

## ■ Grenzenlose Turbulenz

Eine mehr als 50 Jahre alte Vorhersage über den Wärmetransport in thermischer Konvektion wurde jetzt mit Hilfe des Taylor-Couette-Systems verifiziert.

Eine der großen Fragen bei der Erforschung turbulenter Strömungen ist die nach ihren Transporteigenschaften: Wie effizient führen die raumzeitlich chaotischen Geschwindigkeitsfelder chemische Stoffe, Wärme oder einzelne Partikel mit? Um dies zu untersuchen, haben sich zwei Modellsysteme bewährt, die sich auf den ersten Blick unterscheiden, bei näherer Betrachtung aber sehr ähnlich sind [1] – das Rayleigh-Bénard- und das Taylor-Couette-System. Beim Rayleigh-Bénard-System ist eine Fluidschicht von zwei horizontalen Platten begrenzt, von denen die untere geheizt ( $T_b$ ) und die obere gekühlt ( $T_t$ ) wird (Abb. 1a). Die Dichteunterschiede zwischen den warmen und kalten Bereichen treiben das Fluid an. Leicht lässt sich messen, wie viel Wärme zwischen den Platten ausgetauscht wird. Der Wärmefluss normiert mit dem Wärmetransport ohne Strömung ergibt die dimensionslose Nusselt-Zahl  $Nu$  [2]. Die Rayleigh-Zahl  $Ra$  beschreibt die Höhe des thermischen Antriebs und ist proportional zur Temperaturdifferenz zwischen den Platten.

Im Taylor-Couette-System ist ein Fluid zwischen zwei coaxialen Zylindern unterschiedlicher Radien eingeschlossen (Abb. 1b). Der innere Zylinder rotiert schneller ( $\Omega_i$ ) als der äußere ( $\Omega_o$ ), sodass durch die

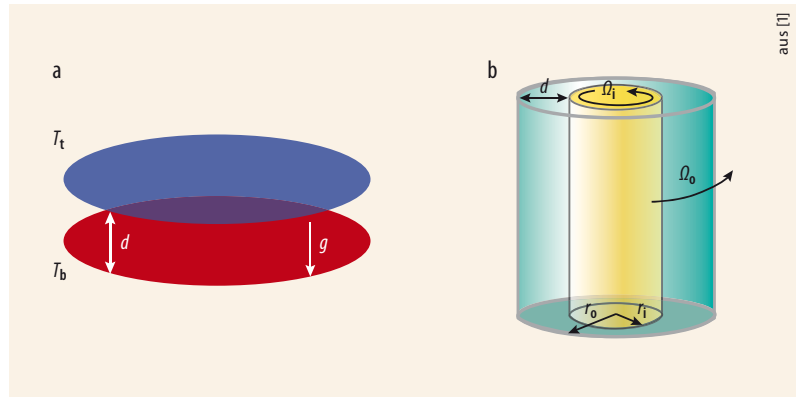


Abb. 1 Das Rayleigh-Bénard-System (a) und das Taylor-Couette-System (b) erlau-

ben es, Transporteigenschaften turbulenter Strömungen zu untersuchen.

höhere Zentrifugalbeschleunigung Fluid mit hohem Drehimpuls vom inneren zum äußeren Zylinder gelangt. Dagegen strömt Fluid mit geringem Drehimpuls zum inneren Zylinder. Der globale Transport von Drehimpuls entspricht dem Drehmoment, das nötig ist, um die Zylinder gegeneinander zu rotieren. Analog zum Rayleigh-Bénard-System lässt sich eine Nusselt-Zahl  $Nu_w$  definieren als das Verhältnis aus dem globalen Drehmoment und dem Drehmoment, das in einer rein laminaren Strömung zu erwarten ist [3]. Der Steuerparameter ist die Taylor-Zahl  $Ta$ , die proportional zum Quadrat der Differenz der Winkelgeschwindigkeiten zwischen den Zylindern ist.

Die Strömung ist in beiden Systemen geprägt durch periodische

Rollen, die sich über die gesamte Fluidschicht erstrecken und bei Überschreiten einer kritischen Zahl  $Ra$  bzw.  $Ta$  auftreten. Diese Strukturen werden mit zunehmenden Zahlen  $Ra$  bzw.  $Ta$  turbulent, sind aber weiterhin im Zeit-gemittelten Strömungsfeld gut erkennbar.

Die Frage liegt nahe, wie  $Nu$  bzw.  $Nu_w$  von  $Ra$  bzw.  $Ta$  abhängt. Für das Rayleigh-Bénard-System ist diese Frage für die numerisch und experimentell leicht zugänglichen  $Ra$ -Bereiche ( $Ra \leq 10^{14}$ ) gut erforscht [4]. Dort ergeben sich Potenzgesetze der Form

$$Nu \propto Ra^\gamma \text{ mit } \gamma \approx 0,3. \quad (1)$$

Obwohl im Inneren der Fluidschicht die Strömung hochgradig turbulent ist, sind in diesen  $Ra$ -Bereichen die Grenzschichten an beiden Platten überwiegend laminar. Allerdings sollten auch die Grenzschichten bei hinreichend großem  $Ra$  zur Turbulenz übergehen. 1962 postulierte Robert Kraichnan, dass für diesen Fall gilt [5]:

$$Nu \propto Ra^{1/2} [\log(Ra)]^{-3/2}. \quad (2)$$

Der Wärmetransport erhöht sich also erheblich, da die Strömung in der turbulenten Grenzschicht auch eine Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Grenzfläche besitzt, die Wärme mitführen kann. In einer laminaren Grenzschicht strömt das Fluid nur parallel zur Grenzfläche. Wärme lässt sich dann

### KURZGEFASST

#### ■ Eiskaltes flüssiges Wasser

Reines Wasser kann auch unter  $0^\circ\text{C}$  flüssig vorliegen. Seine Temperatur lässt sich aber schwer exakt bestimmen. Physiker haben kürzlich am GSI Helmholtzzentrum einen Wassertropfen bei  $-42,6^\circ\text{C}$  nachgewiesen. Dazu beobachteten sie das Schrumpfen des Tropfens bei sinkender Temperatur, indem sie gestreutes Laserlicht analysierten. Mit dieser Spektroskopie lassen sich Flüssigtargets optimieren. Sie könnte auch helfen, die Eisbildung in der Atmosphäre besser zu verstehen. C. Goy et al., Phys. Rev. Lett. **120**, 015501 (2018)

#### ■ Still pulsierender Neutronenstern

Für gewöhnlich verraten sich rotierende Neutronensterne anhand eines pulsierenden Radiosignals. Nun wurde mit dem verteilten Rechenprojekt Einstein@Home in den Daten des Fermi-Teleskops ein Pulsar gefunden, der bei Radiofrequenzen still ist. Er dreht sich zwar pro Sekunde 213 Mal um die eigene Achse, sendet dabei aber nur Gammastrahlung aus. Dieses Verhalten erfordert neue theoretische Modelle. Im Zentrum der Milchstraße könnte es tausende stille Gammapulsare geben. C. J. Clark et al., Science Advances **4**, eaa07228 (2018)

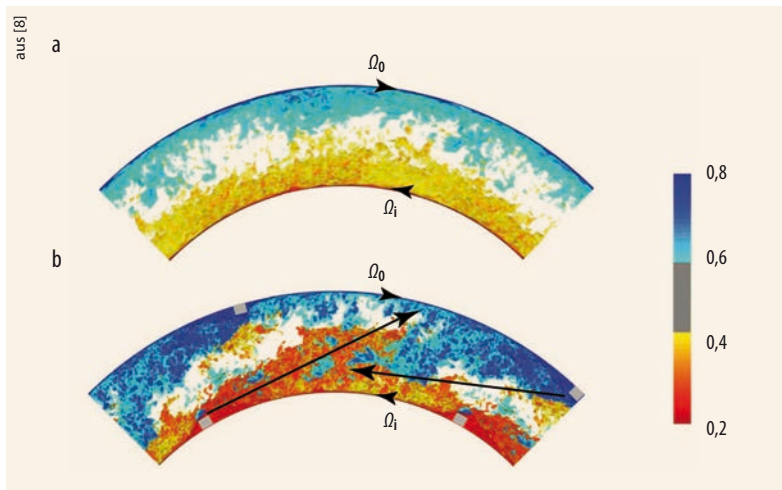


Abb. 2 Horizontaler Querschnitt der simulierten azimuthalen Geschwindigkeitskomponente im Taylor-Couette-System bei  $Ta = 2,15 \times 10^9$ . Im Fall glatter Wände (a) ist ein sehr starker Abfall (bzw. Anstieg) direkt an der Grenzschicht zu erkennen, während die Fluktuationen im Zentrum eher schwach sind (hellblau

und gelb). Bei aufgebrachten Hindernissen (grau, b) treten auch im Zentralbereich dunkelrote und dunkelblaue Gebiete auf. Durch die Hindernisse lösen sich Fluidvolumen hoher Winkelgeschwindigkeit von den Grenzflächen ab und werden in die Zentralbereiche transportiert (lange schwarze Pfeile).

nur durch Diffusion von der Grenzfläche abtransportieren.

Der logarithmische Term in Gl. (2) berücksichtigt, dass auch in einer turbulenten Grenzschicht direkt an den Platten immer eine viskose Unterschicht existiert, in der Wärme nur durch Diffusion transportiert wird. Diese Unterschicht schrumpft mit zunehmender Rayleigh-Zahl und verliert für den Wärmetransport an Bedeutung. Daher strebt die Nusselt-Zahl mit zunehmendem thermischen Antrieb asymptotisch gegen  $Nu \propto Ra^{1/2}$ . In diesem „Asymptotic Ultimate Regime“ spielen Grenzschichten keine Rolle mehr; der Wärmefluss ist durch die Transporteigenschaften der turbulenten Strömung bestimmt. Da Konvektion in der Natur meist bei sehr hohen  $Ra$  stattfindet, ist es wichtig, diesen Zustand zu untersuchen.

Im Rayleigh-Bénard-System ist es aber schwierig, genügend große Rayleigh-Zahlen zu erreichen, da in den Grenzschichten die Scherspannungen relativ gering sind [6]. Im Taylor-Couette-System gilt Gl. (2) ganz analog, wenn man  $Ra$  durch  $Ta$  ersetzt [1]. Turbulente Grenzschichten lassen sich hier viel einfacher erreichen, weil die Scherung an den Grenzflächen das Fluid direkt antreibt [7].

In einer aktuellen Arbeit haben Forscher um Detlef Lohse von der Universität Twente im Taylor-Couette-System das „Asymptotic Ultimate Regime“ erreicht und den asymptotischen Exponenten von  $\gamma \approx 0,5$  gemessen [8]. Hierzu nutzten sie Computersimulationen, um Details der Strömungsfelder zu erforschen (Abb. 2), sowie Experimente, in denen sie große  $Ta$  und damit starke Turbulenz erreichten. Die Experimente erfolgten in einer Taylor-Couette-Apparatur mit fast einen Meter hohen Zylindern, die mit bis zu 20 Hz rotierten [9]. Dies ermöglicht  $Ta$  von bis zu  $10^{13}$ . Um die viskose Unterschicht an den Grenzflächen zu eliminieren, waren an beiden Zylindern kleine Balken angebracht. Anschließend ermittelten sie den effektiven Exponenten  $\gamma_{\text{eff}}$  durch Fitten des Potenzgesetzes  $Nu_w \propto Ta^{\gamma_{\text{eff}}}$  an die Messdaten. Ohne Hindernisse ergab sich  $\gamma_{\text{eff}} = 0,38$ . Dieser Wert zeigt, dass die viskosen Unterschichten an den Grenzflächen vorhanden sind – und damit auch der logarithmische Term im Analogon zu Gl. (2). Mit Hindernissen an beiden Grenzflächen betrug  $\gamma_{\text{eff}} = 0,50$  – das System befindet sich nun im Asymptotic Ultimate Regime. Zum Vergleich erfolgten Untersuchungen, bei denen die Hindernisse nur innen bzw.

nur außen aufgebracht waren. In diesen Fällen ergab sich  $\gamma_{\text{eff}} = 0,43$  bzw.  $0,42$  – die viskose Grenzschicht existiert nur an der äußeren beziehungsweise inneren Grenzfläche. Die Hindernisse beeinflussen das Strömungsfeld deutlich (Abb. 2). Während ohne Hindernisse sehr kleine bzw. große azimuthale Geschwindigkeiten nur direkt an den Grenzflächen auftreten, gelangt mit Hindernissen Fluid mit extremen azimuthalen Geschwindigkeiten tief in die Zentralbereiche.

Die Forscher betrachteten zudem die Rate  $\varepsilon_w$ , mit der sich kinetische Energie aufgrund innerer Reibung in Wärme umwandelt. Im Zentralbereich des Spaltes folgt  $\varepsilon_w$  immer dem gleichen Potenzgesetz  $\varepsilon_w \propto Ta^\beta$  mit  $\beta = 1,50$ , unabhängig von Hindernissen. Nahe der inneren Zylinderwand erhöht sich  $\beta$  aber deutlich, sobald an dieser Grenzfläche Hindernisse angebracht sind. Während  $\beta$  dort ohne Hindernisse  $1,32$  beträgt, steigt dieser Wert mit Hindernissen auf  $\beta = 1,49$  und erreicht damit ähnliche Werte wie im turbulenten Zentralbereich.

Die neuen Messungen über den Wärmefluss im „Asymptotic Ultimate Regime“ sind von entscheidender Bedeutung, um theoretische Modelle zum Transport skalarer Größen in turbulenten Strömungen zu verifizieren. Das ist wichtig, um besonders großskalige turbulente Systeme, z. B. in der Erdatmosphäre oder in astrophysikalischen Systemen, zu verstehen, die sich nicht im Labor oder im Computer modellieren lassen.

Stephan Weiss

- [1] F. H. Busse, *Physics* **5**, 4 (2012)
- [2] O. Shishkina, S. Weiss und E. Bodenschatz, *Phys. Rev. Fluids* **1**, 062301 (2016)
- [3] B. Eckhardt, S. Grossmann und D. Lohse, *J. Fluid Mech.* **581**, 221 (2007)
- [4] G. Ahlers, S. Grossmann und D. Lohse, *Rev. Mod. Phys.* **81**, 503 (2009)
- [5] R. H. Kraichnan, *Phys. Fluids* **5**, 1374 (1962)
- [6] X. He et al., *Phys. Rev. Lett.* **108**, 024502 (2012)
- [7] S. Grossmann, D. Lohse und C. Sun, *Annu. Rev. Fluid Mech.* **48**, 53 (2016)
- [8] X. Zhu et al., *Nature Physics* (2018), doi.org/10.1038/s41567-017-0026-3
- [9] D. P. M. van Gils et al., *Rev. Sci. Instr.* **82**, 025105 (2011)

Dr. Stephan Weiss,  
Max-Planck-Institut  
für Dynamik und  
Selbstorganisation,  
Am Faßberg 17,  
37077 Göttingen