

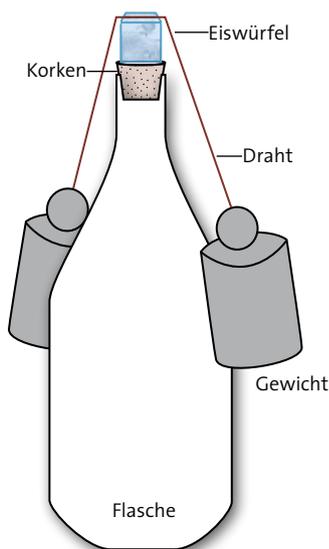
# Glatt daneben

Erst eine dünne Wasserschicht macht Eis wirklich rutschig. Doch wie sie genau entsteht, wissen nur wenige.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Eine gefrorene Wasserpflütze hat einiges mit einer Glasscheibe gemeinsam: Beide sind feste Körper, mehr oder weniger durchsichtig und ziemlich glatt. »Glatt« im Sinn von glitschig ist allerdings nur das Eis, während trockenes Glas dem darüberreibenden Finger erheblichen Widerstand entgegensetzt. Und so verbindet man den Begriff der Eisesglätte kaum mehr mit Ebenheit, vielmehr hat er es geradezu zum Synonym für Glitschigkeit oder Rutschigkeit gebracht. Ist etwas eisglatt, dann scheint die Reibung aufgehoben zu sein, und es gibt kein Halten mehr – zur Freude der Wintersportler und zum Schrecken der Autofahrer.

Warum aber ist Eis glatt – und Glas nicht? Jeder glaubt das zu wissen, doch die meisten liegen mit ihrer Antwort falsch. Unsere Schulweisheit, der zufolge die Eisoberfläche durch den starken Druck etwa von Schlittschuhkufen schmilzt und so ein schmierender Wasserfilm entsteht, stimmt nämlich nicht.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH H. JOACHIM SCHLICHTING

Trotzdem scheint Wasser eine Rolle zu spielen. Aus dem Alltag wissen wir, dass auch bei Temperaturen weit über dem Gefrierpunkt Glitseffekte auftreten, wie wir sie vom Glatteis kennen; wenn etwa der Fliesenfußboden nass ist. Selbst eine Glasscheibe muss man nur anfeuchten, damit sie extrem glatt wird. Stellen wir also die Hypothese auf, dass Feuchtigkeit ein Grund für Glätte ist. Doch würde flüssiges Wasser auf Eis nicht sofort gefrieren?

Um das Rätsel zu lösen, schauen wir uns erst einmal das Schlittschuhkufenargument näher an. Materie weicht einer Erhöhung des Drucks in der Regel aus, indem sie ihr Volumen verringert; wachsender Druck kann also Stoffe verfestigen. Eis bildet dabei die große Ausnahme: Auf Druckerhöhung reagiert es ebenfalls mit Volumenabnahme, doch wird es dabei nicht fester, sondern schmilzt vielmehr – denn Wasser ist einer der wenigen Stoffe, die erstarrt ein größeres Volumen als flüssig besitzen.

Diesen Sachverhalt untermauert man gerne durch ein einfaches, aber ein wenig irreführendes Experiment (Grafik). Dazu legt man einen dünnen Draht über einen Eisquader und belastet ihn mit schweren Gewichten. Unter dem Druck schmilzt das Eis, so dass der Draht allmählich durch den Eisquader hindurchschmilzt, während oberhalb der Eisklotz wieder zusammenfriert.

Das Phasendiagramm des Wassers informiert uns darüber, dass es bei ei-

**Beschwert man einen über einen Eiswürfel gespannten Draht, lässt ihn nicht nur der Druck durch das Eis hindurchschmelzen. Auch die durch den Draht zum Auflagepunkt fließende Wärme hilft dabei mit.**

Oft wundern wir uns über das Erstaunlichste nicht, weil es uns seit Langem bekannt ist und darum selbstverständlich scheint.

*Carl Friedrich von Weizsäcker (1912–2007)*

ner Temperatur von  $-1$  Grad Celsius eines Drucks von 14 Millionen Pascal bedarf, um Eis um 1 Grad zu erwärmen und damit zum Schmelzen zu bringen. Da der mechanische Druck  $p$  dem Quotienten aus Kraft  $F$  und Fläche  $A$  entspricht, also  $p = F / A$ , und die Auflagefläche von Kufen sehr klein ist, üben Schlittschuhläufer recht großen Druck aus. Geht man von einem Menschen mit einer Masse  $m = 80$  Kilogramm aus und nimmt die Erdbeschleunigung  $a \approx 10$  Meter / Sekunde<sup>2</sup> hinzu, errechnet sich die Gewichtskraft zu  $F = m \cdot a \approx 800$  Newton. Im Fall sehr feiner Kufen mit einer Auflagefläche von 0,0001 Quadratmetern, das ist ein Quadratzentimeter, üben diese dann einen Druck von 8 Millionen Pascal aus. Das ist viel, reicht aber noch lange nicht zum Schmelzen des Eises.

## Nicht nur der Druck spielt eine Rolle

Nur bei Eistemperaturen ganz in der Nähe des Nullpunkts könnte sich ein merklicher Effekt ergeben – darin besteht eine weitere, aber meist übersehene Botschaft des Eisquaderexperiments. Dann ist die zu überwindende Temperaturdifferenz so niedrig, dass neben dem Druck auch ein zweiter Faktor eine wichtige Rolle spielt, nämlich die Wärmeleitfähigkeit des auf dem Eis aufliegenden Materials. Das Durchschmelzen funktioniert nämlich nur deshalb so gut, weil der Metalldraht Wärme bestens leitet und sie dem Auflagepunkt immer neu zuführt. Ersetzt man ihn durch einen gleich dicken Nylonfaden, läuft der Vorgang wesentlich langsamer ab.

So oder so führt kein Weg an der Erkenntnis vorbei, dass das Druckschmelzen nur bei Temperaturen nahe des Gefrierpunkts überhaupt von Belang ist.



**Schmale Kufen, hoher Druck: Das reicht angeblich, um fast reibungslos über das Eis zu gleiten. Diese Schulweisheit stimmt nur leider nicht. Die Oberfläche von Eis ist immer schon »vorgeschmolzen«.**

Daraus folgt umgekehrt, dass Eis bei größerer Kälte stumpf wie eine trockene Glasscheibe sein müsste. Ist es aber nicht: Erfahrungsgemäß liegt die optimale Temperatur für den Eiskunstläufer bei  $-5,5$  Grad Celsius, für Eishockey sogar bei  $-9$  Grad. Und selbst wenn die Temperaturen auf  $-30$  Grad Celsius absinken, kann man auf gefrorenen Seen noch Schlittschuh laufen.

Auf der Suche nach besseren Erklärungen stieß man schon bald auf einen weiteren Mechanismus: Könnte Reibungswärme eine wichtige Rolle spielen? In den erhalten gebliebenen Aufzeichnungen von Robert Falcon Scotts Terra-Nova-Expedition, die 1913 tragisch mit dem Tod aller Teilnehmer endete, berichten die Expeditionsmitglieder von Schnee, der sich bei Temperaturen unter  $-40$  Grad Celsius »sandartig« anfühlte. Zumindest wenn es trocken und sehr kalt ist, setzt also auch Schnee, der seinerseits aus feinen Eiskristallen besteht, dem Darübergleiten erheblichen Widerstand entgegen. Mit Wärme reduziert man diesen tatsächlich: Die Energie, die man zur Überwindung der Reibung aufbringen muss, geht auf den

eisigen Untergrund über und trägt dazu bei, dessen Temperatur zu erhöhen. 1997 wiesen Forscher um den US-Amerikaner Samuel C. Colbeck dies auch experimentell nach: Sie versahen Schlittschuhe und Schier mit Wärmefühlern und maßen, wie die Temperatur mit der Geschwindigkeit anstieg.

Unser Problem haben wir damit immer noch nicht gelöst. Denn die Menge an Wärme, die auf diese Weise entsteht, ist nicht der Rede wert. Vor allem aber bleibt Eis bei Minustemperaturen auch dann glatt, wenn der Schlittschuhläufer sich gar nicht bewegt, sondern einfach nur steht. Letztlich taugen also Druck und Reibung allein nicht zur Erklärung.

Das war schon dem für seine Experimente berühmten englischen Naturforscher Michael Faraday aufgefallen. Um 1850 wies er nach, dass Eisblöcke bei Temperaturen unter  $0$  Grad Celsius zusammenfrieren, wenn man sie miteinander in Kontakt bringt, und schloss daraus, dass sie mit einem flüssigen Film überzogen sein müssten. Weil es Faraday aber nicht gelang, seine Kollegen zu überzeugen, gerieten seine Erkenntnisse in Vergessenheit. Erst 100 Jahre später erinnerte man sich ihrer wieder, und es gelang mit verschiedenen Methoden, eine Art Vorschmelzen des Eises nachzuweisen – also ein Schmelzen, noch bevor der eigentliche Schmelzpunkt erreicht ist.

Eine präzise Messung dieses so genannten »Premelting«-Effekts gelang Astrid Döppenschmidt und Hans Jürgen Butt von der Universität Mainz im Jahr 1998. Wie sie mit einem Rasterkraftmikroskop herausfanden, beträgt die Dicke des Wasserfilms auf Eis bei minus  $0,7$  Grad Celsius rund  $70$  Nanometer (milliardstel Meter), während es bei  $-24$  Grad Celsius immerhin noch  $12$  Nanometer sind. Die Dicke des Wasserfilms – und damit die Glitschigkeit des Eises – nimmt also mit der Temperatur ab. Die Untergrenze ist bei  $-33$  Grad Celsius erreicht; wird es noch kälter – wie am Südpol –, gibt es auch keine Schmelzschicht mehr.

Wie aber lässt diese sich mit dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik in Einklang bringen? Ihm zufolge ist die

Natur bestrebt, immer so viel Energie wie möglich an die Umgebung abzugeben. Es wäre also zu erwarten, dass Wassermoleküle eher gefrieren als schmelzen, weil sie auf diese Weise Energie verlieren. Doch für die Energiebilanz spielen auch die Grenzflächen eine Rolle: Offenbar ist mehr Energie erforderlich, eine Grenzfläche zwischen einem perfekten Eiskristall und der Luft zu bilden, als es kostet, die beiden Grenzflächen zwischen Eis und Schmelzschicht beziehungsweise Schmelzschicht und Luft aufrechtzuerhalten. Insgesamt fließt also tatsächlich das Maximum an Energie in die Umgebung. Wer nicht nachrechnen will, kann sich aber auch anschaulich klarmachen, warum Eis zur Ausbildung eines Wasserfilms tendiert: Weil die äußeren Teilchen weniger Bindungen besitzen und daher nicht so fest wie Moleküle im Inneren des Kristalls sitzen, schmilzt die Eisoberfläche schon bei geringeren Temperaturen, als es das Phasendiagramm voraussagt.

Inzwischen haben Forscher in vielen Studien herausgefunden, dass das Phänomen Oberflächenschmelzen nicht nur bei Eis vorkommt, sondern auch bei allen anderen Stoffen. Beispielsweise überzieht sich Blei bereits ab einer Temperatur von  $40$  Grad unterhalb seines Schmelzpunkts mit einem flüssigen Film. Weil die alltäglicheren Materialien meist recht hohe Schmelzpunkte haben – der von Blei liegt bei  $327,5$  Grad Celsius –, weiß das aber kaum jemand. Winterliche Eisesglätte wird uns also auch weiterhin das beste Anschauungsmaterial liefern. 

#### DER AUTOR



#### H. Joachim Schlichting

war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2013 wurde er mit dem Archimedes-Preis für Physik ausgezeichnet.

#### WEBLINKS

Dieser Artikel und Links zu den im Text genannten Publikationen im Internet:  
[www.spektrum.de/artikel/1216440](http://www.spektrum.de/artikel/1216440)