

Zeitschrift: Berichte der St. Gallischen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft
Herausgeber: St. Gallische Naturwissenschaftliche Gesellschaft
Band: 95 (2024)

Artikel: Warum ist Eis glitschig?
Autor: Bützer, Peter
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1098726>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 25.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Warum ist Eis glitschig?

Peter Bützer

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	227
Summary	227
1 Die Fragestellung	228
2 Die Besonderheiten von Wasser, H ₂ O .	228
3 Wasser, ein Molekül mit besonderen Eigenschaften	230
4 Die Quantenmechanik kann das Ver- halten von Wasser beschreiben	232
5 Schwärme von Wassermolekülen mit Struktur	233
6 Die Oberfläche von Wasser	235
7 Wasser ist ein schlechtes Schmier- mittel	236
8 Die Oberfläche wird vom flüssigen Wasser zum Eis.	236
9 Eis ist ein wandelbarer Festkörper	237
10 Theorien zum Gleiten auf Eis	238
11 Rollreibung für das Gleiten auf Eis.	239
12 Quintessenz.	240
13 Literaturverzeichnis.	241

Kurzfassung

Für das leichte Gleiten auf Eis ist eine spezielle Oberflächenschicht verantwortlich, ein Phänomen, das durch die molekulare Struktur von Wasser und Eis erklärt werden kann. Wasser, das aus H₂O-Molekülen besteht, ist ein einzigartiger Stoff mit vielen Anomalien in seinen physikalischen und chemischen Eigenschaften, bei denen die Wasserstoffbrückenbindung (H-Brücken-Bindung) eine zentrale Rolle spielt. Diese besonderen Eigenschaften, die nur mit Hilfe der Quantenmechanik verstanden werden können, sind für das Leben auf der Erde unerlässlich. In flüssigem Wasser und auf der Oberfläche von Eis bilden die Wassermoleküle durch H-Brücken-Bindungen «Nanopartikel», die auf Eis das «Rollgleiten» mit der bekannten geringen Reibung erklären können. Bisher gängige Theorien über das Gleiten auf Eis auf einer flüssigen Wasserschicht können durch experimentelle Daten widerlegt werden.

Summary

A special surface layer is responsible for gliding on ice, a phenomenon that can be explained by the molecular structure of water and ice. Water, consisting of H₂O molecules, is a unique substance with many anomalies in its physical

and chemical properties, in which hydrogen bonding (H-bonding) plays a central role. These special properties, which can only be understood with the help of quantum mechanics, are essential for life on Earth. In liquid water and on the surface of ice, the water molecules form nanoparticles through H-bonds, which can explain the «rolling glide» on ice with the known low friction. Previously common theories about gliding on ice on a liquid water layer can be refuted by experimental data.

1 Die Fragestellung

«Wenn dem Esel zu wohl ist, so gehet er aufs Eis tanzen und bricht ein Bein.»

Martin Luther (1483–1546) deutscher Mönch, Prediger und Reformator (BÖHLHAUS 1900).

Wer einen Schritt auf einen glatten Marmorboden oder auf eine glatte Eisfläche setzt, merkt schnell, wie unterschiedlich glitschig die beiden Oberflächen sind, obwohl beide vergleichbar hart sind. Die Härte von Eis ist sehr hoch (Abbildung 1) und die Scherfestigkeit des Eises im Verhältnis zur Härte sehr gering, was mit Reibung einen leichten Abrieb und das

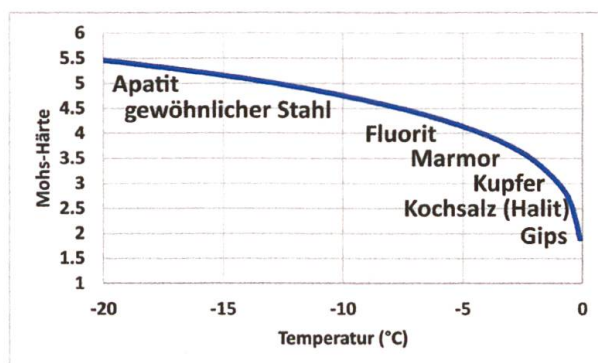


Abbildung 1: Die Härte von Eis in Abhängigkeit von der Temperatur im Vergleich zu vier Mineralien, Kupfer und Stahl – die H-Brücken-Bindungen sind sehr stabil und steif. Die Dichte von Eis nimmt von $-0,5^{\circ}\text{C}$ bis -30°C nur um $4,4\%$ zu, ein Bruchteil der Härtezunahme.

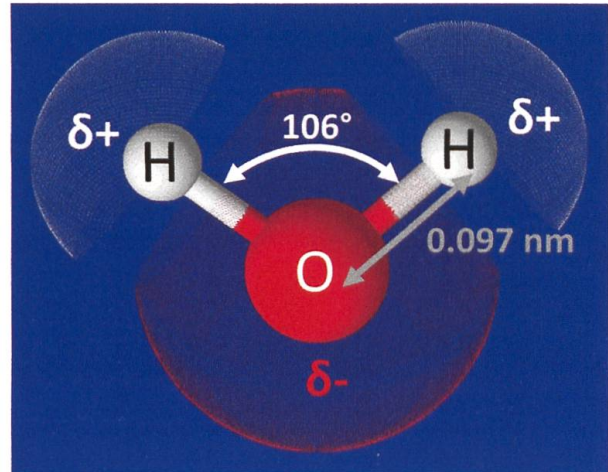


Abbildung 2: Wasser, als Molekül H_2O , mit seinen Dimensionen. Über diesen Stoff ist viel wissenschaftlich publiziert worden, weil er für unser Leben von zentraler Bedeutung ist. Denn dieses kleine und einfache Molekül aus zwei Wasserstoffatomen und einem Sauerstoffatom mit zwei positiven ($\delta+$) und einem negativen Dipol ($\delta-$) kann als Kollektiv so vielfältige Eigenschaften aufweisen, dass immer noch spannende Fragen offen sind. (Der Winkel H-O-H entspricht nicht dem normalen Tetraederwinkel von $109,5^{\circ}$).

Fließen der Gletscher ermöglicht, wobei die Werte der Scherspannung unter Gletschern bemerkenswert konstant sind. Die Ursache für die geringe Scherfestigkeit liegt in der besonderen dreidimensionalen Struktur des Wassers als Eis (Abbildung 15).

Eis ist hart, aber fast alle trockenen Oberflächen von Mineralien und Metallen sind weniger glatt als Eis – weniger glitschig. Warum ist das so? Dieses Phänomen lässt sich nur verstehen, wenn man im Detail die molekulare Struktur von Wasser und Eis betrachtet.

2 Die Besonderheiten von Wasser, H_2O

Wasser ist die häufigste Flüssigkeit auf der Erde und ein aussergewöhnlicher Stoff, mit den meisten Anomalien einer Flüssigkeit in fast allen seinen physikalischen und chemischen Eigenschaften (GALLO et al. 2016). Es ist der mit Abstand komplexeste aller bekannten Stoffe, der aus kleinen Einzelmolekülen

besteht und gasförmig, flüssig und fest in unserem Lebensraum vorkommt. Ein Molekül Wasser besteht aus zwei Wasserstoffatomen und einem Sauerstoffatom (H_2O) (Abbildung 2). Diese Zusammensetzung ist wichtig, aber nicht ausreichend, um die besonderen Eigenschaften von Wasser zu erklären. Die Anziehung zwischen den Wasserstoff- und Sauerstoffatomen bildet eine Bindung zwischen den Wassermolekülen, aber es gibt noch mehr zu verstehen. Die Beweglichkeit der Protonen und die Ausrichtung der Bindungen in Eis oder Biomolekülen sind Beispiele dafür. Ohne die einzigartigen Eigenschaften von Wasser gäbe es kein Leben, wie wir es kennen. Selbst in flüssigem Wasser haben die Moleküle spezielle Strukturen und Oberflächen, die wichtig sind. Dies ist grundlegend für alles, was lebt oder nicht lebt. Das einfache Bild von Wasser als H_2O reicht nicht aus, um sein dynamisches Verhalten in unserer Umwelt zu erklären (Abbildung 3).

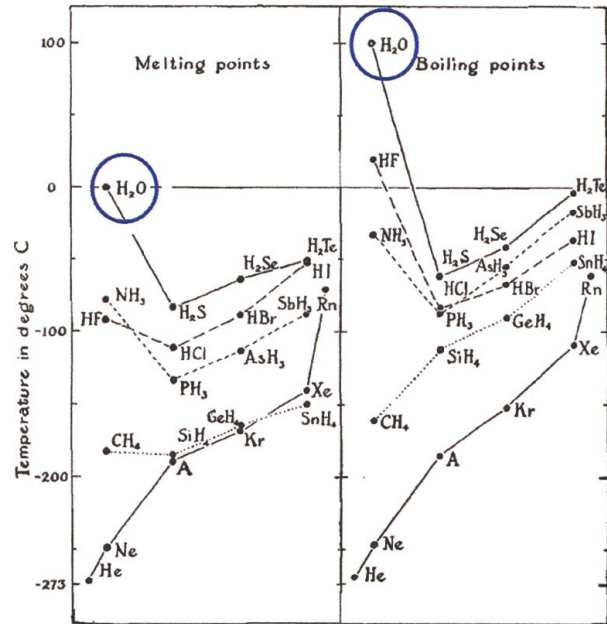


Abbildung 4: Die Schmelz- und Siedepunkte von Wasser im Vergleich zu ähnlichen Molekülen mit Wasserstoff und Edelgasen geben Hinweise auf seine besonderen Eigenschaften (dargestellt von Linus Pauling 1955).

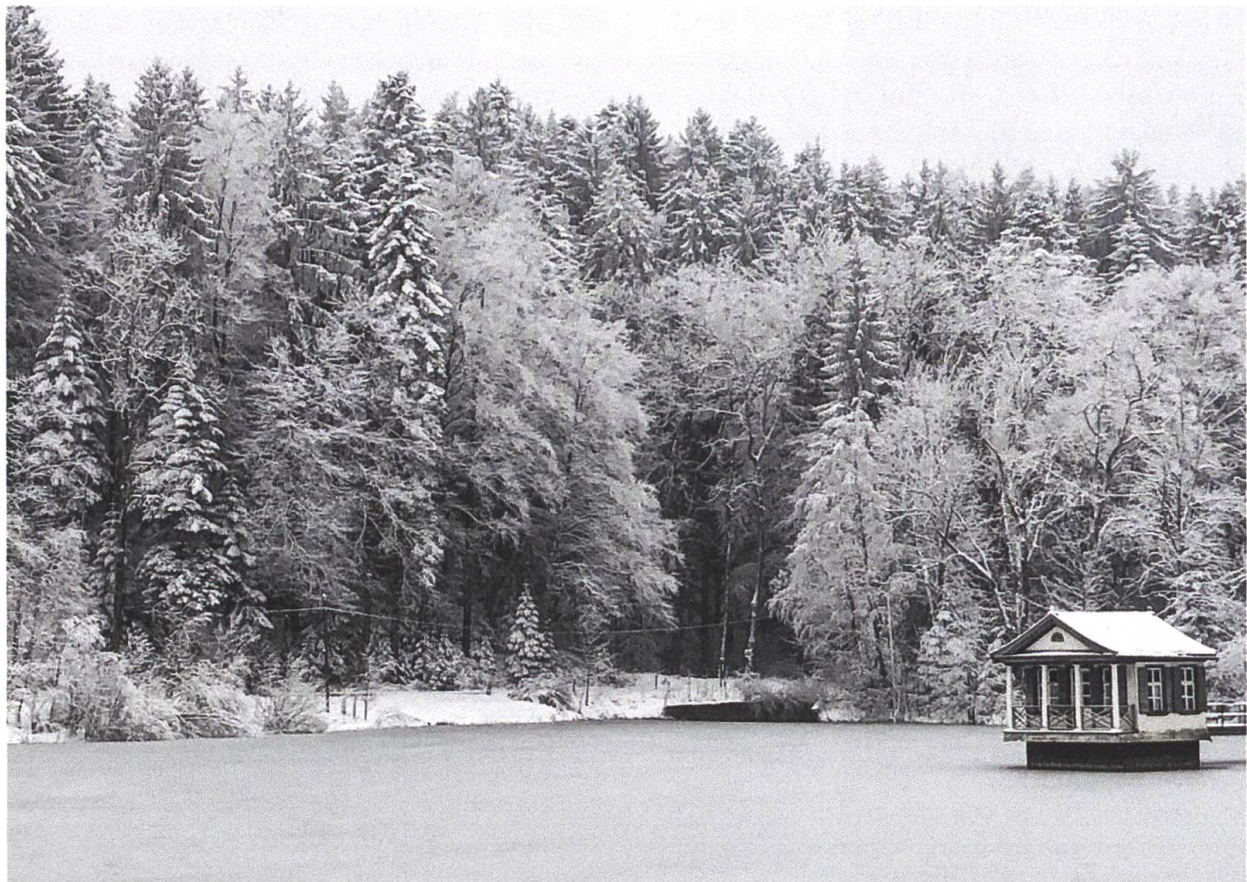


Abbildung 3: Dass die sehr kleinen Wassermoleküle in Schwärmen als Wolken fliegen, als Regen, Schnee und Hagel herunterfallen, als Eis erstarren und als Wasser fließen, ist auf Besonderheiten des molekularen Aufbaus und des kollektiven Verhaltens von H_2O zurückzuführen (Wenigerweiher). Bild: Clarissa Schwarz.

Linus Carl Pauling (1901–1994) hat 1955 in einer bemerkenswerten Zusammenstellung (Abbildung 4) gezeigt (PAULING 1955), dass Wasser (H_2O) im Vergleich zu ähnlichen Stoffen bei den Schmelz- und Siedepunkten aussergewöhnliche Eigenschaften aufweist. Dieses Verhalten von Wasser im Vergleich zu ähnlich aufgebauten Stoffen zeigt, dass die Bindungen bei Wasser stark sind. Warum Wasser bei Zimmertemperatur flüssig ist und warum festes Wasser, das Eis, auf dem Wasser schwimmt, sind Fragen, die schon *Galileo Galilei* (1564–1642) beschäftigten. Auch naturwissenschaftlich gebildete Menschen können sie kaum korrekt erklären. Denn die Anomalien von flüssigem Wasser und die Struktur von festem Wasser als Eis sind kein Allgemeinwissen. *Johannes Kepler* (1571–1631) stellte 1611 fest, dass jede Schneeflocke ein einzigartiges, individuelles Sechseck ist (Abbildung 12), konnte dies aber weder physikalisch noch molekular herleiten. *Michael Faraday* (1791–1867) postulierte 1859, dass die Oberfläche von Eis auch bei Temperaturen weit unter dem Gefrierpunkt von einem dünnen Film flüssigen Wassers bedeckt sei, weil sich zwei Eisflächen bei Berührung schnell verbinden (FARADAY 1859) (Abbildung 5) – er nannte diesen Prozess *Regelation*.

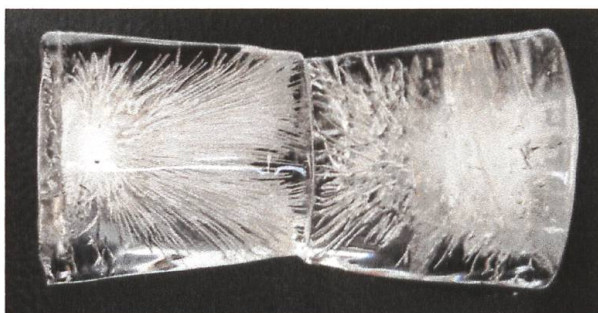


Abbildung 5:
Zwei Eisstücke haften durch leichten Druck aneinander, *Faraday* nannte diesen Vorgang *Regelation*. Wenn man die Eisflächen gegeneinander bewegt, sind sie sehr glitschig, aber wenn man sie für kurze Zeit nicht bewegt, dann kleben sie aneinander. Der Vorgang entspricht dem Kaltschweißen von Metallen, nur dass die Oberflächen beim Eis nicht so genau aufeinander passen müssen. Bild: P. Bützer.



Abbildung 6:
Ausscheidung des blauen Farbstoffs Indigotin in der Mitte des Eisblocks (rechts) («sulphate of indigo», wie *Faraday* es nannte) aus einer ursprünglich einheitlich blau gefärbten Indigotin-Lösung (links) beim Einfrieren. Bild: P. Bützer.

Faraday beschrieb auch erstmals, dass Farbstoffe, Salze und Alkalien sichtbar ausgetrieben werden, wenn wässrige Lösungen zu Eis gefrieren, eine Ausstossungsreaktion (Abbildung 6). Analog dazu verdrängen beim Gefrieren von Meerwasser die Wassermoleküle den Salzanteil aus der entstehenden Kristallstruktur in das umgebende Wasser – mit diesem Prozess wird das Meerwasser beim Gefrieren entsalzt (STEINBACH 1951).

3 Wasser, ein Molekül mit besonderen Eigenschaften

«Selbst viele, die an allgemeinen Theorien über den flüssigen Zustand der Materie arbeiten, gehen nicht in die Nähe von Wasser.»

Philip Ball (*1962) *englischer Chemiker, Physiker und Autor* (BALL 2008).

Wenn Wasser, H_2O , nur aus einer Ansammlung von Molekülen bestünde, die als kleinste Teilchen keine weiteren Bindungen eingehen, wäre Wasser nicht flüssig, alle Ozeane wären verdunstet und es gäbe kein Leben, wie wir es kennen. Wissenschaftliche Erkenntnisse, die zeigen konnten, wie sich Wassermoleküle im

Kollektiv so verhalten, so wie wir es beobachten, sind daher von grosser Bedeutung. Das leichte Molekül Wasser mit einer Molmasse von 18 g/mol würde ohne weitere Bindungen in unserer Luft, aus Stickstoff (N_2) mit einer Molmasse von 28 g/mol und Sauerstoff (O_2) mit einer Molmasse von 32 g/mol, aufsteigen und verloren gehen – es bildet aber Wolken und kommt als Regen, Schnee, Graupel und Eis wieder auf die Wasser- und Erdoberfläche zurück. Die Wassermoleküle sind bei Raumtemperatur (25 °C) flüssig, obwohl sie 10 % leichter sind als Fluorwasserstoff (HF), der eine 30 % höhere Polarität aufweist aber gasförmig ist. Im Vergleich dazu hat Wasser einen ungewöhnlich hohen Schmelz- und Siedepunkt und ist pH-neutral. Die Ursache: Ausgerechnet das Wasserstoffatom mit nur einem Proton als Kern und nur einem Elektron als Hülle kann nebst der Bindung zu Sauerstoff noch eine weitere Bindung eingehen – aber wie?

Gilbert Newton Lewis (1875–1946) kombinierte 1916 erstmals Chemie und Quantenphysik, um die chemische Bindung mit Elektronenpaaren zu beschreiben, was zu den modernen Theorien der kovalenten Bindung führte (LEWIS 1916), beispielsweise in H_2O die Bindung zwischen H und O. Der nächste wichtige Schritt zum Verständnis der lebenswichtigen Eigenschaften des Wassers war jedoch die Theorie der Wasserstoffbrückenbindung (H-Brücken-Bindung). Diese Exklusivität wurde erstmals 1919 vom amerikanischen Chemiker *Maurice Loyal Huggins* (1897–1981) aufgestellt (nicht offiziell publiziert).

«Huggins, there are several interesting ideas in this paper, but there is one you'll never get chemists to believe: the idea that a hydrogen atom can be bonded to two other atoms at the same time.»

William Crowell Bray (1879–1946) *amerikanischer Chemiker* (QUANE 1990).

Als Entdecker der H-Brücken-Bindung gelten jedoch *Wendell Mitchell Latimer* (1893–1955) und *Worth Huff Rodebush* (1887–1959), die da-

mit 1920 die hohe elektrische Leitfähigkeit des Wassers so erklärten (LATIMER & RODEBUSH 1920), dass der Wasserstoffkern, der zwischen zwei Oktetten gehalten wird, eine schwache «Bindung» bildet. Der amerikanische Chemiker und Physiker *Irving Langmuir* (1881–1957) erkannte bereits 1921, dass das Wasserstoffatom in der H-Brücke von Eis nur zwei Elektronen in seiner Schale haben kann, konnte daraus aber keine zweite Bindung ableiten (LANGMUIR 1921): «In Doppelmolekülen wie H_4O_2 (in Eis), H_2F_2 und in Verbindungen wie KHF_2 usw. scheinen die Wasserstoffkerne keine Doppelmoleküle mit Elektronen im gleichen Atom zu bilden, sondern Doppelmoleküle, in denen sich die beiden Elektronen in verschiedenen Atomen befinden. In diesem Fall fungiert der Wasserstoffkern selbst als Bindung. *Latimer* und *Rodebush* haben einen ähnlichen Vorschlag für Wasserstoffkerne als Bindungen gemacht. Sie nehmen an, dass der Wasserstoffkern auf zwei

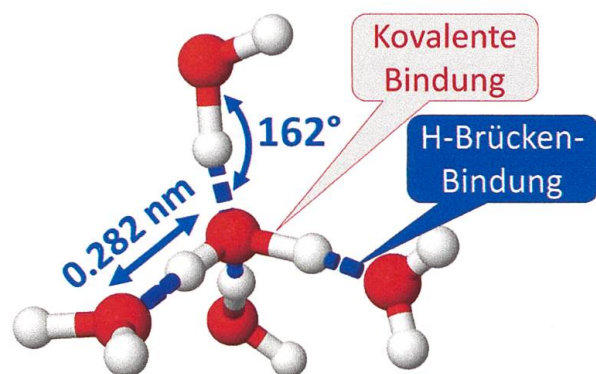


Abbildung 7:

Fünf Wassermoleküle (H_2O , mit Sauerstoff, rot, und Wasserstoff, weiss). Das Wassermolekül in der Mitte verbindet O mit H (rot-weiss) durch eine kovalente Bindung mit einer Energie von 462 kJ/mol. Aussen verbinden sich vier weitere Wassermoleküle über H-Brückenbindungen (H-Brücken blau) mit einer 22-mal geringeren Energie von 21 kJ/mol. Auf diese Weise kann Wasser dreidimensionale Strukturen aufbauen. Doch wie kann ein Wasserstoffatom zwei Bindungen eingehen? Allein durch die Anziehung des negativen Dipols des Sauerstoffs und des positiven Dipols des Wasserstoffs (Abbildung 2) lassen sich die gemessenen Bindungsstärken nicht erklären.

Elektronenpaare einwirkt: ein Paar in jedem der beiden Atome ... Da die erste Elektronenschale in allen Atomen nur zwei Elektronen enthält, scheint es wahrscheinlich, dass auch der Wasserstoff in diesem Fall nur zwei Elektronen besitzt und dass diese die eindeutige stabile Gruppe bilden, die wir als Duplett bezeichnet haben.» Das ist eine Besonderheit, denn nach dem Physiker und Nobelpreisträger *Wolfgang Ernst Pauli* (1900–1958) können maximal zwei Elektronen in einem Bindungsorbital vorhanden sein.

Bei dieser H-Brücken-Bindung werden schon gebundene Wasserstoffatome des Wassers (H-O-H) von zwei benachbarten Sauerstoffatomen angezogen ($\text{O}|\cdots\text{H}-\text{O}-\text{H}\cdots|\text{O}$) und bilden so zwischen ihnen eine Brücke – das sind besondere Bindungen. Jedes Wassermolekül H_2O kann somit an jedem Wasserstoffatom noch zwei weitere, schwache H-Brücken-Bindungen eingehen (Abbildung 7). Erst dadurch entstehen mit Netzwerken von Wassermolekülen die wichtigen Strukturen in Wasser und Eis. Im Frühjahr 1935 gelang *Pauling* der Durchbruch mit seiner Theorie der Wasserstoffbrücken zur Erklärung des Aufbaus von Eis (PAULING 1935). In seinem 1939 erschienenen Buch «The Nature of the Chemical Bond, and the Structure of Molecules and Crystals» fasste er seine Sicht

der Strukturchemie zusammen und diskutierte die Rolle der spezifischen Eigenschaft der H-Brücken-Bindung in den Strukturen von Wasser, Proteinen und Nukleinsäuren. Das war eine ganz aussergewöhnliche Theorie, dass sich ein Elektronpaar zwischen benachbarten Molekülen bewegen könne.

«... es wird sich herausstellen, dass die Bedeutung der Wasserstoffbrückenbindung für die Physiologie grösser ist als die jedes anderen einzelnen Strukturmerkmals.»

Linus Carl Pauling (1901–1994), amerikanischer Chemiker und Nobelpreisträger (PAULING 1960).

4 Die Quantenmechanik kann das Verhalten von Wasser beschreiben

Die H-Brücken-Bindung ist für die Chemie (PARADOWSKI & PAULING 2015): «Der wichtigste amerikanische Beitrag zur modernen Kristallographie des Wassers.» Für das Verständnis dieser Bindungen wird das Modell vom Tunneleffekt verwendet. Das ist ein anschaulicher Begriff aus der Physik, der beschreibt, dass ein Teilchen eine Energiebarriere überwinden kann, ohne sie zu überqueren, sondern sie in einem «Tunnel» mit wesentlich geringerem Energieaufwand durch-

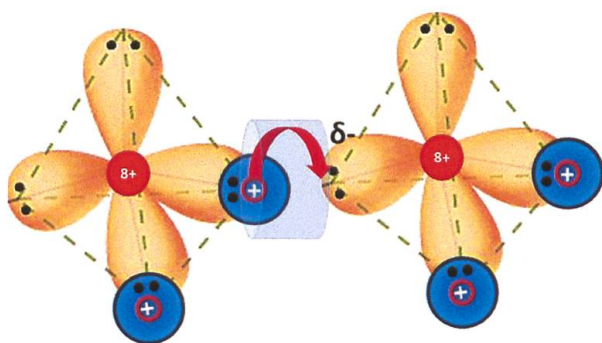


Abbildung 8:
Das Proton (\oplus) löst sich von seinem Elektron und wandert zu den beiden Elektronen (\cdot) im Orbital des benachbarten Sauerstoffatoms rechts, ohne den dadurch notwendigen Energieberg überwinden zu müssen – es geht mit wenig Energie quantenmechanisch durch einen virtuellen Tunnel (Tunnel-Effekt).

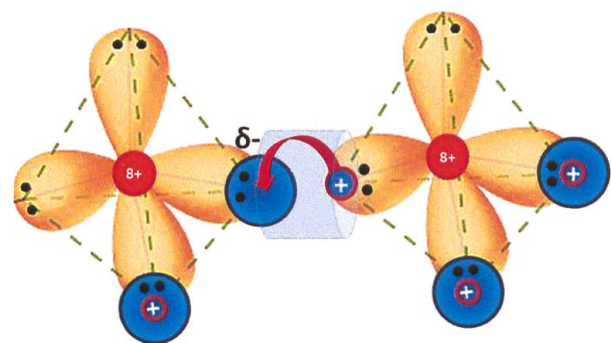


Abbildung 9:
Das Proton (\oplus) wandert im Tunnel zurück zu seinem Elektron im ursprünglichen Wassermolekül links. Dieser Austausch des Protons zwischen den beiden Wassermolekülen mit unterschiedlichen Aufenthaltswahrscheinlichkeiten auf beiden Seiten beschreibt die Wasserstoffbrücken-Bindung.

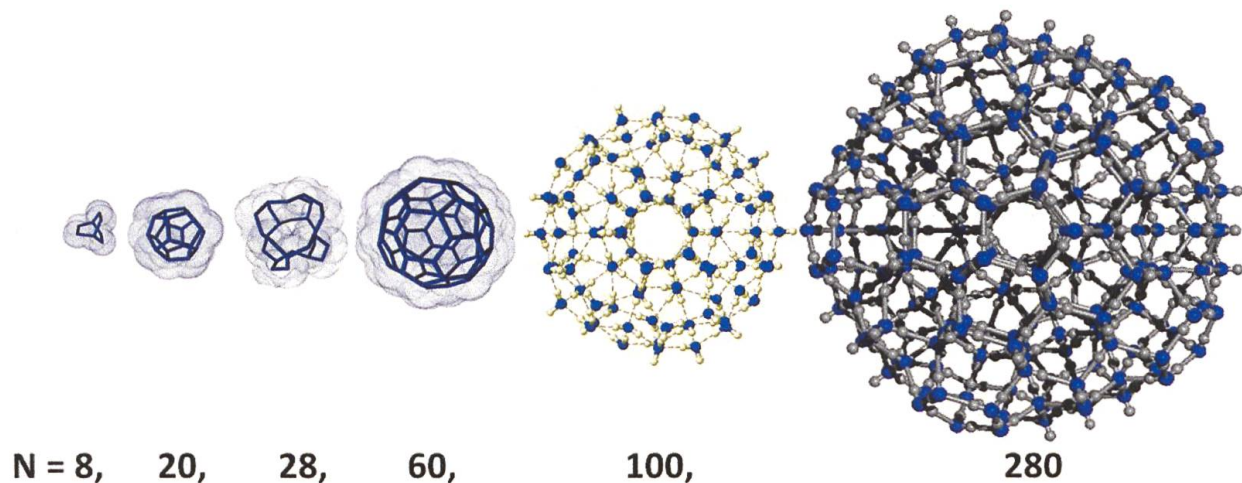


Abbildung 10:

Einige nachgewiesene geometrische Strukturen von Wassermolekülen in flüssigem Wasser mit n =Anzahl der Wassermoleküle, die einen geordneten Schwarm (Cluster) bilden. Der Cluster von $n=280$ entspricht dem Cluster von $n=100$ mit einer weiteren Hülle von Wassermolekülen. Je wärmer das Wasser, desto kleiner und weniger zahlreich sind die Cluster.

quert. In der klassischen Physik wäre dies unmöglich, in der Quantenmechanik ist es möglich. Das Tunneln von Elektronen ist bekannt. Ein Proton ist jedoch etwa 2'000-mal massereicher als ein Elektron, so dass die Wahrscheinlichkeit einer Tunneldurchquerung viel geringer ist (MENG et al. 2015). Ein Wasserstoffatom ohne sein einziges Elektron ist ein Proton. Beim Tunneldurchgang des Protons im Wasser werden die H-Brücken-Bindung und die kovalente Bindung vertauscht (siehe Abbildungen 8 und 9).

Dieses quantenmechanische Modell erklärt, wie jedes Molekül Wasser noch vier weitere Bindungen eingehen kann. Damit erst können die Besonderheiten im Verhalten von Wasser in der Umwelt und der Biologie verstanden werden. Die rasche «Tunnel-Mobilität» der Protonen im Wasser zeigt sich auch im Alltag mit der Besonderheit als Mass für den Säure-Basen-Charakter als Protonenaustausch.

5 Schwärme von Wassermolekülen mit Struktur

Eine wichtige und oft übersehene Tatsache ist, dass flüssiges Wasser im Nanometerbereich nicht homogen ist. Die meisten Wassermolekü-

le in flüssigem Wasser verbinden sich kurzfristig über H-Brücken-Bindungen zu grösseren Verbänden in Form von dreidimensionalen, käfigartig strukturierten Clustern von 8 bis 280 Molekülen (Abbildung 10), deren Grösse und Anteil von der Temperatur abhängt, wobei bei niedrigen Temperaturen fast 50 % der Wassermoleküle in solchen Clustern gebunden sind (CHAPLIN 2013). Die Lebensdauer einer Wasserstoffbrückenbindung liegt dabei typischerweise im Bereich von 1–20 Picosekunden (KEUTSCH & SAYKALLY 2001) (1 Pikosekunde = 10^{-12} Sekunden), d.h. die Strukturen des Gemisches unterliegen einer ständigen Veränderung – reines Wasser hat somit kein Gedächtnis. Bei tiefen Temperaturen bilden sich durch diese Selbstorganisation die supra-molekularen Strukturen von hexagonalem Eis und die Schneeflocken (Abbildungen 11,12).

In der Kälte tritt mit einer Clustergrösse von $n=90-300$ Molekülen der hexagonale Eis-Ih-Charakter auf (Abbildung 11), was wichtig ist für das Verständnis der atmosphärischen Phänomene von Eiswolken. Experimentell ist Eis mit $n=275 \pm 25$ beobachtet worden, denn für $n=475 \pm 25$ dominiert die bekannte Infrarot-Bande um $3'200\text{cm}^{-1}$ von kristallinem Eis (PRADZYNSKI et al. 2012).

Die H-Brücken-Bindungen der Wassermoleküle und deren Bildung von Nanostrukturen sind nachweislich für anomale Eigenschaften von Wasser verantwortlich, wie z. B. die Dichteanomalie, den hohen Siede- und Schmelzpunkt, die hohe Wärmekapazität, die Schnee- und Eisumwandlungsgeschwindigkeit, die Oberflächenspannung, das Verhalten als Lösungsmittel von Ionen in lebenswichtigen wässrigen Lösungen, das Fließen von Eis in Gletschern, die Erosion durch Wasser, der Wassertransport in Kapillaren oder durch Poren von Membranen oder bis zur Spitze der höchsten Bäume. Wären diese Eigenschaften auch nur geringfügig anders, wäre alles Leben auf der Erde anders. Auch in der Biologie sind die H-Brücken-Bindungen essentiell, denn sie sind für den Aufbau der Nukleinsäuren, Proteine und Zucker mitverantwortlich.

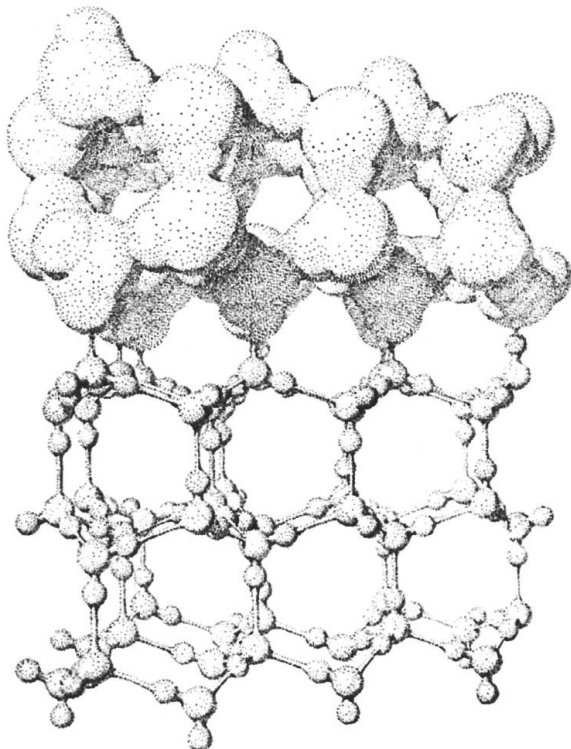


Abbildung 11:
Die Struktur von Eis als Modell der gebundenen Wasser-Moleküle von *Pauling* 1950. Die sechseckige Struktur im Aufbau von Eis ist Ursache für die sechseckige Struktur der Schneeflocken (Abbildung 12).

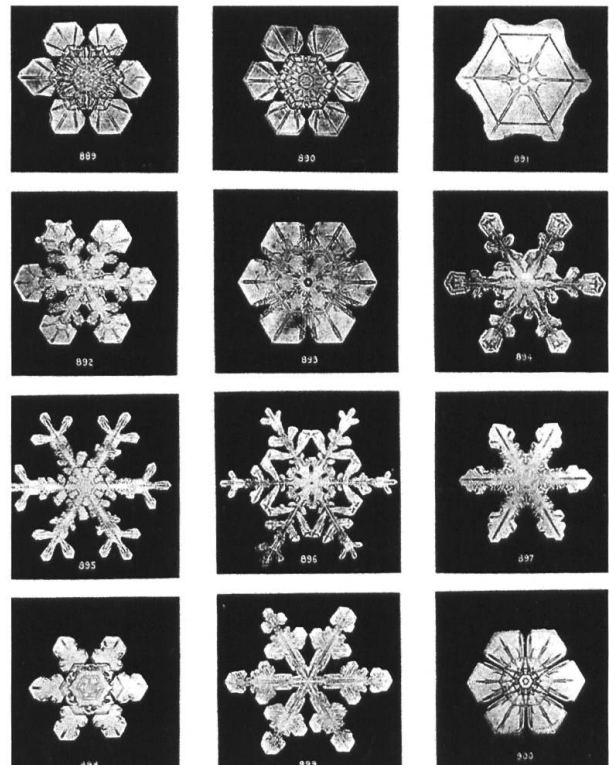


Abbildung 12:
Sechseckige, hexagonale Schneeflocken fotografiert ca. 1902 von *Wilson Alwyn Bentley* (1865–1931). Bild: Wikipedia.

Und diese H-Brücken-Bindungen im Wasser geben immer noch Rätsel auf. Die Beobachtung, dass warmes Wasser unter sonst gleichen Bedingungen im Kühlschrank schneller gefriert als kaltes, wird als «*Mpemba-Effekt*» bezeichnet, benannt nach dem Tansanier *Erasto Bartholomeo Mpemba* (1950–2023), der ihn 1963 als 13-jähriger Sekundarschüler entdeckte und 1969 beschrieb (MPEMBA & OSBORNE 1969). Eine allgemein anerkannte Erklärung für diesen *Mpemba-Effekt* ist bis heute nicht gefunden worden (HOLTZMAN & RAZ 2022).

6 Die Oberfläche von Wasser

«Gott schuf das Volumen, der Teufel die Oberfläche.»

Wolfgang Ernst Pauli (1900–1958) österreichischer Physiker (JAMTVEIT 1999)

Bei allen reinen Festkörpern oder Flüssigkeiten sind die Moleküle im Inneren allseitig von anderen gleichen Molekülen umgeben. Jedes Wassermolekül hat an der Oberfläche eine freie Bindung. An den Kanten sind es zwei und an den Ecken drei freie Bindungen. Dies wirkt sich auf die Gesamtheit der Bindungskräfte aus, wie z.B. in einem Wassertropfen (Abbildung 13).

An der Wasseroberfläche führt die asymmetrische Umgebung dazu, dass die resultierende Kraft auf ein Wassermolekül nach innen gerichtet ist und die Bildung einer «Haut» ermöglicht (Abbildung 13). Das hat eine höhere

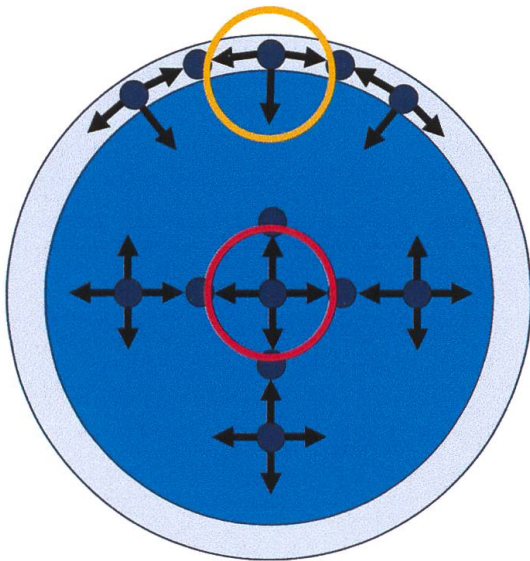


Abbildung 13:
Ein Wassertropfen hat als Oberfläche eine «Haut» von Wasser-Molekülen mit den drei H-Brücken-Bindungen (gelb), die sich von denen im Inneren mit vier (rot) unterscheiden (hier 2-dimensional). Die unterschiedlichen Anordnungen der Bindungen haben einen direkten Einfluss auf die Bindungsstärken und Bindungswinkel (Strukturen) der gebundenen Wassermoleküle. Daraus ergibt sich die Kugelform des Wassertropfens, da die Kugel die Form mit der kleinsten Oberfläche bezogen auf ein Volumen ist.

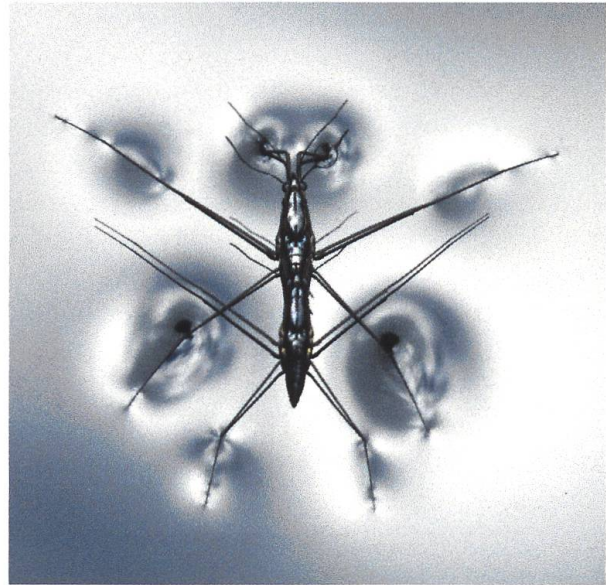


Abbildung 14:
Gemeiner Wasserläufer (*Gerris lacustris*). Die Beine des Wasserläufers sind kräftig, lang und schlank, aber flexibel, so dass er sein Gewicht gleichmässig auf eine grosse Fläche verteilen und die spezielle Struktur der «Wasserhaut» mit der Oberflächenspannung des Wassers ausnutzen kann. Bild: USGS, Creative Commons License.

Oberflächendichte und Oberflächenspannung zur Folge – Wasser hat eine besonders hohe Oberflächenspannung. Diese Oberflächenspannung wird von Tieren ausgenutzt, um über das Wasser zu laufen (Abbildung 14). Die Oberfläche von flüssigem Wasser kann so mit einer dünnen, leicht gespannten Haut verglichen werden, mit dem Unterschied, dass die Spannung nicht von der Dehnung abhängt. So verleiht die Oberflächenspannung der Flüssigkeitsoberfläche besondere Eigenschaften und ist die Ursache dafür, dass Flüssigkeitstropfen eine Kugelform annehmen, wenn keine anderen Kräfte auf sie einwirken. Durch die Kräfte der Oberflächenspannung ändert sich die Dichte an der Flüssigkeitsoberfläche innerhalb weniger Moleküllängen, bis sie den konstanten Wert des Flüssigkeitsinneren erreicht. Heute weiss man, dass die Oberfläche von neutralem Wasser negativ geladen ist (CHAPLIN 2009). Das ist die komplementäre Ladung zum pH-Wert von 7,0 bei neutralem Wasser mit 10^{-7} Mol pro Liter Protonen als H_3O^+ gelöst in der Flüssigkeit.

7 Wasser ist ein schlechtes Schmiermittel

Reines Wasser ist ein schlechtes Schmiermittel, weil seine Viskosität zu klein ist. Die dynamische Viskosität (Zähigkeit) von Wasser bei 20°C beträgt 1,0 mPa·s (Millipascal-Sekunden), d.h. Wasser ist nicht zähflüssig und fließt relativ leicht. Im Vergleich dazu hat z.B. Motorenöl eine Viskosität von ca. 100 mPa·s oder mehr, d.h. es ist ca. 100-mal zäher als Wasser und fließt langsamer. Mögliche Wasserfilme sind zu dünn, um Oberflächen mit Rauheiten im Mikrometerbereich zu trennen und damit die Reibung entscheidend zu verringern (LEVER et al. 2021). Ist der Schmierstoff zu niedrigviskos, wird die Wasserschicht im eigentlichen Kontaktbereich weggepresst und die Oberflächen berühren sich wieder, so dass die ursprüngliche normale Reibung eintritt. Der Unterschied in der Viskosität ist z.B. dafür verantwortlich, dass eine ölverschmierte Strasse im Vergleich zu einer nassen Strasse viel rutschiger ist. Somit kann die sehr glitschige Oberfläche von Eis kein flüssiges Wasser sein. Da sich das Wasser bei Normaldruck und Temperaturen von -100°C bis 0°C zu kristallinen Eis-Strukturen (Eis-Ih) ordnet (IGNATOV & MOSIN 2015) ist zu erwarten, dass sich frei bewegliche Wassermoleküle auf einer kalten Oberfläche ebenfalls zu Festkörpern verbind-

den und daher nicht flüssig sind. Gleichzeitig bewirkt die starke Polarisierung der Wassermoleküle eine starke Bindung zwischen den Wassermolekülen selbst, d.h. eine geringe Beweglichkeit, und eine starke Adhäsion (Anziehung) zwischen dem Wasser und den Oberflächen, die es benetzt, was zu einer erhöhten Reibung und einem hohen Reibungskoeffizienten führt. Die Oberflächenspannungskräfte aufgrund dünner Flüssigkeitsfilme von Wasser, die zwischen festen Oberflächen eingeschlossen sind, können sehr gross sein.

8 Die Oberfläche wird vom flüssigen Wasser zum Eis

«Glattes Eis

Ein Paradies

Für Den, der gut zu tanzen weiss.»

Friedrich Nietzsche (1844–1900), deutscher Philologe und Philosoph (NIETZSCHE 1882).

Der englische Naturforscher und Experimentalphysiker *Faraday* postulierte 1850, dass ein dünner Film aus flüssigem Wasser die Oberfläche von Eis bedeckt – und das selbst bei Temperaturen weit unter dem Gefrierpunkt (FARADAY 1850). Aber die Dampfdrücke über Wasser und Eis zeigen deutlich unter-

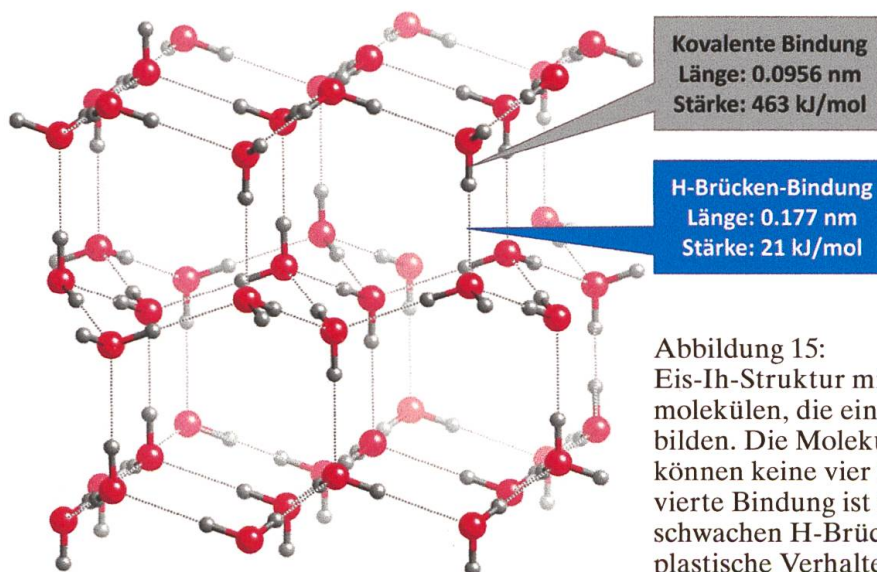


Abbildung 15:

Eis-Ih-Struktur mit tetraedrischen Wassermolekülen, die eine hexagonale Gitterstruktur bilden. Die Moleküle auf der idealen Oberfläche können keine vier Bindungen eingehen, die vierte Bindung ist frei und daher reaktiv. Die schwachen H-Brücken-Bindungen sind für das plastische Verhalten und die geringe Scherfestigkeit von Eis (z.B. in Gletschern) verantwortlich, da sich die Schichten verschieben können. Eis hat eine um den Faktor 100 niedrigere Viskosität als Bitumen!

schiedliche Verläufe (LIDE 2004), was darauf hindeutet, dass auf der Oberflächenschicht von Eis kein gewöhnliches Wasser vorhanden ist. Der irische Wissenschaftler und Alpinist *John Tyndall* (1820–1893) unterschied 1858 mit genauen Beobachtungen zwischen den Eigenschaften der Teilchen, die sich an der Oberfläche des Eises befinden, und denen, die den Festkörper bilden (TYNDALL 1858): «Was nun das Ausmass der Bewegung betrifft, die notwendig ist, um diese Freiheit der Liquidität zu erzeugen, so müssen die Teilchen an der Oberfläche einer Eismasse unter ganz anderen Bedingungen stehen als die Teilchen im Inneren, die von allen Seiten von anderen Teilchen beeinflusst und kontrolliert werden» (Abbildungen 13 und 15).

Die lokale Struktur der Oberfläche von flüssigem Wasser ähnelt der obersten Eisschicht des Eis-Ih (Abbildung 15) insofern, als die äussersten Moleküle durch eine beträchtliche Anzahl freier H-Bindungen gekennzeichnet sind (ODENDAHL & GEISLER 2022). Die Oberfläche zeichnet sich durch eine Anordnung aus, in der nicht jedes Wassermolekül vier Bindungen eingeht, im Gegensatz zur tetraedrischen Struktur mit vier H-Brückenbindungen im hexagonalen Eis-Ih (WERNET et al. 2004), welche sogar eine um etwa einen Faktor 100 niedrigere Viskosität als Bitumen aufweist (JOHNSTON 2013). Das bedeutet, dass sehr viele Wassermoleküle in einem Clusternetzwerk angeordnet sind, das hauptsächlich durch schwache H-Brückenbindungen zusammengehalten wird. Grössere Eisvolumina, die nicht im Labor entstehen, sind polykristallin (JACKA & BUDD 1989), was zur Folge hat, dass Eiskristalle nicht einheitlich ausgerichtet sind.

9 Eis ist ein wandelbarer Festkörper

Eis und Schnee sind physikalisch gesehen «heisse» Materialien, da sie auf der Erde nie weit von ihrem Schmelzpunkt von 0°C (273 K) entfernt sind. So ist Eis-Ih mit einer Temperatur von $-27,3^{\circ}\text{C}$ nur 10 % unterhalb vom

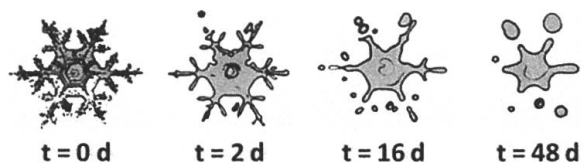


Abbildung 16:

Die Oberfläche von Eis bei -20°C ist dynamisch. Die Metamorphose eines Eiskristalls ist bei -20°C eine Funktion der Zeit. Wassermoleküle lösen sich durch Sublimation und lagern sich an anderer Stelle durch Resublimation wieder an. Kleine Kristalle lösen sich auf und lagern sich an grössere Kristalle an, da deren Temperatur auch bei $-27,3^{\circ}\text{C}$ nur 10 % unter dem Gefrierpunkt von 273 K liegt.

Schmelzpunkt von 273 Kelvin. Deshalb hat es einen hohen Dampfdruck und verdunstet ständig, ohne vorher geschmolzen zu sein, es sublimiert. Analog dem Prozess der *Ostwald-Reifung* lösen sich kleine Kristalle auf, lagern sich als gasförmigen Wasserdampf an kälteren Oberflächen der grösseren Kristalle ab (Resublimation) (HEGGLI et al. 2011) und verändern so permanent ihre Struktur (BADER 1962), Grösse und Orientierung durch diese Metamorphose (DE QUERVAIN 1950) (Abbildung 18), indem sie Material über die Oberflächen übertragen (RICHE et al. 2013). Für die Bildung von Eis aus Wasser müssen die Wassermoleküle für den ersten Schritt jedoch zunächst zusätzliche Ordnungs-Energie aufbringen (TAMTÖGL et al. 2021) – siehe auch *Mpemba-Effekt*.

Die Geschwindigkeit, mit der dieser Umwandlungsprozess (Metamorphose) abläuft, hängt von der Temperatur ab. Dabei gilt: Je höher die Temperatur und je grösser die Temperaturunterschiede, desto schneller verändert sich die Schneestruktur. Beispielsweise kann Eis auch an kalten Wintertagen mit Lufttemperaturen unter -5°C der Wasserdampf in der Atmosphäre direkt vom gasförmigen in den festen Aggregatzustand übergehen. Je nach Temperatur und Luftfeuchtigkeit bilden sich Eisnadeln, Dendriten (sechseckige Schneesterne), sechseckige Plattenkristalle oder Säulen (Abbildung 12).

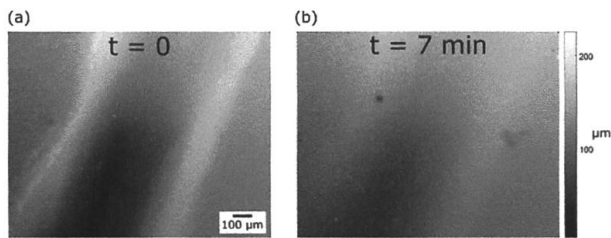


Abbildung 17: Selbstheilendes Eis bei -10°C als Kratzprofil (a), gemessen mit einem Interferometer kurz nachdem mit einem Schraubenzieher ein Kratzer in die Eisoberfläche geritzt wurde. Nur 7 Minuten später ist der Kratzer fast vollständig verheilt (b). Die Selbstheilung einer Eisoberfläche gibt einen Hinweis auf die permanent ablaufenden Sublimations-Resublimation-Prozesse. Bild: Mischa Bonn.

Die Übertragung von Wasser von einem zum nächsten Kristall, Sublimation und Resublimation, auf der Eisoberfläche scheint bei der «Selbstheilung» der vorherrschende Mechanismus zu sein (DEMMEINIE et al. 2022). Dieser Prozess zeigt sich bei einer Eisdecke z. B. darin, dass sich Kratzer auf der Oberfläche in wenigen Minuten bis zu einem gewissen Grad selbst heilen können (Abbildung 17) (WEBER et al. 2018).

10 Theorien zum Gleiten auf Eis

«Das Glitschige des Eises ist und bleibt einer der auffälligsten, interessantesten und wichtigsten Umstände, unter denen wir leben, und auch einer der am häufigsten.»

Osborne Reynolds (1842–1912), britischer Physiker (REYNOLDS 1900).

Eis ist Wasser in gefrorener, fester Form, hat jedoch andere Eigenschaften als die meisten Flüssigkeiten nach dem Erstarren. So sind Wasserpartikel im Nanometerbereich an einer Reihe von Prozessen in der Atmosphärenchemie beteiligt, einschliesslich der Bildung von Wolken und Aerosolen. Darum ist die Kenntnis der Clustergrösse von $n=90\text{--}300$ Molekülen, bei der der Eis-Ih-Charakter auftritt, wichtig für das Verständnis dieser atmosphärischen

Phänomene (JORDAN 2019). So wurde experimentell Eis mit $n=275 \pm 25$ beobachtet und für $n=475 \pm 25$ dominiert die bekannte Infrarotbande um $3'200\text{cm}^{-1}$ von kristallinem Eis-Ih (PRADZYNSKI et al. 2012). Amorphes Eis niedriger Dichte (Low-Density Amorphous Ice, LDA) lässt sich rechnerisch am besten durch kleine Eiskörner mit amorphen Bereichen an den Korngrenzen wiedergeben (DAVIES et al. 2023). Mit steigender Temperatur nimmt die Reibung von Eis ab. Das liegt daran, dass die obersten Wassermoleküle durch H-Brücken-Bindungen nach Innen verbunden sind und geschwächt werden. Dadurch wird das Gleiten durch die mobilen Oberflächeneismoleküle erleichtert. Erst wenn das Eis durch Sonneneinstrahlung oder hohe Lufttemperatur schmilzt und flüssiges Wasser entsteht, steigt die Reibung wieder an. Leider weichen die gemessenen Dimensionen der besonderen Oberflächen-Schichten von Eis auch heute noch um mehrere Potenzen ab (ZENG & LI 2019). Eine konsistente Interpretation der Gleit-Eigenschaften auf Eis ist dadurch noch unmöglich.

Hartnäckig hält sich die Theorie, dass das leichte Gleiten auf Eis oder Schnee auf eine dünne Wassergleitschicht zurückzuführen ist. Diese werde durch Druck- oder Reibungsschmelzen erzeugt. Der irische Physiker und Geologe *John Joly (1857–1933)* berechnete 1899, dass der Schmelzpunkt von Eis bei einer Druckerhöhung um eine Atmosphäre nur um $0,0072^{\circ}\text{C}$ sinkt. Experimente haben gezeigt und mit Berechnungen ist bestätigt, dass der notwendige Druck für eine Verflüssigung von Eis zu Wasser für Schlittschuhe, Schlitten oder Ski bei üblichen Eis- und Schnee-Temperaturen, ausser in der Nähe von 0°C , für ein Gleiten auf einer Flüssigkeitsschicht von Wasser zu klein ist (THOMSON 1850, 1851). 1939 schrieb der australische Physiker *Frank Philip Bowden (1903–1968)* (BOWDEN & HUGHES 1939): «Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die niedrige Reibung, die bei sich schnell bewegenden Festkörpern auf Eis und Schnee beobachtet wird, zu einem grossen Teil auf das Schmelzen einer Wasserschicht durch Rei-

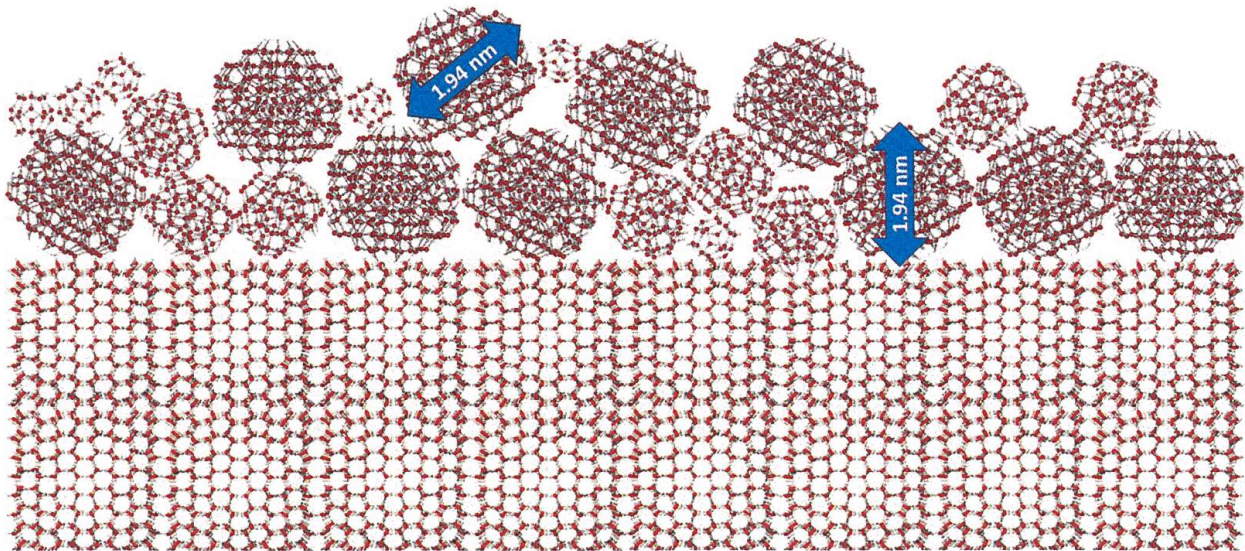


Abbildung 18:

Hexagonales Eis mit Wasser-Cluster (z. B. $n=100$ und 280) auf der Oberfläche. Kugelförmige Cluster mit mehr als 90 Wassermolekülen sind bei tiefen Temperaturen hart wie Eis. Auf diesen Partikeln findet eine «Rollreibung» statt. Der Rollreibungskoeffizient nimmt dabei mit abnehmendem Radius proportional zu, wie der französische Physiker *Charles Augustin den Coulomb* (1736–1806) bereits 1785 feststellte (COULOMB 1785).

bungserwärmung zurückzuführen ist, obwohl die Druckschmelze eine gewisse Rolle spielt.» Aber eine grosse Anzahl Messungen mit unterschiedlichen Materialien und Messmethoden zeigen, dass Eis auch bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten sehr glitschig ist (MARMO et al. 2005). Sie widerlegen die Hypothesen, dass sich auf Eis durch Reibung in eine Gleitschicht von flüssigem Wasser bildet (TUSIMA 2011).

Zusammenfassend bestätigen Experimente und Theorie, dass:

1. Flüssiges Wasser ein schlechtes Schmiermittel ist, weil die Filme zu wenig viskos und zu dünn sind. Eine niedrigviskose Schicht fördert das Herausdrücken, erhöht so den direkten Festkörper-Festkörper-Kontakt und erhöht damit die Reibung.
2. Das Druckschmelzen ist für die geringe Reibung von Eis nicht verantwortlich, da die normal aufgebrachten Drücke zu gering sind.
3. Nach der Theorie der Reibungsschmelze entsteht flüssiges Wasser durch Reibungswärme. Weil aber selbst bei sehr kleinen

Geschwindigkeiten die Reibung klein ist, ist die Reibungsschmelztheorie von Eis ein logischer Widerspruch.

Wenn also diese drei obigen Argumente ausgeschlossen werden können, dann müssen auf der Eisoberfläche andere Eigenschaften vorliegen, die für die geringe Reibung verantwortlich sind.

11 Rollreibung für das Gleiten auf Eis

Es ist allgemein anerkannt, dass sich auf der Oberfläche von Eis eine Schicht mit niedrigem Reibungskoeffizienten bildet, die jedoch immer wieder unterschiedlich bezeichnet wird.

«Ich habe sehr früh gelernt, dass es einen Unterschied gibt zwischen dem Wissen um den Namen einer Sache und dem Wissen um eine Sache.»

Richard Phillips Feynman (1918–1988), amerikanischer Physiker und Nobelpreisträger (FEYNMAN & COX 2016).

Zahlreiche Messungen bestätigen, dass auch bei minimalen Reibungsgeschwindigkeiten und geringem Wärmeeintrag ein Abrieb von Wassermolekülen an der Eis- oder Schneeoberfläche stattfindet. Diese freigesetzten Wasser-Nanopartikel (Cluster) werden auch als eisreiche Schlämme bezeichnet (LEVER et al. 2022), sie sind für eine Rollreibung auf der Eis-/Schneeoberfläche verantwortlich (Abbildung 18). Die Härte von Eis nimmt mit abnehmender Temperatur zu (Abbildung 1). Dies führt dazu, dass der Abrieb mehr Energie erfordert und die Cluster kleiner werden. Daher ist eine Zunahme des Roll-Reibungskoeffizienten mit abnehmender Temperatur zu erwarten. Die Reibung ist bei glatten Oberflächen höher als bei rauen. Dieser Effekt ist besonders ausgeprägt bei Temperaturen nahe dem Schmelzpunkt, wo die Reibung auf glatten Oberflächen stark ansteigt. Als Ursache für die höhere Reibung glatter Oberflächen wurde eine Erhöhung der Adhäsion und der Nassreibung durch eine Vergrößerung der Kontaktfläche angenommen.

So wurde festgestellt, dass Adhäsion, Reibung und Verschleiss auf Nanoebene signifikant mit der Dicke und Struktur der adsorbierten Oberflächenschicht korreliert sind. Auf hydrophoben Oberflächen ist diese Schicht stark ungeordnet, was sich durch ein Gemisch von unterschiedlich grossen Clustern erklären lässt (CHEN & QIAN 2020).

12 Quintessenz

«Theorien sind nicht verifizierbar; aber sie können sich bewähren.»

Karl Raimund Popper (1902–1994) österreichisch-britischer Erkenntnisphilosoph (POPPER 1994).

Der Aufbau und das Verhalten von Wasser, Schnee und Eis lassen sich nur mit den Besonderheiten der vier Bindungen für jedes Wassermolekül erklären, die auf dem Tunneleffekt der Quantenmechanik beruhen. Die Eisoberflächenschicht unterscheidet sich in ihren mo-

lekularen Strukturen vom Eisinneren wie beim Wasser (Abbildung 18). Struktur und Dicke dieser Schicht sind auch mit modernsten Messmethoden noch nicht geklärt. Die Bildung von flüssigem Wasser als anerkannt schlechter Schmierstoff mit sehr kleiner Viskosität bei tiefen Temperaturen kommt daher für die geringe Reibung nicht in Betracht. Die Tatsache, dass Eis selbst bei geringem Druck und niedrigen Reibungsgeschwindigkeiten rutschig ist, lässt sich somit weder auf Druckschmelze noch auf Reibungswärme zurückführen. Die gegenseitig und an die Oberfläche schwach gebundenen Wassercluster bilden auf dem Eis eine dünne Oberflächenschicht (Abbildung 18), die als Partikel eine «Rollreibung» mit kleinem Reibungskoeffizienten ermöglichen und somit auch bei geringen Geschwindigkeiten glitschig sind.

Wasser erinnert uns an die Gefahren, Wissenschaft im Elfenbeinturm zu betreiben, an die Risiken, scheinbar eindeutige und plausible Erklärungen ungeprüft zu lassen. Es erinnert uns auch daran, dass Allgegenwart nicht zur Unsichtbarkeit führen darf und dass neue kreative Ansätze zur Erforschung der Welt sowohl Verwirrung schaffen als auch beseitigen können.

«Der Mensch sucht in die sachliche Wahrheit der Natur einzudringen, aber in ihrem letzten, unfassbaren Hintergrund sieht er wie in einem Spiegel unvermutet sich selbst.»

Carl Friedrich von Weizsäcker (1912–2007), deutscher Physiker und Philosoph (WEIZÄCKER 2006).

Detaillierter, chronologischer Überblick zu diesem Thema ist zu finden (BÜTZER & BÜTZER 2022, 2023).

13 Literaturverzeichnis

- BADER, H. (1962): The Physics and Mechanics of Snow as a Material, Cold Regions Research and Engineering Laboratory (U.S.), Engineer Research and Development Center (U.S.), Cold regions science and engineering. Part II, <http://hdl.handle.net/11681/2642>.
- BALL, P. (2008): Water – an enduring mystery, *Nature*, 452, 291–292. doi: 10.1038/452291a. PMID: 18354466.
- BOWDEN, F.P., HUGHES, T.P. (1939): The Mechanism of Sliding on Ice and Snow, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 172 (949), 280–298. doi.org/10.1098/rspa.1939.0104.
- BÜTZER P., BÜTZER M.R. (2022): Is a sliding layer formed when gliding on ice or snow? A chronological overview – as time-specific knowledge. Part I, *Gliding*, 4, 22–36.
- BÜTZER P., BÜTZER M.R. (2023): Is a sliding layer formed when gliding on ice or snow? A chronological overview – as time-specific knowledge. Part II, *Gliding*, 10–42.
- CHAPLIN, M.F. (2009): Theory vs Experiment: What is the Surface Charge of Water?, https://www.waterjournal.org/uploads/vol1/chaplin/WATER_2009.2.Chaplin.pdf. doi: 10.14294/WATER.2009.2.
- CHAPLIN, M.F. (2013): What is liquid water, *Science in Society*, 58, 41–45.
- CHEN, L., QIAN, L. (2020): Role of interfacial water in adhesion, friction, and wear – A critical review, *Friction*, 9 (1), 1–28. doi.org/10.1007/s40544-020-0425-4.
- COULOMB, C.A. (1785): Théorie des machines simples en ayant égard au frottement de leurs parties et à la roideur des cordages, *Mém. des Mith. Phys.*, 161–342.
- DAVIES, M.B., ROSU-FINSEN, A., SALZMANN, C.G., MICHAELIDES, A. (2003): Low-Density Amorphous Ice Contains Crystalline Ice Grains, arXiv:2305.03057.
- DE QUERVAIN, M. (1950): Die Metamorphose eines Eiskristalls, *Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft*, 130, 114–122. doi.org/10.5169/seals-90475.
- DEMMEINIE, M., KOLPAKOV, P., NAGATA, Y., WOUTERSEN, S., BONN, D. (2022): Scratch-Healing Behavior of Ice by Local Sublimation and Condensation, *The Journal of Physical Chemistry C*, 126 (4), 2179–2183. DOI: 10.1021/acs.jpcc.1c09590.
- FARADAY, M. (1850): On Certain conditions of Freezing Water. A Discourse, & Athenaeum, p. 640. [Royal Institution, Friday Evening, June 7, 1850.] p. 373-374 in: *Experimental Researches in Chemistry and Physics*, by Michael Faraday, D.C.L., F.R.S., Reprinted from the *Philosophical Transactions of 1821–1857*, Richard Taylor and William Francis, London, 1859.
- FEYNMAN R.P., COX, B., MA, Y.-Y. (2016): *The Quotable Feynman*, Princeton University Press, p.6.
- GALLO, P., AMANN-WINKEL, K., ANGELL, C.A., ANISIMOV, M.A., CAUPIN, F., CHAKRAVARTY, C., LASCARIS, E., LOERTING, T., PANAGIOTOPOULOS, A.Z., RUSSO, J., SELLBERG, J.A., STANLEY, H.E., TANAKA, H., VEGA, C., XU, L., PETTERSSON, L.G. (2016): Water: A Tale of Two Liquids. *Chem Rev*, 116 (13), 7463–7500. doi: 10.1021/acs.chemrev.5b00750. Epub 2016 Jul 5. PMID: 27380438; PMCID: PMC5424717.
- HEGGLI, M., KÖCHLE, B., MATZL, M., PINZER, B., RICHE, F., STEINER, S., STEINFELD, D., SCHNEEBELI, M. (2011): Measuring snow in 3-D using X-ray tomography: Assessment of visualization techniques. *Annals of Glaciology*, 52 (58), 231–236. doi:10.3189/172756411797252202.
- HOLTZMAN, R., RAZ, O. (2022): Landau theory for the Mpemba effect through phase transitions. *Commun Phys*, 5, 280. doi.org/10.1038/s42005-022-01063-2.
- IGNATOV, I.I. MOSIN, O.V. (2015): Structural Models of Water and Ice Regarding the Energy of Hydrogen Bonding, *Nanotechnology Research and Practice*, 7 (3), 96–118. doi: 10.13187/ejnr.2015.7.96.
- JACKA, T., BUDD, W. (1989): Isotropic and Anisotropic Flow Relations for Ice Dynamics. *Annals of Glaciology*, 12, 81–84. doi:10.3189/S0260305500006996.
- JAMTVEIT, B., MEAKIN, P. (eds.) (1999), *Growth, Dissolution and Pattern Formation in Geosystems*, Springer, Dordrecht, 291. doi.org/10.1007/978-94-015-9179-9 (hier zitiert).
- JOHNSTON, R. (2013): World's slowest-moving drop caught on camera at last, *Nature*. doi.org/10.1038/nature.2013.13418.
- JOLY, J. (1899): The Phenomena of Skating and Prof. J. Thomson's Thermodynamic Relation. *Nature*, 59, 485–486. doi.org/10.1038/059485b0.

- JORDAN, K.D. (2019): Smallest water clusters supporting the ice I structure. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 116 (49), 24383–24385. doi: 10.1073/pnas.1918178116. Epub 2019 Nov 18. PMID: 31740613; PMCID: PMC6900708.
- KEUTSCH, F.N., SAYKALLY, R.J. (2001): Water clusters: Untangling the mysteries of the liquid, one molecule at a time. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. 98, 10533–10540, doi:10.1073/pnas.191266498.
- LANGMUIR I. (1921): Types of valence, *Science*. 54 (1386), 59–67. doi: 10.1126/science.54.1386.59. PMID: 17843674.
- LATIMER, W.M., RODEBUSH, W.H. (1920): Polarity and ionization from the standpoint of the Lewis theory of valence, *Journal of the American Chemical Society*, 42(7), 1419–1433.
- LEVER, J., LINES, A., TAYLOR, S., HOCH, G., ASENATH-SMITH, E., SODHI, D. (2022): Revisiting mechanics of ice–skate friction: From experiments at a skating rink to a unified hypothesis. *Journal of Glaciology*, 68 (268), 337–356. doi:10.1017/jog.2021.97.
- LEVER, J.H., ASENATH-SMITH, E., TAYLOR, S., LINES, A.P. (2021): Assessing the Mechanisms Thought to Govern Ice and Snow Friction and Their Interplay with Substrate Brittle Behavior, *Frontiers in Mechanical Engineering*, 7, 2297–3079. doi=10.3389/fmech.2021.690425.
- LEWIS, G.H. (1916): The Atom and the Molecule, *J. Am. Chem. Soc.*, 1916, 38 (4), 762–785.
- LIDE, D.R. (ed.) (2004): *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (85th ed.). CRC Press, pp. 6–8. ISBN 978-0-8493-0485-9.
- LUTHER, M. (1900): *Luthers Sprichwörter-sammlung*, Hermann Böhlhaus, Weimar, 1900, Projekt Gutenberg, Luther EA 36, 294, <https://www.projekt-gutenberg.org/luther/sprichw/chap323.html> (Accessed 24 June 2023).
- MARMO, B.A., BLACKFORD, J.R., JEFFREE, C.E. (2005): Ice Friction, Wear Features and their Dependence on Sliding Velocity and Temperature, *Journal of Glaciology*, 51, 391–398.
- MENG, X., GUO, J., PENG, J., CHEN, J., WANG, Z., SHI, J.-R., LI, X.-Z., WANG, E.-G., JIANG, Y. (2015): Direct visualization of concerted proton tunnelling in a water nanocluster. *Nat. Phys.*, 11 (3): 235–239. doi:10.1038/NPHYS3225.
- MPEMBA, E.B., OSBORNE, D.G. (1969): Cool? *Physics Education*, 4 (3), 172–175, doi:10.1088/0031-9120/4/3/312.
- NIETZSCHE, F. (1882): *Die fröhliche Wissenschaft*, Scherz, List und Rache, Vorspiel in deutschen Reimen, 13. Für Tänzer, Reclam, S. 8. <https://www.projekt-gutenberg.org/nietzsch/wis-sense/chap002.html> (Accessed 23 June 2023).
- ODENDAHL, N.L., GEISSLER, P.L. (2022): Local Ice-like Structure at the Liquid Water Surface, *Journal of the American Chemical Society*, 144 (25), 11178–11188. DOI: 10.1021/jacs.2c01827.
- PARADOWSKI, R., PAULING, L. (2015): *Day-by-Day, 1935*, Special Collections & Archives Research Center, OSU Libraries, Oregon State University.
- PAULING, L. (1935): The structure and entropy of ice and of other crystals with some randomness of atomic arrangement, *J. Am. Chem. Soc.*, 57, 2680–2684.
- PAULING, L. (1939): *The Nature of the Chemical Bond and the Structure of Molecules and Crystals: An Introduction to Modern Structural Chemistry*, Oxford University Press: London, UK.
- PAULING, L. (1960): *The nature of the chemical bond and the structure of molecules and crystals; an introduction to modern structural chemistry* (3rd ed.), Ithaca (NY): Cornell University Press, p. 450. ISBN 978-0-8014-0333-0.
- PAULING L., HAYWARD R. (1950): *College Chemistry*, 2nd Edition, Publisher. W. H. Freeman and Company, San Francisco, Figure 15–11, p. 335.
- POPPER K.R. (1994): *Logik der Forschung*, 10. Auflage, J.C.B. Mohr, Tübingen, 198.
- PRADZYNSKI, C. C., FORCK, R. M., ZEUCH, T., SLAVÍČEK, P., BUCK, U. (2012): A fully size-resolved perspective on the crystallization of water clusters. *Science*. 337 (6101), 1529–1532. doi: 10.1126/science.1225468. PMID: 22997336.
- QUANE, D. (1990): The Reception of Hydrogen Bonding by the Chemical Community: 1920–1937, *Bulletin for the History of Chemistry*, 7, 4, http://acshist.scs.illinois.edu/bulletin_open_access/num7/num7%20p3-13.pdf, 2023-08-06.
- REYNOLDS, O. (1900): On the Slipperiness of Ice, *Manchester Memoirs*, Manchester, Vol. XLIII., 1898–99, No. 5.
- RICHE, F., MONTAGNAT, M., SCHNEEBELI, M. (2013): Evolution of crystal orientation in snow during temperature gradient metamorphism. *Journal of Glaciology*, 59 (213), 47–55. doi: 10.3189/2013JoG12J116.
- STEINBACH, A. (1951): Gewinnung von Trinkwasser aus Meerwasser durch Ausfrieren, *Chemie Ingenieur Technik*, 23 (12), 296–298. doi.org/10.1002/cite.330231204.

- TAMTÖGL, A., BAHN, E., SACCHI, M., ZHU, J., WARD, D.J., JARDINE, A.P., JENKINS, S.J., FOUQUET, P., ELLIS, J., ALLISON, W. (2021): Motion of water monomers reveals a kinetic barrier to ice nucleation on graphene. *Nat Commun*, 12, 3120. doi.org/10.1038/s41467-021-23226-5.
- THOMSON, J. (1851): 2. Theoretical Considerations on the Effect of Pressure in lowering the Freezing-Point of Water. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, 2, 204–207. doi:10.1017/S037016460003635X.
- THOMSON, W. (1850): XII. The effect of pressure in lowering the freezing-point of water experimentally demonstrated, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 37 (248), 123–127, doi: 10.1080/14786445008646566.
- TUSIMA, K. (2011): Adhesion Theory for Low Friction on Ice, 302-328, in: Ghrib Taher (ed.), *New Tribological Ways*, ISBN 978-953-307-206-7. doi: 10.5772/15085.
- TYNDALL, J. (1858): XIII. On some physical properties of ice, *Phil. Trans. R. Soc.*, 148, 211–229. doi.org/10.1098/rstl.1858.0013.
- USGS, Water Science School, Surface tension allows a water strider to «walk on water», Creative Commons License. <https://www.usgs.gov/media/images/surface-tension-allows-a-water-strider-walk-water>, 2023-07-24.
- WEBER, B., NAGATA, Y., KETZETZI, S., TANG, F., SMIT, W.J., BAKKER, H.J., BACKUS, E.H.G., BONN, M., BONN, D. (2018): Molecular Insight into the Slipperiness of Ice, *J Phys Chem Lett*, 9 (11), 2838–2842. doi: 10.1021/acs.jpcclett.8b01188.
- WEIZÄCKER VON, C.F. (2006): *Die Geschichte der Natur*, 2. Auflage, S. Hirzel Verlag Stuttgart, XII.
- WERNET, P., NORDLUND, D., BERGMANN, U., CAVALLERI, M., ODELIUS, M., OGASAWARA, H., NÄSLUND, L.A., HIRSCH, T.K., OJAMÄE, L., GLATZEL, P., PETTERSSON, L.G., NILSSON, A. (2004): The structure of the first coordination shell in liquid water. *Science*. 304 (5673), 995–999. doi: 10.1126/science.1096205. Epub 2004 Apr 1. PMID: 15060287.
- ZENG, Q., LI, K. (2019): Quasi-Liquid Layer on Ice and Its Effect on the Confined Freezing of Porous Materials. *Crystals*, 9, 250. doi.org/10.3390/cryst9050250.

