

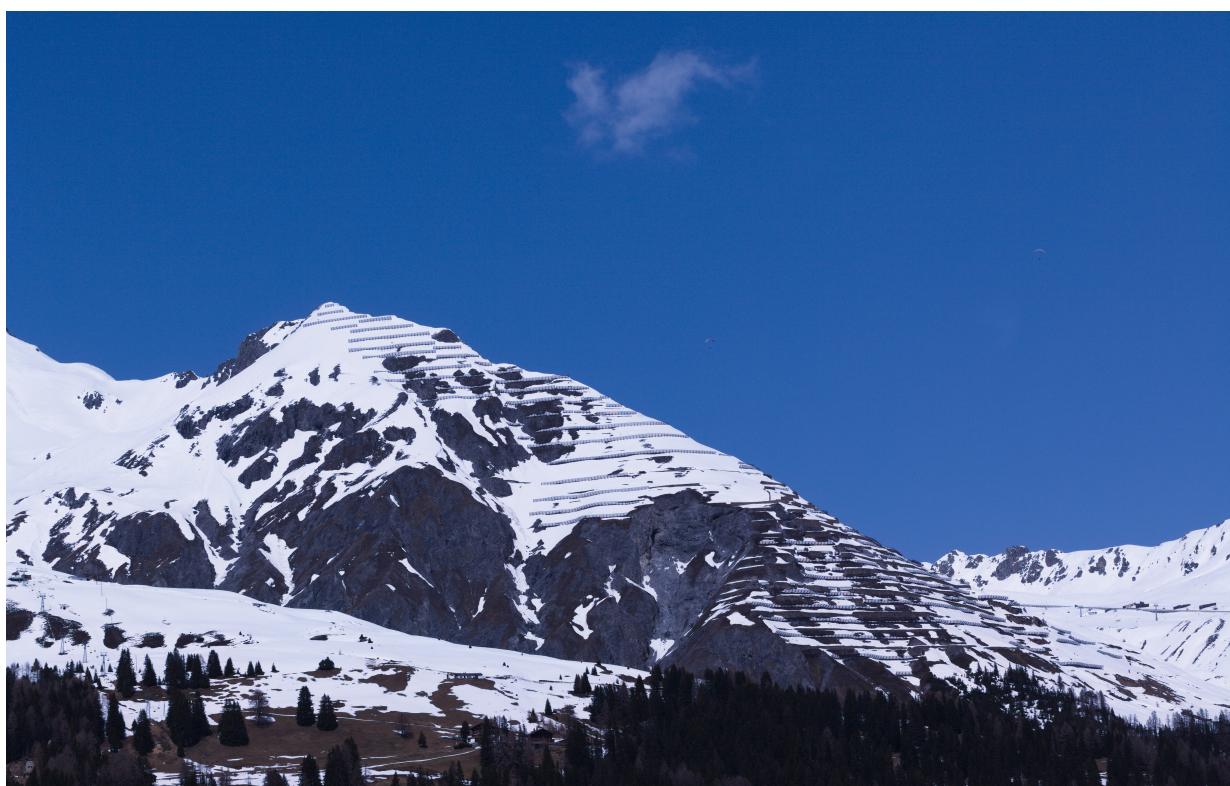
Innovative Sensorentwicklung für den Liquid Water Content von Schnee für die Lawinenvorhersage

Bachelorarbeit
Bachelor für Maschinentechnik | Innovation

Betreuung: Prof. Dr. Albert Loichinger

FS 2024
Abgabedatum: 2024.06.21

Autor: Peter Kuhn



Abstract

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Herausforderung, den Liquid Water Content (LWC) im Schnee präzise zu messen. Der LWC ist ein wesentlicher Parameter, der die physikalischen Eigenschaften von Schnee und damit das Verhalten von Schneedecken maßgeblich beeinflusst. Ein genaues Verständnis und die Messung dieses Parameters sind entscheidend für die Vorhersage von Lawinen, insbesondere von Gleitschneelawinen, die auf rutschigen Untergründen abgleiten. Ziel der Arbeit ist es, eine innovative Methode zur Bestimmung des LWC zu entwickeln, die über die Möglichkeiten derzeitiger kommerzieller Produkte hinausgeht.

Zur Erreichung dieses Ziels wurde ein systematisches Vorgehen gewählt, das eine Vorstudie zur Identifikation der vielversprechendsten Messtechniken einschloss. Sechs unterschiedliche Prinzipien wurden getestet: Phasenübergang ausgelöst durch Vibration, elektrischer Widerstand, Diffusion von Flüssigkeit, Laser Refraktion und Reflexion sowie Water Indicator Tape. Das Water Indicator Tape erwies sich als am geeignetsten und wurde mittels agiler Hardware-Entwicklung zu einem funktionierenden Messsystem weiterentwickelt. Dieser iterative Entwicklungsprozess umfasste fünf Iterationen, in denen der Messablauf kontinuierlich optimiert wurde.

Die Ergebnisse der Messungen mit dem entwickelten System sind vielversprechend. Das Water Indicator Tape ermöglichte nicht nur eine Messung des LWC, sondern lieferte auch Informationen über die geometrischen Eigenschaften des Schnees. Diese erweiterten Messmöglichkeiten eröffnen neue Perspektiven für die Analyse und das Verständnis von Schneemetamorphose, LWC und Lawinengefahr. Insgesamt zeigt die Arbeit, dass das entwickelte Messsystem ein leistungsfähiges Werkzeug zur Bestimmung des LWC darstellt und durch weitere Verbesserungen in zukünftigen Forschungsarbeiten optimiert werden kann.

Liste der Abkürzungen

API	Application Progarm Interface
BA	Bachelorarbeit
CAD	Computer Aided Design
DB	Datenbank
EM	Elektro Magnetisch
FDM	Fused Deposition Modeling
FS	Frühlingssemester
GPS	Global Positioning System
IR	Infrarot
IPEK	Institut für Produktentwicklung
JSON	JavaScript Object Notation
LWC	Liquid Water Content
MHz	Megahertz
ML	Maschinelles Lernen
MRI	Magnetic Resonance Imaging
OST	Ostschweizer Fachhochschule
RGB	Rot Grün Blau
s	Sekunde
SLF	Schweizerisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung
SQL	Structured Query Language
Tape	Water Indicator Tape 5559 hergestellt von 3M
TRL	Technology Readiness Level
UML	United Modeling Language
XPS	extrudiertes Polystyrol

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Aufgabenstellung für die Arbeit	1
2 Theoretischer Hintergrund	3
2.1 Metamorphose von Schnee	3
2.2 Lawinen in der Schweiz	4
2.3 Entstehung der Gleitschneelawine	4
3 Physikalische Prinzipien und kommerzielle Produkte zur Messung des LWC	5
3.1 Physikalische Prinzipien zur Messung des LWC	5
3.2 Kommerzielle Produkte	8
4 Konzeptionelle Planung und Nutzeranforderungen	8
4.1 User Storys	8
5 Vorstudie	10
5.1 Mechanische Anregung durch Vibration	10
5.2 Elektrischer Widerstand	13
5.3 Diffusion von Flüssigkeit	14
5.4 Refraktion und Reflexion eines Lasers	14
5.5 Water Indikator Tape	17
5.6 Reflexion zur Vorstudie	19
5.7 Auswahl des physikalischen Prinzips	20
6 Funktionsmusterentwicklung, Tests und Weiterentwicklung	20
6.1 Agiles Hardware Development	20
6.2 Messablauf	21
6.3 Eigenschaften der Funktionsmuster	22
6.4 Funktionsweise der Bildverarbeitung	24
6.5 Extrahieren von Informationen aus Bilddaten	26
6.6 Ergebnisse der Versuche	30
6.7 Mögliche Gründe der hohen Varianz der zweiten Iteration	35
6.8 Verbesserungsmöglichkeiten des Funktionsmusters	39
6.9 Vollautomatische Durchführung und Weiterentwicklung der Messung	40
7 Fazit	42
7.1 Persönliche Erfahrung	42
7.2 Fazit	42
7.3 Zusammenfassung	43

1 Einleitung

Gleitschneelawinen gefährden Menschenleben und sind bisher schwer vorhersagbar. Durch die Klimaerwärmung werden sie häufiger auftreten. Ein wichtiger Indikator für die Bildung dieser Lawinen ist der Anteil von flüssigem Wasser im Schnee.

Ziel dieser Arbeit ist, einen Sensor zu entwickeln, der den Liquid Water Content (LWC) von Schnee misst, und damit die Lawinenvorhersage verbessert.

Das flüssige Wasser im Schnee ist ein entscheidender Parameter um das Verhalten des Schnees an einem Lawinen gefährdeten Hang vorherzusagen.

Die heute eingesetzten Messgeräte nutzen unterschiedliche Ansätze. Diese Methoden haben unterschiedliche Nachteile, zum Beispiel, dass sie zwei Arbeitsschritte brauchen, um den LWC als das Verhältnis von flüssigem Wasser zum vorhandenen Schnee messen.

In der folgenden Arbeit wird kurz auf die Eigenschaften von Schnee und die Gefährdung durch Lawinen eingegangen. Nach einer Recherche zu den physikalischen Prinzipien zur Messung des LWC werden User Stories für das Produkt entwickelt. Nach dieser Klärung wird die Arbeit in drei weiteren Schritten fortgesetzt.

1. Vorstudie: Unterschiedliche physikalische Prinzipien zur Messung des LWC werden erst theoretisch und dann praktisch miteinander verglichen.
2. Bau der Funktionsmusters: Hier wird ein vielversprechendes physikalisches Prinzip ausgewählt und es werden Funktionsmuster gebaut. Dieser Teil wird mittels Agiler Hardware Entwicklung einem Kanban Board geplant.
3. Dokumentation der Produktentwicklung.

Es wurden verschiedene theoretische Ansätze der Produktentwicklung im Verlauf der Bachelorarbeit eingesetzt.

Um den Sensor herzustellen, wurden entsprechend der agilen Hardware Entwicklung möglichst rasch Iterationen von Sensoren hergestellt, getestet, angepasst und erneut getestet.

1.1 Aufgabenstellung für die Arbeit

Ausgangslage und Aufgabe

In der Lawinenforschung bestehen offene Fragen hinsichtlich der Erfassung der Schneefeuchte in der Schneedecke. Diese ist einer der wesentlichen Einflüsse in der Schneedecke, die zu Gleitschneelawinen führen. Umfassende Untersuchungen am SLF (Fees et al) haben gezeigt, dass Feuchte, die aus dem Boden dem Schnee oder dem Niederschlag eindringen und sich an den Schneekristallen ablagnern, im Bereich von 0.5 bis 10 % Wassergehalt im Schnee einen erheblichen Einfluss auf

die mechanische Stabilität sowie das Kriechverhalten der Schneedecke besitzen. Bestehende Messverfahren sind das sog. Denothmeter, das als Gerät vom SLF und der Fa. FPGS Tann SG entwickelt sind. Hier wird komplex eine elektrische Kenngrösse (dielektrische Konstante) erfasst, die jedoch ebenso stark von der Dichte des Schnees abhängig ist.

Zielsetzung / Anforderungen

Die Aufgabe dieser Arbeit ist es, ein Konzept zu entwickeln, mit dem die Schneefeuchte im Gelände als Sensor und als Laborgerät unabhängig von anderen Grössen wie der Dichte, Temperatur etc gemessen oder charakterisiert wird. Als wesentliche Hürde ist die Qualifikation und Kalibrierung der Messung anzusehen. Hier sind gegebenenfalls mehrere hoch priorisierte Verfahren nebeneinander zu erstellen und zu beurteilen, wie weit diese sich evtl auch in Kombination eignen, um eine Aussage über den Wassergehalt am Schneekristall zu treffen.

2 Theoretischer Hintergrund

2.1 Metamorphose von Schnee

Neuschnee verändert sich durch eine Schneemetamorphose. Bei der Metamorphose sublimiert Eis zu Wasserdampf und lagert sich an einer anderen Stelle wieder an. Die Geschwindigkeit dieser Umwandlung variiert je nach Umgebungsbedingungen stark. Die Temperatur im Schnee bleibt dabei relativ konstant bei 0 Grad Celsius.

Während der Metamorphose, zu sehen in 1 verändern sich die Eigenschaften des Schnees. Ein zentrales Prinzip dabei ist die Reduzierung der Oberfläche, was bedeutet, dass kleine Eiskristalle zu grösseren, konkaven Formen verschmelzen. Dieser Prozess ist ein Beispiel für Energieoptimierung, da das System bestrebt ist, einen energetisch günstigeren Zustand zu erreichen.

Bei der Schmelzmetamorphose bildet sich Schmelzwasser im Porenraum des Schnees. Die Umwandlung zu runden Strukturen schreitet dabei besonders schnell voran. [42]

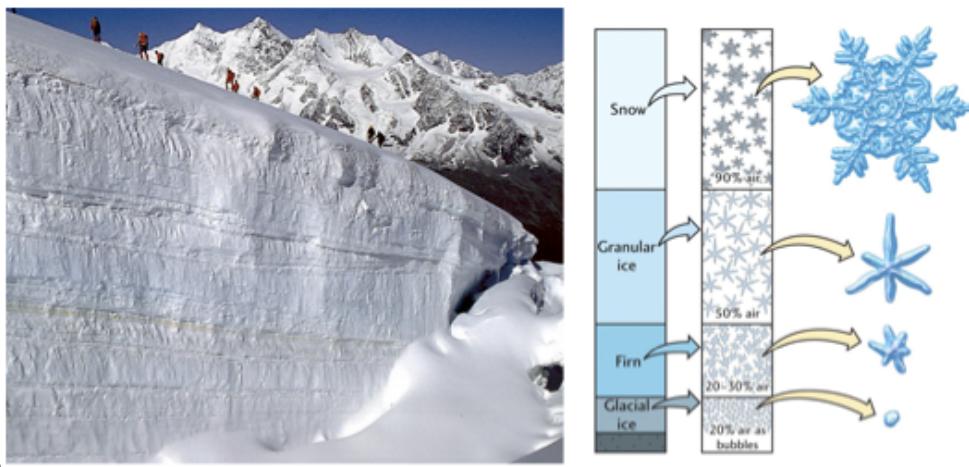


Abbildung 1: Darstellung der Schneemetamorphose, Bild aus [29]

2.2 Lawinen in der Schweiz

Jedes Jahr sterben in der Schweiz ca. 24 Menschen durch Lawinen, wobei ca. 19 der Todesfälle durch Schneebrettlawinen, und durch ca. 5 Gleitschneelawinen verursacht werden. Mit dem Klimawandel ändern sich Häufigkeit und Eigenschaften von Lawinen. Im Gegensatz zur Schneebrettlawine können Gleitschneelawinen bisher kaum frühzeitig erkannt und auch nicht präventiv durch Detonation ausgelöst werden. [34]

Der in dieser Arbeit entwickelte Sensor zur Messung des LWC, soll zum besseren Verständnis von Gleitschneelawinen beitragen.

2.3 Entstehung der Gleitschneelawine

Gleitschneelawinen entstehen, wenn die gesamte Schneedecke auf einem glatten Untergrund wie einem Grashang oder glatten Felsen abrutscht. Typisch für Gleitschneelawinen ist eine dicke, homogene Schneedecke. Diese Lawinenart wird fast ausschliesslich natürlich ausgelöst und kündigt sich oft nur durch Gleitschneerisse, sogenannte "Fischmäuler" an. Der Auslösemechanismus beruht auf dem Verlust der Reibung zwischen Schnee und Boden. [37]

Die Entstehung von Gleitlawinen ist stark von der Feuchtigkeit im Schnee abhängig. Diese Feuchtigkeit sammelt sich zwischen den Eiskristallen und stammt aus verschiedenen Quellen:

- Schmelzender Schnee, hauptsächlich durch primäre und sekundäre EM-Strahlung.
- Regen, der auf die Schneedecke fällt.
- Feuchtigkeit aus dem Untergrund, insbesondere aus wasserführenden Schichten.

3 Physikalische Prinzipien und kommerzielle Produkte zur Messung des LWC

Der Liquid Water Content (LWC) ist ein entscheidender Parameter in der Meteorologie und Glaziologie, der den Gehalt an flüssigem Wasser in Schnee beschreibt. Der LWC beeinflusst die physikalischen Eigenschaften des Schnees, wie seine Dichte, Wärmeleitfähigkeit und mechanische Stabilität. Der LWC wird als Verhältnis des Volumens oder Gewichts von flüssigem Wasser zum Gesamtvolume oder Gewicht der Eiskristalle ausgedrückt.

Seit 40 Jahren werden Techniken erforscht um den LWC zu messen. Es gibt unterschiedliche Methoden das heterogene Gemisch aus festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen, diesen Schaum aus Eis, Wasser und Luft zu messen.

3.1 Physikalische Prinzipien zur Messung des LWC

Bei der Recherche nach physikalischen Prinzipien zur Messung des LWC wurden unterschiedliche, derzeitige Techniken gefunden. Hier ist eine Liste:

Absorption elektromagnetischer Wellen

- GPS [33], [32]
- Radar [26], [1]
- IR [27]
- Satellitenaufnahmen [44]

Dielektrische Konstante

- bei 20 MHz über eine Platte [2]
- zwischen einer Gabel [3]
- Resonanz in einem Zylinder [4], [5]
- Sonstige Anordnungen aus der Agrikultur [36], [39]

Akustische Wellen

- Absorption normaler Schall [31]

Elektrische Eigenschaften

- ohmscher Widerstand [22]

Mechanische Eigenschaften

- Scherkräfte [30], [6]
- Dichte [7]

Thermische Eigenschaften

- Schmelzenergie mit DSC [8]
- mit heißem Wasser [28]
- mit kalter Flüssigkeit

Kapillarkräfte

- Oberflächenspannung [24]

Sonstiges

- optische Beurteilung [41]
- Luftfeuchtigkeit verändern [9], [10]
- Luftwiderstand
- MRI [23], [38], [45]
- Raman-Spektroskopie [40]
- Neutronen-Scattering [35]

Im Folgenden sind potenzielle Techniken aufgeführt, die zur Messung des LWC im Schnee verwendet werden könnten, aber zu denen keine spezifischen Veröffentlichungen gefunden wurden.

Absorption elektromagnetischer Wellen

- Mikrowellen

Akustische Wellen

- Absorption Ultraschall
- Lamb-Welle [11]
- Emission akustischer Wellen

Mechanische Eigenschaften

- Eigenschwingungen
- Vibrationsübertragung
- Eindrückwiderstand mit Vibration
- Viskosität
- Vibrationsbohrer

Optische Eigenschaften

- Reflexion
- Refraktion
- Polarimetrie

Thermische Eigenschaften

- mit kalter Flüssigkeit
- Heizung (elektrisch, Mikrowelle)
- Taupunktspiegel
- Leitfähigkeit von Wärme

Separation

- Zentrifuge
- Quetschen
- Absaugen

Kapillarkräfte

- Water Indicator Tape
- Staub/Flüssigkeit beim Ausbreiten im Schnee beobachten (optisch, fluoreszent, elektrisch, Event-Kamera) [12]
- Oberflächenspannung [24]

Sonstiges

- optische Beurteilung [41]
- Luftfeuchtigkeit verändern [9], [10]
- Luftwiderstand
- Infrarot-Spektroskopie

3.2 Kommerzielle Produkte

Heute gibt es kommerziell erhältliche Produkte, die den LWC von Schnee messen. Die Produkte nutzen die unterschiedliche dielektrische Konstante von Eis und Wasser. Hier zu erwähnen sind der SLF Snow Sensor, auch Denothmeter genannt und die Finnish Snow Fork. Sensoren aus dem Agrikultur Bereich die die Bodenfeuchtigkeit messen, sind auch im Schnee einsetzbar.

Ein Nachteil der Produkte ist, dass, um auf einen prozentualen LWC zu kommen, die Dichte des Schnees separat gemessen werden muss. Die räumliche Auflösung der Produkte ist im Bereich von Zentimetern.

4 Konzeptionelle Planung und Nutzeranforderungen

4.1 User Storys

Die User Stories werden genutzt, um sich früh Gedanken über den Einsatz des fertigen Produkts zu machen.

- Alice führt an einem Hang eine Schneedeckenanalyse durch. Sie hat alles Material und die Messgeräte in ihrem Rucksack mitgebracht. Mit einer Schaufel gräbt sie einen Schneegraben für die Messungen. Neben ihren üblichen Messungen und ihrer subjektiven Beurteilung trägt sie noch die Messwerte der Schneefeuchtigkeit in das Protokoll ein.
- Barbara sitzt in der Einsatzzentrale an ihrem Computer und sieht eine Warnung aufleuchten. Die Warnung wurde von den Sensor im Lawinenhang ausgelöst. Sie ruft sofort bei der Rhätischen Bahn an und kann den Zug stoppen, bevor er von der Lawine erfasst wird.
- Chloe führt eine neue Simulation durch. Die Simulation berechnet aus Meteorologiedaten den LWC und somit die Lawinengefahr in der Schweiz. Dazu benutzt sie die neuen Trainingsdaten des vergangenen Jahres, die mit den Sensoren aufgezeichnet wurden.
- Dorothea überlegt, ob sie an diesem Hang mit ihren Skiern eine Abfahrt wagen soll. Mit einem handlichen Gerät überprüft sie schnell die Schneefeuchtigkeit und kann so eine sichere Entscheidung treffen.
- Ester wirft aus dem Helikopter das Sensorpaket, um den Hang, der sonst nicht zu erreichen ist, zu überwachen. In sechs Monaten wird das Paket im abgetauten Hang wieder eingesammelt.

-
- Greta trainiert ihr Reinforcement Machine Learning Modell auf Bildern von Schneeflocken. Dazu braucht sie hochauflösende Bilder und den dazugehörigen LWC der Probe.

Die unterschiedlichen User Stories beschreiben komplett unterschiedliche Produkte. Da noch nicht entschieden werden kann, welche die korrekte Anwendung ist, wird zuerst die unterschiedlichen Methoden erkundet. Sobald eine Methode gefunden ist, wird diese zu einer konkreten Anwendung ausgearbeitet.

Zu diesem Zeitpunkt ist der Einsatz weiterer abstrakter Planungstechniken, wie zum Beispiel Black Box und Musskriterien, nicht sinnvoll, da dadurch spannende Möglichkeiten ausgeschlossen werden könnten.

5 Vorstudie

In der Vorstudie werden verschiedene physikalische Methoden zur Bestimmung des LWC im Schnee getestet.

Es wurden 5 Methoden gewählt, die eine hohe Erfolgswahrscheinlichkeit, eine abschätzbares Aufwand und, nach meiner Recherche, nicht mit anderen Produkten konkurrenzieren.

Weitere Auswahlkriterien für die Methoden sind die Innovativität, die Eleganz des Prinzips und die Umsetzbarkeit im Rahmen dieser Bachelorarbeit

5.1 Mechanische Anregung durch Vibration

Diese Hypothese geht davon aus, dass sich der Schnee bei mechanische Anregung von einem festen in den flüssigen Zustand übergeht. Je nach dem wie hoch der LWC ist, findet dieser Übergang statt oder nicht.

Um die Idee zu testen, wird ein vibrierendes Objekt mit hoher Dichte auf den Schnee gelegt, und es wird beobachtet, wie sich das Objekt durch den Schnee bewegt.

Die Form und der Name des Objekts wurde vom AvaNode übernommen. Der Name ist VibraNode. Für die Umsetzung wurde ein Morphologischer Kasten mit drei Varianten erstellt.

Morphologischer Kasten VibraNode

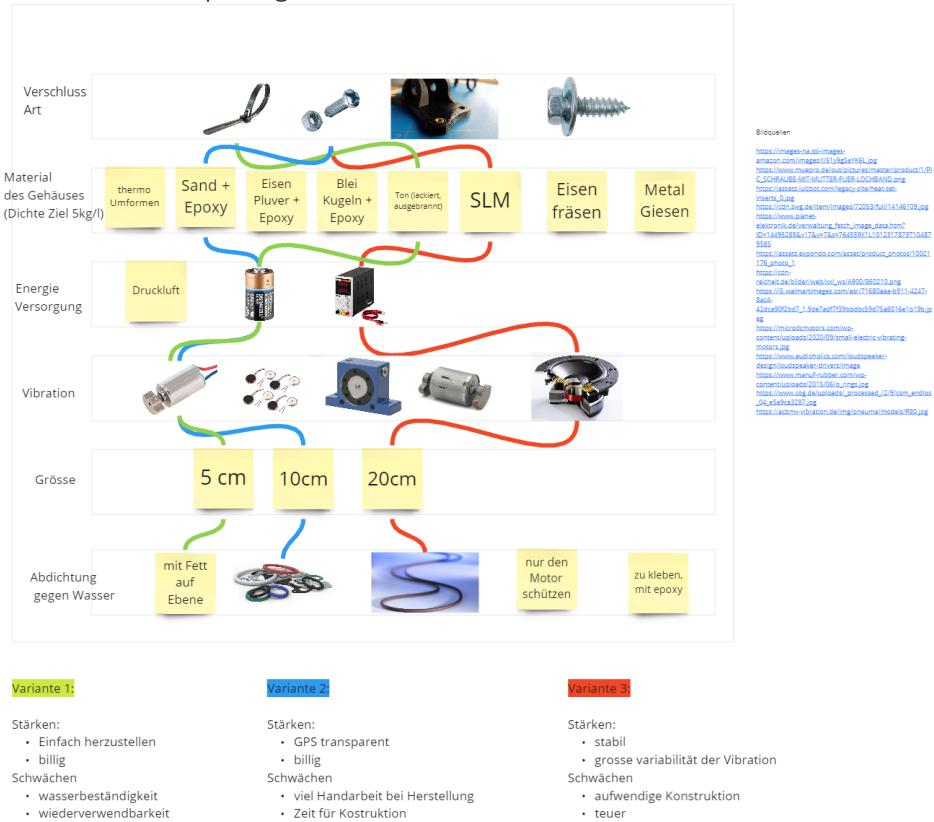


Abbildung 2: Morphologischer Kasten für VibraNode

Variante 1 wurde gewählt, da die Umsetzung und somit das Testen einfach ist. Die Schwächen, besonders die Wiederverwendbarkeit, sind hier in der Vorstudie noch nicht gravierend.

Die in Abbildung 9 dargestellte Variante 1 wurde gewählt, da die Umsetzung und somit das Testen einfach ist. Die Schwächen, wie die fehlende Wiederverwendbarkeit, sind hier in der Vorstudie noch nicht gravierend. Die Schwäche der Wasserbeständigkeit wurde mit einer passenden Beschichtung gelöst.

Für den Test mit dem VibraNode wird der VibraNode auf die Schneedecke gelegt. Das Messergebniss ist, ob sich der VibraNode im Schnee versinkt.

Die Testergebnisse fielen negativ aus. Der VibraNode konnte trotz seiner Dichte von 1600 kg/m³ nicht in den Schnee eindringen. Auch wenn der Schnee wurde mit flüssigem Wasser gesättigt war. Damit stellt sich die neue Frage, ob der LWC einen kausalen oder nur einen korrelativen Zusammenhang mit Gleitschneelawinen hat, und wie weit die Vorgeschichte und andere Faktoren des Schnees mitbetrachtet

werden muss. [25]

5.2 Elektrischer Widerstand

Um den elektrischen Widerstand von Schnee zu messen, wurde der Kontaktpunkt eines Leitwertmessgeräts mit zwei angewinkelten Stahlplatten modifiziert, um einen guten flächigen Kontakt mit dem Schnee zu ermöglichen.

In einem Feldversuch konnte keine Leitfähigkeit des Schnees gemessen werden. Der gemessene Schnee hatte einen hohen LWC da es während der Messung regnete.

Die Hypothese ist, dass sowohl die Verunreinigungen durch die Nuklei des Schnees als auch die spontan entstehenden Hydronium Ionen keine genügend Leitfähigkeit bilden, um einen Messwert im μS (Siemens = $1/\Omega$) Bereich zu messen. [43]

Eine Erweiterung dieser Messung wäre, dem Schnee einen Stoff zuzugeben, der gut leitfähig ist. Dann wird der Versuchsaufbau mehr in die Richtung 5.3 gehen, wo die Ausbreitung eines Stoffes im Schnee beobachtet wird. Hier wäre diese Beobachtung dann über die Leitfähigkeit und nicht wie in 5.3 optisch.

5.3 Diffusion von Flüssigkeit

Die Methode der Diffusion beobachtet, wie sich ein Stoff im Schnee ausbreitet. Für den Vorversuch wurde der Schnee unter ein Stereo-Mikroskop platziert. Der Versuch dauert etliche Minuten. Um zu verhindern, dass der Schnee von der warmen Raumluft aufgeschmolzen wird, ist der Schnee in einer Röhre aus Eis platziert. Während das -10 Grad Celsius kalte Eis langsam schmilzt, kann der Versuch durchgeführt werden. Die Auswertung bei dem Vorversuch erfolgt visuell, indem beobachtet wird, wie sich blaue Tinte im Schnee ausbreitet.

Eine Kombination dieses Ansatzes mit der Leitfähigkeitsmessung ist möglich, wenn ein leitfähiger Stoff eingesetzt wird.

Dieser Ansatz wird stark von der Geometrie des Schnees beeinflusst. Wieviel flüssiges Wasser vorhanden ist, ist sekundär zu wie die Eiskristalle miteinander verbunden sind.



Abbildung 3: Aufbau einer Messung wo der Schnee durch eine Eis Röhre gekühlt wird

5.4 Refraktion und Reflexion eines Lasers

Funktionsweise:

Mit einem Laser wird der Schnee sowohl durchleuchtet für die Refraktion als auch angeleuchtet für die Reflexion. In dem Bild 4 ist eine schematische Darstellung der Hypothese dargestellt. Die Grösse Wasseroberfläche und damit die Brennweite ändern sich je nach dem, wie viel Volumen Wasser auf den Eiskristallen ist. Die Effekte der Linsen sollten in der Refraktion sichtbar werden, indem es helle und dunkle Bereiche sich bilden.

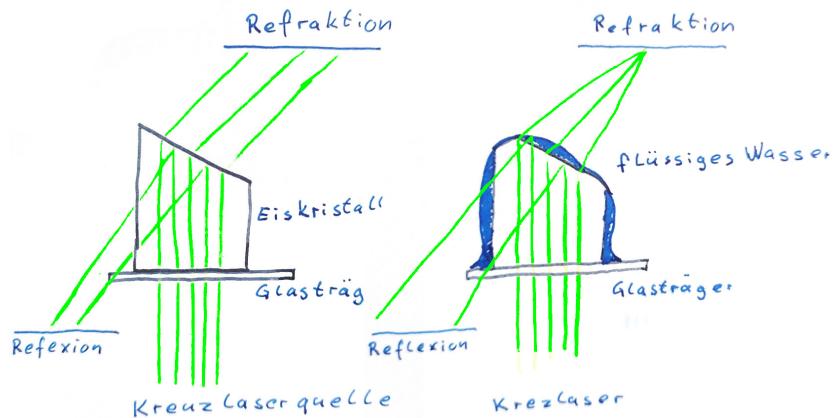


Abbildung 4: Hypothese wie das flüssige Wasser die optischen Eigenschaften der Eiskristalle beeinflusst

Beispiele in anderen Sektoren:

Refraktion wird in der Kristallografie angewendet. Die Reflexion von Wasser an einer Glasscheibe wird genutzt, um bei Autos Niederschlag auf der Windschutzscheibe zu messen.

Benutzte Mittel für den Versuchsaufbau:

Als Laserquelle wurde ein grüner Kreuzlaser (<5mW) genutzt. Um sowohl die Reflexion als auch die Refraktion gleichzeitig zu sehen, wurde die Schneeprobe auf einen Mikroskopier-Objektträger platziert. Die Ergebnisse des Lasers wurden jeweils auf weissem Papier dargestellt. Die Refraktion wird auf dem Papier an der Unterseite der Holzplatte dargestellt. Mit einem Smartphone wurde eine Videoaufnahme gemacht, wie sich die Ergebnisse des Lasers verändern während der Schnee schmilzt. Mit einem Spiegel wurde sowohl die Reflexion unten als auch die Refraktion oben gleichzeitig in einem Bild dargestellt.

In Bild 5 ist die Anordnung der verschiedenen Teile auf den Stativmaterial zu sehen.

Funktionsweise des Versuchsaufbaus:

Der Schnee wird im trockenen Zustand bei -10 Grad Celsius aus dem Gefrierschrank auf den gekühlten Objektträger gelegt. Dann wird beobachtet, wie sich die Ergebnisse ändern, wenn der Schnee an der Raumtemperatur schmilzt. Dieser Schmelzvorgang dauerte rund 3 Minuten. Dieser Aufbau ist suboptimal, denn die konstante Reflexion des Objektträgers muss aus dem Laserergebnis herausgerechnet werden.



Abbildung 5: Versuchsaufbau der Laser Reflexion und Refraktion

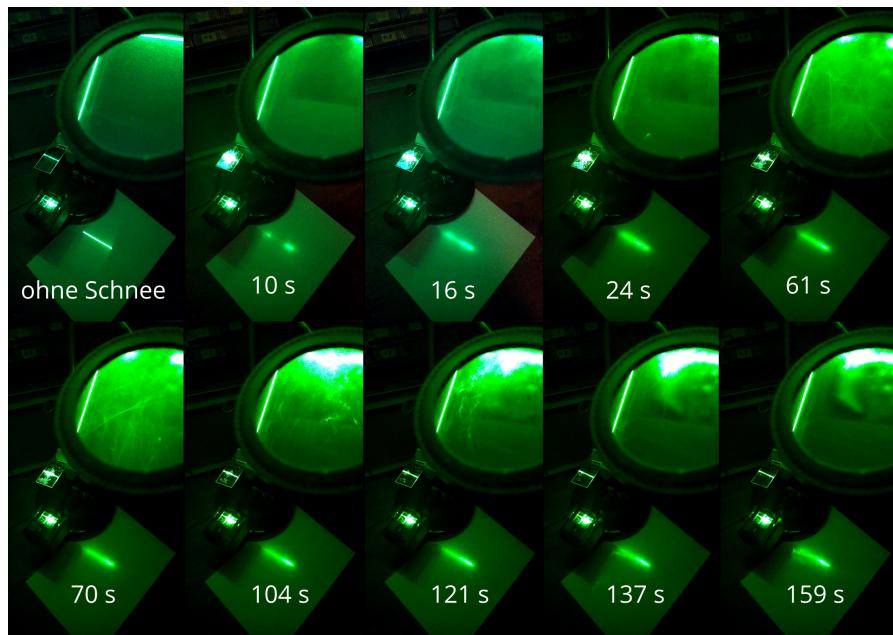


Abbildung 6: Messgrößen für die Reflexion und Refraktion, Veränderung über Zeit

Messgrößen:

Die Inhomogenität vom Licht und die Intensität können begutachtet werden.

Aussagekraft der Ergebnisse über den LWC:

Die Ergebnisse werden direkt von Wasser beeinflusst. Um den Gewichts-LWC zu erhalten, ist aber die Geometrie der Eiskristalle von Bedeutung. Daher ist das Ergebnis nicht direkt mit den LWC überführbar. Mit der 3D-Geometrie der Kristalle wäre die Aussagekraft besser.

Reflexion zum Versuchsaufbau:

Da zwei physikalische Messmethoden gleichzeitig getestet wurden, war der Versuchsaufbau nicht optimal für beide Messgrößen.

Mit den Ergebnissen der Refraktion bin ich zufrieden. Es ist eine klare Veränderung sichtbar wenn der Schnee schmilzt.

Um vergleichbare Werte für den LWC zu bekommen, ist die Kristallgeometrie aber von Bedeutung. Die Messung der Geometrie übersteigt das Ausmass der BA. Um eine Messung durchzuführen, muss eine Schneeprobe durchleuchtet werden. Um das zu erreichen, muss der Schnee physikalisch aus der Schneedecke aufwendig extrahiert werden.

Das Ergebnis der Reflexion ist schwer zu beurteilen. In [27] ist die Reflexion von EM-Wellen bereits mit Erfolg untersucht worden, in Abbildung ?? ist ein Ergebniss abgebildet.

Verbesserungen des Versuchsaufbaus:

Um bessere Reflexionsergebnisse zu bekommen, keinen Objektträger nutzen, sondern direkt auf Schnee leuchten. Für eine statische Messung einer Schneeprobe muss die Luft um den Schnee herum gekühlt sein. Ein Ansatz dafür wird im Vorversuch 5.3 umgesetzt. Mit dem Laser wird Energie in den Schnee eingebracht. Um das Schmelzen und damit Verfälschen des LWC zu minimieren, sollte ein möglichst schwacher Laser eingesetzt werden.

5.5 Water Indikator Tape

Das Water Indikator Tape stammt ursprünglich aus der Qualitätssicherung im dem Elektronikbereich und wird beispielsweise in Handys verwendet, um das Eindringen von Wasser nach zu weisen. Wenn das Tape rot wird, ist Wasser eingedrungen und der Hersteller kann eine Garantieleistung ablehnen.

Sobald das papierbasierte Klebeband nass wird, blutet die rote Farbe auf der Unterseite des Klebebands irreversibel durch das weiße obere Papier hindurch.

Varianten von Water Indikator Tapes wurden ebenfalls getestet. Für diese Arbeit wurde das Produkt 5559 des Herstellers 3M ausgewählt, da es sich durch seine dünnerne Dicke und damit schnellere Anzeigegeschwindigkeit auszeichnet.

Bei der Patent-Recherche zur Messung des LWC im Schnee wurde keine Verwendung von Water Indikator Tapes festgestellt, was auf die Neuartigkeit der Me-

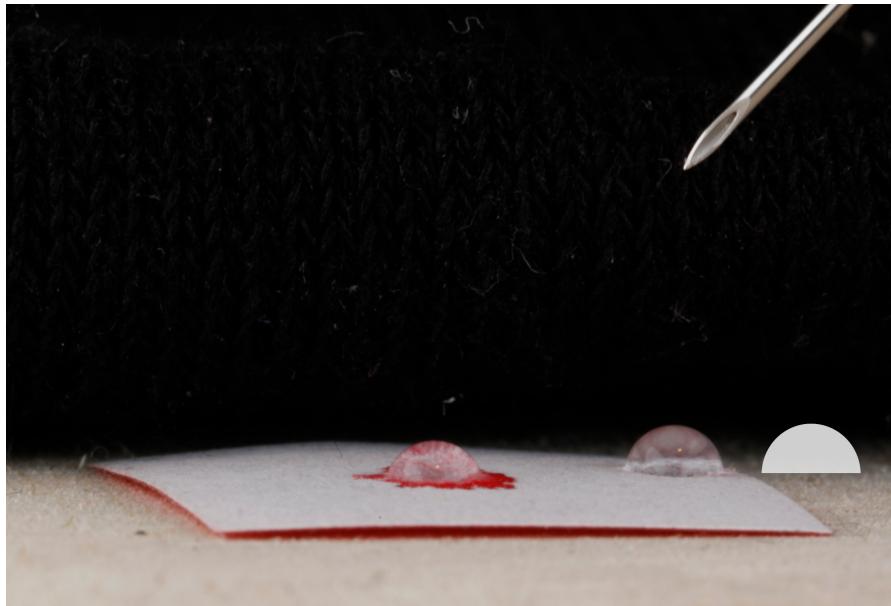


Abbildung 7: Messung des Kontaktwinkels. Links ist ein Tropfen zu sehen, der mehrere Minuten auf dem Tape verweilt. Rechts ist ein neuer Wassertropfen, daneben noch der gefittete Kreis.

thode hindeutet. Der Hinweis, dass das Water Indikator Tape für die Messung des LWC genutzt werden kann, kam von Herr Loichinger.

Um die Interaktion des flüssigen Wasser mit dem Tape besser zu verstehen, wurde die Hydrophilie des Tapes getestet. Dazu wurde ein Wassertropfen auf das Tape gesetzt und der Kontaktwinkel gemessen. Im Abbildung 7 ist zu sehen, dass der Winkel zwischen dem Wasser und dem Tape etwa 90 Grad beträgt, was bedeutet, dass das Tape sich an der Grenze zwischen hydrophob und hydrophil befindet.

Die Verfärbungen des Tapes sind abhängig von der Andruckdauer, Anpressdruck, der Geometrie des Schnees, dem Messablauf und dem LWC.

Bei einem ersten Feldversuch 6.6 konnten vielversprechende Ergebnisse gemessen werden.

Widerstand gegen Umwelteinflüsse Um zu verhindern, dass das Tape den Schnee aufschmilzt, wird es mit einem Kältemittel gekühlt. Deswegen ist es wichtig abzuklären wie das Tape auf andere Stoffe reagiert.

Bei einer Vorbehandlung mit einem Lösungsmittel, getestet wurden Isopropanol, Nitroverdünner und Aceton, verfärbt sich das Tape temporär. Nachdem das Lösungsmittel abgedampft ist, ist eine Veränderung am Tape nicht mehr sichtbar. Wenn das Tape nun mit Wasser aktiviert wird, kann beobachtet werden, wie die vorbehandelten Bereiche die Feuchtigkeit stärker anzeigen.

Die Kältemittel aus 6.2 haben ebenfalls das Tape temporär verfärbt. Hier wurde keine Veränderung der Wasseranzeige beobachtet.

Die Reaktionsfähigkeit des Tapes wurde bei -10 Grad getestet. Der Temperaturbereich ist vom Hersteller als -40 bis 121 Grad Celsius angegeben.

Bei Wärmeeinwirkung einer Heissluftpistole hat sich zum einen der Klebstoff gelöst und das weiße Papier des Tapes wurde braun. Die Bereiche des Tapes, die noch weiß waren, haben bei Wasser noch immer gut reagiert. Der braune Teil hat kein Wasser mehr anzeigen können.

5.6 Reflexion zur Vorstudie

Von den fünf getesteten physikalischen Methoden, zeigten drei einen erfolgreichen Ansatz um den LWC abzubilden. Diese Methoden sind jedoch stark von der Geometrie des Schnees beeinflusst, was eine noch schwierigere Messgröße darstellt als die Dichte.

Der LWC hat einen enormen Einfluss auf die Eigenschaften Schnee. Das spiegelt sich in der vielfältigen und möglichen Messmethoden wieder. Die gesamte Vorgeschichte des Schnees spielt ebenfalls eine bedeutende Rolle für dessen Eigenschaften.

In der Aufgabenstellung 1.1 wurde erwähnt, dass der zu entwickelnde Sensor unabhängig von Größen wie der Dichte des Schnees funktionieren soll.

Es ist nicht sicher, ob die getesteten Methoden dichteunabhängig sind. Daher wurden, in Absprache mit dem Betreuer, die Anforderungskriterien bezüglich der Dichteunabhängigkeit der Messung für den Sensor gelockert, um einen innovativen Ansatz verfolgen zu können.

5.7 Auswahl des physikalischen Prinzips

Die Messprinzipien versuchen auf unterschiedliche Weise, einen Einflüsse des flüssigen Wassers auf den Schnee abzubilden.

Die Entscheidung, welches Prinzip weiterverfolgt wird, wurde in Absprache mit meinem Betreuer getroffen.

Die Technik des Water Indicator Tapes wurde gewählt, weil sie am elegantesten und mit den wenigsten Umwegen, direkt mit dem flüssigen Wasser im Schnee interagiert.

Es wird vermutet, dass das Tape mehr kann, als nur den LWC durch das Verhältnis von Rot und Weiss zu messen. Die Grösse und Verteilung der roten Bereiche könnten Informationen über die Geometrie des Schnees liefern.

Wenn dies gelingt, könnte das Water Indicator Tape eine Funktion bieten, die kommerzielle Produkte bisher nicht haben.

6 Funktionsmusterentwicklung, Tests und Weiterentwicklung

In diesem Kapitel wird das agile Hardware Developement und die verschiedenen Funktionsmuster des Sensors vorgestellt, die im Verlauf der Entwicklung entstanden sind. Ziel der Funktionsmuster war es, verschiedene Ansätze zur Messung und Auswertung des LWC im Schnee zu erproben und zu optimieren. Jedes Funktionsmuster adressiert spezifische Herausforderungen und bringt neue Ideen ein, um die Messgenauigkeit und Benutzerfreundlichkeit zu verbessern.

Die Darstellung der iterativen Entwicklung der Funktionsmuster in dieser linearen Dokumentation ist herausfordernd.

6.1 Agiles Hardware Development

Die Planung der Arbeit wird mit einem agilen Kanban-Board durchgeführt. Ein Ziel der agilen Hardware Entwicklung ist möglichst schnell zu einem Funktionsmuster zu kommen und daraus für die nächste Iteration zu lernen.

Um diese schnelle Arbeitsweise zu ermöglichen, habe ich folgende Priorisierung der Fertigungstechniken erstellt:

1. Bestehendes Objekt benutzen und modifizieren
2. von Hand ausschneiden aus Karton
3. IR-Lasercutter mit Sperrholz

-
- 4. 3D-Druck in FDM
 - 5. Einkaufsteile kaufen
 - 6. Selber fertigen (manuell drehen, fräsen, töpfern usw.)
 - 7. Extern fertigen lassen

Ein Endprodukt wird extern gefertigt werden müssen, um die Wertigkeit des Produkts an den Benutzer zu vermitteln. Die Seriengröße ist je nach Endprodukt dazugehöriger User Story sehr unterschiedlich.

6.2 Messablauf

Um an möglichst viele Schneetypen anwendbar zu sein, ist das Andrücken kraftgesteuert. In der Vorstudie 5.5 war die Messung weggesteuert.

Als Kraft für den Anpressdruck wurde die Gewichtskraft gewählt. So kann die Messung in Puderschnee bis hin zu Firn durchgeführt werden..

Die Messung mit dem vierten Funktionsmuster wird wie folgt durchgeführt. Die Funktionsmuster werden in 6.3 beschrieben:

- 1. Einen Schnee finden, der möglichst homogen und von Menschen unbeeinflusst ist.
- 2. Mit einer Schaufel oder Ähnlichem wird ein kleiner Schneegraben schaufeln.
- 3. Auf der zu messenden Höhe eine saubere horizontale Fläche im Schnee mit der Blechklinge freilegen.
- 4. Das Stativmaterial wird im Schnee aufgebaut.
- 5. Mit der Federwaage die maximale Traglast des Schnees ermitteln.
- 6. Die Gewichte der Tape-Halter zu 80 % der maximalen Traglast des Schnees zusammenschrauben.
- 7. Die Tape-Halter aus den vor Feuchtigkeit und anderen Umwelteinflüssen geschützten Beuteln entnehmen.
- 8. Die Tape-Halter mit den 36 g schweren Gewichten zusammenstecken.
- 9. Mit dem Kältespray die Tapes runterkühlen 0 Grad.
- 10. Mit der Wärmebildkamera überprüfen, ob die Tapes die richtige Temperatur haben.

-
11. Die Tapes vorsichtig horizontal auf den Schnee aufsetzen.
 12. Mit dem magnetischen Halter die Gewichte an das Stativmaterial befestigen.
 13. 120 Sekunden warten, sodass das Wasser aus dem Schnee auf das Tape übergehen kann.
 14. Mit Druckluft allfällige Schneeflocken vom Tape entfernen.
 15. 300 Sekunden warten, bis das Tape einen stabilen Zustand erreicht hat.
 16. Die Tape-Halter in der Lichtbox befestigen.
 17. Ein Bild der Tapes aufnehmen.

6.3 Eigenschaften der Funktionsmuster

Im Folgenden Abschnitt werden die wichtigen Details der einzelnen Iterationen der Funktionsmuster beschreiben. Es werden hier nur die herausragenden Eigenschaften der verschiedenen Iterationen dargestellt. Dies soll einen kompakten Überblick über die Fortschritte und technischen Lösungen bieten, die im Laufe des Projekts entwickelt wurden. Die Eigenschaften werden teilweise in späteren Funktionsmustern nicht erneut umgesetzt.

Erste Iteration

- Eine neue Messung kann durchgeführt werden, indem das alte feuchte Tape mit einem wasserdichten Klebeband abgedeckt wird. Auf dieses trockene Klebeband wird manuell ein neues Tape aufgetragen.
- Die optische Auswertung kann mit einem Smartphone erfolgen, wodurch kein zusätzliches Material benötigt wird, da ein Smartphone bereits vorhanden ist.

Zweite Iteration

- Das Tape wird auf einen Block aus extrudiertem Polystyrol (XPS) montiert, um den Einfluss eines warmen Tapehalters auf den Schnee zu reduzieren.
- Mit einem unter Druck stehenden inertem Gas wird der an den Tapes haftende Schnee abgeblasen.
- Die Lichtbox ist in zwei Kompartimente unterteilt: ein schwarzes, um Streulicht von aussen zu minimieren, und ein helles, um das Licht der LED gleichmäßig auf die Tapes zu reflektieren.

- Die Tapehalter werden mit Elastomeren sicher an die Lichtbox angedrückt, was eine freie Rotation der Lichtbox ermöglicht.

Dritte Iteration

- Die Gewichte haben Markierungen, die es ermöglichen, die Probe mit definierter kinetischer Energie auf den Schnee aufzubringen.
- Die Gewichte werden 20 cm oberhalb des Schwerpunkts von Kunststoffführungen gehalten, um ein Umkippen der Tapehalter während der Messung zu verhindern.

Vierte Iteration

- Die Lichtbox kann zusammengefaltet werden, was einen platzsparenden Transport zur Versuchsort ermöglicht.
- Die Beleuchtung der Tapes in der Lichtbox erfolgt durch zwei LED-Panels und Diffusoren, die für eine gleichmäßige Ausleuchtung sorgen.
- Mit einem Kältemittel und einer Wärmebildkamera wird sichergestellt, dass die Tapes keine eigene Wärmeenergie besitzt, die den Schnee aufschmelzen könnte.
- Die Gewichte sind modular mit 36-g Gewichtsplatten zusammengesetzt, was eine Anpassung an verschiedene Schneesorten ermöglicht.

Fünfte Iteration

- Zur optischen Auswertung wird ein Raspberry Pi mit dem HQ-Kameramodul verwendet, was die Weiterverarbeitung der aufgenommenen Bilder erleichtert.
- Die Lichtbox ist in einer Kunststoffkiste untergebracht, um das Streulicht aus der Umgebung effektiv zu blockieren.
- Die Lichtbox ist auf der Innenseite mit einem schwarzen Samt Stoff ausgekleidet, um das Licht der LEDs besser zu kontrollieren.



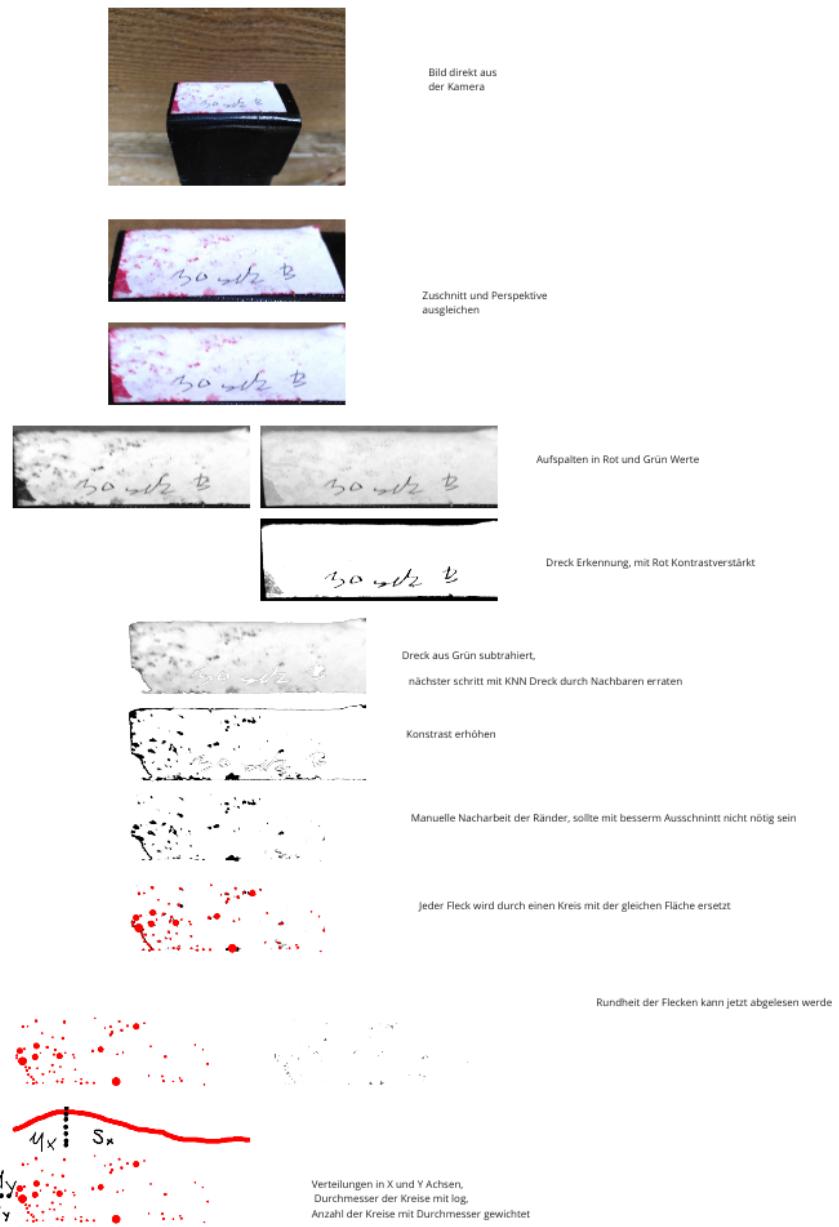
Abbildung 8: Fünfte Iteration, mit Sicht von unten in die Lichtbox

6.4 Funktionsweise der Bildverarbeitung

Die Auswertung des Tapes kann auf zwei Arten passieren. Die einfache Variante, die bei den Vorversuchen genutzt wird, ist mit den eigenen Augen die Grösse und Verteilung des Rots auf dem Tape ab zu schätzen.

Um dieses Gefühl zu quantivizieren wurde eine Pipeline zur digitalen Auswertung entwickelt. In einem ersten Schritt, illustriert in 9, wird das Tape in der Fotografie ausgewählt, dann in ein schwarz weiss Bild übersetzt.

Im zweiten Schritt kann in dem Bild jeder die Farbflecken erkannt werden. Um aus dem Bild quantitative Zahlen zu bekommen, werden die Farbflecken einzeln erkannt und in die Datenbank gespeichert. In der Datenbank können dann statistische Aussagen wie die Verteilung und der relative Flächenanteil gemacht werden.



Endwerte:
Flächen die durch die Kreise abgedeckt werden
Anzahl Kreise
Verteilung der Kreise über x, y
Rundheit der Flecken

Abbildung 9: Bildverarbeitung Konzept

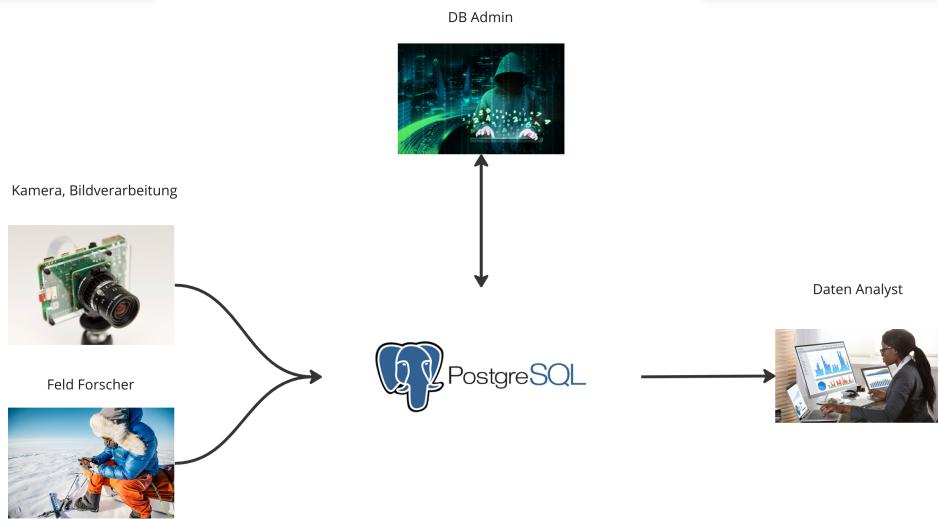


Abbildung 10: Benutzer der Datenbank

6.5 Extrahieren von Informationen aus Bilddaten

Um aus den Bilddaten, die während Feldversuchen gesammelt werden, sinnvolle Erkenntnisse zu gewinnen, ist es entscheidend, die Daten effektiv zu strukturieren. Dazu wird eine Datenbank angelegt. Dies erleichtert die effiziente Speicherung und ermöglicht leistungsstarke Datenabfragefunktionen, wie z. B. das pattern matching, die für eine umfassende Analyse wichtig sind.

Die im Feld gesammelten Daten werden zunächst in der Datenbank gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt analysiert.

Im Folgenden werden die Schritte zur Auslegung der Datenbank dargestellt. Der Code ist in Section 8 zu finden.

Die Methode wie die Datenbank hier ausgelegt wird, folgt der Vorlesung Datenbanksysteme 1.

Anforderungsanalyse

Die Anforderungen ergeben sich aus der Funktionsweise des Messaufbaus.

Die Datenbank ist skalierbarer angelegt, als sie für die Vorversuche in der Bachelorarbeit nötigt ist.

Es gibt vier Benutzer, die mit der Datenbank interagieren. In der Grafik 10 ist die schematische Darstellung.

1. Die Kamera, die die Bilder der Taps macht und auswertet, muss die Auswertungen in die Datenbank schreiben.

-
2. Der Feldforscher gibt zusätzliche Informationen über den Versuch an, die er ebenfalls in die Datenbank schreiben muss.
 3. Der Analyst wird die Daten abfragen und hoffentlich Informationen daraus gewinnen.
 4. Der Datenbankadministrator wird im Normalbetrieb nicht benötigt, sollte jedoch berücksichtigt werden.

Die Anforderungen an die Datenbank und ihre Benutzer werden entsprechend den Anforderungen des Messaufbaus und den Bedürfnissen der Benutzer festgelegt.

1

Konzeptueller DB Entwurf

Mit der Unified Modeling Language (UML) wird in 11 die Struktur der Datenbank dargestellt. Diese Darstellung ist noch lösungsunabhängig.

Logischer DB Entwurf

Um die Datenbank zu implementieren, wurde PostgreSQL gewählt. Es ist ein Free- und Open-Source-System, das zeitgemäße Features wie zum Beispiel JSON-Datentypen unterstützt.

Der folgende SQL-Code initialisiert die Datenbank: 2

Views für den Analysten Das Endziel besteht darin, eine Machine Learning Regression aus Messungen und Taps zu erstellen, um den 'LWC Denoth' zu bestimmen. Für diese Aufgabe sind höchstwahrscheinlich nur bestimmte Angaben aus der Datenbank erforderlich.

Hier werden zwei Views erstellt: Der erste ist ein minimalistischer Ansatz, mit dem direkt weitergearbeitet werden kann. Der zweite View dient dazu, genauer zu verstehen, was in dem ersten View dargestellt ist.

Da die Ansichten 3 für den Read Only Analysten bestimmt sind, muss keine aktualisierbarer View erstellt werden.

Physischer Entwurf Für die Beispieldaten wurden Daten aus der Vorstudie 5.5 für eine Messung verwendet.

Die Datenbank wird anfangs viele NULL-Werte enthalten, da beispielsweise die Wetterdaten nicht von einer API gefüllt werden.

Die Transaktionen sind in dieser Anwendung unproblematisch, da der Benutzer, der die Inserts durchführt (Raspberry, Feldforscher), zu einem früheren Zeitpunkt arbeitet als der Analyst.

Falls die Datenbank von einem Laptop auf einen Server ausgelagert wird, werden die folgenden Tools zur Sicherheitsprüfung verwendet: www.owasp.org und <http://sqlmap.org/>.

Python-Interaktion mit der Datenbank

Für die Interaktion mit der Datenbank werden verschiedene Python-Skripte verwendet, die je nach Benutzer unterschiedliche Aufgaben erfüllen.

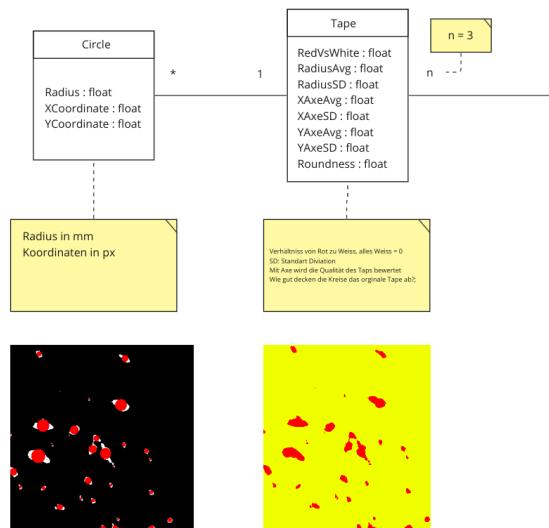
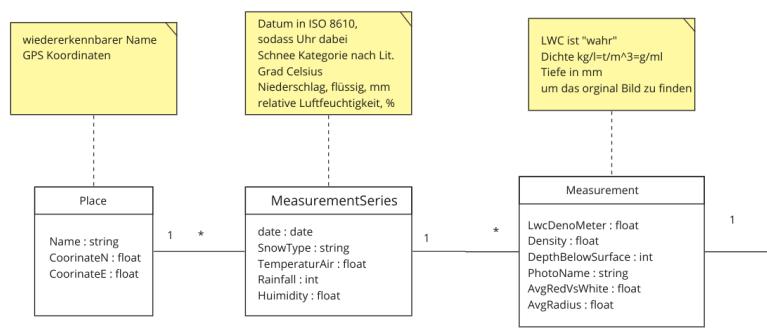


Abbildung 11: UML-Diagramm des konzeptuellen DB-Entwurfs

Das folgende Python-Skript ist dazu da, Bilder von Taps zu analysieren und die daraus gewonnenen Daten in die Datenbank einzufügen. 5

Das nächste Python-Skript wird interaktiv vom Versuchsleiter verwendet. Zur Zeit ruft das Skript auch noch die Bildanalyse auf. 6

Nächste Schritte für die Datenbank

Die Python-Programme sollten weiterentwickelt werden, um sämtliche verfügbaren Daten in der Datenbank zu nutzen und um die Funktionalität zu verbessern.

Aktuell läuft die Datenbank mit dem Benutzer Postgres auf einem Laptop. Eine Auslagerung auf einen Server ist derzeit keine Priorität, da dies mit Sicherheitsrisiken verbunden ist. Das Hauptziel dieser Produktentwicklungs Bachelorarbeit besteht darin, das Verhalten des Taps zu verstehen. Sobald dieses Ziel erreicht ist, können weitere Schritte zur Optimierung und Sicherung der Datenbankinfrastruktur unternommen werden.

Sobald die Feldversuche durchgeführt worden sind, wird die Daten Bank an die tatsächliche Nutzung angepasst.

6.6 Ergebnisse der Versuche

Erster Feldversuch

Im ersten Versuch wurde untersucht, wie sich die Andruckzeit des Tapes auf das Messergebnis auswirkt. Bereits nach 5 Sekunden war ein Ergebnis messbar, welches bei 120 Sekunden ausgeprägter wurde.

1.



2.



3.



Abbildung 12: Drei Tapes gemessen bei nassem Schnee, da es geregnet hat: 1. 5 Sekunden Anpresszeit, 2. 30 Sekunden Anpresszeit, 3. 120 Sekunden Anpresszeit

Zweiter Feldversuch Ziel des zweiten Versuchs 14 war es, den Ablauf der Tape-Messung bei verschiedenen LWC-Werten zu testen. Dazu wurde Schnee einmal mit Wasser übergossen und einmal mit Kältespray eingefroren. Die Ergebnisse sind in 15 dargestellt. Die Wärmebildaufnahme 13 zeigte, dass der Schnee nur lokale Temperaturänderung macht, da Schnee gut isoliert.

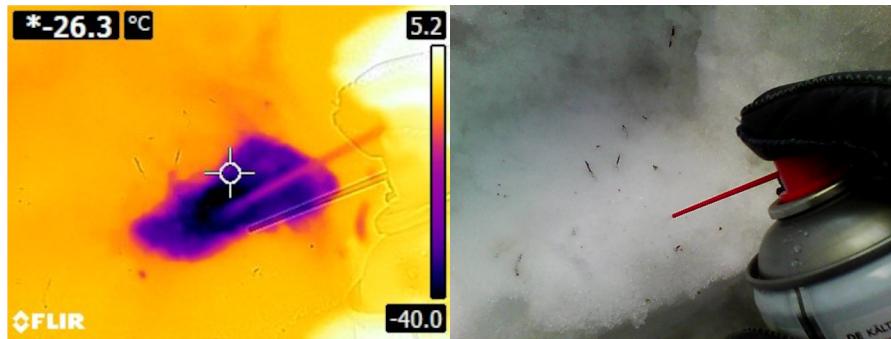


Abbildung 13: Wärmebildaufnahme der gekühlten Schneestelle, welche zur Simulation eines niedrigen LWC verwendet wurde.



Abbildung 14: Messstandort in Davos, unter dem Regenschirm ist das Tape gelagert, um es vor direkter Sonneneinstrahlung und Wasser Tropfen zu schützen.

1.

2.

3..



Abbildung 15: Tapes aus dem ersten Feldversuch: 1. Unveränderter Schnee, 2. Gekühlter Schnee (siehe Abb. 13), 3. Mit flüssigem Wasser übergossener Schnee.



Abbildung 16: Messaufbau von drei Tapes auf unverändertem Schnee

dritter Feldversuch Im dritten Versuch 18 wurde ein neues Design mit variablem Anpressdruck getestet. Es zeigte sich, dass die Varianz der Tapes am geringsten war, wenn das Gewicht 80% der maximalen Tragkraft des Schnees betrug. In 17 ist das Ergebnis zu sehen.



Abbildung 17: Messung von sechs Tapes mit zwölf Stahlplatten und einem Gesamtgewicht von 514 g auf unverändertem Schnee, um die Varianz der Messergebnisse zu bestimmen.

Es wurde auch untersucht, wie sich das Tape verhält, wenn derselbe Schnee mehrmals hintereinander getestet wird. Dabei zeigte sich, dass die Menge an Wasser, die benötigt wird, um das Tape zu befeuchten, während der 120 Sekunden Andruckzeit vom Schnee bereitgestellt werden kann. Im Feldversuch wurde die Messung sechs mal wiederholt. 18



Abbildung 18: Messung von sechs Tapes auf dem selben unverändertem Schnee, um die Einflüsse des Messen auf den Schnee zu erkennen.

6.7 Mögliche Gründe der hohen Varianz der zweiten Iteration

In der Messung mit der zweiten Iteration wurde der vergleichbare, unveränderte Schnee wiederholt gemessen. Ziel war es, die Varianz von vergleichbarem Schnee zu ermitteln. Die Varianz, sichtbar im Bild ??, zwischen den einzelnen Tapes ist hoch.

Varianz in der Messung aus Davos,
(Skalierung ist kein Problem)

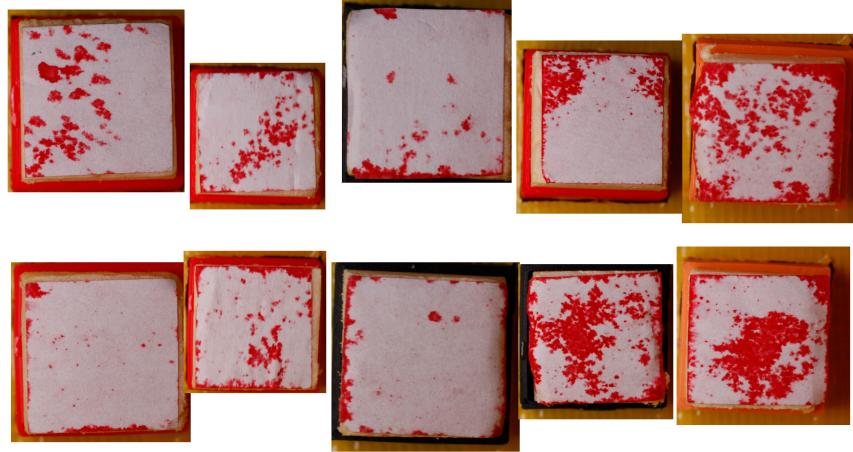


Abbildung 19: 10 Messungen von vergleichbarem, unverändertem Schnee

Die Annahme, dass sich Wasser homogen in Schnee verteilt, ist fragwürdig. In einem Paper aus 'The Cryosphere' von 2022 [27] hat Herr Donahue u.a. Schnee beim schmelzen mit IR-EM Wellen vermessen. Die Abbildung ?? zeigt die Inhomogenität, besonders bei LWC-Werten über 10 %.

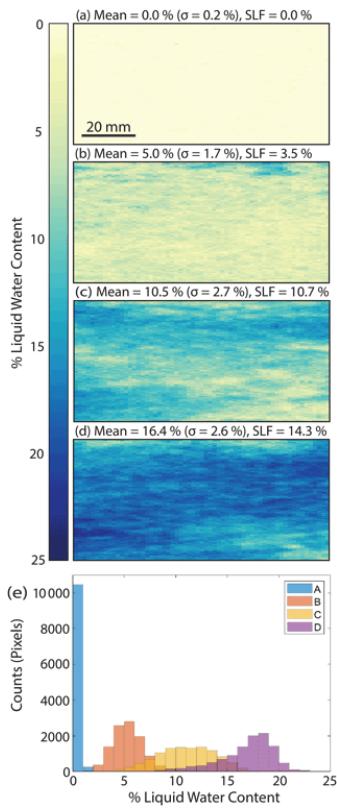


Abbildung 20: Schnee der schmiltz, gemessen mit IR-EM Wellen von Herrn Donahue in [27]

Mit Ishikawa 21 wurde das Problem der hohen Varianz genauer analysiert.
Die wichtigsten Einflüsse sind:

- Das Tape ist anisotrop durch die Herstellung. Das ist besonders auffällig an den Rändern. Die Lösung wurde in Abbildung 9 schon intuitiv benutzt. Der Rand (etwa 2 mm) soll nicht beachtet werden. Der Bildausschnitt wird in Zukunft so gewählt, dass der Rand nicht im Bild ist.
- Das Tape hat einen schlechten Kontakt zum Wasser auf dem Schnee. Um diese Hypothese zu überprüfen, wurde der Winkel eines Wassertropfens auf dem Tape gemessen. Mit einem Winkel von 90 Grad ist das Tape genau zwischen hydrophob und hydrophil.
- Die Beleuchtung war nicht homogen. Deswegen werden LEDs mit Diffusoren im nächsten 6.3 Funktionsmuster verbaut.
- Die Tape-Halter standen nicht genau senkrecht. Deswegen wurde die Führung mit den Magnetbögen und Stativmaterial gebaut.

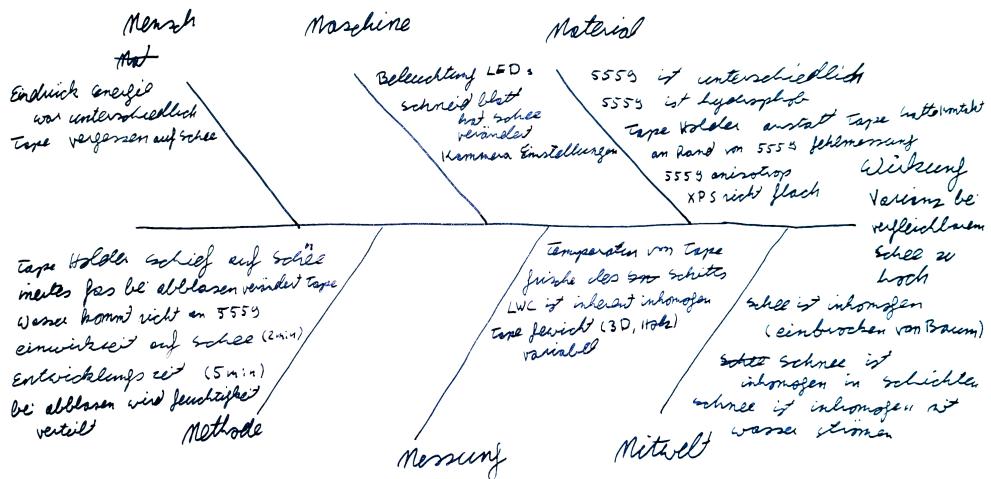


Abbildung 21: Ishikawa Fehler Analyse für die Messung des Funktionsmusters 2

- Die kinetische Eindrückenergie war inkonsistent. Deswegen wurde die Hauptzahl der Versuche des dritten Feldversuchs ohne extra Energie durchgeführt. Bei dem Durchgang mit Energie wurde das Stativmaterial benutzt, um eine gleiche potentielle Energie sicherzustellen.
- Der Tapehalter und nicht das Tape hatten Kontakt zum Schnee. Deswegen wurde der neue Tapehalter umkonstruiert, sodass 40 mm nur der XPS-Schaumstoff mit dem Tape in den Schnee eindringen kann.
- Der XPS-Schaumstoff ist nicht flach. Deswegen wurde eine Schneidlehre gebaut, um den XPS senkrecht zu schneiden. Weitere Möglichkeiten wären, eine Glasplatte (Mikroskop-Objektträger) zwischen den XPS und das Tape zu machen. Einen anderen Möglichkeit ist ein plastisch verformbaren Träger für das Tape zu entwickeln.
- Die Temperatur des Tapes war vor dem Schneekontakt die Umgebungstemperatur (15 Grad Celsius). Deswegen wurde jedes Tape runtergekühlt und mit der Wärmebildkamera überprüft.
- Die Gewichte der Tapehalter waren um rund 10 % unterschiedlich, denn es

wurden verschiedene Versionen benutzt. Die neue hat nur eine einzige Version an Tapehaltern.

- Der Schnee ist inhomogen. Die Messung war unter einem Baum, von dem Schnee und Eis heruntergefallen waren. Das hat dazu geführt, dass im Schnee zentimetergroße Eisregionen waren.
- Der Schnee ist inhomogen in Schichten. In den nächsten Messungen wurde ein weniger geschichteter Schnee gewählt.
- Der Schnee ist inhomogen mit Wasserströmen. Die Messung in Davos war in der Nähe eines Baches. Die nächste Messung wurde ein homogener Schnee gewählt.
- Die Ebene, auf der das Tape geklebt ist, ist nicht eben, sondern beim Transport eingedrückt worden. Um das Problem zu reduzieren, wurden Pelican Boxen für den Transport benutzt.

Weitere mögliche Gründe und die Strukturierung der Gründe können im Ishikawa-Diagramm gesehen werden 21.

Eine weitere Ishikawa Analyse wurde für die vierte Iteration gemacht. Nur noch kleine, lösbare Probleme konnten identifiziert werden. Die Analyse ist in ?? abgebildet.

6.8 Verbesserungsmöglichkeiten des Funktionsmusters

Zwischen dem Tape und dem Gewicht kann ein flexibler Schaumstoff eingesetzt werden, so kann sich das Tape an die Unregelmäßigkeit des Schnees besser anpassen.

Das Tape kann mit einer Membran an den Schnee gedrückt werden. So kann auf die Kraft praktischer kontrolliert werden. Schwerkraft ist nicht praktisch, um ein vollautomatisches Produkt zu entwickeln.

Die Geometrie des harten XPS-Schaums kann durch eine Kugel oder Kegel ersetzt werden, so kann eine andere Druckkraft erreicht werden.

6.9 Vollautomatische Durchführung und Weiterentwicklung der Messung

Um die grossen Datenmengen, die für ein robustes ML aus 6.5 benötigt werden, liefern zu können, muss die Messung die teure menschliche Arbeitszeit drastisch reduzieren. Die Vorstudien in 20 erforderten rund 9 Stunden Arbeitszeit und hätten etwa 50 LWC-Tapes und 6 LWC-Denoth-Datenpunkte liefern können.

Ein grosser Vorteil des Tapes ist die feine örtliche Auflösung im zentralen Millimeter Bereich in der Messregion von 20 x 20 mm. Um diese feine Auflösung zu nutzen, ist es spannend, Messungen durch die Höhe der Schneedecke durchzuführen.

- Eine Möglichkeit besteht darin, dass der Feldforscher mit einer Bohrmaschine ein Loch in den Schnee bohrt. Dann kann das Messsystem in das Loch herabgelassen werden und kontinuierlich Messungen durchführen, während es abgesenkt wird. Mit dieser Anordnung wird nicht mehr in der Horizontalen gemessen, sondern in der Verticalen. Das sollte eine umfassendere Aussage über eine Schneedecke liefern.
- Um den Anpressdruck seitlich ausüben zu können, funktioniert die Schwerkraft nicht mehr. Elastomere sind bei tiefen Temperaturen schwer einzuschätzen. Ein Elektromotor ist möglich, aber etwas mühsam mit der Batterie. Eine Blattfeder oder Kompressionsfeder sind vielversprechende Varianten. Ein pneumatisches System hat in der Wirkung vorteile, ist aber in der Umsetzung anspruchsvoll.
- Das Tape kann auf eine Membran geklebt werden, die pneumatisch aufgeblasen wird und so an den Schnee angedrückt wird.
- Um eine hohe Anpassbarkeit des steifen Tapes an den Schnee zu verbessern, kann das Tape in kleinere Stücke geschnitten werden. So kann sich der elastische Träger des Tapes effektiv an den Schnee anpassen.
- Es ist auch möglich, dass ein vollautomatisiertes Messsystem über den Sommer an strategisch gewählten Orten aufgebaut wird und dann eingeschneit wird. Hier besteht die Schwierigkeit, an genügend 'ungetesteten' guten Schnee zu gelangen, um eine feine zeitliche Auflösung zu ermöglichen. Mit der vierten Iteration konnte gezeigt werden, dass die Zeit nicht ein Problem darstellen muss.
- Ein weiteres Konzept ist, dass das Messsystem von einem Helikopter aus abgeworfen wird. Durch die kinetische Energie schlägt das Messsystem dann durch die Schneedecke. In einer zweiten Phase wird das Tape an den Schnee angepresst und die Daten drahtlos an die Datenbank aus 6.5 übermittelt.

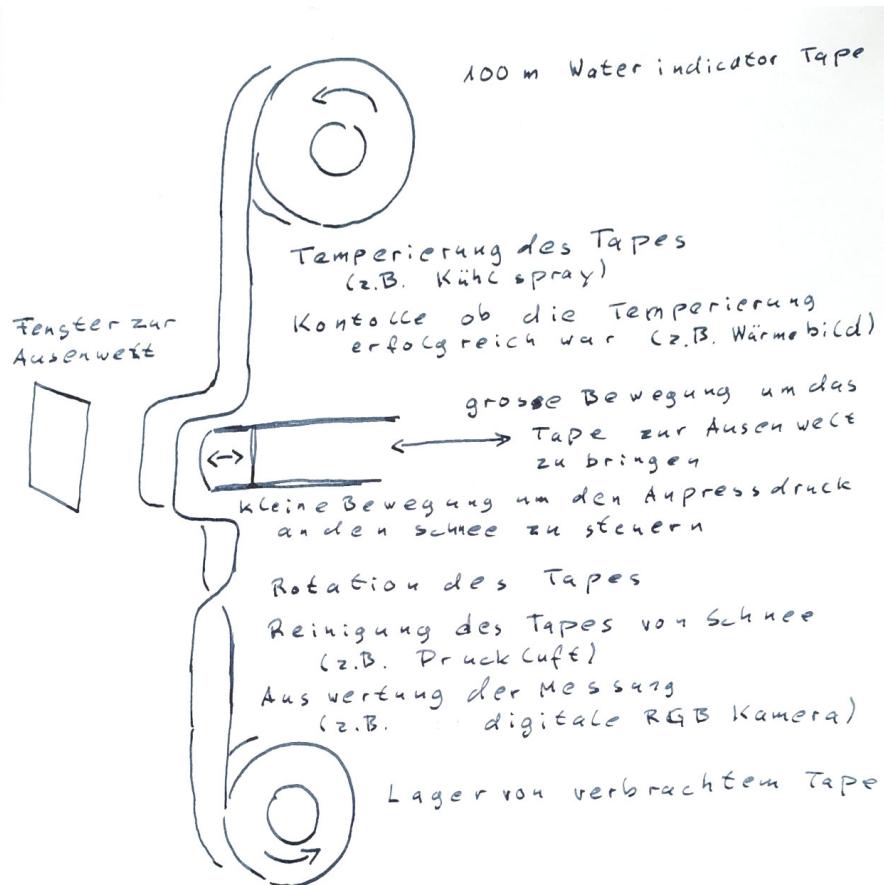


Abbildung 22: Ablauf einer automatischen Messung

7 Fazit

7.1 Persönliche Erfahrung

Ich hatte Freude mich in das mir unbekannte Thema des Schnees und des LWC einzuarbeiten. Die Arbeit hat mir einen kleinen Einblick in den Schnee gegeben, das Thema des Schnees wird für die Schweiz in den kommenden Jahren mit dem Klimawandel noch weiter an Bedeutung gewinnen.

Die agile Hardware Development Methode liegt mir und es hat Freude bereitet 5 Iterationen des Produktes in der Hand zu haben, zu testen und zu verbessern.

7.2 Fazit

Die Untersuchung und Messung des Liquid Water Content (LWC) im Schnee ist aufgrund der komplexen Eigenschaften und Inhomogenität des Schnees herausfordernd. Der LWC beeinflusst fast alle Eigenschaften des Schnees und ist daher ein kritischer Parameter. Es gibt zahlreiche Methoden zur Messung des LWC, wobei gängige kommerzielle Produkte häufig die dielektrische Konstante nutzen, um das flüssige Wasser zu messen.

In dieser Arbeit wurden fünf verschiedene Methoden zur Messung des LWC getestet:

1. Phasenübergang ausgelöst durch Vibration
2. Elektrischer Widerstand
3. Diffusion von Flüssigkeit
4. Refraktion und Reflexion eines Lasers
5. Water Indicator Tape

Das Water Indicator Tape wurde dann mit der Methodik des agilen Hardware-Developments zu einem Messsystem entwickelt. Das Tape stammt ursprünglich aus der Qualitätssicherung in der Elektronik und wird verwendet, um das Eindringen von Wasser nachzuweisen. Bei der Messung mit dem Tape gibt es Hinweise, dass das Tape nicht nur den LWC, sondern auch Informationen über die Geometrie des Schnees liefern kann. Dies eröffnet neue Perspektiven für die Messung und Analyse von Schnee.

Insgesamt hat die Arbeit gezeigt, dass das entwickelte Messsystem ein vielversprechende Methode zur Bestimmung des LWC darstellt. Durch kontinuierliche Verbesserungen und Anpassungen kann es weiter optimiert und verfeinert werden, um die Messgenauigkeit, Messpräzision und Anwendungsbreite zu erhöhen.

7.3 Zusammenfassung

Diese Arbeit untersucht den Liquid Water Content (LWC) im Schnee, ein entscheidender Parameter, der die Struktur, Stabilität und das Verhalten von Schneedecken beeinflusst und damit für die Vorhersage von Lawinen, insbesondere von Gleitschneelawinen, von entscheidender Bedeutung ist.

Ihr Hauptziel besteht in der Entwicklung eines Sensors zur präzisen Messung des Liquid Water Content (LWC) von Schnee. Die Einleitung bietet eine grundlegende Einführung in die physikalischen Eigenschaften von Schnee sowie die spezifischen Risiken von Lawinen.

Im theoretischen Hintergrund wird die Schneemetamorphose erläutert und ihr Einfluss auf die Stabilität von Schneedecken diskutiert, wobei besondere Aufmerksamkeit den Gleitschneelawinen gilt, die durch das Abgleiten von homogenen Schneemassen auf glatten Oberflächen entstehen.

Zahlreiche wissenschaftliche Veröffentlichungen befassen sich mit verschiedenen Methoden zur LWC-Messung, darunter elektrische, dielektrische, optische und thermische Techniken. Eine Vorstudie identifizierte das vielversprechendste Prinzip zur LWC-Messung, wobei fünf verschiedene Messmethoden getestet wurden.

Das Water Indicator Tape, ursprünglich für die Qualitätssicherung in der Elektronik entwickelt, wurde mittels agiler Hardware-Entwicklung zu einem Messsystem weiterentwickelt. In fünf Iterationen wurde der Messablauf optimiert, was zu einem zuverlässigen System führte, das nicht nur den LWC, sondern auch geometrische Eigenschaften des Schnees erfassen kann. Dies übertrifft die Fähigkeiten kommerzieller Produkte und ermöglicht umfassendere Analysen der Schneemetamorphose und Lawinengefahr. Mit weiteren Verbesserungen kann das System zukünftig die Messgenauigkeit und Anwendungsbreite erhöhen und detailliertere Einblicke in die physikalischen Prozesse von Schneedecken und Lawinenentwicklungen bieten.

Der iterative Entwicklungsprozess des Sensors wird beschrieben, wobei agile Hardware-Entwicklungsmethoden und ein Kanban-Board eingesetzt werden, um die Herausforderungen und Lösungen detailliert zu dokumentieren.

Die Ergebnisse der Feldversuche werden analysiert, wobei die Messergebnisse verschiedener Andruckzeiten und LWC-Werte verglichen werden, um die Zuverlässigkeit des entwickelten Systems zu bewerten.

Abschließend werden Vorschläge für die Weiterentwicklung des Messsystems präsentiert, um die Messgenauigkeit und Anwendungsbreite zu verbessern und weitere Forschungsarbeiten zu unterstützen.

8 Ausblick

Der weitere Verlauf der Forschung sollte darauf abzielen, die Präzision und Genauigkeit der LWC Messung zu erhöhen sowie die Anwendbarkeit des Systems in verschiedenen Umgebungen zu testen. Dabei sollten auch mögliche Verbesserungen im Hinblick auf die Automatisierung der Messungen und die Reduzierung des Arbeitsaufwands berücksichtigt werden.

Eine entscheidende Fragestellung besteht darin, die beobachtete Varianz in den Messungen zu verstehen. Es ist wichtig zu klären, ob diese Varianz auf Unterschiede im Liquid Water Content (LWC) des Schnees zurückzuführen ist oder ob sie einen Effekt der Messung selbst darstellt. Um eine statistisch fundierte Aussage treffen zu können, sollten über 30 Messungen von vergleichbaren Schneeproben durchgeführt werden.

Um die statistische Basis der Datenbank zu verbessern, sollten über 1000 Messungen mit dem Tape und etablierten LWC-Messwerten durchgeführt werden. Dadurch können die Daten analysiert, validiert und das Messsystem weiterentwickelt werden.

Danksagung

Ein herzliches Dankeschön geht an Christine Kuhn, den Werkstattverein Core-dump und das Werkzeughaus für ihre Unterstützung. Ich möchte mich auch beim IPEK, insbesondere bei Herrn Loichinger und Herrn Locher, bedanken. Ein besonderer Dank gilt meinen Mitstudierenden Oliver, Florian, Julian und Joel, die stets ein offenes Ohr für mich hatten.

Erklärung zur Urheberschaft

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne Hilfe Dritter angefertigt habe. Ich habe nur die Hilfsmittel benutzt, die ich angegeben habe. Gedanken, die ich aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommen habe, sind kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

KI-Einsatz ohne Kennzeichnungspflicht

Ich bin mir bewusst, dass die Nutzung maschinell generierter Texte keine Garantie für die Qualität von Inhalten und Text gewährleistet. Ich versichere daher, dass ich den Text generierender KI-Tools (ChatGPT 3.5 und ChatGPT 4o) lediglich als Hilfsmittel bedient habe und in der vorliegenden Arbeit meinen gestalterischen Einfluss überwiegt. Ich verantworte die Übernahme jeglicher von mir verwendeter maschinell generierter Textpassagen vollumfänglich selbst. Ich versichere, dass ich keine KI-Schreibwerkzeuge verwendet habe, deren Nutzung der Prüfer / die Prüferin explizit schriftlich ausgeschlossen hat.

Ort/Datum: Rapperswil, 2024

Unterschrift:

Peter Kuhn

Literatur

- [1] URL: <https://www.ilmsens.com/short-range-radar/> (besucht am 11.04.2024).
- [2] URL: <https://www.slf.ch/en/> (besucht am 11.04.2024).
- [3] URL: <https://toikkaoy.com/Snowfork.htm> (besucht am 05.06.2024).
- [4] URL: <https://a2photronicsensors.com/wise-sensor-liquid-water-content-snow/> (besucht am 11.04.2024).
- [5] URL: https://above.nasa.gov/files/snowex_2020/Webb_Day2_Poster_885.pdf (besucht am 11.04.2024).
- [6] URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/seppyo1941/64/4/64_4_443/_pdf (besucht am 11.04.2024).
- [7] URL: https://snow.nasa.gov/sites/default/files/Zhang_080917_15_Snow%20Density%20Comparison.pdf (besucht am 11.04.2024).
- [8] URL: <https://www.mt.com/shop/us/en/product/30474902/density-meter-excellence-d6> (besucht am 11.04.2024).
- [9] URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Joule%20%93Thomson_effect (besucht am 11.04.2024).
- [10] URL: <https://www.mouser.ch/new/sensirion/sensirion-sht4xa-sensors/> (besucht am 11.04.2024).
- [11] URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Lamb-Welle> (besucht am 05.06.2024).
- [12] URL: <https://www.kennedylabs.tech/download/KLG-GOPO-8> (besucht am 11.04.2024).
- [13] URL: <https://www.snowathome.com/product/sg6-xstream-snowmaker/> (besucht am 11.04.2024).
- [14] URL: <https://www.instructables.com/Home-Snowmaker-Snowgun-internal-mix/> (besucht am 11.04.2024).
- [15] URL: <https://www.popularmechanics.com/adventure/outdoors/a26016338/how-to-make-fake-snow/> (besucht am 11.04.2024).
- [16] URL: https://www.eoas.ubc.ca/courses/atsc113/snow/met_concepts/07-met_concepts/07b-newly-fallen-snow-density/ (besucht am 11.04.2024).
- [17] URL: <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/1391-snow-and-ice-density> (besucht am 11.04.2024).

-
- [18] URL: <https://www.proquest.com/docview/2515698986?%20Theses&fromopenview=true&pq-origsite=gscholar&sourcetype=Dissertations%20&parentSessionId=IvIK4xLnFrXKhXxv6CazyhndGZWGa0i7vbpgpqZE3MI%3D> (besucht am 11.04.2024).
 - [19] URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25161535> (besucht am 11.04.2024).
 - [20] URL: <https://www.micro-dehumidifier.com/products/product-range-overview/> (besucht am 11.04.2024).
 - [21] URL: <https://www.ilmsens.com/impedance-spectroscopy/> (besucht am 11.04.2024).
 - [22] Ahmed Abdelaal u. a. "A flexible surface-mountable sensor for ice detection and non-destructive measurement of liquid water content in snow". In: *Cold Regions Science and Technology* 195 (2022), S. 103469. ISSN: 0165232X. DOI: [10.1016/j.coldregions.2021.103469](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103469).
 - [23] Satoru Adachi u. a. "Application of a Magnetic Resonance Imaging Method for Nondestructive, Three-Dimensional, High-Resolution Measurement of the Water Content of Wet Snow Samples". In: *Frontiers in Earth Science* 8 (2020). DOI: [10.3389/feart.2020.00179](https://doi.org/10.3389/feart.2020.00179).
 - [24] Sayed Ul Alam Shibly u. a. "Experimental Estimation of Membrane Tension Induced by Osmotic Pressure". In: *Biophysical journal* 112.6 (2017), S. 1290. DOI: [10.1016/j.bpj.2017.03.001](https://doi.org/10.1016/j.bpj.2017.03.001).
 - [25] N. Altman und M. Krzywinski. "Association, correlation and causation". In: *Nature Methods* (2015), S. 899–900. ISSN: 12. DOI: doi.org/10.1038/nmeth.3587.
 - [26] Randall Bonnell u. a. "Spatiotemporal Variations in Liquid Water Content in a Seasonal Snowpack: Implications for Radar Remote Sensing". In: *Remote Sensing* 13.21 (2021), S. 4223. DOI: [10.3390/rs13214223](https://doi.org/10.3390/rs13214223).
 - [27] Christopher Donahue, S. McKenzie Skiles und Kevin Hammonds. "Mapping liquid water content in snow at the millimeter scale: an intercomparison of mixed-phase optical property models using hyperspectral imaging and in situ measurements". In: *The Cryosphere* 16.1 (2022), S. 43–59. DOI: [10.5194/tc-16-43-2022](https://doi.org/10.5194/tc-16-43-2022).
 - [28] D. Fasani, F. Cernuschi und L.P.M. Colombo. "Calorimetric determination of wet snow liquid water content: The effect of test conditions on the calorimeter constant and its impact on the measurement uncertainty". In: *Cold Regions Science and Technology* 214 (2023), S. 103959. ISSN: 0165232X. DOI: [10.1016/j.coldregions.2023.103959](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103959).

-
- [29] *gletscher_eis_schnee.png* (PNG-Grafik, 542 × 261 Pixel). 6-22-2017. URL: https://www.wetterdienst.de/maps/topics/gletscher_eis_schnee.png.
 - [30] Jiansheng Hao u. a. “Performance of snow density measurement systems in snow stratigraphies”. In: *Hydrology Research* 52.4 (2021), S. 834–846. ISSN: 0029-1277. DOI: 10.2166/nh.2021.133.
 - [31] N. J. Kinar und J. W. Pomeroy. “Determining snow water equivalent by acoustic sounding”. In: *Hydrological Processes* 21.19 (2007), S. 2623–2640. ISSN: 0885-6087. DOI: 10.1002/hyp.6793.
 - [32] Franziska Koch u. a. “Measuring Snow Liquid Water Content with Low-Cost GPS Receivers”. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 14.11 (2014), S. 20975–20999. DOI: 10.3390/s141120975.
 - [33] Franziska Koch u. a. “Retrieval of Snow Water Equivalent, Liquid Water Content, and Snow Height of Dry and Wet Snow by Combining GPS Signal Attenuation and Time Delay”. In: *Water Resources Research* 55.5 (2019), S. 4465–4487. ISSN: 0043-1397. DOI: 10.1029/2018WR024431.
 - [34] *Langjährige Statistiken*. URL: <https://www.slf.ch/de/lawinen/unfaelle-und-lawinen/langjaehrige-statistiken/>.
 - [35] Michael Lombardo u. a. “A method for imaging water transport in soil–snow systems with neutron radiography”. In: *Annals of Glaciology* (2023), S. 1–10. ISSN: 0260-3055. DOI: 10.1017/aog.2023.65.
 - [36] Alex Mavrovic u. a. “Snow liquid water content measurement using an open-ended coaxial probe (OECP)”. In: *Cold Regions Science and Technology* 171 (2020), S. 102958. ISSN: 0165232X. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102958.
 - [37] Christoph Mitterer. “Nass- und Gleitschneelawinen: Manche Lawinen mögen's warm”. In: *DAV Panorama* 2 (), S. 56–59. URL: https://www.alpenverein.de/files/Panorama-2016-2-Nass-und-Gleitschneelawinen_30770.pdf.
 - [38] Anna Nowogrodzki. “The world's strongest MRI machines are pushing human imaging to new limits”. In: *Nature* 563.7729 (2018), S. 24–26. DOI: 10.1038/d41586-018-07182-7.
 - [39] Carlos L. Pérez Díaz u. a. “Proof of Concept: Development of Snow Liquid Water Content Profiler Using CS650 Reflectometers at Caribou, ME, USA”. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 17.3 (2017). DOI: 10.3390/s17030647.

-
- [40] Jens Reichardt u. a. “Accurate Absolute Measurements of Liquid Water Content (LWC) and Ice Water Content (IWC) of Clouds and Precipitation with Spectrometric Water Raman Lidar”. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* (2022), S. 163–180. ISSN: 39. DOI: <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-21-0077.1>.
 - [41] R Schefold. *Messungen von Schneeflocken: Die Fallgeschwindigkeit und eine Abschätzung weiterer Grossen*. 2004. URL: <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/148042/> (besucht am 11.04.2024).
 - [42] *Schneemetamorphose*. URL: <https://www.slf.ch/de/schnee/material-schnee/schneemetamorphose/>.
 - [43] Fritz Scholz und Heike Kahlert. *Chemische Gleichgewichte in der Analytischen Chemie*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020. ISBN: 978-3-662-61106-7. DOI: 10.1007/978-3-662-61107-4.
 - [44] Leung Tsang u. a. “Global monitoring of snow water equivalent using high-frequency radar remote sensing”. In: *The Cryosphere* 16.9 (2022), S. 3531–3573. DOI: 10.5194/tc-16-3531-2022.
 - [45] Satoru Yamaguchi, Satoru Adachi und Sojiro Sunako. “A novel method to visualize liquid distribution in snow: superimposition of MRI and X-ray CT images”. In: *Annals of Glaciology* (2023), S. 1–11. ISSN: 0260-3055. DOI: 10.1017/aog.2023.77.

Abbildungsverzeichnis

1	Darstellung der Schneemetamorphose, Bild aus [29]	3
2	Morphologischer Kasten für VibraNode	11
3	Aufbau einer Messung wo der Schnee durch eine Eis Röhre gekühlt wird	14
4	Hypothese wie das flüssige Wasser die optischen Eigenschaften der Eiskristalle beeinflusst	15
5	Versuchsaufbau der Laser Reflexion und Refraktion	16
6	Messgrößen für die Reflexion und Refraktion, Veränderung über Zeit	16
7	Messung des Kontaktwinkels. Links ist ein Tropfen zu sehen, der mehrere Minuten auf dem Tape verweilt. Rechts ist ein neuer Wassertropfen, daneben noch der gefüttete Kreis.	18
8	Fünfte Iteration, mit Sicht von unten in die Lichtbox	24
9	Bildverarbeitung Konzept	25
10	Benutzer der Datenbank	26
11	UML-Diagramm des konzeptuellen DB-Entwurfs	28
12	Drei Tapes gemessen bei nassem Schnee, da es geregnet hat: 1. 5 Sekunden Anpresszeit, 2. 30 Sekunden Anpresszeit, 3. 120 Sekunden Anpresszeit	30
13	Wärmebildaufnahme der gekühlten Schneestelle, welche zur Simulation eines niedrigen LWC verwendet wurde.	31
14	Messstandort in Davos, unter dem Regenschirm ist das Tape gelagert, um es vor direkter Sonneneinstrahlung und Wasser Tropfen zu schützen.	31
15	Tapes aus dem ersten Feldversuch: 1. Unveränderter Schnee, 2. Gekühlter Schnee (siehe Abb. 13), 3. Mit flüssigem Wasser übergossener Schnee.	32
16	Messaufbau von drei Tapes auf unverändertem Schnee	33
17	Messung von sechs Tapes mit zwölf Stahlplatten und einem Gesamtgewicht von 514 g auf unverändertem Schnee, um die Varianz der Messergebnisse zu bestimmen.	34
18	Messung von sechs Tapes auf dem selben unveränderten Schnee, um die Einflüsse des Messen auf den Schnee zu erkennen.	35
19	10 Messungen von vergleichbarem, unverändertem Schnee	36
20	Schnee der schmiltz, gemessen mit IR-EM Wellen von Herrn Donahue in [27]	37
21	Ishikawa Fehler Analyse für die Messung des Funktionsmusters 2 . .	38
22	Ablauf einer automatischen Messung	41

Digitaler Anhang

Lebenslauf

Personalien

Peter Kuhn
Webergasse 16
8640 Rapperswil
078 707 12 46 (Mobil)
043 268 55 87 (Festnetz)
peter.jo.kuhn@gmail.com



Bildung

1998.06.17 geboren
2005 - 2011 Primarschule
2011 - 2013 Langzeit Gymnasium Kantonsschule Zürcher Oberland
2013 - 2017 Kurzzeit Gymnasium Math. Naturwiss. Gym. Rämibühl
2017 - 2018 Zivildienst
2018 - 2020 Mathematik Studium ETH Zürich
2021 - jetzt Maschinenbau und Innovation Studium an der OST
Maturarbeit

Sprachen

- Deutsch (Muttersprache)
- Englisch (sehr gut schriftlich und mündlich)
- Italienisch (gut mündlich)

Programmiersprachen

C++, Java, Python,
JavaScript, Bash, Matlab, html/css, Mysql, Excel

Fähigkeiten

Führerausweis Kat. B
Aktives Mitglied von Velove,
einer von Studenten geleiteten Velo Werkstatt

Sport

Mountainbike
Rennvelo
Schwimmen

Code

Listing 1: SQL-Code für die Benutzerinitialisierung

```
-- Prevent default role PUBLIC from creating tables:
REVOKE CREATE ON SCHEMA public FROM PUBLIC;

CREATE USER RaspberryKamera WITH PASSWORD 'abscaaksd.tt33' NOINHERIT;
-- Grant insert and update permissions on specific tables
GRANT INSERT ON TABLE Kreis TO RaspberryKamera;
GRANT INSERT ON TABLE Messung TO RaspberryKamera;
GRANT INSERT, SELECT ON TABLE Tape TO RaspberryKamera;

CREATE USER Feldversuch WITH PASSWORD 'bsacauxiaxbc222/' NOINHERIT;
-- Grant insert permissions on specific tables
GRANT INSERT, SELECT ON TABLE Messung TO Feldversuch;
GRANT INSERT ON TABLE Messreihe TO Feldversuch;
GRANT INSERT ON TABLE Messort TO Feldversuch;

CREATE USER Analyst WITH PASSWORD 'rabgkkaadggg221!' NOINHERIT;
GRANT SELECT ON ALL TABLES IN SCHEMA public TO Analyst;

CREATE USER admin WITH PASSWORD 'sgintyijyj77(';
GRANT ALL PRIVILEGES ON ALL TABLES IN SCHEMA public TO admin WITH GRANT OPTION;
GRANT ALL PRIVILEGES ON ALL SEQUENCES IN SCHEMA public TO admin WITH GRANT OPTION;
GRANT ALL PRIVILEGES ON SCHEMA public TO admin WITH GRANT OPTION;
```

Die pseudozufällige Passwörter sind nicht optimal, besser wäre *SELECT gen_random_uuid()*;

Listing 2: SQL-Code für die DBinitialisierung

```
CREATE DATABASE TapeMessungenBAKuhn;

CREATE TABLE Place (
    id SERIAL PRIMARY KEY,
    Name VARCHAR(255) NOT NULL,
    CoordinateN FLOAT,
    CoordinateE FLOAT
);

CREATE TABLE MeasurementSeries (
    id SERIAL PRIMARY KEY,
    date TIMESTAMP WITH TIME ZONE NOT NULL,
    SnowType VARCHAR(255),
    TemperaturAir FLOAT,
    Rainfall INT,
    Humidity FLOAT,
    -- Foreign Key reference to Messort
```

```

Place_id INT REFERENCES Place(id)
);

CREATE TABLE Measumrment (
    id SERIAL PRIMARY KEY,
    LwcDenothMeter FLOAT,
    Density FLOAT,
    DepthBelowSurface INT NOT NULL,
    PhotoName VARCHAR(255) NOT NULL,
    AvgRedVsWhite FLOAT,
    AvgRadius FLOAT,
    -- Foreign Key reference to MessReihe
    MeasurmentSeries_id INT REFERENCES MeasurmentSeries(id)
);

CREATE TABLE Tape (
    id SERIAL PRIMARY KEY,
    RedVsWhite FLOAT NOT NULL,
    RadiusAvg FLOAT NOT NULL,
    RadiusSD FLOAT NOT NULL,
    XAxeAvg FLOAT NOT NULL,
    XAxeSD FLOAT NOT NULL,
    YAxesAvg FLOAT NOT NULL,
    YAxeSD FLOAT NOT NULL,
    Roundness FLOAT NOT NULL,
    -- Foreign Key reference to Messung
    Measurment_id INT REFERENCES Measurment(id)
);

CREATE TABLE Circle (
    id SERIAL PRIMARY KEY,
    Radius FLOAT NOT NULL,
    XCoordinatne INT NOT NULL,
    YCoordinatne INT NOT NULL,
    -- Foreign Key reference to Tape
    tape_id INT REFERENCES Tape(id)
);

```

Listing 3: SQL-Code für die Views

```

CREATE VIEW Minimal_Messung_Tape_View AS
SELECT m.LwcDenothMeter, t.RedVsWhite, t.AvgRadius
FROM Measurment m
JOIN Tape t ON m.id = t.Measurment_id;

CREATE VIEW Full_Measurement_View AS
SELECT mo.id AS place_id, mo.Name, mo.CoordinateN, mo.CoordinateE,
       mr.id AS MeasurmentSeries_id, mr.Date, mr.SnowType, mr.Temperatur, mr.Rain
       m.id AS messung_id, m.lwcDenothMeter, m.dichte, m.tiefeUnterSchnee, m.bild

```

```
t.id AS tape_id, t.RedVsWhite, t.radiusAvg, t.RadiusSD, t.XAxeAvg, t.XAxeSD
FROM Place mo
JOIN MeasurementSeries mr ON mo.id = mr.Place_id
JOIN Measurement m ON mr.id = m.MeasurementSeries_id
JOIN Tape t ON m.id = t.Measurement_id;
```

Listing 4: SQL-Code für Beispiel Daten

```
INSERT INTO Place (Name, CoordinateN, CoordinateE)
VALUES ('Rothenthurm', 47.1, 8.683333);
```

```
INSERT INTO MeasurementSeries (Datum, SnowType, Temperatur, Rainfall, Humidity, pl)
VALUES ('2024-03-10T15:02:08', 'schneebereigte', 6, 2, 100, 1);
```

Listing 5: Bilderkennung und verarbeitung

```
#!/usr/bin/python

import psycopg2
from config import config
import cv2
import numpy as np
import pandas as pd

def do_image(image_name, Measurement_id): # Accept tape_id as a parameter
    """
    Process an image to detect circles, calculate statistics, and insert data.

    Args:
        image_name (str): The filename of the image to process.
        messung_id (int): The ID of the Messung associated with the circles.

    Returns:
        float: The mean radius of the detected circles.
    """
    df = process_image(image_name)
    mean_radius = perform_statistics(df, Measurement_id)

    tape_id = get_last_tape_id()
    for index, row in df.iterrows():
        insert_data_kreis(row['Radius'], row['X-coordinate'], row['Y-coordinate'],
# Pass tape_id to insert_data
# print(df)
    return mean_radius

# Function to perform statistics on a DataFrame
```

```

def perform_statistics(df, Measurment_id):
    """
    Calculate statistics on a DataFrame containing circle data and insert them into the database.

    Args:
        df (pandas.DataFrame): DataFrame containing circle data.
        messung_id (int): The ID of the Messung associated with the circle.

    Returns:
        float: The mean radius of the detected circles.
    """

    # Calculate mean and standard deviation
    mean_radius = df['Radius'].mean()
    mean_x_coordinate = df['X-coordinate'].mean()
    mean_y_coordinate = df['Y-coordinate'].mean()
    std_radius = df['Radius'].std()
    std_x_coordinate = df['X-coordinate'].std()
    std_y_coordinate = df['Y-coordinate'].std()

    # Insert statistics into the database
    insert_data_tape(mean_radius, mean_x_coordinate, mean_y_coordinate, std_radius, std_x_coordinate, std_y_coordinate, messung_id)

    return mean_radius


def insert_data_tape(mean_radius, mean_x_coordinate, mean_y_coordinate, std_radius, std_x_coordinate, std_y_coordinate, messung_id):
    """
    Insert statistics into the database.

    Args:
        mean_radius (float): Mean radius of detected circles.
        mean_x_coordinate (float): Mean x-coordinate of detected circles.
        mean_y_coordinate (float): Mean y-coordinate of detected circles.
        std_radius (float): Standard deviation of radius of detected circles.
        std_x_coordinate (float): Standard deviation of x-coordinate of detected circles.
        std_y_coordinate (float): Standard deviation of y-coordinate of detected circles.
        messung_id (int): The ID of the Messung associated with the statistics.

    Returns:
        None
    """

    sql = """INSERT INTO tape (radiusavg, xaxeavg, yaxesavg, radiussd, xaxessd, yaxessd, messung_id) VALUES (%f, %f, %f, %f, %f, %f, %d)""" % (mean_radius, mean_x_coordinate, mean_y_coordinate, std_radius, std_x_coordinate, std_y_coordinate, messung_id)

```

```

        VALUES (%s, %s, %s, %s, %s, %s);"""
conn = None
try:
    # Read database configuration
    params = config()
    # Connect to the PostgreSQL database
    conn = psycopg2.connect(**params)
    # Create a new cursor
    cur = conn.cursor()
    # Execute the INSERT statement
    cur.execute(sql, (mean_radius, mean_x_coordinate, mean_y_coordinate))
    # Commit the changes to the database
    conn.commit()
    print("Statistics inserted into the database.")
    # Close communication with the database
    cur.close()
except (Exception, psycopg2.DatabaseError) as error:
    print(error)
finally:
    if conn is not None:
        conn.close()
# Function to retrieve the last inserted tape_id
def get_last_tape_id():
    """
    Retrieve the ID of the last inserted tape from the database.

    Returns:
        int: The ID of the last inserted tape.
    """
    # Read database configuration
    params = config()
    # Connect to the PostgreSQL database
    conn = psycopg2.connect(**params)
    # Create a new cursor
    cur = conn.cursor()

    cur.execute("SELECT id FROM tape")
    last_tape_id = cur.fetchone()
    if last_tape_id:
        return last_tape_id[0]
    else:
        return 1

```

```

def show_image_progsess(df, image, contours, radii_list, x_coords_list, y_coords_list):
    """
    Display the processed image with circles and contours.

    Args:
        df (pandas.DataFrame): DataFrame containing circle data.
        image (numpy.ndarray): Original image.
        contours (list): List of contours detected in the image.
        radii_list (list): List of radii of detected circles.
        x_coords_list (list): List of x-coordinates of detected circles.
        y_coords_list (list): List of y-coordinates of detected circles.

    Returns:
        None
    """
    # Display DataFrame
    print(df)

    # Display the original image
    cv2.imshow('Original Image', cv2.imread(image_name))

    # Display the image with contours
    image_with_contours = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_GRAY2BGR)
    for contour in contours:
        cv2.drawContours(image_with_contours, [contour], 0, (0, 255, 0), 2)
    cv2.imshow('Image with Contours', image_with_contours)

    # Display the image with contours and circles
    # Create a copy of the original image for drawing circles
    image_with_circles = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_GRAY2BGR)

    for x, y, r in zip(x_coords_list, y_coords_list, radii_list):
        cv2.circle(image_with_circles, (x, y), r, (0, 0, 255), cv2.FILLED)
    cv2.imshow('Image with Circles', image_with_circles)

    cv2.waitKey(0)
    cv2.destroyAllWindows()

def insert_data_kreis(radius, x_coordinate, y_coordinate, tape_id):
    """

```

Insert circle data into the database.

Args:

- radius (int): Radius of the circle.*
- x_coordinate (int): X-coordinate of the circle.*
- y_coordinate (int): Y-coordinate of the circle.*
- tape_id (int): The ID of the tape associated with the circle.*

Returns:

None

"""

```
sql = """INSERT INTO Circle (radius, xcooridnate, ycooridnate, tape_id)
conn = None
try:
    # Read database configuration
    params = config()
    # Connect to the PostgreSQL database
    conn = psycopg2.connect(**params)
    # Create a new cursor
    cur = conn.cursor()
    # Convert NumPy integers to Python integers
    radius = int(radius)
    x_coord = int(x_coordinate)
    y_coord = int(y_coordinate)
    # Execute the INSERT statement
    cur.execute(sql, (radius, x_coord, y_coord, tape_id))
    # Commit the changes to the database
    conn.commit()
    # Close communication with the database
    cur.close()
except (Exception, psycopg2.DatabaseError) as error:
    print(error)
finally:
    if conn is not None:
        conn.close()
```

def process_image(image_name):

"""

Process an image to detect circles and return a DataFrame containing ci

Args:

- image_name (str): The filename of the image to process.*

```

>Returns:
    pandas.DataFrame: DataFrame containing circle data.
"""

# Load the image
image = cv2.imread(image_name, cv2.IMREAD_GRAYSCALE)

# Invert the image (since blobs are black on a white background)
image = cv2.bitwise_not(image)

# Find contours
contours, _ = cv2.findContours(image, cv2.RETR_EXTERNAL, cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)

# Lists to store radius, x-coordinate, and y-coordinate
radii_list = []
x_coords_list = []
y_coords_list = []

# Iterate through each contour
for contour in contours:
    # Calculate the center of gravity (centroid) and area of the contour
    M = cv2.moments(contour)
    if M["m00"] != 0:
        cx = int(M["m10"] / M["m00"])
        cy = int(M["m01"] / M["m00"])
        area = cv2.contourArea(contour)

        # Calculate the radius of the circle using the area
        radius = int(np.sqrt(area / np.pi))

        # Append radius, x-coordinate, and y-coordinate to respective lists
        radii_list.append(radius)
        x_coords_list.append(cx)
        y_coords_list.append(cy)

# Create DataFrame
data = {'Radius': radii_list, 'X-coordinate': x_coords_list, 'Y-coordinate': y_coords_list}
df = pd.DataFrame(data)

if __name__ == '__main__':
    show_image_progsess(df, image, contours, radii_list, x_coords_list, y_coords_list)

return df

```

```
if __name__ == '__main__':
    image_name = 'bild1.png'

    do_image(image_name)
```

Listing 6: Bilderkennung und verarbeitung

```
#!/usr/bin/python

import psycopg2
from config import config
import cv2
import numpy as np
import pandas as pd
from imageToCircle3 import do_image
# Function to retrieve the last inserted tape_id
def get_last_Measurement_id(cur):

    """
    Retrieve the last inserted Measurement_id from the database.

    Args:
        cur (psycopg2.cursor): Cursor object for database interaction.

    Returns:
        int: The last inserted Measurement_id incremented by 1.
    """
    cur.execute("SELECT id FROM Measurement")
    last_Measurement_id = cur.fetchone()
    if last_Measurement_id:
        return last_Measurement_id[0] + 1
    else:
        return 1
def insert_data(MeasurementSeries_id):
    """
    Insert a new messung entry into the database.

    Args:
        MeasurementSeires_id (int): The ID of the MeasurementSeries associate
    """

    
```

```

    None
"""

sql = """INSERT INTO Measurment (MeasurmentSeries_id)
          VALUES (%s);"""
conn = None
try:
    # Read database configuration
    params = config()
    # Connect to the PostgreSQL database
    conn = psycopg2.connect(**params)
    # Create a new cursor
    cur = conn.cursor()
    # Execute the INSERT statement
    cur.execute(sql, (MeasurmentSeries_id))
    # Commit the changes to the database
    conn.commit()
    print("Messung inserted into the database.")
    # Close communication with the database
    cur.close()
except (Exception, psycopg2.DatabaseError) as error:
    print(error)
finally:
    if conn is not None:
        conn.close()

# Main function
def main():
    """
    Main function to execute the program.

    Prompts the user for a messungReihe ID input, processes a list of image
    """

    # Prompt user for messung_id input
    messung_id = input("Enter MeasurmentSeries ID:")

    # List of image names
    image_names = ['bild1.png', 'bild2.png', 'bild3.png']

    try:
        # Read database configuration
        params = config()
        # Connect to the PostgreSQL database

```

```
conn = psycopg2.connect(**params)
# Create a new cursor
cur = conn.cursor()

# Retrieve the last inserted tape_id
messung_id = get_last_Measurment_id(cur)
print("Next_Measurement_id:", Measurement_id)

avg_mean_radius = 0
# Process each image
for idx, image_name in enumerate(image_names):
    # Process the image
    avg_mean_radius += do_image(image_name, messung_id)
avg_mean_radius = avg_mean_radius / 3

# Commit the transaction
conn.commit()

except (Exception, psycopg2.DatabaseError) as error:
    print(error)
finally:
    # Close cursor and connection
    if cur is not None:
        cur.close()
    if conn is not None:
        conn.close()

# Entry point of the program
if __name__ == "__main__":
    main()
```