

Antenneninstallation für das RNO-G

Bachelorarbeit aus der Physik

Vorgelegt von

Erik Fröhlich

16.05.2021

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg



Betreuer: Prof. Dr. Anna Nelles

PD Dr. Robert Lahmann

Diese Arbeit beschäftigt sich mit einem Verfahren zum Aufbau von speziell angeordneten Antennen zur Messung von Neutrino Signalen für das Projekt: „*Radio Neutrino Observatory in Greenland*“. Hierbei wird einerseits auf die nötigen Spezifikationen eingegangen, welche der Aufbau erfüllen muss, andererseits werden Probemessungen für die Genauigkeit des Aufbaus präsentiert.

Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	4
1. Einleitung.....	6
1.1 RNO-G und Grönland.....	6
1.2 Ziel von RNO-G.....	7
1.3 Neutrinos.....	7
2. Entwicklung des Aufbauverfahrens.....	12
2.1 Aufbau.....	12
2.2 Skizze des Aufbauverfahrens.....	13
2.2.1 Schritt 1:.....	13
2.2.2 Schritt 2:.....	14
2.2.3 Schritt 3:.....	15
2.2.4 Schritt 4:.....	16
2.2.5 Schritt 5:.....	16
2.2.6 Schritt 6:.....	17
2.3 Aufbau mit Maßband.....	18
2.4 Fehlertoleranz.....	18
2.5 Bauteile.....	19
2.5.1 Messapparatur:.....	19
2.5.2 Messschild:.....	21
2.5.3 Kreuz Wasserwaage:.....	22
2.5.4 Gestochener Mastwurf (Knotentechnik):.....	22
2.5.5 10 m Maßband:.....	23
2.5.6 5 mW Laser:.....	24
3. Messungen zur Überprüfung des Aufbauverfahrens.....	25
3.1 Winkelgenauigkeit beim Ausrichten an der Richtschnur.....	25
3.2 Genauigkeit des Lasers 1.....	27
3.3 Genauigkeit des Maßbandes.....	29
3.4 Gesamtmessung 1.....	31
3.5 Genauigkeit des Lasers 2.....	35
3.6 Gesamtmessung 2.....	36
4. Diskussion.....	39
Quellenverzeichnis.....	41
Eidesstattliche Erklärung:.....	42

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Geographische Karte von Grönland.....	6
Abbildung 2: Fotografie der Oberfläche um die Summit Station.....	7
Abbildung 3: Überblick über die Elementarteilchen.....	8
Abbildung 4: Wirkungsquerschnitte verschiedener Reaktionen von Neutrinos mit Materie.....	9
Abbildung 5: Skizze einer Neutrinowechselwirkung mittels des Askarian Effekts.....	9
Abbildung 6: Skizze zum Gesamtaufbau des RNO-G Projekts.....	10
Abbildung 7: Foto einer LPDA die in Grönland verwendet werden wird. Sie im Profil dreieckig, ca. 1,5 m lang und an der breitesten Stelle etwa 1 m weit.....	11
Abbildung 8: Schematische Aufstellung der LPDAs von oben.....	12
Abbildung 9: Ausrichtung eines LPDA Dreierpaares relativ zueinander.....	12
Abbildung 10: Ausgangssituation beim Aufstellen der Antennen.....	14
Abbildung 11: Schritt 2.....	14
Abbildung 12: Schnittpunkte welche mithilfe des GPS und des Laserstrahls gefunden werden.....	15
Abbildung 13: Zwei Antennen stehen nun mittels einer Richtschnur (grün).....	15
Abbildung 14: Ausrichtung der mittleren Antenne.....	16
Abbildung 15: Schematischer Aufbau zur Ausrichtung der Antennen relativ zur Oberfläche.....	17
Abbildung 16: Winkel mit daran befestigter Kreuz Wasserwaage.....	17
Abbildung 17: Messung der Amplitude empfangener Signale in Abhängigkeit vom Winkel des Signals relativ zur Antenne und Abhängig von der Frequenz.....	18
Abbildung 18: Messapparatur zur Ausrichtung des Lasers.....	19
Abbildung 19: Die Aluminiumplatte mit den entsprechenden Markierungen zur Ausrichtung des Lasers.....	20
Abbildung 20: Improvisiertes Schild zum Einfangen und führen des Laserpunktes zur entsprechenden Entfernung.....	21
Abbildung 21: Eine Kreuzwasserwaage zur Ausrichtung der Messapparatur und der Antennen relativ zur Oberfläche.....	22
Abbildung 22: Skizze zum Binden eines gestochenen Mastwurfs.....	23
Abbildung 23: Maßband mit 10 m Länge.....	23
Abbildung 24: Laserpointer mit einer Leistung von >5 mW. Die Farbe des Lasers ist grün.....	24
Abbildung 25: Aufbau der Messung zur Überprüfung der Genauigkeit der Ausrichtung der Antennen mithilfe der Richtschnur.....	25
Abbildung 26: Karton, welcher als Antenne ausgerichtet wurde.....	26
Abbildung 27: Messung der Ungenauigkeit des Ausrichtungswinkels mithilfe von markierten Ausrichtungen auf einem Block.....	26
Abbildung 28: Messaufbau zur Genauigkeit des Lasers bei Neuausrichtung.....	27
Abbildung 29: Trefferpunkte des Lasers auf dem Papier, welches an der Wand befestigt wurde.....	28
Abbildung 30: Abstand der jeweiligen Messpunkte relativ zu einem festen Punkt in cm.....	28
Abbildung 31: Messung der Abweichung des Maßbandes.....	30
Abbildung 32: Abstände zu einem festen Punkt für die Maßbandmessung in cm.....	30
Abbildung 33: Bild zur Ausrichtung des Maßbandes an der Winkelplatte.....	32
Abbildung 34: Skizze, was im Versuch Gesamtmessung 1 aufgebaut und gemessen wurde.....	32
Abbildung 35: Bild einer Messung der Entfernung zur Position der mittleren Antenne zur Winkelplatte.....	33
Abbildung 36: Bild zur Messung mit dem Maßband.....	33
Abbildung 37: Diagramm zur Messung des Abstandes von der Papierplatte zur Richtschnur.....	34
Abbildung 38: Skizze zur potenziellen Lage der Richtschnur bei entsprechender Befestigung an den Pflöcken.....	34

Abbildung 39: Bild zur zweiten Messung der Genauigkeit des Lasers mit der Messapparatur.....	35
Abbildung 40: Messung des horizontalen Abstandes der gemessenen Punkte.	36
Abbildung 41: Verwendung des Schildes und einem Lot zum Finden der exakten Position der Pflöcke.	37
Abbildung 42: Bild des improvisierten Stativs zur Fixierung der Messapparatur.	37
Abbildung 43: Abstandsmessung von der Aluminiumplatte zur Richtschnur.....	38

1. Einleitung

1.1 RNO-G und Grönland

Bevor konkret auf den eigentlichen Zweck dieser Arbeit eingegangen wird, soll zuerst das Projekt vorgestellt werden, für welches dieses Aufbauverfahren entwickelt wurde. Hierbei handelt es sich um das sogenannte Radio-Neutrino-Observatory-Greenland (RNO-G) [1], welches in Grönland aufgebaut werden soll. Konkret wird es an der Summit Station an der Position $72^{\circ}34'44.10''\text{N}$ $38^{\circ}27'34.56''\text{W}$, also sehr zentral in Grönland installiert werden.



Abbildung 1: Geographische Karte von Grönland [2]. Der Stern markiert die Lage der Summit Station bei $72^{\circ}34'44.10''\text{N}$ $38^{\circ}27'34.56''\text{W}$. (bearbeitet).

Es handelt sich hierbei um den höchsten Punkt des Grönländischen Eisschildes und hat eine Höhe von etwas mehr als 3000 m über dem Meeresspiegel [3]. Weiter fällt bei einem Blick auf die Wetteraufzeichnungen von Summit auf, dass die Temperaturen dort auch tagsüber und im Sommer unter 0° liegen. Das bedeutet, dass Personal, welches außerhalb der Station arbeitet, Winterkleidung und Sonnen- oder Skibrillen tragen wird. Die Einschränkungen, welche durch das Tragen von Schutzkleidung, wie Handschuhen oder getönten Brillen hervorgerufen werden, sind in dieser Arbeit zu berücksichtigen.



Abbildung 2: Fotografie der Oberfläche um die Summit Station [4]. Wie augenscheinlich zu erkennen, ist die Oberfläche relativ eben.

Ebenfalls interessant ist die Beschaffenheit der Oberfläche um die Summit Station. Betrachtet man die obige Außenaufnahme, so ist zu erkennen, dass man eine ebene Schneedecke hat. Dies wird in der Wahl möglicher Messmethoden ebenfalls eine Rolle spielen. Außerdem zu erwähnen ist die Dicke des Eisschildes, welche im Schnitt 1,5 km beträgt [3]. Hierbei handelt es sich näherungsweise um homogenverteiltes, mit zunehmender Tiefe dichteres Eis. Diese Eigenschaft ist für das RNO-G von zentraler Bedeutung, da es maßgeblich davon abhängt wie, bzw. wie genau Neutrinos gemessen werden können. Hierzu jedoch später mehr.

1.2 Ziel von RNO-G

Das Ziel des RNO-G ist es Neutrinos im Energiebereich von PeV bis EeV zu messen. Hierbei wird einerseits Wert auf die Analyse der Energie des Neutrinos gelegt und andererseits auf die Richtung, aus der das Neutrino gekommen ist. Da Neutrinos in dem angegebenen Energiebereich ihren Ursprung zumeist in astronomischen und kosmologischen Objekten haben, ist die Untersuchung solcher Neutrinos ebenfalls für diese Forschungsbereiche von Relevanz. Das Projekt bedient sich hierbei bereits an erprobten Messmethoden für Neutrinos aus früheren Experimenten wie ARIANNA oder ARA [1].

Neutrinos können nicht direkt gemessen werden, sondern nur indirekt durch ihre Wechselwirkung mit Materie. Um dies genauer zu erläutern, wird im folgenden Abschnitt etwas detaillierter auf Neutrinos und deren Wechselwirkung eingegangen.

1.3 Neutrinos

Neutrinos sind Fermionen, d.h. Teilchen mit halbzahligen Spin und gehören zur Teilchenklasse der Leptonen. Hierbei gibt es für jedes existierende Lepton (Elektron, Myon,

Tau und deren Antiteilchen) ein dazugehöriges Neutrino. Es gibt also zusammen mit deren Antiteilchen insgesamt sechs Neutrinos.

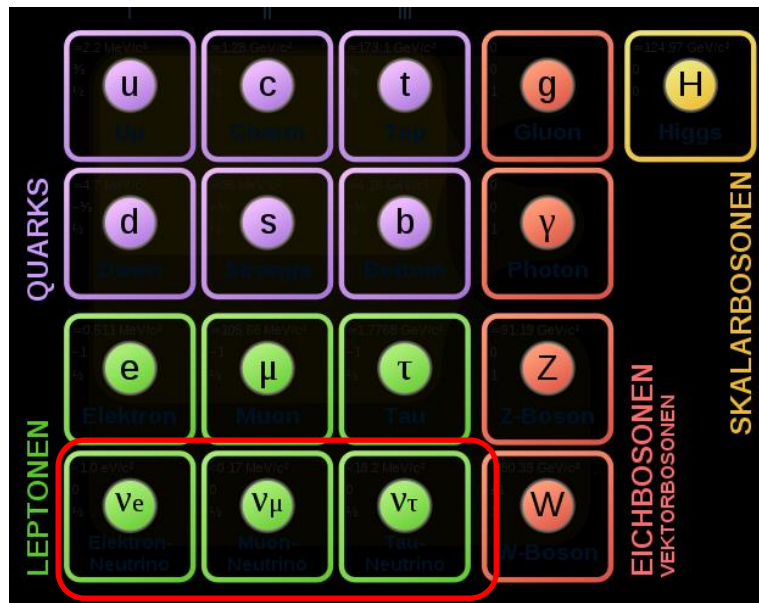


Abbildung 3: Überblick über die Elementarteilchen [5]. Die roteingekreisten Teilchen sind die Neutrinos, welche Teil der Leptonen (grün) sind.

Des Weiteren sind Neutrinos neutral geladen und haben eine, bis heute nicht genau bekannte Ruhemasse. Aktuell schätzt man die Ruhemasse eines Neutrinos auf weniger als 1,1 eV [6].

Eine weitere wichtige Eigenschaft von Neutrinos ist ihre Reaktionsträgheit. Der Grund hierfür ist, dass Neutrinos lediglich über die schwache Wechselwirkung und über Gravitation mit Materie interagieren, was zu sehr kleinen Wirkungsquerschnitten ($\sim 10^{-39} \text{ cm}^{-2}$) führt. Der Wirkungsquerschnitt ist jedoch von der Energie abhängig. Hierbei gilt, je größer die Energie eines Neutrinos, desto größer der Wirkungsquerschnitt.

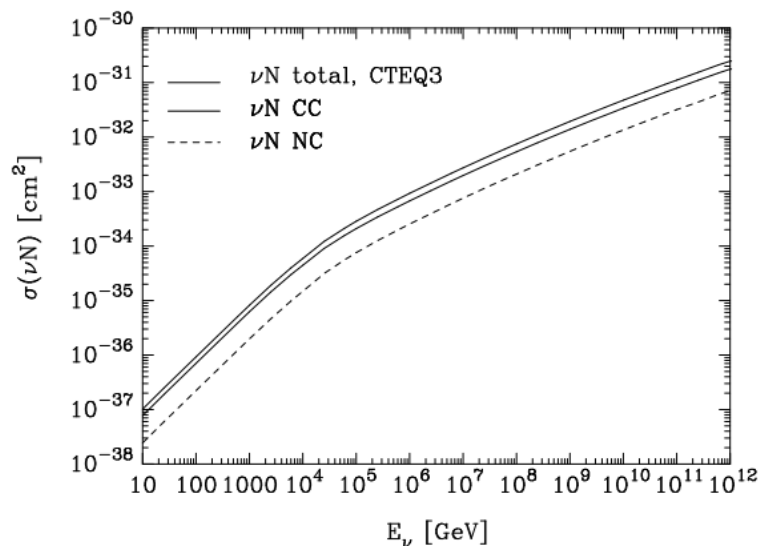


Abbildung 4: Wirkungsquerschnitte verschiedener Reaktionen von Neutrinos mit Materie [7]. Die Grafik zeigt den Wirkungsquerschnitt für die Wechselwirkung eines Neutrinos unter neutraler, schwacher Wechselwirkung (NC) und geladener schwacher Wechselwirkung (CC). νN total ist hierbei die Summe aus NC und CC. Der Energiebereich geht von 10 GeV bis zu 10^{12} GeV.

Wechselwirkt nun ein Neutrino mit Materie und überträgt Energie auf diese, so erzeugt das Teilchen, mit welchem das Neutrino gewechselwirkt hat ein Teilchen Kaskade. Die Teilchen (Elektronen) in dieser Kaskade erzeugen ein Ladungsungleichgewicht, welches sich mit dem Fortschreiten der Kaskade ändert. Diese zeitliche Änderung der Ladung erzeugt elektromagnetische Wellen im MHz- GHz Bereich, also Radiowellen. Dieser Effekt wird auch Askaryan Effekt genannt [8]. In der folgenden Abbildung ist dieser Effekt schematisch aufgezeigt.

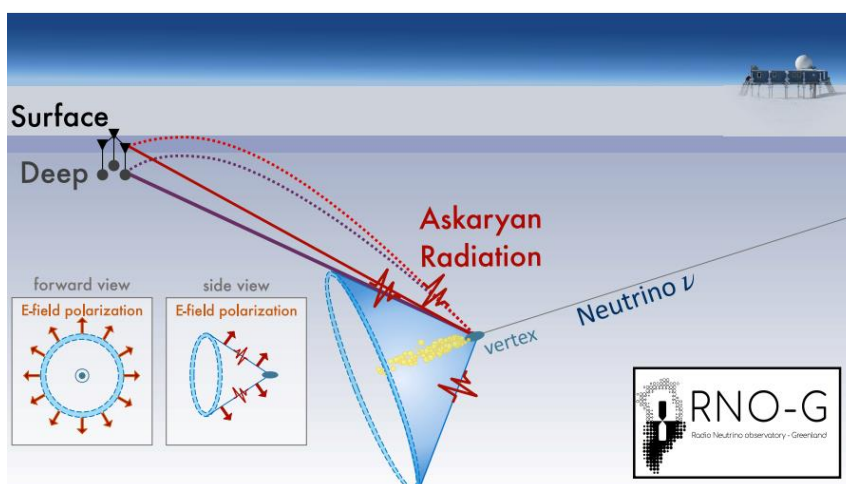


Abbildung 5: Skizze einer Neutrinowechselwirkung [1] mittels des Askaryan Effekts. Der Kegel zeigt die Ausbreitung der resultierenden Radiowellen.

Innerhalb des RNO-G-Projektes soll nun Neutrinos anhand von Radiostrahlung detektiert werden. Um diese Strahlung eines wechselwirkenden Neutrinos messen zu können, ist es notwendig, ein möglichst großes Volumen des Eises in Grönland pro Messstation abzudecken.

Bei der durch Neutrinos im Eis entstehenden Radiostrahlung muss auch berücksichtigt werden, wie sich die EM-Wellen im Eis ausbreiten. Hierbei wird angenommen, dass das Eis mit zunehmender Tiefe eine höhere Dichte hat, lateral aber homogen ist. Durch den vertikalen Dichtegradienten ergibt sich auch ein Gradient hinsichtlich des Brechungsindex innerhalb der Eisschicht und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der entstehenden Radiowellen nimmt mit zunehmender Tiefe ab. Durch den Gradientenindex ergibt sich ein gebogener Strahl, welcher bei abnehmender Dichte, also bei Propagation in Richtung Oberfläche immer flacher wird. Dies und auch die Dicke des Eises erlauben nur einen gewissen Elevationswinkel unterhalb dessen Neutrinos gemessen werden können. Davon ausgenommen sind die Schnee- und Firnschicht des Grönländischen Eisschildes, da diese nicht der Annahme des homogenen Eises folgen.

Ein weiterer, sehr wichtiger Einflussfaktor für das Projekt sind die sogenannten ausgedehnten Luftschauern (AS). Hierbei handelt es sich um hochenergetische Photonen oder kosmische Strahlung, die beim Auftreffen auf die Erdatmosphäre eine Kaskade auslösen. Die resultierende Strahlung ist der Radiostrahlung der gesuchten Neutrinos sehr ähnlich, weshalb sie sich gut als Kalibrationssignal eignet. Durch diese Ähnlichkeit können jedoch auch Fehlmessungen entstehen. So kann es z. B. sein, dass ein Teil der AS-Radiostrahlung in die Eisoberfläche hineinpropagiert und dann fälschlicherweise für ein Neutrinosignal gehalten wird. Einen Überblick über den Aufbau von RNO-G liefert die folgende Abbildung.

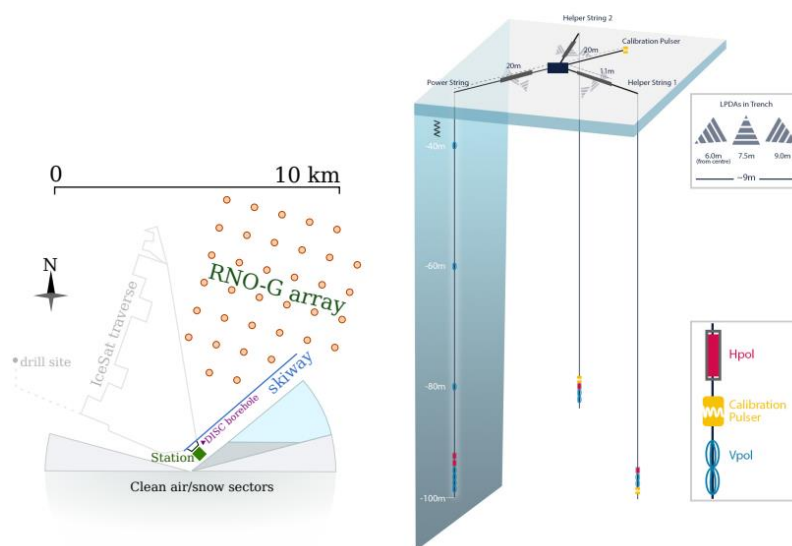


Abbildung 6: Skizze zum Gesamtaufbau des RNO-G Projekts [1]. Die Anordnung der einzelnen Stationen von oben links und der Aufbau einer Station im Profil rechts.

In dem linken Teil der Abbildung ist skizziert, wie die Messung von Neutrinos über viele in einem Array angeordnete einzelne Messstationen großflächig ermöglicht werden soll. Der rechte Teil zeigt eine der RNO-G-Stationen aus dem RNO-G-Array. Hierbei fallen zuerst die drei im Boden befindlichen Hpol und Vpol Antennen auf, welche für die Detektion der

Radiostrahlung der Neutrinos vorgesehen sind und an der Oberfläche die logarithmisch-periodischen Antennen (LPDAs), um dessen Anordnung es in dieser Arbeit gehen soll. Auf die konkrete Aufstellung dieser neun LPDAs pro Messstation wird im folgenden Abschnitt genauer eingegangen. Hier sei noch erwähnt, dass die besagten Antennen auf Grund ihrer einerseits breiten Frequenzabdeckung, und andererseits hohen Genauigkeit, sowie einer breiten Raumabdeckung die Kalibration der H- und Vpol Antennen mithilfe der AS erheblich erleichtern werden. Weiter sind sie das Werkzeug zur Unterscheidung von Strahlung, welche von unterhalb der Oberfläche propagiert (Radiostrahlung der Neutrinos) und Strahlung, die oberhalb der Oberfläche propagiert (AS). Sie dienen also auch als ein Kontrollmodul. Auf dem folgenden Foto ist eine der verwendeten LPDAs zu sehen.

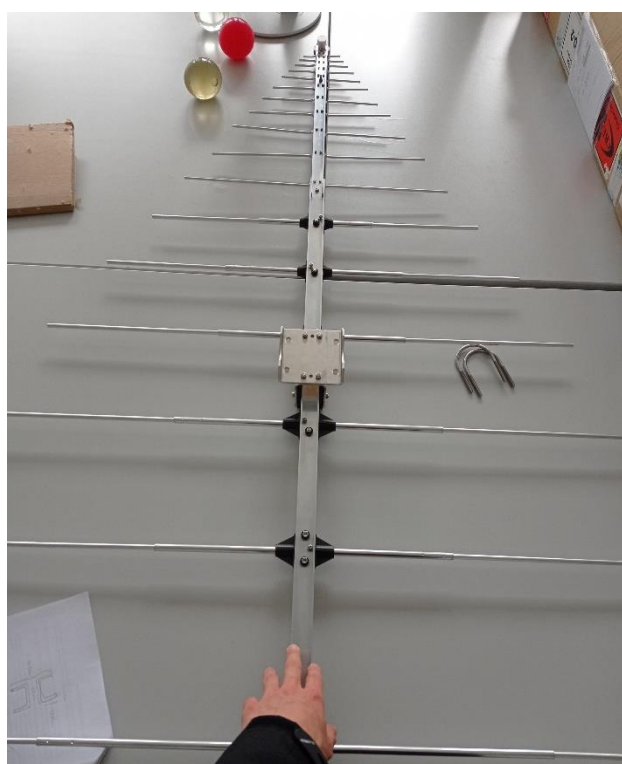


Abbildung 7: Foto einer LPDA die in Grönland verwendet werden wird. Sie im Profil dreieckig, ca. 1,5 m lang und an der breitesten Stelle etwa 1 m weit.

2. Entwicklung des Aufbauverfahrens

Im Rahmen der durchzuführenden Messungen innerhalb des RNO-G-Projektes sind viele Antennen in einer exakten Anordnung zueinander aufzustellen. Diese Installationen sollen im zentralen Grönland manuell erfolgen. Um eine exakte Ausrichtung der Antennen zueinander durchführen zu können, soll eine Aufbauanleitung für die Antennengruppen erstellt werden sowie das zur Verfügung stellen kostengünstiger Hilfsmittel erfolgen, um die Positionierung der einzelnen Antennen zu erleichtern. Der Messaufbau muss hierbei, auf Grund der Wetterbedingungen in Grönland möglichst einfach zu bedienen und temperaturbeständig sein.

2.1 Aufbau

Um die oben beschriebenen Messungen zu gewährleisten, müssen die Antennen in einer bestimmten Konfiguration geometrisch angeordnet werden. Siehe hierzu die folgenden Abbildungen.

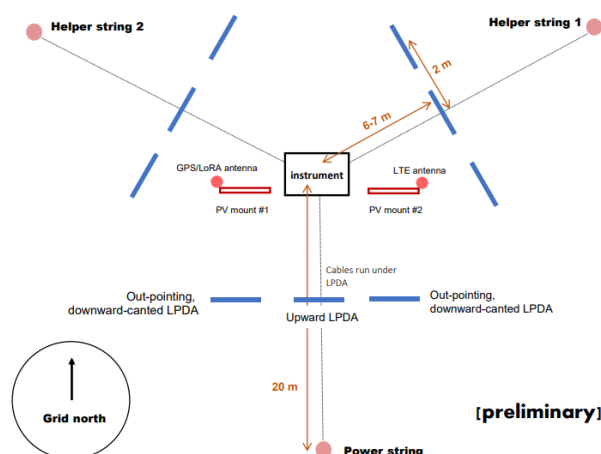


Abbildung 8: Schematische Aufstellung der LPDAs von oben [9]. Die Antennen, um die es in dieser Arbeit geht sind als blaue Striche markiert. Sie haben als Gruppe einen Abstand von 7 m relativ zum Instrument in der Mitte und jeweils einen Abstand von 2 m innerhalb einer Gruppe.

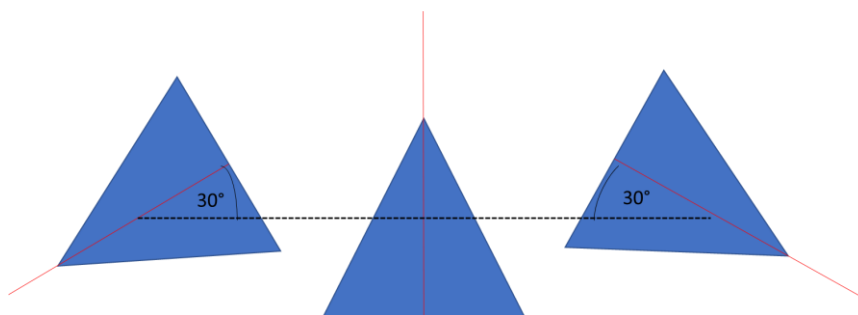


Abbildung 9: Ausrichtung eines LPDA Dreierpaares relativ zueinander. Die mittlere Antenne zeigt, relativ zur Oberfläche senkrecht nach oben, die äußeren Antenne zeigen in einem 30° Winkel relativ zur Oberfläche weg von der mittleren Antenne in Richtung Boden. Der Abstand der äußeren Antennen relativ zur mittleren beträgt 2 m.

Wie zu sehen, werden die Antennen in Dreiergruppen in einem Winkel von jeweils 120° zueinander angeordnet. Sie haben dabei einen Abstand von 6-7m zum Mittelpunkt. Die drei Antennen selbst werden wiederum in einer Reihe angeordnet, wobei die mittlere Antenne den 120° Punkt relativ zu den anderen mittleren Antennen markiert. Die äußeren zwei Antennen einer Dreiergruppe stehen symmetrisch zur mittleren Antenne in einer Reihe und haben, während die mittlere Antenne nach oben zeigt, eine Neigung von 60° nach unten (siehe Abbildung 9). Darüber hinaus werden die Antennengruppen in einem Graben platziert, welcher so tief ist, dass diese von der Oberfläche aus nicht mehr zu sehen sind, da die Schneedecke in Grönland nicht genügend Stabilität bietet um die Antennen dort fixiert zu halten. Dieser Aufbau gewährleistet einerseits die Vermessung der AS von oben, und andererseits mögliche Radiosignale aus dem Eis. Zusammen mit den vergrabenen H- und Vpol Antennen kann somit sehr gut Richtung und Frequenz eines Signals bestimmt werden.

2.2 Skizze des Aufbauverfahrens

Da eine manuelle Installation der Antennen in Grönland vorgesehen ist, sollte die Methode für den Aufbau möglichst einfach gehalten werden, da das Personal ständig Winterhandschuhe und Ski- oder Sonnenbrillen tragen wird. Aus diesem Grund wurde eine theodolitähnliche Methode entwickelt, bei der man vom Mittelpunkt der drei Antennendreiergruppen die Position der jeweiligen Antennen bestimmt. Diese Methode soll nun im Folgenden genauer beschrieben werden.

2.2.1 Schritt 1:

Wichtig für die Aufstellung der Antennen ist in erster Linie die richtigen Winkel zu finden. Zur Entfernungsmessung stehen GPS oder ein Maßband zur Verfügung. Daraus folgt nun, dass zusammen mit der Markierung des Mittelpunktes über GPS oder einem Maßband ein Kreis mit 7m Entfernung gezogen wird. Siehe hierzu die folgende Abbildung.

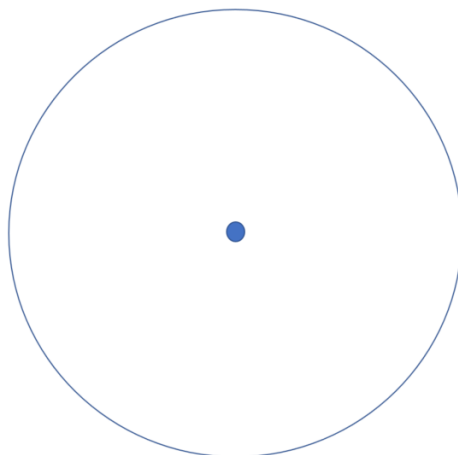


Abbildung 10: Ausgangssituation beim Aufstellen der Antennen. Bekannt ist nur die Position des Mittelpunktes der Antennen und die Entfernung angedeutet durch den Kreis.

Der Mittelpunkt wird nun mit der Messapparatur markiert.

2.2.2 Schritt 2:

Nun wird ein Laser auf der horizontal ausgerichteten Messapparatur, die im Mittelpunkt des Kreises platziert ist, auf einen der beiden äußeren Markierungen eines Antennenpaares ausgerichtet. Der Laserstrahl ist in der folgenden Abbildung skizziert.

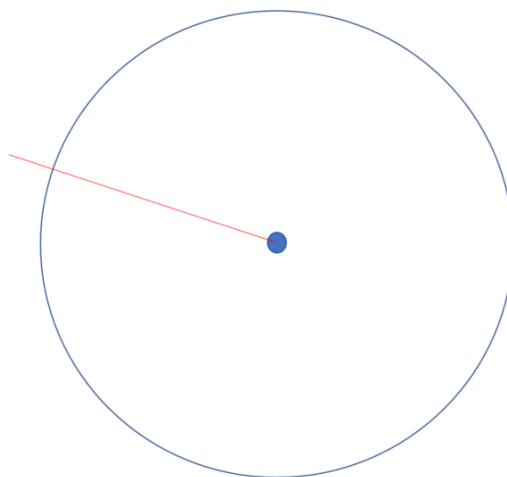


Abbildung 11: Schritt 2 Der rote Strahl entspricht dem Laserstrahl, welcher in der Mitte ausgerichtet wurde. Zusammen mit dem GPS kann der Schnittpunkt des Lasers mit dem Kreis gefunden werden.

Nun nimmt man das Schild aus Abschnitt 2.3, fängt damit bei der Messapparatur den Laserstrahl ein und geht anschließend sieben Meter von der Apparatur weg. Dabei ist darauf zu achten, dass sich der Laserstrahl stets auf dem Schild befindet. Hat man die sieben Meter erreicht, so zentriert man den Strahl zwischen den Markierungen auf dem Schild und markiert die so gefundene Stelle mit einem Pflöck mithilfe der Markierung auf der Rückseite. Dies muss nun für die zweite äußere Markierung noch einmal wiederholt werden.

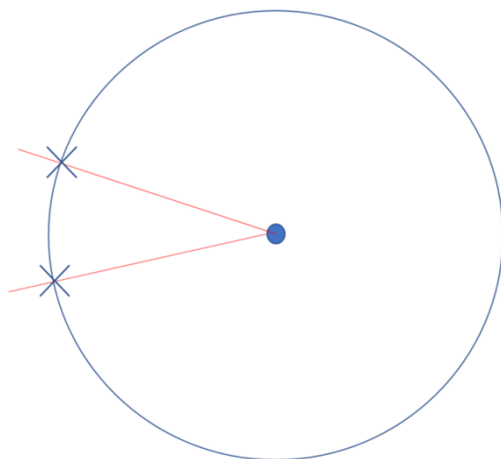


Abbildung 12: Schnittpunkte welche mithilfe des GPS und des Laserstrahls gefunden werden.

2.2.3 Schritt 3:

Nun wird zwischen den beiden gesetzten Pflöcken eine Richtschnur gespannt. Hier soll diesbezüglich noch einmal darauf hingewiesen werden, dass sich die Antennen unter der Oberfläche befinden, weshalb hierfür Gräben ausgehoben werden müssen. Das Ausheben dieser Gräben kann entweder vor oder nach diesem Schritt erfolgen. Hier wird davon ausgegangen, dass die Gräben bereits ausgehoben wurden.

Nun nimmt man sich einen Meterstab oder ein Bandmaß zur Hand und misst einen vorher festgelegten Abstand vom Pflöck aus entlang der Richtschnur. Dies ist die Position einer der äußeren Antennen, welche nun platziert werden kann. Wiederholt man dies an dem anderen Pflöck so hat man nun die beiden äußeren Antennen platziert. Siehe hierzu die folgende Abbildung.

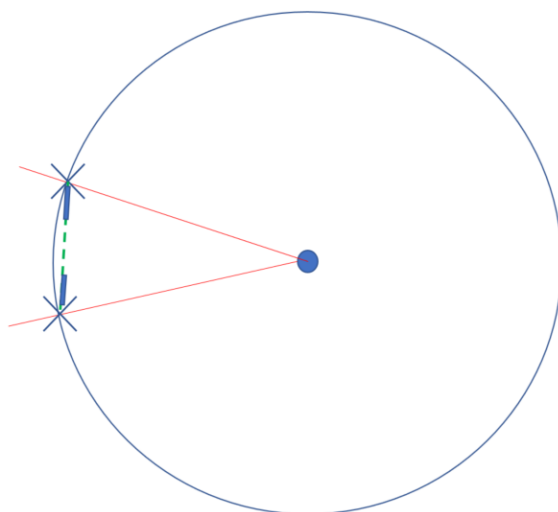


Abbildung 13: Zwei Antennen stehen nun mittels einer Richtschnur (grün). Diese wurde zwischen den Markierungen mit dem Kreis gespannt. Nun können danach die äußeren Antennen ausgerichtet werden. Für den Abstand von den äußeren Markierungen relativ zu den Antennen wurden auf der Aluminiumplatte Winkel für bestimmte Abstände markiert.

Die Ausrichtung der Antennen folgt hierbei über die Richtschnur. Hier ist es wichtig sich möglichst senkrecht über diese zu stellen, um einen möglichen Parallaxenfehler zu vermeiden.

2.2.4 Schritt 4:

Um die letzte Antenne zu platzieren hat man nun zwei Möglichkeiten. Da die Entfernung der äußeren Antennen zur mittleren fest ist, kann man diese Entfernung nun wieder entlang der Richtschnur messen. Eine andere Möglichkeit bietet die Messapparatur aus der Mitte, bei welcher man den Laser auf die mittlere Markierung setzt. Die Position der mittleren Antenne ist dann der Schnittpunkt des Laserstrahls mit der Richtschnur, welchen man mit dem Schild aus Schritt 2 leicht findet.

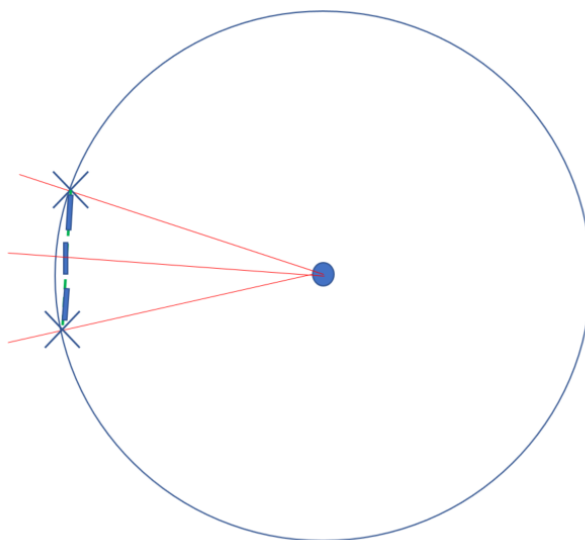


Abbildung 14: Ausrichtung der mittleren Antenne. Dies geschieht mithilfe des Lasers, oder durch Messung der Entfernung von den beiden äußeren Antennen.

2.2.5 Schritt 5:

Was nun noch fehlt ist die Ausrichtung der äußeren Antennen auf einen Winkel von 60° relativ zur mittleren Antenne. Siehe hierzu die Abbildung 9 aus dem vorangegangenen Abschnitt.

Hierfür wurde das folgende Bauteil entworfen, welches in der Abbildung 15 schematisch dargestellt ist.

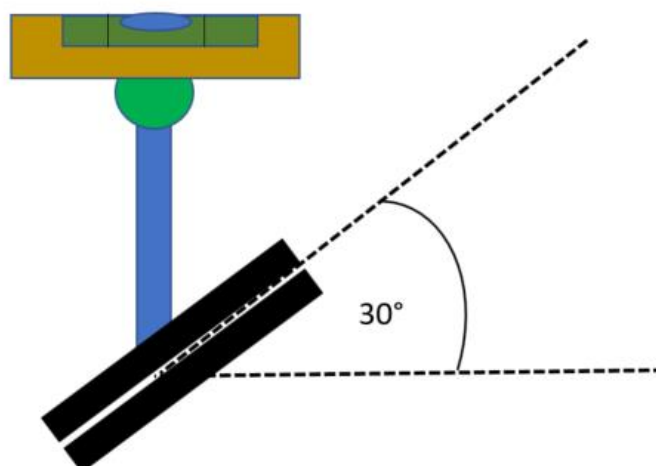


Abbildung 15: Schematischer Aufbau zur Ausrichtung der Antennen relativ zur Oberfläche. Die schwarzen Balken markieren hierbei eine Klammer, welche an der Antenne befestigt wird. der gelbe Abschnitt oben beschreibt eine Wasserwaage, zur Ausrichtung.



Abbildung 16: Winkel mit daran befestigter Kreuz Wasserwaage. Dieser Winkel erfüllt die Aufgabe des Werkstücks aus Abbildung 15.

Das Bauteil wird, wie zu sehen an der Antenne befestigt und anschließend mit der Wasserwaage eben gestellt. Durch die Neigung in dem Bauteil erhält die Antenne den gewünschten Winkel.

2.2.6 Schritt 6:

Abschließend baut man die Richtschnur und die Pflöcke ab und dreht den Laser auf der Messapparatur am Mittelpunkt des Antennenkreises zu den nächsten Markierungen auf der Aluminiumplatte, bei welchen man die Schritte 1-5 wiederholt.

2.3 Aufbau mit Maßband

Da die Arbeit mit elektronischen Geräten in Grönland auf Grund der niedrigen Temperaturen zu möglichen Problemen führen kann, wurde die Methode ebenfalls so konstruiert, dass sie mit einem Maßband durchführbar ist. Hierfür muss lediglich die Aluminiumplatte aus der Messapparatur gelöst werden und mit einem Erdanker oder Ähnlichem auf dem Boden befestigt werden. Nun verwendet man statt des Lasers das Maßband um die Position der Pflöcke zu markieren. Das Schild aus dem Abschnitt des 2.5.2 Messschild: wird hierbei ebenfalls nicht benötigt.

2.4 Fehlertoleranz

Bei dem gewählten Messaufbau stellt sich die Frage, wie genau das Verfahren die Antennen positionieren und ausrichten soll. Dies ist v.a. deswegen wichtig, weil hier ein eigenes Aufbauverfahren vorgestellt wird, welches keine oder nur bedingte Vergleichswerte zur Verfügung stellt. Aus diesem Grund soll in diesem Abschnitt etwas näher auf die Fehlertoleranz der LPDAs und damit der nötigen Genauigkeit des Aufbauverfahrens eingegangen werden.

Für die Genauigkeit der Antennen wurde hierbei auf ein Paper des ARIANNA Projektes zurückgegriffen. Siehe hierzu die folgende Abbildung.

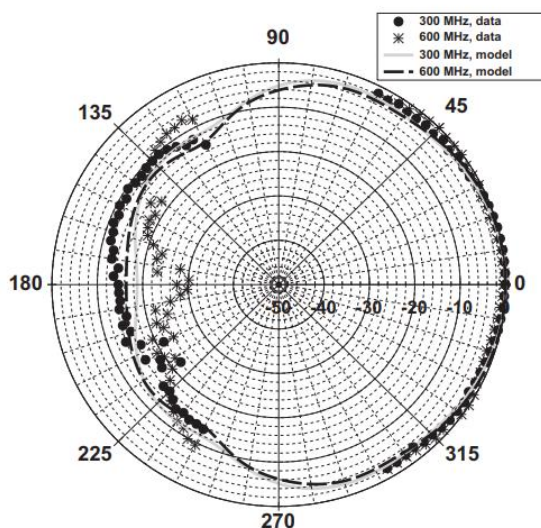


Abbildung 17: Messung der Amplitude empfangener Signale in Abhängigkeit vom Winkel des Signals relativ zur Antenne und Abhängig von der Frequenz [10]. Wie zu sehen, ändert sich die Amplitude bei einer Auslenkung des Signals von $\pm 45^\circ$ kaum.

In der Abbildung zeigt die Antenne in Richtung 0° . Die Amplitude, mit welcher die Antenne ein Signal misst, ist hierbei auf 0 dB normiert. Wenn man nun die Signalquelle vom 0° Punkt auslenkt, so stellt man fest, dass die Dämpfung der Amplitude an der Antenne bis zu einem Winkel von $\pm 10^\circ$ kaum zu erkennen ist. Daher wurde für das Verfahren festgelegt, dass $1-2^\circ$

Ungenauigkeit, sowohl für die Positionierung der Antennen mithilfe der Aluminiumscheibe als auch die Ausrichtung dieser ausreichend sind. Dies entspricht bei der Entfernung von sieben Metern einer horizontalen Ungenauigkeit von 13-25cm. Als Richtwert wurde für die jeweiligen Messungen, wie nachfolgend beschrieben, immer die Standardabweichung aus den gemessenen Werten bestimmt.

2.5 Bauteile

2.5.1 Messapparatur:

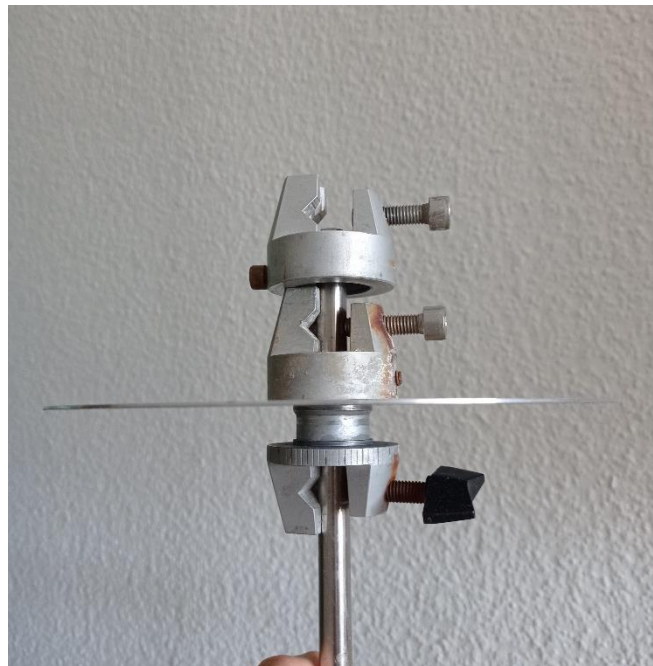


Abbildung 18: Messapparatur zur Ausrichtung des Lasers. die beiden unteren Klammern dienen dazu die Aluminiumplatte in der Mitte zu fixieren. Die obere Klammer dient als Halterung für den Laser.

Diese Messapparatur dient zur Positionierung der Antennen. Sie besteht aus einer Aluminiumplatte mit insgesamt 15 Markierungen, wobei jeweils fünf davon für eine Antennengruppe stehen. Der Winkel der Markierungen für die jeweiligen Antennengruppen ist 120° (siehe Abbildung 19).

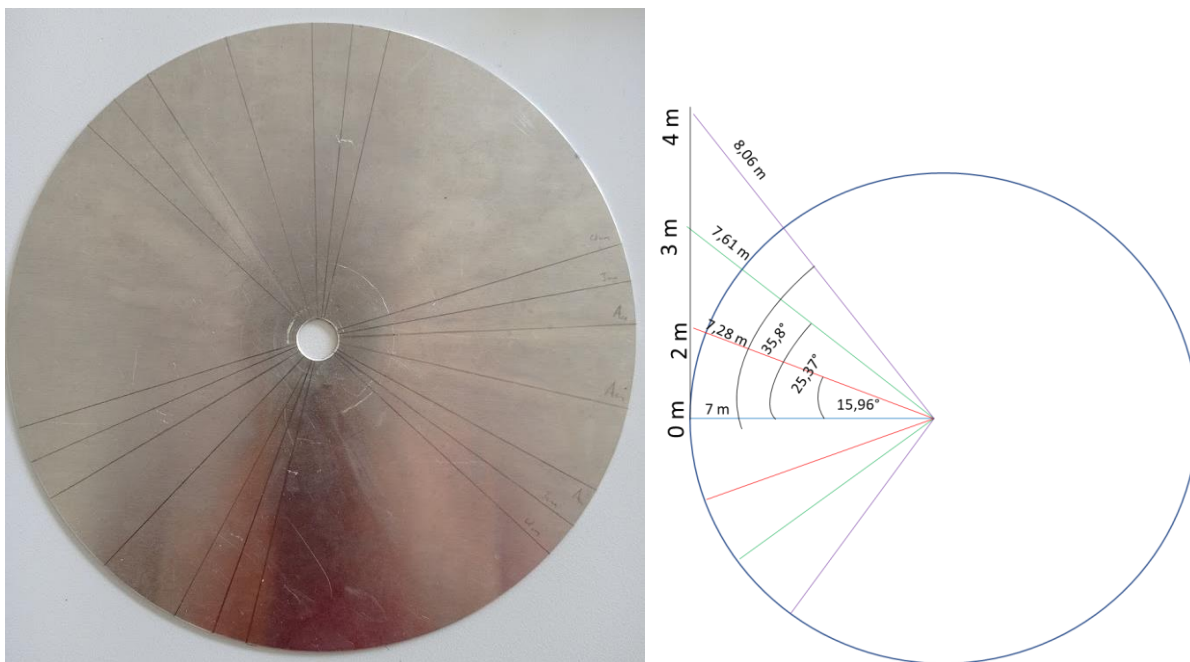


Abbildung 19: Die Aluminiumplatte mit den entsprechenden Markierungen zur Ausrichtung des Lasers (links). Schematische Zeichnung für eine Antennengruppe welche Strecke auf der Platte zu welchem Winkel und zu welcher Entfernung relativ zur mittleren Antenne gehört (rechts).

Wie im Kapitel des Aufbaus schon erwähnt, dienen die Markierungen zur Ausrichtung eines Lasers, bzw. eines Maßbandes um die Position der Antennen, bzw. der Pflöcke zu finden. Damit das Team, dass die Antennen aufstellt, genügend Spielraum v.a. bzgl. der Grabenaushebung hat, wurden auf der Platte mehrere Winkel und deren Entfernungen zu der Tangente aufgezeichnet auf der sich die Antennen relativ zu dem sieben Meter Abstand befinden. Die kleinste Markierung bei $15,94^\circ$ entspricht hier beispielsweise dem Standpunkt der beiden äußeren Antennen, welche einen Abstand von zwei Metern relativ zur mittleren Antenne und eine Entfernung von 7,28 m zur Messapparatur haben. Analog sind die größeren Winkel bei $24,37^\circ$ und $35,8^\circ$ welche, nach dem Aufbauverfahren, als Messausgangspunkt verwendet werden können. Die Aluminiumplatte wird an einem Stativ befestigt, welches sicherstellt, dass die Platte waagrecht zur Oberfläche ist. Am oberen Ende ist eine drehbare Klammer befestigt, in der man einen Laserpointer befestigen kann.

2.5.2 Messschild:

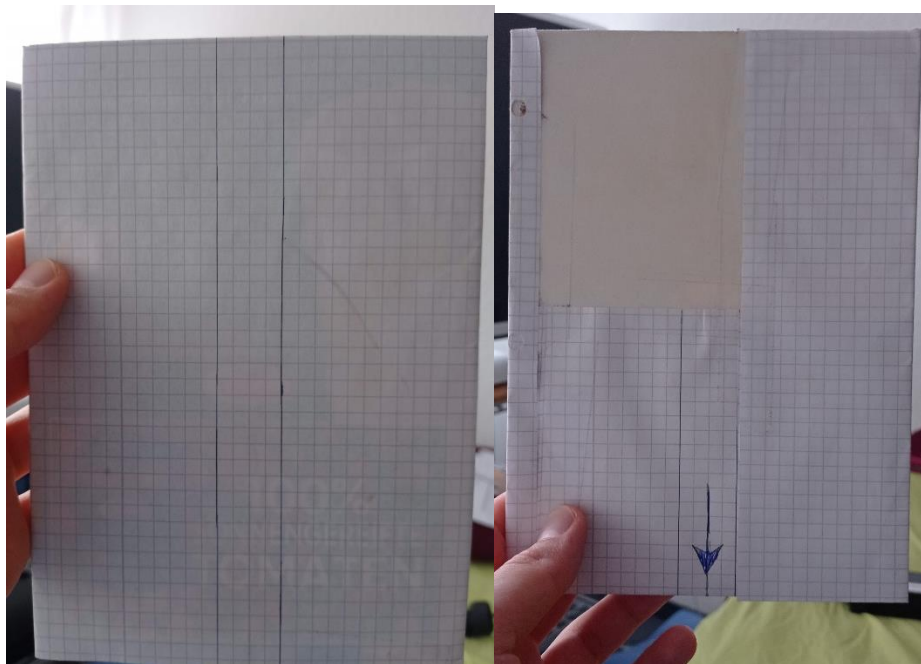


Abbildung 20: Improvisiertes Schild zum Einfangen und führen des Laserpunktes zur entsprechenden Entfernung. Die Vorderseite (links) hat hierbei zwei Striche, die Rückseite (rechts) einen Pfeil. Befindet sich der Laserpunkt innerhalb der zwei Striche, so zeigt der Pfeil die Position des Lasers an (siehe Abbildung 41).

Das in Abbildung 20 gezeigte Schild dient dazu, den Laserstrahl, welcher von der obigen Messapparatur ausgeht, einzufangen. Für die Messungen in dieser Arbeit wurde hierfür ein Schild aus einem Stück Pappe entworfen, was etwas größer als Din A 5 ist. In der Mitte des Schildes befindet sich eine 2 cm breite Markierung, mit welcher man das Schild mithilfe des Laserstrahls ausrichten kann. Auf der Rückseite des Schildes befindet sich ebenfalls eine Markierung, welche die Mitte des Schildes markiert, und mit welcher man die Position der zur Installation nötigen Pflöcke bestimmen kann.

2.5.3 Kreuz Wasserwaage:



Abbildung 21: Eine Kreuzwasserwaage zur Ausrichtung der Messapparatur und der Antennen relativ zur Oberfläche [11].

Bei dieser speziellen Wasserwaage handelt es sich um zwei, senkrecht zueinander ausgerichteten, Wasserwaagen, welche eine ebene Ausrichtung bzgl. des Horizonts gewährleisten. Abschätzungen mit einem Geodreieck haben ergeben, dass die Kreuz Wasserwaage bei einem Grad Abweichung relativ zum Horizont bereits voll ausschlägt. Für die Unsicherheit wird daher auch weniger als ein Grad geschätzt. Bzgl. der Temperatur wurde die Wasserwaage für 1 Stunde in eine Gefriertruhe mit einer Temperatur von ungefähr -18° gelegt. Die Wasserwaage hatte danach keine Anzeichen von Vereisungen und konnte auch weiter normal benutzt werden.

2.5.4 Gestochener Mastwurf (Knotentechnik):

Um die Antennen zu installieren ist es nötig eine Richtschnur zu spannen. Um einerseits eine effektive Methode zu haben, um die Richtschnur zu spannen, und gleichzeitig die Schnur nach dem Aufstellen wiederzuverwenden, soll hier als Beispiel der sogenannte gestochene Mastwurf erklärt werden. Durch diese Knotenart ist es möglich die Schnur zu spannen, während man den Knoten festzieht.

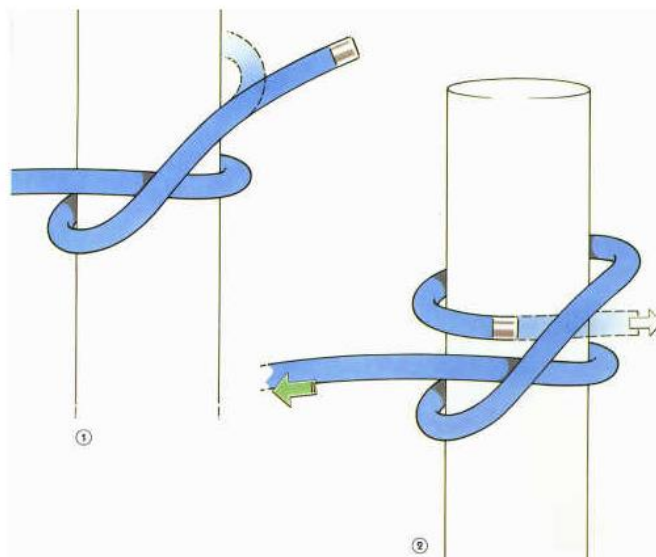


Abbildung 22: Skizze zum Binden eines gestochenen Mastwurfs [12].

Wie auf dem Bild zu erkennen, wird die Schnur einmal um den Pflock herumgeführt und dann unter der Führung noch einmal um den Pflock herumgeführt. Nun wird das Ende der Schnur durch die so entstandene Schlaufe geführt und dann festgezogen. In einem Test mit Winterhandschuhen und Sonnenbrille konnte der Knoten ebenfalls geknüpft werden, wenn auch mit etwas mehr Zeitaufwand. Ein weiterer Vorteil dieses Knotens ist, dass man ihn nach dem Aufstellen der Antennen wieder leicht lösen kann, wodurch man die Schnur mehrfach wiederbenutzen kann.

2.5.5 10 m Maßband:

Für die Messung von Distanzen für den Aufbau, wurde ein Maßband mit 10 m Länge angeschafft.



Abbildung 23: Maßband mit 10 m Länge [13].

Die theoretische Genauigkeit der Messskala des Maßbandes wird hierbei auf 0,5mm abgeschätzt. In der Praxis können jedoch durch externe Einflüsse wie Wind oder der Unebenheit der Fläche wesentlich größere Fehler entstehen. Die Bedienung des Maßbandes ist auch mit Handschuhen und Sonnenbrille leicht möglich. Des Weiteren wurde der Fehler des Maßbandes bei unterschiedlichen Temperaturen untersucht. Hierfür wurde ein cm auf dem Maßband mit dem auf einem Geodreieck verglichen. Anschließend wurde das Maßband bei -15 °C in eine Gefriertruhe gelegt und nach 45 Minuten erneut mit dem Geodreieck verglichen. Mit dem Auge konnte hierbei kein Fehler der Maßband Skala erkannt werden.

2.5.6 5 mW Laser:

Bis auf die Messung 3.2 Genauigkeit des Lasers 1 wurden alle Messungen mit dem Laserpointer im folgenden Bild gemacht.



Abbildung 24: Laserpointer mit einer Leistung von >5 mW. Die Farbe des Lasers ist grün.

Dieser hat nach eigenen Angaben eine Leistung von <5 mW und ist somit der Laserklasse 3R zuzuordnen. Eine optische Leistungsmessung wurde nicht durchgeführt, allerdings lässt die Helligkeit des Lasers im Vergleich zu Strahlquellen derselben Klassifizierung darauf schließen, dass die Leistung >5 mW ist. Er strahlt bei einer Wellenlänge von 532 nm und ist somit grün. Beim Test auf Temperaturbeständigkeit bei -20° hat der Laser bereits bei einem Test nach 20 Minuten nicht mehr funktioniert. Der Grund hierfür waren vermutlich die Batterien (2x AAA) welche nicht temperaturbeständig sind. Er ist daher für die praktische Arbeit in Grönland nicht ohne weitere Kälteabschirmung benutzbar. Er wird aber in dieser Arbeit als Laser für die Messapparatur verwendet werden.

3. Messungen zur Überprüfung des Aufbauverfahrens

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Messungen präsentiert. Hierbei wird zunächst auf den Aufbau und dann die Ergebnisse eingegangen. Die Messungen sind chronologisch geordnet. Ein Teil der Messungen wurde dabei mit Handschuhen und Sonnenbrille durchgeführt, um die händische Tauglichkeit für den Einsatzort in Grönland abschätzen zu können.

3.1 Winkelungenaugkeit beim Ausrichten an der Richtschnur

Als erste Messung wurde überprüft, wie genau man die LPDAs mithilfe einer Richtschnur ausrichten kann, also wie groß die Winkelabweichung der Antenne relativ zur Richtschnur ist. Zu diesem Zweck wurde eine Richtschnur zwischen zwei Stühlen mit beliebiger Länge gespannt. Anschließend wurde ein Karton entlang seiner längsten Kante (ca.35 cm) an besagter Richtschnur ausgerichtet.

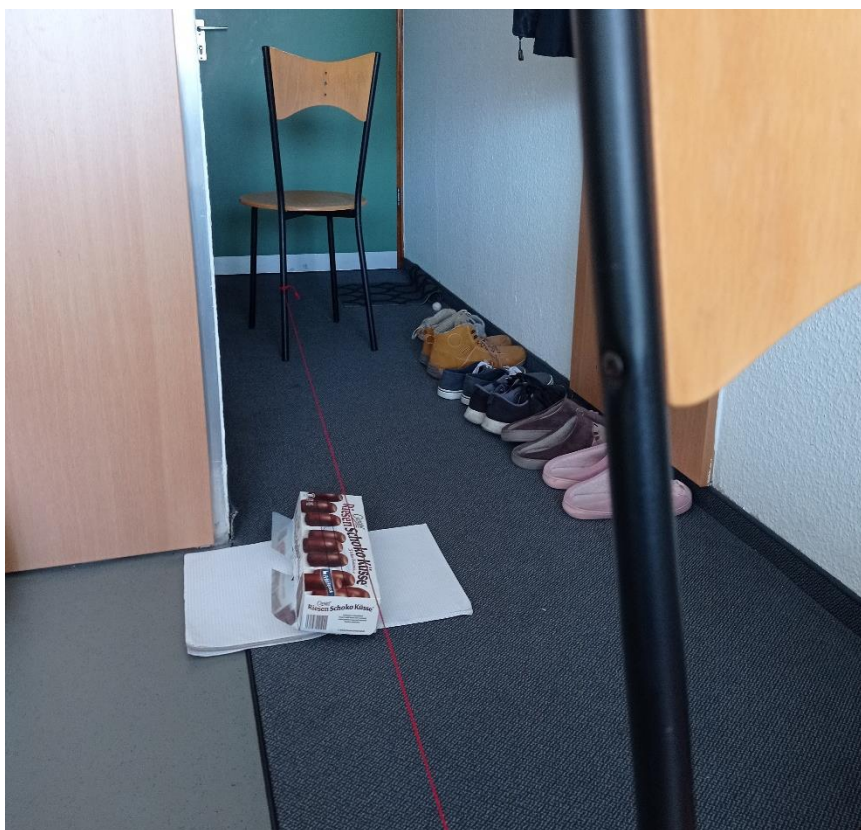


Abbildung 25: Aufbau der Messung zur Überprüfung der Genauigkeit der Ausrichtung der Antennen mithilfe der Richtschnur. Der Schreibblock hat hierbei eine feste Position unter der Richtschnur. Der Karton wird entlang der Richtschnur auf dem Block ausgerichtet und dann darauf markiert.



Abbildung 26: Karton, welcher als Antenne ausgerichtet wurde. Die Linien auf dem Karton wurden hierbei als Führung verwendet.

Um mehrere Ausrichtungen vergleichen zu können wurde der Karton auf einem Blatt Papier, welches einen festen Punkt auf dem Boden hatte, ausgerichtet, auf welchem dann die Lage der ausgerichteten Kante des Kartons markiert wurde. Insgesamt wurden fünf Messungen gemacht. Diese sind auf dem folgenden Foto zu sehen.



Abbildung 27: Messung der Ungenauigkeit des Ausrichtungswinkels mithilfe von markierten Ausrichtungen auf einem Block.

Ziel war es nun aus den leichten Winkelunterschieden der jeweiligen Ausrichtungen eine Standardabweichung und somit einen Wert für die Ungenauigkeit der Ausrichtung einer Antenne entlang der Richtschnur zu bestimmen. Da jedoch einige der Linien sehr nah aufeinander liegen und auch fast parallel verlaufen, wurde auf die quantitative Berechnung einer Unsicherheit verzichtet und diese stattdessen lediglich abgeschätzt. Diese Ungenauigkeit liegt bei nicht mehr als bei $1,5^\circ$ und liegt damit noch innerhalb der obigen Fehlertoleranz.

3.2 Genauigkeit des Lasers 1

Die nächste Messung untersucht die Genauigkeit, mit welcher man die Position der oben erwähnten Pflöcke, mithilfe des Lasers, messen kann. D.h. wie gut die Position, die man mit dem Laser einmal getroffen hat, wieder getroffen wird. Hierfür wurde mithilfe eines Maßbandes eine Strecke von acht Metern von einer Mauer weg gemessen. Hierbei ist zu erwähnen, dass das Maßband nur eine Länge von fünf Metern hatte und daher zweimal gemessen werden musste. An dieser Stelle wurde dann ein Holzbalken, vertikal zum Boden aufgestellt und mit einem Blatt Papier versehen, worauf der Laser auf die Wand ausgerichtet wurde. An der besagten Stelle an der Wand wurde dann ebenfalls ein Blatt Papier befestigt und die Position, wie der Laser auf dem Holzbalken gelegen hat, wurde mit Bleistift auf dem darauf befestigten Papier markiert. Hier soll noch erwähnt werden, dass der Laser Punkt in acht Meter Entfernung nur schwer mit dem Auge zu erkennen war und dementsprechend noch schwerer mit Sonnenbrille. Der Grund hierfür kann jedoch auch eine schwache Batterie gewesen sein, da die Leistung des Lasers 5mW betragen hat. Der Laser war ebenfalls mit Winterhandschuhen bedienbar.



Abbildung 28: Messaufbau zur Genauigkeit des Lasers bei Neuausrichtung. Das zu sehende Maßband war für eine Messung zu kurz, daher musste zweimal gemessen werden. Der Laser wird auf dem Holzpflock positioniert und anschließend auf die Wand ausgerichtet.

Nun wurde der Laser zehn Mal entlang der Markierung auf dem Pflock neu ausgerichtet und der Punkt des Laserpointers auf dem Papier an der Wand markiert.

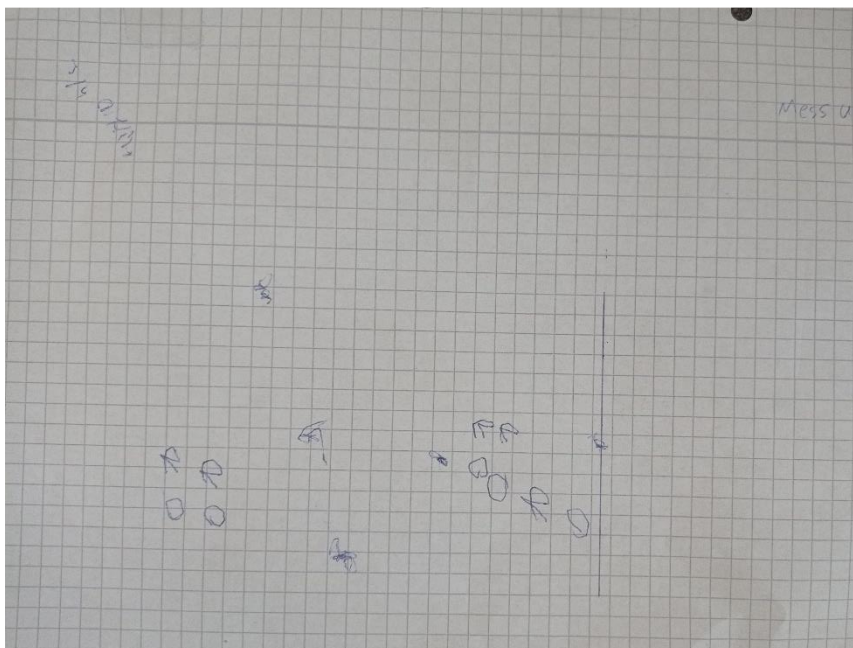


Abbildung 29: Trefferpunkte des Lasers auf dem Papier, welches an der Wand befestigt wurde.

Um einen quantitativen Fehler zu bestimmen, wurde anschließend der horizontale Abstand der Punkte relativ zu einem zufällig ausgewählten Punkt bestimmt und daraus eine Standardabweichung berechnet.

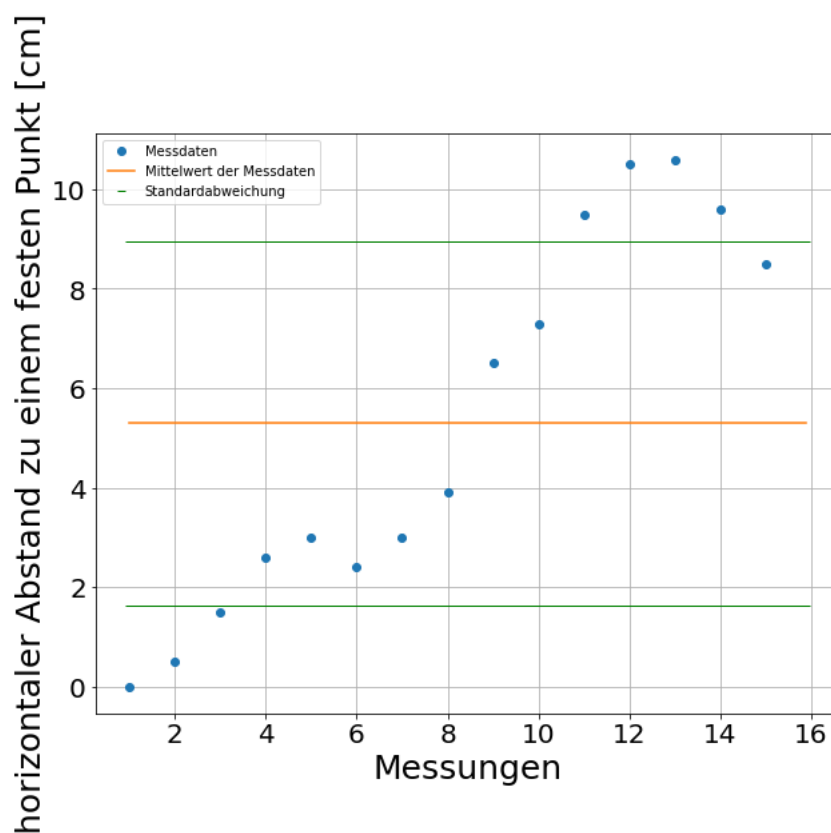


Abbildung 30: Abstand der jeweiligen Messpunkte relativ zu einem festen Punkt in cm. Die Messungen wurden hierbei der Zeit nach aufgetragen, d.h. der erste Abstand entspricht der 1 auf der Abszisse. Dies erklärt auch die scheinbare Proportionalität, welche jedoch daherkommt, dass die kleinen Abstände zuerst gemessen wurden.

Diese berechnet sich nach der obigen Abbildung auf 3,78 cm, was bei acht Meter Entfernung einem Winkel $0,27^\circ$ entspricht. Es fällt auf, dass die Messpunkte einem Muster zu folgen scheinen. Dies resultiert jedoch aus der Reihenfolge, in welcher die Abstände gemessen wurden, und hat keinen physikalischen Hintergrund. Hier soll noch erwähnt werden, dass der Laser auf dem Balken nicht fixiert war. Wäre dieser wie oben beschrieben an einem Stativ befestigt, ist davon auszugehen, dass die Unsicherheit noch einmal kleiner wird. Ein größeres Problem könnte hingegen die Sichtbarkeit des Laserpunktes auf größere Entfernungen sein.

3.3 Genauigkeit des Maßbandes

Wie im vorherigen Abschnitt diskutiert, weist der Laser v.a. bzgl. der Helligkeit eine mögliche Unbrauchbarkeit für die Aufstellung der Pflöcke auf. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt eine alternative Messung mit einem Maßband vorgestellt, welche im Fall des Versagens des Laserverfahrens als Alternative gedacht ist. Die Vorgehensweise der Messung ist hierbei dieselbe wie schon bei der Messung mit dem Laser. Hierfür wurde diesmal ein Block in einem Abstand von 7,45 m vom Messursprung auf den Boden gelegt, wie das folgende Foto zeigt. Der Abstand von 7,45 m entspricht der Distanz des Ursprungs zu einem der äußeren Pflöcke.

Bei diesen Messreihen wurde das Maßband verwendet, welches im Abschnitt 2.5.5 10 m Maßband: beschrieben wurde. Es musste also pro Durchgang nur einmal gemessen werden. Insgesamt wurden fünf Messungen gemacht, welche auf dem folgenden Foto zu sehen sind.

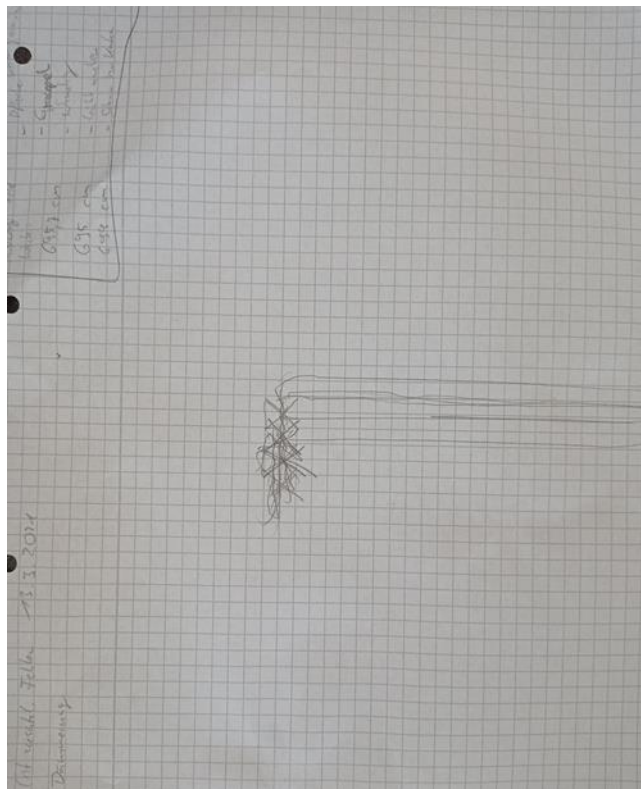


Abbildung 31: Messung der Abweichung des Maßbandes. Hier wurde analog wie bei der ersten Lasermessung vorgegangen.

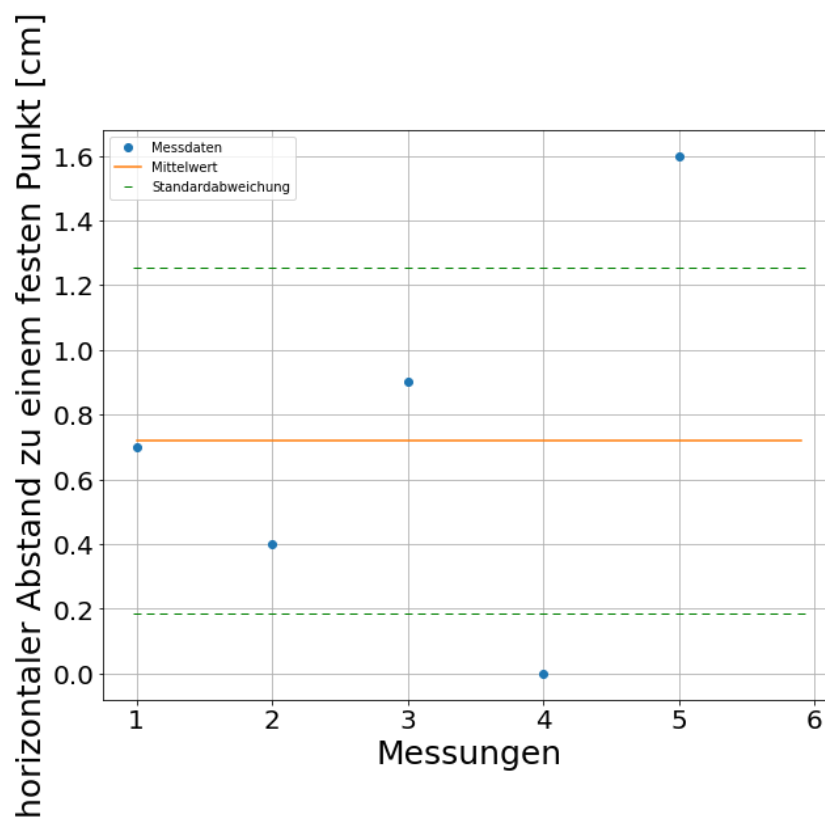


Abbildung 32: Abstände zu einem festen Punkt für die Maßbandmessung in cm. Die Abszisse zeigt hier wieder die einzelnen Messungen der Abstände.

Wie zu sehen, wurde, analog zu der Messung mit dem Laser, der Abstand der Punkte relativ zu einem festen Punkt gewählt. Daraus errechnet sich für den Fehler eine Standardabweichung von 0,6cm was einem Winkel von $0,05^\circ$ entspricht.

Da es zum Zeitpunkt des Versuchs bereits gedämmt hat, wurde aus Lichtgründen ein Versuch mit Sonnenbrille weggelassen. Da der Kontrast der Skala auf dem Maßband jedoch sehr stark ist (schwarz auf gelb), ist davon auszugehen, dass das Tragen einer Sonnenbrille die Benutzung des Maßbandes nicht beeinträchtigt. Ebenfalls wurde ein Messdurchgang mit Winter Handschuhen durchgeführt. Auch hier wurde keine Beeinträchtigung der Messung festgestellt.

3.4 Gesamtmessung 1

Um die Genauigkeit des Gesamtaufbaus zu untersuchen, wurde in diesem Abschnitt der Gesamtaufbau eines LPDA Dreierpaares mittels Maßband aufgebaut. Da die Aluminiumplatte zum Zeitpunkt des Versuchs noch nicht angekommen war, wurde als Ersatz eine mit Pappe verstärkte Papierscheibe verwendet, auf welcher die Markierungen aufgezeichnet wurden. Hierbei wurde jedoch für den Winkel zwischen den äußeren Markierungen 40° gewählt. Die mittlere Markierung befand sich bei 20° relativ zu den äußeren. Anschließend wurde das Maßband entlang der äußeren Winkel auf der Papierscheibe ausgerichtet, und der Abstand bei 7,45 m mit einem Pflöck markiert. Zuletzt wurde zwischen den so gestellten Pflöcken eine Richtschnur gespannt.



Abbildung 33: Bild zur Ausrichtung des Maßbandes an der Winkelplatte. Die hier verwendete Platte war eine provisorische aus Pappe und wurde mit zwei Schrauben im Boden fixiert.

Die Genauigkeit der Messung wurde anschließend mit der Messung der Distanz von der Papierscheibe zur Mitte der Richtschnur bestimmt.

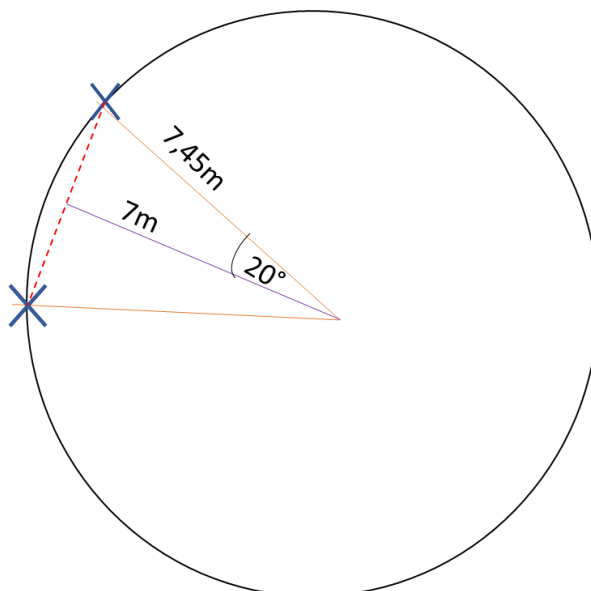


Abbildung 34: Skizze, was im Versuch Gesamtmessung 1 aufgebaut und gemessen wurde. Die lilane Strecke wurde hierbei gemessen und hatte einen Sollwert von 7 m. Der Winkel der Markierungen auf der Platte betrug 20° , was für die beiden äußeren Antennen einem Abstand von 7,45 m entsprachen.

Wichtig ist hierbei zu erwähnen, dass die Lage der Pflöcke mithilfe des Maßbandes und nicht mit dem Laser bestimmt wurde. Ebenfalls wurde die gesuchte Distanz von der Mitte der

Richtschnur zur Scheibe mit dem Maßband gemessen. Der Versuch wurde dreimal wiederholt. Die Messungen finden sich in Abbildung 37.



Abbildung 35: Bild einer Messung der Entfernung zur Position der mittleren Antenne zur Winkelplatte.



Abbildung 36: Bild zur Messung mit dem Maßband. Zur einfacheren Ausrichtung wurde hierbei das Ende des Maßbandes bei der Platte angesetzt.

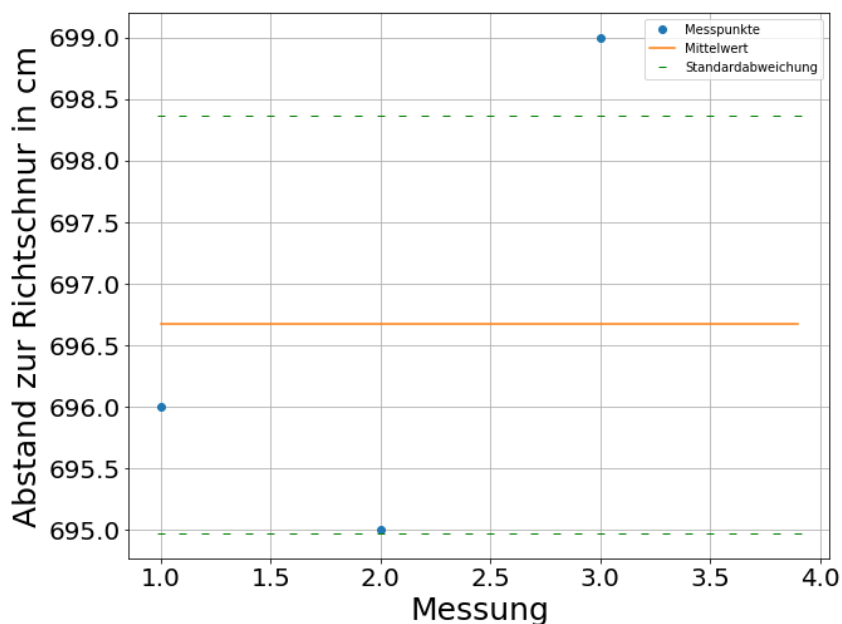


Abbildung 37: Diagramm zur Messung des Abstandes von der Papierplatte zur Richtschnur.

Um die Gesamtgenauigkeit des Aufbaus zu bestimmen wurde der Mittelwert über die Messungen gebildet. Dieser entspricht $6,97\text{ m} \pm 0,03\text{ m}$ und weicht somit um ungefähr 3 cm vom Sollwert von 7 m ab. Rechnet man die Standardabweichung wieder in einen Winkel um, so erhält man eine Gesamtunsicherheit von $0,2^\circ$. Damit liegt die Genauigkeit der Messung auf jeden Fall innerhalb der Fehlertoleranz.

Mögliche Ursachen für die Ungenauigkeit in der Messung waren einerseits die Wetterbedingungen. Am Tag der Messung war es sehr windig und es hat gegraupelt. Des Weiteren wurde die Papierdisk mithilfe einfacher Geometrischer Werkzeuge (Geodreieck und Zirkel) gefertigt, weshalb auch hier eine höhere Unsicherheit zu erwarten war. Im Nachhinein fiel auf, dass die Lage der Knoten, mitwelchem die Richtschnur an den Pflöcken befestigt war, ebenfalls zu einem Fehler geführt haben könnte. Siehe hierzu die folgende Abbildung

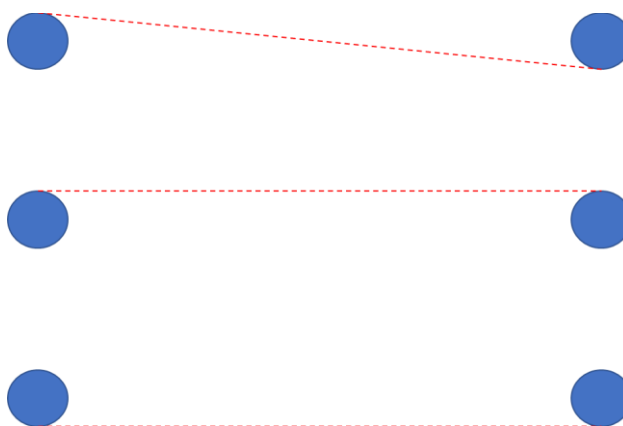


Abbildung 38: Skizze zur potenziellen Lage der Richtschnur bei entsprechender Befestigung an den Pflöcken. Die mittlere und die untere Skizze führen zu einer Verlängerung der Distanz von der Richtschnur zur Papierscheibe. Diese Verlängerung ist gleich dem Radius der Stärke der Pflöcke.

Die besagte Lage der Knoten konnte im Nachhinein nicht mehr ermittelt werden, sie wird jedoch für zukünftige Messungen berücksichtigt werden und es sollte auch beim Aufstellen der LPDAs darauf geachtet werden. Man erhält einen zusätzlichen Fehler in der Größe der halben Stärke der Pflöcke, welche ungefähr 3cm beträgt.

3.5 Genauigkeit des Lasers 2

Nachdem die generelle Genauigkeit des Lasers nun schon einmal untersucht wurde, wird in diesem Abschnitt die Genauigkeit des Lasers in der Messapparatur noch einmal in derselben Art und Weise gemessen, wie schon im Abschnitt 3.2 Genauigkeit des Lasers 1. Der Grund hierfür ist die Fertigstellung der Messapparatur, sowie der Einsatz einer neuen Strahlquelle (siehe Abschnitt 2.5.6 5 mW Laser:). Da bei der ersten Messung ebenfalls Bedenken wegen der Sichtbarkeit des Laserpunktes geäußert wurden, wurde dies im Freien, bei Tageslicht und einer nicht genau gemessenen Entfernung von 8- 10 m an einer roten Hauswand untersucht. Es wurde festgestellt, dass dieser Laser auch auf die Entfernung noch sehr gut sichtbar ist und der Laser aus dem ersten Versuch wohl eine schwache Batterie hatte.



Abbildung 39: Bild zur zweiten Messung der Genauigkeit des Lasers mit der Messapparatur.

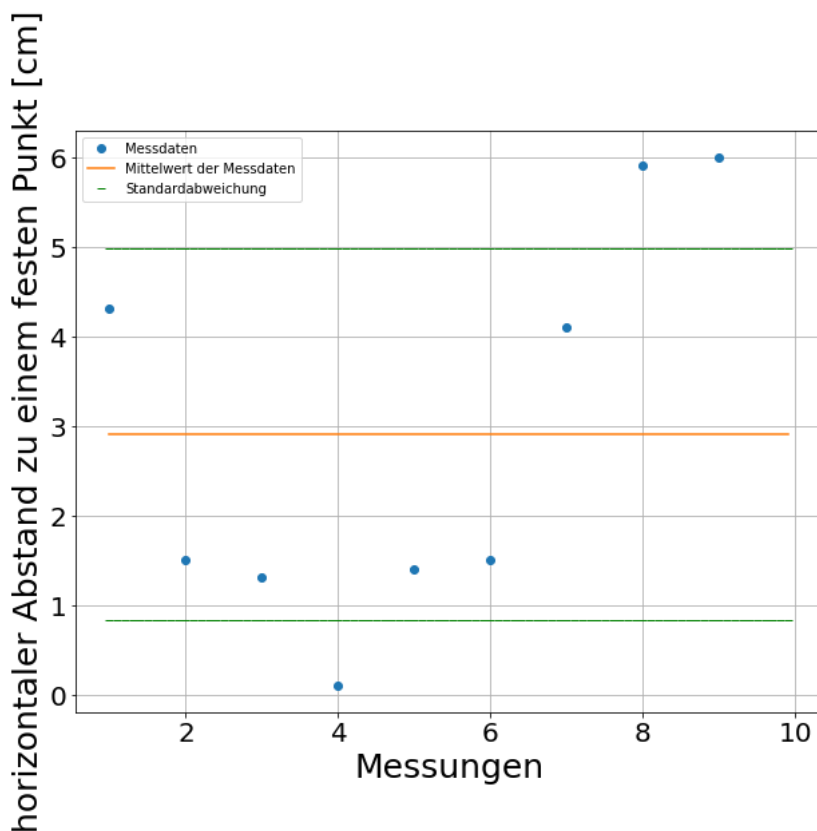


Abbildung 40: Messung des horizontalen Abstandes der gemessenen Punkte. Die Vorgehensweise ist hierbei analog zu der in Abbildung 29.

In der obigen Abbildung finden sich wieder die gemessenen Abweichungen der jeweiligen Messpunkte. Die Unsicherheit hat sich hierbei auf ca. 2,2 cm Standardabweichung ergeben, was einem Winkel von $0,2^\circ$ entspricht. Sie ist damit im Vergleich zur ersten Lasermessung um ca. 35 % besser geworden und liegt ebenfalls innerhalb der Fehlertoleranz von $1-2^\circ$.

3.6 Gesamtmessung 2

In dieser Messung sollte die Genauigkeit des Lasers im Gesamtaufbau überprüft werden. Hierfür wurden, analog zum Gesamtaufbau 1 erst die beiden Pflöcke aufgestellt, und anschließend die Distanz der Mitte der Richtschnur, welche zwischen den beiden gespannt war, gemessen. Um die Position der jeweiligen Pflöcke zu finden, wurde diesmal das 2.5.2 Messschild: und ein Lot verwendet, um den Laserpunkt zu fixieren. Als Entfernungsmessung wurde wieder das Maßband verwendet.



Abbildung 41: Verwendung des Schildes und einem Lot zum Finden der exakten Position der Pflöcke. Der Faden mit dem Lot wird hierbei parallel über den Pfeil auf der Rückseite des Messschildes positioniert.

Bezüglich des Aufbaus sollte zuerst getestet werden, ob es genügt die Messapparatur im Boden zu verankern. Dies hat jedoch zu keinem stabilen Aufbau geführt, weshalb nachträglich ein improvisiertes Stativ gebaut wurde (siehe folgende Abbildung).



Abbildung 42: Bild des improvisierten Stativs zur Fixierung der Messapparatur.

Insgesamt wurde der Versuch fünfmal aufgebaut und gemessen. Die gemessenen Werte finden sich in der folgenden Tabelle bzw. in der darauffolgenden Abbildung.

Abstand zum Laser in m	Abstand der Mitte zum linken Pflock in m	Der sich aus den beiden Abständen ergebende Winkel in Grad
6,85	Keine Messung	Keine Messung
6,72	Keine Messung	Keine Messung
6,87	2,83	22,39
6,94	2,76	21,68
6,97	2,68	21,03

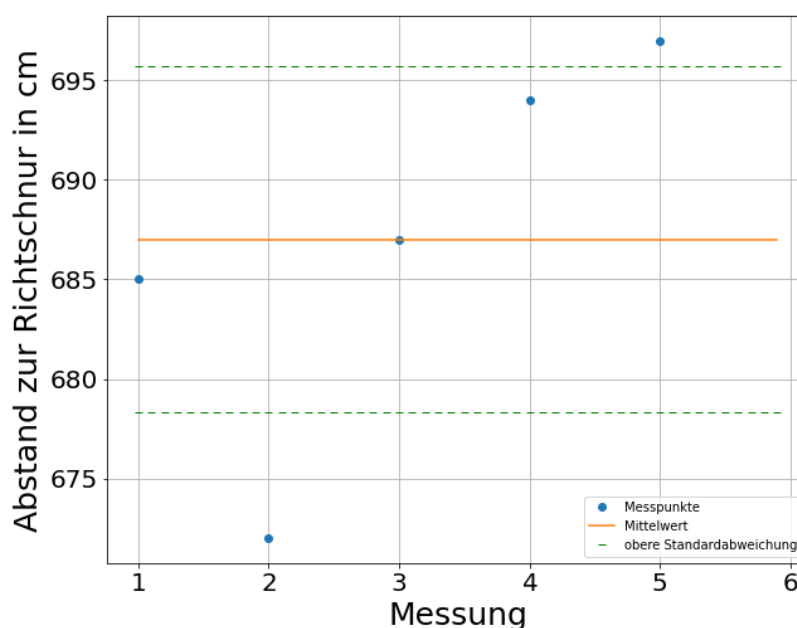


Abbildung 43: Abstandsmessung von der Aluminiumplatte zur Richtschnur. Die Vorgehensweise ist hierbei analog zu Abbildung 34.

Die Standardabweichung belief sich hierbei auf 9,72 cm. Dies entspricht einem Winkel von $0,81^\circ$ und ist damit zwar innerhalb der Fehlertoleranz, jedoch deutlich höher als mit der gleichen Messung mit dem Maßband. Weiter fällt auf, dass die Messungen alle kleiner waren als der eigentlich erwartete theoretische Wert. Dies wurde bei den letzten drei Messungen mithilfe der Länge vom linken Posten zur Mitte untersucht. Die Messwerte hierfür finden sich ebenfalls in der obigen Tabelle. Rechnet man zusammen mit den gemessenen Distanzen zur Mitte hin die Winkel aus, so erhält man für diese einen Mittelwert von $21,7^\circ \pm 2^\circ$. Hierbei wurde für den Fehler dreimal die Standardabweichung verwendet. Es sollte für einen stabilen Stand der Messapparatur ein Theodoliten Stativ verwendet werden.

4. Diskussion

In dieser Arbeit wurde eine Methode zur möglichst genauen Aufstellung der LPDAs gesucht, welche für das RNO-G Projekt eine Art Kontroll- und Kalibrationsstellung einnehmen. Hierbei wurde als grundsätzliche Idee festgehalten, dass man die Strecke von einer Antennengruppe mithilfe einer Richtschnur markiert, um die Ausrichtung auch nach dem Ausheben der Gräben noch zu gewährleisten. Diese besagte Ausrichtung wurde im Abschnitt 3.1 Winkelgenauigkeit beim Ausrichten an der Richtschnur untersucht und ist mit einer qualitativen Fehlereinschätzung von ca. einem Grad auch verwendbar. Um die Position der Pflöcke zu finden, an der die Richtschnur befestigt werden muss, wurde eine Aluminiumplatte entworfen (siehe den Abschnitt zur 2.5.1 Messapparatur:) auf welcher die entsprechenden Winkel vormarkiert sind und welche in der Mitte der drei Antennengruppen aufzustellen ist. 'Ausgehend von dieser Platte wurden zwei Ansätze zur weiteren Einmessung der Antennen gewählt. Die eine sollte mithilfe eines Lasers und GPS funktionieren, die andere mithilfe eines Maßbandes. Um zuerst die Reproduzierbarkeit einer Messung mit den jeweiligen Ansätzen zu untersuchen, wurde eine festgelegte Strecke mehrmals mithilfe der Aluminiumplatte gemessen, und anschließend eine Standardabweichung über die Messungen errechnet. Diese ist für das Maßband in Abschnitt 3.3 Genauigkeit des Maßbandes zu finden und hat eine Ungenauigkeit von $0,05^\circ$. Für den Laser wurde diese Messung zweimal gemacht, da bei der ersten Messung keine adäquate Halterung für diesen zur Verfügung stand, siehe hierzu den Abschnitt 3.2 Genauigkeit des Lasers 1. Die zweite Messung hatte relativ zur ersten Messung eine Verbesserung um 38 % diese wurde im Abschnitt 3.5 Genauigkeit des Lasers 2 untersucht. Vergleicht man die Messung des Maßbandes direkt mit der Messung des zweiten Laserversuchs, so stellt man fest, dass das Maßband eine wesentlich kleinere Standardabweichung hat. Hier muss allerdings erwähnt werden, dass für diese Messung bzgl. des Maßbandes eine ebene Fläche verwendet wurde. Einen Überblick über die Gesamtunsicherheit sollten die Messungen aus Abschnitt 3.4 Gesamtmessung 1 für das Maßband und Abschnitt 3.6 Gesamtmessung 2 für den Laser liefern. Hierbei wurde der Aufbau für ein Antennendreierpaar mehrmals wiederholt und die Entfernung zur Position der mittleren Antenne als Messwert aufgezeichnet. Hierbei ist vor allem beim Laserversuch aufgefallen, dass besondere Sorgfalt für die Vermessung der Winkel auf der Aluminiumplatte wichtig ist. Als Fehler wurde hier wieder die Standardabweichung der jeweiligen Messwerte verwendet. Für den Aufbau mithilfe des Maßbandes erhält man hierbei $0,20^\circ$ und für den Laser $0,81^\circ$. Auch hier fällt wieder auf, dass das Maßband genauer als der Laser ist. Hier ist jedoch zu erwähnen, dass für die Entfernungsmessung in Grönland GPS vorgesehen ist, welches bei der Messung nicht in der nötigen Genauigkeit zur Verfügung stand. Stattdessen wurde die Entfernung mithilfe des Maßbandes gemessen. Weiter ist bei dem Laserversuch verstärkt aufgefallen, dass eine stabile Apparatur notwendig ist um einen möglichst genauen Messwert zu bekommen. In dem Versuch wurde dies mithilfe eines

improvisierten Stativs ermöglicht. Für den Aufbau in Grönland empfiehlt es sich hier ein Theodolit Stativ zu verwenden. Hierbei handelt es sich um ein Stativ, welches eine stabile lotrechte Auflage für ein Messinstrument auf unebenem Grund bietet.

Abschließend soll hier noch eine Empfehlung für einen der beiden Messapparaturen gegeben werden. Der Vorteil des Lasers ist, bei stabilem Stand, eine Vermessung der Umgebung, welche nahezu unabhängig von der Beschaffenheit der Oberfläche ist. Des Weiteren war die Unsicherheit des Aufbaus immer noch im Rahmen der Fehlertoleranzen. Nachteilig ist die Verwendung von elektronischen Geräten, welche in diesem Projekt höhere Belastungen aushalten müssen und somit potenziell teurer sind, sowie die deutlich größere Messapparatur, welche beim Transport deutlich mehr Platz einnimmt. Da das RNO-G an der Summit Station aufgebaut wird, ist dieser Faktor durchaus relevant. Dem gegenüber steht die Messung mit dem Maßband, welche weit weniger Platz einnimmt und, zumindest in den hier gemachten Messungen, genauer war. Des Weiteren konnte bei dem Maßband bis -18° kein sichtbarer Messfehler beobachtet werden, weshalb die Messmethode ohne weiteres benutzbar wäre. Nachteilig an dieser Methode ist jedoch, dass sie ungenauer oder sogar unbrauchbar wird, sobald die Oberfläche uneben wird. Da diese jedoch, wie in Abbildung 2 zu sehen, weitgehend eben ist, wird hier dennoch der Aufbau mit dem Maßband empfohlen. Generell wurde die Messapparatur jedoch so entworfen, dass man, wenn nötig, zwischen beiden Aufbauten wechseln kann.

Quellenverzeichnis

- [1] Aguilar et. al., „Design and Sensitivity of the Radio Neutrino Observatory,“ Nr. JINST 16 P03025 2021, 26 Dezember 2020.
- [2] U. Dederig, „Greenland edcp relief location map.jpg,“ 1 Dezember 2010. [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Greenland_edcp_relief_location_map.jpg.
- [3] Abe-Ouchi et. al., „Greenland_Factsheet,“ 24 01 2013. [Online]. Available: https://web.archive.org/web/20150102054622/http://bprc.osu.edu/wiki/Greenland_Factsheet. [Zugriff am 16 05 2021].
- [4] „geosummit,“ [Online]. Available: <https://www.geosummit.org/summit-station/virtual-tour>. [Zugriff am 12 04 2021].
- [5] MissMJ, „Standard Model of Elementary Particles,“ 27 August 2010. [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles-de.svg.
- [6] Aker et. al., „An improved upper limit on the neutrino mass from a direct kinematic method by KATRIN,“ Nr. Phys. Rev. Lett. 123, 221802 (2019), 13 09 2019.
- [7] Gandhi et. al., „Ultrahigh-Energy Neutrino Interactions,“ *Astropart.Phys.5:81-110,1996*, Nr. Astropart.Phys.5:81-110,1996, 19 12 1995.
- [8] Glaser et. al., „NuRadioMC: Simulating the radio emission of neutrinos from,“ Nr. Eur. Phys. J. C 80, 77 (2020), 03 02 2020.
- [9] RNO- G collaboration, *RNO-G-station-layout-topView*, 2021.
- [10] S.W. Barwick et. al., *Time-domain response of the ARIANNA detector*, 2014.
- [11] IWILCS, „A-SPY-W00374TN,“ 30 10 2020. [Online]. Available: https://www.amazon.de/gp/product/B08M987HB5/ref=ppx_yo_dt_b_asin_title_o02_s01?ie=UTF8&psc=1. [Zugriff am 16 05 2021].
- [12] N. Hartmann, „ff-muehlhausen,“ [Online]. Available: <http://www.ff-muehlhausen.de/mastwurf-gestochen.html>. [Zugriff am 16 05 2021].
- [13] PRESCH, „10031,“ 08 11 2017. [Online]. Available: https://www.amazon.de/gp/product/B0779D3H5Q/ref=ppx_yo_dt_b_asin_title_o00_s00?ie=UTF8&psc=1. [Zugriff am 16 05 2021].

Eidesstattliche Erklärung:

Ich versichere, dass ich die Arbeit: "Antenneninstallation für das RNO-G" ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen angefertigt habe und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch an keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat. Alle Ausführungen, die wörtlich übernommen wurden, sind als solche gekennzeichnet.

Erlangen, 16.05.2021

E. Fiedler