

Unterschätzte Schmelzrate

Die Wasseranomalie beeinflusst die Schmelzrate von Eis massiv.

Olga Shishkina

Durch die globale Erwärmung schmelzen die Gletscher – mit enormen Folgen für das Klima. Daher ist es notwendig, die Prozesse des Schmelzens und Gefrierens von Eis in Gewässern und die Strukturen der sich dabei bildenden globalen Konvektionsströme genau vorhersagen zu können. Unter anderem ist es sehr wichtig, die Dynamik der geophysikalischen Morphologie, insbesondere die Abschmelzgeschwindigkeit der Gletscher, zuverlässig prognostizieren zu können.

Eisschmelzprozesse sind komplex, insbesondere aufgrund der turbulenten Natur der sich bildenden Wasserströme sowie der Wechselwirkung zwischen der Flüssigkeitsbewegung und der Form des Eises. Nicht nur Turbulenzen und die dynamische Grenze zwischen Eis und Wasser wirken sich dramatisch auf die Entstehung von Strömungen und letztlich auf die Schmelzgeschwindigkeit des Eises aus, sondern auch die in frühen Studien oft vernachlässigte Anomalie der Wasserdichte.

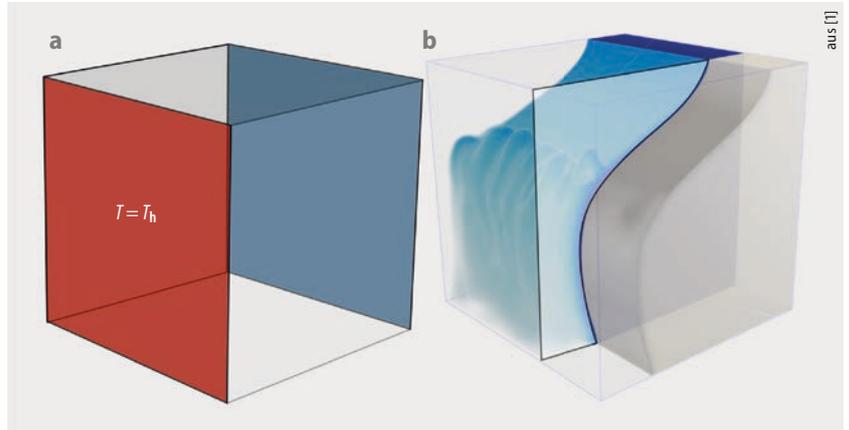


Abb. 1 Die Temperatur an der linken Wand des kubischen Gefäßes beträgt T_h , die an der gegenüberliegenden Wand beträgt 0 °C . Zu Beginn ist das Gefäß mit Eis gefüllt. Bei $T_h = 10\text{ °C}$ (b) schmilzt Wasser an der warmen Wand und steigt aufgrund der geringeren Dichte auf. Aufgrund der Wasseranomalie bildet sich eine zweite Flüssigkeitsrolle aus.

Detlef Lohse und seine Mitarbeitenden an der Universität Twente in den Niederlanden haben diesen Zusammenhang in numerischen Experimenten entdeckt, indem sie die Eisschmelze in einem kubischen Gefäß modellierten [1]. Hierbei nahmen sie an, dass das Gefäß zu Beginn vollstän-

dig mit Eis gefüllt war und dass die konstante Temperatur einer vertikalen Gefäßwand $T_h > 4\text{ °C}$ beträgt und die Temperatur der gegenüberliegenden Wand 0 °C . Die anderen zwei Seiten sind ideal wärmeisolierend (**Abb. 1**).

Warmes Wasser ist leichter als kaltes und steigt auf, während kälteres

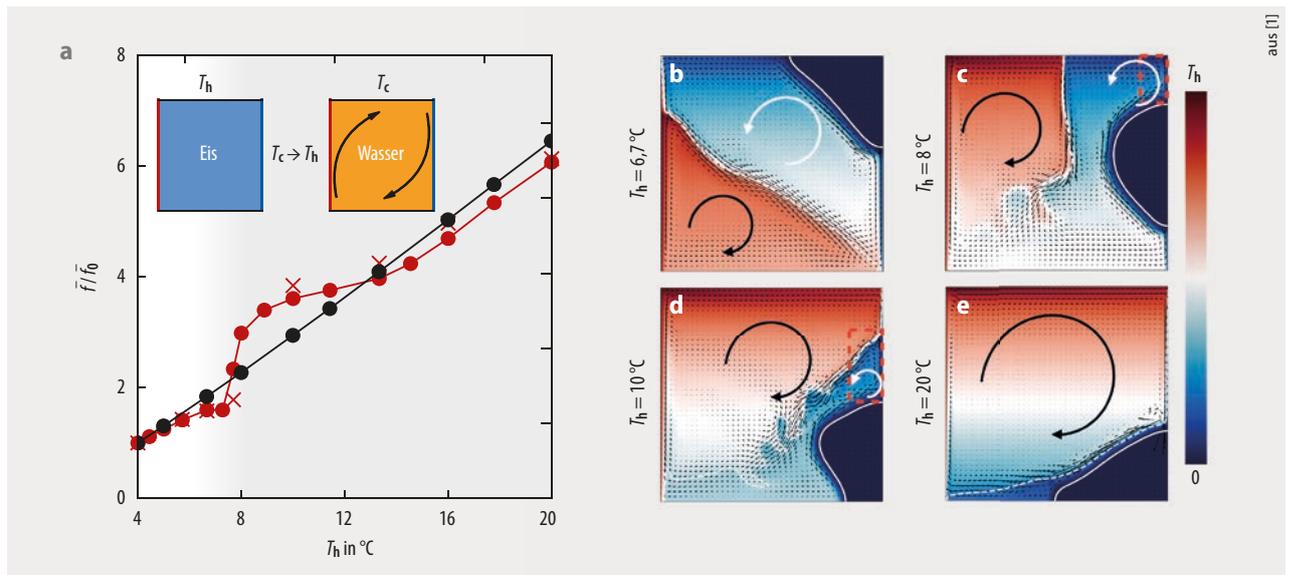


Abb. 2 Ohne Wasseranomalie wäre die Schmelzrate \bar{F} (in a normiert durch die Schmelzrate \bar{F}_0 bei 4 °C) eine monoton steigende Funktion der Heiztemperatur T_h (schwarze Linie). Unter Berücksichtigung der Anomalie der Wasserdichte (rot) weicht die Schmelzrate bei 8 bis 12 °C deutlich ab. Je nach Temperatur T_h unterscheiden sich die Geschwindigkeits- und Temperaturverteilungen stark ($b - e$). Zwei konkurrierende Flüssigkeitsrollen bestimmen hier die Strömungsstruktur. Die weißen gepunkteten Linien zeigen die 4 °C -Konturlinien, die weißen durchgezogenen Linien die Grenzflächen zwischen Eis und Wasser.

Wasser dichter ist und sinkt. Dies gilt aber nur für eine Wassertemperatur über $T_c \approx 4\text{ °C}$, wo die Wasserdichte maximal ist. Bei Temperaturen unter T_c steigt das kältere Wasser auf.

Gäbe es keine Wasseranomalie, wäre die Dichte des Wassers eine monoton fallende Funktion der Temperatur. Dann würde sich nur eine warme Flüssigkeitsrolle bilden, die entlang der erwärmten Wand aufsteigt und entlang der Eisoberfläche und der kalten Wand absinkt. Der Wärmefluss (proportional zur Temperaturableitung in Richtung der Normalen) durch die warmen und kalten vertikalen Wände würde monoton mit T_h zunehmen. Als Ergebnis wäre die Eisschmelzrate, die antiproportional zur gesamten Eisschmelzzeit ist, eine monoton steigende, nahezu lineare Funktion von T_h (schwarz in **Abb. 2a**).

In der Nähe der beheizten Wand ist die Temperatur höher als T_c , daher steigt wärmeres Wasser entlang dieser Wand auf. In unmittelbarer Nähe des Eisblocks ist die Schmelzwassertemperatur kleiner als T_c , daher tendiert auch das Schmelzwasser nach oben, welches das Eis umströmt. So entstehen zwei benachbarte und konkurrierende Flüssigkeitsrollen (**Abb. 2b – e**), eine im Uhrzeigersinn (warm), die andere entgegen (kalt). Beide zusammen bestimmen die globale Strömungsstruktur.

Bei hoher Seitenwandtemperatur T_h ist die Auswirkung der kalten Flüssigkeitsrolle (und damit der Wasserdichteanomalie) gering, während bei niedrigem T_h eine vergleichsweise starke kalte Flüssigkeitsrolle entsteht. Diese verhindert, dass das warme Wasser an die kalte Wand gelangt, und reduziert dadurch den Wärmefluss durch die kalte Wand. Die erhöhte Differenz zwischen dem in das System eintretenden und dem austretenden Wärmestrom trägt dazu bei, das Eisschmelzen zu beschleunigen. Dieser Effekt ist besonders ausgeprägt für $T_h \approx 8 - 12\text{ °C}$ (**Abb. 2a** und **Abb. 3**). In diesem Bereich bewirkt eine kleine Erhöhung von T_h eine erhebliche, nahezu zweifache Vergrößerung der Schmelzrate. Ohne Berücksichtigung der Wasseranomalie wäre die Schmelzrate stark unterschätzt.

Für quantitative Vorhersagen haben die Forschenden aus Twente ein auf Energieerhaltung basierendes theoretisches Modell [2] weiterentwickelt und auf ihr System angewandt. Dies führt zu einem allgemeineren Ausdruck, der die Wärmeströme durch die vertikalen Wände, die durchschnittliche Wassertemperatur, den durchschnittlichen Abstand von der Eisoberfläche zur beheizten Wand und die Eisschmelzrate in Beziehung setzt. Diese theoretischen Ergebnisse sind allgemeingültig und werden durch die numerischen Experimente vollständig bestätigt.

Den hierbei offenbarten Zusammenhang gilt es nun, auf andere Kon-

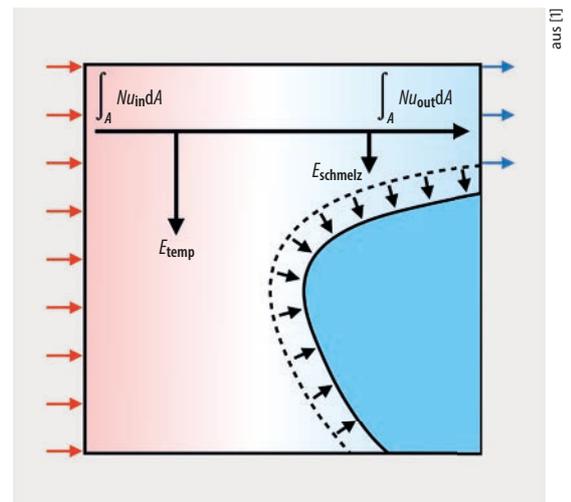


Abb. 3 Der lokale Wärmefluss durch die beheizte Wand (Nu_{in}) und durch die gekühlte (Nu_{out}) wird durch die Nusselt-Zahl beschrieben, die das Vielfache des rein diffusiven Wärmetransports ist. Der gesamte Wärmefluss, der durch die warme Wand in das System eintritt (Integral von Nu_{in}), erwärmt das Wasser, schmilzt das Eis und verlässt teilweise das System durch die kalte Wand (Integral von Nu_{out}).

figurationen von Eisschmelzsystemen mit anderen Wärmequellen zu verallgemeinern [3, 4]. Darüber hinaus ist es erforderlich, die Eisschmelze auch im Kontext von Meerwasser zu untersuchen. Dort hängt die dem Dichtemaximum entsprechende Temperatur von der Salzkonzentration ab. Die Ergebnisse der Gruppe aus Twente haben auch große Bedeutung für die Industrie, da dort ebenfalls Flüssigkeiten mit Dichteanomalien, etwa Phosphor und Silizium, zum Einsatz kommen.

Am Schmelzprozess gibt es noch viel zu untersuchen. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse werden ein wichtiger Bestandteil unseres Verständnisses des Klimawandels sein.

- [1] R. Yang, K. L. Chong, H.-R. Liu, R. Verzicco und D. Lohse, Phys. Rev. Fluids 7, 083503 (2022)
- [2] B. Favier, J. Purseed und L. Duchemin, J. Fluid Mech. 858, 437 (2019)
- [3] Z. Wang, E. Calzavarini und C. Sun, Europhys. Lett. 135, 54001 (2021)
- [4] Z. Wang et al., Proc. Natl. Acad. Sci. 118, 10 (2021)

Die Autorin

Dr. Olga Shishkina, Theory of Turbulent Convection Group, Max Planck Institute for Dynamics and Self-Organization, Am Fassberg 17, 37077 Göttingen

Kurzgefasst

Proben von Ryugu im Labor

Die ersten Ergebnisse mineralogischer und chemischer Analysen der Gesteinsproben vom Asteroiden Ryugu liegen vor. Die japanische Raumsonde Hayabusa2 hatte die Proben von der Oberfläche und aus tieferen Schichten des Asteroiden entnommen und im Dezember 2020 zur Erde zurückgebracht. Weltweit untersuchen sechs Gruppen die Proben mit unterschiedlichen Methoden, darunter auch Forschende aus Deutschland. In der chemischen Zusammensetzung ähneln die Proben der Photosphäre der Sonne. Die Analysen deuten außerdem darauf hin, dass Ryugu zwar am äußersten Rand des Sonnensystems entstand, dann aber nach innen wanderte.

T. Yokoyama et al., Science (2022), DOI: 10.1126/science.abn7850

Noch weiter verschränkt

Ein Forschungsteam aus München und Saarbrücken hat es geschafft, zwei Atome mittels einer Glasfaser Verbindung über eine Strecke von 33 km miteinander zu verschränken. Dazu regten sie Rubidium-Atome in einer optischen Falle mit einem Laserpuls an, die bei der Abregung Photonen emittierten. Deren gemeinsamer Nachweis nach dem Durchlaufen des Glasfaserkabels signalisierte die Verschränkung der Atome. Entscheidend war es, die Wellenlänge der Photonen mit Quantenfrequenzkonvertern auf 1517 nm zu bringen, um die Verluste im Kabel zu minimieren. Das Experiment ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg zum Quanteninternet auf Basis bestehender Glasfaser-Infrastruktur.

T. van Leent et al., Nature 607, 69 (2022)