

■ Den Fliehkräften auf der Spur

Zentrifugalkräfte werden in Untersuchungen rotierender Konvektionsströmungen meist ignoriert, weil sie in natürlichen Systemen keine große Rolle spielen. Dabei lässt man sich viel spannende Physik entgehen.



Abb. 1 Isoflächen des Temperaturfeldes in numerischen Simulationen rotierender Konvektion: Ein Fluid in einem rotierenden Zylinder wird von unten geheizt und von oben gekühlt. Abhängig von der Stärke der Coriolis- und Zentrifugal-

kräfte bilden sich verschiedene Strömungsregime aus: Konvektion mit vernachlässigbaren Rotationseffekten (a), starken Coriolis- und schwachen Zentrifugalkräften (b), starken Zentrifugal- und schwachen Corioliskräften (c) und

starken Zentrifugal- und Corioliskräften (d). Die in (c) dargestellten Zustände ähneln Tornados, die Strukturen in (d) erinnern an die „Augen“ und „Eyewalls“ in tropischen Wirbelstürmen.

Konvektionsströmungen sind in der Natur weit verbreitet. Sie transportieren die tief im Inneren der Sonne erzeugte Energie durch deren äußere Schicht bis an die sichtbare Oberfläche, von wo aus sie ins Universum abgestrahlt wird und damit das Leben auf der Erde ermöglicht. In den Riesenplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun durchmischen heftige Konvektionsströmungen das Planeteninnere und erzeugen dabei möglicherweise die gewaltigen zonalen Windströmungen, welche die Planetenoberflächen prägen – eine Hypothese, zu deren Klärung im Fall des Jupiter die NASA-Mission Juno beitragen soll [1]. Auch das Erdmagnetfeld, das uns vor kosmischer Strahlung schützt, entsteht durch Konvektionsströmungen im flüssigen, äußeren Eisenkern unseres Heimatplaneten [2].

Konvektion ist so relevant, weil neben ihr nur zwei weitere Mechanismen bekannt sind, die Wärme transportieren: Wärmeleitung und Strahlung. Auf großen Skalen ist Wärmeleitung sehr ineffizient, und Strahlung kann sich oft nicht ungehindert ausbreiten. Sind beide Prozesse zu schwach, um bestehende Temperaturunterschiede auszugleichen, bleibt nur Konvektion übrig.

In geo- und astrophysikalischen Objekten ist sie allgegenwärtig.

Eine wichtige Rolle für die Dynamik spielen hier meist auch die Corioliskräfte, die mit der Rotation der Objekte einhergehen. Eindrucksvoll zu bewundern ist das auf Wetterkarten, auf denen die Windrichtung vorzugsweise entlang der Isobaren verläuft – die Corioliskraft lenkt die Luftteilchen ab und verhindert, dass sie auf direktem Weg von den Hochdruck- zu den Tiefdruckgebieten gelangen. Im Erdkern erzeugen die Corioliskräfte helikale Strömungen, die nach heutigem Kenntnisstand eine Schlüsselrolle bei der Entstehung des Erdmagnetfeldes spielen [2]. Auch die Tatsache, dass die zonalen Windsysteme der Riesenplaneten deren Rotationsachsen umkreisen, ist ein untrügliches Zeichen für den Einfluss der Corioliskräfte.

Aufgrund ihrer großen Bedeutung werden rotierende Konvektionsströmungen intensiv erforscht. Beliebt ist dabei eine rotierende Variante des sog. Rayleigh-Bénard-Systems, das aus einer ebenen Fluidschicht besteht, die von unten geheizt wird und um eine vertikale Achse rotiert. In Laborexperimenten begrenzt eine zylindrische Seitenwand das Fluid (**Abb. 1**).

Um natürliche Systeme realistisch abzubilden, sind in den Experimenten stark turbulente Strömungen erwünscht, die durch die Corioliskraft massiv beeinflusst werden. Dazu sind mit anwachsender Turbulenz immer höhere Rotationsraten nötig. Dies führt zu einem Dilemma: Denn mit wachsender Rotation nehmen auch die Fliehkräfte zu und übertreffen irgendwann sogar die Gravitationskraft.

Für die Geo- und Astrophysik ist dieses Regime, abgesehen von exotischen Ausnahmen, nicht besonders relevant. Hier bleiben die Zentrifugalkräfte im Vergleich zur Gravitation meistens klein und beeinflussen das Schwerepotential nur marginal. Dass die Corioliskräfte dennoch oft stark sind, liegt an der enormen Größe von Planeten und Sternen im Vergleich zu den Experimenten. Die Fluidteilchen benötigen bei ihrer Reise innerhalb der Strömungswirbel oft deutlich länger als eine Rotationsperiode, um die großen Distanzen zu überwinden, und spüren daher die Corioliskraft deutlich. Laborexperimente sind viel kleiner und benötigen viel höhere Rotationsraten, um bei ausgeprägter Turbulenz genügend starke Corioliskräfte zu garantieren.

Doch dann dominieren schnell auch die unerwünschten, quadratisch mit der Rotationsfrequenz anwachsenden Zentrifugalkräfte.

Susanne Horn und Jonathan Aurnou von der University of California in Los Angeles haben sich die Rolle der Zentrifugalkräfte in rotierender Rayleigh-Bénard-Konvektion genauer angesehen und dabei Überraschendes herausgefunden [3]. Sie simulierten die in Experimenten zu erwartenden Strömungen numerisch und konnten ermitteln, wann genau die Zentrifugalkräfte wichtig werden. Bislang hatte man angenommen, dies geschehe, wenn das Verhältnis aus Zentrifugal- und Erdbeschleunigung, die sog. Froude-Zahl, einen festen Schwellenwert überschreitet. Da die maximal auftretende Zentrifugalkraft vom Radius des verwendeten Fluidcontainers abhängt, wurden in den letzten Jahren immer schmalere und höhere Experimente konstruiert, um einerseits die Fliehkräfte im Zaum zu halten, und andererseits die Turbulenz bei gleichzeitig dominanten Corioliskräften weiter zu steigern [4]. Susanne Horn und Jonathan Aurnou zeigen nun aber, dass dieser Ansatz problematisch ist: Die Froude-Zahl, bei der die Zentrifugalkräfte ins Spiel kommen, ist keineswegs konstant, sondern entspricht in Wirklichkeit dem Verhältnis aus Radius und Höhe des Versuchsaufbaus. Mit anderen Worten: In hohen und schmalen Gefäßen können selbst vermeintlich kleine Zentrifugalkräfte die Ergebnisse signifikant verfälschen. Was das genau für den experimentell zugänglichen Parameterbereich bedeutet, müssen weitere Studien klären. Möglicherweise sind den Wissenschaftlern engere Grenzen gesetzt als erhofft.

Susanne Horn und Jonathan Aurnou gehen in ihrer Studie noch einen Schritt weiter und untersuchen mithilfe numerischer Simulationen auch die durch Zentrifugalkräfte dominierten Zustände, die bislang wenig Beachtung gefunden hatten. Hier lassen sich, abhängig von der Stärke der Corioliskräfte, zwei Regime unterscheiden. Im ersten Fall sind Corioliskräfte unbe-

deutend, und der Wärmetransport erhöht sich durch die Zentrifugaleffekte. Im zweiten Regime besteht die dominierende Kräftebalance aus Coriolis-, Druck- und zentrifugalen Auftriebskräften, wodurch sich der Wärmetransport verringert. Die Strömungsfelder haben sehr interessante Eigenschaften. Insbesondere bilden sich Strukturen aus, die Tornados ähneln oder ein „Auge“ samt zugehöriger „Eyewall“ entwickeln und an tropische Wirbelstürme erinnern (Abb. 1). Hier gibt es offenbar viel spannende Physik zu entdecken. Das ist die gute Nachricht: Die im Experiment bislang unerwünschten, durch starke Zentrifugalkräfte geprägten Zustände sind viel interessanter als bislang angenommen – und bergen möglicherweise sogar Einsichten in ganz andere geophysikalische Systeme als die, auf die man es ursprünglich abgesehen hatte.

Stephan Stellmach

- [1] Y. Kaspi et al., *Nature* 555, 223 (2018)
- [2] C. A. Jones, *Treatise on Geophysics* (2nd Edition), Elsevier, Oxford, S. 115 (2015)
- [3] S. Horn und J. M. Aurnou, *Phys. Rev. Lett.* 120, 204502 (2018)
- [4] J. S. Cheng et al., arXiv:1703.02895 (2018)

Dr. Stephan Stellmach, Institut für Geophysik, Universität Münster, Corrensstraße 24, 48149 Münster