Faszination Eis

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
eines Magisters der Naturwissenschaften

an der Karl-Franzens-Universität Graz

vorgelegt von

Manuel HELLINGER

am Institut für Experimentalphysik
an der Technischen Universität Graz

Begutachter: Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Gernot Pottlacher**

Graz, 2017

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen inländischen oder ausländischen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht. Die vorliegende Fassung entspricht der eingereichten elektronischen Version.

Danksagung

Großer Dank gebührt Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Pottlacher, welcher sich für die Betreuung dieser Diplomarbeit bereit erklärt hat. Bei der Übernahme hat er mir großes Vertrauen geschenkt und mir wichtige Tipps zur Diplomarbeit mit auf den Weg gegeben. Besonders dankbar bin ich auch für sein Engagement und zahlreiche interessante Diskussionen inner- und außerhalb seiner Lehrveranstaltungen.

Den größten Dank möchte ich an meine Familie und insbesondere an meine Eltern richten, die mich bei all meinen Entscheidungen unterstützt und gefördert haben. Ohne sie wäre ein Studium in dieser Form nicht möglich gewesen.

Kurzfassung

Eis birgt unzählige und faszinierende Phänomene, welche in dieser Arbeit untersucht werden. Ausgehend von der Frage, warum Eis einen besonders geringen Reibungswiderstand besitzt, werden zuerst einige physikalische Eigenschaften von Eis erläutert, die als Basis für eine weitere Betrachtung dienen. Aktuelle Forschungsergebnisse zu Oberflächenerscheinungen von Eis werden aufgearbeitet und möglichst einfach erläutert, um dann der eigentlichen Frage nachzugehen: Warum ist Eis so rutschig? Obgleich die Frage trivial erscheint, bedarf es bei einer möglichen Beantwortung unzähliger Überlegungen und Vergleichen von Erklärungsversuchen. Im Anschluss werden einige Sportarten, welche auf Eis ausgeübt werden, unter die Lupe genommen. Abschließend wird ein Schulbezug durch relevante Experimente und Themen hergestellt.

Abstract

Ice contains countless and fascinating phenomena, which are investigated within in this work. Starting from the question why ice has a particularly low frictional resistance, some physical properties of ice are explained first, which serve as a basis for further consideration. Current research results on surface phenomena of ice are reviewed and explained as simply as possible, in order to investigate the actual question: Why is ice so slippery? Although the question appears to be trivial, countless considerations and comparisons of attempted explanations are required for a possible answer. Subsequently some sports, which are practised on ice, are examined carefully. Finally, a reference to school is created by relevant experiments and topics.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 1

2 Theoretische Grundlagen ... 2

2.1. Anomalie des Wassers ... 2

2.2. Phasenübergänge ... 4

2.2.1 Verdampfen ... 6

2.2.2 Kondensieren ... 9

2.2.3 Sublimieren ... 11

2.2.4 Resublimieren ... 11

2.2.5 Gefrieren ... 11

2.2.6 Schmelzen ... 12

2.2.7 Gleichgewichtszustand ... 12

2.3. Druckschmelzen ... 13

2.4. Oberflächenschmelzen ... 16

2.5. Schmelzen durch Reibung ... 16

3 QLL ... 17

3.1. Entstehung der QLLs ... 17

3.2. Formen der QLLs ... 19

3.3. Modell für die Dynamik der QLLs ... 20

3.4. QLLs bei tieferen Temperaturen ... 21

4 Warum ist Eis rutschig? ... 23

5 Sport auf Eis ... 29

5.1. Grundlagen des Eishockeysports ... 29

5.1.1 Bodycheck 31

5.1.2 Puck 32

5.1.3 Eishockeyschläger 33

5.2. Eiskunstlauf 35

5.3. Eisschnelllauf und Kufenformen im Vergleich 36

5.4. Curling 38

5.5. Skisport 40

5.6. Synthetisches Eis 42

6 Relevante Experimente 43

6.1. Eiswürfel im randvollen Glas 43

6.2. Sprengkraft des Eises 44

6.3. Temperaturverlauf beim Schmelzen von Eis 45

6.4. Kryophor 46

6.5. Herstellung von Speiseeis 47

6.6. Eiswürfel angeln 48

6.7. Wasserdampf sichtbar machen 48

6.8. Eis und siedendes Wasser nebeneinander 49

6.9. Sieden durch Abkühlen 49

6.10. Tripelpunkt 50

6.11. Nebensonne aus dem Marmeladenglas 51

7 Eis im Physikunterricht 53

8 Zusammenfassung und Ausblick 56

Literaturverzeichnis 57

Abbildungsverzeichnis 61

Tabellenverzeichnis 63

Anhang 64

1 Einleitung

Von Kindesbeinen an ist man mit der Natur und ihren Besonderheiten konfrontiert. Im jüngsten Alter wird die Umgebung meist spielerisch erforscht und dadurch ein Bild von ihr geschaffen, das nicht weiter hinterfragt werden muss. Die Naturwissenschaften leben von der Reproduzierbarkeit, wonach ein erneutes Durchführen derselben Handlung unter denselben Bedingungen immer zum selben Ergebnis führt. Stellt man sich später aber die Frage nach dem „Warum“, so kann man schnell ins Schleudern geraten – und genau das ist das Stichwort.

Michael Faraday berichtete vor etwa 175 Jahren über einen möglichen Wasserfilm, der sich an der Eisoberfläche befinden soll und so für das Zusammenkleben von zwei Eisstücken oder Schneeflocken beim Formen eines Schneeballs verantwortlich sein würde (Faraday, 1932). Aktuelle Forschungsergebnisse zeigen, dass Eis fast immer von einer quasiflüssigen Schicht (QLL) bedeckt ist (Asakawa, Sazaki, Nagashima, Nakatsubo, & Furukawa, 2016; Murata, Asakawa, Nagashima, Furukawa, & Sazaki, 2015, 2016; Sánchez u. a., 2017; G. Sazaki, Zepeda, Nakatsubo, Yokomine, & Furukawa, 2012; Gen Sazaki, Zepeda, Nakatsubo, Yokoyama, & Furukawa, 2010).

Motiviert durch die Ausübung des Eishockeysports werden in dieser Diplomarbeit einige physikalische Aspekte von Eis durchleuchtet. Unter anderem werden die Forschungsergebnisse aufbereitet, um danach genauer auf die geringe Reibung auf Eis einzugehen. Welche Rolle spielen dabei Druck, Reibungswärme, quasiflüssige Schichten, Materialkombinationen und Pinguine? Welche Besonderheiten bieten Sportarten, die auf Eis betrieben werden?

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, diese und weitere Fragen so gut als möglich zu beantworten und einen Bogen zum Physikunterricht zu spannen, um damit einen interessanten Einblick in die Faszination Eis zu ermöglichen.

> Glattes Eis ist ein Paradeis fuer den der gut zu tanzen weiss. (Nietzsche, 1887)

2 Theoretische Grundlagen

2.1. Anomalie des Wassers

Die Anomalie (oder auch Dichteanomalie) des Wassers beschreibt das ungewöhnliche Dichteverhalten des Wassers bei Temperaturabnahme unterhalb einer gewissen Temperatur. Die meisten Stoffe haben im flüssigen Zustand eine geringere Dichte und damit ein höheres Volumen als im festen Zustand. Bei der Metallverarbeitung beispielsweise müssen deshalb die Gussformen größer sein als das Endprodukt, um die gewünschte Größe zu erreichen. Wasser stellt aber eine Ausnahme dar, da die Dichte von Eis geringer ist als die von flüssigem Wasser. Das heißt Wasser vergrößert sein Volumen beim Phasenübergang des Erstarrens (mehr dazu in Abschnitt 2.2). Bringt man Wasser in einer vollen Glasflasche zum Gefrieren, so zerspringt diese. Die Dichteanomalie erklärt also auch, warum Eis im flüssigen Wasser schwimmt. Neben diesem unüblichen Dichteverhalten beim Erstarren hat Wasser auch im Bereich oberhalb des Gefrierpunkts eine besondere Eigenschaft. Während die Dichte von vielen anderen Stoffen oberhalb des Erstarrungspunktes mit steigender Temperatur abnimmt, steigt die Dichte von Wasser an, bis sie ihr Maximum ρ = 999,972 kg m^{-3} bei einer Temperatur T = 3,98 °C („Dichte des Wassers“, o. J.) erreicht, um danach wieder zu fallen. Diese Werte beziehen sich auf Wasser bei Normaldruck p = 1013,25 mbar = 1013,25 hPa.

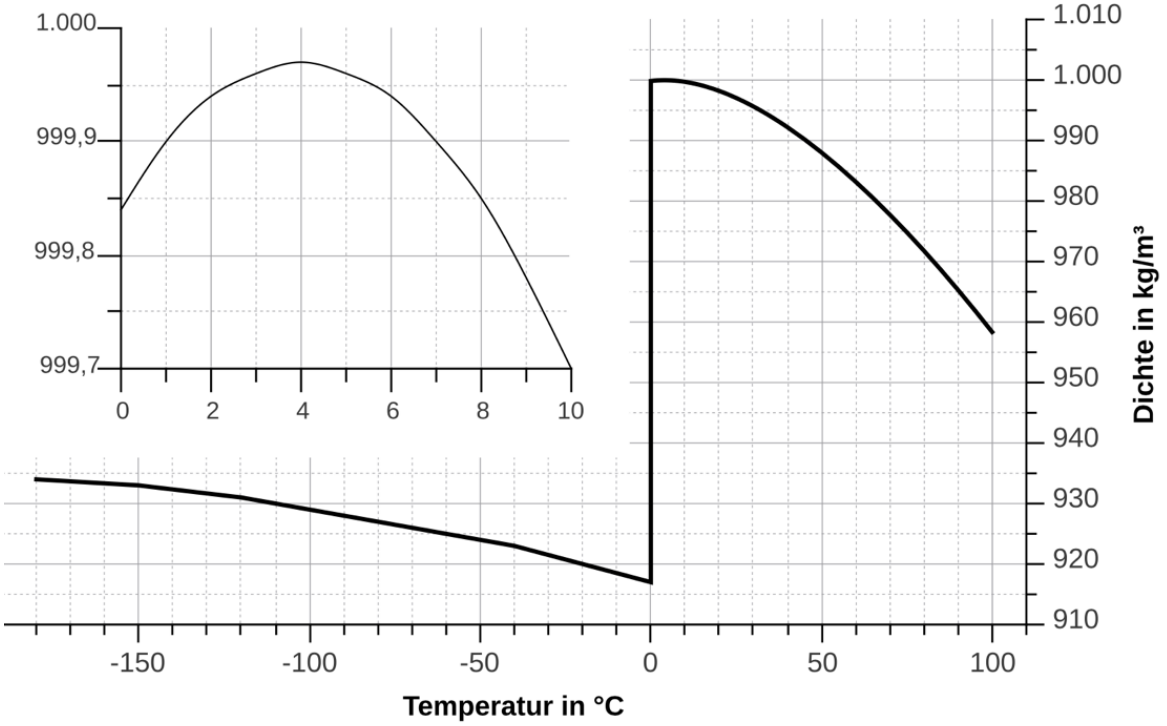


Abbildung 1: Dichte von Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur („Dichteanomalie“, 2017)

Ursache für die Anomalie des Wassers ist die molekulare Anordnung bei verschiedenen Temperaturen. Wassermoleküle sind durch Wasserstoffbrückenbindungen an ihre Nachbarn gebunden. Im festen Zustand bildet Wasser ein Kristallsystem mit Fernordnung, das heißt, dass die einzelnen Moleküle im Festkörper regelmäßig und periodisch angeordnet sind. In diesem Fall haben die Moleküle durch die Wasserstoffbrückenbindungen einen höheren Bindungsabstand als den mittleren im flüssigen Zustand. Man geht davon aus, dass sich schon vor der Erstarrung des Eises sogenannte „Cluster“ bilden, welche als kontinuierliche Vorstufen des Kristalls zu verstehen sind. Bei T = 3,98 °C wird der Zustand des geringsten Volumenbedarfs erreicht (Demtröder, 2015).

Aufgrund der Dichteanomalie können Fische den Winter überleben. Man betrachte dazu die Wassertemperatur an der Oberfläche des Wassers. Oberhalb einer Temperatur von etwa vier Grad Celsius hat das Wasser mit zunehmender Temperatur geringere Dichte. Hat das Wasser in einem Teich also beispielsweise eine Temperatur von T = 20 °C, so ist das Wasser am Grund kühler, da die Verteilung durch die relativen Dichteeigenschaften geschieht. Hat das Wasser an der Oberfläche eine Temperatur im Bereich des Gefrierpunktes, so ist die Temperatur am Grund wieder höher und liegt maximal bei etwa vier Grad Celsius. Diese Aussagen gelten in einem Gewässer mit genügend großer Tiefe, denn bei seichten Gewässern kann das Wasser bis zum Boden gefrieren. Als einfaches Beispiel ist hier eine gefrorene Pfütze zu nennen.

In stillen Gewässern kann durch diese Dichteschichtung eine Zirkulation des Wassers zwischen Grund und Oberfläche grundsätzlich nur zweimal im Jahr stattfinden. Im Frühling schmilzt das Eis und es erwärmt sich das Wasser an der Oberfläche, welches somit bis zu einer Temperatur von T = 3,98 °C immer dichter wird und aufgrund dessen absinkt. Tiefere Schichten steigen dann auf, um nach einer Erwärmung maximal bis zur besagten Temperatur wieder abzusinken. Das Gewässer fängt also von oben an sich kontinuierlich zu durchmischen. Hat sämtliches Wasser eine Temperatur von T = 3,98 °C, so gibt es keine Dichteschichtung mehr, wodurch eine vollständige Zirkulation möglich ist. So gelangt auch das sauerstoffarme Wasser vom Grund weiter nach oben, sodass es dort wieder mit Sauerstoff angereichert werden kann. Im Herbst sinkt die oberste Wasserschicht durch Abkühlung, wodurch eine erneute Zirkulation stattfinden kann.

2.2. Phasenübergänge

In diesem Abschnitt werden die Prozesse der Phasenübergänge von Wasser durchleuchtet und mit Beispielen untermauert. Dazu werden zuerst die Eigenschaften der drei klassischen Aggregatszustände (Phasen) der Vollständigkeit halber erwähnt.

Tabelle 1: Eigenschaften der Stoffe in den verschiedenen Aggregatszuständen (Kuchling, 2011)

	Fest	Flüssig	Gasförmig
Kristallgitter	ja	nein	nein
Bestimmte Gestalt	ja	nein	nein
Kohäsion	ja	ja	nein
Bestimmtes Volumen	ja	ja	nein

Ergänzend zur Tabelle seien noch einige Überlegungen angeführt. Wie in Abschnitt 2.1 erwähnt, bilden sich knapp oberhalb des Gefrierpunktes von Wasser Cluster. Diese Komplexe von Wassermolekülen sind allerdings sehr instabil und lösen sich innerhalb von Bruchteilen von Sekunden wieder. Ebenso ist hierbei noch nicht von einer Fernordnung zu sprechen, weshalb der flüssigen Phase auch in diesem Temperaturbereich keine Eigenschaft eines Kristallgitters zuzuschreiben ist. Bei der gasförmigen Phase sei noch erwähnt, dass Stoffe in einem solchen Aggregatszustand immer den gesamten Raum einnehmen, der ihnen zur Verfügung steht. Verringert man das Volumen so weit, dass eine Kohäsion einsetzt, so verflüssigt sich der Stoff.

Bezeichnet man wie in der Literatur die gasförmige Phase als höchsten und die feste Phase als niedrigsten Aggregatszustand, so kann man sagen: Ein Phasenübergang zu einem höheren Aggregatszustand benötigt eine Energiezufuhr und zu einem niedrigeren eine Energieabgabe. Diese werden als entsprechende Wärmemengen angegeben und beinhalten immer zwei Komponenten. Einerseits ist eine Volumenänderung gegen den äußeren Druck mit Energie verbunden und andererseits eine Arbeit bei Änderung des Molekülabstands gegen intermolekulare Kräfte (Demtröder, 2015).

Da bei Wasser alle drei Aggregatszustände sehr häufig in der Natur vorkommen, haben alle Phasen ihren eigenen Namen. Bei festem Wasser sprechen wir von „Eis“, bei flüssigem einfach nur von „Wasser“ und bei der gasförmigen Phase von „Wasserdampf“.

Ein Aggregatszustand kann dabei durch bloße Änderung der Temperatur oder des Drucks in einen anderen überführt werden.

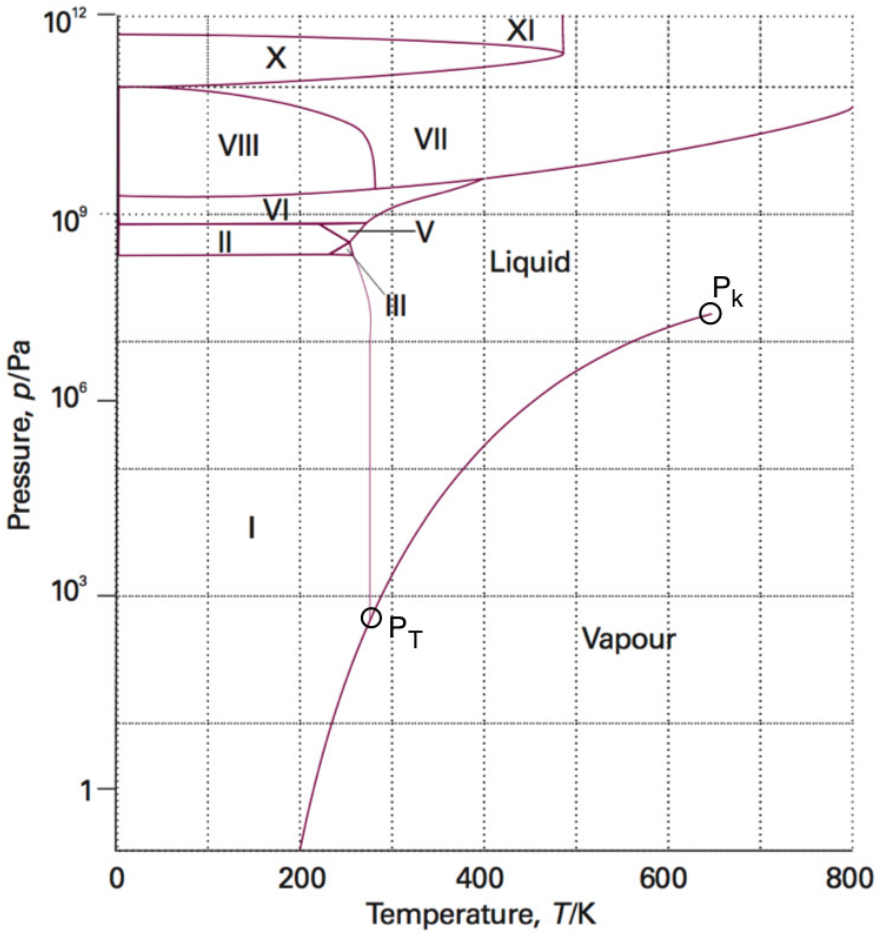


Abbildung 2: Experimentelles Phasendiagramm von Wasser mit Tripelpunkt P_T und kritischem Punkt P_k (Atkins & de Paula, 2006, S. 121, Abbildung erweitert um Tripelpunkt und kritischen Punkt)

In der Abbildung 2 beschreiben I-XI verschiedene feste Phasen von Wasser. Eis I würde dabei (großteils) dem normalen Eis entsprechen, alle anderen festen Phasen existieren erst ab einem Druck von über 1000 bar (Atkins & de Paula, 2006). Hat man im Labor die Möglichkeit solch hohe Drücke zu erzeugen, so kann Wasser bei Raumtemperatur gefrieren (so bereits geschehen an der TU Graz im Labor Subsekunden Thermophysik).

Die Kurve zwischen Wasserdampf und Eis I (Sublimationskurve) beziehungsweise Wasserdampf und Wasser (Siedepunktskurve) erreicht ihr Maximum am sogenannten kritischen Punkt P_k und endet dort. Dieser Punkt wird bei Wasser durch die kritische Temperatur T_k = 374 °C ≈ 647 K und den kritischen Druck p_k = 220 bar = 2,2 * 10^7 Pa beschrieben (Kuchling, 2011). Unterhalb dieses Punkts lässt sich beispielsweise Wasserdampf durch Druck verflüssigen. Oberhalb dieses Punkts befinden sich die Dichten der beiden Phasen im Gleichgewicht, sodass nicht mehr zwischen den Aggregatszuständen flüssig und gasförmig unterschieden werden kann.

Die Trennlinie zwischen Wasser und Eis I (Schmelzpunktskurve) wirkt in Abbildung 2 durch die Skalierung wie eine Vertikale, ist aber eine steil fallende Kurve (in Abschnitt 2.2.7 wird dies ersichtlich).

2.2.1 Verdampfen

Zwischen den Wassermolekülen herrscht eine Kohäsionskraft, bedingt durch die Wasserstoffbrückenbindungen. Diese ist beispielsweise für die Oberflächenspannung oder für das Bilden von Tropfen verantwortlich. Wird die Kohäsionskraft überwunden und geht das Wasser in den gasförmigen Zustand über, so spricht man von einem Verdampfen. Dabei kann zwischen Sieden und Verdunsten unterschieden werden. Unterhalb des Siedepunkts von Wasser, welcher druckabhängig ist, spricht man beim Übergang in die gasförmige Phase von einer Verdunstung. Dieser Übergang geschieht nur an der Oberfläche. Wird der Siedepunkt erreicht, so bleibt die Temperatur bei weiterer Energiezufuhr konstant und man sagt, dass Wasser siedet. Bei diesem Vorgang geschieht eine Verdampfung auch innerhalb der Flüssigkeit, welche man beim Kochen beobachten kann. Dabei steigen Wasserdampfblasen aufgrund ihrer geringeren Dichte auch vom Boden aus auf und verlassen die Flüssigkeit an der Oberfläche.

Für der den Phasenübergang des Verdampfens ist eine (temperaturabhängige) Verdampfungswärme Q_V erforderlich. Bezieht man diese Wärmemenge auf die auf die Masse m, so nennt man diese die spezifische Verdampfungswärme bzw. Verdampfungsenergie r.

$$r = \frac{Q_V}{m} \tag{1}$$

Für Wasser ergibt sich bei Normaldruck eine spezifische Verdampfungswärme von r = 2257 kJ/kg (Kuchling, 2011). Dieselbe Energiemenge wird auch beim Verdunsten benötigt, welche meist der Flüssigkeit entzogen wird und sich diese infolgedessen abkühlt. Deshalb wird die Verdampfungswärme in diesem Fall auch Verdunstungskälte genannt. Der menschliche Körper nützt diese Möglichkeit der Abkühlung beim Schwitzen.

Den druckabhängigen Siedepunkt kann man ausnützen, um die Höhe zu bestimmen. Für den Spezialfall einer isothermen Atmosphäre (mit der Temperatur T = 15 °C) kann man den Luftdruck p und die Höhe z mit einer einfachen barometrischen Höhenformel in Verbindung bringen. In (2) stehen p_0 = 1013,25 hPa für den Normaldruck und H für die Skalenhöhe mit einem Wert H ≅ 8000 m (Foelsche, 2015b).

$$p(z) = p_0 \, e^{-\frac{z}{H}} \tag{2}$$

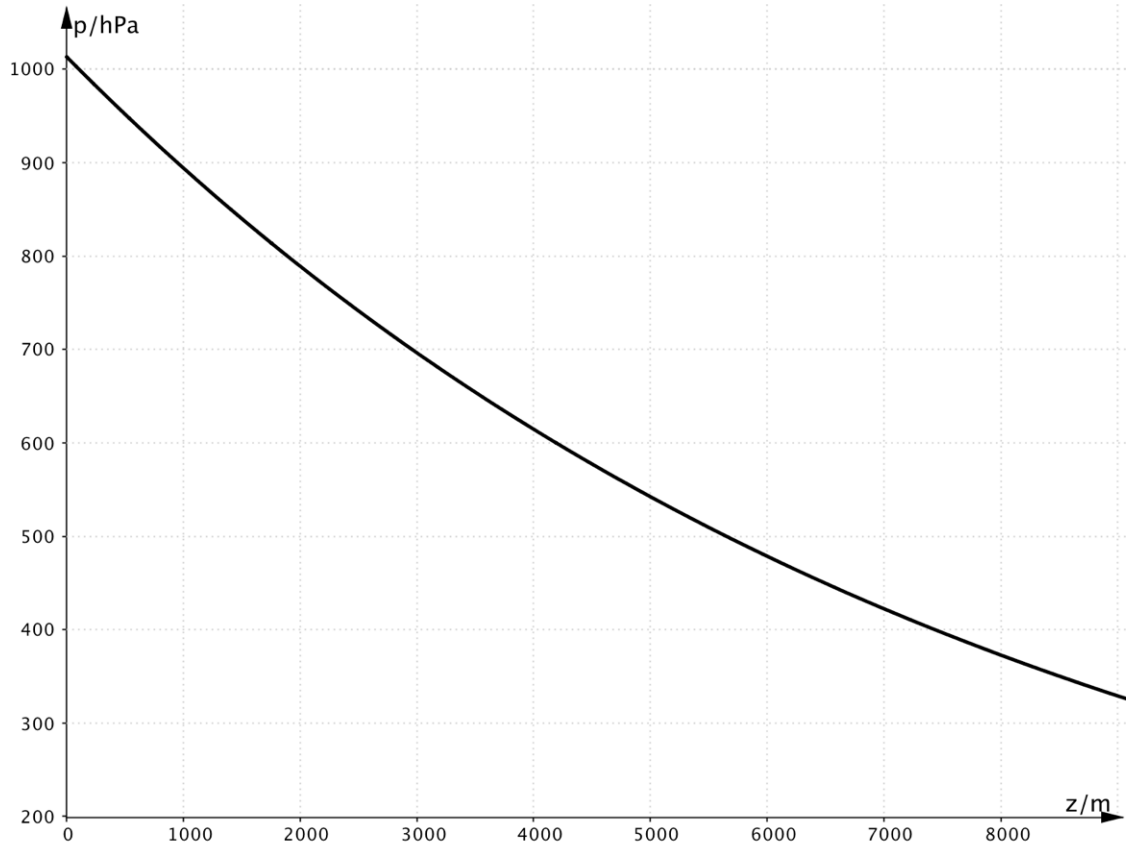


Abbildung 3: Luftdruck in Abhängigkeit von der Höhe, berechnet durch die barometrische Höhenformel für den Fall einer isothermen Atmosphäre (eigene Abbildung)

Berücksichtigt man die Temperaturabnahme mit der Höhe, so ist der Druckabfall sogar stärker (Foelsche, 2015b). Formt man (2) auf die Höhe z um, so ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$z = H \ln\left(\frac{p_0}{p(z)}\right) \tag{3}$$

Gemeinsam mit dem druckabhängigen Siedepunkt (siehe Abbildung 2) kann man so mit Hilfe eines Thermometers und siedenden Wassers die Höhe (z.B. auf Bergen) bestimmen. Dies kann mittels eines Hypsometers durchgeführt werden. In diesem wird Wasser zum Sieden gebracht und ein spezielles Thermometer misst die Temperatur des Wasserdampfs, mit welcher auf die Höhe geschlossen werden kann. Da der Luftdruck aber auch stark wetterabhängig ist, muss man mit einem hohen systematischen Fehler rechnen (Lenzenweger, o. J.).

Den druckabhängigen Siedepunkt kann man sich aber auch beispielweise beim Kochen zunutze machen. Der Deckel des Papinschen Topfs (auch Druckkochtopf genannt) wird durch Verdrehen druckfest mit dem Topf verschlossen. Durch den erhöhten Dampfdruck beginnt Wasser erst bei höherer Temperatur zu sieden, wodurch Speisen schneller gekocht werden können. Einen essentiellen Bestandteil des Papinschen Topfs stellt das Sicherheitsventil da, das nur einen gewissen Überdruck innerhalb des Topfs zulässt und diesen regelt. Durch defekte Ventile kommt

es immer wieder zu folgenschweren Unfällen, da die bei der Explosion umhergeschleuderten Metallteile Menschen verletzen oder sogar töten können (orf.at, 2007).

Der Grund für diese Gefahr und den hohen Druck ist das Verhältnis der Volumina zwischen Wasser und Wasserdampf. So wird ein Liter Wasser bei gleicher Temperatur und gleichem Druck zu 1700 Liter Wasserdampf (Demtröder, 2015). Steht nicht genügend Raum für den Wasserdampf zur Verfügung, so erhöht sich der Druck durch die isochoren Bedingungen bei Temperaturerhöhung.

Als weitere Gefahr dieses Volumenverhältnisses ist das Löschen eines Kaminbrandes zu nennen. Der dabei entstehende Wasserdampf kann nicht schnell genug abgeführt werden, sodass es auch hier zu einem Zerbersten des Kamins kommen kann.

Der Vollständigkeit halber und um Missverständnissen vorzubeugen sei noch der Sättigungsdampfdruck und seine Unabhängigkeit vom Volumen erwähnt. Befindet sich ein Gas in einem abgeschlossenen Gefäß und verringert man das Volumen bei gleichbleibender Temperatur, so erhöht sich der Druck im Inneren. Befindet sich allerdings eine Flüssigkeit in einem abgeschlossenen Gefäß, welche dieses nicht zur Gänze ausfüllt, so verdunstet Flüssigkeit und Dampf kondensiert. Es bildet sich ein Gleichgewicht zwischen diesen Vorgängen bei einem bestimmten temperaturabhängigen Druck, dem sogenannten Sättigungsdampfdruck. Dieser kann nicht überschritten werden, d. h. ein Verkleinern des Volumens führt nicht zu einer Erhöhung des Dampfrucks im Inneren des Gefäßes, sondern zur verstärkten Kondensation des Dampfs (Kuchling, 2011). Sehr wohl ist der Sättigungsdampfdruck aber von der Temperatur abhängig (siehe dazu Abbildung 2, Siedepunktskurve).

Erwähnenswert ist die Gefahr des sogenannten Siedeverzugs. Wird in einem Gefäß mit glatten und sauberen Innenwänden reines Wasser erhitzt, ohne es umzurühren, so kann es bei Normaldruck eine Temperatur von über 100 °C erreichen, ohne das Einsetzen des Siedevorgangs. Grund hierfür ist das Fehlen von Keimen, sodass sich keine Wasserdampfblasen bilden können. Dieser Zustand ist metastabil und kann bei Erschütterungen oder beim Zuführen von Keimen zu Gefahren führen. Das Wasser verdampft dann schlagartig, sodass sich große Dampfblasen bilden können, die mit hoher Geschwindigkeit aufsteigen, dort entweichen und so zu einem heftigen Spritzen der Flüssigkeit führen (Hauk, 2016).

2.2.2 Kondensieren

Den Übergang von gasförmigem zu flüssigem Wasser nennt man Kondensieren und dies stellt somit das Gegenstück zum Verdampfen dar. Das Einsetzen eines Kondensationsvorgangs geschieht beim Kondensationspunkt, welcher dem Siedepunkt entspricht. Während der Kondensation bleibt die Temperatur konstant und die aufgenommene Verdampfungswärme wird dem Wasserdampf wieder entzogen und an die Umgebung abgegeben, welche dann Kondensationswärme genannt wird. Eine Änderung von Volumen, Temperatur oder Druck, welche zu einem Verdampfen führt, bringt Wasserdampf bei einer gegenteiligen Änderung zum Kondensieren.

Je höher die Temperatur der Umgebungsluft ist, desto mehr Wasserdampf kann sie aufnehmen. Dieser Zusammenhang wird durch den Sättigungsdampfdruck beschrieben und entspricht der Siedepunktskurve in Abbildung 2. Enthält Luft die maximale Menge an Wasserdampf, die sie aufnehmen kann, so spricht man von gesättigter Luft. Kühlt man ein ungesättigtes Luftpaket bis zum Taupunkt ab, also zu dem Punkt, an welchem die Luft gesättigt ist, so beginnt der Wasserdampf zu kondensieren und man spricht von einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100 %. In der Natur ist dieses Phänomen häufig ab den Abendstunden zu beobachten. Die relativ warme und ungesättigte Luft kühlt sich ab, die Luft wird gesättigt, der Wasserdampf kondensiert und bleibt als Tau an verschiedensten Oberflächen zurück. Man kann aber auch kalte Gegenstände, wie z.B. Getränke, in die Umgebung einer warmen ungesättigten Luft bringen und eine Kondensation an solchen Gegenständen beobachten, ohne dabei große Luftmassen abkühlen zu müssen.

In schlecht isolierten Kellern ist daher ein Lüften bei warmen Außentemperaturen zu vermeiden beziehungsweise gezielt durchzuführen. Der Kellerboden bietet mit seiner relativ kalten Oberfläche eine hervorragende Kondensationsmöglichkeit für die feuchte und relativ warme Außenluft. Deshalb empfiehlt sich der Einsatz von einem Hygrometer im Außenbereich, welcher die Luftfeuchte misst, sodass man bei trockener Luft ein verstärktes Kondensieren im Keller beim Lüften vermeiden kann.

Für die Kondensation beim Taupunkt sind Kondensationskerne, wie beispielsweise Staub, oder andere Oberflächen notwendig. Ohne solche Kondensationskerne kann der Taupunkt auch unterschiedlich stark ohne einsetzende Kondensation unterschritten werden (Kuchling, 2011).

Um die thermodynamischen Zustandsgrößen von feuchter Luft nicht immer neu berechnen zu müssen, kann man sich des Mollierdiagramms bedienen (siehe Abbildung 4). Dieses beinhaltet Größen wie Temperatur, Partialdruck des Wasserdampfs, Wasserdampfgehalt, Dichte der Luft, relative Luftfeuchtigkeit und spezifische Enthalpie in einem einzigen Diagramm durch die Darstellung in schiefwinkligen Koordinaten.

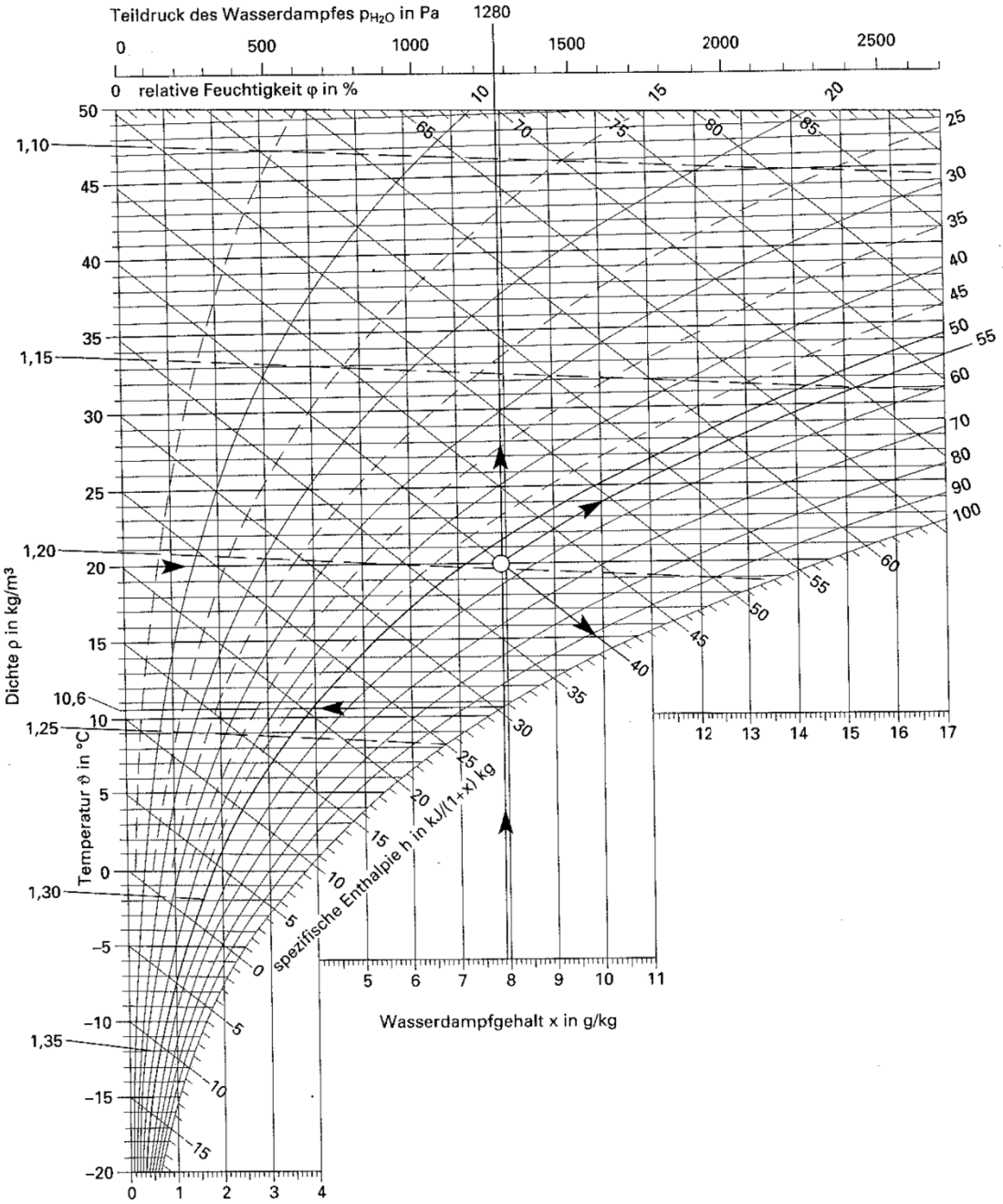


Abbildung 4: Mollierdiagramm für feuchte Luft (Pottlacher, 2001, S. Wärme 23)

2.2.3 Sublimieren

Feststoffe können auch direkt in die Gasphase übergehen. Dieser Vorgang wird Sublimation genannt. Der vorhandene Dampfdruck ist aber sehr gering (siehe Abbildung 2) und daher läuft dieser Vorgang nur sehr langsam ab (Stuart, 2006). Die dafür notwendige Sublimationswärme entspricht dabei der Summe aus Schmelz- und Verdampfungswärme (Kuchling, 2011). Als Beispiel für Wasser sind hier Schnee bei tiefen Temperaturen und stark ungesättigter Luft sowie das Trocknen gefrorener Wäsche zu nennen. Scheinbar kann eine Sublimation nur unterhalb eines Drucks von 611 Pa (siehe Abbildung 2 und 2.2.7) stattfinden und dennoch ist sie bei atmosphärischen Bedingungen zu beobachten. Allerdings ist dieser beschriebene Druck der Dampfdruck, welcher nur ein Partialdruck des Umgebungsluftdrucks ist. Dieser Phasenübergang spielt allerdings eine weitaus größere Rolle als man annehmen mag (siehe dazu Kapitel 3). Besonders eindrucksvoll kann man einen Sublimationsvorgang bei Trockeneis beobachten. Dabei bildet sich ein sichtbarer Bodennebel durch die Kondensation des Wasserdampfs aus der Umgebungsluft.

2.2.4 Resublimieren

Die Umkehrung der Sublimation wird sinngemäß als Resublimation bezeichnet. Die dabei abgegebene Resublimationwärme entspricht der Sublimationswärme. Raureif oder die Eisschicht am Verdampfer in einem Kühlschrank sind Beispiele für Produkte von Resublimationsvorgängen. Der Wasserdampf gefriert sofort, ohne dazwischen in die flüssige Phase überzugehen.

2.2.5 Gefrieren

Der Phasenübergang von flüssig auf fest wird Erstarren genannt, bei Wasser nennt man ihn Gefrieren. Bei Normaldruck liegt der Gefrierpunkt bei 0 °C = 273,15 K und die spezifische Erstarrungswärme q hat einen Wert von q = 334 kJ/kg (Kuchling, 2011). Wie auch beim Sieden und Kondensieren gilt, dass während des Gefrierens oder Schmelzens die Temperatur konstant bleibt.
Die verschiedenen festen Phasen von Wasser (siehe Abbildung 2) unterscheiden sich in den Anordnungen der einzelnen Wassermoleküle, denn unter hohem Druck brechen die Wasserstoffbrückenbindungen auf, was zu einer anderen Strukturbildung führt (Atkins & de Paula, 2006). Eis gibt es in mindestens 18 verschiedenen Kristallformen, wobei das hexagonale Eis (entspricht einem Teil von Eis I in Abbildung 2) bei atmosphärischen Bedingungen vorherrscht (Foelsche, 2015a).

2.2.6 Schmelzen

Das Schmelzen von Eis, also der Übergang von festem zu flüssigem Wasser, stellt einen wesentlichen Teil dieser Diplomarbeit dar und wird im weiteren Verlauf noch öfters aufgegriffen. Die Grundlagen für diesen Vorgang bleiben wie zuvor ähnlich. So ist der Schmelzpunkt gleich dem Gefrierpunkt und die Erstarrungswärme ist gleich der Schmelzwärme.

Im Allgemeinen steigt der Schmelzpunkt von Stoffen bei steigendem Druck aber Wasser stellt durch seine Anomalie eine Ausnahme dar (siehe 2.3).

2.2.7 Gleichgewichtszustand

Entlang der verschiedenen Kurven in Abbildung 2 können zwei Phasen gleichzeitig existieren. Im sogenannten Tripelpunkt P_T als Schnittpunkt von Siedepunkts-, Schmelzpunkts- und Sublimationskurve können alle drei Phasen von Wasser im Gleichgewicht existieren.

Der Tripelpunkt ist druckunabhängig und dient deshalb heute zur Definition der Basiseinheit der Temperatur als 273,16ter Teil des Tripelpunkts von Wasser (Kuchling, 2011). In Zukunft wird dafür die Boltzmann-Konstante k_B = 1,38064852 * 10^{-23} J/K herangezogen, um die Definition auf eine Naturkonstante zu stützen (Lerch, 2016, S. 17). Somit wäre 1 K eine Temperaturänderung, die der Änderung der thermischen Energie um 1,38064852 * 10^{-23} J entspricht (Demtröder, 2015).

Der Tripelpunkt liegt bei T = 0,01 °C = 273,16 K und p = 6,11 mbar = 611 Pa (Atkins & de Paula, 2006). Im Vergleich dazu liegt der Schmelzpunkt von Wasser bei T = 0,00 °C = 273,15 K bei einem rund 165-fachen Druck von p = 1013,25 hPa. Die Schmelzpunktskurve ist also steil fallend.

Vergleicht man den Tripelpunkt mit dem Schmelzpunkt, so wird ersterer nur erreicht, wenn sich in einem geschlossenen Gefäß nur Wasserdampf als Gas befindet. Dafür wird das Gefäß evakuiert, sodass Wasser solange verdampft, bis sich der Sättigungsdampfdruck einstellt. So befinden sich keine anderen Gase innerhalb des Gefäßes und der gesamte darin herrschende Gasdruck entspricht dem Partialdruck des Wasserdampfs. Beim häufiger beobachtbaren Schmelzpunkt hingegen lastet ein Gasdruck auf dem Eis, welcher sich aus den Partialdrücken vieler Gase der Atmosphäre wie Stickstoff, Sauerstoff, Wasserdampf und anderen zusammensetzt.

Erwähnenswert ist an dieser Stelle die Gibbssche Phasenregel, welche die Anzahl an Freiheitsgraden f in den Zustandsgrößen des Drucks p und der Temperatur T bei einer Anzahl an q gleichzeitig existierenden Phasen bestimmt, sodass sich beim Tripelpunkt mit q = 3 keinerlei Freiheitsgrade ergeben (Demtröder, 2015).

$$f = 3 - q \tag{4}$$

2.3. Druckschmelzen

Eis kann durch Druckausübung geschmolzen werden. Dies liegt an der relativ höheren Dichte des flüssigen Wassers. Lässt der Druck nach, so kann das Wasser wieder gefrieren, da dieses ja keine Temperaturerhöhung erfährt. Die Schmelzpunkterniedrigung durch Druck wird auch Regelation genannt.

Gerne wird im Physikunterricht ein Versuch demonstriert oder zumindest genannt, bei welchem ein mit Gewichten beschwerter Draht durch einen Eisblock wandert, welcher dabei ganz bleibt, wenn der Draht dünn genug ist. Je größer die Masse und je dünner der Draht ist, desto schneller geht dieser Vorgang vonstatten.

Der Schmelzpunkt von Eis sinkt bei einer Erhöhung des Drucks um 1 bar um 0,0075 K (Stuart, 2006). Versucht man einen Eisblock mit einer Breite von 10 cm, einem Draht mit einer durchgängigen Auflagebreite von 0,1 mm und einer Masse von 10 kg zu durchtrennen, so erhält man eine Kraft von 981 N auf einer Fläche von 10^{-5} m^2, somit einen Druck von 9,81 MPa (= 98,1 bar) und dadurch eine Schmelzpunkterniedrigung um etwa 0,74 K. Der Versuch wird sehr oft bei Zimmertemperatur durchgeführt, sodass der Eisblock ohnehin schmilzt und dieser Vorgang unterhalb des Drahtes beschleunigt stattfindet. Zusätzlich spielt die Wärmeleitfähigkeit des Drahtes eine entscheidende Rolle. Durch diese kann der Draht immer Wärme von der Umgebungsluft aufnehmen und an das Eis übertragen. Derselbe Versuch lässt ein langsameres Durchwandern der Schlinge erwarten, wenn man ein anderes Material als Metall, wie zum Beispiel Nylon, benützt.

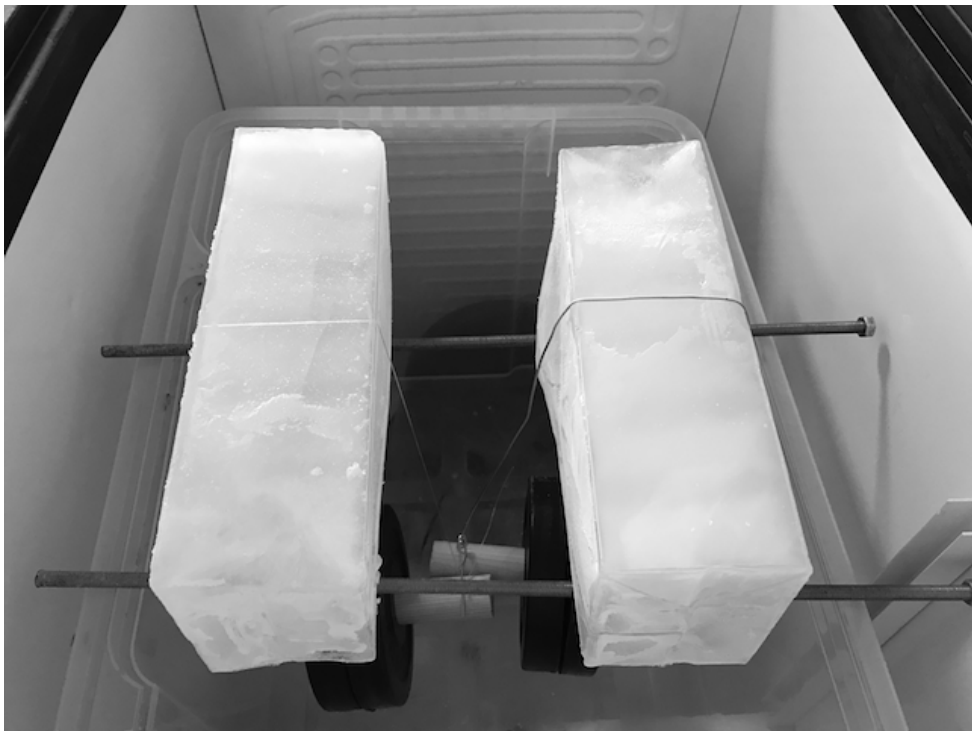


Abbildung 5: Versuchsaufbau zum Prinzip der Regelation, links mit einem Nylonfaden (Durchmesser 0,5 mm), rechts mit einem Metalldraht (Durchmesser 1 mm) und einer jeweiligen Belastung von 2,5 kg (eigene Abbildung)

Führt man den Versuch wie in Abbildung 5 in einer Gefriertruhe bei einer Temperatur deutlich unterhalb des Schmelzpunktes durch, so wandern die Schlingen keineswegs durch die Eisblöcke. Die Schmelzpunkterniedrigung reicht bei weitem nicht aus.

Der Versuch wurde später mit einem dünneren Metalldraht und einer höheren Belastung in einem Gefrierschrank bei noch tieferen Temperaturen durchgeführt. Um die Verfälschung des Versuchs möglichst gering zu halten, wurden alle Komponenten bei der gleichen Temperatur gelagert, bis der eigentliche Versuch gestartet wurde.

Die Solltemperatur des Gefrierschranks betrug dabei -24 °C, der Metalldraht hatte einen Durchmesser von 0,6 mm und es wurde eine Belastung von 10 kg gewählt. Beim Versuchsstart musste der Gefrierschrank zum Anordnen der einzelnen Komponenten für einige Zeit geöffnet werden, sodass die Temperatur kurzzeitig auf -8 °C anstieg, um danach wieder bis zur Solltemperatur abzufallen.

Abbildung 6: Erneuter Versuchsaufbau zur Regelation in einem Gefrierschrank bei einer Temperatur von -24 °C mit einem Metalldraht (Durchmesser 0,6 mm) und einer Belastung von 10 kg (eigene Abbildung)

Selbst nach über 48 Stunden war keine Veränderung der Drahtposition oder der Form des Eisblocks bemerkbar, sodass der Versuch an dieser Stelle abgebrochen und bei einer Umgebungstemperatur von etwa 22 °C durchgeführt wurde. Dabei konnten folgende Vorgänge beobachtet werden (Fotos im Anhang):

- Direkt nach dem Aufbau setzte eine verstärkte Resublimation des Wasserdampfs an den Gewichten, am Aluminiumgestell und am Draht im Bereich seiner Auflagefläche ein
- Nach etwa 15 Minuten war ein leichtes Einsinken des Drahtes im Bereich der Kanten des Eisblocks erkennbar. Zur selben Zeit war das Eis aber schon stärker an den Stellen geschmolzen, an denen der Eisblock am Aluminiumgestell auflag, sodass dieses in den Eisblock zu wandern begann
- Nach etwa 25 Minuten begann das Eis an der Oberfläche sichtlich zu schmelzen, allerdings vorwiegend im Bereich der Auflageflächen am Aluminiumgestell
- Nach über 50 Minuten war ein Schmelzen des Eisblocks über seine gesamte Oberfläche zu erkennen und auch der Draht war nun schon einige Millimeter in das Eis gewandert. Der Draht rutschte mit den befestigten Gewichten auf eine Seite, bis diese durch das Aluminiumgestell an einer weiteren Drehbewegung gehindert wurden. Dieser Vorgang lässt sich mit einem Vorhandensein eines Wasserfilms unterhalb des Drahts erklären, welcher die Reibung zwischen Draht und Eis deutlich verringert
- Nach etwa 90 Minuten war der Draht an den Seitenflächen des Eisblocks bis zur Hälfte eingesunken, während an der oberen Fläche ein minimales Einsinken beobachtet werden konnte. An den Auflageflächen des Eises am Gestell waren dessen Rohre über den gesamten Durchmesser von etwa 1 cm in das Eis eingedrungen, ohne ein erneutes Zufrieren rund um die Rohre
- Nach 110 Minuten war das Schmelzen des Eises im Bereich der Auflageflächen durch die erhöhte Wärmezufuhr des Aluminiumgestells bereits soweit fortgeschritten, dass eine Weiterführung des Versuchs unter diesen Umständen nicht mehr möglich war. So wurde der Eisblock mit Holzbrettern unterstützt, um das Schmelzen unterhalb des Drahtes weiter beobachten zu können
- Nach etwa 240 Minuten war die Drahtschlinge letztendlich durch den Eisblock gewandert, ohne diesen zu durchtrennen

Trotz eines äußerst hohen Drucks, der ein Aufheben des Drahtes ohne Hilfsmittel oder Handschuhe schmerzhaft gestaltete, trug die Wärmezufuhr beim Draht und bei den Auflageflächen am Gestell zu einem stärkeren Schmelzen bei als der Druck durch den Draht.

2.4. Oberflächenschmelzen

Michael Faraday war im 19. Jahrhundert der Meinung, dass Eis immer eine nasse Oberfläche aufweist, also auch bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts (Faraday, 1932; Zastrow, 2016). Dieses Phänomen wird Oberflächenschmelzen genannt und beschreibt die Bildung einer dünnen Flüssigkeitsschicht an der Oberfläche eines Festkörpers ohne Temperatur- oder Druckerhöhung. Als Grund für diese Flüssigkeitsschicht werden die geringere Anzahl an Nachbarmolekülen und die daraus resultierende schwächere Bindung genannt (Wilhelm & Hopf, 2015). Eine genauere Betrachtung dieser Theorie erfolgt in Kapitel 3.

2.5. Schmelzen durch Reibung

Befinden sich zwei Körper in Kontakt und bewegen sich relativ zueinander, so wirkt eine Reibungskraft parallel zur Kontaktfläche und wirkt entgegen der Bewegungsrichtung. Dabei kann zwischen mehreren Reibungsarten, wie z.B. Haft- oder Gleitreibung unterschieden werden. Das Reiben an Eis führt Energie zu und kann es so schmelzen.

Hier ist zu erwähnen, dass Eis umso rutschiger wird, je öfter man über dieselbe Stelle reibt. Davon kann man sich leicht überzeugen, wenn man auf einer Eisfläche mit einer Hand über das Eis wischt. Zu Beginn fühlt sich das Eis sogar trocken an und schon nach dem ersten Wischen ist eine deutlich verringerte Reibung an dieser Stelle zu bemerken. Nach mehrmaligem Wischen ist dann auch ein dünner Wasserfilm zu erkennen. Mit Vorbehalt kann man also sagen, dass eine erhöhte Reibungsarbeit an einer Stelle des Eises die Reibung ebenda reduziert und ein dickerer Wasserfilm die Gleiteigenschaften erleichtert.

Beim Curling nützt man dieses Prinzip beim Wischen mit den Curlingbesen. Dabei wird unter anderem das Eis direkt vor dem Curlingstein gewischt, sodass dort ein Wasserfilm entsteht, welcher die Reibung reduziert und somit auch ein längeres Gleiten des Curlingsteins erlaubt. Hinter Curling stecken allerdings noch mehrere verblüffende Phänomene und Theorien. Diese werden in Abschnitt 5.4 dargelegt und diskutiert.

3 QLL

Das Schmelzen von Eis kann unter gewissen Umständen also durch Reibung oder Druck stattfinden. Damit wird an der Oberfläche ein Wasserfilm erzeugt, welcher im Vergleich zum Festkörper eine freie Verschiebbarkeit der Moleküle aufweist (Demtröder, 2016). Dieser könnte die geringe Reibung beim Gleiten über Eis klären. Warum ist Eis aber auch ohne Bewegung rutschig? Sind solche Filme an der Oberfläche immer so frei verschiebbar, wie normales Wasser?

Der Druck eines normalen Schuhs auf das Eis reicht nicht aus, um dieses zu schmelzen und da bei einer Haftreibung keine Arbeit verrichtet wird, erwärmt sich das Eis auch nicht und kann so auch nicht schmelzen.

Das Oberflächenschmelzen, wie es Faraday vorgeschlagen hat, sei eine stets präsente Vorstufe zum eigentlichen Schmelzen (Zastrow, 2016). Somit würde die Oberfläche des Eises stets flüssig sein oder werden. Diese Schicht an der Oberfläche bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts wird in der Fachliteratur als „quasi-liquid layer“ (QLL) oder als Produkt des „surface melting“ bezeichnet. Im weiteren Verlauf wird Ersteres bevorzugt und unter anderem die Gründe dafür erläutert.

QLLs können nicht nur bei Eis auftreten. Im Allgemeinen weisen kristalline Oberflächen knapp unterhalb des Schmelzpunktes dünne, flüssigkeitsähnliche Schichten auf (Li u. a., 2016).

3.1. Entstehung der QLLs

Der Begriff des Oberflächenschmelzens (surface melting) bei Eis suggeriert das Entstehen eines Wasserfilms an der Oberfläche des Eises durch Schmelzen. Erst kürzlich berichtete ein japanisches Forscherteam, dass die QLLs nicht ausschließlich durch ein Verflüssigen der obersten Eisschichten hervorgerufen werden (Asakawa u. a., 2016; Murata u. a., 2016). Das Gleichsetzen der QLLs mit Oberflächenschmelze ist den neuen Berichten nach nicht sinnvoll.

Im Folgenden werden die aktuelle Publikation und die Ergebnisse diskutiert. Bei ihren Untersuchungen betrachteten sie die Eisfläche mittels einer besonderen Art der Mikroskopie. Temperatur und Dampfdruck im Bereich der Probe (Eisoberfläche) konnten dabei unabhängig voneinander reguliert werden. Durch die resultierenden Aufnahmen schlossen sie auf die Entstehungsbedingungen und auf die Dynamik der QLLs (Murata u. a., 2016):

- Es gibt verschiedene äußere Erscheinungsformen der QLLs (siehe Abschnitt 3.2)
- QLLs bleiben beim Sättigungsdampfdruck aus
- QLLs entstehen als metastabiler Zustand bei übersättigter Luft durch Kondensation
- QLLs entstehen als metastabiler Zustand bei ungesättigter Luft durch Schmelzen

Der Vollständigkeit halber sei hier erwähnt, dass sich bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts ohne hohen Druck keine flüssige Phase ausbilden dürfte (siehe Abbildung 2). Bei

Übersättigung resublimiert Wasserdampf in höherem Maße, als Eis sublimiert. Dennoch bilden sich QLLs bei diesen Übergängen durch Keimbildung (Nukleation) als eine Art Zwischenstufe beim Übergang von Wasserdampf zu Eis und umgekehrt.

Im Bereich des Sättigungsdampfdrucks geht Eis ohne die Bildung von QLLs direkt in die Gasphase über und vice versa. Sind QLLs vorhanden und wird anschließend der Sättigungsdampfdruck angestrebt oder erreicht, so dauert es relativ lange (im Bereich von mehreren Minuten), bis die QLLs verschwinden.

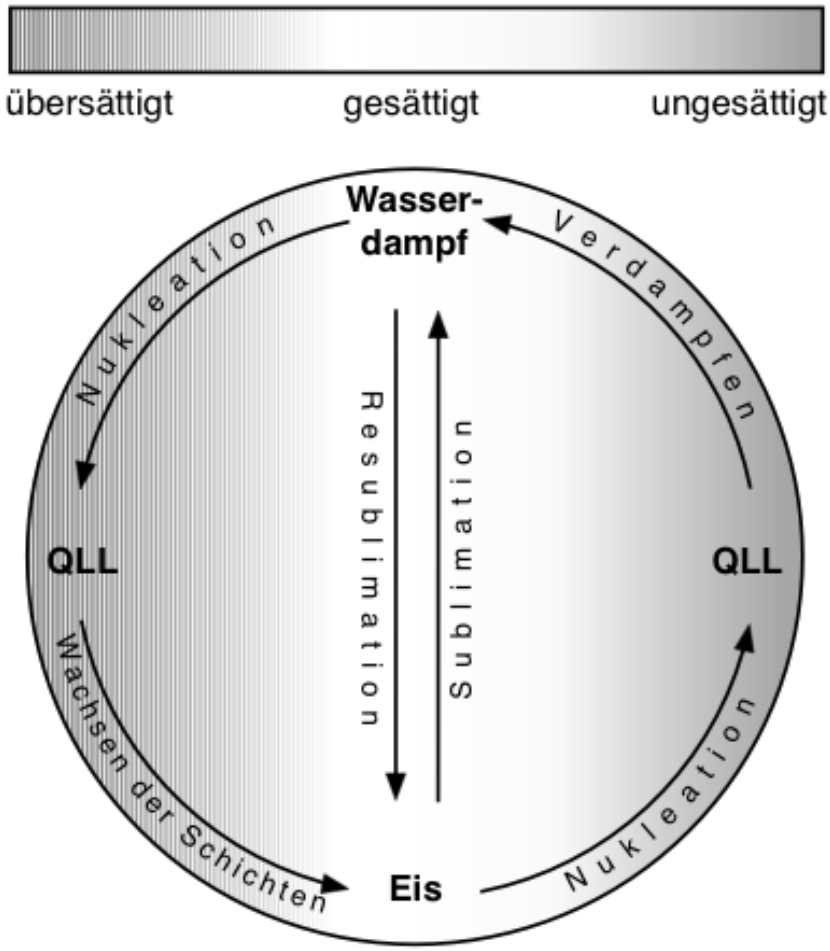


Abbildung 7: Übergänge zwischen Eis, Wasserdampf und QLLs in Abhängigkeit vom Dampfdruck (eigene Abbildung, angelehnt an Murata u. a., 2016, S. E6747)

Haben sich diese also einmal formiert, so können sie in thermodynamisch ungünstigen Bereichen für eine längere Zeit bestehen bleiben. Hierbei ist zu erwähnen, dass die angeführten Beobachtungen im Bereich von -2 °C bis -0,1 °C erzielt wurden (Murata u. a., 2016).

3.2. Formen der QLLs

Manchmal überziehen die QLLs eine große Fläche des Eises, manchmal haben sie eine Tropfenform und manchmal erscheint eine Kombination aus beiden Formen, welche an die eines Spiegeleis erinnert. Diese Formen können unter den gleichen Umgebungsbedingungen rasch ineinander übergehen, bei denen sie sich formiert haben (Temperatur und Dampfdruck). Dies liegt an den thermischen Fluktuationen an der Grenzfläche zwischen QLL und Wasserdampf, welche hingegen nicht zwischen Eis und Wasserdampf auftreten. Diese Fluktuationen erleichtern den Übergang von dünnen Schichten zu Tropfen oder zur kombinierten Erscheinungsform (siehe Abschnitt 3.3). Das Fehlen der Fluktuationen an der Grenzfläche zwischen Eis und Wasserdampf soll das langzeitige Bestehen oder Formieren von QLLs beim Sättigungsdampfdruck verhindern (Murata u. a., 2016).

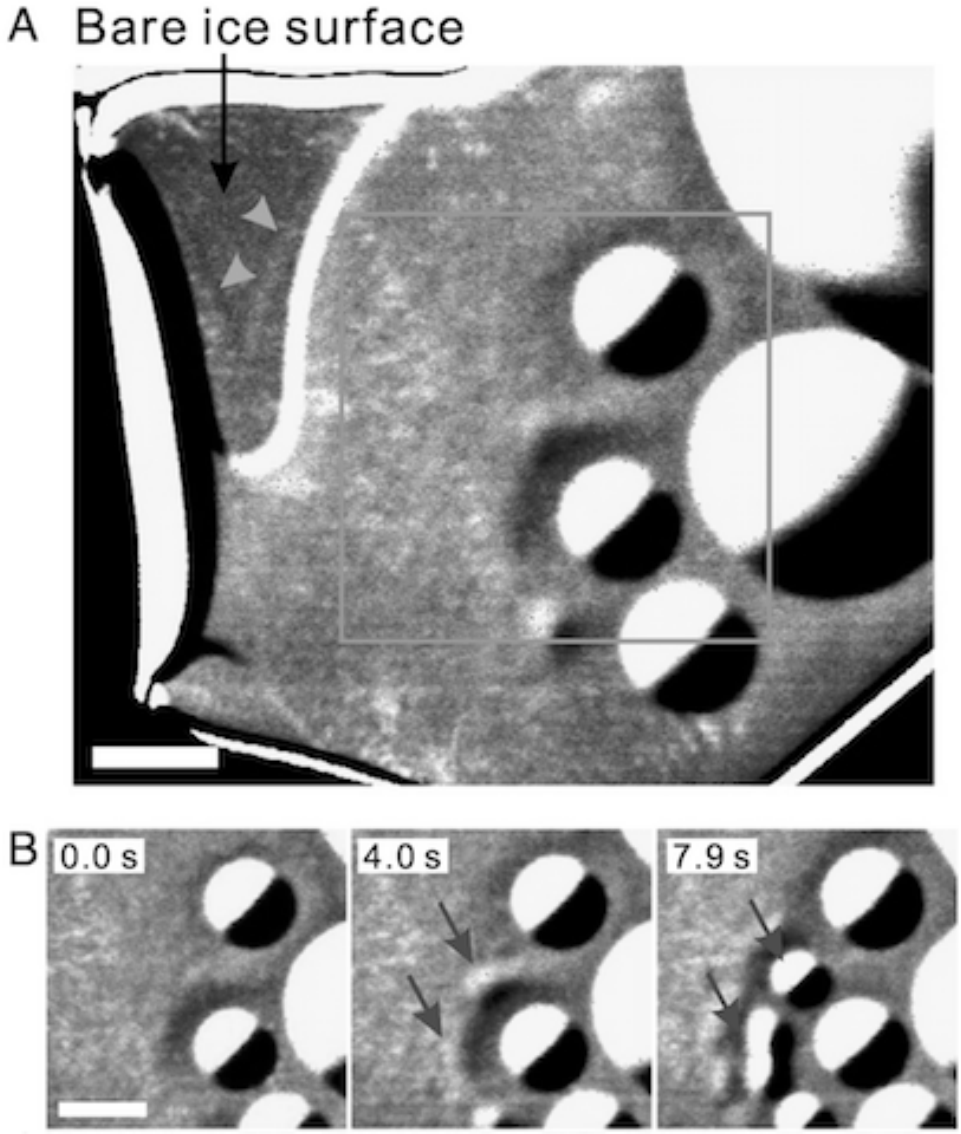


Abbildung 8: Fluktuationen und Formen der QLLs bei T = -0,1 °C und p = 603 Pa. Maßstabbalken: 20 μm (A) Der dunkle Pfeil zeigt auf die unbedeckte Eisfläche, auf welcher keine Fluktuationen beobachtet werden konnten. Die hellen Pfeilspitzen zeigen auf elementare Stufen im Eis. (B) Betrachtung des Ausschnittes in (A). Tropfenbildung aus einer dünnen QLL-Schicht durch thermische Fluktuationen. Die Pfeile zeigen die Bildung der neuen Tropfen an. (Murata u. a., 2016, S. E6745)

3.3. Modell für die Dynamik der QLLs

Um die Entstehung erklären und die resultierende Erscheinungsform charakterisieren zu können, betrachtete die Forschergruppe rund um Murata das Grenzflächenpotential. Ausgehend von einem Dreischichtsystem, bei welchem QLLs zwischen Wasserdampf und Eis liegen, zogen sie Bilanz über einfließende Faktoren (freie Energien, Winkel des Kontakts zwischen Eis und QLLs, Oberflächenspannung, anziehende und abstoßende Kräfte, etc.) und erstellten so mit ihren Ergebnissen aus den Experimenten ein Modell, mit welchem sie die Dynamik der QLLs qualitativ und quantitativ erklärten. Die Grenzflächenpotentiale für die verschiedenen Formen wurden dabei in Abhängigkeit der Dicke der QLLs bestimmt und analysiert. Dabei kommen sie zu dem Schluss, dass das Grenzflächenpotential an der Stelle 0, welche einer Eisfläche ohne jegliche QLLs entspricht, und das lokale Minimum der Grenzflächenpotentialkurve die resultierenden Eigenschaften der QLLs bestimmt (Murata u. a., 2016).

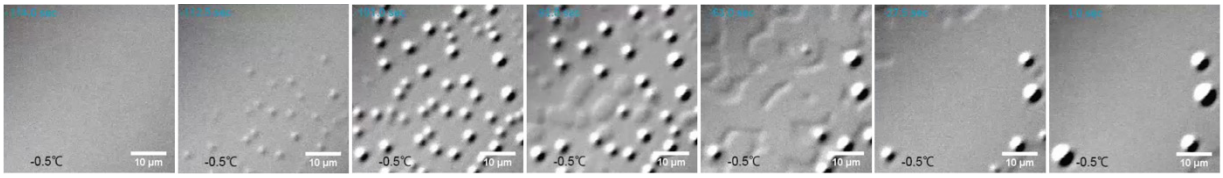


Abbildung 9: Oberflächenerscheinungen beim Übergang vom Sättigungsdampfdruck zu Übersättigung (Zeitraum 113 s). Bildschirmaufnahmen von "Movie S1. Morphological evolution of hole nucleation and growth." (Murata u. a., 2016)

In Abbildung 9 wird die Entstehung und Dynamik von QLLs anschaulich gemacht. Ausgehend vom Sättigungsdampfdruck wird Übersättigung angestrebt. Im ersten Bild ist die reine Eisfläche zu sehen. Im zweiten Bild entstehen erste tropfenförmige QLLs, welche im dritten Bild ihre maximale Ausprägung in dieser Form erreichen. Im weiteren Verlauf bilden sich dünne QLLs in der Form von Schichten durch Ausbreiten der Tropfen und Nukleation (viertes bis letztes Bild), welche eine kombinierte Form der QLLs hervorbringt (Spiegelei). Diese Ausbreitung durch Nukleation erlaubt das Überwinden der Potentialbarriere, welche aus der Oberflächenspannung resultiert (Murata u. a., 2016). Nukleationskeime, wie zum Beispiel Staubkörner oder Unregelmäßigkeiten an der Oberfläche, können das angesprochene Grenzflächenpotential lokal ändern und somit zu einer Änderung der Oberflächenausprägungen führen (Schlagowski, 2002).

Der umgekehrte Prozess, also von Übersättigung zu Sättigung, zeichnet sich durch die gleichen Schritte ab. Zuerst werden dünne Schichten zu Tropfen, was durch thermische Fluktuationen erleichtert wird. Diese führen zu einer Schwankung der Dicke der QLLs, wodurch sich ein höherer Tropfen ausbilden kann (siehe Abbildung 8). Diese verschwinden dann, wenn der Sättigungsdampfdruck erreicht beziehungsweise lang genug gehalten wird (Murata u. a., 2016).

Zu guter Letzt sei auch noch der Formationsvorgang bei ungesättigten Bedingungen erwähnt. Ausgehend vom Sättigungsdampfdruck wird die Temperatur bei gleichbleibendem Dampfdruck erhöht, wodurch die Luft ungesättigt wird. Dadurch schwindet die Eisoberfläche durch Sublimation. Dieser Vorgang höhlt die glatte Eisoberfläche langsam aus. In diesen kleinen Unebenheiten bilden sich tropfenförmige QLLs, welche sich auch durch Nukleation und Ausbreiten der Tropfen in Schichten umwandeln, wie auch bei der Übersättigung (Murata u. a., 2016).

3.4. QLLs bei tieferen Temperaturen

Für eine sinnvolle Betrachtung der Hintergründe des Schlittschuhlaufens und anderer Sportarten ist die Erwähnung von QLLs in einem Bereich knapp unterhalb des Gefrierpunkts nicht ausreichend, weshalb ein anderer Forschungsbericht herangezogen wird, welcher das Verhalten der Eisoberfläche bei tieferen Temperaturen beschreibt. Die optimalen Temperaturen für den Eiskunstlauf betragen T = -5,5 °C und für das Eishockey T = -9 °C (Rosenberg, 2005).
Für die weitere Betrachtung ist die Struktur der Oberflächen von hexagonalem Eis wichtig.

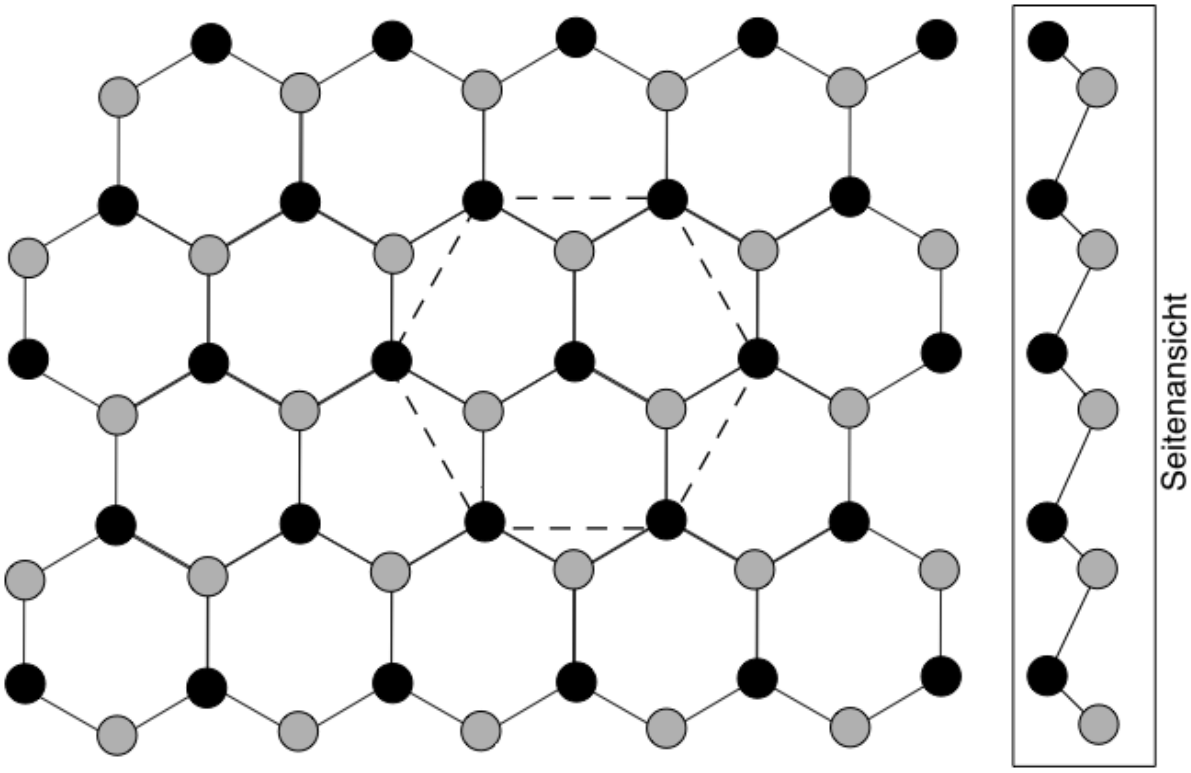


Abbildung 10: Draufsicht und Seitenansicht der Grundfläche von hexagonalem Eis. Die Kreise stellen Sauerstoffatome (schwarz = oberste Schicht, grau = zweitoberste Schicht) und die Verbindungslinien Wasserstoffbrückenbindungen dar. Das gestrichelte Hexagon soll die Symmetrie des Eises verdeutlichen. Die in der Seitenansicht dargestellten beiden Schichten entsprechen einer Doppelschicht des Eises. (eigene Abbildung, in Anlehnung an Sánchez u. a., 2017)

Die in Abbildung 10 dargestellten Schichten von Sauerstoffatomen haben senkrecht zur Oberfläche nicht die gleichen Abstände. So ist die Doppelschicht dünner als der Abstand der zweiten zur dritten Schicht, welche mit der vierten wieder eine Doppelschicht bildet. Der Abstand zwischen Beginn der oberen Doppelschicht zum Beginn der darunterliegenden Doppelschicht beträgt 0,37 nm und bildet elementare Stufen im Eis, wie sie in Abbildung 8 zu sehen sind (Gen Sazaki u. a., 2010).

Folgend wird ein aktueller Forschungsbericht herangezogen, in welchem die Oberfläche des hexagonalen Eises mittels einer besonderen Form der Spektroskopie untersucht wurde (Sánchez u. a., 2017). Sie beschränkten sich dabei auf einen Temperaturbereich zwischen 235 K und 273 K und beobachteten die spektralen Erscheinungen, durch welche sie auf die Bindungsstärke der Wasserstoffbrückenbindung an der Oberfläche des Eises schlossen. Aus den Ergebnissen schlossen sie, dass die QLLs nicht kontinuierlich dicker werden, sondern diskret und das Doppelschicht für Doppelschicht. Bei der tiefsten observierten Temperatur von 235 K war die oberste Doppelschicht bereits geschmolzen. Sie erwähnen hierbei eine mögliche Temperaturgrenze der ersten Doppelschicht von 200 K. Das Schmelzen der zweiten Doppelschicht findet bei einer Temperatur von 257 K statt. Oberhalb dieser Temperatur können sie ein kontinuierliches Schmelzen nicht mehr ausschließen. Es wird angemerkt, dass QLLs bei 269 K andere spektroskopische Eigenschaften aufweisen als unterkühltes Wasser, welche die Forscherinnen und Forscher durch möglicherweise stärkere Wasserstoffbrückenbindungen bei QLLs legitimieren (Sánchez u. a., 2017).

4 Warum ist Eis rutschig?

Dass Eis ein unelastischer Festkörper ist, bemerkt man spätestens dann, wenn man darauf ausrutscht und hinfällt. Ein zugefrorener See hat im Allgemeinen eine glatte Eisoberfläche, die zweifelsohne rutschig ist. Warum aber weist beispielsweise Glas an der Oberfläche keineswegs solche Eigenschaften auf, trotz seiner Glätte? Der Grund für die geringe Reibung auf Eis ist klar, im Gegensatz zur Ursache. Befeuchtet man eine Glasoberfläche, so verringert sich die Reibung auf dieser merkbar. Auf Eis ist ebenfalls eine dünne Wasserschicht oder ein wasserähnlicher Film für die geringe Reibung verantwortlich. Eis ist also rutschig, wenn oder gerade weil es nass ist. Die Antwort auf die Frage, warum sich solche Oberflächenerscheinungen ausprägen, ist allerdings komplizierter.

Gäbe es keine flüssige oder flüssigkeitsähnliche Schicht zwischen Eis und einem weiteren Festkörper, so wäre die Reibung ähnlich groß, wie zwischen zwei anderen „trockenen“ Festkörpern (siehe Tabelle 2). Eine mit einem atomaren Kraftmikroskop durchgeführte Untersuchung erlaubte eine Bestimmung des Reibungskoeffizienten auf trockenem Eis mit einem Wert von 0,6 (Bluhm, Inoue, & Salmeron, 2000).

Wie schon in Abschnitt 2.3 erwähnt, kann das Schmelzen durch Druck nur bei Temperaturen um den Gefrierpunkt eine Rolle spielen. Als mögliche Ursachen für die rutschige Oberfläche bleiben noch das Schmelzen durch Reibung und die Präsenz von QLLs.

Hierbei ist zu erwähnen, dass die Definition eines leichten Rutschens nur schwer darzulegen ist. Insbesondere stellt sich die Frage, wie sich Reibungszahlen verteilt über eine mehr oder weniger unregelmäßige Eisfläche auf mikroskopischer Ebene verhalten. Beachtet man die Forschungsergebnisse aus Kapitel 3, so sind auf Eis mehrere Oberflächenerscheinungen in nächster Nähe möglich. Andere Faktoren, wie Schnee auf Eis, können das Rutschverhalten auch beeinflussen. Im Folgenden werden die beiden übrigen Erklärungsversuche gegenübergestellt, um daraus mögliche Schlüsse ziehen zu können.

Bei einer Betrachtung bezüglich der Reibung sollte immer zwischen Haft- und Gleitreibung unterschieden werden. Schlittschuhe sind allerdings gerade so konzipiert, dass sie längs der Kufen eine besonders geringe Reibung aufweisen. Die Betrachtung von Straßenschuhen oder Autoreifen auf Eis wäre ebenso möglich, allerdings kommt gerade bei Schlittschuhen ein besonderer Aspekt zur Geltung. Denn für die alleinige Erklärung durch Reibung muss eine Arbeit verrichtet werden, welche das Eis zum Schmelzen bringt. Steht man mit Schlittschuhen auf Eis, so weisen diese auch ohne Bewegung eine geringe Reibung auf. Die folgenden Werte sind sogar deutlich höher als die bei Schlittschuhen gemessenen (siehe Abschnitt 5.3). Die Haftreibungszahl für Stahl auf Eis beträgt $\mu_0 = 0{,}027$ und die Gleitreibungszahl $\mu = 0{,}014$ (Kuchling, 2011). Für die Abhängigkeit des Gleitreibungskoeffizienten von der Geschwindigkeit findet man konträre Antworten, sodass in

verschiedenen Quellen sowohl eine zunehmende als auch abnehmende Reibungszahl bei steigender Geschwindigkeit angegeben wird (de Koning, de Groot, & van Ingen Schenau, 1992; Evans, Nye, & Cheeseman, 1976).

Vergleicht man die QLLs auf Eis mit Wasser auf Glas, so stellt sich auch die Frage, ob und wie stark die Schicht, die zum leichten Rutschen führt, bei einem Druck von oben verdrängt wird. Falls die QLLs die geringen Reibungseigenschaften bei einem hohen und konzentrierten Druck, wie bei einem Schlittschuh, erklären, so muss unterhalb der Kufe eine dünne Schicht der QLLs zurückbleiben, um ein Gleiten zu ermöglichen. Falls dies nicht der Fall ist, so würde man ohne weitere Effekte auf trockenem Eis stehen, wodurch die Reibungszahlen deutlich größer wären. Berücksichtigt man die Forschungsergebnisse und die Modelle aus Abschnitt 3.4, so könnte durch die hohe Bindungsstärke innerhalb der QLLs ein Verdrängen dieser unterhalb einer Kufe verhindert werden. Ob dies tatsächlich der Fall ist, kann hier nicht beantwortet werden. Allerdings soll hier der Unterschied zu anderen Festkörpern verdeutlicht werden, wenn diese mit Wasser bedeckt sind, da bei einem genügend großen Druck die Flüssigkeitsschicht verdrängt wird und die Reibungszahl dadurch ansteigt. Bei der Bewegung von Stahlkufen über Eis nimmt der Reibungskoeffizient jedoch sogar mit zunehmender Beladung und damit zunehmendem Druck ab (Federolf, Mills, & Nigg, 2008). Allerdings stellt sich dann, wenn nicht die QLLs für die geringe Reibung verantwortlich sind, die Frage, wieso geschmolzenes Eis offensichtlich nicht völlig verdrängt wird, obwohl es schwächere Bindungen aufweist als die QLLs (Sánchez u. a., 2017).

Ein weiteres scheinbares Paradoxon bei Eis ist das Schmelzen durch Reibung an sich. Die Reibung, die an der Eisoberfläche verrichtet wird, setzt die Reibung auf ihr herab. Somit sollte die Kontaktfläche des Eises diesbezüglich immer entlang der Bewegungsrichtung betrachtet werden. Der vorderste, aufliegende Teil, wie zum Beispiel die Spitze einer Schuhsohle, verrichtet die Reibungsarbeit, die notwendig ist, um das Eis zu erwärmen und zu schmelzen. Der hintere Teil kann dann leichter auf diesem dünnen Wasserfilm gleiten. Auch im sehr kleinen Bereich kann eine solche Betrachtung erfolgen, wenn beispielsweise ein Curlingstein über das Eis geschoben wird (siehe Abschnitt 5.4).

Für eine nicht durchgängige Flüssigkeitsschicht an der Oberfläche oder stärkere Bindungsverhältnisse zwischen manchen QLLs als bei normalem Wasser spricht auch die Gleitreibungszahl für Stahl auf Eis. Ein Flüssigkeitsfilm, der zwei Festkörper vollständig voneinander trennt, bildet eine sogenannte Schmierung. Diese minimiert die Scherkräfte, die ohne Schmierung zwischen den Festkörpern entstehen würden. Dadurch, dass Flüssigkeiten frei verschiebbar sind, erfahren die relativ zueinander bewegten Festkörper mit Schmierung eine sehr geringe Reibung. Die resultierende, sogenannte Flüssigkeitsreibung hat eine Gleitreibungszahl im Bereich von 0,001 – 0,01. Der etwas höhere Wert zwischen Stahl und Eis beim Gleiten von 0,14 liegt damit im Bereich

der Mischreibung (0,01-0,1), welche eine Mischform aus Festkörper- und Flüssigkeitsreibung repräsentiert (Habig & Woydt, 2014, S. E 89 f.).

Gemäß den Forschungsergebnissen aus Kapitel 3 bleiben QLLs beim Sättigungsdampfdruck aus. Nebel bildet sich aber genau unter diesen Umständen. Will man QLLs also für die geringe Reibung verantwortlich machen, so wäre Eis bei einem darüber liegenden Nebel – spätestens nach einigen Minuten - nicht so rutschig.

Abbildung 11: Eishockey bei Nebel („Eisbären im Nebel“, 2013, Foto: Ernst Mayer)

Abbildung 11 zeigt, dass bei schlechter Regulierung der Umgebungsbedingungen in der Halle oder bei ungünstigen Witterungsverhältnissen auf einer Freilufteisfläche und somit bei Nebelbildung dennoch Eishockey gespielt werden kann, ohne dabei mit den Schlittschuhen am Eis haften zu bleiben. Da QLLs beim Sättigungsdampfdruck nur einige Zeit nach ihrer Formation bestehen bleiben können, müsste das gute Gleitverhalten nach einigen Minuten schwinden, sofern man die geringe Reibung auf die QLLs zurückführt.

Obwohl Eis ein uns sehr bekannter und in der Natur häufig vorkommender Festkörper ist, ist die Frage nach der Ursache der geringen Reibung noch nicht eindeutig geklärt. Nach aktuellem Stand kann man dieses Phänomen allerdings nicht mit einem einzigen Aspekt abhaken, sondern man benützt dafür meist eine kombinierte Erklärung (Wilhelm & Hopf, 2015). Eine endgültige Beantwortung könnte für Wintersportarten große Vorteile bringen, wenn zum Beispiel die Beläge von Skiern optimal an die Schneeverhältnisse angepasst werden können, um somit die resultierende Reibung zu minimieren. Allerdings könnte man somit möglicherweise auch die

Reibung dort maximieren, wo man sie benötigt, wie zum Beispiel bei Autoreifen - mit oder ohne Spikes - oder bei Winterschuhen.

Man kann momentan allerdings zumindest die Wahrscheinlichkeit minimieren, während des Gehens auf Eis auszurutschen. Um den Halt auf vereistem Untergrund zu verlieren, ist es notwendig die Haftreibung zu überwinden und damit in die Phase des Gleitens überzugehen. Um dem entgegenzuwirken, kann man sehr kleine Schritte setzen. Für folgende Überlegung wird auf das Kennzeichnen von Kräften als Vektoren verzichtet und sie sind als betragsmäßige Größen zu verstehen. Während des Gehens (siehe Abbildung 12) setzt man einen Fuß vor den anderen, wobei man beim vorderen beim Aufsetzen des Fußes im Winkel φ senkrecht zur Oberfläche eine Kraft F_φ auf den Boden ausübt, welche sich als vektorielle Summe aus der Normalkraft F_N senkrecht zur Oberfläche und der Kraft F_B in Richtung der Bewegung ergibt. Dieser ist die gleich große Haftreibungskraft F_H entgegengesetzt, welche uns ein sicheres Schreiten ermöglicht.

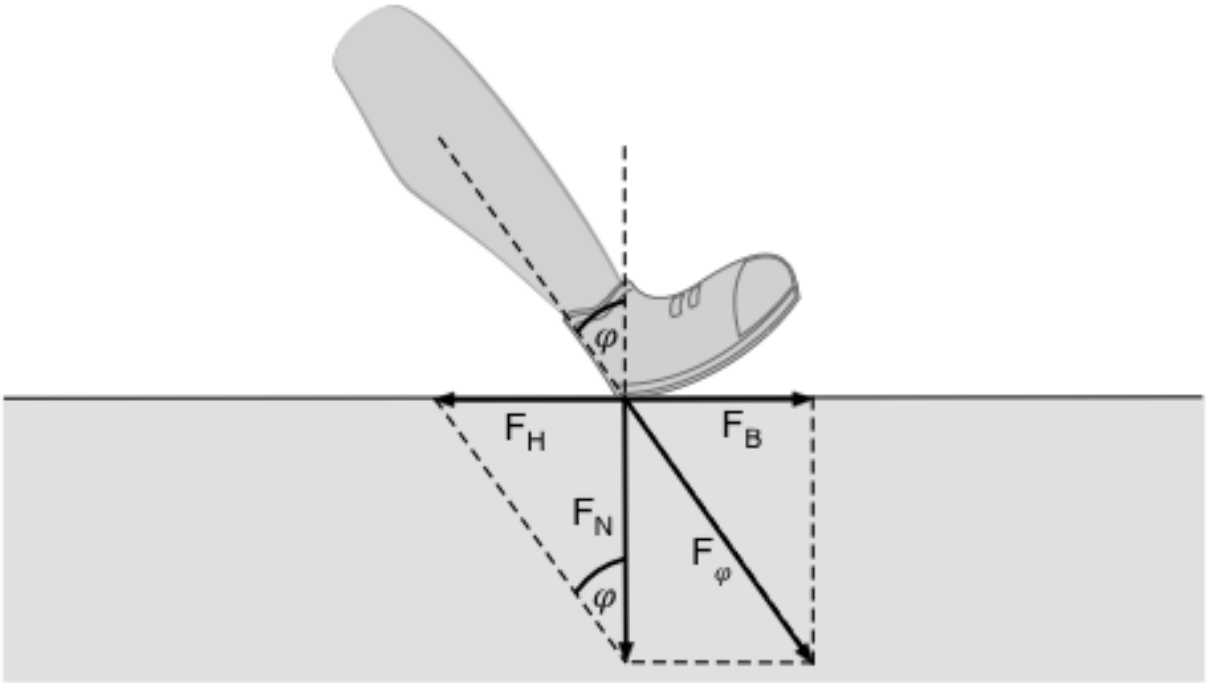


Abbildung 12: Relevante Kräfte für die geometrische Interpretation der Reibungszahl (eigene Abbildung)

Allerdings hat die Haftreibungskraft einen maximalen Wert, der nicht überschritten werden darf, um nicht auszurutschen. Die Haftreibungskraft F_H ergibt sich aus Produkt von Normalkraft F_N und der Haftreibungszahl μ_0.

$$F_H = \mu_0 F_N \tag{5}$$

Damit lässt sich äquivalent die Reibungszahl als Quotient von Haftreibungskraft und Normalkraft schreiben.

$$\mu_0 = \frac{F_H}{F_N} \tag{6}$$

Da Normalkraft und Haftreibungskraft normal aufeinander stehen, lässt sich ein winkelabhängiges Kriterium je nach Belastung des Fußes und damit variierender Normalkraft schreiben. Dafür kann man die Reibungszahl als Tangens des Winkels φ interpretieren.

$$\mu_0 = \tan\varphi = \frac{F_H}{F_N} \tag{7}$$

Somit ergibt sich für aneinander reibende Materialien eine Ungleichung, die erfüllt sein muss, um eine Haftung zwischen den Materialien zu erlauben und damit ein Gleiten oder Ausrutschen zu verhindern.

$$\varphi \leq \arctan\mu_0 \tag{8}$$

Da der Arkustangens eine streng monoton steigende Winkelfunktion ist, ergibt sich bei einer höheren Reibungszahl ein größerer Winkel, in welchem der Fuß auf den Boden aufgesetzt werden kann, ohne dabei wegzurutschen.

Tabelle 2: Haftreibungszahlen und resultierende, maximale Winkel für verschiedene Materialkombinationen

Materialkombination	Haftreibungszahl μ_0 / 1	Maximaler Winkel φ / °	Literatur
Gummi – trockener Beton	1,0	45,0	(Tipler & Mosca, 2015)
Glas – Glas	0,9	42,0	(Tipler & Mosca, 2015)
Stahl – Stahl	0,7	35,0	(Tipler & Mosca, 2015)
Stahl – Holz	0,5	26,6	(Demtröder, 2015)
Gummi – nasser Beton	0,3	16,7	(Tipler & Mosca, 2015)
Gewachste Ski – Schnee (0 °C)	0,1	5,7	(Tipler & Mosca, 2015)
Stahl - Eis	0,027	1,5	(Kuchling, 2011)

Der Haftreibungskoeffizient für Gummi auf Eis liegt bei $\mu_0 < 0{,}2$, wodurch der maximale Winkel ohne Gleiten bei $\varphi < 11{,}3\,°$ liegt (Kuchling, 2011). Damit lässt sich leicht begreifen, warum man beim Gang auf Eis besonders aufpassen sollte. Wählt man dabei eine kleine Schrittweite, so wird der Aufsetzwinkel verkleinert, wodurch ein Ausrutschen verhindert werden kann. Jedoch spielt auch der Versatz der Füße zum Körperschwerpunkt eine entscheidende Rolle. Dieser Aspekt kann analog zur Schrittweite betrachtet werden, da ein größerer Abstand der Füße einen größeren Winkel (zwischen Senkrechter auf den Boden beim Fuß und der Verbindung von Fuß zum Körperschwerpunkt) zur Folge hat. Daher ist es sinnvoll, den Abstand zwischen den Füßen in alle Richtungen möglichst gering zu halten und dabei den Körperschwerpunkt immer direkt über dem vorderen Fuß auszurichten, was einer Fortbewegung eines Pinguins gleichkommt.

5 Sport auf Eis

In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Aspekte einiger Sportarten beleuchtet, die auf Eis ausgeübt werden. So verhalten sich viele Objekte, die im Sport auf Eis eingesetzt werden, nicht so, wie man es auf den ersten Anhieb vermuten mag. Zu Beginn eines jeden Abschnittes wird auf die verschiedenen Eisflächen eingegangen, die bespielt und befahren werden, und welche Kriterien diese erfüllen müssen.

5.1. Grundlagen des Eishockeysports

Eishockey zählt zu den schnellsten Mannschaftssportarten. Dabei beträgt die optimale Temperatur des Eises -9 °C, was zu einem schnelleren und härteren Eis führt, als es beispielsweise beim Eiskunstlauf der Fall ist (Rosenberg, 2005). Im Allgemeinen gilt bei präparierten Eisflächen, dass tiefere Temperaturen zu einer erhöhten Härte und Sprödigkeit des Eises führen, welches beim Überfahren mit einem Schlittschuh splittern kann (Kubli, 1967). Insbesondere führt das Fahren einer engen Kurve mit hoher Belastung auf einem Schlittschuh zu einer erhöhten Splitterung. Ferner kann die Verunreinigung von Eis zur Sprödigkeit beitragen. In diesem Zusammenhang findet eine solche Verunreinigung besonders auf natürlichen Eisflächen, wie zum Beispiel auf einem zugefrorenen See, statt. Fällt Schnee auf eine Eisfläche und wird dieser nicht entfernt, so kann sich dieser partiell mit dem darunterliegenden Eis verbinden und Lufteinschlüsse bilden. Wird diese Oberfläche dann - durch Regen oder händisch - bewässert, so gefriert sie zu einer mehr oder weniger ebenen und bespielbaren Fläche. Allerdings führt die Unregelmäßigkeit unterhalb der Oberfläche, resultierend aus den Lufteinschlüssen, zu einer erhöhten Sprödigkeit des Eises, da eine geringere Festigkeit im Vergleich zu reinem Eis zu erwarten ist. Solche Lufteinschlüsse können sich auch durch oberflächlich gefrierende Risse oder abgelagerte Blätter bilden. Daher ist eine regelmäßige Eisreinigung auf natürlichen Eisflächen unumgänglich und für den Erhalt der Befahrbarkeit essentiell. Diese Reinigung kann durch einfaches Abschaufeln oder Abkehren des Schnees geschehen. Bei großen Eisflächen empfiehlt sich eine Kehrmaschine, welche mittels eines Motors eine Bürste in Rotation versetzt, wodurch der am Eis liegende Schnee Bahn für Bahn an den Rand der Eisfläche transportiert werden und dort leichter entfernt werden kann. Je nach Abnützung kann hinterher ein Wasserfilm auf die Eisfläche aufgetragen werden, welcher die durch das Befahren mit Schlittschuhen entstandenen Rillen verschließt.

Bei künstlichem Eis wird meist auf sogenannte Zambonis zurückgegriffen. Diese motorisierten Eisbearbeitungsmaschinen führen alle notwendigen Schritte aus, um eine hervorragende Eisqualität sicherzustellen. Eine Person lenkt und steuert dabei die Funktionen des quaderförmigen Fahrzeuges. Zambonis tragen die oberste Eisschicht und den sich darauf befindlichen Schnee mit

einem breiten Messer ab und befördern diese Masse in einen entleerbaren Tank innerhalb der Maschine. Hinter dem Messer wird warmes Wasser aufgetragen. Dieses kann die Oberfläche antauen, wodurch die Rillen noch effizienter geglättet und gefüllt werden können, ohne dabei etwaige Lufteinschlüsse zuzulassen. Die dünne Wasserschicht wird dann mittels einer sich am Heck des Fahrzeugs befindlichen Gummilippe gleichmäßig verteilt. Zambonis werden meist durch einen Elektromotor angetrieben, wodurch ein gesundheitlich unbedenklicher Einsatz in geschlossenen Eishallen gewährleistet wird.

Die künstlichen Eisflächen werden von unten durch Kühlschläuche auf die notwendige Temperatur gebracht. In geschlossenen Eishallen ist zusätzlich eine Entfeuchtungsanlage notwendig, da von außen oft warme und feuchte Luft nach innen gebracht wird, welche in der relativ kalten Eishalle zu einer erhöhten Kondensation des Wasserdampfs führen würde. Dies ist besonders an den Decken der Eishalle problematisch, da sich Tropfen bilden können, welche dann auf das Eis fallen, gefrieren und die Eisfläche so unregelmäßig werden lassen.

Etwaige Markierungen auf der Eisfläche, welche beim Eishockey oder Curling benötigt werden, werden bei der Eisproduktion auf das Eis aufgetragen. Darüber wird weiteres Wasser gefroren, sodass die Markierungen zwar sichtbar bleiben, zugleich aber durch das darüberliegende Eis geschützt und nicht sofort wieder abgetragen werden. Somit kann ein einmaliges Aufbringen von Markierungen pro Saison genügen.

Beim Eishockey ist die Eisfläche von einer stabilen Bande umgeben, auf welcher Plexiglasscheiben aufgesetzt sind. Diese Elemente sind in regelmäßigen Abständen voneinander getrennt, sodass sie bei einem Bodycheck gegen die Bande nachgeben und somit die Gefahr von Verletzungen reduzieren können. Oberhalb der Bande wird vorwiegend im Bereich der beiden Tore ein großes Netz gespannt, welches etwaige Zuschauerinnen und Zuschauer vor reflektierten Pucks schützen soll.

Zu guter Letzt ist für eine einwandfreie Vorbereitung der Eisfläche für Eishockey das Befestigen der Tore nötig. Dafür werden in das Eis unterhalb der Torstangen Löcher gebohrt, in welche das Tor gesteckt werden kann. Bei einer zu hohen Kraft gegen das Tor, wie bei einem Zusammenstoß eines Spielers oder einer Spielerin mit dem Tor, wird es aus der Verankerung gelöst, wodurch das Verletzungsrisiko minimiert wird. Außerdem tragen die Spielenden Schutzausrüstungen am ganzen Körper, welche bei Stößen eine Knautschzone darstellen. Dennoch kommt es vor allem im professionellen Eishockey immer wieder zu Verletzungen.

5.1.1 Bodycheck

Eine im Vergleich zu vielen anderen Sportarten spektakuläre Aktion im Eishockey ist der Bodycheck. Dabei wird bewusst der Zusammenstoß mit gegnerischen Spielerinnen und Spielern gesucht, wobei der Einsatz des Schlägers oder Ellbogens und der Check von hinten, gegen den Kopf oder das Knie nicht erlaubt sind. Um die Härte dieses Sports zu verdeutlichen, werden im Folgenden die Beschleunigungen und Kräfte abgeschätzt, die bei einem solchen Zusammenstoß wirken (Mathelitsch & Thaller, 2015). Um diese Abschätzung simpel zu halten, wird von einem unelastischen Stoß ausgegangen, bei welchem sich die beiden Körper verformen, nach dem Stoß nicht voneinander abprallen und die gleiche Endgeschwindigkeit erhalten, auch wenn es sich in der Realität immer um einen teilelastischen Stoß handelt (Kuchling, 2011). Auch hier wird auf das Verwenden von Vektoren verzichtet. Dafür wird von einem frontalen Zusammenstoß zweier Personen A und B ausgegangen mit den entsprechenden Massen m_A = 90 kg und m_B = 80 kg und Geschwindigkeiten v_A = 10 m/s und v_B = -5 m/s vor dem Stoß. Aus der Impulserhaltung wird die Endgeschwindigkeit v der beiden Personen berechnet.

$$v = \frac{m_A v_A + m_B v_B}{m_A + m_B} \tag{9}$$

Für die oben angegebenen Werte ergibt sich eine Endgeschwindigkeit beider Personen von v = 2,9 m/s. Um die wirkende Beschleunigung beim Aufprall abzuschätzen, werden die kinetischen Energien beider Körper vor (E_1) und nach (E_2) dem Stoß berechnet.

$$E_1 = \frac{m_A {v_A}^2}{2} + \frac{m_B {v_B}^2}{2} \tag{10}$$

$$E_2 = \frac{(m_A + m_B)\, v^2}{2} \tag{11}$$

Damit ergibt sich aus (10) ein Wert von E_1 = 5500 J und aus (11) ein Wert von E_2 = 735 J. Die Energiedifferenz ΔE = 4765 J entspricht dann der Arbeit, die in der Verformung der beiden Körper umgesetzt wird (Kuchling, 2011; Mathelitsch & Thaller, 2015). Dadurch kann die einwirkende Kraft F auf die Körper abgeschätzt werden. Es sei erwähnt, dass für eine genauere Berechnung die zeitlichen Änderungen der Impulse zu betrachten wären, worauf hier verzichtet wird und somit ein gemeinsamer Richtwert für beide Körper akzeptiert wird. Die einwirkende Kraft hängt dabei vom Weg s ab, welcher die Knautschzone beim Aufprall darstellt.

$$F = \frac{\Delta E}{s} \tag{12}$$

Unter der Annahme einer Knautschzone beider Personen addiert von s = 0,4 m wird so die durchschnittlich einwirkende Kraft berechnet (Mathelitsch & Thaller, 2015, S. 156). Es ergibt sich ein betragsmäßiger und durchschnittlicher Wert von F = 11,9 kN und die entsprechenden Beschleunigungen der Personen A und B mit a_A = - 132 m/s^2 und a_B = 149 m/s^2. Schwerere Personen haben bei Bodychecks also einen deutlichen Vorteil. Man kann sich auch durch eine bessere Körperhaltung einen Vorteil verschaffen. Trifft man den anderen Körper in aufrechter Position oberhalb des Schwerpunkts, so kann dieser in eine leichte Rotation versetzt werden und sich nicht mehr am Eis entgegenstützen, was das Abfangen eines Checks erschwert. Da die hohen Kräfte und Beschleunigungen nur kurzzeitig wirken, können die Spielenden solche Zusammenstöße ohne Verletzungen überstehen. Solche frontalen Zusammenstöße mit vergleichsweise hohen Geschwindigkeitsdifferenzen stellen bei Eishockeymatches aber eine Seltenheit dar. Häufiger finden Checks gegen die Bande statt, welche durch die von der Bande aufgenommene Verformungsenergie einen deutlich leichter zu verkraftenden Körperangriff erlauben.

5.1.2 Puck

Ziel beim Eishockey ist es, eine kleine Gummischeibe, den sogenannten Puck, ins gegnerische Tor zu befördern. Dieser ist 25 mm dick, hat einen Durchmesser von 75 mm und wiegt 170 g (Mathelitsch & Thaller, 2015, S. 149). Er besteht durchgängig aus vulkanisiertem Gummi, ist an den Grundflächen glatt und am Mantel mit einem Profil versehen, welches ein besseres Führen des Pucks mit dem Schläger erlaubt.

Im professionellen Eishockey werden Pucks vor dem Spiel in Tiefkühlschränken gefroren, um ein unkontrolliertes Hüpfen des Pucks auf dem Eis zu verhindern, wie es bei einem nicht gekühlten Puck passieren kann („Behind the Scenes Series - Frozen Biscuits“, o. J.). Dieser Aspekt ist vor allem beim Bully, also beim Einwerfen des Pucks durch die Schiedsrichter, entscheidend, da die gefrorene Spielscheibe beim Auftreffen auf das Eis nicht oder kaum hüpft und somit ein faires Erkämpfen des Scheibenbesitzes erlaubt.

Der Puck verformt sich bei einwirkenden Kräften nur minimal, was eine präzisere Durchführung von Schüssen erlaubt.

Im Vergleich zu Schlittschuhen weisen Pucks auf Eis eine höhere Reibung auf und können durch abgetragenes Eis in ihrer Bewegung zusätzlich gehemmt werden.

5.1.3 Eishockeyschläger

Bewegt wird der Puck im Eishockey hauptsächlich mit Schlägern. Diese bestehen aus einem langen Schaft, an welchem der Schläger gehalten wird, und einer Schaufel, an welcher der Puck gespielt wird und die je nach Wunsch der Spielenden rechts- oder linksgekrümmt ist. Früher spielte man fast ausschließlich mit Schlägern aus Holz, welche heute nur noch selten benützt werden. Sie waren zwar sehr robust, dafür aber auch kaum flexibel und relativ schwer. Nun werden vorwiegend Schläger verwendet, die aus Materialien wie Karbon, Graphit und Fiberglas bestehen. Diese Materialien erlauben eine hohe Flexibilität und ein geringes Gewicht aber auch einen erleichterten Schlägerbruch bei zu starker Belastung bei einem Schuss.

Neben den verschiedenen Schaufelformen, Materialien und Längen ist die Flexibilität der Schläger ein wichtiges Kriterium für ein effizientes Spielen. Dazu sind die Schläger an den Schäften meist mit „Flex“ und einer nachfolgenden Zahl gekennzeichnet. Diese gibt Auskunft darüber, wie leicht sich ein Schläger bei Belastung verbiegt. So bedeutet „Flex 85“ zum Beispiel, dass bei einer Aufhängung des Schlägers an den Enden des Schafts und einer mittigen Belastung 85 Pfund (entsprechen rund 38 kg) an Masse benötigt werden, um den Schläger an dieser Stelle um einen Zoll (entspricht rund 2,5 cm) zu biegen. Die Flexibilität ist für den Schuss des Pucks relevant. Im Vergleich zu vielen anderen Sportarten wird das Spielgerät dabei nämlich nicht direkt nach dem Ausholen getroffen. Die Spielenden biegen den Schläger durch das Treffen der Eisfläche vor dem Puck und verrichten dabei eine Verformungsarbeit, welche als potentielle Energie im gebogenen Schläger gespeichert bleibt und dann an den Puck in der Beschleunigungsphase abgegeben wird. Im Eishockey werden beim härtesten Schuss – dem Schlagschuss – Geschwindigkeiten von über 150 km/h erreicht. Würde man den ruhenden Puck mit einem steifen Schläger direkt treffen und diesen Vorgang als unelastischen Stoß betrachten, so würde der ruhende Puck nach dem Stoß eine maximale Geschwindigkeit wie die des Schlägers erreichen, da sich beide Objekte bei dieser Betrachtung kurzzeitig gemeinsam mit der gleichen Geschwindigkeit bewegen und sich dann voneinander trennen. Gemäß (9) kann man hierfür die Masse des Schlägers viel größer als die des Pucks annehmen, um zur Behauptung zu gelangen. Somit müsst man die Schlägerschaufel mindestens auf eine Geschwindigkeit von 150 km/h beschleunigen, um eine annähernd gleiche Geschwindigkeit des Pucks zu erreichen. Trifft man vor dem Puck zuerst das Eis, so lassen sich solche Geschwindigkeiten leichter erzielen.

Die gespeicherte potenzielle Energie, welche auch Spannungsenergie genannt wird, soll abgeschätzt und mit der für eine realistische Geschwindigkeit notwendigen Energie verglichen werden. Dafür betrachte man zuerst die kinetische Energie E_{kin} des Pucks bei einer Geschwindigkeit von v = 150 km/h und einer Masse von m = 170 g.

$$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 \tag{13}$$

Es ergibt sich E_{kin} = 148 J für den Puck. Diese Energie muss beim Schuss übertragen werden. Die Spannungsenergie E_{pot} wird abgeschätzt und ergibt sich aus der Federkonstante k und dem Federweg s (Kuchling, 2011).

$$E_{pot} = \frac{ks^2}{2} \tag{14}$$

Dafür wird die angegebene Flexibilität der Schläger ausgenützt, um die Federkonstante zu berechnen. Diese Modellierung ist sinnvoll, da die Federkonstante einen Proportionalitätsfaktor innerhalb der Elastizitätsgrenze zwischen Kraft F und Deformationsweg x darstellt, wie es bei Eishockeyschlägern auch der Fall ist.

$$k = \frac{F}{x} \tag{15}$$

In unserem Fall entspricht die Kraft der Schwerkraft, die auf den Schläger bei einer mittigen Belastung wirkt. Wir bleiben bei einer Flexibilität von 85 (1 Zoll / 85 Pfund), erhalten so eine Kraft F = 378 N und einen Deformationsweg s = 0,025 m nach Definition. Für die Federkonstante ergibt sich ein Wert von 14890 N/m. Zuletzt muss noch eine Annahme über den maximalen Federweg des Schlägers beim Kontakt des Pucks bei einem Schuss getroffen werden. Dafür wird von einer Biegung um s = 0,1 m ausgegangen, was uns mit (14) auf eine im Schläger gespeicherte Spannungsenergie E_{pot} = 74,5 J bringt. Diese ist also in etwa halb so groß, wie die gesamte kinetische Energie eines Pucks mit 150 km/h. Dabei sei angemerkt, dass es sich um eine einfache Modellierung des Schusses handelt und es in der Realität somit zu einer Vielzahl von Abweichungen kommen kann. Dennoch kann man so darlegen, dass ein beachtlicher Teil der Energie aus der Biegung des Schlägers resultiert.

Den härtesten Schuss erreicht man bei einer Belastung des Schlägers bis zu seiner Elastizitätsgrenze, da bei stärkerer Biegung mehr Energie gespeichert wird. Trifft man bei einem maximal gebogenen Schläger den Puck und überschreitet so die Belastungsgrenze durch die zusätzliche Spannung im Schläger, so bricht dieser. Eine zu hohe Flexibilität – also ein weicherer Schläger – führt leichter zu einem Schlägerbruch, als es bei einem härteren der Fall ist. Ist die Schusstechnik aber nicht genügend ausgereift oder der Kraftaufwand, um den Schläger stark genug zu biegen, zu hoch, so kann ein härterer Schläger durch eine geringere Spannung zu langsameren Schüssen führen. Daher ist die richtige Schlägerwahl im Eishockey für einen effektiven Einsatz essentiell.

5.2. Eiskunstlauf

Für die Sportart des Eiskunstlaufs wird eine Temperatur des Eises von -5,5°C empfohlen (Rosenberg, 2005). Diese führt zu einem weicheren Eis und erlaubt den Eiskunstläuferinnen und -läufern ein leichteres Eindringen ihrer Bezahnung an der Frontseite der Kufen, um beispielsweise bei Sprüngen sicher zu landen (siehe Abschnitt 5.3). Im Vergleich zum Eishockey sind beim Eiskunstlauf weder Markierungen auf der Eisfläche noch Banden notwendig. Die Eisaufbereitung kann auch mittels Zamboni erfolgen, obgleich die Landungen teils tiefe Löcher im Eis hinterlassen können, die bei einmaligem Aufbereiten eventuell nicht zur Gänze geschlossen werden und es somit einer händischen Nach- oder nochmaligen Aufbereitung bedarf.

Neben den interessanten Kufenformen, die in Abschnitt 5.3 erläutert werden, gibt es einige physikalische Prinzipien, derer sich Eiskunstläuferinnen und Eiskunstläufer bedienen. In dieser Sportart werden Drehungen um die eigene Körperachse mit fast 6 Umdrehungen pro Sekunde ausgeführt (Mathelitsch & Thaller, 2008). Dies wird durch eine geschickte Masseverteilung bei der Rotation erreicht. Für folgende Überlegung wird ebenfalls auf das Verwenden von Vektoren verzichtet. Betrachtet man einen Körper als Zusammensetzung aus n Massenelementen m_i, so ergibt sich das Trägheitsmoment I aus der Summe der einzelnen n Trägheitsmomente, die bei einem Abstand r_i der jeweiligen Massenpunkte zur Drehachse herrschen (Kuchling, 2011, S. 128).

$$I = \sum_{i=1}^{n} r_i^2 m_i \tag{16}$$

Streckt man bei einer Drehung die Arme und ein Bein so weit als möglich nach außen, so erhöht sich gemäß (16) das gesamte Trägheitsmoment. Bringt man die Extremitäten möglichst nah zur Drehachse, so verringert sich das Trägheitsmoment. Der Drehimpuls L ergibt sich aus dem Produkt von Trägheitsmoment I und Winkelgeschwindigkeit ω.

$$L = I\omega \tag{17}$$

Da der Drehimpuls eine Erhaltungsgröße ist, bleibt dieser bei der Rotation konstant. Eine Verringerung des Trägheitsmoments erhöht somit die Winkelgeschwindigkeit und führt zu einer schnelleren Rotation bei angezogenen Armen. Dadurch können im Eiskunstlauf beeindruckende Sprünge, wie ein dreifacher Axel, welcher einer dreieinhalbfachen Drehung im Sprung entspricht, gezeigt werden. Die durchschnittliche Winkelgeschwindigkeit beträgt dabei 4,9 Umdrehungen pro Sekunde (Mathelitsch & Thaller, 2008, S. 125).

5.3. Eisschnelllauf und Kufenformen im Vergleich

Wettkämpfe werden beim Eisschnelllauf auf ovalen Bahnen ausgetragen. So können bei Kurzstrecken hohe Geschwindigkeiten von bis zu 14 m/s erreicht werden (Mathelitsch & Thaller, 2008, S. 125). Durch die langgezogenen Kurven können die Geschwindigkeiten dort beibehalten werden.

Die gemessenen Gleitreibungszahlen für Schlittschuhe des Eisschnelllaufs betragen beim Geradeausfahren 0,0046 und beim Kurvenfahren 0,0059 (de Koning u. a., 1992). Vergleicht man diese Werte mit den in Kapitel 4 besprochenen Reibungsarten, so liegen die beim Eislaufen im Bereich der Flüssigkeitsreibung (Habig & Woydt, 2014, S. E 89 f.). Da Kufen meist aus Stahl hergestellt werden, muss die Form einen entscheidenden Einfluss auf die Reibungszahl haben (siehe Kapitel 4).

Um trotz der geringen Reibung entlang der Kufen beschleunigen zu können, müssen bei allen Formen des Schlittschuhfahrens die Kanten der Kufen eingesetzt werden, welche auch schnelle Kurvenfahrten ohne Traktionsverlust erlauben. Der Einsatz einer einzelnen Kante gelingt durch das Neigen des Schlittschuhs.

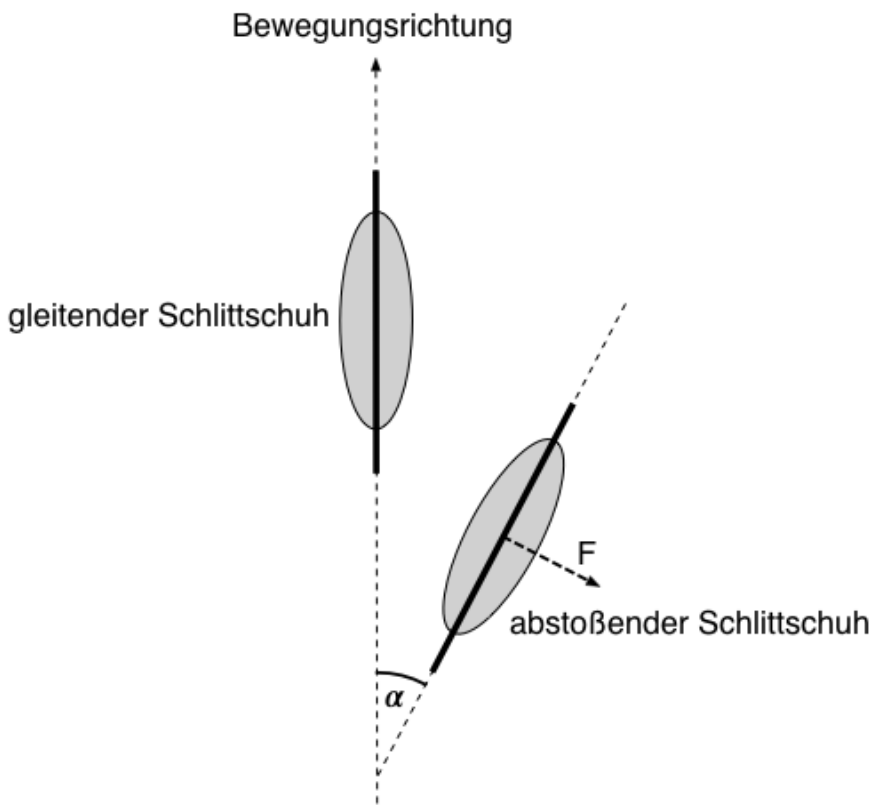


Abbildung 13: Beschleunigen beim Eislaufen durch Abstoßen eines Schlittschuhs (eigene Abbildung)

Am effizientesten ist ein möglichst großer Abstoßwinkel α (siehe Abbildung 13) bis hin zu 90°, wie es oft beim Beschleunigen aus dem Stand praktiziert wird. Die der Kraft F, mit welcher man gegen das Eis drückt, entgegengesetzte Kraft ist dann parallel zur gewünschten Bewegungsrichtung. Da dies bei höheren Geschwindigkeiten aufgrund der fehlenden Zeit nicht mehr funktioniert, versucht man zumindest einen größtmöglichen Abstoßwinkel zu erreichen. Dann bewegt sich der gleitende Schlittschuh im Allgemeinen auch nicht mehr parallel zur Bewegungsrichtung. Nachdem das Bein nach dem Abstoßen vollständig gestreckt ist, wird dieses wieder nach vorne gebracht, auf das Eis aufgesetzt und übernimmt die Rolle des Gleitens. Diese Abfolge führt zu einer leichten Pendelbewegung, welche durch die Arme unterstützt werden kann.

Im weiteren Verlauf wird auf verschiedene, sportartenspezifische Schlittschuhe und Kufenformen eingegangen. Beim Eisschnelllauf werden die längsten Kufen verwendet. Diese führen zu einer vergrößerten Kontaktlänge mit dem Eis und verminderten Wendigkeit, welche bei diesem Sport in Kauf genommen werden kann. Die Kufen sind minimal nach oben gewölbt und am vorderen Ende nur leicht abgerundet. Zusätzlich sind die Kufen mit einer Breite von rund 1,3 mm relativ schmal („Schlittschuh“, 2017). Dadurch ist im Vergleich zu Eishockeyschuhen ein etwas geringerer Reibungskoeffizient und dementsprechend höhere Geschwindigkeit zu erwarten (Federolf u. a., 2008).

Da die Kufen beim Eisschnelllauf länger als die eigentlichen Schuhe sind, gibt es die sogenannten Klappschlittschuhe. Diese erlauben das Abklappen der Kufe am hinteren Ende des Schuhs. Dadurch kann eine längere Abstoßphase erfolgen. Nach einem vollständigen Anheben des Fußes klappt die Kufe wieder zur Gänze an den Schuh zurück.

Alle Schlittschuhe besitzen einen besonderen Kufenschliff, angepasst an die Anforderung der Sportart. Beim Eisschnelllauf werden die Kufen plan geschliffen. Dies ermöglicht die höchsten Geschwindigkeiten durch die große Auflagefläche, vermindert aber den seitlichen Halt der Kufen. So sind beim Eisschnelllauf häufig Stürze in den Kurven zu beobachten.

Die Kanten der Kufen erzeugen einen hohen Druck auf dem Eis, wodurch sich diese eingraben können und den Schuh so stabilisieren. Je schärfer die Kanten, desto stärker ist dieser Effekt ausgeprägt. Erzielt wird die Anpassung durch einen Plan- oder Hohlschliff der Kufen.

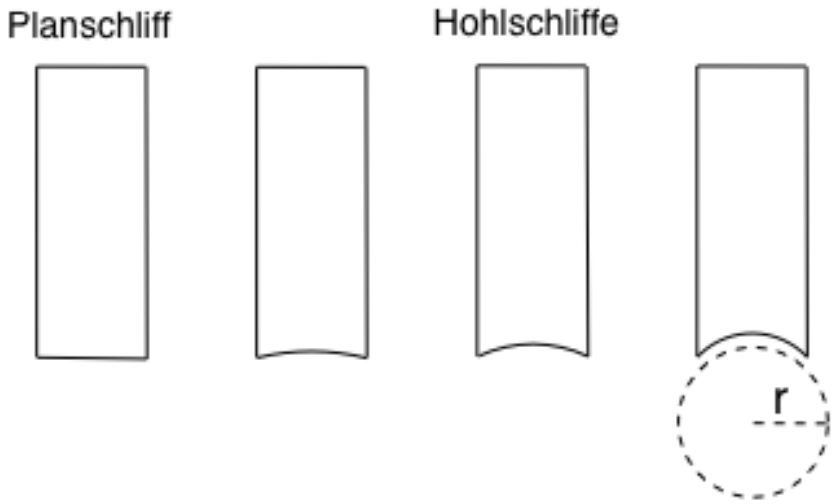


Abbildung 14: Kufenschliffe im Vergleich. Von links nach rechts: Planschliff, leichter, mittlerer und starker Hohlschliff mit eingezeichnetem Hohlschliffradius r (nicht maßstabsgetreu, eigene Abbildung)

Je kleiner der Hohlschliffradius r (siehe Abbildung 14), desto schärfer sind die Kanten und desto tiefer können sie sich ins Eis eingraben. Dies erlaubt das Fahren von besonders engen Kurven und ein schnelles Bremsen. Dabei wird die oberste Eisschicht abgetragen, wodurch ein kontinuierlicher Abbau der kinetischen Energie und ein Verlangsamen erreicht wird.

Die zusätzliche Wendigkeit beim Eishockey und Eiskunstlauf wird durch die kurze Aufstandsfläche erreicht, welche durch eine leicht nach oben gewölbte Kufe realisiert wird. Die Breite der Kufen beim Eishockeyschuh beträgt etwa 5 mm, beim Eiskunstlaufschuh etwa 3-4 mm („Schlittschuh“, 2017).

Die Bezahnung der Kufen von Eiskunstlaufschuhen garantiert den notwendigen Halt, der bei Sprüngen, Schritten und Drehungen notwendig ist. Die Bezahnung befindet sich am vordersten Ende der Kufe und kann so gezielt eingesetzt werden, ohne dabei beim normalen Eislaufen zu stören.

5.4. Curling

Die Anregungen und Aspekte zum Thema Curling entstanden aus einem YouTube–Video heraus, welches Destin Sandlin auf dem Kanal „SmarterEveryDay“ veröffentlicht hat (Sandlin, 2014).

Ziel beim Curling ist es, die eigenen Curlingsteine am nächsten zu einem am Eis markierten Punkt zu bringen. Dabei treten zwei Teams gegeneinander an.

Die Eisfläche wird zuerst, wie auch bei den zuvor angeführten Sportarten, gereinigt und aufbereitet. Anschließend wird die Eisoberfläche durch Aufsprühen von Wasser mit Noppen versehen. Es entstehen also kleine gefrorene Tropfen am Eis. Diese werden anschließend oberflächlich abgeschabt, um eine verkleinerte, glatte Lauffläche für die Curlingsteine zu erhalten.

Curlingsteine sind an der unteren Seite konkav und treten nur auf einem dünnen, kreisförmigen Laufband in Kontakt mit dem Eis. Ein relativ raues Laufband verursacht so Kratzer auf dem Eis.
Eine Besonderheit des Curlings ist die Bahn, die ein rotierender Curlingstein beim Gleiten verfolgt. Man könnte meinen, eine analoge Bewegung mit einem umgestülpten Glas auf einem glatten Tisch zu erhalten, wobei der Glasrand das Laufband des Curlingsteins und der Tisch die Eisfläche simulieren soll (Sandlin, 2014).

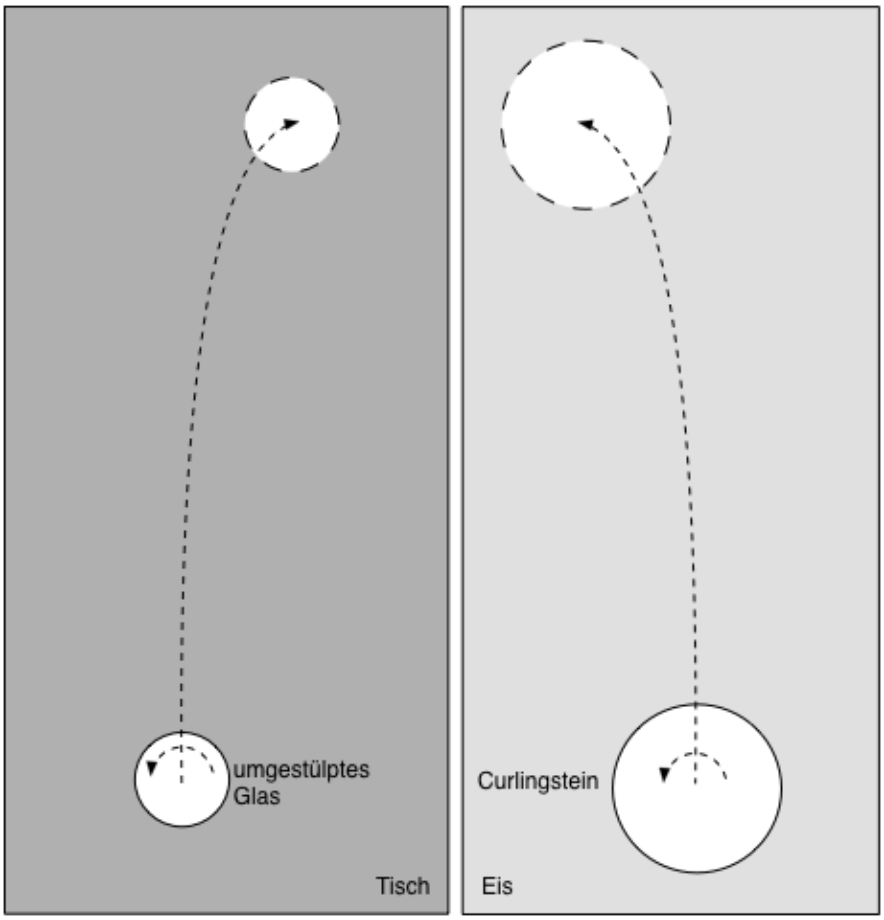


Abbildung 15: Resultierende Bewegungen eines umgestülpten Glases auf einem Tisch und eines Curlingsteins auf Eis bei einer Linksrotation (eigene Abbildung)

Das umgestülpte Glas führt eine Bewegung entgegen der Rotationsrichtung aus, während sich der Curlingstein in die Richtung der Rotation bewegt (siehe Abbildung 15). Der Grund für die Bewegung des Glases ist vergleichsweise leicht gefunden. Während der Bewegung über den Tisch wird das Glas durch die herrschende Reibung gebremst, wodurch das Glas dazu tendiert überzukippen. Somit drückt das Glas am vorderen Ende stärker gegen den Tisch als am hinteren Ende. Die resultierende Reibungskraft, welche die Drehung zu hemmen versucht und damit der Rotationsrichtung entgegengesetzt ist, ist vorne durch die höhere Normalkraft größer. Hinten ist die der Rotationsrichtung entgegengesetzte Reibungskraft im Vergleich geringer. Diese

asymmetrische Reibungskraftverteilung führt zu einer Bewegung des Glases entgegen der Rotationsrichtung. Dies kann man auch veranschaulichen, indem man ein Glas im Stand nach vorne oder hinten kippt und dann dreht. Kippt man es nach vorne, so bewegt es sich entgegen der Rotationsrichtung und kippt man es nach hinten, so bewegt es sich in die Rotationsrichtung.

Ein Curlingstein folgt in seiner Bewegung jedoch der Rotationsrichtung. Eine letztendliche Erklärung ist noch nicht gefunden, allerdings gibt es dazu einige Versuche (Sandlin, 2014). So wird teilweise mit einer Theorie das seltsame Verhalten des Curlingsteins erklärt, welche das zuvor angesprochene Kratzen auf dem Eis verwendet. Dafür betrachtet man einen Punkt des Laufbandes eines rotierenden und gleitenden Curlingsteins, welcher durch die Bewegung im Eis einen Kratzer in der Form einer Sinusfunktion hinterlässt. An der hinteren Hälfte des Laufbandes bewegen sich andere Punkte über diese Kratzer. Dabei sollen die Punkte eine Tendenz zum Folgen dieser Kratzer haben. Dadurch entsteht eine der Rotationsrichtung entgegengesetzte Kraft, die vorne ausbleibt. Somit würde die Bewegung in die Rotationsrichtung resultieren (Nyberg, Alfredson, Hogmark, & Jacobson, 2013).

Diese Idee trifft jedoch auf Widerstand, da für die Erklärung ein raues Laufband herangezogen wird. Allerdings führen auch Curlingsteine mit polierten Laufbändern, welche keine Kratzer im Eis hinterlassen, solche Bewegungen in Rotationsrichtung aus (Shegelski, Jensen, & Reid, 2015).

Die Frage nach dem wahren Grund für das seltsame Verhalten des Curlingsteins bleibt weiterhin offen (Nyberg, Hogmark, & Jacobson, 2013).

Wischt man vor dem Curlingstein mit dem Curlingbesen über das Eis, so reduziert sich durch das Schmelzen mittels Reibung die Reibung zwischen Curlingstein und Eis. Dadurch kann der Curlingstein weiter gleiten und die resultierende Seitwärtsbewegung, welche durch die Rotation verursacht werden würde (siehe Abbildung 15), kann so gezielt verringert werden (Sandlin, 2014).

5.5. Skisport

Schneebedeckte Skipisten werden mit Pistenraupen präpariert. Diese glätten unebene Stellen und verdichten den Schnee, um eine möglichst lange Haltbarkeit der Piste zu gewährleisten. Bei zu geringem Niederschlag werden Schneekanonen eingesetzt, in welchen Wasser zerstäubt, gefroren und über hohe Wurfweiten verteilt wird. Das zerstäubte Wasser kann aber nur dann gefrieren, wenn es genügend Wärme abgibt, was durch ein partielles Verdampfen des Wassers erreicht wird. Dies kann durch ein Beimengen von komprimierter Luft realisiert werden, welche beim Austritt rasch expandiert und sich so abkühlt. Aufgrund des einfacheren Verdampfens bei trockener Luft ist die Schneeproduktion bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 30 % schon ab -1 °C möglich, bei 80 % Feuchte hingegen erst unter -4 °C (Gerl, 2006).

Zwischen Skifahren und den zuvor besprochenen Sportarten gibt es einige Analogien. Es wird auch hier die geringe Reibung auf gefrorenem Wasser ausgenützt, um möglichst schnell und gezielt fahren zu können. Die durchschnittlichen Reibungszahlen für gewachste Ski auf Schnee bei 0 °C betragen für die Haftreibung 0,1 und für die Gleitreibung 0,05 (Tipler & Mosca, 2015, S. 114). Die Werte liegen damit im Bereich der Mischreibung (siehe Kapitel 4). Das suggeriert den Kontakt des Skis sowohl zu Schnee als auch zu Wasser. Betrachtet man den Ski beim Gleiten wieder der Länge nach, so kann man aufgrund der Erwärmung des Schnees durch Reibung am hinteren Ende von einer verringerten Reibung im Vergleich zum vorderen Ende ausgehen. Die QLLs sollen dabei nur die „Ecken" der Schneekristalle abrunden, wodurch die Kontaktfläche zweier Festkörper reduziert wird und sie somit zu einer geringeren Reibung beim Skifahren beitragen (Nachbauer, Kaps, Hasler, & Mössner, 2016).

Während bei Kunsteisbahnen relevante Faktoren, wie Temperatur oder Luftfeuchtigkeit, konstant gehalten werden können und die Schlittschuhe dadurch nicht stets neu angepasst werden müssen, kommt es im Skisport zu variierenden Umgebungsbedingungen. Durch verschiedene Beläge und Wachse kann die Lauffläche an die herrschende Witterung und Anforderung angepasst und ein besseres Gleitverhalten realisiert werden.

Bei den Rennskiern werden im Alpinsport je nach Disziplin unterschiedliche Formen gewählt. So werden beim Abfahrtslauf und dem Super-G besonders lange Skier eingesetzt, welche eine erhöhte Stabilität ermöglichen. Beim Riesentorlauf oder Slalom werden kürzere Skier verwendet, die gemeinsam mit einer stärkeren Taillierung engere Kurvenradien ermöglichen.

Die Stahlkanten des Skis weisen im Alpinsport einen spitzen Winkel auf, welche sich in Kurvenfahrten tief genug in den Schnee eingraben, um einen seitlichen Halt zu gewährleisten. Bei nordischen Skisportarten, wie beim Langlaufen oder Skispringen, werden die Kanten hingegen nicht so stark eingesetzt, da kaum Kurvenfahrten oder Bremsmanöver ausgeführt werden müssen. Die hohe Geschwindigkeit beim Skispringen wird durch eine präparierte Anlaufspur erreicht, welche durch ein an die Skier angepasstes Profil den nötigen Seitenhalt bietet. Beim Langlaufen wird die notwendige Reibung für ein Beschleunigen meist durch sogenannte Steigzonen gewährleistet, welche sich unterhalb der Bindung befinden, mit einem Haftwachs präpariert oder mit Schuppen versehen werden und nur bei der Belastung auf einem Ski in Kontakt mit dem Schnee geraten. Vor und hinter der Steigzone befindet sich auf der Lauffläche jeweils eine Gleitzone, die eine geringe Gleitreibung ermöglicht („Ski", 2017).

5.6. Synthetisches Eis

Um Kunsteisbahnen zu betreiben, ist ein enormer Energieaufwand nötig. Gerade in den Sommermonaten stellen daher viele Eishallen ihren Betrieb ein. Will man dennoch eine Fläche zur Verfügung stellen, welche bei einer Benützung ähnliche Eigenschaften wie Eis aufweist, so kann man auf synthetisches Eis zurückgreifen.

Wie schon in Kapitel 4 erwähnt, werden die besonderen Gleiteigenschaften auf Eis durch eine Fluidschicht erreicht. Anfänge des synthetischen Eises imitierten diese Eigenschaften durch aufgetragene Gleitflüssigkeiten, wie zum Beispiel Silikonlösungen („Synthetisches Eis“, 2015). Ein Austrocknen oder unregelmäßiges beziehungsweise zu seltenes Auftragen verhindert aber die Benutzbarkeit. Neuere Systeme greifen auf manipulierte Polyethylene und verschiedene Zusatzstoffe zurück („LIKE-ICE!“, 2017). Eine Gleitschicht wird erst bei der Benützung freigesetzt („Synthetisches Eis“, 2015). Die Temperaturen sind für synthetische Eisflächen nicht relevant und diese können so das ganze Jahr über benützt werden, wobei sich die Wartung auf ein Entfernen des geringen Abriebs beschränkt („LIKE-ICE!“, 2017, „Skate Revolution“, 2015).

Synthetisches Eis weist eine höhere Gleitreibung auf, ist aber dennoch mit normalen Eislaufschuhen befahrbar und erlaubt sogar das Bremsen durch Querstellen der Kufen wie auf normalem Eis („Synthetisches Eis“, 2015).

6 Relevante Experimente

In diesem Kapitel wird auf verschiedene Experimente zum Thema Wasser in all seinen Aggregatszuständen eingegangen. Diese richten sich nach den bereits besprochenen Eigenschaften von Wasser. Die Versuche werden möglichst einfach gehalten, um sie gegebenenfalls im Unterricht durchführen zu können.

Auf den in Abschnitt 2.3 erwähnten Versuch, bei welchem ein Eisblock mit Hilfe von beschwerten Drahtschlingen durchtrennt wird, wird bewusst verzichtet.

6.1. Eiswürfel im randvollen Glas

Material:

- Offenes Gefäß (Glas, Eimer, ...)
- Kaltes Wasser
- Eiswürfel

Durchführung (Epstein, 2011)**:**

Man legt einige Eiswürfel in ein offenes Gefäß und füllt dieses mit eiskaltem Wasser bis zum Rand an. Dann wartet man ab und beobachtet den Wasserstand. Wird das Wasser beim Schmelzen der Eiswürfel über den Rand hinausschwappen? Bleibt der Wasserstand gleich? Sinkt der Wasserstand?

Prinzip (Epstein, 2011)**:**

Nach dem Archimedischen Prinzip ist das Gewicht des Wassers, das vom Eis verdrängt wird, gleich groß wie das Gewicht des Eises. Damit erreicht das geschmolzene Eis durch die gestiegene Dichte genau das Volumen, das in das Gefäß hineinpassen würde, wenn sich kein Eis darin befinden würde. Somit bleibt der Wasserstand gleich. Erwähnenswert ist auch, dass das Volumen des Eises, welches sich oberhalb des Wasserstandes befindet, genau dem Volumenzuwachs des Wassers beim Gefrieren zu Eis entspricht.

6.2. Sprengkraft des Eises

Material:

- Verschließbare Gusseisenhohlkugel
- Flüssiger Stickstoff
- Wasser

Durchführung:

Die Kugel aus Gusseisen wird zur Gänze mit Wasser gefüllt und verschlossen. Kühlt man diese mit flüssigem Stickstoff ab, so explodiert sie.

Abbildung 16: Explodierte und neue Gusseisenhohlkugel an der TU Graz (eigene Abbildung)

Prinzip:

Bei der Versuchsdurchführung mit flüssigem Stickstoff sollten ausreichende Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden, da die umhergeschleuderten Metallteile eine Verletzungsgefahr darstellen können. Für die vom Hersteller vorgeschlagene Version dieses Versuchs kann für die Kühlung eine Kältemischung aus Eis, Wasser und Salz verwendet werden (siehe Abschnitt 6.5).

Da Eis ein höheres Volumen als Wasser besitzt, baut das Eis einen enormen Druck auf die verschlossene Kugel auf, welche beim Überschreiten eines Maximalwerts nachgibt und so zerspringt. Dieses Prinzip lässt sich auch bei gefüllten Glasflaschen im Gefrierschrank beobachten, in welchen sich vergleichsweise langsam ein Druck aufbaut und bei einem geringeren Wert ein Nachgeben des Materials zu erwarten ist. Getränkedosen besitzen zwar eine konkave Wölbung an der Unterseite, welche bei einer Ausdehnung des Eises nachgeben kann, allerdings kann es auch hier zur Beschädigung der Dosen und einem Austritt der Flüssigkeit kommen.

Abbildung 17: Explodierte und neue Getränkedose an der TU Graz (eigene Abbildung)

Die Ausdehnung des Wassers beim Gefrieren stellt auch im Bauwesen ein erhebliches Problem dar, sodass es zu Rohrbrüchen oder Frostschäden an Straßen kommen kann.

6.3. Temperaturverlauf beim Schmelzen von Eis

Material:

- Hitzebeständiges, offenes und durchsichtiges Gefäß
- Eiswürfel
- Thermometer
- Wärmequelle (Kochplatte, Gasbrenner, ...)

Durchführung (Sexl & Wessenberg-Raab, 2007)**:**

Die Eiswürfel werden gemeinsam mit einem Thermometer in das Gefäß gegeben. Dieses wird anschließend erwärmt und die Temperatur über den zeitlichen Verlauf notiert.

Prinzip:

Im Bereich des Schmelz- und Siedepunkts bleibt die Temperatur bis zur vollständigen Phasenumwandlung konstant, wenn sich der Umgebungsdruck nicht ändert. Die zugeführte Wärme wird dabei ausschließlich für die Änderung der Aggregatszustände verwendet. Die Schmelzwärme beträgt dabei 334 kJ/kg und die Verdampfungswärme 2257 kJ/kg. Für die Erwärmung des Eises ist eine Wärmemenge von etwa 2,1 kJ/kg*K nötig und 4,2 kJ/kg*K für die Erwärmung von Wasser (Kuchling, 2011).

6.4. Kryophor

Material:

- Kryophor
- Flüssigstickstoff

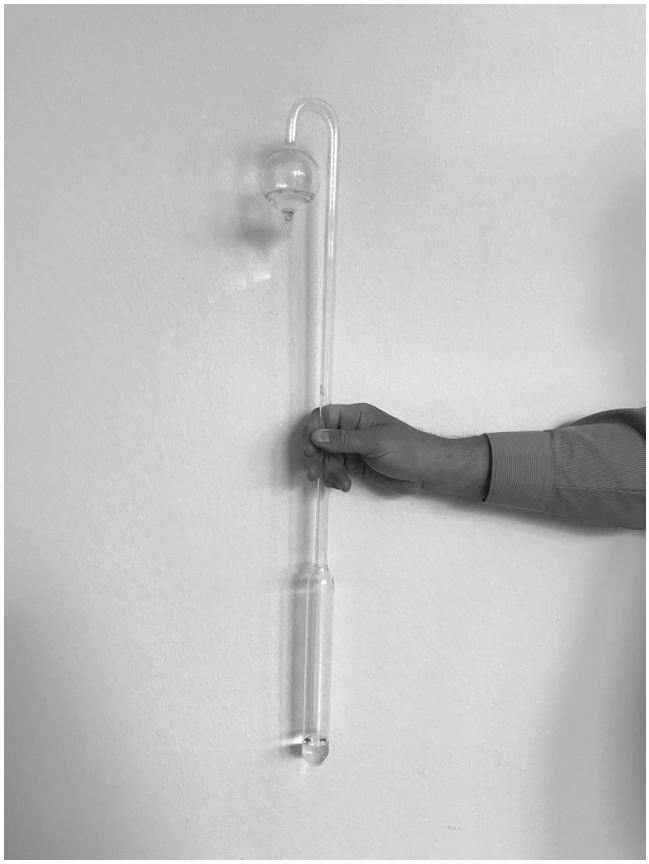


Abbildung 18: Kryophor an der TU Graz (eigene Abbildung)

Durchführung:

Der zylinderförmige Teil des Kryophors wird in den flüssigen Stickstoff getaucht, sodass sich das Wasser in diesem Bereich abkühlt und gefriert. Nach einiger Zeit gefriert auch das Wasser im oberen Bereich des Kryophors.

Prinzip:

Der Kryophor enthält nur Wasserdampf als Gas und flüssiges Wasser im zylinder- und kugelförmigen Teil. Es stellt sich die Sättigungsdampfmenge ein. Kühlt man das Wasser in einem Bereich ab bis es gefriert, so verringert sich der Dampfdruck darüber. Durch die Diffusion des Wasserdampfs ist die Druckabnahme im unteren Bereich mit einer Druckabnahme im oberen Bereich verbunden, was dort zu einer erhöhten Verdampfung des Wassers führt. Die dafür notwendige Wärme wird dem Wasser entzogen, welches sich so abkühlt und gefriert.

6.5. Herstellung von Speiseeis

Material:

- Schüssel
- Schneebesen
- Zerkleinerte Früchte
- Schlagobers
- Zucker
- Flüssigstickstoff oder Kältemischung (Eis und Salz)

Durchführung:

Die Früchte werden mit Schlagobers und Zucker in einer Schüssel vermengt. Diese Masse wird dann unter ständigem Rühren mit dem Schneebesen gefroren, wofür zwei Möglichkeiten zur Auswahl stehen. Man kann entweder flüssigen Stickstoff in die Masse mit einrühren oder die Schüssel von außen mit einer Kältemischung abkühlen.

Prinzip:

Da flüssiger Stickstoff beim Kontakt mit der Umgebung durch seine Siedetemperatur von -196 °C rasch in den gasförmigen Zustand übergeht, eignet er sich hervorragend für eine schnelle Abkühlung, da bei einem langsamen Beimengen nur die gefrorene Speiseeismasse in der Schüssel zurückbleibt (Kuchling, 2011).

Etwas zeitaufwendiger, dafür aber mit haushaltsüblichen Mitteln durchführbar, ist die Abkühlung durch die sogenannte Kältemischung. Dafür wird die Schüssel von außen mit Eis gekühlt, welchem Salz beigemengt wird. Zur Lösung von Salz ist aber eine Wärmemenge nötig, welche dem Eis entzogen wird und sich die Mischung daraufhin weiter abkühlt. Bei einem Beimengen von 31 g Natriumchlorid zu 100 g Eis kann durch die endotherme Reaktion eine Kältemischung von -21 °C erreicht werden (Kuchling, 2011).

Durch das ständige Rühren soll die Bildung von großen Eiskristallen verhindert werden.

Das Vermengen von Eis und Salz führt zwar insgesamt zu einer tieferen Temperatur der Mischung, setzt aber gleichzeitig den Erstarrungspunkt herab. Dieser Effekt wird im Winter beim Verteilen von Streusalz auf den Straßen ausgenützt, sodass das Eis schmilzt.

6.6. Eiswürfel angeln

Material:

- Offenes Gefäß (Glas, Eimer, ...)
- Kaltes Wasser
- Eiswürfel
- Salz
- Wollfaden

Durchführung:

Das kalte Wasser wird gemeinsam mit den Eiswürfeln in ein Gefäß gegeben. Der Faden wird auf einem Eiswürfel platziert und darauf etwas Salz gestreut. Nach einiger Zeit kann der Eiswürfel mit dem Faden aus dem Wasser gehoben werden.

Prinzip:

Durch das Bestreuen des Eiswürfels mit Salz wird der Erstarrungspunkt herabgesetzt, wodurch die Oberfläche leicht antaut. Das gebildete Wasser kann am Faden wieder anfrieren, wenn die Salzkonzentration durch weiteres Schmelzen des Eises abnimmt. Wird zu viel Salz auf den Eiswürfel gestreut, so kann die Salzkonzentration nicht weit genug abnehmen, wodurch ein Anfrieren am Faden verhindert wird.

6.7. Wasserdampf sichtbar machen

Material:

- Wasser
- Kochtopf oder Reagenzglas
- Wärmequelle (Kochplatte, Gasbrenner, ...)
- Taschenlampe

Durchführung:

Das Wasser wird in einem hitzebeständigen Gefäß durch eine Wärmequelle erhitzt. Die Taschenlampe wird so eingerichtet, dass das Licht den Bereich oberhalb des Gefäßes passiert und anschließend auf eine weiße Wand trifft. Je heißer das Wasser, desto mehr Schlieren sind an der Wand zu erkennen.

Prinzip:

Der aufsteigende Wasserdampf ist zwar unsichtbar, besitzt aber andere optische Eigenschaften als Luft, sodass es zu einer unregelmäßigen Lichtausbreitung durch den strömenden Wasserdampf kommen kann, die an der Wand sichtbar wird.

6.8. Eis und siedendes Wasser nebeneinander

Material:

- Wasser
- Kleines Stück Eis
- Reagenzglas
- Draht
- Gasbrenner

Durchführung:

Das Eis wird am Boden des Reagenzglases platziert und mit einem Draht am Aufsteigen im Wasser, welches anschließend in das Reagenzglas gefüllt wird, gehindert. Erhitzt man das Reagenzglas im oberen Bereich, so siedet das Wasser dort, ohne dass das Eis am Boden geschmolzen ist.

Prinzip:

Wasser besitzt eine geringe Wärmeleitfähigkeit, sodass bei einem schnellen Erhitzen im Gefäß gleichzeitig Temperaturen von unterhalb des Gefrierpunkts bis zum Siedepunkt herrschen können.

6.9. Sieden durch Abkühlen

Material:

- Glaskolben inklusive Verschluss
- Wasser
- Wärmequelle (Kochplatte, Gasbrenner, ...)

Durchführung (Sexl & Wessenberg-Raab, 2007)**:**

Das Wasser wird im offenen Glaskolben durch eine Wärmequelle zum Sieden gebracht. Anschließend entfernt man die Wärmequelle, wodurch das Sieden stoppt. Man verschließt den Kolben, dreht diesen auf den Kopf und kippt kaltes Wasser darüber. Das Wasser im Kolben beginnt wieder zu sieden.

Prinzip:

Wasser siedet, wenn der druckabhängige Siedepunkt erreicht wird. Das heißt, dass der Dampfdruck höher wird als der Umgebungsdruck, der auf der Flüssigkeitsoberfläche lastet (Demtröder, 2015). Da sich der Druck beim Abkühlen einer Luftmasse in einem geschlossenen Gefäß verringert (durch die isochoren Bedingungen) und das Wasser durch seine hohe Wärmekapazität nur geringfügig abkühlt, wird die Siedepunktskurve in Abbildung 2 wieder erreicht, sodass das Wasser siedet.

6.10.Tripelpunkt

Material:

- Glasglocke
- Vakuumpumpe
- Eiswürfel
- Schale

Durchführung (Roth & Stahl, 2016)**:**

Die Eiswürfel werden in einer Schale langsam geschmolzen, sodass das Gemisch aus Eis und Wasser eine Temperatur um den Gefrierpunkt (bei Normaldruck) erreicht. Die Schale wird samt Inhalt unter die Glasglocke gestellt und die sich darin befindliche Luft mittels der Vakuumpumpe abgesaugt. Bei Erreichen von gewünschtem Druck ($p = 611$ Pa) und Temperatur ($T = 273{,}16$ K) verdampfen Wasser und Eis zur gleichen Zeit, wobei sogar innerhalb des Eises ein Brodeln zu erkennen ist.

Prinzip:

Hinter diesem Phänomen steckt der Tripelpunkt von Wasser (siehe Abschnitt 2.2.7). Hier können alle drei klassischen Aggregatszustände von Wasser im Gleichgewicht koexistieren.

Eine alternative Möglichkeit wäre es, einen Glaskolben zu evakuieren, diesen mit Wasser zu füllen und anschließend zu kühlen. Sobald an der Glaswand Wasser gefriert, ist der Tripelpunkt erreicht.

6.11. Nebensonne aus dem Marmeladenglas

Material:

- Hexagonales Prisma (alternativ: ein mit Wasser gefülltes Marmeladenglas mit selber Form)
- Taschenlampe
- Eventuell schwarzes Klebeband

Durchführung (Gruber, 2017)**:**

In diesem Fall wird ein Marmeladenglas in der Form eines hexagonalen Prismas verwendet, welches mit Wasser gefüllt wird. Um ungewollte optische Erscheinungen zu vermeiden, kann man die Kanten des Glases mit schwarzem Klebeband abdecken. Man beleuchtet das Glas mit einer Taschenlampe und dreht es dabei. Bei einem Winkel um 22° zum Glas erscheint bei richtiger Ausrichtung des Glases ein heller Fleck.

Abbildung 19: Versuchsmaterial und -durchführung für die Nebensonne aus dem Marmeladenglas (eigene Abbildung)

Prinzip:

Der Versuch soll die Brechung des Sonnen- oder Mondlichts an einem Eiskristall in der Atmosphäre illustrieren. Glas und Wasser haben ähnliche Brechungsindices wie Eis, wodurch die optischen Eigenschaften eines hexagonalen Eiskristalls bei dieser Durchführung annähernd erreicht werden (Kuchling, 2011).

Bei gehäufter horizontaler Ausrichtung der Kristalle in der scheinbaren Höhe der Leuchtquelle treten besonders helle Flecken links und rechts von dieser auf und werden je nach Auftreten Nebensonnen oder Nebenmonde genannt. Sind viele solcher Eiskristalle in verschiedenen Höhen und Ausrichtungen vorhanden, so bilden sich ganze Ringe um die Sonne oder den Mond und werden Halos genannt (Foelsche, 2015c).

Abbildung 20: Halo bei Mondlicht. Aufgenommen am 7. März 2017 in Graz, Straßgang. Der Mond wurde bewusst verdeckt, um den Halo-Ring deutlicher zu sehen. (eigene Abbildung, nachträgliche Bearbeitung zur verbesserten Sichtbarkeit)

7 Eis im Physikunterricht

Der Lehrplan für allgemeinbildende höhere Schulen wurde novelliert und tritt ab September 2017 klassenweise in Kraft („BKA - Lehrplan“, 2017). Zweckmäßigerweise wird daher auf diesen neuen Lehrplan eingegangen. Dafür werden Themengebiete sowohl aus der Unterstufe als auch aus der Oberstufe bei einem Ausmaß von bis zu sieben Wochenstunden Physikunterricht ausgesucht, in welchen Eis im Physikunterricht eine Rolle spielen kann. Der Bezug auf Eis kann sowohl häufiger als auch seltener genommen werden.

2. Klasse:

Die Welt in der wir uns bewegen:

Reibungskraft

Alle Körper bestehen aus Teilchen:

Teilchenmodell und Auswirkungen, Wärmephänomene, Temperatur

Schwimmen, Schweben, Sinken

3. Klasse:

Unser Leben im „Wärmebad“:

Zustandsänderungen – Teilchenmodell

Wetter, Klima

4. Klasse:

Die Welt des Sichtbaren:

Brechung, Totalreflexion

6. Klasse:

Grundlagen zur Thermodynamik

7. Klasse:

Elektromagnetische Wellen:

Wellenoptik

Strahlungshaushalt der Erde

8. Klasse:

Einblicke in aktuelle physikalische Forschung

(„BKA - Lehrplan“, 2017)

Eis kann also in jeder Klasse, in der Physik unterrichtet wird, als Basis, Mittel oder Beispiel für verschiedenste Lehrinhalte herangezogen werden. Die genannten Themen können in direkter Verbindung mit Eis stehen, während bei anderen auch in weiterführender Betrachtung eine Erwähnung von Eis als sinnvoll erachtet werden kann. Als Beispiel kann hier unter anderem der in Abschnitt 5.2 behandelte Aspekt des Eiskunstlaufs genannt werden, bei welchem die Drehimpulserhaltung eine essentielle Rolle spielt. Dieses Vorgehen ist auch dem Lehrplan nach sinnvoll, wonach klassenunabhängig die wesentlichen physikalischen Prinzipien im Sport zu behandeln sind („BKA - Lehrplan“, 2017). Dabei sei erwähnt, dass sich je nach Interesse der Schülerinnen und Schüler eine Einführung in verschiedene Themen durch solche kontextbezogenen Aspekte und Alltagsbeispiele durchführen lässt, um das Interesse an der Thematik zu steigern. Dies bietet sich besonders dann an, wenn sich die vermuteten Prinzipien und Phänomene, die hinter einem scheinbar bekannten Ablauf stecken, bei genauerer Betrachtung, wie beispielsweise Zeitlupenaufnahmen aus dem Internet, als falsch herausstellen und so in Konflikt mit den eigenen Vorstellungen geraten (Kircher, Girwidz, & Häußler, 2007).

Dazu seien einige mögliche, falsche Alternativvorstellungen aufgelistet, welche sich als Hürde herausstellen können:

- Die beim Sieden des Wassers aufsteigenden Blasen bestehen aus Luft, Sauerstoff und Wasserstoff, ... (Koss-Thosold, 2011)
- Kontinuumsmodell – die Welt besteht nicht wirklich aus Teilchen (Kircher u. a., 2007)
- Wasserdampf ist sichtbar (Nebel oder Wolken werden mit Wasserdampf gleichgesetzt)
- Regentropfen haben eine Tropfenform
- Wärme ist gleich Temperatur
- Skifahren oder Eislaufen aufgrund des Druckschmelzens

Nichtsdestotrotz kann Eis als hervorragendes Beispiel im Spiralprinzip genannt werden, wonach Lerninhalte während des Schulverlaufs immer wieder aufs Neue aufgegriffen sowie detaillierter oder unter einem anderen Aspekt betrachtet werden. Ebenso kann bereits Gelerntes einen Grundstock für neue Zugangsmöglichkeiten zum selben Thema darstellen und das bis zu aktuellen Forschungsfragen.

Die in Kapitel 3 behandelten QLLs und deren Verhalten sind Teil der aktuellen Forschung und so kommen regelmäßig neue Aspekte zum Vorschein (Asakawa u. a., 2016; Murata u. a., 2015, 2016; Sánchez u. a., 2017). Jedoch können auch einige Phänomene, welche beim Sport eine große Rolle spielen nach aktuellem Stand der Forschung nicht eindeutig erklärt werden, wie beispielsweise die Bewegung eines Curlingsteins oder allgemein das besonders gute Gleitverhalten von Sportgeräten auf Eis (siehe Kapitel 5).

Wie soll man also als „einfache Lehrkraft“ nicht vollständig geklärte Phänomene vermitteln, wenn oft Expertinnen und Experten im passenden Fachbereich keine konkrete Antwort dazu finden? Die einfachsten Fragen können uns zum Zweifel am eigenen Wissen und am Verständnis der Physik treiben und zeigen uns, wie viel Arbeit in vielen Bereichen noch getan werden muss. Aber gerade dort hat man als Lehrkraft die Chance, solche Forschungslücken aufzuzeigen und vielleicht einige Schülerinnen und Schüler für die aktuelle naturwissenschaftliche Arbeit zu begeistern.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Nach einem Streifzug durch die theoretischen Grundlagen in Kapitel 2 und einer Aufbereitung der Forschungsergebnissen zu quasiflüssigen Schichten (QLLs) in Kapitel 3 kann man verschiedene Meinungen zur Erklärung der geringen Reibung auf Eis vertreten. In Kapitel 4 wurden dabei einige Aspekte besprochen, die für und gegen die häufigsten Erklärungsversuche sprechen. Einigung herrscht über das Vorhandensein einer flüssigen beziehungsweise flüssigkeitsähnlichen Schicht an der Oberfläche des Eises. Die Ursache für die Entstehung dieser Schicht wird in der Literatur mit Druckschmelzen, Schmelzen durch Reibung oder durch QLLs angegeben. Zusammenfassend seien die Überlegungen, welche insbesondere die einzelnen Erklärungsversuche zum Schlittschuhlaufen widerlegen, noch einmal aufgelistet:

Der Druck, der durch einen Schlittschuh auf das Eis ausgeübt wird, senkt den Schmelzpunkt um wenige Grad Celsius, während die optimalen Eistemperaturen für das Eishockey oder den Eiskunstlauf noch tiefer liegen. Dieser Aspekt wurde auch schon in Abschnitt 2.3 behandelt und mit einem Versuch untermauert.

Für die Erwärmung des Eises durch Reibung muss eine Arbeit verrichtet werden. Bei einer Haftreibung wird aber keine Relativbewegung zwischen zwei Oberflächen ausgeführt, sodass auch keine Arbeit verrichtet wird und sich die Materialien infolgedessen auch nicht erwärmen. Steht man mit Schlittschuhen auf Eis, so ist es aber auch ohne Bewegung rutschig.

QLLs entstehen bei ungesättigter oder übersättigter Luft, bleiben aber beim Sättigungsdampfdruck aus. Wird dieser erreicht, so kann sich Nebel bilden. Dennoch wurden schon Eishockeypartien unter diesen Bedingungen ausgetragen, ohne dass die Schlittschuhe am Eis haften blieben.

Ungeachtet dessen wurden in Kapitel 5 einige Sportarten, die auf Eis ausgeübt werden, auf ihre Besonderheiten untersucht und erläutert. Unter anderem wurde dabei auf das seltsame Verhalten von rotierenden Curlingsteinen eingegangen.

Durch die Sammlung einiger Experimente im Kapitel 6 wurde gemeinsam mit Kapitel 7 der Bogen zum Physikunterricht gespannt.

Abschließend kann gesagt werden, dass es für ein umfassendes Verständnis zu den Phänomenen, die Eis aufweist, noch einiger Forschung bedarf, man somit auf zukünftige Ergebnisse gespannt sein kann und sich bis dahin weiter an der Faszination Eis erfreuen darf.

Literaturverzeichnis

Asakawa, H., Sazaki, G., Nagashima, K., Nakatsubo, S., & Furukawa, Y. (2016). Two types of quasi-liquid layers on ice crystals are formed kinetically. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *113*(7), 1749–1753. https://doi.org/10.1073/pnas.1521607113

Atkins, P., & de Paula, J. (2006). *Physical chemistry* (8. Auflage). https://doi.org/10.1039/C1CS15191F

Behind the Scenes Series - Frozen Biscuits. (o. J.). Abgerufen 22. Mai 2017, von http://www.nhlofficials.com/es3552/cat127/behind-the-scenes-series-frozen-biscuits

BKA - Lehrplan. (2017). Abgerufen 30. Mai 2017, von https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008568&FassungVom=2017-09-01

Bluhm, H., Inoue, T., & Salmeron, M. (2000). Friction of ice measured using lateral force microscopy. *Phys. Rev. B.*, *61*(11), 7760–7765. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.61.7760

de Koning, J. J., de Groot, G., & van Ingen Schenau, G. J. (1992). Ice friction during speed skating. *Journal of Biomechanics*, *25*(6), 565–571. https://doi.org/10.1016/0021-9290(92)90099-M

Demtröder, W. (2015). *Experimentalphysik 1: Mechanik und Wärme* (7. Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-46415-1

Demtröder, W. (2016). *Atome, Moleküle und Festkörper*. *Experimentalphysik* (5. Auflage, Bd. 3). Berlin Heidelberg: Springer Spektrum. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03911-9

Dichte des Wassers. (o. J.). Abgerufen von http://www.iup.uni-heidelberg.de/institut/studium/lehre/AquaPhys/docMVEnv3_12/AqSysSkript_Kap2.pdf

Dichteanomalie. (2017). Abgerufen 22. März 2017, von de.wikipedia.org/wiki/Dichteanomalie

Eisbären im Nebel. (2013). Abgerufen 8. Juni 2017, von http://www.augsburger-allgemeine.de/guenzburg/sport/Eisbaeren-im-Nebel-id27554662.html

Epstein, L. C. (2011). *Denksport Physik* (4. Auflage). München: Deutscher Taschenbuch Verlag.

Evans, D. C. B., Nye, J. F., & Cheeseman, K. J. (1976). The Kinetic Friction of Ice. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, *347*(1651), 493 LP-512. Abgerufen von http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/347/1651/493.abstract

Faraday, M. (1932). Tagebucheintrag vom 8. September 1842. In T. Martin (Hrsg.), *Faraday's diary : being the various philosophical notes of experimental investigation*. London: Bell and Sons. Abgerufen von https://archive.org/details/faradaysdiarybei00fara_2

Federolf, P. A., Mills, R., & Nigg, B. (2008). Ice friction of flared ice hockey skate blades. *Journal of Sports Sciences*, *26*(11), 1201–1208. https://doi.org/10.1080/02640410802027360

Foelsche, U. (2015a). *(19) Niederschlag*. Graz. Abgerufen von https://moodle.uni-graz.at/course/view.php?id=61463

Foelsche, U. (2015b). *(5) Barometrische Höhenformel*. Graz. Abgerufen von https://moodle.uni-graz.at/course/view.php?id=61463

Foelsche, U. (2015c). *(8) Atmosphärische Optik*. Graz. Abgerufen von https://moodle.uni-graz.at/course/view.php?id=61463

Gerl, B. (2006). Lautstark rieselt der Schnee. Abgerufen 9. Juni 2017, von http://www.spektrum.de/news/lautstark-rieselt-der-schnee/859719

Gruber, W. (2017). *Wunderbares Licht - Planetarium*. Wien.

Habig, K.-H., & Woydt, M. (2014). Tribologie. In K.-H. Grote & J. Feldhusen (Hrsg.), *Dubbel* (24.Auflage, S. E 89-E 97). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38891-0

Hauk, A. (2016). Siedeverzug - die unterschätzte Gefahr. *Biologie in unserer Zeit*, *46*(2), 91–91. https://doi.org/10.1002/biuz.201690037

Kircher, E., Girwidz, R., & Häußler, P. (Hrsg.). (2007). *Physikdidaktik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Koss-Thosold, E.-M. (2011). *H2O Wasser - Der phänomenale Stoff*. Wien. Abgerufen von https://www.imst.ac.at/imst-wiki/images/3/33/Studie_Koss-Thosold.pdf

Kubli, H. (1967). Die Kunsteisbahnen. In H. Baur, W. Flechtenmacher, W. Häussler, E. Kolb, H. Kubli, H. Laakso, … P. Weuthen (Hrsg.), *Die Anwendung der Kälte in der Verfahrens- und Klimatechnik, Biologie und Medizin* (S. XVI, 533). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-11478-0

Kuchling, H. (2011). *Taschenbuch der Physik* (20.Auflage). Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.

Lenzenweger, R. (o. J.). *3.4 Hypsometer*. Abgerufen von https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Institute/IEP/Docs/Museum/Hypsometer.pdf

Lerch, R. (2016). *Elektrische Messtechnik* (7. Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-46941-5

Li, B., Wang, F., Zhou, D., Peng, Y., Ni, R., & Han, Y. (2016). Modes of surface premelting in colloidal crystals composed of attractive particles. *Nature*, *531*. https://doi.org/10.1038/nature16987

LIKE-ICE! (2017). Abgerufen 27. Mai 2017, von http://www.like-ice.com/index.php?option=com_content&view=article&id=73&Itemid=438&lang=de

Mathelitsch, L., & Thaller, S. (2008). *Sport und Physik*. Köln: Aulis Verlag.

Mathelitsch, L., & Thaller, S. (2015). *Physik des Sports*. Wiley. Abgerufen von https://books.google.at/books?id=EjZ0CgAAQBAJ

Murata, K., Asakawa, H., Nagashima, K., Furukawa, Y., & Sazaki, G. (2015). In situ Determination of Surface Tension-to-Shear Viscosity Ratio for Quasiliquid Layers on Ice Crystal Surfaces. *Physical Review Letters*, *115*(25), 1–5. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.256103

Murata, K., Asakawa, H., Nagashima, K., Furukawa, Y., & Sazaki, G. (2016). Thermodynamic origin of surface melting on ice crystals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *113*(44), E6741–E6748. https://doi.org/10.1073/pnas.1608888113

Nachbauer, W., Kaps, P., Hasler, M., & Mössner, M. (2016). Friction Between Ski and Snow. In *The Engineering Approach to Winter Sports* (S. 17–32). New York, NY: Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3020-3_2

Nietzsche, F. (1887). Vorspiel 13. In *Die fröhliche Wissenschaft* (2., ergänzte Ausgabe). Leipzig: Verlag von E. W. Fritzsch. Abgerufen von http://www.friedrichnietzsche.de/.bin/showpic.php?picnr=128

Nyberg, H., Alfredson, S., Hogmark, S., & Jacobson, S. (2013). The asymmetrical friction mechanism that puts the curl in the curling stone. *Wear*, *301*(1), 583–589. https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.051

Nyberg, H., Hogmark, S., & Jacobson, S. (2013). Calculated Trajectories of Curling Stones Sliding Under Asymmetrical Friction: Validation of Published Models. *Tribology Letters*, *50*(3), 379–385. https://doi.org/10.1007/s11249-013-0135-9

orf.at. (2007). Überdruck in Wasserkessel löste Explosion aus - oesterreich.ORF.at. Abgerufen 6. April 2017, von http://stmv1.orf.at/stories/213947

Pottlacher, G. (2001). *Physik für Bauingenieure*. Graz.

Rosenberg, R. (2005). Why Is Ice Slippery ? *Physics Today*, *58*(12), 50–55. https://doi.org/10.1063/1.2169444

Roth, S., & Stahl, A. (2016). *Mechanik und Wärmelehre*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-45304-9

Sánchez, M. A., Kling, T., Ishiyama, T., van Zadel, M.-J., Bisson, P. J., Mezger, M., … Backus, E. H. G. (2017). Experimental and theoretical evidence for bilayer-by-bilayer surface melting of crystalline ice. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *114*(2), 227–232. https://doi.org/10.1073/pnas.1612893114

Sandlin, D. (2014). COLD HARD SCIENCE. The Controversial Physics of Curling - Smarter Every Day 111 - YouTube. Abgerufen 25. Mai 2017, von https://www.youtube.com/watch?v=7CUojMQgDpM

Sazaki, G., Zepeda, S., Nakatsubo, S., Yokomine, M., & Furukawa, Y. (2012). Quasi-liquid layers on ice crystal surfaces are made up of two different phases. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(4), 1052–1055. https://doi.org/10.1073/pnas.1116685109

Sazaki, G., Zepeda, S., Nakatsubo, S., Yokoyama, E., & Furukawa, Y. (2010). Elementary steps at the surface of ice crystals visualized by advanced optical microscopy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *107*(46), 19702–7. https://doi.org/10.1073/pnas.1008866107

Schlagowski, S. (2002). *Die Benetzungsdynamik dünner flüssiger Filme aus einfachen und komplexen Flüssigkeiten*. Universität Ulm. Abgerufen von https://oparu.uni-ulm.de/xmlui/bitstream/handle/123456789/101/vts_1621.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Schlittschuh. (2017). Abgerufen 25. Mai 2017, von https://de.wikipedia.org/wiki/Schlittschuh

Sexl, R., & Wessenberg-Raab, B. (2007). *Physik 6* (1. Auflage). Wien: öbv&hpt.

Shegelski, M. R. A., Jensen, E. T., & Reid, M. (2015). Comment on the asymmetrical friction mechanism that puts the curl in the curling stone. *Wear*, *336–337*, 69–71. https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.04.015

Skate Revolution. (2015). Abgerufen 27. Mai 2017, von http://skate-revolution.com/

Ski. (2017). Abgerufen 9. Juni 2017, von https://de.wikipedia.org/wiki/Ski

Stuart, H. A. (2006). *Kurzes Lehrbuch der Physik* (18.Auflage). Springer Berlin Heidelberg New York.

Synthetisches Eis. (2015). Abgerufen 27. Mai 2017, von https://de.wikipedia.org/wiki/Synthetisches_Eis

Tipler, P. A., & Mosca, G. (2015). *Physik: für Wissenschaftler und Ingenieure*. (J. Wagner, Hrsg.), *Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg* (7. Auflage). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-54166-7

Wilhelm, T., & Hopf, M. (2015). Moment mal ... (17): Warum können wir Schlittschuhlaufen? *Praxis der Naturwissenschaften*, *64*(5), 48–49.

Zastrow, M. (2016). Journal Club: Why does water form on icy surfaces? New model solves century-old mystery. Abgerufen 7. März 2017, von http://blog.pnas.org/2016/12/journal-club-why-does-water-form-on-icy-surfaces-new-model-solves-century-old-mystery/

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Dichte von Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur („Dichteanomalie“, 2017) .. 2

Abbildung 2: Experimentelles Phasendiagramm von Wasser mit Tripelpunkt P_T und kritischem Punkt P_k (Atkins & de Paula, 2006, S. 121, Abbildung erweitert um Tripelpunkt und kritischen Punkt) 5

Abbildung 3: Luftdruck in Abhängigkeit von der Höhe, berechnet durch die barometrische Höhenformel für den Fall einer isothermen Atmosphäre (eigene Abbildung)..... 7

Abbildung 4: Mollierdiagramm für feuchte Luft (Pottlacher, 2001, S. Wärme 23) 10

Abbildung 5: Versuchsaufbau zum Prinzip der Regelation, links mit einem Nylonfaden (Durchmesser 0,5 mm), rechts mit einem Metalldraht (Durchmesser 1 mm) und einer jeweiligen Belastung von 2,5 kg (eigene Abbildung) 13

Abbildung 6: Erneuter Versuchsaufbau zur Regelation in einem Gefrierschrank bei einer Temperatur von -24 °C mit einem Metalldraht (Durchmesser 0,6 mm) und einer Belastung von 10 kg (eigene Abbildung) 14

Abbildung 7: Übergänge zwischen Eis, Wasserdampf und QLLs in Abhängigkeit vom Dampfdruck (eigene Abbildung, angelehnt an Murata u. a., 2016, S. E6747) 18

Abbildung 8: Fluktuationen und Formen der QLLs bei T = -0,1 °C und p = 603 Pa. Maßstabbalken: 20 μm (A) Der dunkle Pfeil zeigt auf die unbedeckte Eisfläche, auf welcher keine Fluktuationen beobachtet werden konnten. Die hellen Pfeilspitzen zeigen auf elementare Stufen im Eis. (B) Betrachtung des Ausschnittes in (A). Tropfenbildung aus einer dünnen QLL-Schicht durch thermische Fluktuationen. Die Pfeile zeigen die Bildung der neuen Tropfen an. (Murata u. a., 2016, S. E6745) 19

Abbildung 9: Oberflächenerscheinungen beim Übergang vom Sättigungsdampfdruck zu Übersättigung (Zeitraum 113 s). Bildschirmaufnahmen von "Movie S1. Morphological evolution of hole nucleation and growth.“ (Murata u. a., 2016)..... 20

Abbildung 10: Draufsicht und Seitenansicht der Grundfläche von hexagonalem Eis. Die Kreise stellen Sauerstoffatome (schwarz = oberste Schicht, grau = zweitoberste Schicht) und die Verbindungslinien Wasserstoffbrückenbindungen dar. Das gestrichelte Hexagon soll die Symmetrie des Eises verdeutlichen. Die in der Seitenansicht dargestellten beiden Schichten entsprechen einer Doppelschicht des Eises. (eigene Abbildung, in Anlehnung an Sánchez u. a., 2017)..... 21

Abbildung 11: Eishockey bei Nebel („Eisbären im Nebel“, 2013, Foto: Ernst Mayer)..... 25

Abbildung 12: Relevante Kräfte für die geometrische Interpretation der Reibungszahl (eigene Abbildung) 26

Abbildung 13: Beschleunigen beim Eislaufen durch Abstoßen eines Schlittschuhs (eigene Abbildung) 36
Abbildung 14: Kufenschliffe im Vergleich. Von links nach rechts: Planschliff, leichter, mittlerer und starker Hohlschliff mit eingezeichnetem Hohlschliffradius r (nicht maßstabsgetreu, eigene Abbildung) 38
Abbildung 15: Resultierende Bewegungen eines umgestülpten Glases auf einem Tisch und eines Curlingsteins auf Eis bei einer Linksrotation (eigene Abbildung) 39
Abbildung 16: Explodierte und neue Gusseisenhohlkugel an der TU Graz (eigene Abbildung) 44
Abbildung 17: Explodierte und neue Getränkedose an der TU Graz (eigene Abbildung) 45
Abbildung 18: Kryophor an der TU Graz (eigene Abbildung) 46
Abbildung 19: Versuchsmaterial und -durchführung für die Nebensonne aus dem Marmeladenglas (eigene Abbildung) 51
Abbildung 20: Halo bei Mondlicht. Aufgenommen am 7. März 2017 in Graz, Straßgang. Der Mond wurde bewusst verdeckt, um den Halo-Ring deutlicher zu sehen. (eigene Abbildung, nachträgliche Bearbeitung zur verbesserten Sichtbarkeit) 52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften der Stoffe in den verschiedenen Aggregatszuständen (Kuchling, 2011) ... 4

Tabelle 2: Haftreibungszahlen und resultierende, maximale Winkel für verschiedene Materialkombinationen ... 27

Anhang

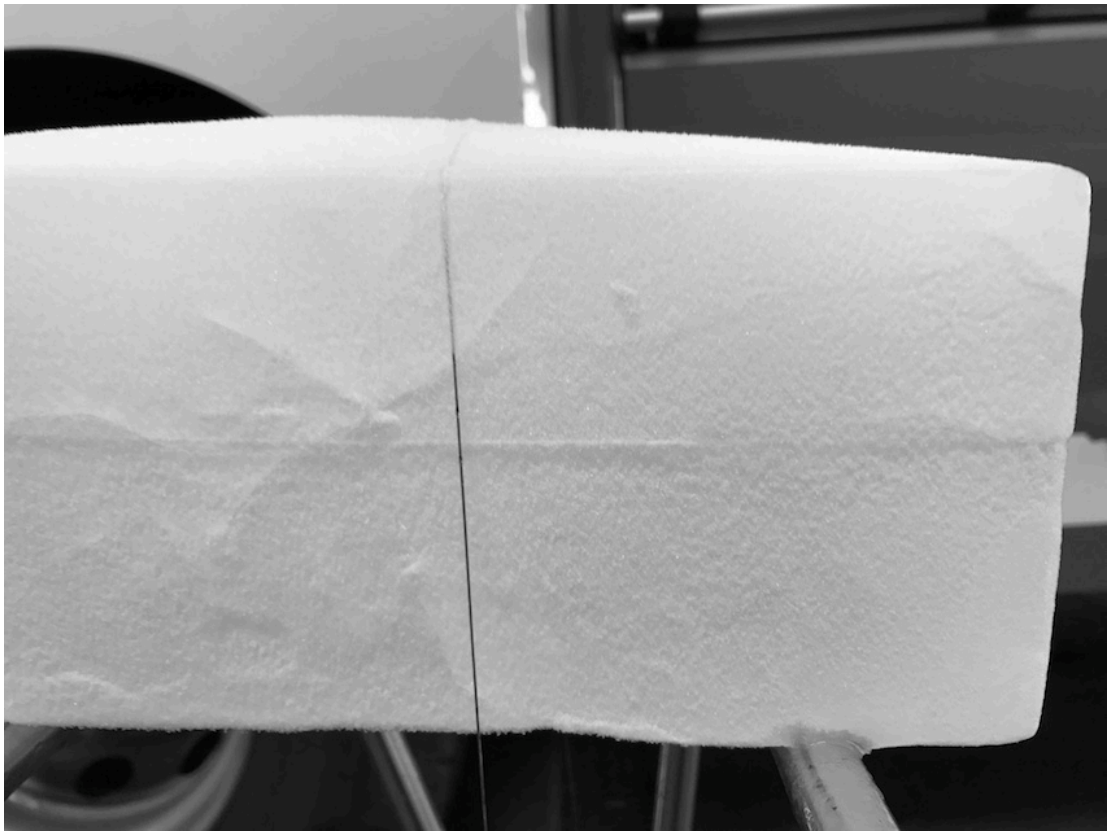
Die nachfolgenden Aufnahmen wurden im Rahmen des in Abschnitt 2.3 besprochenen Versuchs zum Druckschmelzen angefertigt.

Der Metalldraht hatte einen Durchmesser von 0,6 mm und das daran angehängte Gewicht hatte eine Masse von 10 kg. Alle Komponenten des Versuchs wurden zuvor auf eine Temperatur von etwa -24 °C gekühlt. Zum Zeitpunkt t = 0 min wurde die Anordnung in eine Umgebungstemperatur von rund 22 °C gebracht und verweilte dort bis zum Versuchsende bei t = 240 min unter diesen Bedingungen.

Vor jedem Bild ist die Zeit t nach Versuchsstart in Minuten angegeben. Für eine detaillierte Beschreibung der Beobachtungen siehe Abschnitt 2.3.

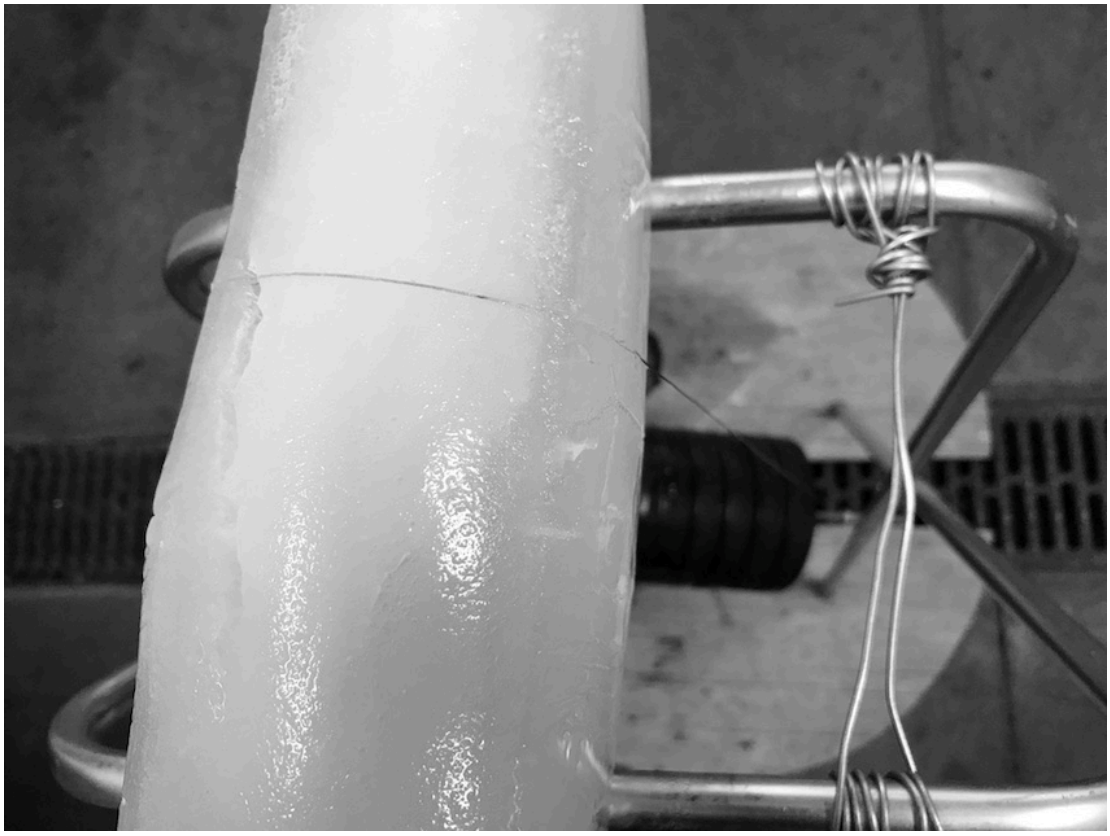
t = 0 min

t = 15 min

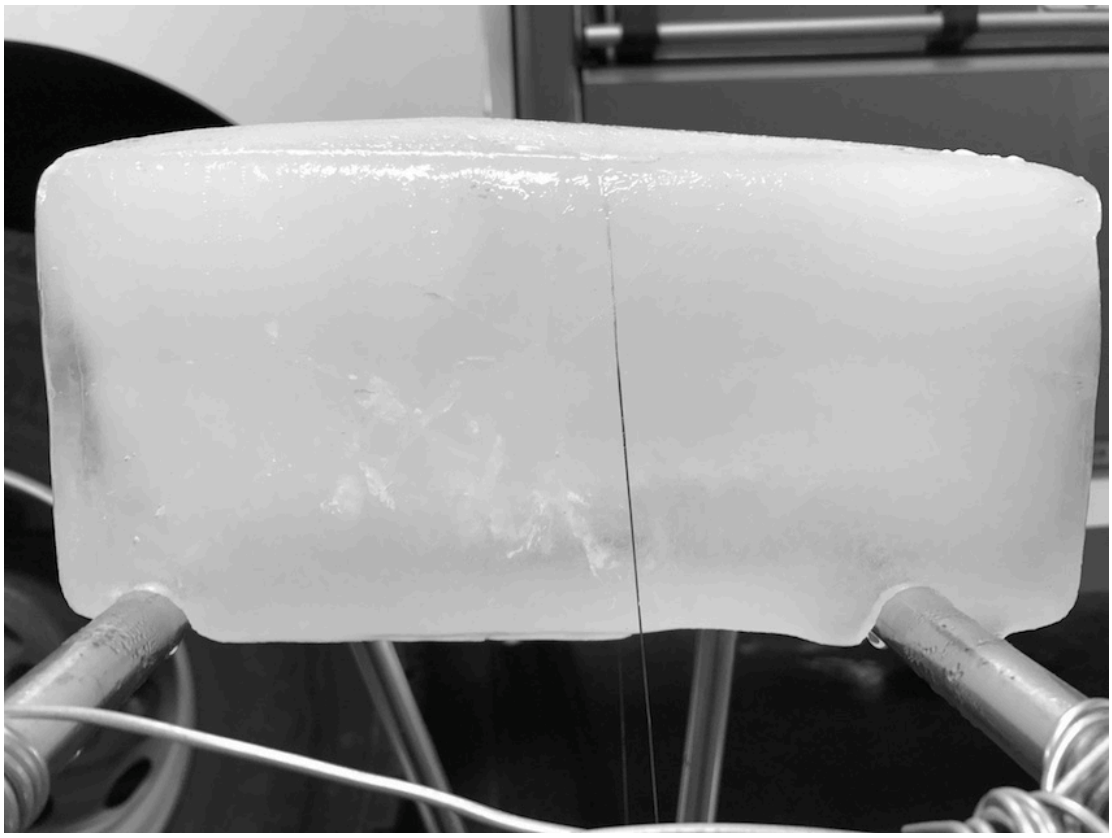


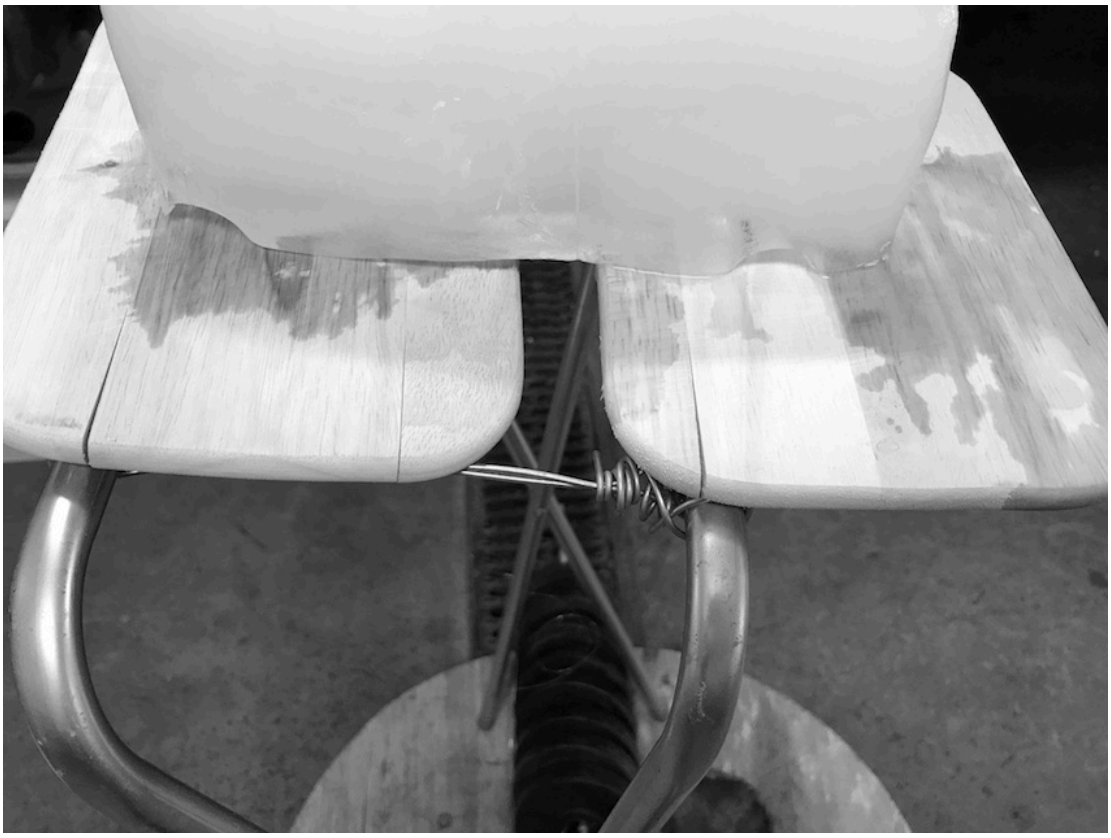
t = 25 min

t = 50 min



t = 90 min



t = 110 min

t = 240 min