

Physik: Veröffentlichung in PNAS

Thermodynamik kreiselnder Teilchen

23.7.2026 - Arne Claussen | Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Physiker von Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf (HHU), TU Darmstadt, La Sapienza-Universität in Rom und von der Universität Camerino (beide Italien) haben die fundamentalen thermodynamischen Gesetze eines Gases von kreiselnden Teilchen berechnet. In der Fachzeitschrift Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) zeigen sie, dass sich der Druck dieses Gases wie derjenige eines normalen Gases verhält, nur mit erhöhter Temperatur. Zusätzlich treten aber lokalisierte Oberflächenströme auf, die für gezielte Teilchentransporte nutzbar sind.

Das sogenannte ideale Gasgesetz ist eine der Grundlagen der Thermodynamik: Nach ihm ist der Druck eines Gases proportional zur Dichte und zur Temperatur. Druck ist, mikroskopisch gesehen, die mittlere Kraft pro Fläche, die durch heranfliegende Teilchen beim Aufprall und der Reflektion darauf ausgeübt wird. Bei höherer Temperatur sind die Teilchen schneller, deshalb erzeugen auftreffende Teilchen einen höheren Druck.

Ein Forschungsteam um Prof. Dr. Hartmut Löwen vom Institut für Theoretische Physik II der HHU stellte sich nun die Frage, ob das ideale Gasgesetz auch für selbst-angetriebene, sogenannte „aktive“ Teilchen gilt, oder ob die Nichtgleichgewichtssituation zu signifikanten Abweichungen führt. Beteiligt waren, neben den Düsseldorfer Physikern, Kollegen aus Rom, Camerino und Darmstadt.

Prof. Löwen zu den in PNAS veröffentlichten Ergebnissen: „Wir beantworten diese Frage gleichzeitig mit Ja und Nein: Das ideale Gasgesetz gilt zwar nicht mehr, wir können es aber durch die Interpretation retten, dass im Nichtgleichgewicht eine effektiv höhere Temperatur herrscht.“

Im Mittelpunkt standen insbesondere „chirale“ aktive Teilchen: selbst fortbewegende Objekte, die sich nicht auf einer geraden Linie bewegen, sondern systematisch auf einer Kreisbahn driften, also quasi kreiseln. Solche Teilchen kommen häufig in der Natur vor, zu ihnen gehören zum Beispiel Algen und rotierende Akaziensamen. Technisch sind magnetisch getriebene Kolloidpartikel zu nennen, mit denen die Zähigkeit in Stoßdämpfern erhöht und gesteuert werden kann.

Nähert sich ein solches selbst drehendes Objekt einer Oberfläche, dann gibt es neben der normalen Reflektion zwei Zusatzbeiträge zum Druck, der auf die Oberfläche ausgeübt wird: Einerseits resultiert ein erhöhter Druck, der sogenannte aktive Schwimmdruck, aus der Eigenbewegung. Andererseits sorgt die Eigenrotation der Teilchen für eine Tangentialbewegung des Objekts an der Oberfläche, die den Schwimmdruck senkt.

Prof. Löwen: „Analytisch sieht es wie das ideale Gasgesetz aus, mit einer aktivitätsabhängigen effektiv höheren Temperatur. Es ist erstaunlich, dass es überhaupt eine Zustandsgleichung im Nichtgleichgewicht gibt; das bedeutet, dass der Druck nur von wenigen Parametern, aber nicht von den Wandeigenschaften abhängt.“

Prof. Dr. Lorenzo Caprini von der La Sapienza-Universität ist Erstautor der Studie: „Die tangentialen Bewegung an den Wänden führt zu einem gerichteten Teilchenstrom an den Grenzen, der quantitativ berechnet werden kann. Interessanterweise ergibt sich hier eine Analogie zu sogenannten topologischen Isolatoren, welche nur auf der Oberfläche eines Körpers Strom tragen

können.“

An der HHU wurden die theoretischen Vorhersagen in einem Experiment mit kreiselnden Minirobotern bestätigt. Doktorand Marco Musacchio führte dieses Experiment maßgeblich durch: „Unser experimenteller Aufbau stellt die rotierenden Systeme optimal nach und erlaubt einen quantitativen Vergleich mit der Theorie, der erstaunlich erfolgreich ist.“

Mitautor Prof. Dr. Benno Liebchen aus Darmstadt ergänzt: „Unsere Ergebnisse stellen nicht nur die fundamentale Basis einer Nichtgleichgewichtsthermodynamik von Kreisschwimmern dar. Sie können perspektivisch auch eine nützliche Grundlage für Anwendungen bilden. Zu denken ist hier an die Herstellung von Flussfeldern, die nur an Systemrändern wirksam sind und so einen effizienten Transport etwa von Wirkstoffen ermöglichen.“

Originalpublikation

L. Caprini, M. Musacchio, U. M. B. Marconi, B. Liebchen, H. Löwen; Active thermodynamics of inertial chiral active gases: equation of state and edge currents; PNAS 123 (29) e2532158123, 17. Juli 2026

DOI: 10.1073/pnas.2532158123

<https://www.hhu.de/die-hhu/presse-und-marketing/aktuelles/pressemeldungen-der-hhu/news-detailansicht/thermodynamik-kreiselnder-teilchen>