

Entwicklung und Evaluierung eines Teststandes zur Erzeugung planarer Eisschichten

Bachelorprojekt 2021

Mader, Kevin Rafael, 4732503, mail@kevin-mader.de

Mit Abgabe des Protokolls erklärt die oder der Verfassende, dass sie oder er das Protokoll in Eigenarbeit angefertigt und darin enthaltenes Fremdmaterial entsprechend gekennzeichnet hat. Darüber hinaus sind alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Schriften entnommen wurden, als solche gekennzeichnet. Des Weiteren ist dem Verfasser bekannt, dass eine Zuwiderhandlung als Plagiat gewertet wird und zum Ausschluss aus dem Praktikum führt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Theoretischer Hintergrund.....	1
1.2.1	Nachbildung der natürlichen Entstehung von Eis	1
1.2.2	Messung von Schichtdicken	1
1.3	Konstruktion des Messaufbaus	1
1.4	Steuerung des Messaufbaus	3
1.5	Charakterisierung	4
1.5.1	Erzeugung von Eisschichten	4
1.5.2	Messbereich und vertikale Auflösung	6
1.5.3	Reproduzierbarkeit.....	6
1.5.4	Differenzelle Höhenmessung	8
1.6	Datengenerierung / Visualisierung.....	9
1.7	Optionen der Erweiterung	9
2	Diskussion.....	10
3	Zusammenfassung.....	11
4	Literaturverzeichnis.....	11

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Zur Charakterisierung von Sensoren müssen bei der Entwicklung Sensormesswerte mit den zu messenden Parametern gegenübergestellt werden können. In der hier geplanten Anwendung soll der Teststand Eisschichten auf einer planaren Oberfläche erzeugen und ein Höhenprofil dieser Schicht ermitteln können, ohne die generierte Schicht bei der Messung zu beschädigen.

1.2 Theoretischer Hintergrund

1.2.1 Nachbildung der natürlichen Entstehung von Eis

Durch die Kondensation der Luftfeuchtigkeit kann Eis auf kalten Oberflächen entstehen. Um unter Laborbedingungen gezielt hohe Luftfeuchtigkeit zu erreichen wird Luft durch ein Wasserbecken gepumpt. Die Luft nimmt die maximal mögliche Menge an Wasser auf und kann anschließend in einen Testaufbau geleitet werden. Die absolute Wassermenge steigt mit der Temperatur der Luft.

Auch Nebel kann auf kalten Oberflächen Eis bilden, indem die freien Wasserpartikel auf die Oberfläche treffen und gefrieren. Nebel kann durch Ultraschallvernebler im Labor kosteneffizient künstlich erzeugt werden.

Eisbildung durch gefrierenden Regen lässt sich im Labor durch Aufsprühen von Wasser mit Zerstäubern realisieren.

1.2.2 Messung von Schichtdicken

Schichtdicken werden, abhängig von benötigter Auflösung, Messbereich und Material über verschiedene Messmethoden wie Reflexion von Licht oder Schall, mechanische Abtastung, Interferenzmessung oder durch Bestimmung der Resonanz ermittelt.

In diesem Versuch wurde eine mechanische Abtastung gewählt, da ein Messbereich von 10mm erreicht werden soll und Eis Linseneigenschaften aufweist, was eine optische Triangulationsmessung unmöglich macht. Durch das Anbauen einer Tasteinheit an eine Spindel können Distanzen über die Drehung über den Drehwinkel bestimmt werden. In diesem Aufbau wird ein Schrittmotor zur Ansteuerung eingesetzt, wodurch der Drehwinkel über die ausgeführten Schritte des Motors bestimmbar ist.

1.3 Konstruktion des Messaufbaus

Der Messaufbau ist dafür vorgesehen in einem Klimaschrank bei einer Umgebungstemperatur von $2^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\text{ambient}} \leq 5^{\circ}\text{C}$ betrieben zu werden. Hierdurch werden Störungen wie z.B. das Antauen des Eises während einer Abrasterung vermieden.

Der Messaufbau besteht aus den zwei Baugruppen Kühlkammer und Abtastung. Die Kühlkammer wird durch Verspannen in den Messaufbau montiert. Eine Verwendung der Kühlkammer ohne den mechanischen Aufbau der Abtastung oder umgekehrt ist somit problemlos möglich.

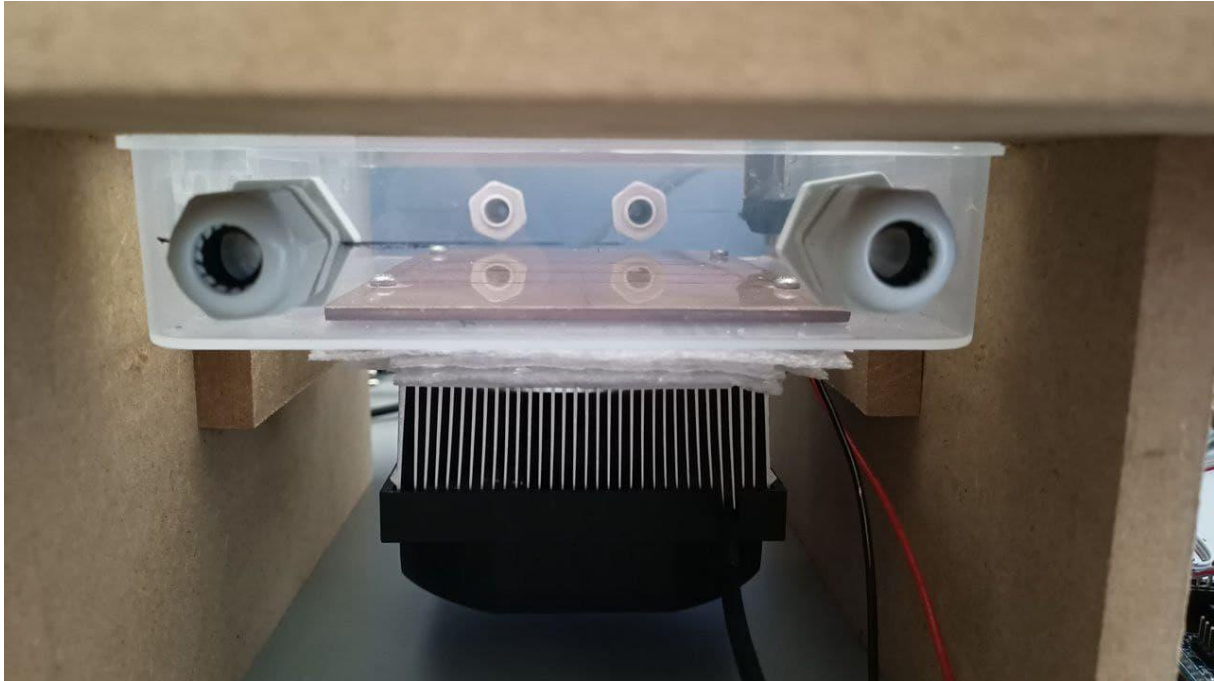


Abbildung 1: Kühlkammer des Messaufbaus in Seitenansicht.

Die Kühlkammer, wie in Abbildung 1 dargestellt, besteht aus einer oben offenen Kunststoffbox aus ABS. Innerhalb der Box ist eine Kupferplatte verbaut, welche rückseitig mit einem Peltierelement TEC1-12706 verbunden ist um negative Temperaturen zu erreichen. Die Abwärme wird mittels eines Prozessor-Kühlkörpers des Typs Alpine 11 Plus von Arctic an die Umgebung abgegeben. Um die Rückführung von Wärme vom Kühlkörper zurück in die Kühlkammer möglichst gering zu halten, wurde zusätzliches Isoliermaterial zwischen Kühlkörper und Kupferplatte eingebracht.

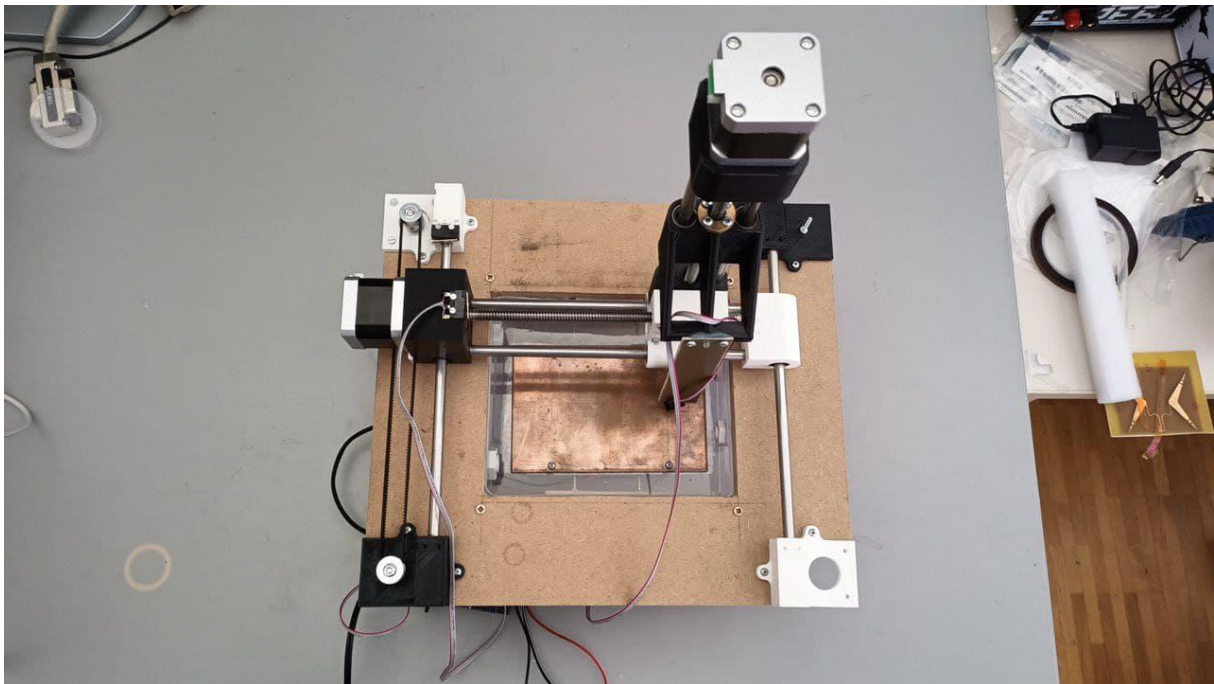


Abbildung 2: XYZ-Antrieb zur Abtastung der Oberflächen in der Kühlkammer.

Die Mechanik zur Abtastung von Höhenprofilen ist auf einer 16mm starken MDF-Platten mit einer Breite von 340mm und einer tiefe von 320mm montiert. Für jede der Achsen des Aufbaus wurden zwei

Edelstahlstangen mit 8mm verbaut, auf welchen jeweils zwei Gleitlager des Typs LM8UU laufen, die in die gedruckten Kunststoffteile verpresst wurden.

Der Antrieb der Y-Achse erfolgt über einen GT2-Zahnriemen um die Bautiefe gering zu halten und dennoch den benötigten Raum der Abtastung zu gewährleisten. Für X- und Z-Achse wurden für höhere Präzision T8-Trapezgewindespindel mit einer Steigung von 2mm verbaut. In den bewegten Kunststoffteilen befinden sich spielfreie Spindelmuttern.

Wie in Abbildung 2 zu erkennen, sind die rechtsseitigen Kunststoffteile der Y-Achse identisch zur linken Seite. Es ist somit Möglich bei Bedarf einen zweiten X-Schlitten im Testaufbau zu verbauen wenn hierfür eine Notwendigkeit besteht.

Alle Kunststoffteile wurden mit einer Schichtdicke von 0.3mm und einer Füllung von 25% mit aktiviertem Support gedruckt. Als Drucker dienten Ultimaker 3 und Ultimaker 2+.

Die Abtastung Erfolgt mit einem Taster des Typs Cherry MX1A-51NN, da dieser gut dokumentiert ist [1] und eine lineare Betätigungskraft benötigt und keine merkbare Schaltschwelle aufweist, was ruckartige Veränderungen am Eis und Z-Antrieb vermeidet. Als Tastkopf kann eine Spitze aus einem Material mit geringer Wärmekapazität und -leitfähigkeit wie ABS oder PLA eingesetzt werden, um die abgetastete Fläche sauber zu definieren und gleichzeitig einen möglichst geringen Einfluss auf zu messende Eisschichten auszuüben.

Die verwendeten Teile wurden entsprechend der Verfügbarkeit ausgewählt. Eine Anpassung des Aufbaus mit anderen Materialien ähnlicher Eigenschaften ist möglich, jedoch muss jeder Nachbau neu charakterisiert werden. Größenbeschränkungen des Aufbaus sind gegeben durch die verwendete Klimakammer VCL4010 der Firma Vötsch.

Die konstruierten Kunststoffteile des Aufbaus sowie Firmware und die verwendeten Python-Programme zur Datenauswertung sind im Repository zu diesem Projekt [2] frei zugänglich.

1.4 Steuerung des Messaufbaus

Um den Messaufbau simpel zu halten, wird im Messaufbau die serielle Schnittstelle des Arduino Mega zur Übertragung von Steuerbefehlen und Messwerten verwendet.

Befehle für den Messaufbau sind im ASCII-Format mit beendendem Zeilenumbruch $\backslash n$ codiert. Tabelle 1 zeigt alle verfügbaren Befehle zur Steuerung der einzelnen Achsen mit $N \in \{X, Y, Z\}$. Angegebene Fahrdistanzen sind Beispiele und beziehen sich immer auf den Abstand zum Endstop.

Tabelle 1: Achsenspezifische Steuerbefehle des Aufbaus.

Befehl	Funktion
N HOME	Home Achse N
N 10	Absolutes Verfahren der Achse auf Position 10mm
N +10	Relatives Verfahren der Achse um 10mm
N -10	Relatives Verfahren der Achse um -10mm
N +10s	Relatives Verfahren der Achse um 10 Schritte
N -10s	Relatives Verfahren der Achse um -10 Schritte

Befehle zum automatischen Durchführen von Messungen werden während der Verwendung des Messtandes hinzugefügt und sind momentan nicht implementiert.

1.5 Charakterisierung

1.5.1 Erzeugung von Eisschichten

Zur Erzeugung von Eisschichten wurden drei Ansätze verfolgt: Einführen hoher Luftfeuchtigkeit, Vernebeln von Wasser innerhalb der Kammer sowie direktes aufsprühen von Wasser auf den Sensor.

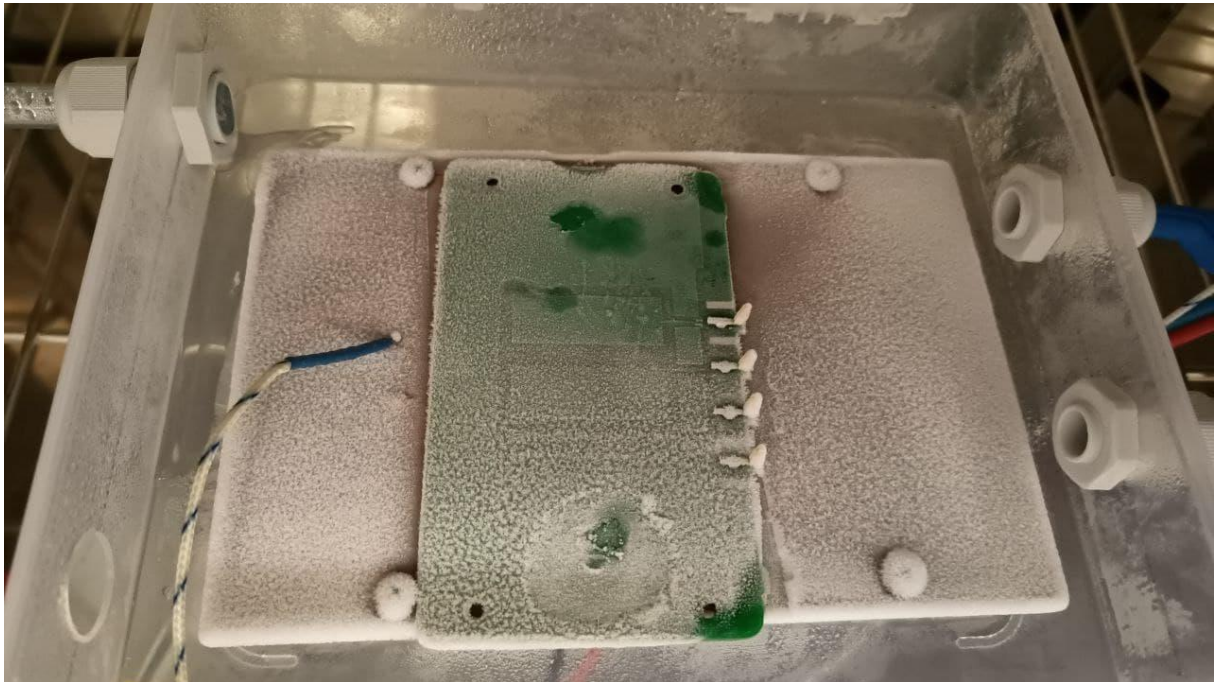


Abbildung 3: Generierte Eisstrukturen durch Zufuhr von Luft mit hoher Luftfeuchtigkeit.

Durch Einleitung von Luft in die Testkammer über ein Wasserbad wurde die zugeführte Luft mit einer Temperatur $\theta_{luft} = 23^{\circ}\text{C}$ mit Feuchtigkeit angereichert. Die Luftfeuchtigkeit gefriert beim passieren der Sensorfläche und bildet Kristallstrukturen auf der Oberfläche, wie in Abbildung 3 zu erkennen.

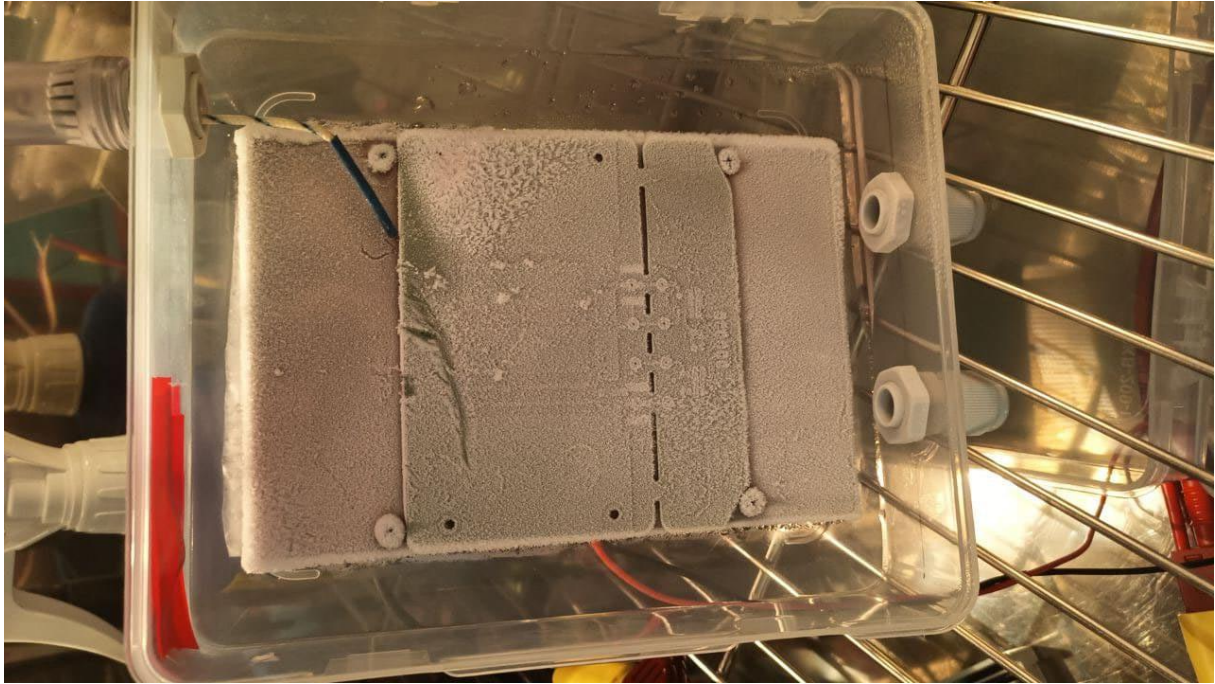


Abbildung 4: Erzeugte Eisschicht durch Einbringen eines Ultraschallverneblers in die Kühlkammer.

Vernebeln von Wasser mittels Ultraschallverneblern sorgt für eine hohe Konzentration freier Wassertröpfchen in der Kühlkammer, welche sich analog zur hohen Luftfeuchtigkeit zu Kristallstrukturen auf der Sensoroberfläche verbinden.

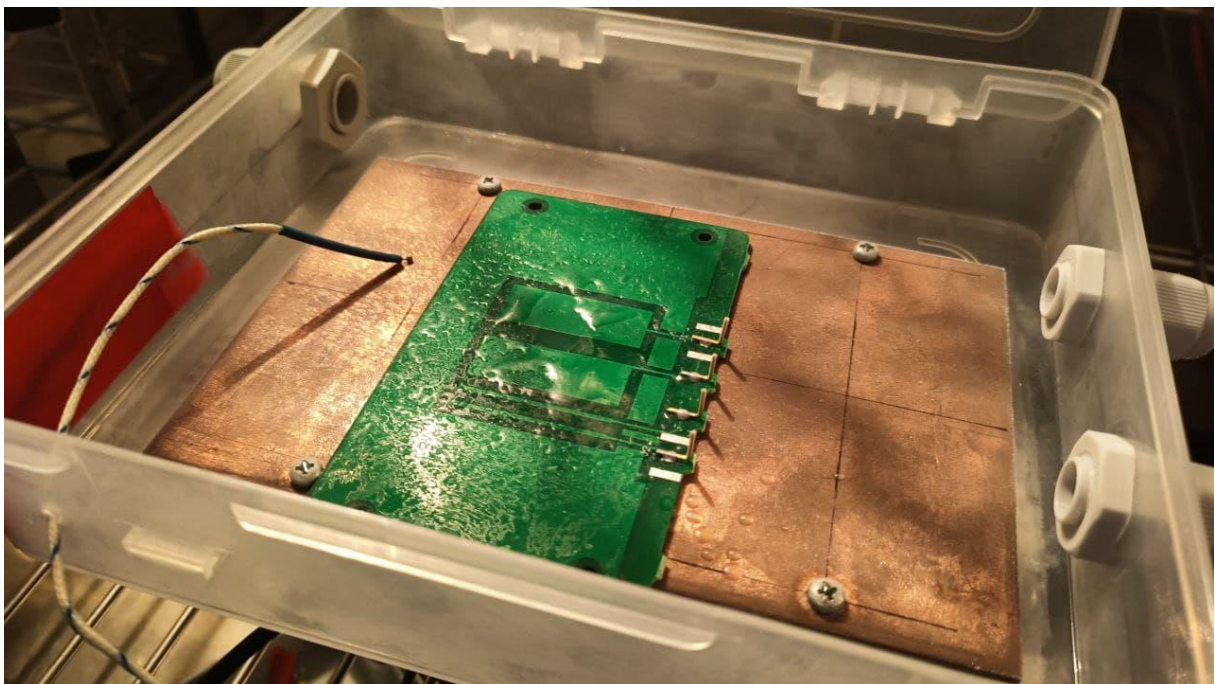


Abbildung 5: Durch Aufsprühen von Wasser generierte Eisflächen.

Direktes Aufsprühen von Wasser auf eine Sensorfläche erzeugt größere Eisflächen, wie Abbildung 5 darstellt. Das Eis ist nicht homogen, sondern bildet kleinere Inseln auf dem Sensor.

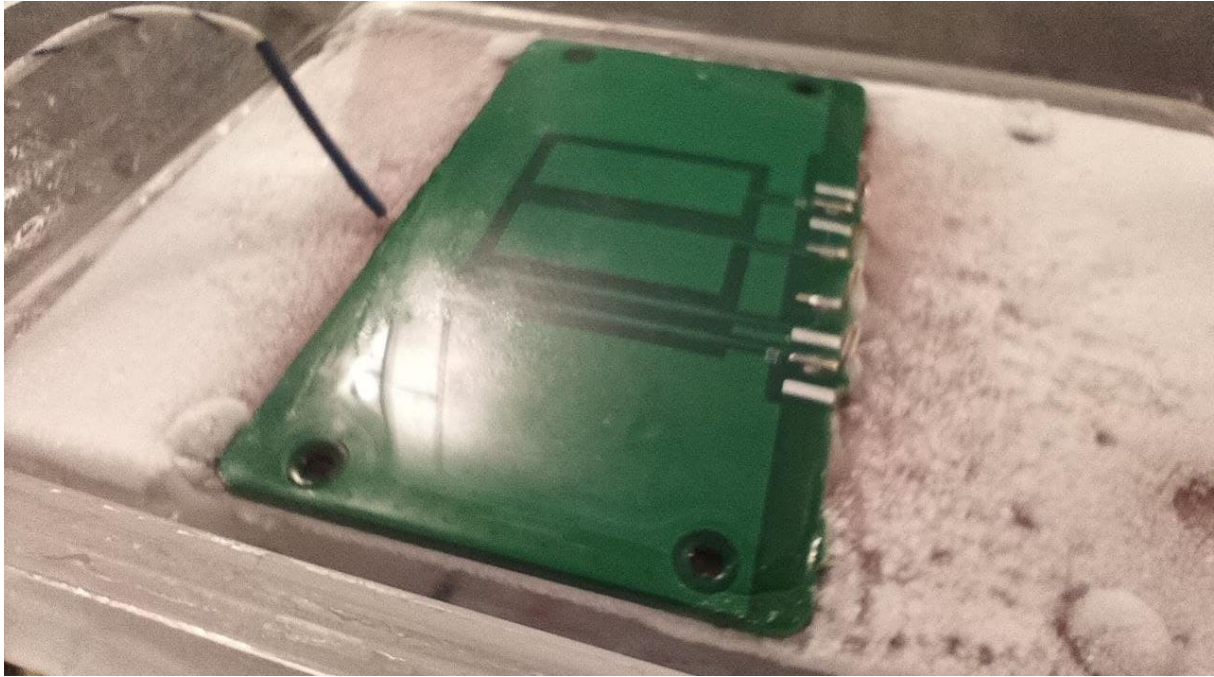


Abbildung 6: Homogene Eisschicht durch eine Kombination aus Vernebeln und Besprühen.

Abbildung 6 zeigt eine homogene Eisschicht, die durch benebeln der Platine mit Wasser und anschließendes Besprühen erzeugt wurde. Die Benetzung der Fläche ist gleichmäßig und es sind mit bloßem Auge keine Unreinheiten im inneren des Eises erkennbar.

1.5.2 Messbereich und vertikale Auflösung

Der Messaufbau wird angetrieben über NEMA 17-Motoren mit einem Schrittwinkel von 1.8° , angesteuert durch einen DRV8825 im 1/32 Microstepping. Unter Betrachtung der verbauten T8-Trapezgewindespindel mit 2mm Steigung ergibt sich somit eine minimale Auflösung der Z-Achse von

$$\Delta h_{min} = 2\text{mm} \cdot \frac{360^\circ}{1.8^\circ} \cdot \frac{1}{32} = 312,5\text{nm}$$

Gegeben durch die Konstruktion ist die messbare Grundfläche 150x80mm bei einer maximalen Höhe von 40mm über der Grundplatte.

1.5.3 Reproduzierbarkeit

Zur Messung der Reproduzierbarkeit fährt der Aufbau mehrfach das gleiche Muster ab und nimmt bei jedem Durchlauf 60 Messungen der Grundplatte an verschiedenen Punkten auf. Hierbei wird einmalig vor Beginn der Messung ein Punkt auf der Trägerplatte als 0 referenziert und anschließend der Tastkopf auf eine Höhe von $h_{start} = 6\text{mm}$ (19.200 Schritte) über der Messfläche gefahren. Für die Messung wird der Tast-Kopf abgesenkt, bis der Taster ein Signal durch Berühren der Grundfläche gibt. Die Differenz der Schritte zum referenzierten Punkt ergibt somit die Höhendifferenz anhand der in 1.5.1 berechneten Auflösung.

Abbildung 7 zeigt die aufgezeichneten Messpunkte mit zugehöriger Standardabweichung über die X-Achse bei einer Y-Achsen Position $p_Y = 50\text{mm}$.

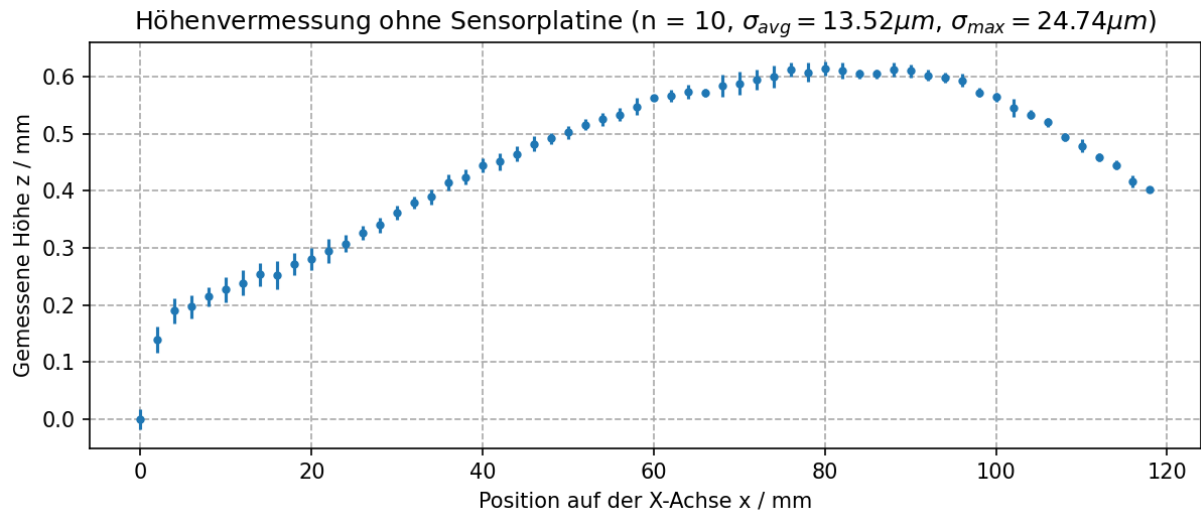


Abbildung 7: Messung der Reproduzierbarkeit ohne Homing der Z-Achse.

Um zu überprüfen ob bei Messungen Schritte verloren werden, werden die Messpunkte in Abbildung 8 in Relation gemäß Formel (1) zur vorherigen Messung an der gleichen Position dargestellt:

$$\delta_n = h_{MPx,n} - h_{MPx,n-1} \quad (1)$$

Es wurden je 10 Messungen an 60 Messpunkten aufgenommen. Entsprechend zeigt die Darstellung das δ_n für 540 Messungen.

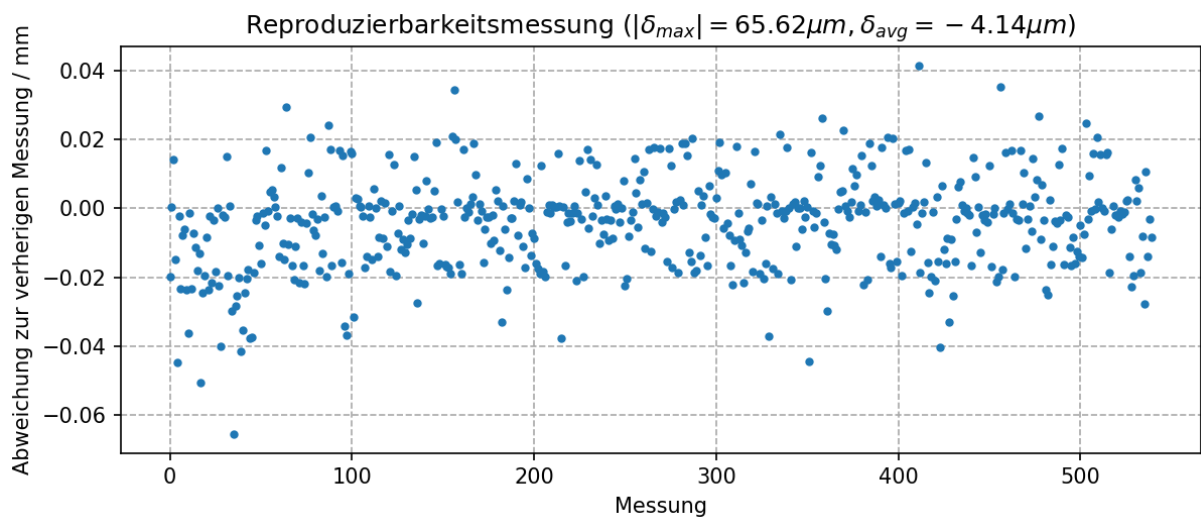


Abbildung 8: Abweichung der Messwerte zum vorherigen Wert an selbiger Position ohne Homing.

Durch regelmäßiges Homing der Z-Achse ist es möglich Langzeitdrifts entgegen zu wirken, indem Veränderungen durch verlorene Schritte aus vorangegangenen Messungen oder eine Verformung des Messaufbaus ausgeglichen werden. Ergebnisse mit einem Homing vor jedem Durchlauf sind in Abbildung 9 und Abbildung 10 analog dargestellt.

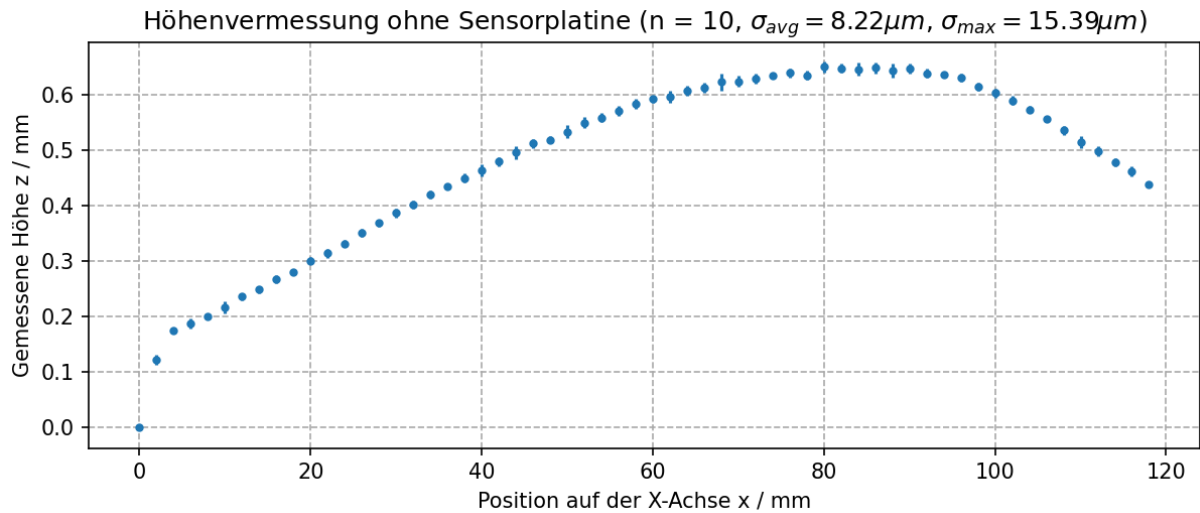


Abbildung 9: Messung der Reproduzierbarkeit mit Homing der Z-Achse nach jedem Durchlauf.

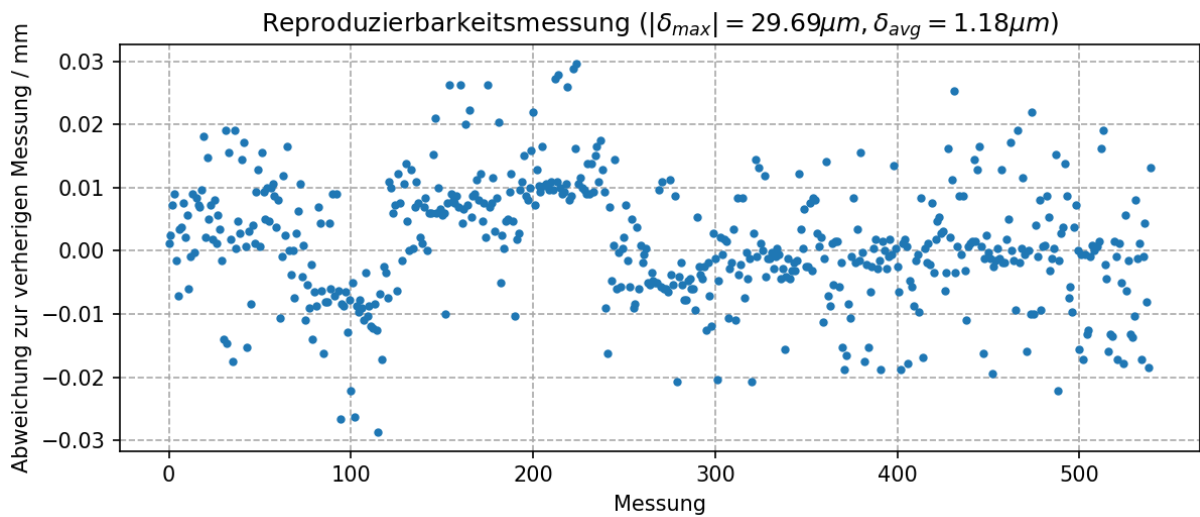


Abbildung 10: Abweichung der Messwerte zum vorherigen Wert an selbiger Position mit Homing.

1.5.4 Differenzelle Höhenmessung

Die Höhe von aufgetragenem Eis wird differenziell bestimmt. Hierzu wird die Höhe der Grundplatte H_{base} initial vermessen. Nach dem Auftrag von Eis oder anderen zu bestimmenden Schichten wird eine weitere Höhenvermessung H_{ice} durchgeführt. Durch Subtraktion der Messergebnisse nach Formel (2) kann die Höhe des Auftrags H_{δ} bestimmt werden:

$$H_{\delta} = H_{ice} - H_{base}. \quad (2)$$

Um eine definierte Höhe vermessen zu können, wurde Kapton-Band des Typs 1205 von 3M auf die Grundplatte aufgeklebt. Dieses weist eine Höhe von $h_{Kapton} = 3mil = 0,076mm$ auf [2] und stellt somit eine der feinsten zu messenden Strukturen dar.

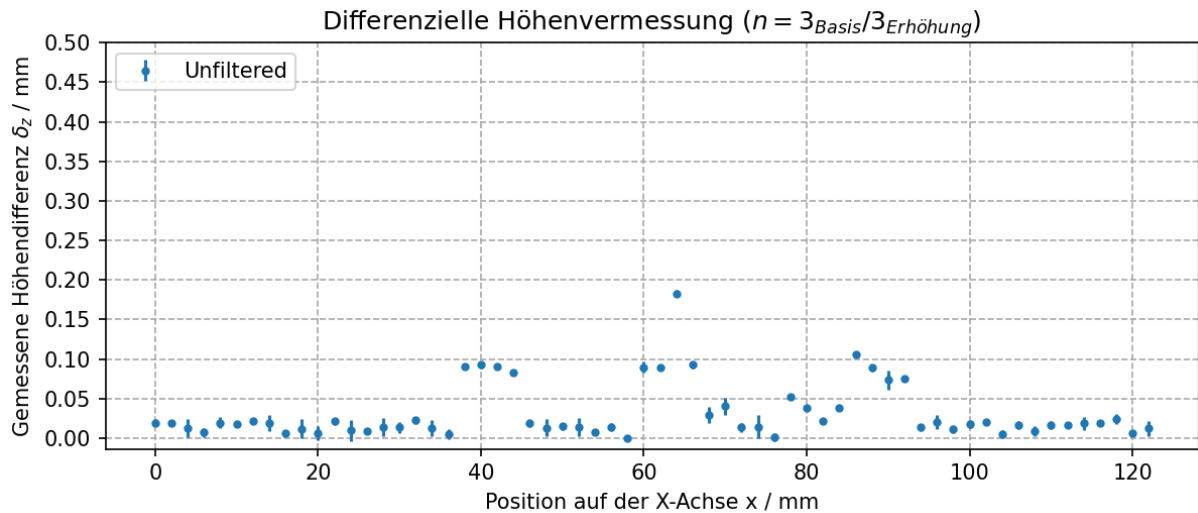


Abbildung 11: Differenzielle Höhenmessung von drei Kapton-Bändern auf der Grundplatte.

1.6 Datengenerierung / Visualisierung

Die Messwerte des Systems werden seriell ausgegeben und können direkt in eine Textdatei kopiert werden. Die Messwerte einer Messreihe sind hierbei separiert durch Tabulatoren und eine Zeile spiegelt eine komplette Messreihe wider. Beigefügte Python-Programme [1] übernehmen das Visualisieren der Daten nach Bedarf, wie Abbildung 12 zu entnehmen ist.

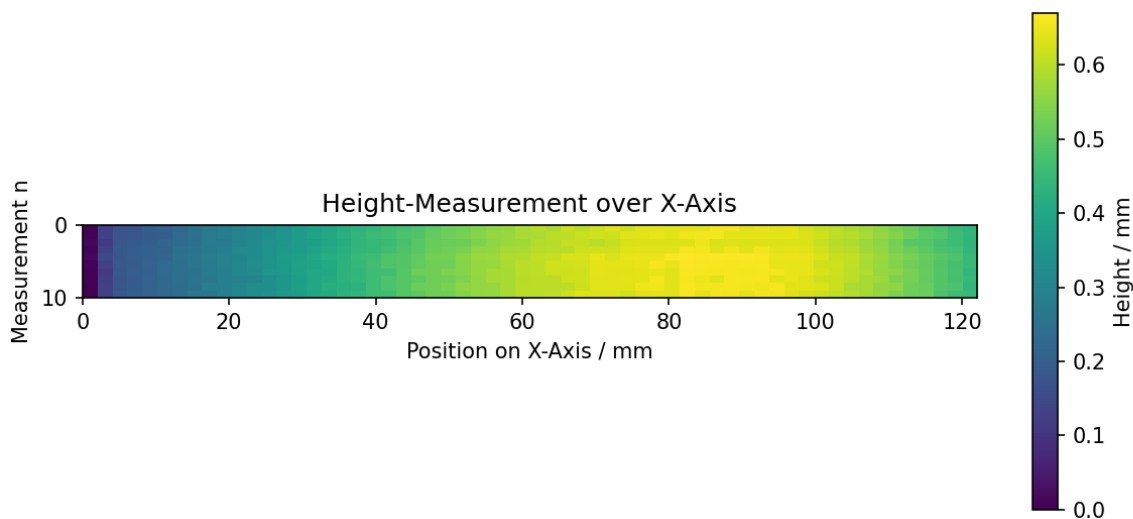


Abbildung 12: Beispielhafte Heatmap-Darstellung der Höhenvermessung der Grundfläche.

1.7 Optionen der Erweiterung

Durch das verbauten eines zweiten X-Schlittens kann beispielsweise ein Sprühkopf oder eine andere Erweiterung im Messaufbau eingeführt werden. Die Konstruktion sieht diese bereits vor, jedoch würde sich hierbei der Verfahrbereich um 50mm verringern. Durch Verlängerung der Y-Achse wird dieses Problem umgangen.

Bei größeren Testaufbauten ist die Belastung der Führungsstangen zu beachten und diese ggf. durch Größere zu ersetzen. Ebenso könnten die Kunststoffteile für größere Konstruktionen ungeeignet sein.

Die Verwendung von Open-Loop Schrittmotoren ist in dieser Anwendung ausreichend, jedoch könnte für höhere Genauigkeit und bessere Reproduzierbarkeit besonders bei der Z-Achse ein Closed-Loop Schrittmotor eingesetzt werden.

Optional ist es auch möglich, an den Unterseiten des X-Y-Antrieb Abdeckungen zu befestigen, sodass die Testkammer möglichst gut verschlossen ist um Störeinflüsse von außen auf den Prüfling zu reduzieren.

2 Diskussion

Die generierten Eisstrukturen zeigen, dass durch eine Kombination von benebeln und besprühen die für unsere Anwendung besten Ergebnisse liefern. Das zuführen von Luft mit hoher Luftfeuchte bildet kleine Kristalle, jedoch ist deutlich das Muster der Luftverwirbelung zu erkennen. Durch den Einsatz eines Strömungsgleichrichter und gezieltem einseitigen Zuführen der Luft mit Auslass auf der gegenüberliegenden Seite könnte dieses Problem reduziert werden.

Vernebeln von Wasser innerhalb der Kühlkammer sorgte für ähnliche Eisstrukturen wie die hohe Luftfeuchtigkeit, jedoch deutlich homogener außer am Auslass des Neblers, der sich zur Laufzeit des Tests neben dem Temperaturfühler befand.

Aufsprühen erzeugt solide Eisschichten, jedoch erfolgt keine gleichmäßige Benetzung der Sensorfläche. Dies ist auf die Oberflächenenergie des Lötstoplacks der Platine zurückzuführen, wodurch das Wasser vor dem Gefrieren nur zu einer mittelmäßigen Benetzung kommt.

Wird die Platine erst mit einem Nebler vollflächig mit Eiskristallen übersät, so bildet sich beim Aufsprühen wie Abbildung 6 zu sehen eine homogene Eisschicht, da die Eiskristalle des Nebels die Oberfläche des Sensors vergrößern und somit die Benetzung fördern. Für die Eisschicht wurde kein Höhenprofil aufgenommen, da der Versuch auf die Machbarkeit der Eis-Generierung abzielte und nicht auf die genauere Vermessung selbiger.

Die Höhenvermessung mit dem Aufbau funktioniert reproduzierbar. Die Krümmung der Messung ist durch die Krümmung der Kupferplatte durch verschrauben über einem Peltier-Element erklärbar. Wird kein regelmäßiges Homing durchgeführt ist zu erkennen, dass über die Länge des Versuchs zunehmend Schritte des Motors verloren werden. Da im Aufbau nur Open-Loop-Motoren eingesetzt werden ist dieses Verhalten erwartbar. Eine Verringerung der verlorenen Schritte wäre durch eine Reduktion der Geschwindigkeit, Erhöhung des Motorenstroms oder langsamerem Anlauf und Stop der Motoren möglicherweise erreichbar.

Wird die Höhenmessung vor jedem Durchlauf referenziert, so gibt es eine generelle Verschiebung der Messreihe durch eine Verschiebung des Nullpunktes, jedoch werden hierbei Langzeiteffekte reduziert und die durchschnittliche Standardabweichung von $\delta_{no\ homing} = 13,52\ \mu m$ auf $\delta_{no\ homing} = 8,22\ \mu m$ reduziert.

Abweichungen in den Höhenprofilen in Abbildung 7 zu Abbildung 9 sind durch leichten Versatz an der Y-Position zu erklären, da sich in diesen Messreihen der Riemenantrieb der Y-Achse etwas gelockert hatte.

Die Differenzielle Höhenmessung mit Kapton-Band zeigt, dass die Messwerte im Rahmen der Erwartung liegen. Da die Abweichungen der Messungen reproduzierbar sind, kann diese möglicherweise auf

eine Verunreinigung der Kupferplatte beim Auftragen der Kapton-Streifen zurückzuführen sein. Weitere Messungen zur Ursachenbestimmung hierzu sollten in einer nachfolgenden Messreihe durchgeführt werden.

3 Zusammenfassung

Mit dem entwickelten Teststand können Eisschichten in verschiedenen Methoden generiert und vermessen werden. Die verschiedenen Möglichkeiten der Generierung von Eis stellen verschiedene reale Vorkommen von Eis dar und ermöglichen so eine weitreichende Charakterisierung von Sensoren.

Die Höhenprofilmessung des Messaufbaus ist reproduzierbar und die Messwerte der Höhe wirken valide. Die erzielte Auflösung und die erhaltenen Messwerte lassen erwarten, dass der Messstand für die geplante Anwendung geeignet ist.

4 Literaturverzeichnis

- [1] „Cherry MX Produktinformation,“ Cherry MX, [Online]. Available: <https://www.cherrymx.de/en/mx-original/mx-speed-silver.html#techSpecs>. [Zugriff am 13 08 2021].
- [2] K. Mader, „Projekt GitHub-Repository,“ Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2021. [Online]. Available: <https://github.com/linglingltd/icing>. [Zugriff am 12 08 2021].
- [3] 3M, „Electrical Tape 1205 Datasheet,“ 2017. [Online]. Available: <https://www.mouser.de/datasheet/2/1/78-8124-4706-4%20Rev%20D-38225.pdf>. [Zugriff am 12 08 2021].