

■ Auf's Glatteis geführt

Über die Physik des Eislaufens ist viel geschrieben worden – auch in renommierten Lehrbüchern. Vieles davon ist falsch oder zumindest unvollständig.

Warum gleiten Schlittschuhkufen auf Eis? Ein Blick in physikalische Lehr- und Schulbücher liefert als Erklärung die Druckaufschmelzung: Weil sich die Last des Eisläufers nur durch die sehr dünnen Kufen überträgt, ist der Druck auf das Eis so hoch, dass dieses schmilzt und ein dünner Wasserfilm entsteht, auf dem die Kufen gleiten. Diese Druckaufschmelzung ist auch von Gletschern bekannt, die durch ihr eigenes Gewicht eine Schmiere geschmolzenen Wassers erzeugen, auf der sie ins Tal gleiten.

Was bei Gletschern funktioniert, muss aber auf das Eislaufen noch lange nicht zutreffen. Das zeigt sich schon beim Stillstehen auf der Eisfläche: Käme es zur Druckaufschmelzung, stünde man schnell in einer Wasserpfütze. Der irische Physiker John Joly hat bereits 1886 berechnet, dass enorm hohe Drücke nötig wären, um das Eis zu schmelzen. Denn nach der Gleichung von Clausius-Clapeyron sinkt der Schmelzpunkt des Eises nur um 0,0077 K, wenn sich der Druck um ein Bar erhöht. Ein Eisläufer, der 75 kg wiegt und Kufen mit einer Auflagefläche von 6 cm² trägt, erzeugt einen Druck von 12,3 bar und damit einen um 0,09 K niedrigeren Schmelzpunkt. Schon bei Eistemperaturen knapp unter dem Gefrierpunkt wäre kein Eislaufen mehr möglich – selbst ein Elefant auf Kufen käme nicht ins Gleiten.

Doch welche Erklärung gibt es dann für das Eislaufen? Heute ist bekannt, dass die Reibungswärme, welche die Kufen bei der Bewegung über das Eis erzeugen, den größten Beitrag zum Schmelzen leistet. Beim Schlittschuhlaufen oder beim Rodel- und Bobsport im Eiskanal erwärmt die



Eric Gevaert, Shutterstock

Mit Schlittschuhen lässt es sich elegant und schnell über das Eis gleiten – wie hier bei den niederländischen Meisterschaften im Marathon auf Natureis.

Reibung die Kufen, und das Eis darunter schmilzt. Ein typischer Eisläufer verflüssigt mit der Reibungswärme bis zu 12 mm³ Eis und erzeugt einen Wasserfilm von bis zu 0,04 mm Dicke. In Wirklichkeit ist der Film noch dünner, weil Wasser seitlich aus der Kontaktstelle entweicht und Wärme nach oben über die Kufen und nach unten ins Eis verloren geht. Gleitet man schneller, verringern sich Wärmeverluste und Reibung.

Doch die Reibung durch die Bewegung kann nicht die einzige Erklärung sein. Das merkt man spätestens, wenn man sich beim ersten Betreten der Eisfläche schmerzhaft auf den Hosenboden setzt: Die schmierende Schicht zwischen Kufe und Eis scheint unabhängig von Gewicht, Temperatur und Bewegung vorhanden zu sein. Diese Hypothese hatte Michael Faraday 1850 geäußert. Er machte den Vorschlag, dass ein Quasi-Flüssigkeitsfilm auf der Oberfläche das Zusammenfrieren zweier Eiswürfel hervorruft. Allerdings konnte er seine Behauptung nicht beweisen. Dazu waren Experimente mit intensivem Röntgenlicht nötig, die erst seit den 1990er-Jahren zur Verfügung stehen. Die Oberfläche von Eis ist immer mit einem flüssigen Film überzogen, der nur

wenige Moleküllagen dick ist. Während die Wassermoleküle im Eis regelmäßig angeordnet sind (Abb. 1), verlieren sie an der Grenze zu Luft ihren Zusammenhalt. Sie befinden sich wie hingewürfelt auf dem darunterliegenden Kristallgitter und lassen sich leicht gegeneinander verschieben. Allerdings handelt es sich nicht um Moleküle in der flüssigen Phase: Neigt man einen Eisklotz, fließt kein Wasser ab. Wasserstoffbrückenbindungen halten die Wassermoleküle zusammen und sind in dem Film stärker als in der flüssigen Phase: Der Wasserfilm ist eine besondere Form der festen Phase mit ungeordneten leicht verschiebbaren Molekülen.

Der experimentelle Nachweis der quasi-flüssigen Wasserschicht auf Eis war mit der üblichen Methode, der Röntgendiffraktometrie, nicht möglich. Für genaue Ergebnisse muss die Probe nämlich ausreichend dick sein, damit das Röntgenlicht zahlreiche Kristalllagen durchdringt. Die nur wenige Nanometer dünne Oberflächenschicht zeigt sich aber nicht im gebeugten Röntgenlicht. Erst ein optischer Trick macht die Röntgendiffraktion auch für dünne Oberflächenschichten empfindlich. Der optische Brechungsindex von Röntgenstrahlung ist in allen Medien kleiner als im



Vakuum. Daher wird die Strahlung unter flachen Winkeln totalreflektiert, und in der dünnen Oberflächenschicht entsteht eine evaneszente Röntgenwelle. Sie dringt nur wenige Nanometer in die Oberfläche ein und liefert Informationen über deren Struktur. Dazu darf der Einfallswinkel nur wenige Milliradian betragen, was einen stark kollimierten Röntgenstrahl erfordert. Bei herkömmlichen Röntgenquellen entsteht diese Strahlqualität durch schmale Schlitzblenden, die gleichzeitig die Intensität reduzieren. Synchrotronstrahlungsquellen wie die 1994 eingeweihte ESRF in Grenoble erzeugen dagegen mithilfe relativistischer Elektronenstrahlen eine laserartige Röntgenstrahlung mit hoher Intensität und Kohärenz sowie definierter Polarisation. Damit zeigte sich, dass Eis an der Oberfläche seine kristalline Struktur einbüßt – zumindest oberhalb von $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dann lockert sich die erste Molekülschicht. Bei $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ kommt die zweite hinzu, sodass die quasi-flüssige Schicht bis zum Schmelzpunkt bei $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ schrittweise immer dicker wird und bis zu 50 nm erreicht. Dabei bedeckt sie die Eisoberfläche nicht gleichmäßig, sondern bildet scheibenförmige Nässezonen, runde Tröpfchen oder Kombinationen aus beiden.

Wie sich dieses Verhalten ändert, wenn eine Schlittschuhkufe oder ein anderer Festkörper auf das Eis

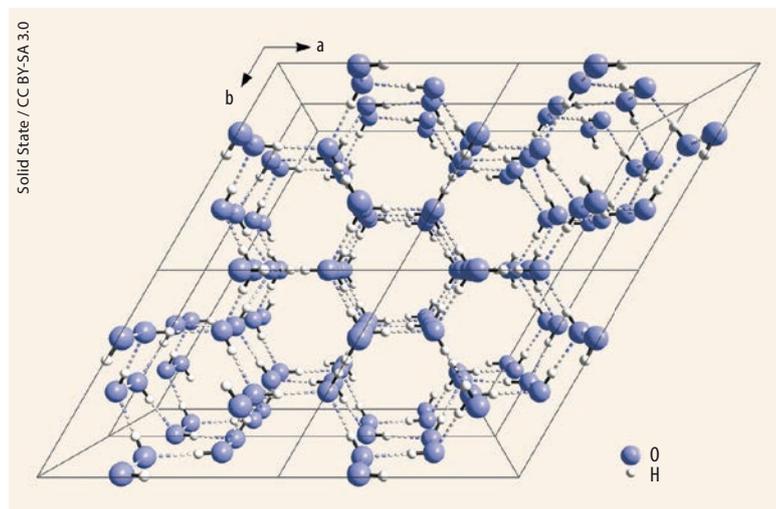


Abb. 1 Sechs Wassermoleküle bilden mit Wasserstoffbrücken einen Ring, sodass die Kristallstruktur von Eis eine hexagonale Symmetrie entlang der $[001]$ -Achse besitzt.

drückt, lässt sich nur schwer experimentell untersuchen, weil die Schicht dann für die Röntgenstrahlung verdeckt ist. Mathematisch hat Bo Persson vom Jülicher Peter Grünberg Institut ein phänomenologisches Gesetz zu Scherkräften aufgestellt, das die Reibungskraft eines Körpers auf Eis abhängig von Gleitgeschwindigkeit und Temperatur über große Geschwindigkeits- und Temperaturbereiche beschreibt. Er vermutet, dass eine dünne, quasi-flüssige Schicht Wasser auch an der Kontaktfläche vorliegt und kaum Widerstand gegen Scherkräfte zeigt. Bei Belastungen quer zur Oberfläche, wie sie ein bewegtes Objekt auf dem Eis ausübt, gleiten die Atomlagen leicht über-

einander: Das Eis ist glatt. Eine nur wenige Nanometer dicke Schicht reicht aus, um die Scherkräfte erheblich zu reduzieren. Mit diesem Ansatz will Persson Materialien für besonders glattes oder besonders rutschfestes Verhalten auf dem Eis optimieren, beispielsweise Gummi von Autoreifen.

Versteht man die Physik des Eislaufens im Detail, bieten sich also auch praktische Anwendungen jenseits sportlicher Betätigung. Bleibt zu hoffen, dass sich die kommenden Auflagen der Lehr- und Schulbücher von der falschen Aussage lösen, dass Eis allein durch Druckaufschmelzung glatt ist.

Bernd Müller

WILEY

Light at Work

PhotonicsViews.com

The international news platform for industry and research in

- Optics
- Photonics
- Laser Technology

PhotonicsViews.com

