

■ Laminarisierung durch Turbulenz

Untersuchungen zur raum-zeitlichen Dynamik turbulenter Rohrströmungen geben neue Einblicke in das Transitionsverhalten und weisen Wege zur Turbulenzbeeinflussung.

Die Rohrströmung ist das klassische Praktikumsbeispiel, an dem der Übergang von laminaren zu turbulenten Strömungen untersucht wird. Dabei wird eine Besonderheit der Rohrströmung in den meist kurzen Rohren oft übersehen: Eine turbulente Störung breitet sich nicht über das ganze Rohr aus, sondern schwimmt in klar begrenzten, turbulenten Gebieten, Propfen (im Englischen Puffs) stromabwärts. Warum das so ist, und welcher Mechanismus die Pfpfen auf eine Länge von etwa 30 Rohrdurchmessern begrenzt, ist nach wie vor unklar. Allerdings ließen sich nun einige besondere Eigenschaften dieser räumlichen Strukturen in einem originellen Experiment [1] und in aufwändigen numerischen Simulationen [2] genauer studieren.

Björn Hof und seine Kollegen vom Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen haben in einer Rohrströmung mit kurzen Pulsen Störungen injiziert und sie stromabwärts verfolgt [1]. Nahezu unabhängig von der Art der Störung bildete sich ein typischer Pfpfen aus: Am stromaufwärtigen Ende, wo sich die Störungen überwiegend in Wandnähe befinden, kommt es zu erhöhten Gradienten in der mittleren Strömungsgeschwindigkeit. Wirbel bilden sich aus, die aus der Grenzschicht gelöst, in die Mitte transportiert und dort von der parabolischen

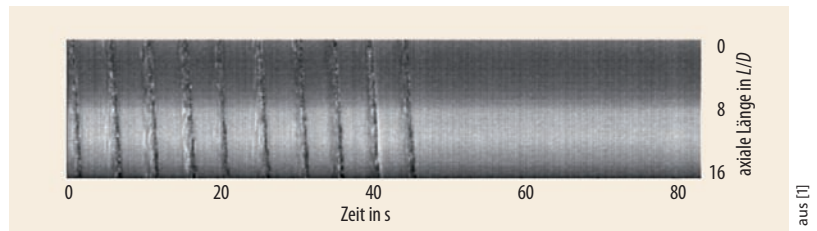


Abb. 1 In einer Rohrströmung (Durchmesser D) bilden sich lokalisierte Turbulenzpfropfen aus. Die Turbulenz wird oberhalb des gezeigten Bereichs regelmäßig induziert und läuft von links oben nach rechts unten als schmaler

Streifen durch das Bild. Nach Anschalten eines stationären turbulenten Gebiets (ebenfalls oberhalb des Bildausschnitts) werden die Turbulenzpfropfen dort absorbiert, der Beobachtungsbereich bleibt laminar.

Hintergrundströmung mitgetragen werden. In der lokalen Strömungsgeschwindigkeit entstehen dabei in radialer Richtung Wendepunkte, an denen nach Rayleigh Instabilitäten auftreten, die zu den Wirbeln führen. Am stromabwärtigen Ende überleben nur noch die in der Mitte mitgetragenen Störungen. Die Wendepunkte und die wandnahen, den Pfpfen antreibenden Strukturen im Experiment zu beeinflussen, war das Ziel der Göttinger Physiker: Wird ein zweiter turbulenter Bereich zu rasch nach dem ersten gestartet, so stören die vom zweiten Puls ausgehenden Fluktuationen im Geschwindigkeitsfeld die Grenzschichten. Der Wendepunkt verschwindet, die Zahl und Intensität der dort ausgelösten Wirbel wird geringer, und der vordere Pfpfen löst sich auf! Es gelingt also, einen Turbulenzpfropfen durch einen zweiten „abzuschießen“.

Überraschend kann man mit einem stationären turbulenten Bereich auch einen Filter bauen, der den stromabwärtigen Bereich laminar hält (Abb. 1): Injiziert man aus einer Düse dauerhaft Flüssigkeit, so bildet sich von der Injektionsstelle ausgehend ein turbulenter Bereich, der stationär bleibt und nicht stromabwärts getragen wird. Läuft ein Turbulenzpfropfen in dieses Gebiet, so stören die zusätzlichen Fluktuationen die Erzeugung von Wirbeln am oberen Ende und der Pfpfen kann den Kontrollbereich nicht wieder verlassen, er wird absorbiert. Die Experimente zeigen damit, wie empfindlich die turbulenten Bereiche auf Störungen reagieren, und wie wichtig die Details der Strömung am stromaufwärtigen Ende sind.

Bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten bleiben die turbulenten Regionen nicht mehr in ihrer Länge lokalisiert [2]. Turbulente Störungen, die in der Rohrmitte stromabwärts schwimmen, schwächen sich ab, weil die radialen Gradienten fernab der Wände kleiner sind und somit weniger Energie aus der mittleren Strömung gezogen wird. Gleichzeitig breiten sich die Strömungen wieder in Richtung der Wände hin aus, wo sie bei genügend hohen Strömungsgeschwindigkeiten anhaften und neue Turbulenz initiieren. Damit breitet sich ein ursprünglich lokalisierter Pfpfen aus und wächst in Strömungsrichtung. Da dieser Wachs-

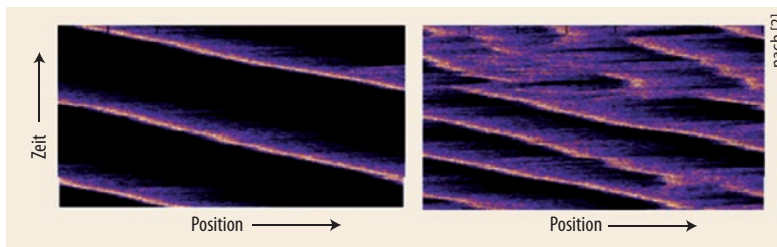


Abb. 2 Dynamik von turbulenten Pfpfen bei einer Reynolds-Zahl von 2250 (links) bzw. 2350 (rechts): Die turbulente kinetische Energie ist in den gelblichen Gebieten am höchsten und verschwindet in den schwarzen Bereichen. In einem Fall bleibt die Turbulenz lokalisiert, im

anderen Fall breitet sie sich auf der ganzen Länge aus. Hier ist die mittlere Bewegungsgeschwindigkeit abgezogen, sodass die Pfpfen von rechts nach links zu laufen scheinen, obwohl die Strömungsrichtung von links nach rechts weist.

tumsprozess von den Störungen getrieben wird, die aus einem turbulenten Pfropfen herausgetragen werden, ist die Ausbreitung nicht gleichmäßig, sondern intermittent. Zudem kann die Turbulenz vorübergehend auch zerfallen, etwa auf Grund der Wechselwirkung zwischen benachbarten turbulenten Regionen (wie die Experimente in [1] zeigen). Daraus resultiert eine raum-zeitlich intermittente Folge von turbulenten Strukturen, wie sie Julius Rotta schon 1956 sehr genau dokumentiert hat [3].

Über die Arbeiten von Rotta hinausgehend haben nun David Moxey und Dwight Barkley diese raum-zeitliche Intermittenz in numerischen Simulationen in sehr langen Röhren quantitativ studiert [2]. Wie in allen Experimenten zur Rohrströmung bestimmt die dimensionslose Reynolds-Zahl $Re = DU/\nu$ das Verhalten, mit dem Durchmesser D , der mittleren Strömungsgeschwindigkeit U und der kinematischen Viskosität ν . Moxey und Barkley finden in numerischen Rechnungen in Röhren von $100 D$ Länge, dass für $Re < 2250$ ein Pfropfen lokalisiert bleibt und er sich bei $Re > 2350$ ausbreitet (Abb. 2). Überreste der Lokalisierungsmechanismen überleben insoweit,

als sich zunächst noch laminare und turbulente Gebiet abwechseln und erst ab $Re \sim 2600$ das ganze Volumen turbulent wird.

Der Wechsel von lokalisierter zu ausgedehnter Turbulenz weist auf einen Phasenübergang hin, der im Limes unendlich langer Röhren scharf werden dürfte: Unter einer kritischen Reynolds-Zahl bleibt die Turbulenz lokalisiert, und der Bruchteil des mit Turbulenz gefüllten Volumens zum Gesamtvolumen verschwindet. Oberhalb dieser kritischen Reynolds-Zahl ist der Bruchteil von Null verschieden, allerdings nicht notwendigerweise gleich eins. Nach den Rechnungen von Moxey und Barkley sowie den Beobachtungen von Rotta scheint diese kritische Reynolds-Zahl zwischen 2250 und 2350 zu liegen. Genauere Bestimmungen sind allerdings dadurch erschwert, dass es neben dem intermittenten Anwachsen einen zweiten noch nicht vollständig aufgeklärten Prozess gibt, bei dem sich ein Pfropfen in zwei aufspaltet [4].

Mit diesen Arbeiten rücken die raum-zeitlichen Aspekte turbulenter Strömungen im Transitionsbereich stärker in den Mittelpunkt des Interesses [5]. Der Wechsel von lokalisierter zu intermittenter und

schließlich raumfüllender Turbulenz zeigt Ähnlichkeiten, aber auch charakteristische Unterschiede zu Beobachtungen in anderen Muster bildenden Systemen [6, 7]. Die Beobachtungen, wie sich die Pfropfen lokal unterdrücken lassen oder sich aufgrund der räumlichen Vernetzung ausbreiten, eröffnen neue Möglichkeiten, um Turbulenz zu beeinflussen. Schließlich könnte der Übergang von lokalisierten turbulenten Regionen zur raumfüllenden Turbulenz in die Universalitätsklasse der gerichteten Perkolatation fallen [8]. Mit Spannung warten wir daher auf die Bestimmung des kritischen Punktes und der kritischen Exponenten.

Bruno Eckhardt

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

- [1] B. Hof, A. de Lozar, M. Avila, C. Tu und T. M. Schneider, *Science* **327**, 1491 (2010)
- [2] D. Moxey und D. Barkley, *Proc. Natl. Acad. Sci (NY)* **107**, 8091 (2010)
- [3] J. Rotta, *Ing. Arch.* **24**, 258 (1956)
- [4] M. Nishi, B. Ünsal, F. Durst und G. Biswas, *J. Fluid. Mech.* **614**, 425 (2008)
- [5] P. Manneville, *Phys. Rev. E* **79**, 025301(R) (2009)
- [6] F. Mellibovsky, A. Meseguer, T.M. Schneider und B. Eckhardt, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 054502 (2009)
- [7] T. M. Schneider, J. F. Gibson und J. Burke, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 104501 (2010)
- [8] H. Hinrichsen, *Adv. Phys.* **7**, 815 (2000)

■ Volle Packung

Magnetresonanzenaufnahmen zeigen, dass sich Tetraederwürfel dichter als andere konvexe Körper ungeordnet packen lassen.

Wie lassen sich Objekte im Raum so anordnen, dass sie den zur Verfügung stehenden Raum optimal ausnutzen? Mathematiker bezeichnen diese Aufgabe als Packungsproblem, und ihre Lösung spielt in vielen Bereichen eine wichtige Rolle. So bestimmt die Packungsdichte maßgeblich die Porosität und die Fließigenschaften von granularen Materialien wie Sand oder Kies, und auf kleineren Skalen lassen sich schwach wechselwirkende Kolloide in guter Näherung als harte Teilchen ansehen. Im Allgemeinen unterscheidet man zwischen geordneten Packungen

(Kristallen) und ungeordneten (Gläsern). Forscher um Paul Chaikin von der New York Universität haben nun mit Experimenten gezeigt, dass Tetraeder (genauer gesagt Tetraederwürfel) von allen kongruenten konvexen Objekten die dichteste jemals beobachtete ungeordnete Packung bilden [1]. Dadurch lösen sie Ellipsoide (ellipsoide Schokolinsen) als bisherige Rekordhalter ab [2].

Traditionell konzentrieren sich Untersuchungen zum Packungsproblem auf harte Kugeln, die theoretisch und experimentell einfach zu handhaben sind. Au-

ßerdem dienen Kugelpackungen als minimalistisches Atommodell und sind daher von generellem Interesse. Ein System harter Kugeln bildet bei geringen Dichten eine fluide Phase, die unter Druck erstarrt. Aufgrund der rein abstoßenden Wechselwirkung gibt es keinen Tripelpunkt und somit keine Unterscheidung zwischen einer gasförmigen und einer flüssigen Phase. Wie von Johannes Kepler im Jahr 1611 vermutet und 1998 durch Thomas Hales bewiesen, entsteht die dichteste Kugelpackung durch Stapeln dicht gepackter Ebenen. Dabei füllen die Kugeln