch oder Sahne in den Kaffee gießen. Deshalb rühren wir mit dem Löffel um. Besonders bei Sahne kann man schön beobachten, was folgt: Sie zeichnet erst als heller Faden den großen Wirbel des Löffels nach. Dieser bricht schnell in viele kleinere Wirbel auf, die schließlich verschwinden. Dann ist der Kaffee gleichmäßig milchbraun durchmischt. Ohne Umrühren können wir andere turbulente Strömungen beobachten: Der heißere Kaffee steigt von unten auf, kühlt an der Oberfläche ab und sinkt wieder hinunter. Auch so entsteht langsam eine gleichmäßige Mischung. Der Kaffee demonstriert, dass

## Turbulente Ereignisse – warum Forscher beim Kaffeeumrühren genau hinschauen

Turbulenz ist die ungeordnete Bewegung von **Fluiden** – all jenen Medien, deren Moleküle gegeneinander beweglich sind. Dazu zählen Flüssigkeiten wie Wasser, aber auch Dampf und Gase. In der windigen Wetterküche über unseren Köpfen tobt die gewaltigste Turbulenz der Erde. Noch größere Turbulenz gibt es im Kosmos: In der Sonne rasen wahrscheinlich riesige Wirbel heißen Gases turbulent durcheinander. Ohne Turbulenz könnten nach heutiger wissenschaftlicher Vorstellung auch keine Planeten aus den Staubscheiben um junge Sterne entstehen. Erst Wirbel bringen die feinen Materieteilchen einander so nahe, dass sie zusammenklumpen können. Auf ähnliche Weise, nur in kleinerem Maßstab, lässt atmosphärische Turbulenz aus feinsten Wolkentröpfchen vermutlich größere Regentropfen entstehen. Solche Vorgänge in Natur und Technik untersucht das Team von Eberhard Bodenschatz in ausgefeilten Experimenten.

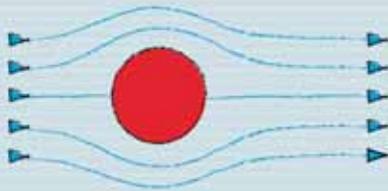
**Turbulenz** hat also eine wichtige Eigenschaft: Sie mischt im wahrsten Sinne des Wortes kräftig auf. Das ist für viele technische Anwendungen entscheidend. In einem Verbrennungsmotor zum Beispiel müssen sich Luft und Treibstoff vor der Zündung möglichst gut mischen, um effizient zu verbrennen. Eine gute Mischung wollen wir auch,

grundsätzlich zwei physikalische Kräfte wirken: Eine Kraft beschleunigt die Flüssigkeit. So bringt das anfängliche Umrühren mit dem Löffel oder das Aufsteigen des heißen Kaffees **Bewegungsenergie** (kinetische Energie) ins Fluid. Dem wirkt eine zweite Kraft entgegen – die **Reibungskraft**. Sie bremst die Bewegung wieder aus und verwandelt deren Energie letztlich in Wärme.

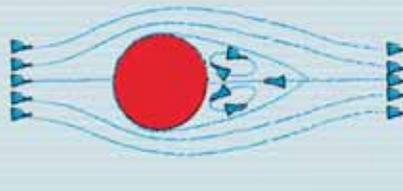
In der turbulenten Strömung passiert jedoch noch mehr. Wie wir am Kaffee beobachten, bleibt der große Wirbel nach dem Umrühren



a)  $Re = 0,01$ :

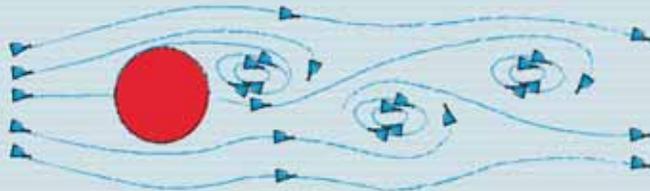


b)  $Re \approx 20$ :



B

c)  $Re \approx 100$ :



d)  $Re \approx 10.000$ :



e)  $Re \approx 1.000.000$ :



Druckgetriebene Strömungen um einen Zylinder verändern bei wachsenden Reynoldszahlen ( $Re$ ) ihren Charakter. Hier steigt von a) nach e) die mittlere Strömungsgeschwindigkeit. Bei niedriger Reynoldszahl (a) ist die Strömung laminar, also schön „glatt“ und wirbelfrei. Bei c) entsteht eine von Kármánsche Wirbelstraße. Mit weiter wachsender Reynoldszahl zerfallen die großen Wirbel zunehmend in kleinere. Bei einer Reynoldszahl von etwa einer Million herrscht voll ausgebildete Turbulenz.

© Grafik: R. Wengenmayr nach Richard Feynman

→ nicht stabil. Er zerfällt schnell in kleinere Wirbel. Diese haben noch so viel Bewegungsenergie, dass sie die Reibung kaum spüren. Sie zerfallen wieder in kleinere Wirbel und so weiter. Würde man mit einem Mikroskop in den Kaffee hineinzoomen, dann könnte man auf immer kleineren Größenskalen ähnliche Wirbel beobachten. Diese Selbstähnlichkeit auf verschiedenen Skalen nennt man **fraktal**. Erst für die kleinsten Wirbel wird die Reibung riesengroß, sie reiben sich im wahrsten Sinne des Wortes auf. Es ist schlussendlich die Reibung zwischen den Molekülen, die die Bewegungsenergie in Wärmeenergie umwandelt.

Die Vorstellung einer solchen Energiekaskade von Wirbel zu Wirbel entstand Anfang des 20. Jahrhunderts. Ab 1941 präzisierete sie vor allem der russische Mathematiker

Arei Nikolajewitsch Kolmogorow. Die Wirbelhierarchie erinnert an eine russische Matrjoschka-Puppe, in der immer kleinere, ähnliche Exemplare stecken. Wirbelt die Natur aber wirklich so ordentlich? „Das ist ein Hilfsmodell“, schränkt Eberhard Bodenschatz ein: „Aber es scheint sehr gut zu funktionieren.“ Jedenfalls besteht eine voll entwickelte Turbulenz aus Wirbeln auf sehr verschiedenen Größenskalen.

Der Kaffee ist ein schönes Beispiel für das Gegenspiel von Bewegung und Reibung in Fluiden. Im 19. Jahrhundert fassten das der Franzose Claude Navier und der Ire George Stokes in eine berühmte Formel. Diese **Navier-Stokes-Gleichung** beschreibt die Bewegung von Fluiden mit innerer Reibung präzise. Die Formel sieht schwierig aus, ist aber aus Sicht der Physik recht einfach.

Leider hat sie einen Schönheitsfehler: Sie ist bis heute nur für physikalisch eher langweilige Spezialfälle exakt gelöst. Ein solcher Fall sind gleichmäßige, „laminare“ Strömungen ohne jegliche Wirbel.

Bodenschatz erläutert, warum die Lösung so schwer fällt: Man kann die Navier-Stokes-Gleichung als Newtonsche Bewegungsgleichung eines winzigen Tröpfchens im Fluid ansehen. Es beschleunigt mit seiner Masse nach der Summe aller Kräfte, die auf das Tröpfchen von außen einwirken. Mit ihm fährt man sozusagen mathematisch wie auf einer Achterbahn mit. Für eine solche rein lokale Betrachtung, wie das in der Physik heißt, wäre die Gleichung gut lösbar. Leider bringen die äußeren Kräfte aber mit dem Druck eine „globale“ physikalische Größe ins Spiel: Er wirkt im Fluid überall zugleich. Man kann sich ihn als Kraft auf ein gedachtes Flächenelement im Fluid vorstellen. Ändert sich der Druck an einer lokalen Stelle, dann teilt sich das im Fluid an jedem anderen Punkt mit. So treibt er Wasser durch Leitungsrohre. Wasser ist wie viele Fluide nicht kompressibel, deshalb wirkt sich eine Druckänderung praktisch sofort überall im Fluid aus. Bei kompressiblen Gasen geschieht das eher verzögert – wie bei einer Luftpumpe, deren Luft noch lange nach dem Zusammendrücken in den Reifen strömt. Doch auch in solchen Fluiden wirkt der Druck global.

### WANN WIRD'S TURBULENT

Diese globalen Änderungen geschehen in Fluiden permanent. Je schneller ein Fluid an einer Stelle strömt, etwa in einem Wirbel, desto stärker sinkt dort der Druck. Je höher der Druck ist, desto mehr Energie speichert das Fluid in sich. Das Fluid verhält sich wie eine Feder: Entspannt es sich, dann verwandelt sich „potenzielle“ Speicherenergie in „kinetische“ Bewegungsenergie – und umgekehrt. Überall dort, wo das Fluid schnell strömt, fällt somit der Druck im Vergleich zu den ruhigeren Stellen ab. Wann aber geht eine schön gleichmäßige Strömung in Turbulenz über?

Diese Frage treibt Wissenschaftler und Ingenieure schon lange um. Sobald nämlich Turbulenz einsetzt, steigt durch die Wirbel die innere Reibung im Fluid. Entsprechend verliert die Strömung an Bewegungsenergie, was zum Beispiel bei Öl oder Erdgas in langen Pipelines viel Pumpenergie frisst. Auch die Aerodynamik von Flugzeugen ver-

meidet möglichst turbulente Wirbel hinter den Tragflächen: Als Luftbremsen treiben diese den Spritverbrauch hoch.

Wann Turbulenz auftritt, hängt vom Fluid ab. Im dünnflüssigen Kaffee sorgt bereits leichtes Umrühren für Turbulenz. Nach dem Herausnehmen des Löffels bleibt das Fluid in Bewegung, weil die Reibung gering ist. Das pure Gegenteil erlebt man, wenn man in weiße Dispersionsfarbe eine andere Farbe einrühren will. Das erfordert nicht nur viel Kraft; sobald man den Rührer loslässt, bleibt das zähe Fluid einfach stehen, weil die Reibung sehr hoch ist. Die Reibung in Fluiden heißt **Viskosität**. Eine hohe Viskosität bremsst somit Bewegung und damit Turbulenz aus.

Diesen Zusammenhang erforschte schon vor 130 Jahren der englische Physiker Osborne Reynolds. Er untersuchte die Strömung von Fluiden in Rohren. Dabei interessierte ihn, wann die Strömung vom laminaren Zustand ohne Wirbel in einen turbulenten Zustand übergeht (**Abb. B**). Nach ihm ist eine fundamentale, dimensionslose Zahl benannt, die **Reynoldszahl**. Fluide mit gleicher Reynoldszahl haben gleiche Eigenschaften, sie sind „hydrodynamisch ähnlich“. Die Reynoldszahl ist umgekehrt proportional zur Viskosität und proportional zur mittleren Strömungsgeschwindigkeit. Das heißt, dass der nieder-

viskose Kaffee sich bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten so verhält wie die hochviskose Dispersionsfarbe bei hohen Geschwindigkeiten. Beim Kaffee setzt also die Turbulenz bei ein bisschen Rühren ein; in der Farbe müsste man dafür extrem stark rühren. Allgemein gilt: Volle Turbulenz bildet sich bei sehr hohen Reynoldszahlen von etwa einer Million aus.

### WIE WOLKENTRÖPFCHEN WACHSEN

Die Reynoldszahl funktioniert wie ein Übersetzungsgetriebe. Dank ihr können Ingenieure verkleinerte Flugzeugmodelle im Windkanal testen. Dazu müssen sie die Strömungsverhältnisse so einstellen, dass die Reynoldszahl derjenigen beim Flug des großen Flugzeugs gleicht. Diese Zahl ist zudem proportional zur Dichte des Fluids, also dessen Masse pro Volumeneinheit. Das nutzen die Göttinger Max-Planck-Forscher aus, um die Rolle der Turbulenz bei der Entstehung von Wolken- und Regentropfchen zu erforschen. Sie haben dafür einen ringförmigen Windkanal konstruiert (**Abb. C**). Diesen füllen sie mit dem schweren Gas Schwefelhexafluorid, das sie unter bis zu 15-fachen Atmosphärendruck setzen. Damit können sie die Turbulenz in einer Wolke, deren Wirbel Hunderte von Metern groß sein können, in einen Labormaßstab von etwa einem halben Meter verkleinern. Ein Gitter mit ansteuerbaren Lamellen produziert genau definierte Turbulenzverhältnisse. Im Rohr des Windkanals befindet sich ein Schlitten, der mit dem Gasstrom gleich schnell mitfährt. So können die auf ihn

montierten Hochgeschwindigkeitskameras die gegeneinander wirbelnden Bewegungen der „Wolkentröpfchen“ präzise aufzeichnen.

Eberhard Bodenschatz interessiert, wie oft in der Turbulenz schwerere und leichtere Tröpfchen miteinander kollidieren. Seine Vorstellung: Schwerere Tröpfchen fliegen in Wirbeln wegen der Fliehkraft leichter aus der „Kurve“, während leichtere Tröpfchen eher mitkommen. Dieses unterschiedliche Verhalten führt dazu, dass die unterschiedlichen Wege der leichteren und schwereren Tröpfchen sich öfter kreuzen als in ruhiger Luft. Sie kollidieren häufiger und formen mehr größere Tropfen.

Bis heute ist das Rätsel um den Niederschlag nicht völlig gelüftet. Deshalb sind die Computermodelle für Wettervorhersagen und Klimaprognosen in diesem wichtigen Punkt leider noch etwas ungenau. Bodenschatz ist sich sicher, dass die Turbulenz ein entscheidender Schlüssel zur Lösung des Rätsels ist. Die Göttinger lassen deshalb ihre Hochgeschwindigkeitskameras und Messgeräte nicht nur im Windkanal Schlitten fahren, sondern demnächst auch auf der Zugspitze. Dort wollen sie das turbulente Innenleben echter Wolken unter die Lupe nehmen.

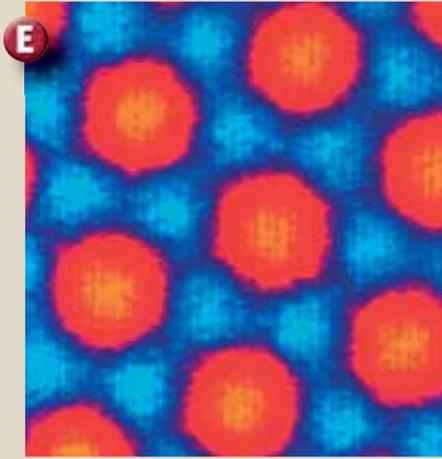
In Wolken herrscht aber nicht nur voll ausgeprägte Turbulenz. Die komplexe Atmosphäre zeigt auch ein interessantes Verhalten von Strömungen, die noch nicht turbulent sind. Bodenschatz zeigt eine Satellitenaufnahme (**Abb. D**): Auf der vom Wind abgewandten Seite hinter einer Insel ist eine Kette gleichmäßiger Wolkenwirbel zu sehen. Einem linksdrehenden Wirbel folgt ein rechtsdrehender, dann wieder ein linksdrehender und so weiter. Das berühmte Muster heißt **von Kármán'sche Wirbelstraße**, benannt nach dem ungarisch-deutsch-amerikanischen Pionier der Aerodynamik. Tatsächlich entsteht dieses Muster in allen Fluiden vor dem Übergang zur echten Turbulenz, deren Strömungen von Druckunterschieden angetrieben werden. Beim Wind sind das die Hoch- und Tiefdruckgebiete, in Pipelines die Pumpen.

Es gibt aber in Natur und Technik noch einen zweiten Strömungsmotor, den wir beim Kaffee ohne Umrühren in Aktion sehen: Temperaturunterschiede. Erhitzt man Öl in einer Pfanne, dann kann man das Aufsteigen des heißen Öls beobachten. Es erhitzt sich am Boden und dehnt sich aus. Damit wird es spezifisch leichter als die kühleren Fluid- →

▼ Der Göttinger Hochdruck-Windkanal ermöglicht es, die Bahnen einzelner Teilchen in extrem starken Turbulenzen zu untersuchen.



© Max-Planck-Gesellschaft/Norbert Michalke



**Rayleigh-Bénard-Muster lassen sich leicht herstellen. Man füllt eine Pfanne mit Öl bis auf etwa einen Zentimeter Höhe auf. Um die Strömungen sichtbar zu machen, gibt man einige Messerspitzen schillerndes Kupfer- oder Aluminiumpulver hinzu. Beim Erhitzen bleibt das Fluid anfangs ruhig. Sobald der Auftrieb die Viskosität überwindet, organisiert sich ein Konvektionsmuster aus Vielecken (Polygonen). In der Mitte der Polygone steigt das heiße Öl auf (rot), kühlt an der Oberfläche und sinkt an ihren Rändern wieder ab (blau). Weitere Temperaturerhöhung zerstört diese Muster, weil Turbulenz einsetzt. Die mikroskopische Aufnahme zeigt in Falschfarben, dass in den Sechsecken wiederum kleinere Sechsecke entstehen können.**

→ schichten weiter oben. Wenn wir uns auf ein Tröpfchen erwärmten Fluids setzen könnten, dann würden wir Folgendes beobachten: Zunächst würde es verharren, denn die viskose Reibung hält es fest. Mit wachsender Temperatur überwindet es jedoch diese Gegenkraft. Nun kann es wie ein Ballon in die oberen, kühleren Fluidschichten aufsteigen.

Dieses Phänomen kann man schön in Lavalampe beobachten, es heißt **Konvektion**. In der Erdatmosphäre entstehen so Aufwinde über dem erhitzten Boden, in der Sonne transportiert die mächtige Konvektionsschicht Wärme vom heißen Kern an die Oberfläche. Konvektionsströme können als

Vorstufe zur Turbulenz wunderbar gleichmäßige Muster produzieren. Der Grund: Wenn warmes Fluid an einer Stelle aufsteigt, muss von woanders kühleres nachströmen. Versetzt man das Öl in einer heißen Pfanne mit einem Pulver, dann kann man sehen, was passiert: Es organisiert sich zu einem unregelmäßigen Wabenmuster aus Konvektionszellen. In der Mitte der Waben steigt heißes Öl auf, an den Rändern sinkt es ab. Auf der Sonnenoberfläche lassen sich ähnliche Konvektionsmuster beobachten. Diese Waben heißen **Rayleigh-Bénard-Zellen**. (Abb. C) Erstmals wissenschaftlich beschrieben hat sie der französische Physiker Henri Bénard im Jahr 1900. Flüssigkeiten, die zwischen einer heißen und einer kalten Fläche eingesperrt sind, können verblüffend gleichmäßige Konvektionsmuster produzieren. Sie reichen von Rollen über Spiralen bis zu einem herzförmigen Muster, das Eberhard Bodenschatz entdeckt hat. Dieses Verhalten ist keinesfalls wissenschaftlich völlig verstanden, weshalb die Göttinger es ebenfalls in ausgefeilten Experimenten untersuchen.

◀ Von Kármánsche Wirbelstraßen entstehen bei richtigen Verhältnissen im Kielwasser von Schiffen genauso wie im Windschatten von Inseln. Hier sind es die oben teilweise sichtbaren Kanaren (rechts: Nordafrika).

Mit wachsender Temperaturdifferenz zwischen Boden und Oberfläche organisieren sich Fluide oft von einem Muster in ein anderes um. Das kann mehrmals passieren. Oberhalb einer kritischen Temperaturdifferenz setzt dann Konvektion ein. Dieser Übergang hängt von den Eigenschaften des Fluids ab. Das beschreibt die **Rayleighzahl**, die nach dem britischen Nobelpreisträger Lord Rayleigh benannt ist. Sie spielt also bei Konvektionsströmen die gleiche Rolle wie die Reynoldszahl bei druckgetriebenen Strömen. Auch sie ist umgekehrt proportional zur Viskosität des Fluids: Je zäher das Fluid ist, desto mehr Wärmeenergie braucht es, um in Wallung zu kommen.

Für Eberhard Bodenschatz gibt es noch viel zu entdecken. Vor allem Partikel in turbulenten Strömungen haben es ihm angetan, die selbst ein Eigenleben führen. Interessant sind da die feinen Wassertröpfchen in Wolken: Je nach Umweltbedingungen kann das Wasser verdampfen, kondensieren oder gefrieren. Diese Phasenübergänge sorgen für ein komplexes Verhalten, das dem Physikprofessor sichtlich gefällt. Sogar für lebendige „Partikel“ interessiert er sich. Zusammen mit einem französischen Meeresforschungsinstitut untersuchen die Göttinger, welche Rolle Turbulenz im Leben von winzigen Ruderfußkrebse spielt. Diese sind bedeutende Vertreter des Planktons und Nahrung für viele andere Organismen im Meer. Im Vergleich zum Wasser sind sie eher schwer. Wegen der Fliehkraft rutschen die Krebse aus schnellen Turbulenzen heraus und sammeln sich in ruhigeren Wasserzonen. Das bringt ihnen nach Ansicht der Wissenschaftler zwei Vorteile: Sie treffen so öfter auf vermehrungswillige Partner und zudem auf Nahrungspartikel. Ein turbulentes Leben – dank der Physik!

**Schlagwörter:** Fluid, Turbulenz, Reibungskraft, Bewegungsenergie, Fraktal, Navier-Stokes-Gleichung, Viskosität, Reynoldszahl, von Kármánsche Wirbelstraße, Konvektion, Rayleigh-Bénard-Zellen, Rayleighzahl

**Links:** Schulexperimente zu Rayleigh-Bénard- und Taylor-Coutte-Instabilitäten mit detaillierter Diskussion: [user.uni-frankfurt.de/~korneck/Unterrichtssreihe/6MUSTE.pdf](http://user.uni-frankfurt.de/~korneck/Unterrichtssreihe/6MUSTE.pdf)  
Tröpfchen in der Achterbahn, MaxPlanckForschung 3/2010, [www.mpg.de/786173/](http://www.mpg.de/786173/)

**WWW.MAXWISSEN.DE**

– der Link zur Forschung für Schüler und Lehrer

Hier finden Sie Hintergrundinformationen und didaktisches Material zu den jeweils zweimal im Jahr erscheinenden Ausgaben von BIOMAX, GEOMAX und TECHMAX. Weitere Exemplare können Sie kostenlos bestellen bei:

