

nächste Stufe durchläuft. Forscher am Lawrence Berkeley National Laboratory in den USA haben ein Experiment durchgeführt, in dem sie erstmals die Elektronenpulse in lasererzeugten Plasmawellen in einem zweistufigen Prozess beschleunigten [5]. Dabei nutzten sie zwei miteinander synchronisierte Laserpulse, um die aufeinander folgenden plasmabasierten Beschleunigerstufen zu betreiben (Abb. 1). Je ein Laserpuls erzeugte in jeder Stufe eine Plasmawelle. In der ersten Stufe erreichten die Elektronen maximale Energien von 200 MeV. Die zweite Stufe erhöhte die Energie nochmals um 80 MeV. Hier zeigten die Forscher insbesondere, dass das Timing zwischen Elektronenpuls und zweiter Plasmawelle bestimmt, wie gut die zweite Stufe die Elektronen beschleunigt. Wenn sie die Verzögerung variierten, beobachteten sie verschiedene Energien. Bewegt sich die zweite Plasmawelle hinter dem Elektronenpuls (positive Verzögerung), beeinflusst die Welle

die Elektronen nicht. Das periodische Feld der zweiten Welle wirkt nur für negative Verzögerung auf den Elektronenstrahl: Ein Nachbeschleunigen und Abbremsen wechseln sich ab (Abb. 2).

Eine ebenfalls plasmabasierte Magnetfeldlinse transportierte den Elektronenpuls effizient von der ersten zur zweiten Beschleunigungsstufe [6]: Azimutale Magnetfelder entstanden in einer Plasmakapillare, durch die eine Hochspannung einen Entladungsstrom von 650 A trieb. Diese Felder refokussierten über eine Distanz von wenigen Zentimeter den Elektronenpuls, der nach der ersten Beschleunigungsstufe leicht divergierte. Dadurch beschleunigte die Plasmawelle der zweiten Stufe einen signifikanten Anteil der Elektronen nach.

Dieses Experiment ist ein Meilenstein für die plasmabasierte Elektronenbeschleunigung, weil es die limitierenden Effekte überwindet. Dank der ausschließlich

plasmabasierten Komponenten bleibt dieser mehrstufige Plasmabeschleuniger mit einer Länge unter zehn Zentimeter sehr kompakt. Einer Kombination sehr vieler Beschleunigungsstufen steht nun nichts mehr im Weg, was auch in Europa Gegenstand der Forschung ist [7]. Damit könnten plasmabasierte Elektronenbeschleuniger in naher Zukunft auch Energien von 10 GeV übertreffen. In kleineren Laboren rücken damit Experimente in greifbare Nähe, die derzeit noch sehr große konventionelle Beschleunigeranlagen benötigen.

Malte C. Kaluza

Prof. Dr. Malte C. Kaluza, Physikalisch-Astronomische Fakultät, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena

- [1] A. Pukhov et al., *Appl. Phys. B* **74**, 335 (2002)
- [2] W. Leemans et al., *Phys. Rev. Lett.* **113**, 245002 (2014)
- [3] O. Lundh et al., *Nature Phys.* **7**, 219 (2011)
- [4] A. Buck et al., *Nature Phys.* **7**, 543 (2011)
- [5] S. Steinke et al., *Nature* **530**, 190 (2016)
- [6] J. van Tilborg et al., *Phys. Rev. Lett.* **115**, 184802 (2015)
- [7] www.eupraxia-project.eu

■ Über Perkolation zur Turbulenz

Die raumzeitliche Dynamik turbulenter Flecken in ausgedehnten Systemen deutet gerichtete Perkolation an.

Strömungsmuster zeigen eine faszinierende Vielfalt: Streifen in der Jupiteratmosphäre, in Wirbelstraßen nach einem Hindernis oder in Hurrikanen, Windhosen oder anderen Phänomenen. Jedes dieser Muster scheint für sich allein zu bestehen und eine individuelle Erklärung zu erfordern. Aber auch hinter solch großskaligen räumlichen Mustern können universelle Gesetzmäßigkeiten stecken, wie nun zwei Experimente an prototypischen Scherströmungen im Übergangsbereich von laminarer zu turbulenter Strömung zeigen [1, 2].

Im Mittelpunkt der Experimente stehen Strömungen, in denen Turbulenz auftritt, ohne dass das laminare Strömungsprofil instabil wird. Dazu gehören neben der Rohrströmung auch die Strömung zwischen zwei gegeneinander verscherten parallelen Platten (die ebene Couette-Strömung) und

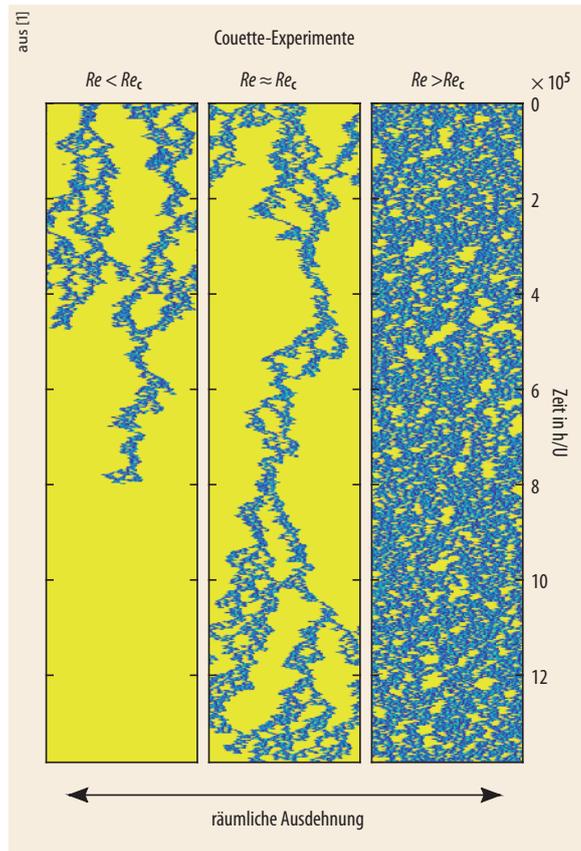
die druckgetriebene Strömung zwischen zwei Platten (die ebene Poiseuille-Strömung). Wie bei vielen anderen Strömungen wird das Verhalten durch eine dimensionslose Kennzahl bestimmt, die Reynolds-Zahl Re . Sie ergibt sich aus der Strömungsgeschwindigkeit U , dem halben Plattenabstand h und der kinematischen Viskosität ν gemäß $Re = Uh/\nu$. Bei kleinen Re zerfallen alle Störungen, und das laminare Profil ist stabil. Bei höheren Re wachsen aus starken Störungen turbulente Flecken, obwohl das laminare Profil gegenüber kleinen Störungen noch stabil ist. In den Flecken reicht die Turbulenz von Platte zu Platte, ist allerdings in den beiden anderen Richtungen heterogen, sodass sich in Draufsicht ein Wechsel zwischen laminaren und turbulenten Gebieten zeigt.

Die turbulenten Flecken haben ihre eigene Dynamik: Sie strecken

sich in Strömungsrichtung oder quer dazu aus, ziehen sich zusammen, teilen sich auf oder zerfallen auch gelegentlich. So entstehen in einer Raum- und einer Zeitrichtung die in Abb. 1 gezeigten, an Dendriten erinnernden verästelten Muster. Da die Bewegung im Details sehr kompliziert ist, dient zur weiteren Beschreibung eine gemittelte Größe: der Anteil der Fläche, der turbulent ist. Da dieser Flächenanteil mit der Reynolds-Zahl variiert – bei kleinen Re (ohne Turbulenz) verschwindet er; bei großen Re erreicht er den Wert 1 –, beschreibt er als Ordnungsparameter den Übergang von der laminaren zur vollentwickelten, raumfüllenden Turbulenz.

Björn Hof vom Institute of Science and Technology Austria und Kollegen untersuchen diesen Ordnungsparameter für die ebene Couette-Strömung [1]. Um die Advektion durch die Bewegung der

Abb. 1 In der ebenen Couette-Strömung zeigen sich raumzeitliche Muster turbulenter (dunkel) und laminarer (hell) Gebiete. Unterhalb der kritischen Reynolds-Zahl Re_c zerfällt die Turbulenz, während an der kritischen Schwelle immer einzelne turbulente Bereiche im System erhalten bleiben. An einer festen Position kann die Turbulenz verschwinden und zu späterer Zeit wieder erscheinen. Auch oberhalb von Re_c bleiben kleine nicht-turbulente Bereiche bestehen, die allerdings mit zunehmender Reynolds-Zahl wieder immer weniger werden.



Platten zu eliminieren, schließen sie das System zu einem Kreisring. Krümmungseffekte können vernachlässigt werden, da der Abstand der Platten klein gegen den Radius ist. Allerdings ist die Höhe limitiert, sodass das System effektiv quasi-eindimensional in der Bewegungsrichtung ist. Im Experiment wird zunächst bei höheren Re ein turbulenter Zustand erzeugt, der dann Ausgangspunkt für die Untersuchungen bei niedrigeren Re ist. Ist die Ziel-Reynolds-Zahl unterhalb einer kritischen Schwelle Re_c , zerfällt die Turbulenz vollständig, und ein laminarer Zustand entsteht. Bei höheren Re verbleibt ein Teil des Gebiets turbulent. Diesen Anteil p_{turb} vermisst das Team um Björn Hof als Funktion von Re und findet $p_{\text{turb}} \approx \varepsilon^\beta$, wobei $\varepsilon = (Re - Re_c)/Re_c$ ist und der kritische Exponent $\beta \approx 0,28$ beträgt.

Masaki Sano und Keiichi Tamai von der Universität Tokio untersuchen eine in der Breite ausgedehnte ebene Poiseuille-Strömung [3]. Dazu verfolgen sie in einem fast sechs Meter langen Aufbau turbulente Flecken bei ihrer Bewegung stromabwärts. Ein Gitter im Ein-

strömungsbereich erzeugt permanent und über die gesamte Breite des Aufbaus turbulente Störungen, die stromabwärts zerfallen, bis nur noch ein Bruchteil der Fläche turbulent ist. Die Daten zeigen, dass p_{turb} bei kleinen Re exponentiell gegen Null strebt, bei höheren Re aber einen festen Anteil erreicht, der mit wachsendem Re zunimmt (Abb. 2). In diesem Experiment ergibt sich

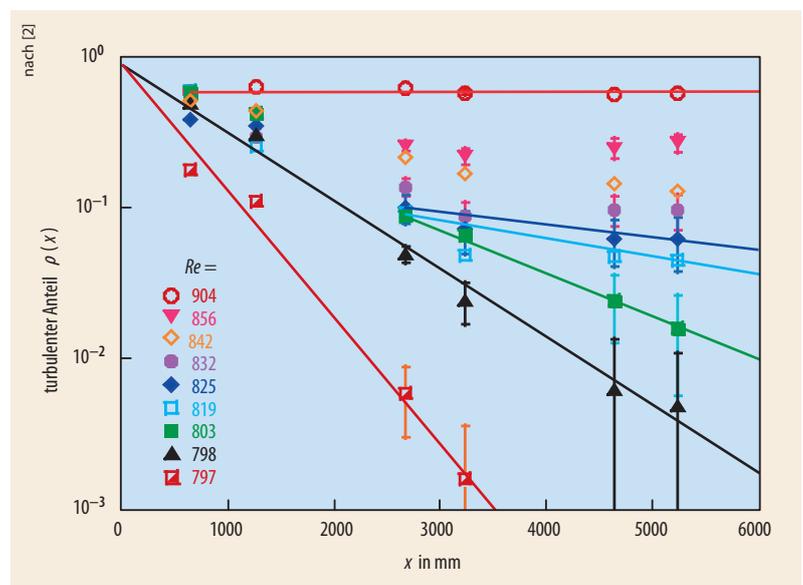


Abb. 2 Der turbulente Anteil in der ebenen Poiseuille-Strömung zerfällt exponentiell unterhalb von $Re_c \approx 830$. Oberhalb von Re_c gibt es immer einen turbulenten Anteil.

der Exponent zu $\beta \approx 0,58$ und belegt die andere Dimensionalität des Problems.

Yves Pomeau (Gewinner der Boltzmann-Medaille des Jahres 2016) erkannte schon vor dreißig Jahren die Bedeutung von Fronten für die Beschreibung raumzeitlicher Muster [3]. Beide Experimente überprüfen seine Spekulation, dass der Übergang zu raumfüllenden Mustern zur Universalitätsklasse der gerichteten Perkolation gehören sollte. Wie bei der normalen Perkolation geht es darum, zwischen zwei Rändern eine Verbindung herzustellen, längs der etwa ein Fluid ein poröses Material durchdringen kann. Bei der gerichteten Perkolation ist die Zeitachse eine relevante Richtung, sodass Wege gesucht werden, längs derer man von einem turbulenten Gebiet zum nächsten voranschreiten kann. Bei $Re < Re_c$ enden die Wege nach einer Weile, während es bei $Re > Re_c$ immer zusammenhängende Gebiete gibt, was sich daran zeigt, dass der Ordnungsparameter einen von Null verschiedenen Wert annimmt (Abb. 2). Der Übergang ist erreicht, wenn zu jedem Zeitpunkt wenigstens ein turbulenter Bereich existiert, der zudem mit den früheren und nachfolgenden verbunden ist. Die langen Korrelationen im Übergangsbereich erfordern sehr lange und – in zwei Dimensionen – sehr breite Systeme.

Daher arbeiten beide experimentellen Gruppen mit sehr schmalen Spalten (250 μm [1] bzw. 5 mm [2]) und sehr langen Systemen. Das stellt enorme Herausforderungen an die Präzision und Stabilität der Aufbauten. Aber nur so kommt man nahe genug an die kritischen Punkte heran, um den Übergang zu charakterisieren.

Die Theorie der gerichteten Perkolation [4] sagt für den kritischen Exponenten im turbulenten Anteil p_{turb} die Werte $\beta \approx 0,276$ im Eindimensionalen bzw. $\beta \approx 0,583$ im Zweidimensionalen voraus, was mit den Beobachtungen sehr gut übereinstimmt. Auch weitere Exponenten – etwa für räumliche Korrelationslängen – stimmen im Rahmen der experimentellen Genauigkeit überein. Damit sind die raumzeitlichen Muster beim Übergang zur Turbulenz nach der Elektrokonvektion in Flüssigkristallen [5] das zweite System, in dem gerichtete Perkolation experimentell untersucht ist.

Die Übereinstimmung in den Exponenten ist ein starker Hinweis auf die Universalitätsklasse der gerichteten Perkolation. Allerdings passen nicht alle Eigenschaften zusammen. So setzt gerichtete Perkolation eine räumlich lokalisierte Wechselwirkung zwischen den turbulenten Bereichen voraus, aber die Geschwindigkeiten und der Druck fallen nur langsam ab. Weiter ergibt sich aus den Untersuchungen der kohärenten Strukturen im Übergangsbereich ein recht gutes Verständnis der lokalen Dynamik [6]; im Detail fehlt die Verbindung mit der räumlichen Dynamik der Fronten, sodass die Abbildung auf einfache Gittermodelle noch aussteht. Schließlich ist die Existenz anderer stabiler Zustände oberhalb des Übergangs [7] nicht mit der Universalitätsklasse vereinbar [8].

Zur Klärung dieser Fragen sind genauere experimentelle Untersuchungen, numerische Simulationen und die Entwicklung geeigneter Modelle für die Bewegung laminar-

turbulenter Grenzen erforderlich. Das Verständnis der Evolution von räumlich heterogenen Mustern vor einem turbulenten Hintergrund trägt zum Verständnis weiterer großskaliger Heterogenität in turbulenten Strömungen bei, wie sie im gerade anlaufenden DFG-Schwerpunktprogramm SPP 1881 „Turbulente Superstrukturen“ untersucht wird.

Bruno Eckhardt

Prof. Dr. Bruno Eckhardt, AG Komplexe Systeme, Philipps-Universität Marburg, Renthof 6, 35032 Marburg

- [1] G. Lemoult et al., *Nature Phys.* **12**, 254 (2016)
- [2] M. Sano und K. Tamai, *Nature Phys.* **12**, 249 (2016)
- [3] Y. Pomeau, *Physica D* **23**, 3 (1986)
- [4] K. Takeuchi et al., *Phys. Rev. Lett.* **99**, 234503 (2007)
- [5] F. H. Busse, *Physik Journal*, November 2004, S. 20
- [6] H. Hinrichsen, *Adv. Phys.* **49**, 815 (2000)
- [7] T. Kreilos, T. M. Schneider und B. Eckhardt, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 044503 (2014)
- [8] Y. Pomeau, *Nature Phys.* **12**, 198 (2016)



Neugierig?

Sachbücher von WILEY-VCH

Jetzt auch als E-Books unter:
www.wiley-vch.de/ebooks



GERD GANTEFÖR
Alles NANO oder was?
Nanotechnologie für Neugierige

ISBN: 978-3-527-32961-8
 September 2013 220 S. mit 176 Abb.
 Gebunden € 24,90

Alles NANO, oder was? Das fragen sich immer mehr Menschen. Die Computer werden intelligenter, die Handys kleiner. Die Nanotechnologie bietet schon heute beachtliche Anwendungen. Noch mehr allerdings faszinieren die Möglichkeiten, die in der Zukunft liegen, zum Beispiel in der Medizin. Können spezielle Nanopartikel tatsächlich bald gezielt Krebszellen attackieren?

Zeit für eine Bestandsaufnahme: Was ist Nanotechnologie? Wo kommt sie bereits zum Einsatz? Was kann sie in Zukunft leisten? Und welche Gefahren sind mit ihr verbunden? All diese Fragen beantwortet Gerd Ganteför, Professor für Physik, in diesem Buch.

58791101_308_bu

Wiley-VCH • Postfach 10 11 61
 D-69451 Weinheim

Tel. +49 (0) 62 01-606-400
 Fax +49 (0) 62 01-606-184
 E-Mail: service@wiley-vch.de

WILEY-VCH

www.wiley-vch.de/sachbuch

Irrtum und Preisänderungen vorbehalten. Stand der Daten: August 2013