

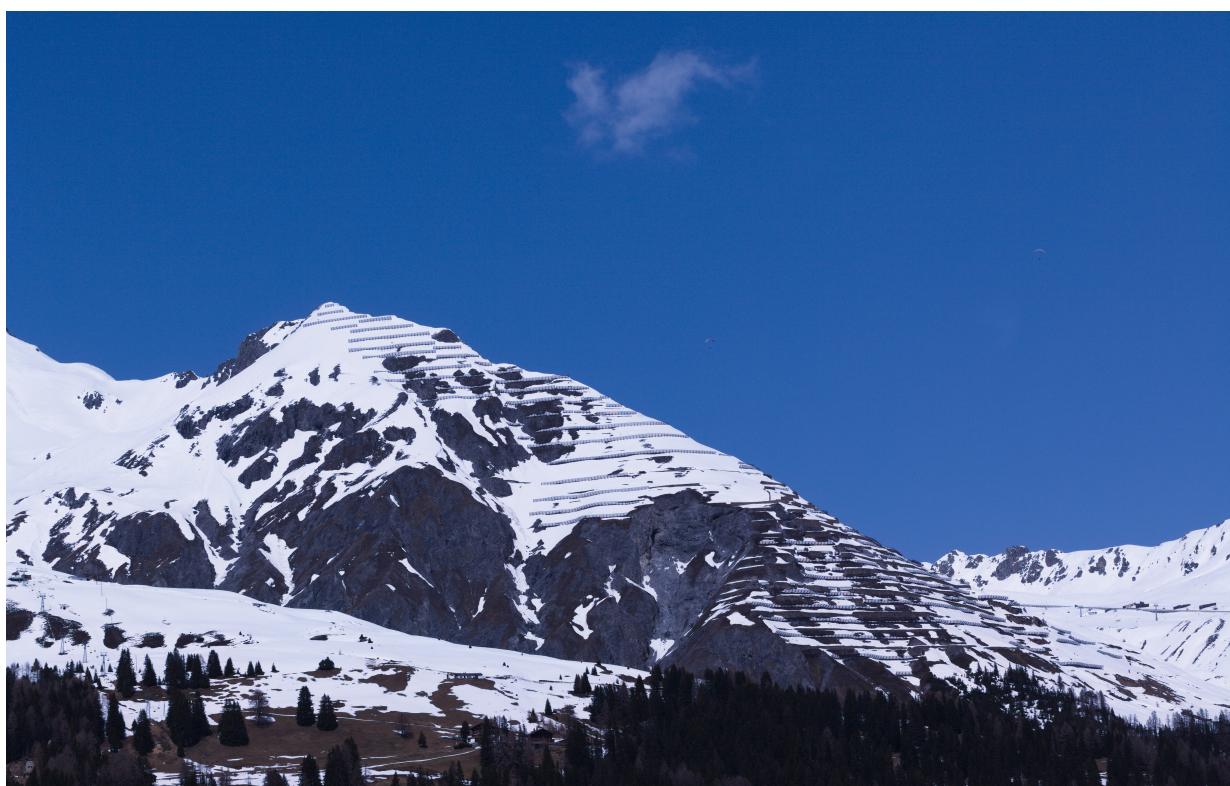
Innovative Sensorentwicklung für den Liquid Water Content von Schnee für die Lawinenvorhersage

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 Anteil von flüssigem Wasser im Schnee, auch Liquid Water Content (LWC) genannt, im Schnee zu messen. Der LWC ist ein wesentlicher Parameter, der die physikalischen Eigenschaften von Schnee und damit das Verhalten von Schneedecken maßgeblich beeinflusst. Durch ein genaues Verständnis dieses Parameters wird die Vorhersage von Lawinen verbessert. Insbesondere die Vorhersage von Gleitschneelawinen, die auf dem Untergrund 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: Mechanische Anregung 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 Werkzeug zur Bestimmung des LWC darstellt kann 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
KI	Künstliche Inteligenz
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	2
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 Stories	8
5 Vorstudie	10
5.1 Mechanische Anregung durch Vibration	10
5.2 Elektrischer Widerstand	12
5.3 Diffusion von Flüssigkeit	13
5.4 Refraktion und Reflexion eines Lasers	14
5.5 Water Indicator Tape	17
5.6 Reflexion zur Vorstudie	20
5.7 Auswahl des physikalischen Prinzips	20
6 Funktionsmusterentwicklung, Tests und Weiterentwicklung	21
6.1 Agiles Hardware Development	21
6.2 Messablauf	21
6.3 Eigenschaften der Funktionsmuster	23
6.4 Funktionsweise der Bildverarbeitung	25
6.5 Extrahieren von Informationen aus Bilddaten	27
6.6 Ergebnisse der Versuche	31
6.7 Mögliche Gründe der hohen Varianz der zweiten Iteration	36
6.8 Verbesserungsmöglichkeiten des Funktionsmusters	40
6.9 Vollautomatische Durchführung und Weiterentwicklung der Messung	41
7 Fazit	43
7.1 Persönliche Erfahrung	43
7.2 Fazit	43
7.3 Zusammenfassung	44

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, der Anteil wird im weiteren Text als Liquid Water Content (LWC) genannt.

Ziel dieser Arbeit ist, einen Sensor zu entwickeln, der den 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 Lawinengefährdeten 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 Funktionsmuster: 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, wie zum Beispiel User Storys, 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 ablagern, 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]

Die Metamorphose, und damit die Geometrie der Eiskristalle, hat einen weitreichenden Einfluss auf den Schnee. Dies wird relevant in der Vorstudie 5.1.

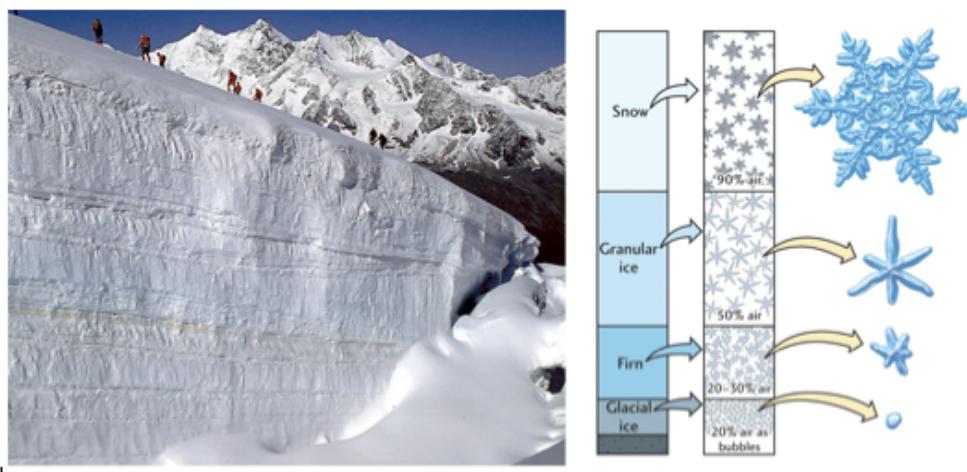


Abbildung 1: Darstellung der Schneemetamorphose, Bild aus [29]

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 ca. durch 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 Gleitschneelawinen ist stark von der Feuchtigkeit im Schnee abhängig. Diese Feuchtigkeit sammelt sich zwischen den Eiskristallen und stammt aus verschiedenen Quellen:

- Schmelzender Schnee, hauptsächlich geschmolzen durch Sonnenstrahlung und deren Reflexion an Wolken.
- 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.

Schnee ist ein heterogenes Gemisch aus festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen, eine Art Schaum aus Eis, Wasser und Luft. Seit 40 Jahren werden Techniken erforscht und Methoden entwickelt, um den LWC zu messen.

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

Die User Stories werden genutzt, um sich früh Gedanken über den Einsatz des fertigen Produkts zu machen. Aus einer User Story können dann Benutzeranforderungen, Musskriterien und so weiter abgeleitet werden.

- 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 einem 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 ab, 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 Anwendung richtig ist, werden anfangs unterschiedliche Methoden offen 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 wichtige Möglichkeiten ausgeschlossen werden könnten.

5 Vorstudie

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

Es wurden sechs Methoden gewählt, die eine hohe Erfolgswahrscheinlichkeit, einen abschätzbaren 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 mechanischer Anregung von einem festen in den flüssigen Zustand übergeht. Ob der Übergang stattfindet oder nicht, könnte vom LWC Wert abhängen.

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 inspiriert. Der AvaNode ist eine laufende Produktentwicklung des Instituts IPEK der OST, mit dem Lawinenhänge überwacht werden sollen. Der für das Objekt und Verfahren gewählte Name ist VibraNode. Für die Umsetzung wurde ein morphologischer Kasten mit drei Varianten erstellt.

Morphologischer Kasten VibraNode

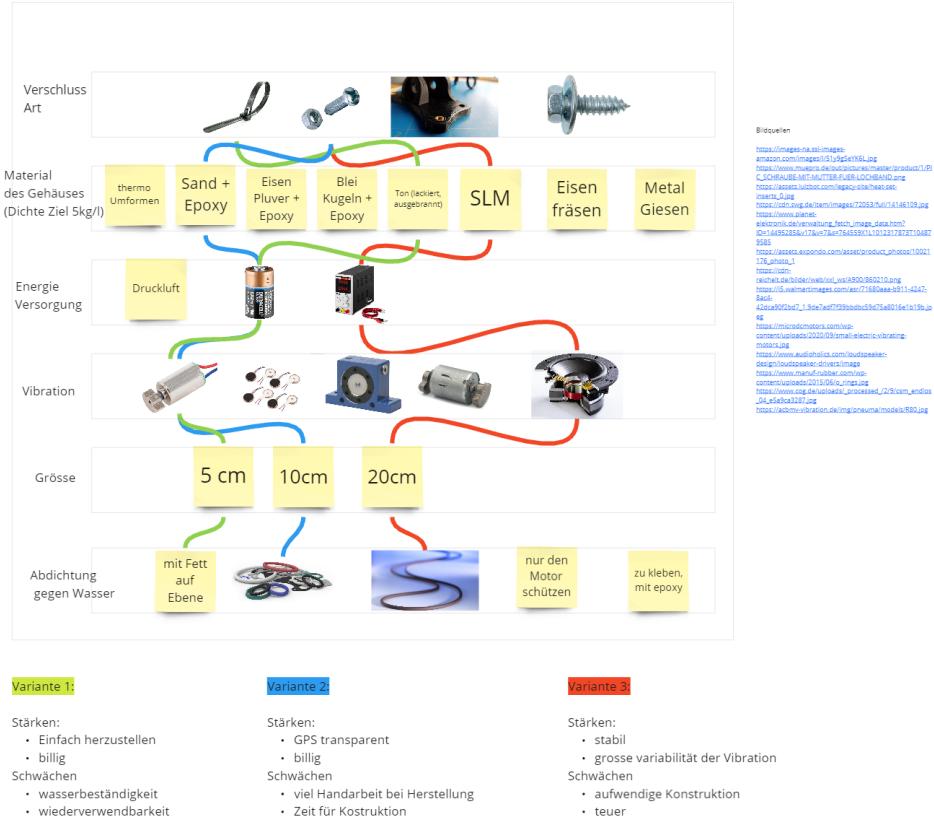


Abbildung 2: Morphologischer Kasten für VibraNode

Die in Abbildung 2 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 eines Drucks von 16'000 Pa, respektive 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, obschon der Schnee durchnässt war, 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 beziehungsweise dem flüssigem Wasser auf den Eiskristallen einen Stoff zuzugeben, der das Gemisch leitfähig macht. Dann wird der Versuchsaufbau mehr in die Richtung Diffusion gehen (siehe 5.3), wo die Ausbreitung eines Stoffes im Schnee beobachtet wird. Beobachtet würde dann anstelle der optischen Eigenschaften, die Leitfähigkeit.

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. In der Abbildung 21 ist der Versuchsaufbau dargestellt. Die Auswertung bei dem Vorversuch erfolgt visuell, indem beobachtet wird, wie sich blaue Tinte im Schnee ausbreitet.

Eine Kombination dieses Ansatzes mit der Leitfähigkeitsmessung (siehe 5.2) ist möglich, wenn ein leitfähiger Stoff eingesetzt wird.

Ich vermute, dass dieser Ansatz von der Geometrie des Schnees beeinflusst wird. Wieviel flüssiges Wasser vorhanden ist, ist sekundär zu wie die Eiskristalle miteinander verbunden sind.

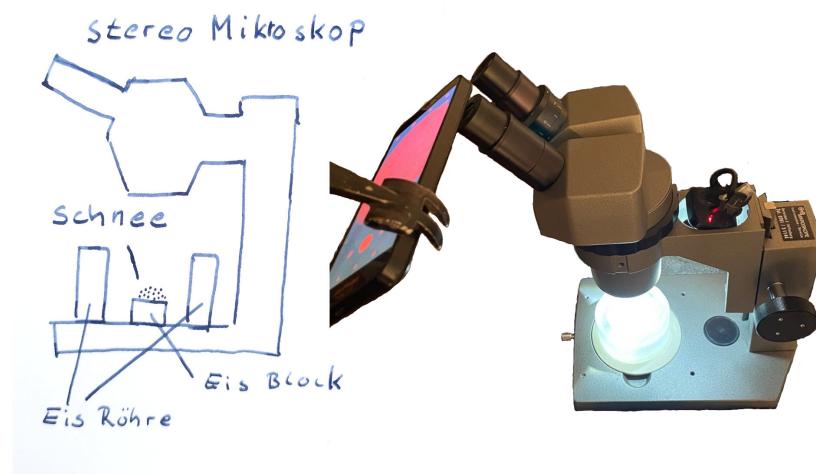


Abbildung 3: Aufbau einer Messung wo der Schnee durch eine Eis Röhre gekühlt wird

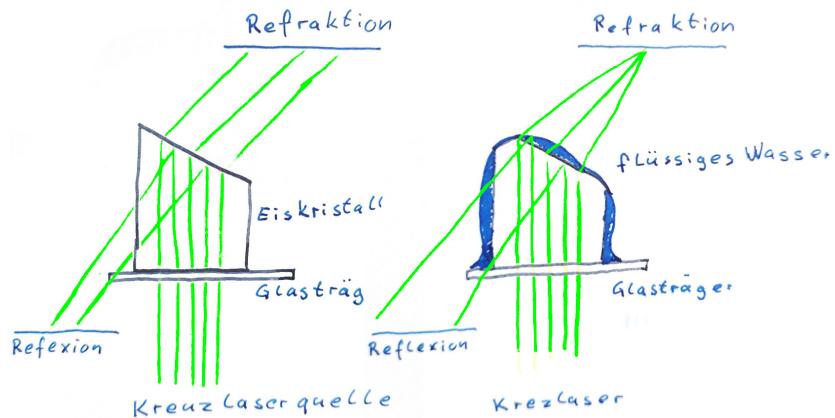


Abbildung 4: Hypothese wie das flüssige Wasser die optischen Eigenschaften der Eiskristalle beeinflusst

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 Wasserlinsen sollten in der Refraktion sichtbar werden, indem sich helle und dunkle Bereiche bilden.

Die Effekte der Linsen sollten in der Refraktion sichtbar werden, indem es helle und dunkle Bereiche sich bilden.

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 ($<5\text{mW}$) genutzt. Um sowohl die Reflexion als auch die Refraktion gleichzeitig zu sehen, wurde die Schneeprobe auf einen Mikroskop-Objektträger platziert. Die Ergebnisse des Lasers wurden jeweils auf weissem Papier dargestellt. Die Refraktion wird auf dem Papier an der Unterseite der in Abbildung 6 zu sehende Holzplatte dargestellt. Mit einem Smartphone wurde eine Videoaufnahme gemacht, wie sich die Ergebnisse des Lasers verändern,



Abbildung 5: Versuchsaufbau der Laser Reflexion und Refraktion

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 dem 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.

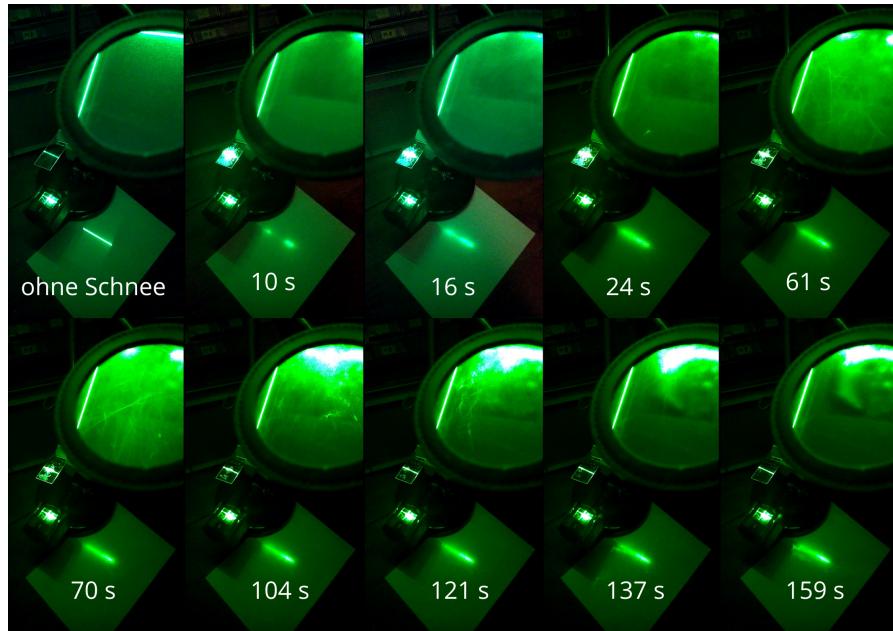


Abbildung 6: Messgrößen für die Reflexion und Refraktion, Veränderung über Zeit

Messgrößen:

Die Inhomogenität des Laserlichts 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 die Messung der Refraktion durchzuführen, muss eine physikalisch unverändert Schneeprobe durchleuchtet werden. Dies stellt eine Herausforderung, dar, da der Schnee aus der Schneedecke aufwendig extrahiert werden muss.

Das Ergebnis der Reflexion ist schwer zu beurteilen. In [27] ist die Reflexion von EM-Wellen bereits mit Erfolg untersucht worden, in Abbildung 20 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 Indicator Tape

Das Water Indicator 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 Methode 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.

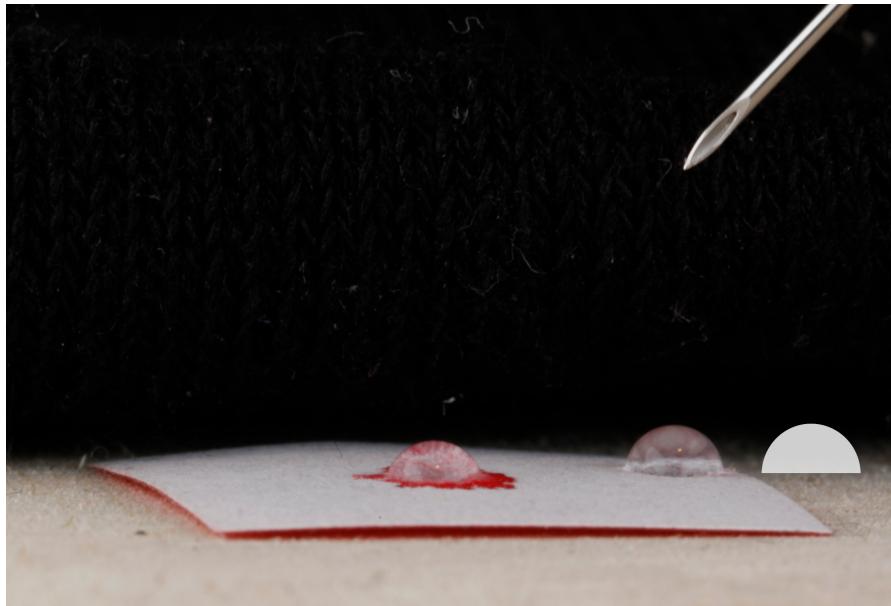


Abbildung 7: Messung des Kontaktwinkels. Links ist ein Tropfen zu sehen, der mehrere Minuten auf dem Tape verweilt. Rechts ist ein neuer Wassertropfen, daneben noch der gefittete Kreis.

Widerstand gegen Umwelteinflüsse

Um zu verhindern, dass das Tape den Schnee anschmilzt und die Werte verfälscht, muss das Tape mit einem Kältemittel gekühlt werden. Daher ist es wichtig abzuklären, wie das Tape auf chemische Stoffe und thermische Veränderungen reagiert.

Chemisch getestet wurden zuerst Isopropanol, Nitroverdünnner und Aceton. Das Tape verfärbte sich temporär. Nachdem das Lösungsmittel abgedampft war, konnten keine Veränderung am Tape mehr festgestellt werden. Wenn das Tape nun jedoch mit Wasser aktiviert wurde, konnte beobachtet werden, dass die vorbehandelten Bereiche stärker auf Feuchtigkeit reagierten.

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.

Zusätzlich wurden auch die thermischen Eigenschaften bei Wärmeeinwirkung getestet. Bei Wärmeeinwirkung mit einer Heissluftpistole hat sich zum einen der Klebstoff gelöst und das weisse Papier des Tapes wurde braun. Die Bereiche des Tapes, die nach dem abkühlen noch weiss waren, haben auf Wasser noch immer gut reagiert. Die Braun verfärbte Teile konnten kein Wasser mehr anzeigen. Die Hitzeentwicklung beispielsweise durch die Lagerung des Tapes in einem Fahrzeug, das in der Sonne steht, sind aber deutlich niedriger.

Der Temperatureinsatzbereich ist vom Hersteller als - 40 bis 121 Grad Celsius angegeben.

5.6 Reflexion zur Vorstudie

Von den sechs 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 des Schnee. Das spiegelt sich in der Vielfalt an möglichen Messmethoden wieder. Die gesamte Vorgeschichte und Metamorphose 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. Siehe Kapitel 2.1.

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 sechs getesteten Messprinzipien versuchen auf unterschiedliche Weise, ein Einfluss 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, wurde folgende Priorisierung der Fertigungstechniken erstellt:

1. Bestehendes Objekt benutzen und modifizieren
2. Von Hand ausschneiden - Verwendung von Karton
3. IR-Lasercutter - Verwendung von Sperrholz
4. 3D-Druck in FDM
5. Einkaufsteile kaufen
6. Weitere eigene Fertigungsweisen (manuell drehen, fräsen, töpfen 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 eine Messung mit dem Tape zu machen, muss das Tape mit dem zu messenden Schnee in Kontakt gebracht werden. Der Messablauf, wie der Schnee vorbereitet wird und wie das Tape mit dem Schnee in Kontakt kommt, ist das Hauptergebniss der Bachelorarbeit.

Um an möglichst viele Schneetypen anwendbar zu sein, ist das Andrücken des Tapes an den Schnee 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 einen kleinen Schneegraben schaufeln.
3. Auf den jeweils zu messenden Höhen je eine saubere horizontale Fläche im Schnee mit einer Blechklinge freilegen.
4. Das Stativmaterial wird im Schnee aufgebaut.
5. Mit der Federwaage die maximale Traglast des Schnees an der freigelegten Stelle ermitteln.
6. Die Gewichte der Tape-Halter mit 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 auf 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. 2 Minuten warten, sodass das Wasser aus dem Schnee auf das Tape übergehen kann.

-
14. Mit Druckluft aus einer Dose allfällige Schneeflocken vom Tape entfernen.
 15. 5 Minuten 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 und Messabläufe beschrieben. Es werden hier nur die wichtigen 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 zum 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 besitzen, 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 (siehe Abbildung 8) 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.



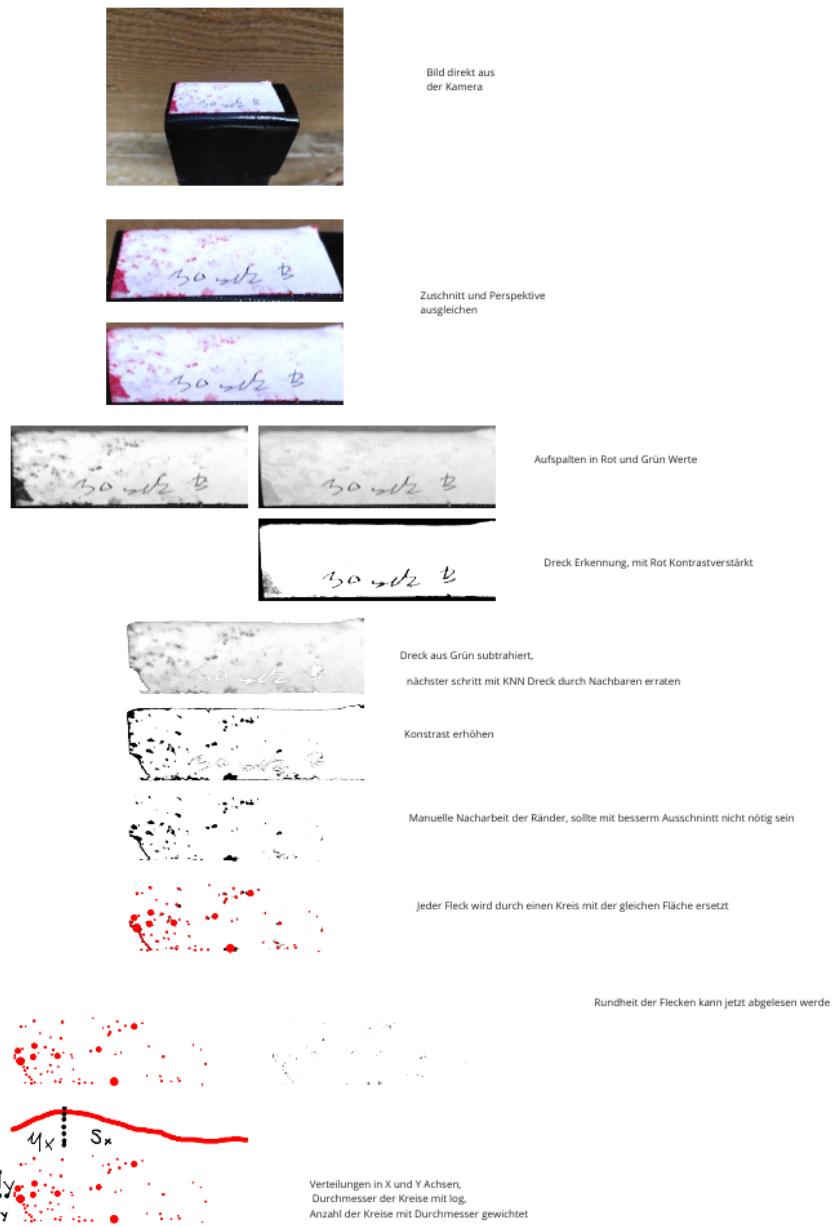
Abbildung 8: Fünfte Iteration, mit Sicht von unten in die Lichtbox

6.4 Funktionsweise der Bildverarbeitung

Die Auswertung des Tapes kann auf zwei Arten passieren. Eine einfache Variante, die bei den Vorversuchen genutzt wird, besteht darin mit den eigenen Augen die Grösse und Verteilung des Rots auf dem Tape abzuschätzen.

Um dieses subjektive Schätzung durch eine objektive Quantifizierung zu ersetzen, wurde eine Pipeline zur digitalen Auswertung entwickelt. In einem ersten Schritt, illustriert in Abbildung 9, wird die Fotografie eines Tape ausgewählt und in ein schwarz-weisses Bild übersetzt, so dass die vorher roten Farbflecken nun deutlicher erkannt werden können.

Um aus dem Bild quantitative Zahlen zu bekommen, werden die Flecken nun einzeln erfasst und in einer Datenbank gespeichert. In der Datenbank können dann statistische Aussagen über die Verteilung, Grösse der Flächen, die Struktur und die prozentualen 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

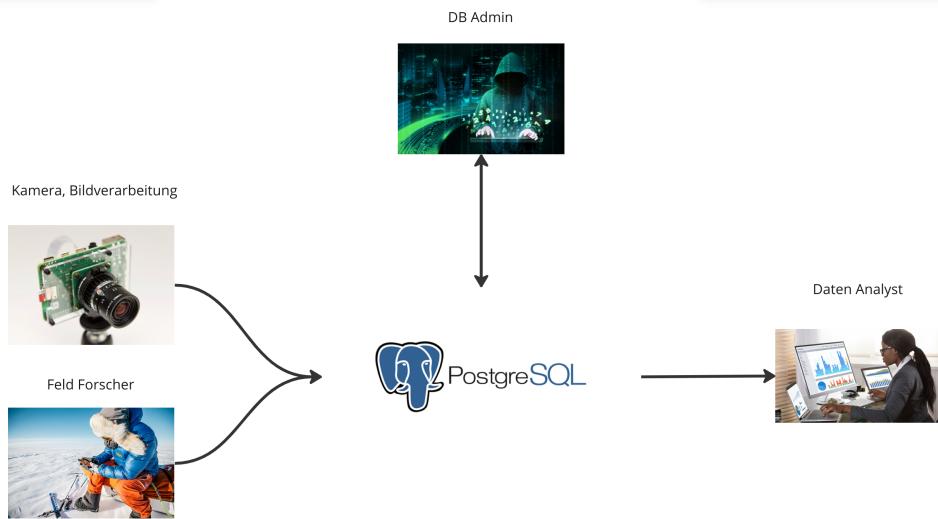


Abbildung 10: Benutzer der Datenbank

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 Abbildung 10 ist die schematische Darstellung zu sehen.

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.

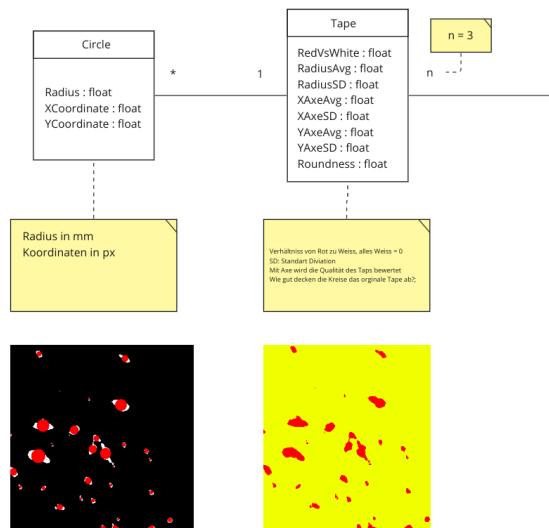
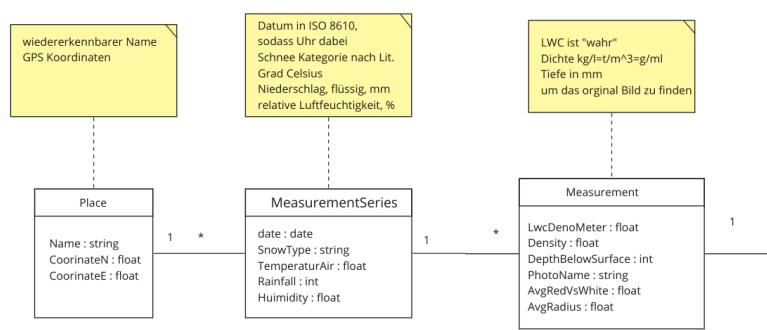


Abbildung 11: UML-Diagramm des konzeptuellen DB-Entwurfs

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 (siehe 6) auch noch die Bildanalyse auf.

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 Produktentwicklung 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 Datenbank an die tatsächliche Nutzung angepasst.

6.6 Ergebnisse der Versuche

Erster Feldversuch

In dem 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. Die Ergebnisse sind in Abbildung 12 zu sehen.

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 (Versuchsstelle in Abbildung 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.

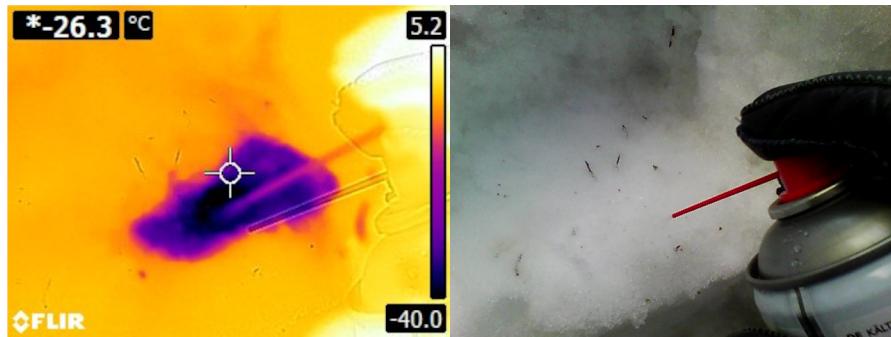


Abbildung 13: Wärmebildaufnahme der gekühlten Schneestelle, welche zur Simulation eines niedrigen LWC verwendet wurde.



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 (siehe Abbildung 16) 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. Die Ergebnisse sind in Abbildung 18 zu sehen.



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 20 zeigt die Inhomogenität, besonders bei LWC-Werten über 10 %.

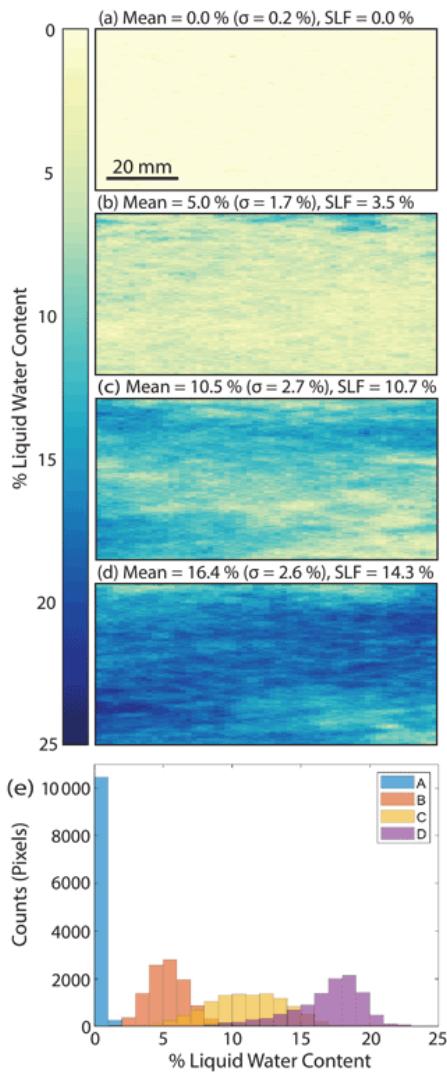


Abbildung 20: Schnee der schmiltz, gemessen mit IR-EM Wellen von Herrn Donahue in [27]

Mit einer Ishikawaanalyse (zu sehen in Abbildung 22) wurde das Problem der hohen Varianz genauer analysiert.

Die wichtigsten Einflüsse auf die hohe Varianz 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.
- 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 22.

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 ?? 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.

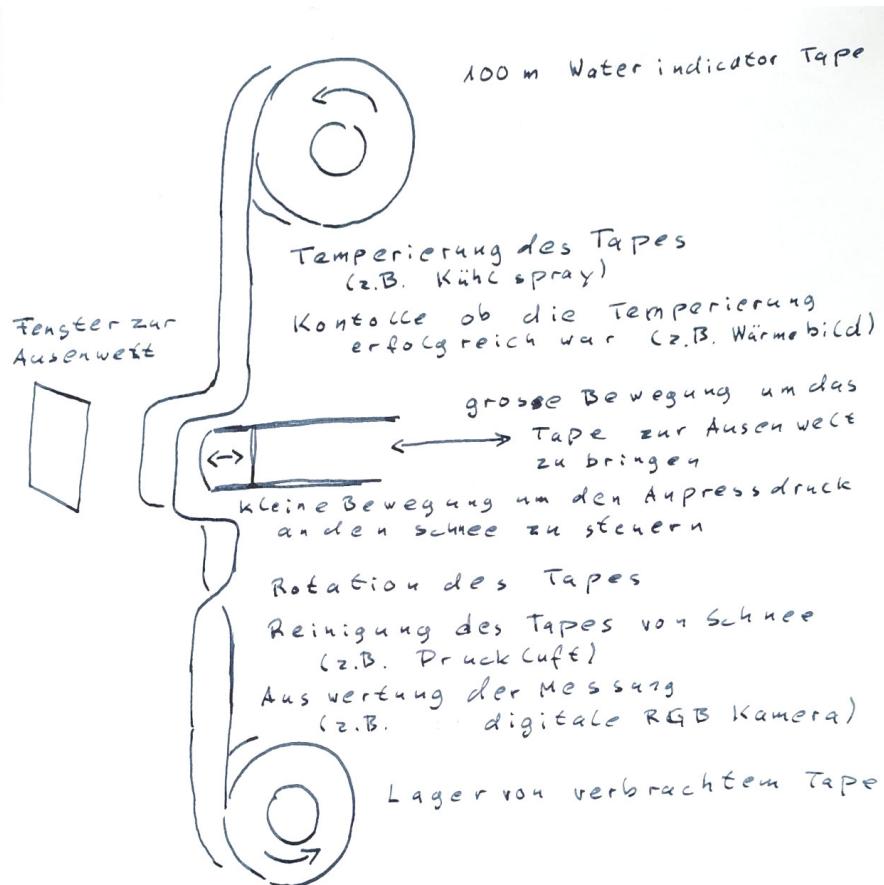


Abbildung 21: Ablauf einer automatischen Messung

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.

Alle Abbildungen ohne explizite Quellenangabe sind vom Author erstellt.

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	13
4	Hypothese wie das flüssige Wasser die optischen Eigenschaften der Eiskristalle beeinflusst	14
5	Versuchsaufbau der Laser Reflexion und Refraktion	15
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	25
9	Bildverarbeitung Konzept	26
10	Benutzer der Datenbank	27
11	UML-Diagramm des konzeptuellen DB-Entwurfs	29
12	Drei Tapes gemessen bei nassem Schnee, da es geregnet hat: 1. 5 Sekunden Anpresszeit, 2. 30 Sekunden Anpresszeit, 3. 120 Sekunden Anpresszeit	31
13	Wärmebildaufnahme der gekühlten Schneestelle, welche zur Simulation eines niedrigen LWC verwendet wurde.	32
14	Messstandort in Davos, unter dem Regenschirm ist das Tape gelagert, um es vor direkter Sonneneinstrahlung und Wasser Tropfen zu schützen.	32
15	Tapes aus dem ersten Feldversuch: 1. Unveränderter Schnee, 2. Gekühlter Schnee (siehe Abb. 13), 3. Mit flüssigem Wasser übergossener Schnee.	33
16	Messaufbau von drei Tapes auf unverändertem Schnee	34
17	Messung von sechs Tapes mit zwölf Stahlplatten und einem Gesamtgewicht von 514 g auf unverändertem Schnee, um die Varianz der Messergebnisse zu bestimmen.	35
18	Messung von sechs Tapes auf dem selben unverändertem Schnee, um die Einflüsse des Messen auf den Schnee zu erkennen.	36
19	10 Messungen von vergleichbarem, unverändertem Schnee	37
20	Schnee der schmiltz, gemessen mit IR-EM Wellen von Herrn Donahue in [27]	38
21	Ablauf einer automatischen Messung	42

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

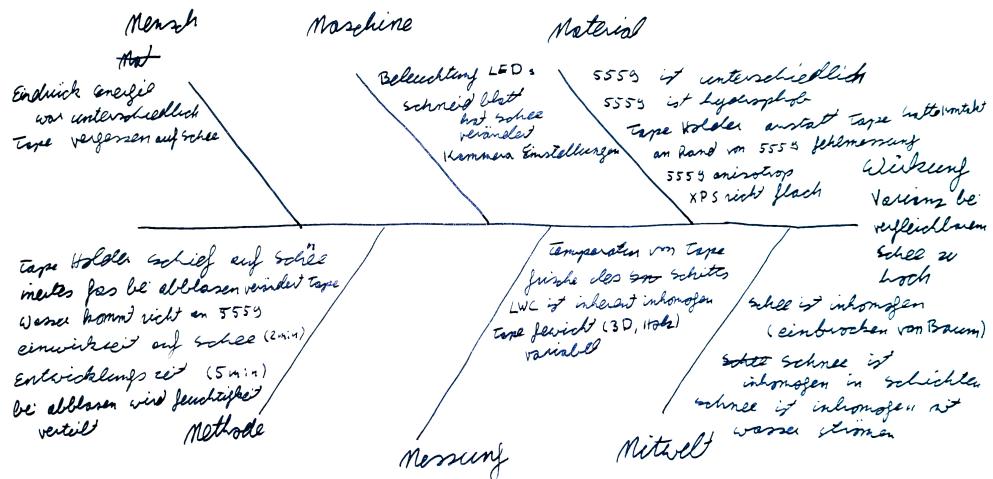


Abbildung 22: Ishikawa Fehler Analyse für die Messung des Funktionsmusters 2

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 MeasurmentSeries (
    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 ,
    XCoordinatE INT NOT NULL ,
    YCoordinatE 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.XAxeS
FROM Place mo
JOIN MeasurmentSeries mr ON mo.id = mr.Place_id
JOIN Measurment m ON mr.id = m.MeasurmentSeries_id
JOIN Tape t ON m.id = t.Measurment_id;

```

Listing 4: SQL-Code für Beispiel Daten

```

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

```

```

INSERT INTO MeasurmentSeries (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, Measurement_id):
    """
    Calculate statistics on a DataFrame containing circle data and insert them.

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

    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)

return mean_radius

def insert_data_tape(mean_radius, mean_x_coordinate, mean_y_coordinate, std_radius):
    """
    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, xaveavg, yavesavg, radiussd, xavesd, yavesd)
             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,
                          std_radius, std_radius, std_radius))
        # 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_c
    """
    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 circle data.

    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_process(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 Measurment_id from the database.

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

Returns:
    int: The last inserted Measurment_id incremented by 1.
"""

cur.execute("SELECT id FROM Measurment")
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
    """

    Returns:
        None
    """

    sql = """INSERT INTO Measurment (MeasurementSeries_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, (MeasurementSeries_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 MeasurementSeries 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_Measurement_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()
```