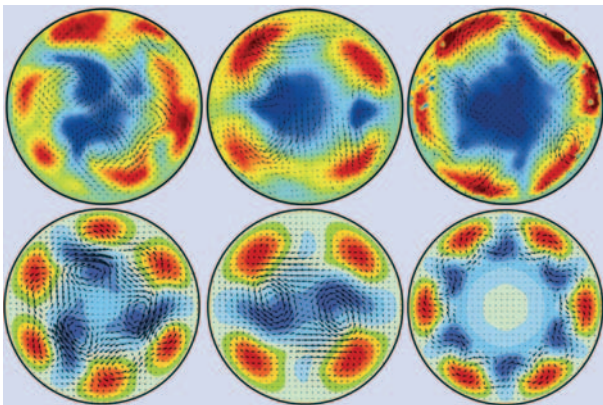


- [5] K. Kleinknecht, Phys. Bl., Juli/August 2001, S. 89
- [6] B. Aubert et al. [BaBar Collaboration], Phys. Rev. Lett. **93**, 131801 (2004)
- [7] Y. Chao et al. [Belle Collaboration], hep-ex/0408100
- [8] K. Abe et al. [Belle Collaboration], Phys. Rev. Lett. **93**, 021601 (2004)
- [9] A.J. Buras, R. Fleischer, S. Recksiegel und F. Schwab, Phys. Rev. Lett. **92**, 101804 (2004); Nucl. Phys. B **697**, 133 (2004)

Wie die Turbulenz einsetzt

Der Übergang zur Turbulenz in einer strömenden Flüssigkeit ist ein alltägliches Phänomen. Wenn man einen Wasserhahn langsam aufdreht, geht das anfangs laminare Fließen über in eine unregelmäßige, chaotische Strömung. Dabei erhöht sich die Reibung, sodass für den gleichen Durchsatz ein höherer Wasserdruck notwendig ist. Obwohl der Turbulenzübergang in Rohrströmungen von grundlegender Bedeutung für viele Anwendungen ist, steht eine befriedigende Erklärung bis heute aus. Nun ist es Hof et al. erstmals gelungen, numerisch vorhergesagte wellenartige Wirbel sichtbar zu machen und damit eine fundamentale dynamische Eigenschaft des Übergangs zu beobachten [1].

Untersuchungen zum Einsetzen von Turbulenz haben eine lange Geschichte. 1839 beobachtete Hagen zwei unterschiedliche Zustände der Rohrströmung [2]. Rund 50 Jah-



Beim Übergang zur Turbulenz in der Rohrströmung organisiert sich die Strömung um laufende Wellen herum, die sich im Experiment durch Auswertung der Strömungsgeschwindigkeit nachweisen lassen. Die Querschnitte durch die Rohrströmung wurden bei verschiedenen mittleren Geschwindigkeiten gemessen. Der Vergleich zwischen beobachteten (oben) und berechneten (unten) Wirbelmustern zeigt eine gute Übereinstimmung. Die Pfeile deuten die Geschwindigkeit in der Querschnittsebene und damit die Wirbel an, die Farben zeigen die Abweichungen der Strömungsgeschwindigkeit längs der Rohrachse vom laminaren Profil an. Gebiete mit höherer bzw. niedrigerer Geschwindigkeit sind rot bzw. blau markiert (aus [1]).

re später erkannte Reynolds, dass der Übergang zwischen den beiden Regimen nur von einer dimensionslosen Größe $Re = DU/\nu$ abhängt, wobei U die über den Rohrquerschnitt gemittelte Geschwindigkeit, D der Rohrdurchmesser und ν die kinematische Viskosität der Flüssigkeit sind [3].

Bereits Reynolds erkannte, dass in Rohrströmungen erst Störungen mit endlicher Amplitude den Übergang zur Turbulenz auslösen. In der Theorie lassen sich jedoch mithilfe der linearen Stabilitätsanalyse nur infinitesimal kleine Störungen einfach behandeln, und dies ist einer der Gründe dafür, dass das theoretische Verständnis für den Übergang zur Turbulenz in Scherströmungen nur langsam vorankam. Für andere Fälle, beispielsweise die Strömung zwischen einem rotierenden inneren und einem stationären coaxialen äußeren Zylinder (zirkuläre Couette-Strömung), waren die theoretischen Untersuchungen erfolgreicher. In Übereinstimmung mit dem Experiment ergibt die Stabilitätsanalyse, dass die laminare Strömung bei einer bestimmten Winkelgeschwindigkeit instabil wird und stattdessen axialsymmetrische Wirbel (Taylor-Wirbel) auftreten, deren Amplitude mit der Reynolds-Zahl wächst. Nach weiteren Instabilitäten, bei denen neue Strömungsmuster auftauchen (man spricht dann von Verzweigungen oder Bifurkationen), ergibt sich ein gradueller Übergang zur Turbulenz. Bei der Rohrströmung oder der Strömung zwischen zwei parallelen Platten, die sich relativ zueinander mit der Geschwindigkeit U bewegen (ebene Couette-Strömung), setzt die Turbulenz jedoch plötzlich und voll entfaltet ein, während die Stabilitätsanalyse selbst bei beliebig großen Reynolds-Zahlen eine laminare Strömung voraussagt. Es ist heute zwar möglich, turbulente Strömungen mit Reynolds-Zahlen von einigen Tausend in guter Übereinstimmung mit den beobachteten Eigenschaften zu simulieren [4], aber ein detailliertes Verständnis des Übergangsprozesses ist damit noch nicht gewonnen.

Obwohl bei der ebenen Couette-Strömung und der Rohrströmung keine Hinweise auf Bifurkationen bei endlichen Re -Werten gefunden wurden, hat sich dennoch die Überzeugung gehalten, dass neben der elementaren Lösung der laminaren Strömung auch andere relativ einfa-

che Lösungen existieren. Da davon auszugehen ist, dass diese Lösungen instabil sind, sind numerische Methoden in der Regel nicht in der Lage, sie direkt zu erzeugen, so wie sie auch im Experiment normalerweise nicht zu beobachten sind.

Eine Möglichkeit, diese Lösungen zu erzeugen, besteht darin, ein allgemeineres Problem mit einem zusätzlichen Parameter zu behandeln, das bei einem speziellen Wert des Parameters der ebenen Couette- oder der Rohrströmung entspricht. Die erwünschten Lösungen werden gefunden, indem man bei den als Funktion des neuen Parameters auftretenden Instabilitäten die abzweigenden Lösungen über sekundäre Verzweigungen bis hin zu den genannten speziellen Parameterwerten verfolgt. So kann man sich etwa die ebene Couette-Strömung als Grenzfall der zirkulären Couette-Strömung bei kleinem Abstand zwischen den Zylindern vorstellen. Die mittlere Winkelgeschwindigkeit ist dabei der zusätzliche Parameter, der nur im Spezialfall der ebenen Couette-Strömung verschwindet [5]. Alternativ kann man im Falle der ebenen Couette-Strömung zwischen horizontalen Platten durch Heizen der unteren Platte und thermischen Auftrieb eine zusätzliche Instabilität bewirken [6]. Man kann aber auch eine willkürliche Kraft einsetzen, um einen Verzweigungspunkt zu erhalten, von dem aus ein Lösungszweig bis zu einem Punkt, an dem die Kraft verschwindet, verfolgt wird [7]. Mit dieser Methode wurden für die Rohrströmung tertiäre Lösungen in der Form von laufenden Wellen gewonnen [8, 9], während die entsprechenden Lösungen für die ebene Couette-Strömung stationär sind. Der Begriff „tertiär“ weist darauf hin, dass sich diese Lösungen über zwei Bifurkationen aus der verallgemeinerten elementaren Lösung entwickelt haben.

Eine dominierende Komponente dieser laufenden Wellen sind walzenähnliche Wirbel mit Achsen parallel zur mittleren Strömung. Diese Walzen verteilen Impuls um und glätten daher das Profil des mittleren Flusses. Dadurch wird das Profil nahe der festen Wand steiler, sodass die viskose Spannung anwächst. Um den gleichen Massenfluss durch das Rohr wie bei der laminaren Strömung zu erreichen, ist ein größerer Druckgradient erforderlich. In der gleichen Weise ist bei der ebenen Couette-Strömung eine höhere

Kraft nötig, damit sich die Platten mit einer relativen Geschwindigkeit U bewegen.

Solche in Flussrichtung orientierten walzenähnlichen Strukturen oder „Streaks“ werden in wandgebundenen turbulenten Scherströmungen häufig beobachtet, und es scheint eine Verwandtschaft mit den tertiären Lösungen zu bestehen [10]. Allerdings gab es wenig Hoffnung, diese Lösungen im Labor zu beobachten, da sie fast immer instabil sind.

Es ist daher überraschend, dass es Hof et al. gelungen ist, die vorhergesagten tertiären Lösungen in ihren Experimenten zu beobachten [1]. Indem sie sorgfältig präparierte Strömungen in einem etwa 30 Meter langen Rohr auf spezielle Weise stören und mit einer raffinierten Technik visualisieren, zeigen sie, dass sich die laufenden Wellen zu mindestens als transiente Phänomene realisieren lassen. Die Abbildung zeigt die gute Übereinstimmung zwischen beobachteten und berechneten Strukturen.

Das Rätsel der Beobachtbarkeit der instabilen Lösungen lässt sich wie folgt aufklären: Der sich verändernde Zustand der Rohrströmung entspricht einer Trajektorie im hochdimensionalen Lösungsraum der Bewegungsgleichungen. Die tertiären Lösungen (und die komplexeren, die durch weitere Bifurka-

tionen aus ihnen hervorgehen) sind in bestimmten Richtungen instabil, aber sie ziehen Trajektorien aus den meisten anderen Richtungen an. Die Trajektorien halten sich daher lange in ihrer Nähe auf, bevor sie „vertrieben“ werden. Diese Lösungen kann man daher als virtuelle Verkehrsarterien betrachten, die in dem Maße sichtbar werden, wie sie ein „Impulspaket“ anziehen, und es eine Zeitlang transportieren, bis sie es an eine andere Arterie „ausliefern“ und zerfallen. Die Gesamtheit aller Verkehrsadern bestimmt dann den turbulenten Zustand.

Die von Hof et al. berichteten Ergebnisse sind einer Zusammenarbeit von Ingenieuren, Physikern und Mathematikern zu verdanken. Sie öffnen die Tür nicht nur zu einem vollständigen Verständnis des Übergangs zur Turbulenz, sondern auch zu neuen Möglichkeiten, diesen zu beeinflussen und zu kontrollieren, mit weitreichenden Implikationen für technische Anwendungen. Die neuen Ergebnisse zeigen auch, dass es nie zu spät ist, ein altes Problem in Angriff zu nehmen, insbesondere dann nicht, wenn dies auf interdisziplinäre Weise geschieht.

FRIEDRICH H. BUSSE

- [1] B. Hof et al., *Science* **305**, 1594 (2004)
 [2] G. H. L. Hagen, *Pogg. Ann.* **46**, 423 (1839).

- [3] O. Reynolds, *Proc. R. Soc. London A* **35**, 84 (1883)
 [4] J. G. M. Eggels et al., *J. Fluid Mech.* **268**, 175 (1994)
 [5] M. Nagata, *J. Fluid. Mech.* **217**, 519 (1990)
 [6] R. M. Clever und F. H. Busse, *J. Fluid Mech.* **234**, 511 (1992)
 [7] F. Waleffe, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 4140 (1998)
 [8] H. Faisst und B. Eckhardt, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 224502 (2003)
 [9] H. Wedin und R. R. Kerswell, *J. Fluid Mech.* **508**, 333 (2004)
 [10] F. Waleffe, *Phys. Fluids* **15**, 1517 (2003)

Multitalente für die Datenspeicherung?

Ferromagnetische Ferroelektrika (Multiferroika) könnten einen neuen Weg zur Datenspeicherung eröffnen. In diesen Materialien lässt sich die magnetische Ordnung mit Hilfe externer elektrischer Felder beeinflussen. Nun ist es sogar gelungen, die Magnetisierung in einem HoMnO_3 -Kristall durch ein externes elektrisches Feld gezielt zu orientieren und den Ferromagnetismus als solchen an- oder abzuschalten.

Schon vor 1900 postulierte Pierre Curie die Existenz des magnetoelektrischen Effekts, d. h. die Induktion einer Magnetisierung durch ein elektrisches Feld oder die Induktion einer elektrischen Polarisation durch ein Magnetfeld [1]. Dieses Phänomen wurde in den 1960er und 70er Jahren erstmals untersucht [2, 3], allerdings gab es zu jener Zeit nur wenige Materialien mit messbaren magnetoelektrischen Effekten. Aufgrund von Fortschritten bei der Herstellung und dem Verständnis von Manganaten mit Perowskitstruktur erlebt dieses Forschungsgebiet aber in jüngster Zeit eine Renaissance. Kürzlich wurde entdeckt, dass in den magnetischen Ferroelektrika dieser Kristallklasse die magnetoelektrischen Effekte diejenigen der normalen Ferroelektrika um Größenordnungen übertreffen [4, 5]. Durch die ungewöhnliche Kombination von optischen Spektroskopietechniken mit Neutronenstreuexperimenten ist es nun einer Gruppe von Physikern aus Berlin und Tübingen erstmals gelungen, die magnetoelektrischen Phasenübergänge in HoMnO_3 auf mikroskopischer Ebene zu erklären und die mit ihnen verbundenen magnetoelektrischen Effekte auf eindrucksvolle Weise darzustellen [6].

Prof. Dr. Friedrich H. Busse, Institut für Physik, Universität Bayreuth, 95440 Bayreuth

KURZGEFASST...

■ Unschärfe im Test

Die Heisenbergsche Unschärferelation gilt auch für Winkelposition φ und Drehimpuls L . Das haben Physiker aus Glasgow und Strathclyde in Großbritannien nun erstmals experimentell bestätigt. Mit einem speziellen Absorber präparierten sie zunächst einen Lichtstrahl, dessen Winkelposition gaußverteilt ist, und maßen anschließend die Verteilung des Drehimpulses mit Hilfe eines geeigneten holographischen Beugungsgitters. Da die Winkelwerte nur in einem Intervall der Länge 2π liegen können und die Drehimpulswerte diskret sind, ist die Unschärferelation komplizierter als diejenige für Ort und Impuls; die Ergebnisse stimmen aber mit der Theorie überein.

S. Franke-Arnold et al., *New. J. Phys.* **6**, 103 (2004)

■ Laserbeschleunigung mit Qualität

Die Beschleunigung von Teilchen mit Hilfe von Plasmen und Hochenergielasern könnte eine platz- und kostensparende Alternative zu den immer größeren konventionellen Beschleunigern bieten. Nun ist es gleich drei Forscherteams gelungen zu zeigen, dass sich mit Hilfe der sog.

Plasma-Wakefield-Methode stark gerichtete Elektronenstrahlen mit einer sehr schmalen Energieverteilung (im 100 MeV-Bereich) erzeugen lassen. Dazu werden 30–50 fs kurze Laserpulse mit Leistungen von 10–50 TW in einen nur 2 mm langen Strahl aus ionisiertem Gas fokussiert. Die Laser erzeugen eine Plasmawelle, auf denen die Elektronen quasi „surfen“.

S. P. D. Mangles et al., *Nature* **431**, 535; C. G. R. Geddes et al., *Nature* **431**, 538; J. Faure et al., *Nature* **431**, 541 (2004)

■ Quantenregister aus fünf Atomen

Physiker der Uni Bonn haben ein Quantenregister für fünf Qubits entwickelt, bei dem jedes Qubit durch ein neutrales Cäsiumatom repräsentiert wird. Die Atome befinden sich in einer optischen Dipolfalle und lassen sich mithilfe eines äußeren Magnetfeldes unter Ausnutzung des Zeeman-Effekts einzeln ansprechen. Das Register lässt sich im Prinzip auf viele Atome und Qubits erweitern, für einen Quantencomputer fehlt aber noch ein Quantengatter, in dem die eigentlichen Rechnungen durchgeführt werden.

D. Schrader et al., *Phys. Rev. Lett.* **93**, 150501 (2003)