

Die Form verrät die Temperatur

Ob und welche Strukturen schmelzendes Eis ausbildet, hängt aufgrund der Dichteanomalie des Wassers stark von der Umgebungstemperatur ab.

Detlef Lohse

Ein schmelzender Eisblock verliert Ecken und Kanten – so lehrt es im Sommer die Erfahrung mit Eiswürfeln im Saftglas. Dagegen entwickeln die Reste von tauendem Schnee oder Eis manchmal seltsam geformte Oberflächen, wenn beim Schmelzen Inhomogenitäten auf unterschiedlichen Längenskalen auftreten. Dem braucht nicht eine ungleichmäßige Erwärmung zugrundezuliegen, sondern es passiert auch durch einen intrinsischen und ganz universellen Prozess. Ein solcher zeigt sich zum Beispiel, wenn ein Eisberg im Ozean unterhalb der Wasserkante schmilzt und regelmäßige, auffällige Strukturen entstehen.

Leif Ristroph – einer der Pioniere der Geomorphologie [1, 2] – hat diesen Prozess nun mit Kolleg:innen an der New York University an einem einfachen und gut kontrollierbaren Modellsystem untersucht. Dazu ließen sie einen zylindrischen Eisblock in einem großen wassergefüllten Tank mit kontrollierter Umgebungswassertemperatur T_U schmelzen [3]. Abhängig von der Wassertemperatur entwickelten sich deutlich verschiedene



Phillip Colla / Oceanlight.com

Die erodierten Vertiefungen an der Oberfläche entstanden beim Schmelzen des Eises, als sich dieser Teil des Eisbergs unter Wasser befand. Als der Eisberg dabei kopflastig wurde, kippte er und legte die Strukturen an der Oberfläche frei.

Formen. So bildete sich bei 4°C ein sehr spitzer, eiszapfenähnlicher Kegel aus, der nach unten zeigte (**Abb. 1a**); bei 8°C war die Spitze nach oben ausgerichtet (**Abb. 1c**). Für Temperaturen zwischen 5 und 7°C entstanden komplexere Strukturen. Die Wellenlänge der schalenförmigen Mulden ist temperaturabhängig (**Abb. 1b**, $T_U = 5,6^\circ\text{C}$). Aus der makroskopischen Struktur des schmelzenden Zylinders lässt sich demnach die Temperatur des umgebenden Wassers ablesen.

Die spitzen Formen sind einfach mit der Dichteanomalie des Wassers zu erklären. Weil das Dichtemaximum bei etwa 4°C vorliegt, ist das etwa 0°C kalte Schmelzwasser leichter als das umgebende Wasser. Daher steigt das Schmelzwasser nach oben auf (**Abb. 2a**). Dort verzögert es das weitere Schmelzen des Eiszylinders, während dessen unterer Teil im wärmeren Wasser weiter schmilzt und eine nach unten gerichtete Spitze entsteht. Der umgekehrte Fall tritt bei 8°C auf, wenn das kalte Schmelzwasser schwerer ist und absinkt (**Abb. 2c**). Der interessanteste Fall ergibt sich für die mittleren Umgebungswasser-

temperaturen (**Abb. 2b**). Gegenläufige Trends stehen im direkten Wettstreit miteinander: Je nach Abstand vom Phasenrand zwischen Eis und Wasser steigt das Schmelzwasser auf oder sinkt ab. Dadurch entsteht eine starke, letztlich instabile Scherströmung. Aus dieser Kelvin-Helmholtz-Instabilität [4] entwickelt sich im Wasser eine Rollenstruktur wohldefinierter, höhenabhängiger Wellenlänge.

Beim Schmelzen des Eiszylinders ergibt sich ein sogenanntes Stefan-Problem, bei dem sich die Grenzfläche zweier Phasen – hier Eis und Wasser – während des Phasenübergangs verändert. Mathematisch gesehen handelt es sich um ein Randwertproblem für ein System partieller Differentialgleichungen mit beweglichem Rand zwischen den beiden Phasen [5]. Für den im Wasser schmelzenden Eisblock gilt es, die Navier-Stokes-Gleichung für das Geschwindigkeitsfeld mit angekoppelten Auftriebskräften zu beachten (Impulserhaltung). Die Inkompressibilitätsbedingung stellt die Massenerhaltung sicher; die Energieerhaltung steckt in der Advektionsgleichung für das Temperaturfeld, an

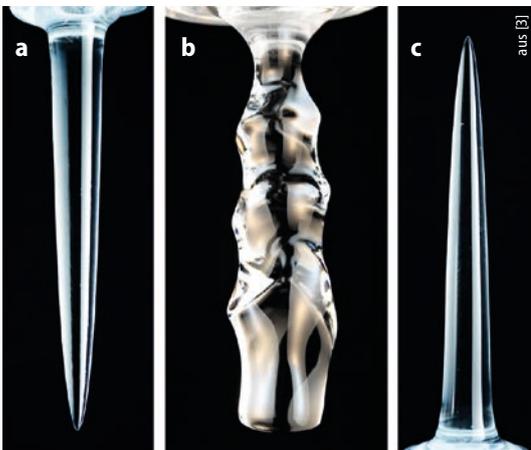


Abb. 1 Ein zylindrischer Eisblock schmilzt in Wasser bei weniger als 5°C Wassertemperatur zu einer nach unten gerichteten Spitze (a). Zwischen 5 und 7°C entwickeln sich bizarre Formen (b) und oberhalb von 7°C ein nach oben zeigender Kegel (c).

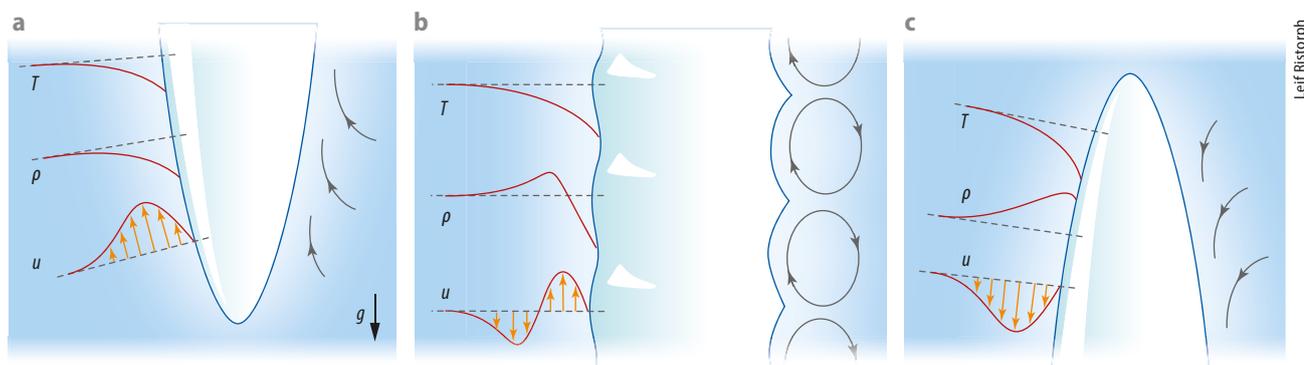


Abb. 2 Für verschiedene Umgebungstemperaturen ergeben sich unterschiedliche Strömungsmuster im Wasser (graue Pfeile). Für eine Umgebungstemperatur unterhalb 5 °C (a), zwischen 5 und 7 °C (b) sowie oberhalb 7 °C (c) sind auch die Profile von Temperatur T , Dichte ρ und Geschwindigkeit u gezeigt.

die am Phasenrand der Energieeintrag durch die Schmelzwärme angekoppelt ist. Ristroph und sein Team haben diese partiellen Differentialgleichungen zusammen mit einer Entwicklungsgleichung für den Phasenrand und den entsprechenden Randbedingungen numerisch gelöst [3]. So ließ sich ohne jeglichen freien Parameter das Schmelzen der Eiszylinder quantitativ beschreiben. Der Vergleich von numerischer Analyse und Experiment ergab eine quantitative Übereinstimmung bei allen relevanten Größen wie Wellenlänge, Spitzenradius und Schmelzrate.

Bemerkenswert ist, dass ein beliebig spitzer Kegel entstehen kann, weil die Krümmung der Spitze in endlicher Zeit divergiert. Schmelzprozesse glätten also keinesfalls alles! Die Höhenabhängigkeit der Wellenlänge

der Strukturen bei mittleren Temperaturen lässt sich analytisch aus den Skalengesetzen der thermischen Konvektion herleiten [6].

Ebenso bemerkenswert ist es, dass letztlich die Wasserstoffbrückenbindungen, die ja für die Anomalie des Wassers sorgen, zu den makroskopischen Strukturen von einigen Zentimetern Größe führen – ein Vielskalenphänomen par excellence.

Die vorliegende Arbeit enthält nicht nur originelle Experimente und Simulationen, die Ergebnisse von ungewöhnlich ästhetischer und intellektueller Schönheit liefern. Sie ist auch höchst relevant, um zum Beispiel das Schmelzen von Gletscherzungen besser zu verstehen. Heutige Modelle, welche die Geschwindigkeit beschreiben, weichen manchmal bis zu zwei Größenordnungen von den Be-

obachtungen ab [7]. Für quantitative Voraussagen gilt es, die neuen Simulationen auf Salzwasser zu verallgemeinern. Das ist hochgradig nichttrivial: Die Zeitskala der Salzdifffusion ist beinahe drei Größenordnungen kleiner als die der thermischen Diffusion, sodass es zu doppelt-diffusiver Konvektion im Temperatur- und Salzkonzentrationsfeld kommt. Dabei können beispielsweise Diffusionsfinger entstehen [8, 9]. Trotz des großen Fortschritts durch die Arbeit von Ristroph und Kolleg:innen [3] sind wir daher noch weit von einem quantitativen Verständnis der Gletscherschmelze entfernt.

- [1] L. Ristroph et al., Proc. Nat. Acad. Sci. **109**, 19606 (2012)
- [2] L. Ristroph, J. Fluid Mech. **838**, 1 (2018)
- [3] S. Weady et al., Phys. Rev. Lett. **128**, 044502 (2022)
- [4] T. E. Faber, Fluid Dynamics for Physicists, Cambridge University Press, Cambridge, UK (1995)
- [5] L. Rubinstein, The Stefan problem, American Mathematical Society, Providence, USA (1971)
- [6] S. Grossmann und D. Lohse, J. Fluid. Mech. **407**, 27 (2000)
- [7] J. Stroeve et al., Geophys. Res. Lett. **34**, L09501 (2007)
- [8] R. W. Schmitt, Annu. Rev. Fluid Mech. **26**, 255 (1994)
- [9] T. Radko, Double-Diffusive Convection, Cambridge University Press, Cambridge, UK (2013)

Der Autor

Prof. Dr. Detlef Lohse, Physics of Fluids, Max Planck – University of Twente Center for Complex Fluid Dynamics, Department of Science and Technology, University of Twente, Niederlande und Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation, Am Faßberg 17, 37077 Göttingen

Kurzgefasst

Spinnennetz als Detektor

Nanomechanische Resonatoren sind in der Lage, winzige Vibrationen bei sehr hohen Frequenzen nachzuweisen. Thermische Schwingungen können die Messung verfälschen, daher werden sie nahe des absoluten Temperaturnullpunkts betrieben. Nun hat ein Team der TU Delft einen Resonator entwickelt, der bei Raumtemperatur arbeitet. Als Vorbild für das Design dienten Spinnennetze. Die mittels maschinellem Lernen optimierten Resonatoren aus Siliziumnitrid (Si_3N_4) erreichten Qualitätsfaktoren von mehr als 10^9 . Mit dieser Empfindlichkeit könnte es den Detektoren gelingen, Dunkle Materie nachzuweisen.

D. Shin et al., Adv. Mater. **34**, 2106248 (2022)

Stabile Seifenblasen

Seifenblasen platzen nach kurzer Zeit, weil ihre Haut Flüssigkeit durch Verdampfen verliert oder das Gas aus ihrem Inneren diffundiert. Forscher aus Lille und Paris gelang es nun, eine Blase zu erzeugen, die 465 Tage lang stabil blieb: ein neuer Weltrekord. Dazu kombinierten sie zwei bereits bekannte Techniken. Zum einen stabilisierten sie die Flüssigkeit mit winzigen Plastikperlen, zum anderen nutzten sie Glycerol, um das Verdampfen zu reduzieren. Ein eigens entwickeltes Modell half dabei, die optimale Zusammensetzung der drei Komponenten zu finden. Damit lassen sich auch superstabile Flüssigkeitsfilme erzeugen.

A. Roux et al., Phys. Rev. Fluids **7**, L011601 (2022)