

## ■ Endliche Turbulenz

Eine turbulente Strömung in einem Rohr wird nach endlicher Zeit wieder laminar.

1) Bei einem Rohrdurchmesser von 10 cm und der kinematischen Viskosität von Wasser von  $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  entspricht dies einer Strömungsgeschwindigkeit von 12 cm/s.

Eines der großen klassischen Probleme der Turbulenzforschung ist das Entstehen von Turbulenz in einer Rohrströmung. Ob eine Flüssigkeit laminar oder turbulent strömt, hängt entscheidend von der Reynolds-Zahl  $Re = vD/\nu$  ab, mit der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , dem Rohrdurchmesser  $D$  sowie der kinematischen Viskosität  $\nu$ . In seinen berühmten Experimenten in Manchester gelang es Osborne Reynolds im Jahre 1883 [1], die Strömung selbst bei einer Reynolds-Zahl von 12 000 laminar zu halten.<sup>1)</sup> Dies war nur durch extreme Sorgfalt möglich, denn bei diesen großen Reynolds-Zahlen führen selbst kleinste Störungen zum Umschlag zur Turbulenz. In der Tat gelang es 100 Jahre später nicht, die Ergebnisse von Reynolds an gleicher Stelle und mit der historischen Apparatur zu reproduzieren: Inzwischen war eine Schnellstraße direkt neben dem historischen Gebäude entstanden, und die resultierenden Vibrationen führten zu einem viel früheren Turbulenzeinsatz.

Die Empfindlichkeit der Rohrströmung gegen kleine Störungen ist bemerkenswert, da das laminare Geschwindigkeitsprofil (Hagen-Poiseuille-Profil) linear stabil ist. Verantwortlich für diese Empfindlichkeit ist das Wechselspiel zwischen Nichtlinearität und Nichtnormalität [2–6] der Navier-Stokes-Gleichung – der Grundgleichung der Hydrodynamik. Selbst niedrigdimensionale Modellsysteme zeigen ein solches Übergangsszenario zur Turbulenz [7]:



Abb. 1 Wissenschaft in der Unterwelt: Unterhalb eines Abwasserrohrs ist ein 4 mm dünnes und 30 m langes Rohr montiert (Pfeil), mit dem sich der Übergang zwischen turbulenten und laminaren Strömungen untersuchen lässt. Am Beginn des Rohr eingebrachte Störungen äußern sich als „Zuckung“ im Austrittsstrahl (Inset), falls sie nicht innerhalb der 30 m zerfallen sind.

Ist die Störung größer als eine von der Reynolds-Zahl abhängige kritische Größe, schlägt die Strömung von laminar nach turbulent um. So entstand das Bild des „double threshold“-Szenarios: Sowohl die Störung als auch die Reynolds-Zahl müssen groß genug sein, und sobald Turbulenz entstanden ist, gibt es keinen Weg zurück zum laminaren Zustand.

Nun gibt es jedoch neue Experimente, wieder aus Manchester, die nicht sofort mit diesem in den letzten Jahren entstandenen Bild in Einklang zu bringen sind: B. Hof, J. Westerweel, T. M. Schneider und B. Eckhardt [8] zeigen, dass bei jeder noch so großen Reynolds-Zahl Störungen immer wieder aussterben, die Strömung wird also immer wieder laminar – nur dauert das bei großer Reynolds-Zahl sehr

lange: Die benötigte Zeit wächst exponentiell mit der Reynolds-Zahl – aber sie bleibt endlich und divergiert nicht wie bisher meistens angenommen. Solche endlichen Lebensdauern von Störungen der laminaren Navier-Stokes-Dynamik hatte U. Brosa bereits 1989 in numerischen Berechnungen gefunden [2].

Dass Hof *et al.* die Rückkehr zur laminaren Strömung überhaupt beobachten konnten, liegt an dem 30 Meter langen Rohr, das die Forscher im Keller des Physik-Departments in Manchester unter einem Abwasserrohr installiert haben (Abb. 1). 30 Meter klingt zwar bereits lang, in der Hydrodynamik kommt es jedoch nur auf die dimensionslosen Größen an, hier auf das Verhältnis von Länge zum Durchmesser. Und weil der Rohrdurchmesser nur  $4 \text{ mm} \pm 0,06 \text{ mm}$  beträgt, erreicht die dimensionslos gemachte „Länge“ sogar den gigantischen Wert von 7500. Dies erlaubt (dimensionslose) Beobachtungszeiten, die zehnmal so groß sind wie die in den bisherigen Experimenten. Nur dadurch ist es möglich auszutesten, ob stromaufwärts angebrachte Störungen weiter stromabwärts zerfallen. In kürzeren Rohren wird die Störung einfach aus dem Rohr weg-

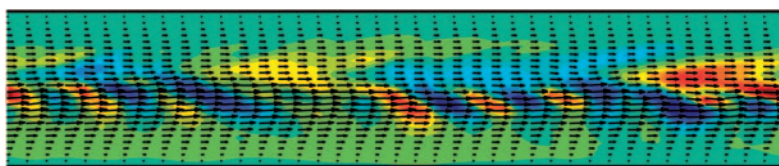


Abb. 2 In diesem berechneten Längsschnitt durch eine Rohrströmung visualisieren die Pfeile die Geschwindigkeit in der Ebene und die Farben die Geschwindigkeitskomponente senkrecht dazu: Ein laminares Hagen-Poiseuille-Profil wäre durchweg grün, die anderen Farben signalisieren Querströmungen aufgrund turbulenter Störungen. (Quelle: T. M. Schneider und B. Eckhardt, erscheint in: *Chaos* 16, Nr. 4 (2006))

Prof. Dr. Detlef Lohse, Universität Twente, Department of Applied Physics und J. M. Burgers Center for Fluid Dynamics, Postfach 217, 7500 AE Enschede, Niederlande

gespült, bevor die Strömung wieder laminar werden kann. Dies passiert natürlich auch im Rohr in Manchester, wenn die Reynolds-Zahl zu groß ist: Die Forscher schätzen ab, dass bei einem Gartenschlauch mit einem Durchfluss von einem Liter pro Minute (was einer nicht allzu großen Reynolds-Zahl von 2400 entspricht) eine Schlauchlänge von 40000 km (Umfang der Erde) und eine Beobachtungszeit von fünf Jahren nötig wären, um die Relaminarisierung zu beobachten.

Für Reynolds-Zahlen zwischen 1500 und 2200 ist es jedoch mit dem langen Rohr in Manchester sehr gut möglich, das Schicksal der stromaufwärts angebrachten Störungen zu beobachten: Überlebt die Störung die 30 m lange Reise, sieht man eine kleine Zuckung des Austrittsstrahls – ähnlich wie ein Tritt auf einen wasserdurchflossenen Gartenschlauch etwas später am Schlauchende sichtbar wird. Anderenfalls ist keine Veränderung des parabelförmigen laminaren Austrittsstrahls wahrzunehmen. Durch tausende von Einzelmessungen kamen Hof *et al.* zu einer belastbaren Statistik, mit der sich die mittlere Lebenszeit  $\tau$  der Störungen (Abb. 2) auch zu größeren Reynolds-Zahlen hin extrapolieren lässt, mit dem oben zitierten Ergebnis  $\tau \propto \exp(c Re)$ : Rohrturbulenz scheint also ein nur transientes Phänomen zu sein!

Die Bedeutung dieser Ergebnisse – sollten sie sich in weiteren Messungen an Rohrströmungen und anderen Scherströmungen bestätigen – ist von prinzipieller Art: Wegen der mit der Reynolds-Zahl exponentiell wachsenden Lebenszeit der Störung wird die Strömung im Rohr im Allgemeinen bei Reynolds-Zahlen über 2500 turbulent sein, trotz der linearen Stabilität und obwohl Rohrturbulenz im Prinzip nur ein transientes Phänomen zu sein scheint. „Praktische“ Auswirkungen gibt es möglicherweise auf astrophysikalischer Skala, auf der hydrodynamische Instabilitäten ganz ähnlichen Typs bestehen: Hier könnten die zur Relaminarisierung notwendigen extrem langen Zeiten und Abstände erreicht werden, sodass die entsprechende Dynamik auf dieser Skala weniger turbulent sein könnte als man bisher dachte.

Detlef Lohse

- [1] O. Reynolds, Proc. Roy. Soc. Lond. **35**, 84 (1883)
- [2] U. Brosa, J. Stat. Phys. **55**, 1303 (1989)
- [3] L. Trefethen, A. Trefethen, S. Reddy und T. Driscoll, Science **261**, 578 (1993)
- [4] S. Grossmann, Rev. Mod. Phys. **72**, 603 (2000)
- [5] H. Faisst und B. Eckhardt, J. Fluid Mech. **504**, 343 (2004)
- [6] R. R. Kerswell, Nonlinearity **18**, R17 (2006)
- [7] T. Gebhardt und S. Grossmann, Phys. Rev. E **50**, 3705 (1994)
- [8] B. Hof, J. Westerweel, T. M. Schneider und B. Eckhardt, Nature **443**, 59 (2006)

## KURZGEFASST

### ■ Element 118 erzeugt

Durch Beschuss eines Californium-Targets mit Kalzium-Ionen haben Forscher am LLNL in Livermore (USA) sowie am JINR in Dubna (Russland) zweifelsfrei Kerne des Elements 118 erzeugt. Eine erste Veröffentlichung der LLNL-Gruppe von 1999 musste aufgrund gefälschter Daten 2002 zurückgezogen werden. Yu. Ts. Oganessian *et al.*, Phys. Rev. C **74**, 044602 (2006)

### ■ Aus grün mach blau

Forschern des MPI für Polymerforschung in Mainz und des Sony Materials Science Laboratory in Stuttgart ist es durch geschickte Kombination einer metallorganischen und einer organischen Substanz gelungen, langwellige (grüne) Photonen einer gewöhn-

lichen Lichtquelle in kurzwelligere (blaue) Photonen zu „fusionieren“. Dies könnte effizientere Solarzellen ermöglichen.

S. Balouchev *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 143903 (2006)

### ■ Dipolmoment des Neutrons

Britische Physiker haben anhand von Messungen an ultrakalten Neutronen in einer Magnetfalle den Wert  $2,9 \times 10^{-26} e \text{ cm}$  als obere Grenze für das elektrische Dipolmoment des Neutrons ermittelt. Die elektrischen Dipolmomente von Elementarteilchen setzen enge Grenzen für Erweiterungen des Standardmodells der Teilchenphysik, wie z. B. die sog. Supersymmetrie. C. A. Baker *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 131801 (2006)