

THz on Ice – Terahertzmessung zur Bestimmung der Wasserfilmdicke auf Eis

Jens SCHUSTER¹, Johannes LUTZ¹, Andreas KELLER², Christopher STUMM²

¹ Hochschule Kaiserslautern, Pirmasens

² Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

Kontakt E-Mail: jens.schuster@hs-kl.de; johannes.lutz@hs-kl.de
andreas.keller@izfp.fraunhofer.de; christopher.stumm@izfp.fraunhofer.de

Kurzfassung. Die geringe Reibung beim Skifahren auf Eis ist auf den durch Reibungswärme erzeugten Wasserfilm zurückzuführen. Noch immer besteht jedoch Unklarheit über die Dicke und die Verteilung dieses Wasserfilms. Da die direkte Beobachtung des Wasserfilms schwierig ist, werden an der Hochschule Kaiserslautern Tribometermessungen einschließlich Temperaturmessungen durchgeführt und am Fraunhofer-Institut IZFP Saarbrücken wird die Kontaktfläche zwischen einem Skibelag und einer Eisoberfläche mit Hilfe des Terahertzverfahrens untersucht. Aufgrund des neuen Anwendungsfeldes des Messverfahrens wurden verschiedene Metallformen gefertigt, welche sehr geringe Eisfilmdicken zulassen. Der sich beim Erwärmen bildende Wasserfilm wird kontinuierlich mit Terahertz im Frequenzbereich von 0,1 – 3 THz vermessen, um infolge einer Änderung der Laufzeit (Δ TOF), Rückschlüsse auf Dicke und Verteilung des Films zu erhalten. Das Verfahren macht sich zu Nutze, dass Eis im Gegensatz zu Wasser für Terahertzwellen durchlässig ist.

Einführung

Jeder Langläufer kennt das Gefühl, dass sein Ski richtig gleitet, oder dies eben nicht tut. Ein schlecht gleitender Ski ist beim Familienausflug oder im Training ein kleines Ärgernis, aber im Wettkampf fatal, weil die Überwindung des höheren Gleitwiderstandes kräftezehrend ist. Ist aber, was wir so landläufig als schlechteres Gleiten bezeichnen, auch messtechnisch erfassbar?

Allgemein wird davon ausgegangen, dass die Reibung durch die unverzügliche Bildung eines dünnen Wasserfilms während des Gleitens des Skis maßgeblich beeinflusst wird [1, 2]. Das Gleiten lokaler Unebenheiten, die eigentliche Kontaktfläche darstellen, auf Schnee oder Eis erzeugt Reibungserwärme [3 - 6]. Aber auch ohne Reibungserwärmung entsteht selbst bei Temperaturen unterhalb der Schmelztemperatur von Wasser durch das sogenannte Vorschmelzen ein Wasserfilm auf der Eisoberfläche [1, 7, 8]. Dieses Vorschmelzen beruht auf der Ablösung nur schwach angebundener Wassermoleküle von der Eisoberfläche. Die Bildung des Vorschmelzfilms ist der Grund, warum es kein echtes Trockengleiten auf Schnee oder Eis geben kann [9]. Die Dicke dieses Films wurde auf 1,5 - 2,0 nm bei Temperaturen von -8 bis -4 °C geschätzt [10]. Bei einem Reibungskoeffizienten von etwa 0,05 bei -10 °C zwischen Polyethylen und Eis wird davon ausgegangen, dass die kombinierte Wirkung von



Vorschmelzen und Reibungserwärmung zu Wasserfilmdicken im Bereich von einigen Nanometern bis zu einigen Mikrometern führt [4, 5, 11 - 14]. Aufgrund der Dynamik des Gleitprozesses befindet sich ein gebildeter Wasserfilm nicht im thermodynamischen Gleichgewicht und besteht daher aus einer zeitabhängigen Mischung aus Wasser, vorgeschmolzenem Eis und Eis. Es wurde festgestellt, dass diese Mischung eine um bis zu zwei Größenordnungen höhere Viskosität aufweist als reines Wasser [15].

Traditionell werden Wachse auf Skibeläge aufgetragen, um die Reibung zu verringern [16 - 18]. Ihre reibungsmindernde Wirkung resultiert aus ihrer Hydrophobie, welche die Oberflächenenergie verringert und den Kontaktwinkel zu Wasser vergrößert [17, 19 - 21], aus der Verringerung der Viskosität der Mischphase des Wasserfilms [11] und aus der Beeinflussung der Oberflächentopographie [22]. Wachse, die per- und polyfluorierte Alkylverbindungen enthalten, haben sich bei der Erzeugung der Hydrophobie als wirksamer erwiesen als andere Wachse [17].

Am Institut für Kunststofftechnik Westpfalz der Hochschule Kaiserslautern wurde in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Skiverband (DSV) ein neuartiges Eistribometer entwickelt, das, im Gegensatz zu üblichen Eistribometern, bei denen eine Probe gegen eine rotierende Eisscheibe gemessen wird (Plattenspielerverfahren) [4], mit einem umlaufenden Sohlenband, wie in Abbildung 1 dargestellt, arbeitet (Prinzip Bandschleifer) [23]. Für dieses Eistribometer muss noch eine Messvorrichtung entwickelt werden, mit Hilfe derer die Bestimmung der Wasserfilmdicke bei Gleitgeschwindigkeiten bis zu 15 m/s möglich ist.

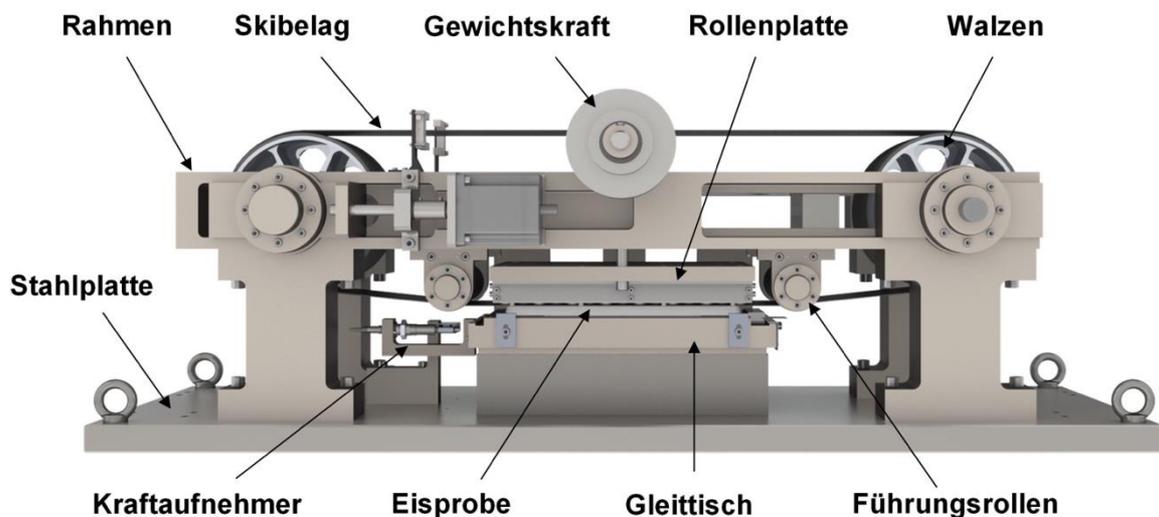


Abbildung 1: Neuartiges Eistribometer an der Hochschule Kaiserslautern

1. Stand der Technik zur Messung der Wasserfilmdicke

Die ersten Untersuchungen zur Existenz eines Wasserfilms wurden von Bowden und Hughes 1939 angestellt. Sie zeigten experimentell mit einem Eistribometer, aufgestellt in einer Eishöhle auf 3.346 m Höhe auf dem Jungfrauenjoch, dass ein Wasserfilm zwischen der Skisohle und Schnee überwiegend durch Reibung und weniger durch Druckschmelzen erzeugt wird. Durch die Messung der Änderung der elektrischen Leitfähigkeit zwischen einer Eisprobe schätzten sie die Wasserfilmdicke zu 70 μm ab [2].

Ambach und Mayr entwickelten mehr als 40 Jahre später eine vielfach zitierte Messvorrichtung zur Bestimmung der Wasserfilmdicke, bei der der große Unterschied in den

relativen Dielektrizitätskonstanten zwischen Wasser bei 0°C ($\epsilon_r = 88$) und Eis ($\epsilon_r = 16$) für Frequenzen oberhalb von 50 kHz ausgenutzt wurde. Ein speziell entwickelter Prüfkopf wurde an Testskiern befestigt, mit denen eine definierte Abfahrtsstrecke gefahren wurde. In Abhängigkeit von Schnee- und Lufttemperatur wurden Wasserfilmdicken von 5 bis 8 μm gemessen. Die maximal messbare Wasserfilmdicke betrug 300 μm [24].

Zwischen 1988 und 1994 entwickelte Colbeck die mathematische Beschreibung der Reibung auf Schnee in einer quantitativen Weise und hob die Bedeutung der Erforschung der durch den Wasserfilm verursachten Reibungsbildung hervor [25]. Es wurden Reibungsexperimente mit einer Gleitoberfläche auf Schnee durchgeführt, die drei Reibungsmechanismen und deren Einfluss auf die Wasserfilmdicke aufzeigten. Colbeck bestimmte theoretisch die Wasserfilmdicke für einen minimalen Reibkoeffizienten zu 8 μm .

Dosch et.al. untersuchte 1995 grundsätzlich das Aufschmelzen von Eis durch Streuexperimente in einer speziellen Röntgenkammer mit Synchrotronstrahlung. Sie bestimmten die Dicke der Quasiflüssigkeit, bei der ein maßgebliches Aufschmelzen beginnt, zu 150 Å (= 15 nm) [7].

Mit Hilfe einer fluoreszenzspektroskopischen Methode bestimmten Strausky et.al. die Dicke des Grenzflächenflüssigkeitsfilms von Eis zu einer PMMA-Probe auf einem Eistribometer zu unter 50 nm für sehr geringe Gleitgeschwindigkeiten [26].

Alle bisherigen Messmethoden sind für den Einsatz im neuartigen Eistribometer unzulänglich. Die Verfahren von Bowden und Hughes, bzw. von Ambach und Mayr sind zu ungenau. Eine spezielle Röntgenkammer ist mit dem vorliegenden Messaufbau nicht kompatibel. Die fluoreszenzspektroskopische Methode von Strausky erfordert transparente Polymerproben. Skibeläge werden, nicht zuletzt aufgrund von Wettkampfvorschriften, aus opakem UHMWPE hergestellt. Als Alternative bietet sich die die Terahertzspektroskopie an, weil Eis im Gegensatz zu Wasser für Terahertzwellen durchlässig ist.

2. Ausgewählte Messmethode: Terahertz-Spektroskopie

2.1 Grundlagen der THz-Spektroskopie

Im elektromagnetischen Spektrum liegt am Grenzbereich zwischen Infrarot- und Mikrowellenstrahlung der Terahertz (THz)-Bereich. Die Grenzen variieren von Quelle zu Quelle, im Allgemeinen lässt sich aber ein Bereich von ca. 0,1-10 THz definieren, mit Wellenlängen von 30 μm bis zu 3 mm. THz-Wellen sind in der Lage, viele unpolare Materialien zu durchdringen und erlauben dadurch die Spektroskopie interner Strukturen. Zudem sind THz-Wellen aufgrund ihrer geringen Energie nichtionisierend und somit sowohl ungefährlich für Menschen als auch zerstörungsfrei für Materialien [27].

Ausschlaggebend für die Materialcharakterisierung mittels THz-Wellen ist die relative dielektrische Permittivität ϵ_r eines Stoffes. So wirken elektrisch leitfähige Materialien wie Metalle und kohlefaserverstärkte Kunststoffe als Reflektoren in diesem Frequenzbereich [28], während Polymere semitransparent sind (ϵ_r ca.- 2 - 4) [29]. Flüssiges Wasser ist im THz-Frequenzbereich aufgrund seiner Polarität ein starker Absorber, da die Bindungen der Wassermoleküle in ähnlichen Frequenzen schwingen und somit die auftreffende Energie absorbieren. Gefriert das Wasser zu Eis, so nimmt ϵ_r Werte von etwa 3 an, abhängig von der Frequenz der auftreffenden Welle und der Temperatur des Eises [30].

3. Experimentalteil

3.1 Versuchsaufbau

Zur Erzeugung von Eisschichten reproduzierbarer Dicke wurden drei Metallzylinder konstruiert. Zylinder 1, im weiteren „Bodenplatte“ genannt, hat einen Außendurchmesser von 150 mm und eine Höhe von 50 mm und enthält vier Durchgangslöcher, mithilfe derer mit Schrauben eine horizontale Ausrichtung der Bodenplatte gewährleistet werden kann. Eine solche horizontale Ausrichtung ist notwendig zur Erzeugung von Eisschichten mit ebener, homogener Oberfläche. Zylinder 2, der „Aufnahmezylinder“, hat einen Außendurchmesser von 100 mm, eine Höhe von 50 mm und ein Loch mit Durchmesser von 50 mm in der Mitte. Der dritte, kleine Zylinder, der exakt in die Öffnung des Aufnahmezylinders passt, heißt „Stempel“ und hat ebenfalls eine Höhe von 50 mm und einen Durchmesser von 50 mm. Auf der Oberseite des Stempels befindet sich ein Sackloch von 3 mm Tiefe und 30 mm Durchmesser. Es wurden zwei Stempel gefertigt und in das Sackloch eines jeden Stempels eine PVC-Platte mit unterschiedlicher Dicke eingeklebt (vgl. Tabelle 1). Durch die unterschiedlichen Dicken der PVC-Platten ist die reproduzierbare Erzeugung verschiedener Eisschichtdicken möglich. Dabei wird Wasser auf den Stempel gegeben, welches sich in der durch die dünne PVC-Platte erzeugten Vertiefung sammelt und mittels eines Schabers plan zum den Stempel umgebenden Aufnahmezylinder gebracht werden kann. Stempel und Aufnahmezylinder werden dabei zusammen im Gefrierfach auf -18 °C gebracht, die Erzeugung der Eisschicht geschieht in mehreren Schritten.

Tabelle 1: mögliche Eisschichtdicken mit unterschiedlichen Stempeln

Stempel	Resultierende Eisschichtdicke [μm]
S1	50 - 60
S2	90 - 100

Die Messung erfolgt, indem der Reflexionsprüfkopf des THz-Spektrometers senkrecht von oben auf die Eisfläche ausgerichtet wird. Die Messdauer beträgt 20 min, wobei nach 5 min das Eis bereits komplett geschmolzen ist, daher fokussiert sich die Auswertung nur auf diesen Zeitbereich. Gemessen wird mit einem Abstand von 85,3 mm im Fokuspunkt des Prüfkopfes (Abbildung 2).

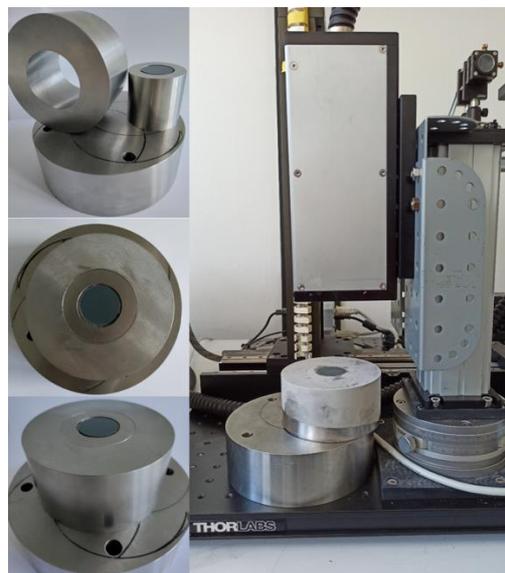


Abbildung 2: links: Stempel, Aufnahmezylinder und Bodenplatte; rechts: Messaufbau mit Reflexionsmesskopf

3.3 Beschreibung der Messtheorie

Zu erwarten ist, dass in den in Reflexion durchgeführten THz-Messungen jede Änderung der Permittivität zu einem Reflexionspeak im Signal führt. Durch die unterschiedlichen Permittivitäten der verschiedenen Materialien ergeben sich zudem variierende Ausbreitungsgeschwindigkeiten der THz-Wellen je Material, was wiederum zu unterschiedlichen Laufzeiten führt. Beispielhafte Permittivitäten sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Unterschiedliche Materialien und ihre Permittivitäten

Material	Relative Permittivität ϵ_r
Luft	1
Eis	2-3
PVC	3-4
Wasser	ca. 80

Aus diesen Grundlagen lassen sich für die durchgeführten Versuche einige Erwartungen ableiten. Das Eis an der Oberfläche des Zylinders taut in drei Phasen ab, wodurch sich jeweils drei unterschiedliche Messeffekte ergeben:

Phase 1): Das Eis ist noch komplett gefroren, es gibt also drei Permittivitätsübergänge, einmal von Luft in Eis, vom Eis in das darunterliegende PVC und vom PVC eine Reflexion am Metall. Somit ergeben sich drei Permittivitätssprünge und es sind drei Reflexionspeaks im Signal zu erwarten.

Phase 2): Beginnend an der Oberfläche, schmilzt die Eisschicht langsam auf. Dabei entstehen erneut drei Permittivitätsübergänge, einmal von Luft zu aufschmelzendem Eis sowie von festem Eis zu PVC und PVC zu Metall. Zwar wandelt sich beim Aufschmelzvorgang Eis zu Wasser um, jedoch ist das aufschmelzende Eis mit Wasser durchsetzt, sodass hier keine eindeutige Unterscheidung gefällt werden kann. Zu erwarten sind demnach je ein Peak für den Übergang Luft – Eis, Eis – PVC sowie PVC - Metall.

Phase 3): Das Eis ist vollständig geschmolzen. Hier kommt es nur noch zu einem Permittivitätssprung am Übergang Luft-Wasser, das restliche Wasser dämpft die eintretenden THz-Wellen jedoch so stark, dass kein Signal aus größerer Tiefe mehr reflektiert werden kann.

4. Auswertung (TOF/Rückwandecho)

Eine Analyse der Messdaten des THz-Spektrometers (Abbildung 3) zeigt, dass bei Stempel 1 und 2 in der ersten Messphase, wie erwartet, drei Peaks zu erkennen sind. Der erste Peak ist dabei jeweils die Reflexion an der Eisschicht, der zweite die Reflexion am PVC und der dritte die Reflexion am Metall. Der dritte Peak (rot) ist am schwächsten, da der größte Teil der Energie der THz-Wellen bereits in Eis und PVC absorbiert bzw. reflektiert wurde. Er liegt für beide Stempel bei einer Laufzeit von ca. 1000 a.E. (arbiträre Einheit), da in beiden Stempeln das Sackloch die gleiche Tiefe und somit das Metall den gleichen Abstand zum Reflexionskopf hat. Der Reflexionspeak an der Eisschicht liegt für Stempel 1 etwa bei 300 a.E., für Stempel 2 bei etwa 400 a.E. Als Ursache hierfür kann die unterschiedliche Eisschichtdicke herangezogen werden. Da bei Stempel 2 die Eisschicht dicker ist, benötigen die Wellen länger für deren Durchdringung, was wiederum den Reflexionspeak zu späteren Zeiten hin verschiebt. So verhält es sich auch mit dem Reflexionspeak am Übergang Eis-PVC, dieser findet sich in der ersten Messphase bei Stempel 2 bei etwa 700 a.E., verglichen mit ca. 650 a.E. bei Stempel 1. Dieser Effekt der zeitlichen Verzögerung der ersten beiden Peaks ist auch in Messphase zwei und drei gleich, wenn die Eisschicht aufschmilzt.

In Messphase 2 geht der Reflexionspeak am Metall für beide Stempel auf 0 zurück, auch die Amplitude des PVC-Reflexionspeaks sinkt, beides geschieht als Reaktion auf das Aufschmelzen des Eises. Durch das beim Aufschmelzen entstandene Wasser kommt es zur Dämpfung der das Wasser durchdringenden THz-Wellen, weshalb der zweite Permittivitätssprung im Signal in dieser Phase schwächer ist als in Phase 1 und der Reflexionspeak am Metall aufgrund der zu hohen Dämpfung gar nicht mehr sichtbar ist. In Messphase 3 ist schließlich das gesamte Wasser aufgeschmolzen; aufgrund der hohen Dämpfung kann in dieser Phase auch von der PVC-Platte kein Signal mehr reflektiert werden.

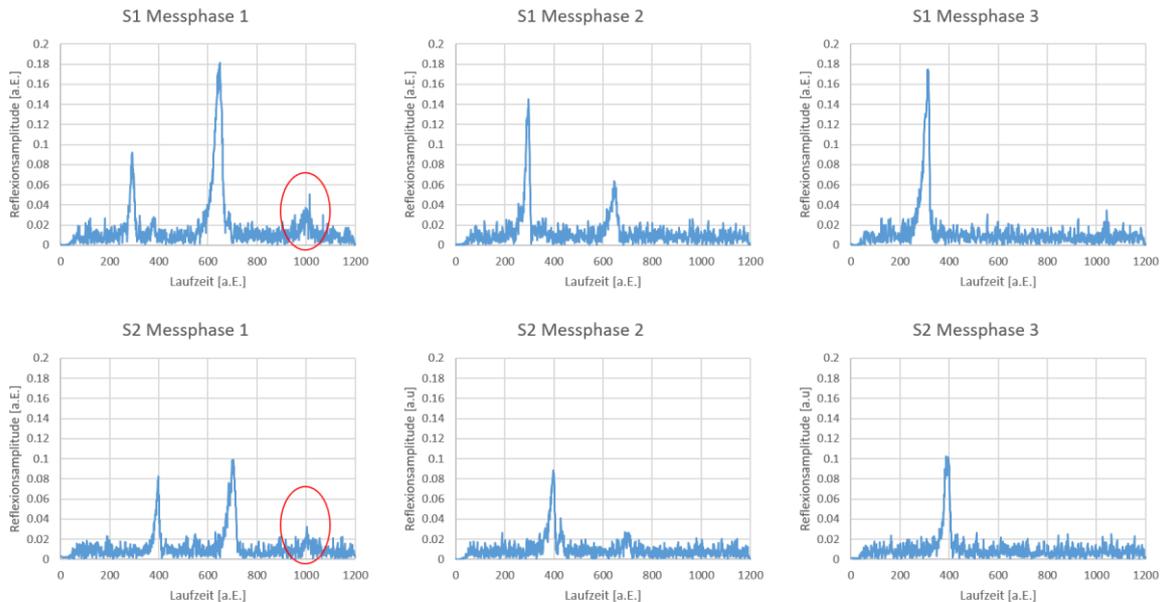


Abbildung 3: Messsignal (Amplitude) über Zeit (TOF) von Stempel 1 und 2 in unterschiedlichen Messphasen

Bei Betrachtung des zeitlichen Verlaufes der Amplituden der jeweiligen Reflexionspeaks am Übergang von Luft zu Eis bzw. Wasser und von Eis bzw. Wasser zur PVC-Platte ist erkennbar (s. Abbildung 4), dass bei beiden Stempeln der zeitliche Verlauf der Amplitude des Reflexionspeaks von Luft zu Eis ansteigt, durch den Phasenübergang von Eis zu Wasser jedoch verschiedenen Schwankungen unterliegt. Der Verlauf der Amplitude des Reflexionspeaks von Eis zur PVC-Platte hingegen fällt nahezu linear ab. Mit geeigneter mathematischer Betrachtung kann eben dieser Amplitudenverlauf des Reflexionspeaks am Übergang von Eis bzw. Wasser zur PVC-Platte für die Bestimmung der Eisschichtdicke herangezogen werden. Zur genauen Quantifizierung der Wasserfilmdicke müssen hierzu in der Folge weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

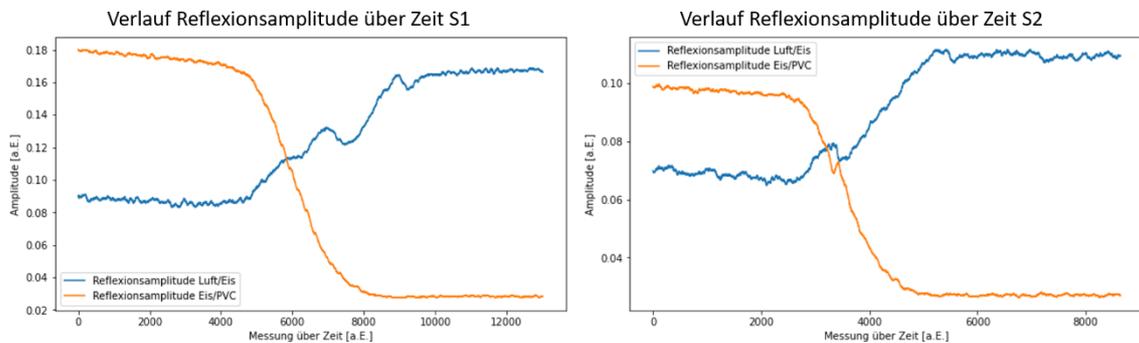


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf der Amplituden während des Schmelzvorganges am Übergang Luft zu Eis/Wasser (blau) und Eis/Wasser zu PVC (gelb) für Stempel 1 (links) und Stempel 2 (rechts)

5. Fazit und Ausblick

Mit einer Dicke von ca. 90-100 μm ist die Eisschicht bei S2 etwa doppelt so dick wie bei S1 (nur 50-60 μm). Dies hat eine auch etwa doppelt so hohe Dämpfung und somit eine Halbierung der Amplitude zur Folge, sodass die Amplitude von S2 nur ein Maximum von etwa 0.1 a.E. annimmt, während das Maximum der Amplitude von S1 bei ca. 0.18 a.E. liegt.

Hierdurch konnte gezeigt werden, dass mit der Terahertz-Technologie eine Aussage über die Dicke des Wasserfilm möglich ist. Eine quantifizierte Aussage war im Rahmen dieser selbstfinanzierten Feasibility-Studie nicht möglich, weil der Kalibrierungsaufwand und dessen statistische Absicherung sehr aufwändig sind. Die Weiterverfolgung und -entwicklung dieses Messverfahrens ist im Rahmen eines geförderten Projekts geplant, im Rahmen dessen auch die notwendige Hardware zur Implementierung in das Eistribometer beantragt werden soll.

6. Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesinstitut für Sportwissenschaft (BISp) und dem Deutschen Skiverband (DSV) für die finanzielle und sächliche Unterstützung bei der Erstellung des Eistribometers.

Referenzen

- [1] Faraday M. XXIV. On regelation, and on the conservation of force. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **1859**, *17*, 162–169.
- [2] Bowden F. P.; Hughes T. P. The mechanism of sliding on ice and snow. *Proc. R. Soc. Lond. A* **1939**, *172*, 280–298.
- [3] Bowden F. P. Friction on snow and ice. Proceedings of the Royal Society of London. *Proc. R. Soc. Lond. A* **1953**, *217*, 462–478.
- [4] Baurle, L. Sliding friction of polyethylene on snow and ice, Dissertation ETH Zurich, **2006**.
- [5] Baurle, L.; Szabó, D.; Fauve, M.; Rhyner, H.; Spencer, N. D. Sliding friction of polyethylene on ice: tribometer measurements. *Tribol Lett* **2006**, *24*, 77–84.
- [6] Kuroiwa, D. The Kinetic Friction on Snow and Ice. *J. Glaciol.* **1977**, *19*, 141–152.
- [7] Dosch, H.; Lied, A.; Bilgram, J. H. Glancing-angle X-ray scattering studies of the premelting of ice surfaces. *Surface Science* **1995**, *327*, 145–164.
- [8] Wettlaufer, J. S. Impurity Effects in the Premelting of Ice. *Phys. Rev. Lett.* **1999**, *82*, 2516–2519.
- [9] Kietzig, A.-M.; Hatzikiriakos, S. G.; Englezos, P. Physics of ice friction. *Journal of Applied Physics* **2010**, *107*, 81101.
- [10] Bluhm, H.; Ogletree, D. F.; Fadley, C. S.; Hussain, Z.; Salmeron, M. The premelting of ice studied with photoelectron spectroscopy. *J. Phys.: Condens. Matter* **2002**, *14*, L227-L233.
- [11] Buhl, D.; Fauve, M.; Rhyner, H. The kinetic friction of polyethylene on snow: the influence of the snow temperature and the load. *Cold Regions Science and Technology* **2001**, *33*, 133–140.
- [12] Döppenschmidt, A.; Butt, H.-J. Measuring the Thickness of the Liquid-like Layer on Ice Surfaces with Atomic Force Microscopy. *Langmuir* **2000**, *16*, 6709–6714.
- [13] Makkonen, L.; Tikanmäki, M. Modeling the friction of ice. *Cold Regions Science & Technology* **2014**, *102*, 84–93.
- [14] Ambach, W.; Mayr, B. Ski gliding and water film. *Cold Regions Science and Technology* **1981**, *5*, 59–65.
- [15] Canale, L.; Comtet, J.; Niguès, A.; Cohen, C.; Clanet, C.; Siria, A.; Bocquet, L. Nanorheology of Interfacial Water during Ice Gliding. *Phys. Rev. X* **2019**, *9*.
- [16] Budde, R.; Himes, A. High-resolution friction measurements of cross-country ski bases on snow. *Sports Eng* **2017**, *20*, 299–311.
- [17] Rogowski, I.; Leonard, D.; Gauvrit, J.-Y.; Lanteri, P. Influence of fluorine-based additive content on the physical and physicochemical properties of ski gliding wax. *Cold Regions Science & Technology* **2007**, *49*, 145–150.

- [18] Styring, P.; Routh, A. F.; Parkinson, S. Friction reduction using self-waxing alpine skis. *Sports Eng* **2012**, *15*, 117–127.
- [19] Scherge M. Zur Wirkung von Fluorwachsen: Open Access Series ISSN 2509-9442. *Gliding* **2019**.
- [20] Breitschädel, F.; Haaland, N.; Espallargas, N. A Tribological Study of UHMWPE Ski Base Treated with Nano Ski Wax and its Effects and Benefits on Performance. *Procedia Engineering* **2014**, *72*, 267–272.
- [21] Scherge Matthias, T. L. Are fluorinated ski waxes really the non plus ultra? Open Access Series ISSN 2509-9442. *Article 3(2020) 14-19* **2020**.
- [22] Haaland, N. H. Nano ski wax, effects and benefits, Master's thesis, Norwegian University of Science and Technology, **2013**
- [23] Lutz, J. Design and verification of an advanced ice-tribometer, Dissertation RPTU Kaiserslautern-Landau, eingereicht, **2023**
- [24] Ambach, W.; Mayr, B. Ski gliding and water film. *Cold Regions Science and Technology* **1981**, *5*, 59–65.
- [25] Colbeck, S. C. A Review of the Processes that Control Snow Friction. *COLD REGIONS RESEARCH AND ENGINEERING LAB HANOVER NH* **1992**.
- [26] Strausky, H.; Krenn, J. R.; Leitner, A.; Aussenegg, F. R. Sliding plastics on ice: fluorescence spectroscopic studies on interfacial water layers in the μm thickness regime. *Appl Phys B* **1998**, *66*, 599–602.
- [27] A. Rostami, H. Rasooli, H. Baghban, *Terahertz Technology: Fundamentals and Applications*. Berlin, Germany: Springer Science and Business Media, 2011
- [28] BATOP GmbH, Determination of material parameters for THz measurements, **2018**
- [29] T. Chang, X. Zhang, HL Cui, Accurate determination of dielectric permittivity of polymers from 75 GHz to 1.6 THz using both S-parameters and transmission spectroscopy. *Applied Optics*, Vol. 56, Issue 12, 3287-3292 **2017**
- [30] U.P. Johari, The spectrum of ice, *Contemporary Physics*, 22:6 **1981**