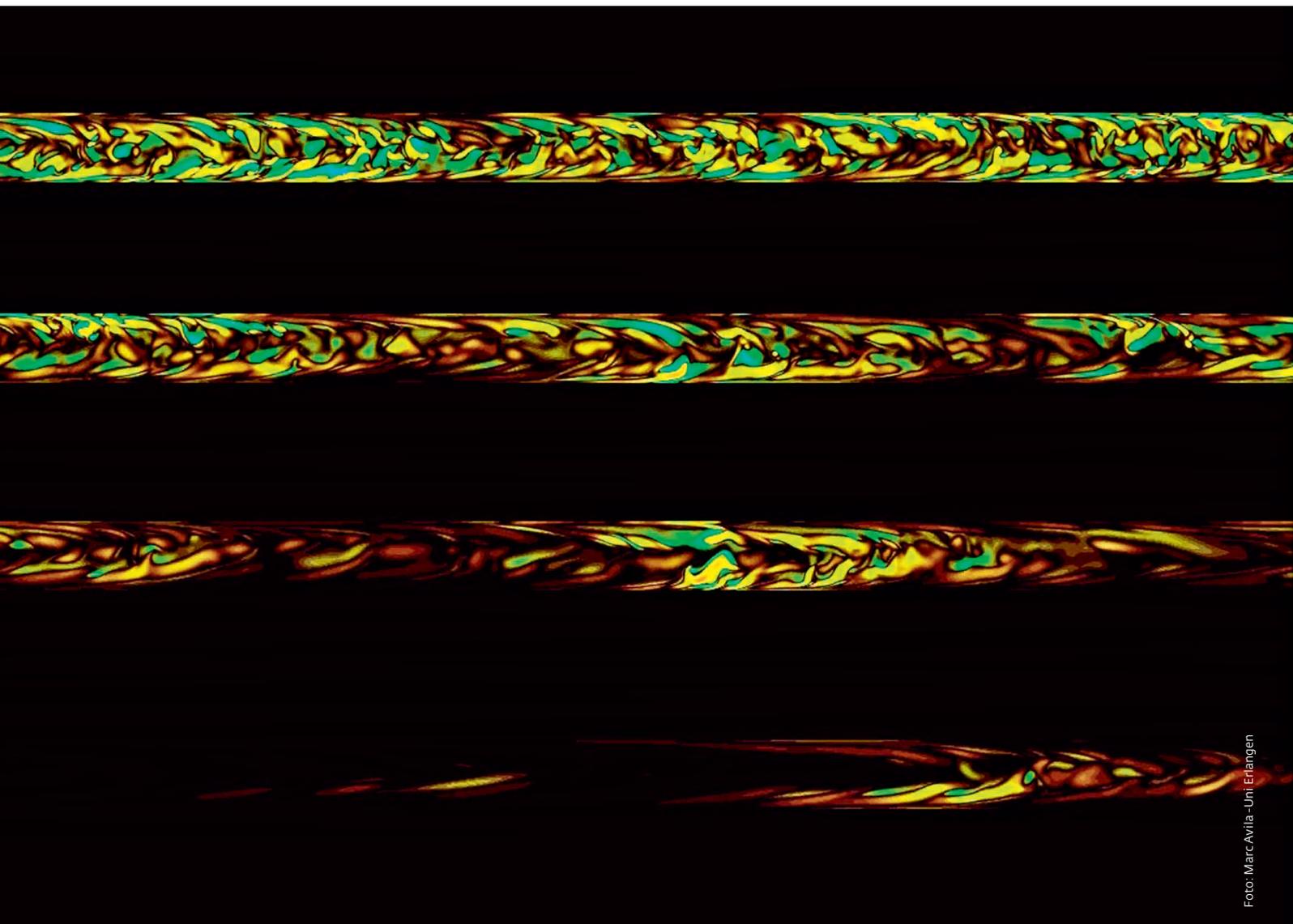


# Mit Wirbel gegen Turbulenz

Turbulenz ist allgegenwärtig: Sie wirkt als Geburtshelfer für Planeten, mischt im Zylinder eines Motors Kraftstoff und Luft, erhöht aber auch den Energiebedarf von Pumpen, die Öl durch Pipelines pressen. **Björn Hof** und sein Team am **Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation** in Göttingen erforschen die Details ihrer Entstehung und suchen Kniffe, die Wirbel dort zu unterbinden, wo sie stören.



TEXT ROLAND WENGENMAYR

**D**uo Xu steht vor einer sechs Meter langen, nur einen Zentimeter dünnen, gläsernen Rohrleitung, die, umgeben von Technik, in einem Labor aufgebaut ist. Der junge Chinese ist Postdoktorand in Björn Hofs Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen. Er startet das Messprogramm am Steuercomputer. Am Ende des Rohrs regt sich ein langer Metallarm, der über einen Kolben die lange Wassersäule im Rohr bewegt. „Wir wollen herausfinden, wie Turbulenzen entstehen“, sagt Duo Xu: „Und hier untersuchen wir, welchen Einfluss das Pulsen im Blutstrom hat.“ Der Herzschlag treibt das Blut pulsierend durch den Kreislauf. Um das nachzuahmen, zieht der pumpende Metallarm das Wasser abwechselnd mal schneller, mal langsamer durch das Glasrohr.

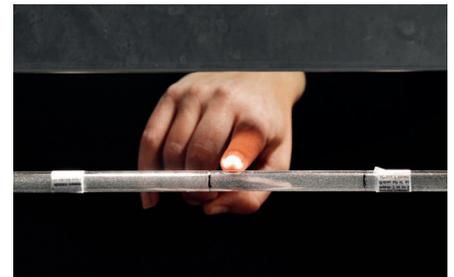
Vorn am Glasrohr ist seitlich ein dünner Schlauch angeschlossen. Er führt zu einem unter der Decke hängenden, etwas provisorisch wirkenden Wassereimer. Durch ein Ventil am Schlauch lässt der Steuercomputer zu Beginn jedes Zugs einen winzigen Schwall Wasser ins Rohr eintreten, der von der Seite in die Rohrströmung schießt. Das verursacht in der Wassersäule eine kleine, wirbelnde Störung. Diese wandert nun mit der Strömung einige Meter weit bis vor eine Kamera. Im Licht eines Lasers

leuchten dort winzige Plättchen im Wasser auf, was die Wirbel auch für das bloße Auge gut erkennbar macht. Xu erklärt, dass der Computer diese Strömungsmuster auswertet und feststellt, wann Turbulenzen auftreten.

### EIN UNIVERSELLES UND GRUNDLEGENDES PHÄNOMEN

Auch in unseren Adern schlägt der gleichmäßig fließende Blutstrom immer wieder in Turbulenzen um. Vor allem in den großen Blutgefäßen wie der Aorta treten sie auf und können dort Gefäßerkrankungen verursachen. Auch wenn die sonst so geniale Evolution diese Wirbel im Blutstrom nicht vermeiden konnte, entstand so das vertrauteste Geräusch unseres Lebens: Der Doppelton des Herzschlags ist die akustische Signatur der Turbulenzen, die an den Herzklappen entstehen.

In Göttingen kann man erfahren, dass Turbulenz ein ebenso universelles wie grundlegendes Phänomen unserer Welt ist. In den Staubscheiben um junge Sterne sorgt sie dafür, dass sich die Materie bis zur Planetengeburt verdichten und verklumpen kann. Riesige Wirbel rühren auch in der Wetterküche unserer Atmosphäre. „Strömungsturbulenz ist das wahrscheinlich häufigste und wichtigste Beispiel für räumlich-zeitliche Unordnung in der Natur“, betont Björn Hof.

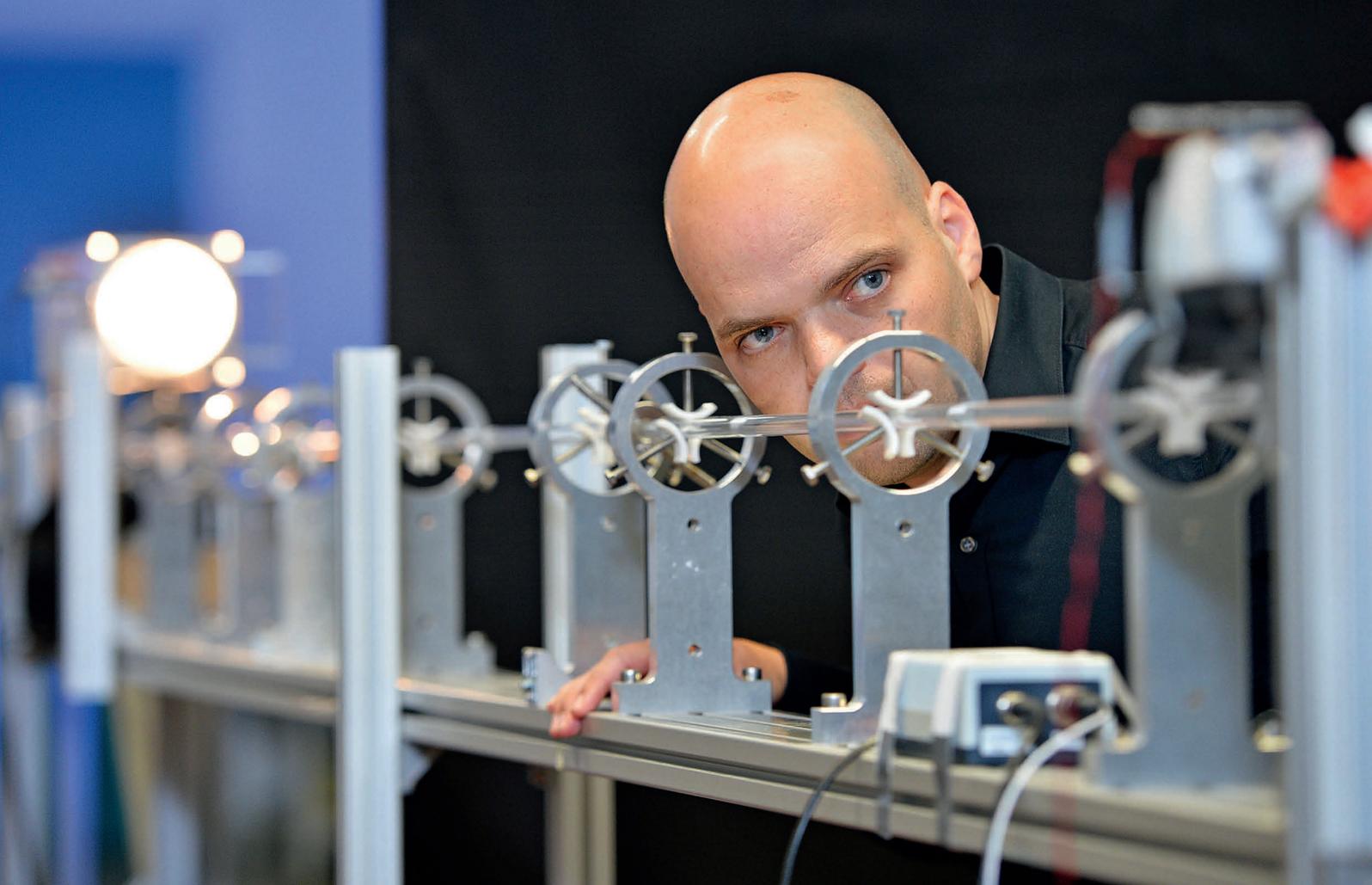


Da sind sie: Winzige Plättchen und Laserlicht machen die Wasserwirbel im Glasrohr sichtbar.

Auch in der Technik spielt Turbulenz eine wichtige Rolle. Verbrennungsmotoren zum Beispiel wären ohne gründliche Verwirbelung des eingespritzten Kraftstoffs weit weniger effizient. Und wenn wir Milch im Kaffee verrühren, hilft Turbulenz beim Mischen. Oft ist sie allerdings auch nicht so willkommen. Luftwirbel an Tragflächen oder Autokarosserien zum Beispiel sind gefürchtet, weil sie den Treibstoffverbrauch hochtreiben. In Rohrströmungen kann Turbulenz den Energieverbrauch empfindlich steigern, etwa im riesigen Netz der Gas- und Ölpipelines.

Turbulenzen entziehen der Strömung wertvolle Bewegungsenergie, und die innere Reibung des wirbelnden Mediums wandelt diese in nutzlose Wärme um. „Wenn man eine Flüssigkeit mit konstantem Massenfluss durch ein Rohr pumpt“, erklärt Björn Hof, „dann kann beim Übergang zur turbulenten

Der Trick mit dem Kick: Diese Simulation zeigt, wie die Forscher Turbulenz kontrollieren wollen. Oben ist eine voll turbulente Strömung im Rohr zu sehen, die Farbverläufe machen die Verwirbelungen sichtbar. Ein geschickter Kick lässt die Turbulenz verschwinden (von oben nach unten).



Wirbel im Visier: Björn Hof an einem der Experimente, mit denen die Max-Planck-Wissenschaftler das Entstehen von Turbulenz in Rohrströmungen erforschen.

Strömung die dazu nötige Energie um den Faktor hundert steigern!“

Die Frage, an welchem Punkt genau eine Strömung in Turbulenz umschlägt, treibt Hof seit Jahren um. Besonders durch Rohre strömende Flüssigkeiten interessieren ihn. Experimente mit langen, gläsernen Röhren wie in Göttingen stehen auch an Hofs neuer Forschungsstätte, dem Institute of Science and Technology (IST) Austria in Klosterneuburg bei Wien. Durch die Rohre strömt meist Wasser mit ein paar Zusätzen, und sein Verhalten erfassen Drucksensoren oder auch Laser und Kameras.

Mit diesem Arsenal hat Hofs Team in den letzten Jahren einige hartnäckige Rätsel um den Turbulenzübergang lösen können. Angesichts der technischen und gesellschaftlichen Relevanz mag es verwundern, aber was bei diesem Übergang genau geschieht, war bis vor Kurzem unverstanden. Dabei begann die systematische Erforschung turbulenter Rohrströmungen bereits vor mehr als hundert Jahren. 1883 veröffentlichte der britische Wissenschaftler

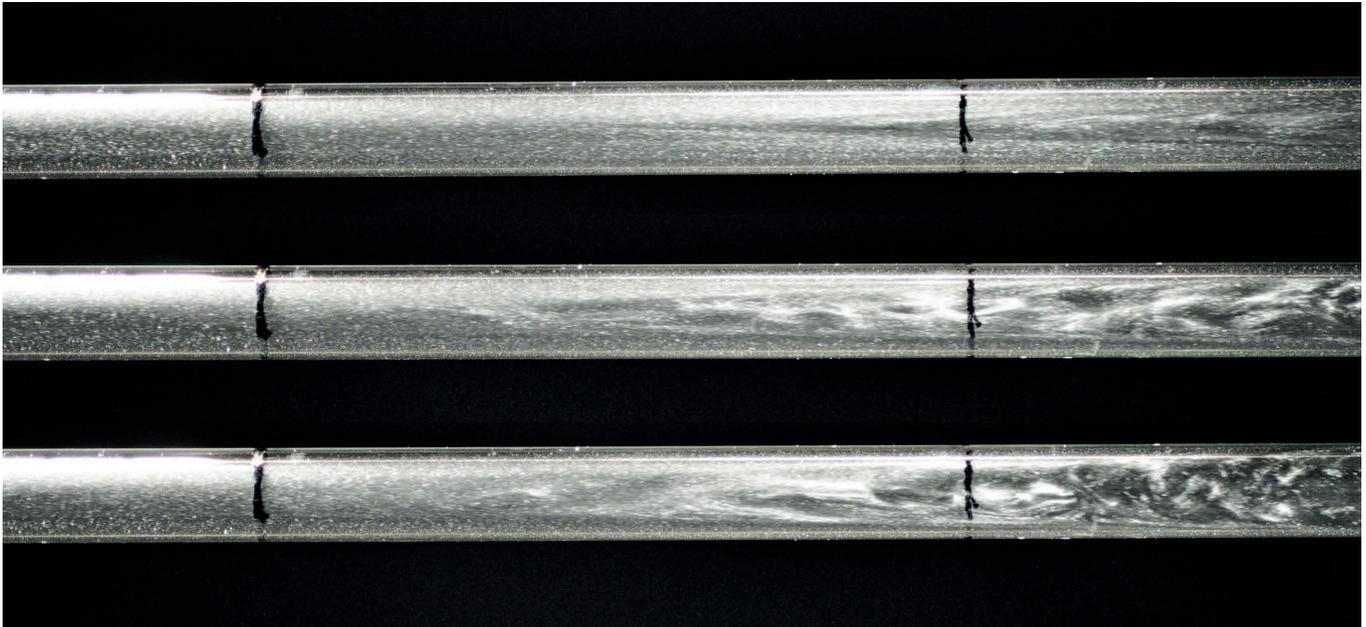
Osborne Reynolds eine bahnbrechende Arbeit. Dafür hatte er das Urexperiment entwickelt, das Björn Hofs Team nun in Hightech-Form perfektionierte. Im Wesentlichen bestand es aus einem langen, waagerechten Rohr. Verbunden war dieses mit einem Vorratsbehälter und einer Art Fallrohr, in das die Schwerkraft das Wasser wie eine Pumpe saugte.

### **TURBULENTE STRÖMUNGEN FRESSEN HUNDERTFACH ENERGIE**

Die Kunst der Turbulenzforschung besteht darin, möglichst gleichmäßige, stabile und wiederholbare Bedingungen herzustellen. „Weil wir hauptsächlich mit Wasser arbeiten, ist zum Beispiel schon die Bildung extrem dünner Biofilme durch Bakterien und Algen ein Problem“, sagt Hof. Bereits Osborne Reynolds steckte jahrelange Arbeit in die Wiederholbarkeit seiner Versuche. Erst dadurch erhielt er aussagekräftige Ergebnisse über die Bedingungen, unter denen gleichmäßige, „laminare“, in turbulente Strömungen umschlagen.

Hofs moderne Experimente funktionieren nach dem gleichen Prinzip. „Man injiziert am Anfang des Rohres eine Störung und schaut, ob dieses kleine Turbulenzfeld den Weg bis zum Rohrende überlebt“, erklärt der Physiker. Sobald die Wirbel nicht mehr zerfallen, ist der Umschlagpunkt zur Turbulenz erreicht. So zumindest die Theorie.

Reynolds entdeckte einen universellen Wesenskern von Strömungen, der eine enorme technische Bedeutung bekommen sollte. Allgemein haben nur drei Eigenschaften Einfluss auf den Punkt, an dem Turbulenz erstmals auftreten kann: die Strömungsgeschwindigkeit, der Durchmesser des Rohrs und die Viskosität der Flüssigkeit. Das lässt sich leicht nachvollziehen: Je schneller die Flüssigkeit strömt und je weiter weg die beruhigende und führende Rohrwand von der Mitte der Strömung ist, desto leichter bilden sich Wirbel. Und je viskoser, also je zähflüssiger eine Flüssigkeit ist, desto schwerer hat es die Turbulenz. Denn eine starke Reibung in einer Flüssigkeit – nichts anderes bedeutet



Blick in das Experiment, das den pulsierenden Blutstrom mit speziell präpariertem Wasser nachahmt. Die Bilder zeigen die Strömung an einer Stelle im Abstand von einigen Zehntelsekunden. Von rechts wandert ein turbulenter Wirbel in den ruhigen, laminaren Wasserstrom hinein.

eine hohe Viskosität – bremst die Wirbel stärker aus. Wenn wir Milch im Kaffee verrühren, brauchen wir wegen des dünnflüssigen Wassers viel weniger Kraft, um eine mixende Turbulenz herzustellen, als wenn wir zwei Farbtöne einer zähen Dispersionsfarbe vermischen.

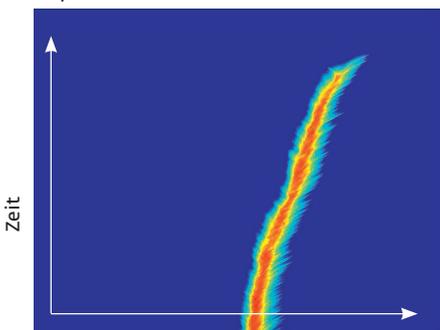
Reynolds fasste die drei entscheidenden Größen – Strömungsgeschwindigkeit, Rohrdurchmesser und Viskosität – in einer universellen Zahl zusammen. Flüssigkeiten mit der gleichen Reynolds-Zahl verhalten sich generell gleich. Diese hydrodynamische Ähnlichkeit

erlaubt es zum Beispiel, Windkanalmessungen an verkleinerten Automodellen vorzunehmen und die dabei beobachteten aerodynamischen Eigenschaften direkt auf die Originalgröße zu übertragen. Die Ingenieure müssen nur sicherstellen, dass die Reynolds-Zahl der großen Autos bei Reisegeschwindigkeit jener des kleinen Modells im Windkanal entspricht. Auch die Ergebnisse von Hofs Experimenten können nach demselben Prinzip etwa auf Rohre mit viel größeren Durchmessern, zum Beispiel Ölpipelines, übertragen werden.

Reynolds beobachtete allerdings auch etwas sehr Merkwürdiges. In seinen Experimenten trat eine einsetzende Turbulenz nur lokal in einzelnen Flecken auf – und nicht immer bei exakt gleicher Strömungsgeschwindigkeit. Dabei gab er alles, um die Bedingungen möglichst stabil zu halten. Zum Beispiel achtete er auf eine konstante Wassertemperatur, was in Hofs Experimenten ebenfalls sehr wichtig ist.

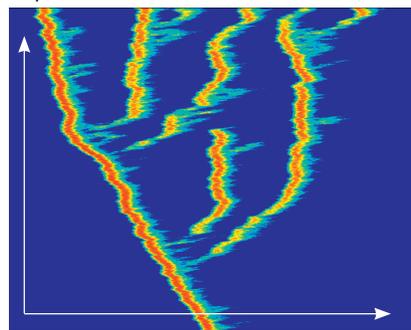
„Gut hundert Jahre blieb der von Reynolds beobachtete lokale Wechsel zwischen turbulenten und laminaren Regionen weitgehend unerklärt“, sagt Hof. „Auch seine Vorhersage einer kritischen Geschwindigkeit, oberhalb derer Turbulenz dauerhaft erhalten bleibt, konnte nicht bestätigt werden.“ Erst vor wenigen Jahren hat Hofs Team in einer internationalen Forschungskooperation gezeigt, dass einzelne turbulente Wirbel

Reynoldszahl: 1800



Raum (Fluss durch das Rohr)

Reynoldszahl: 2300



Raum (Fluss durch das Rohr)

Strömungsmuster: Die laminaren, wirbelfreien Regionen sind blau. Wenn das strömende Medium eine Reynolds-Zahl von 1800 hat (links), zerfällt ein turbulenter Wirbel (gelb und rot) wieder, bei 2300 ist die Strömung voll turbulent (rechts).



Rätsel im Rohr: Wird in Ölpipelines die Strömung turbulent, dann frisst die zusätzliche Reibung der zähen Flüssigkeit bis zu 80 Prozent mehr Pumpenergie. In den 1940er-Jahren entdeckten Ingenieure zufällig, dass im Öl gelöste Polymere den Strom beruhigen. Max-Planck-Forscher fanden nun heraus, warum.

anfangs auch immer wieder absterben. „Das scheint der Vorhersage eines fixen Umschlagpunkts auf den ersten Blick zu widersprechen“, stellt der Physiker fest.

### THEORETIKER BISSEN SICH LANGE DIE ZÄHNE AUS

Reynolds hatte also eine wichtige Eigenschaft entdeckt, ohne ihre tiefere Bedeutung mit seinen Mitteln schon enträtseln zu können. An einer richtigen Erklärung des Turbulenzübergangs bissen sich danach Generationen von Theoretikern die Zähne aus. Als 1988 der amerikanische Nobelpreisträger Richard Feynman starb, hinterließ er auf einer Tafel eine kurze Liste mit wichtigen ungelösten Problemen der Physik. Ein Punkt darauf war die Turbulenz.

Der Fairness halber muss man den Theoretikern zubilligen, dass die Physik erst in jüngerer Zeit den zur Lösung nötigen mathematischen Werkzeugkasten entwickelt hat. Neben der Chaostheorie ist vor allem die moderne Statistische

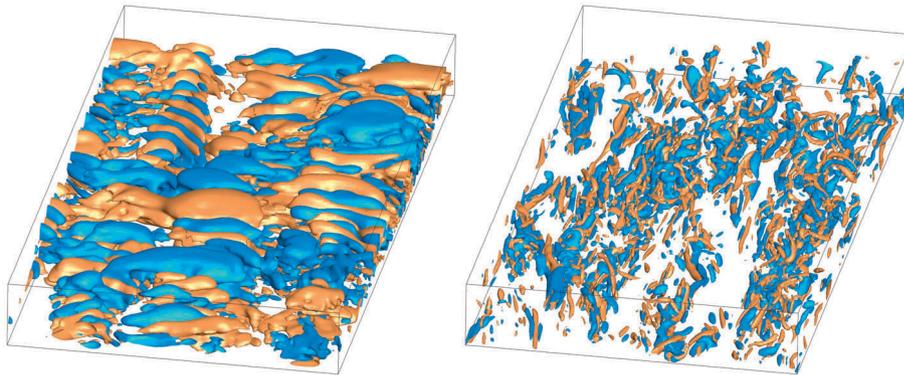
Physik wichtig. Hofs experimentelle Gruppe arbeitet deshalb immer eng mit Theoretikern zusammen. Diese erstellen auf Basis der neuen Beobachtungen Modelle und simulieren die Strömungsverhältnisse in den Rohren am Computer. Passen die virtuellen Strömungsmuster zuverlässig und wiederholbar zur experimentellen Beobachtung, dann dürfen die Wissenschaftler davon ausgehen, dass sie das Phänomen tiefergehend verstanden haben. Dies gelang Hofs Kooperationen in den letzten Jahren mehrfach.

Eine der größten Herausforderungen für Experimentatoren ist die statistische Natur des Turbulenzübergangs. „Wir müssen Hunderttausende und sogar Millionen solcher Prozesse immer wieder untersuchen“, sagt Hof. Erst aus diesen vielen Daten können die Forscher belastbare Schlüsse ziehen. Hofs Team setzt zwar für diese „Sklavenarbeit“ im Labor Computer ein, die vollautomatisch die Experimente steuern, Daten aufzeichnen und analysieren. Trotzdem erfordert die Arbeit enorme

Geduld. Den Physikern gelang es so, den von Reynolds vorhergesagten kritischen Punkt aufzuspüren.

Anfangs bleiben die in die Rohrströmung eingepfropften Wirbelstörungen klein und sterben irgendwann unterwegs ab. Wann ein einzelner Wirbel in diesem Strömungsregime zerfällt, lässt sich nicht vorhersagen. „Die Wirbel haben kein Gedächtnis, keine Erinnerung an den Zeitpunkt ihrer Entstehung“, erklärt Hof. Sie gleichen hierin einem völlig anderen physikalischen Phänomen, dem radioaktiven Zerfall. Auch bei einem einzelnen, instabilen Atom, etwa einem radioaktiven Uranatom, kann man nicht vorhersagen, wann es zerfällt. Man kann aber viele solcher Uranatome beobachten und aus ihren zufälligen Zerfällen ein präzises statistisches Gesetz ableiten. Das ist die Halbwertszeit, nach der garantiert nur noch die Hälfte der anfänglich vorhandenen Atome existiert. Genauso verhalten sich Wirbel.

Ab einer bestimmten Strömungsgeschwindigkeit bleiben einzelne Wirbel erhalten. Die Forscher beobachteten zu-



Unerwartete Entdeckung: Björn Hofs Team fand heraus, dass eine neue Form von Turbulenz den Fluss durch Pipelines beruhigt, sobald in der Flüssigkeit etwas Polymer gelöst ist. Sie durchsetzt die Strömung mit „gutmütigen“ Wirbeln quer zur Strömungsrichtung (links). Bei „normaler“ Turbulenz sind die Energie schluckenden Wirbel längs ausgerichtet (rechts).

dem, dass bei noch schnelleren Strömungen irgendwann nicht allein ein Wirbel überlebt. Dann steckt genug Bewegungsenergie in der Flüssigkeit, dass er aus sich heraus einen weiteren Wirbel erzeugen kann. Auch das geschieht rein statistisch, wie ein radioaktiver Zerfall. Schließlich bleibt es nicht nur bei zwei Wirbeln, sondern aus ihnen entstehen immer neue Wirbel. Außerhalb der Wirbel fließt die Strömung aber noch schön ruhig laminar.

### WIE EINE KRANKHEIT, DIE SICH IN DER GESELLSCHAFT AUSBREITET

Wie sich die Wirbel vermehren, erinnert an ein anderes Phänomen, dem wir vor allem im Winter ausgesetzt sind. „Das ähnelt der Ausbreitung einer Krankheit in der Gesellschaft“, erklärt Hof. Wie ein Kranker kann auch ein Wirbel allein die laminare Strömung in seiner unmittelbaren Umgebung anstecken. „Zwanzig Meter entfernt in der Strömung geht das nicht“, sagt der Physiker, „so wie jemand mit Grippe nicht jemand anderen anstecken kann, mit dem er nicht in Kontakt kommt.“

Wenn sich die Ausbreitung der Turbulenz gegen den Zerfall durchsetzt, passiert die Strömung den ersten Umschlagpunkt. Er liegt bei einer Fließgeschwindigkeit, die einer Reynolds-Zahl von rund 2000 entspricht: Die Turbulenz bleibt dauerhaft erhalten. Nun durchziehen einzelne Wirbelflecken die laminare Strömung wie Löcher einen

Schweizer Käse. Es gibt jedoch noch einen zweiten Umschlagpunkt: Er markiert die Geschwindigkeit, bei der die Strömung voll turbulent wird. Die Löcher im Käse vereinigen sich sozusagen. Die charakteristischen Eigenschaften dieser beiden Übergänge stehen im Fokus von Hofs Forschung.

Aus technischer Sicht steckt eine voll turbulente Strömung voller nutzloser Bewegungsenergie, die dem Vortrieb durch das Rohr fehlt. Für viele technische Anwendungen wäre es deshalb hochinteressant, die Turbulenz gezielt auszuschalten. Vor allem eine verblüffende Erkenntnis aus der Göttinger Forschungsarbeit macht da Hoffnung. Dazu muss man sich die physikalisch möglichen Zustände einer Rohrströmung in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl als Landkarte vorstellen. Auf dieser Landkarte gibt es zwei Reiche, die um die Vorherrschaft kämpfen: das Land der laminaren Strömung und das Reich der Turbulenz. Oberhalb einer Reynolds-Zahl von 2000 reißt das Turbulenzreich in der Regel die Herrschaft über die Rohrwelt an sich.

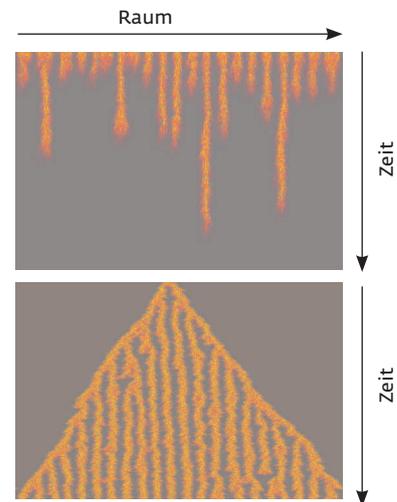
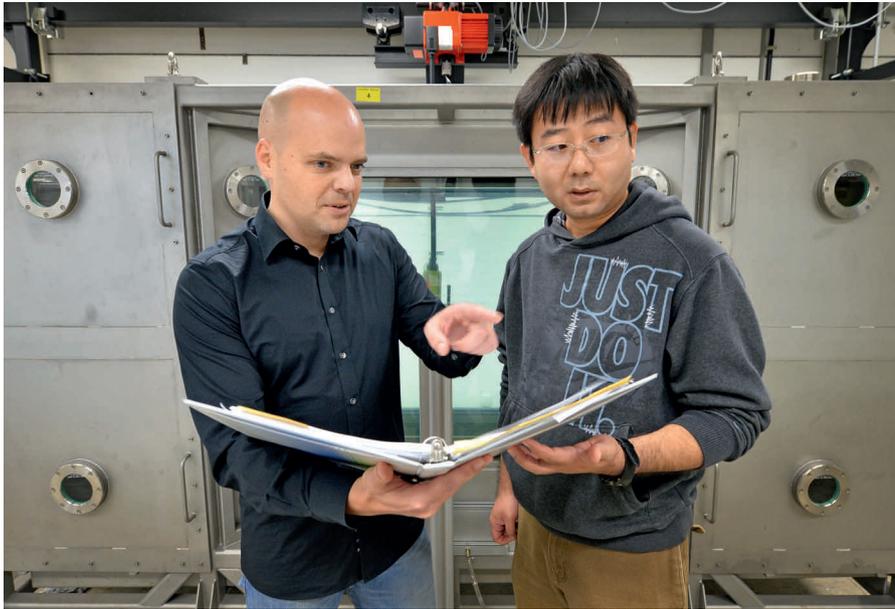
Mit ihrer jahrelangen Forschungsarbeit konnten jedoch Hofs Kooperationen zeigen, dass auf dieser Karte das laminare Land gar nicht untergeht. Es verschwindet nur im Normalfall für die Strömungswelt unerreichbar hinter einem Horizont. „Der laminare Zustand ist grundsätzlich immer stabil, selbst bei hohen Reynolds-Zahlen“, erklärt Hof. Es ist also auch dann noch mög-

lich, dass eine Strömung gleichmäßig fließt. Könnte man dem Strömungszustand bei hohen Reynolds-Zahlen einen Weg in den Herrschaftsbereich der laminaren Strömung weisen, dann wäre ein Sieg über die Energie fressende Turbulenz möglich.

### EIN WIRBEL WÜRGT DEN ANDEREN AB

An der Verwirklichung dieser Idee forscht Hofs Team seit Jahren. 2010 gelang ihm ein Durchbruch bei Strömungen, die einzelne turbulente Wirbel enthalten. Der Trick ist verblüffend einfach. Turbulente Wirbel sind, in Bewegungsrichtung gesehen, vor allem am Heck empfindlich. „Dort ist der Wirbel auf den Antrieb der ihm folgenden laminaren Strömung angewiesen“, sagt Hof. Deshalb kamen die Forscher auf die Idee, gleich hinter einem Wirbel einen zweiten zu erzeugen. Dieser „würgt“ den vorauslaufenden Wirbel von hinten ab, weil er ihn von seinem Antrieb abschneidet. Der Löschvorgang funktioniert zwar nur bei einzelnen Wirbeln. „Man kann aber Einsichten in die Bedingungen gewinnen, die Turbulenzen auch bei sehr viel höheren Geschwindigkeiten zum Überleben benötigen“, sagt Hof.

Heute arbeitet seine Gruppe daran, voll turbulente Strömungen durch so einen intelligenten Kick ins Reich der laminaren Strömungen zurückzutreiben. Doch auch die Tricks findiger In-



Lagebesprechung: Björn Hof und Duo Xu vor einem Experiment, das untersucht, wie in einem Wasserfilm zwischen zwei gegeneinander bewegten Folien Turbulenz entsteht. Rechts: Die raumzeitlichen Muster zeigen, wie dabei Turbulenz zerfällt (oben) oder sich ausbreitet (unten).

genieure interessieren ihn, zum Beispiel in der Ölindustrie. Diese hatte damit zu kämpfen, dass Turbulenz in den Ölpipelines das Durchpumpen des schwarzen Goldes drastisch erschwerte. In den 1940er-Jahren verfielen findige Ingenieure daher durch schlichtes Ausprobieren auf einen Trick: Sie mischten dem Erdöl einen kleinen Schuss langkettiger Polymermoleküle bei.

### LANGE MOLEKÜLE FÜHREN ZUR BERUHIGUNG

Diese langen Moleküle beruhigen die Turbulenz so effizient, dass sich das Öl im Idealfall mit 80 Prozent weniger Energieverlust durch die Pipelines drücken lässt. „Zur Frage, was dieser maximal erreichbaren Reibungsverminderung zugrunde liegt, waren verschiedene Theorien im Umlauf“, erklärt Hof. Doch erst sein Team entdeckte 2012 die tatsächliche Ursache.

In dem mit dem Polymer angereicherten Öl tritt eine bis dahin völlig unbekannt Art von Turbulenz auf. Diese „elasto-inertiale“ Turbulenz, wie sie wissenschaftlich korrekt heißt, kann sogar schon bei viel geringeren Strömungsgeschwindigkeiten entstehen als die herkömmliche „newtonsche“ Turbulenz. Sie verhält sich aber viel gutmütiger, weil sie die innere Reibung des Öls viel weniger erhöht. Noch

besser: Sie unterdrückt die newtonsche Turbulenz. Auf der Landkarte der Strömungszustände taucht also ein weiteres mächtiges Reich auf, das die Herrschaft an sich reißt. Und das der Technik willkommen ist.

Björn Hof und seine Mitarbeiter sind Grundlagenforscher. Doch ihre Entdeckungen haben das Potenzial, viele technische Anwendungen zu verbessern. Sie werden dabei wohl noch auf weitere Überraschungen mit Tragweite stoßen. ◀

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Turbulenz spielt in der Technik eine große Rolle, mal eine nützliche, mal eine schädliche: In Motoren bewirkt sie eine gute Durchmischung von Treibstoff und Luft, in Pipelines erhöht sie die Energie, die zum Pumpen nötig ist.
- Unter welchen Bedingungen Turbulenz im Detail entsteht, wird bereits seit dem Ende des 19. Jahrhunderts erforscht, wird aber erst jetzt allmählich klarer.
- Beim Übergang von einer laminaren zu einer turbulenten Strömung gibt es zwei Umschlagpunkte, die von Rohrdurchmesser, Fließgeschwindigkeit und Viskosität einer Flüssigkeit abhängen. Am ersten zerfallen Wirbel nicht wieder. Mit weiter wachsender Strömungsgeschwindigkeit erzeugen sie sogar neue Wirbel. Am zweiten Umschlagpunkt wird die Strömung voll turbulent.
- Mit Wirbeln, die in einer strömenden Flüssigkeit gezielt erzeugt werden, lassen sich andere Wirbel auflösen.

### GLOSSAR

**Laminare Strömung:** Gleichmäßige Strömung, die deutlich weniger Vortriebsenergie an die innere Reibung verliert als eine turbulente Strömung. Eine laminar strömende Flüssigkeit lässt sich daher mit deutlich weniger Energieaufwand pumpen.

**Reynolds-Zahl:** Mit der Reynolds-Zahl lässt sich das Fließverhalten einer Flüssigkeit charakterisieren. Sie steigt mit der Strömungsgeschwindigkeit und dem Rohrdurchmesser und sinkt mit wachsender Viskosität. Strömungen mit derselben Strömungszahl verhalten sich, bezogen auf das Einsetzen der Turbulenz, gleich.

**Viskosität:** Ein Maß für die innere Reibung in einer Flüssigkeit oder, anschaulich ausgedrückt, für deren Zähflüssigkeit. Je viskoser eine Flüssigkeit, desto größer ist ihre innere Reibung, und desto zäher fließt sie.

# Forschung leicht gemacht.

**Schafft die Papierstapel ab!**

Das Magazin der Max-Planck-Gesellschaft  
**jetzt als ePaper:** [www.mpg.de/mpf-mobil](http://www.mpg.de/mpf-mobil)

Internet: [www.mpg.de/mpforschung](http://www.mpg.de/mpforschung)

Kostenlos  
downloaden!



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT