

# Charakterisierung von Straw Tubes im Rahmen des SHiP-Experiments

## Bachelorarbeit

**Lara Rönnebeck**

---

[lroenneb@physnet.uni-hamburg.de](mailto:lroenneb@physnet.uni-hamburg.de)

Studiengang Physik

Matr.-Nr. 6941536

Fachsemester 7

Erstgutachter: Prof. Dr. Caren Hagner

Zweitgutachter: Dr. Daniel Bick

Datum: 16. März 2020



Für weitere Untersuchungen im Rahmen der Teilchenphysik soll am CERN ein neues Experiment aufgebaut werden. Teil des neuen Experiments sind Strawtubedetektoren. Einen Prototyp dieser Röhren wurde im Rahmen dieser Bachelorarbeit untersucht. Es wurde festgestellt, dass die mechanische Belastbarkeit des verwendeten Wolframdraht unter den Werten, welche aus der Theorie folgen, liegen und somit eine Herausforderung beim Aufbau und dem Betrieb über längere Zeiträume darstellen könnten. Desweiteren wurde der Aufbau des Prototypen begleitet und die Effizienz, kosmische Myonen mit den Röhren zu detektieren, untersucht. Zuletzt habe ich festgestellt, dass die Erstellung einer Driftzeitortbeziehung der Strawtubes nur mit Hilfe eines sehr guten Alignments der Strawtubes in einem Referenzdetektors oder mit einer größeren Zahl von Strawtubes möglich ist.

A new experiment will be build at CERN for doing further studies about particle physics. Part of this experiment will be strawtube-detectors. A prototype of them was examined during this bachelorthesis. I found that the wire used in the tubes is less strong concerning the mechanical resilience than the theoretical values. Therefore there could be complications while the buildup and the operation over a long time period. Furthermore I took part in the build-up of the prototype and messured the efficiency of detecting cosmic muons with the tubes. In the end I found, that we need a better alignemt of the strawtubes relativ to a known detector if we want to examine the relation of drifttimes and postions with only three working strawtubes..

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Untersuchung des Drahtes</b>	<b>5</b>
2.1	Mechanische Zugkräfte . . . . .	5
2.2	Versuchsaufbau . . . . .	6
2.3	Messwerte und Analysen . . . . .	6
2.3.1	Dehnung . . . . .	7
2.3.2	Zerreißen . . . . .	7
2.3.3	Bewertung der Ergebnisse . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Strawtube Detektoren</b>	<b>10</b>
3.1	Das SHiP-Experiment . . . . .	10
3.2	Driftröhren . . . . .	11
3.2.1	Ionisation . . . . .	11
3.2.2	Funktionsweise Driftröhren . . . . .	14
3.2.3	Driftgase . . . . .	17
3.3	Szintillatoren und Photomultiplier . . . . .	17
3.4	Der OPERA-Detektor . . . . .	18
3.5	Teststand . . . . .	19
3.5.1	Aufbau . . . . .	19
3.5.2	Elektronik . . . . .	22
3.5.3	Hochspannungsversorgung der Röhre . . . . .	23
3.5.4	Driftgas . . . . .	24
3.6	Spurrekonstruktion . . . . .	25
3.7	Messung und Analyse . . . . .	26
3.7.1	Driftzeitortbeziehung Strawtubes . . . . .	26
3.7.2	Effizienz . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>Ausblick</b>	<b>37</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>38</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>40</b>

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>41</b>
<b>6 Danksagung</b>	<b>42</b>
<b>7 Eidesstattliche Erklärung</b>	<b>44</b>

# 1 Einleitung

Im Rahmen meiner Bachelorarbeit habe ich mich mit dem Aufbau und den Charakteristika von Strawtubedetektoren beschäftigt. Es handelt sich dabei um Driftröhrendetektoren neuer Bauweise und Dimension. Während meiner Arbeit habe ich einen Teil des Entwicklungsprozesses der Detektorprototypen verfolgt und begleitet. Meine Aufgabe ist in zwei Unterpunkte getrennt gewesen. Zuerst habe ich mich mit den mechanischen Eigenschaften des verwendeten Wolframdrahtes vertraut gemacht und diese untersucht, sowie Messergebnisse ausgewertet. Im zweiten Teil meiner Arbeit habe ich mich dann mit dem fertigen Prototypen beschäftigt. Mit meiner Messung und der dazugehörigen Analyse habe ich die Effizienz des neuen Detektors untersucht. Hierbei sollte verglichen werden, wie sich diese im Vergleich zum bereits ausführlich untersuchten OPERA-Detektors verhält.

Detektoren zum Nachweis und zur Identifikation verschiedener Teilchen bilden die Grundlage für die Teilchenphysik. Sie sind Werkzeug zum Erkenntnisgewinn. Daher ist für ein Fortschreiten der Forschung eine Weiterentwicklung dieser Detektoren unerlässlich. Eine häufig verwendete Detektorenklasse sind die Driftröhrendetektoren. Sie ermöglichen die Rekonstruktion von Spuren geladener Teilchen. Diese Spuren können je nach Aufbau des Experiments Aufschluss über Art und Eigenschaften der hindurch fliegenden Teilchen geben. Driftröhren bestehen aus einem Rohr aus leitendem Material. Da bei den Driftröhren jede Röhre nur einen Datenpunkt auf der Spur der Teilchen liefert, korreliert eine enge Anordnung der Röhren mit einer hohen Spurauflösung. Daher ist Ansatz im SHiP-Experiment eine neue Stufe der Messgenauigkeit zu erreichen, indem der Röhrendurchmesser auf 2 cm gesenkt wird. Zur Charakterisierung dieser neuen Bauweise mit 5 m langen Mylar Röhren, wird ein Teststand mit mittlerweile 4 Röhren betrieben. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit habe ich den Aufbau beobachtet und mitgestaltet. Eine meiner ersten Aufgaben bestand darin, die mechanischen Eigenschaften des verwendeten Wolframdrahtes, welcher als Anode im inneren der Röhren gespannt wird, zu untersuchen. Ziel der Arbeit ist es, den weiteren Aufbau zu begleiten und als finale Messung die Effizienz der Röhren zu bestimmen. Dies ist ein Indikator dafür, ob die Röhren in dieser Bauweise überhaupt für einen zukünftigen Einsatz am CERN geeignet sind.

## 2 Untersuchung des Drahtes

Beim Aufbau des Strawtubedetektors im SHiP-Experiment müssen sowohl die Straws als auch die innen befindlichen Wolframdrähte stark gespannt werden. Je geringer die Spannung in den Drähten ist, desto größer wäre die Abweichung von einer Geraden. Ein möglichst gerader Aufbau erleichtert die Auswertung der Messungen. Denn nur bei einem perfekt kreisförmigen und symmetrischen Querschnitt des Magnetfeldes in den Röhren ist der Radius aus den Driftzeiten trivial mit den verwendeten Formeln bestimmbar. Wie allgemein bekannt, kann ein perfekter Querschnitt bei einem waagerechten Aufbau auf Grund der gravitativen Einflüsse der Erde nie erreicht werden. Die leichten Abweichungen bei einem ausreichend gespannten Aufbau lassen sich aber vernachlässigen. Allerdings sollte man den Effekt so gering wie möglich halten. Damit beim Aufbauen unter den hohen Lasten der Draht nicht zerreißt, werden vorher die Eigenschaften des Drahtes untersucht. Auf dieser Grundlage wird die Spannung des Drahtes im Experiment ausgelegt. Denn der Draht soll auf Grund so stark wie möglich gespannt werden, um das Durchhängen zu minimieren, soll aber beim Aufbau und während des Experiments nicht reißen.

### 2.1 Mechanische Zugkräfte

Bei der Belastung eines Materials in Zugrichtung gibt es mehrere relevante Kraftbereiche. Bei kleinen Belastungen verhält sich das Material elastisch. Die Ausdehnung lässt sich trivial mit dem Hook'schen Gesetz (Gl. 2.1) bestimmen. Hierbei kann das Gesetz zur Betrachtung einer Feder durch Zusammenfassen der Variablen (Gl. 2.2) vereinfacht werden. Dass die selben Gesetzmäßigkeiten wie bei einer idealen Feder gelten, lässt sich dadurch erklären, dass die Verbindungen zwischen den Wolframatomten wie bei jedem anderen Material nicht statisch, sondern elastisch sind.

$$\frac{F}{A} = E \frac{\Delta L}{L} \quad (2.1)$$

$$\sigma = E \varepsilon \quad (2.2)$$

$\sigma$  beschreibt dabei die mechanische Spannung, welche sich aus der Kraft und der Querschnittsfläche berechnet und  $\varepsilon$  die relative Ausdehnung des Drahtes im Verhältnis zu seiner Länge.  $E$  ist das Elastizitätsmodul. Es ist die materialspezifische Proportionalitätskonstante.



Das Elastizitätsmodul von Wolfram beträgt laut Literatur  $E = 415,7$  GPa. Die Zugfestigkeit liegt bei 1800 MPa[13]. Dieser Wert gibt an, ab wann der Bereich der elastischen Verformung beendet ist.

Verlässt man den Bereich der elastischen Verformung, beginnt das Material zu fließen. Das bedeutet, dass der Draht seine Länge plastisch vergrößert. Die Veränderung ist irreversibel. Bei der plastischen Ausdehnung des Materials verringert sich der Querschnitt des Drahtes ebenfalls. Die Atome im Material „fließen“ aneinander vorbei. Dabei lösen sich die ursprünglich bestehenden Verbindungen und neue werden geknüpft. Dass sich dabei der Querschnitt reduziert, ist offensichtlich, da sich dieselbe Menge Material nun auf eine größere Länge verteilt. Sobald eine gewisse Kraft überschritten wird, zerreißt der Draht.

## 2.2 Versuchsaufbau

Zu untersuchen ist die Stabilität des Drahtes unter Zugbelastung. Hierfür wird auf einer Aluminiumschiene senkrecht eine Platte aufgeschraubt, in welcher sich ein kleines Loch befindet. Der Durchmesser des Loches ist groß genug, dass ein 45  $\mu\text{m}$  dicker Draht hindurch gefädelt werden kann. Jenseits der Platte wird ein Crimp-Pin befestigt, welcher nicht durch das Loch passt. Auf diese Weise wird der Draht eingespannt. Auf der anderen Seite befindet sich eine ähnliche Platte, allerdings ist diese am Haken einer elektronischen Hängewaage von Hersteller KERN SOHN GmbH vom Typ HDB 5K5N mit einer maximalen Belastung von 5 kg und einer Genauigkeit von 5 g befestigt. Am anderen Ende der Federwaage ist eine Gewindestange befestigt, welche durch eine fest montierte Aluminiumplatte läuft und dahinter mit einer Schraube befestigt ist. Mit Hilfe dieser Schraube kann langsam der Zug auf den Draht erhöht werden. Dabei ist zu beachten, dass die Schraube nur langsam gedreht werden sollte, um verwertbare Messergebnisse zu erhalten. Es werden mehrere Messungen durchgeführt. Hierfür werden jeweils 5,43 m lange Drähte eingespannt. Es wird sowohl ein 45  $\mu\text{m}$  Draht untersucht als auch ein 30  $\mu\text{m}$  Draht untersucht. Beim 45  $\mu\text{m}$  Draht handelt es sich um denselben, welcher auch für das OPERA-Experiment verwendet wurde. Der 30  $\mu\text{m}$  Draht ist der WEX31-ES Draht von Toshiba.

## 2.3 Messwerte und Analysen

Es wurden pro Draht 2 Messreihen aufgenommen. Die erste Messreihe dient der Untersuchung der Stabilität gegen Zerreißen. Hierfür wurden pro Drahtstärke 10 Drähte eingespannt und die Kraft langsam erhöht, bis diese zerrissen sind. Die zweite Messreihe untersucht die Dehnung des Drahtes. Mithilfe eines Lineals, welches an der Aluminiumschiene befestigt wurde, wird die Dehnung des Drahtes gemessen. Jeweils nach einer Verlängerung um 0,5 cm wurde die ausgeübte Kraft notiert. Da auch diese Drähte nach einer gewissen Belastung gerissen sind,

fließen die Werte für den Punkt des Zerreißen in die erste Messreihe mit ein. Auf diese Weise werden 5 weitere Messwerte generiert, da 5 Messreihen pro Drahtdurchmesser nach der zweiten Methode durchgeführt wurden.

### 2.3.1 Dehnung

Trägt man die gemessenen Kräfte zu den Elongationen in einem Graphen auf (Abb. 2.1) lässt sich die Kurve in zwei Bereiche aufteilen. Aus dem linearen Teil lässt sich durch lineare Regression das Elastizitätsmodul berechnen. Für den 30  $\mu\text{m}$  Draht errechnet sich  $345,88 \times 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$  und 45  $\mu\text{m}$  Draht errechnet sich  $345,92 \times 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ . Die Bestimmtheitsgrade der beiden Regressionen liegen bei  $R_{30}^2 = 0,9956$  und  $R_{45}^2 = 0,9944$  und sind damit mehr als zufriedenstellend. Der Literaturwert des Elastizitätsmodul von Wolfram liegt bei  $415,7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$  und ist damit höher. Die Abweichungen lassen sich wahrscheinlich durch die Produktionsbedingungen erklären. Die festkörperphysikalischen Eigenschaften der Drähte wird durch das Produktionsverfahren beeinflusst. Die mechanischen und thermischen Einflüsse ermöglichen eine Veränderung des Elastizitätsmoduls. Dass die Werte für die beiden unterschiedlichen Drähte nahe beieinander liegen ergibt Sinn. Da sie aus demselben Material bestehen und wahrscheinlich ähnlich gefertigt werden.

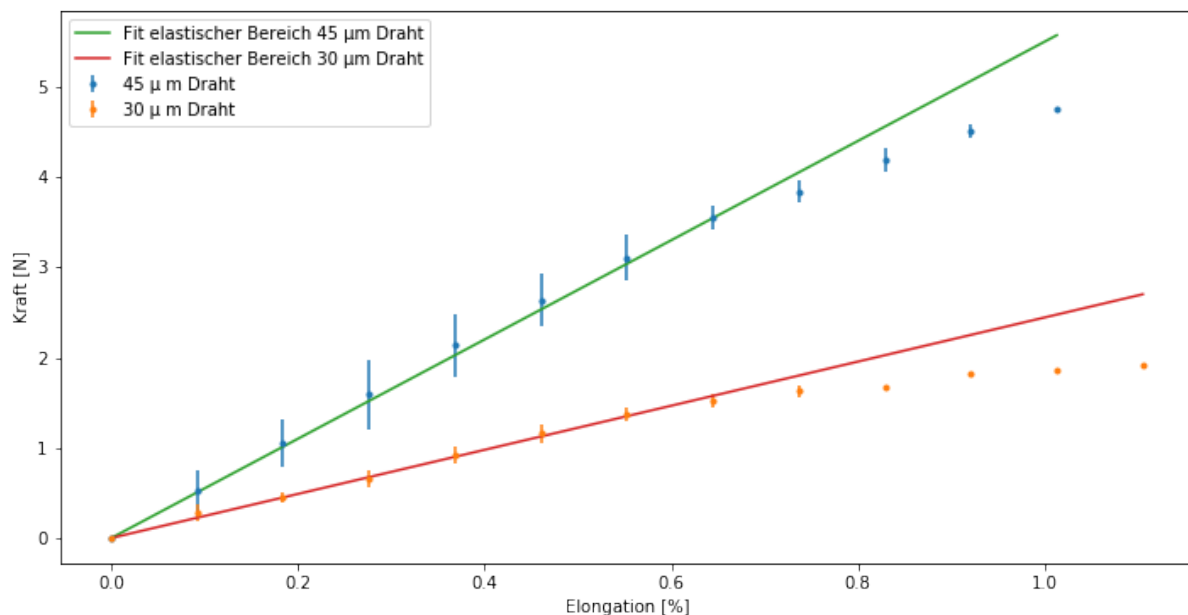


Abbildung 2.1: Ausgeübte Kraft gegen die Elongation aufgetragen sowie Trendlinie durch den elastischen Bereich für den 30  $\mu\text{m}$  und den den 45  $\mu\text{m}$  Draht

### 2.3.2 Zerreißen

Aus den 15 Messwerten pro Drahtstärke wurde der Durchschnitt gebildet. Dieser gibt einen guten Richtwert, wie sehr der Draht gedehnt werden kann, bevor dieser zerreißt. Daraus ergibt

sich, dass der dünne Draht mit 30  $\mu\text{m}$  im Durchschnitt bei einer Belastung von  $1,5 \pm 0,067\text{N}$  reißt. Das entspricht einem Fehler von 4,27%. Für den dickeren 45  $\mu\text{m}$  Draht errechnet sich ein durchschnittlicher Wert von  $4,2 \pm 0,74\text{N}$  hier liegt der Fehler mit 17,68% über 10%. Beim 45  $\mu\text{m}$  Draht fallen 2 Messwerte stark aus der Reihe. Geht man davon aus, dass diese Werte auf Grund menschlichen Versagens, Produktionsfehlern oder ähnlichen Ausnahmen zustande gekommen sind und nimmt diese somit aus der Rechnung, folgt ein Durchschnitt von  $4,4 \pm 0,13$ . Dies entspricht lediglich einem Fehler von 3,05%. Der dickere Draht erreicht also eine 2,5 mal höhere Stabilität gegen Zerreißen als der dünnere Draht.

Die Stabilität gegen Zerreißen ist aus zwei Gründen relevant. Zum ersten ist es ein Richtwert wie stark der Draht initial maximal gespannt werden darf. Eine hohe Spannung des Drahtes ist relevant, da sich dieser nach Möglichkeit in der Mitte der Mylar-Röhre befinden soll, um ein ideales Magnetfeld zu erzeugen und somit eine präzise Messung der Driftzeit ermöglicht. Außerdem soll ein Ausschlagen gegen die Mylarfolie verhindert werden, was durch elektrische Kräfte passieren kann. Sobald der Draht nicht mehr exakt zentral in der Röhre ist, ist das Magnetfeld auf der näher an der Folie befindlichen Seite höher. Die resultierende Kraft zieht den Draht also weiter in die bereits ausgelenkte Richtung und verfälscht somit seine Position weiter. Die Kräfte des Magnetfeldes reichen nicht aus, um ein zerreißen des Drahtes zu verursachen. Dies folgt aus einer einfachen geometrischen Überlegung. bildet man aus den Aufhängepunkten des Drahtes ein Dreieck (Abb. 2.2) zu einem Punkt auf der Folie in der Mitte der Röhre, kann man näherungsweise die maximal mögliche zusätzliche Dehnung des Drahtes berechnen.

$$d = 500 \text{ mm}$$

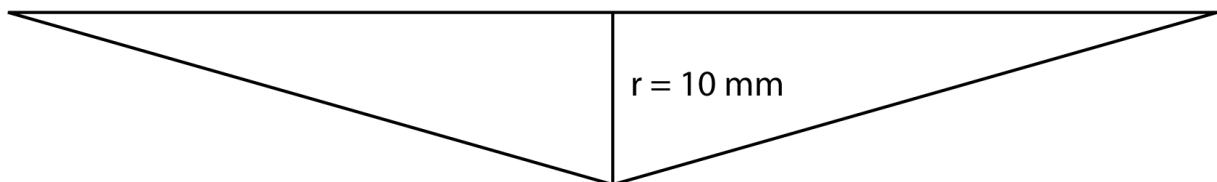


Abbildung 2.2: Dreieck zur Näherung der Auslenkung des Drahtes bis zum Radius der Röhre

$$r^2 + \frac{d^2}{2} = \frac{x^2}{2} \quad (2.3)$$

$$x = 2\sqrt{\frac{d^2}{2} + r^2} = 500,004\text{cm} \quad (2.4)$$

Das Dreieck wird als Näherung verwendet, da der Draht um lediglich 40  $\mu\text{m}$  gedehnt wird. Dieser Wert entspricht nur einer Dehnung um 0,0008% (Gl. 2.4), was bei etwa 10% der Zerreißgrenze der Drähte beider Dicken liegt.

### **2.3.3 Bewertung der Ergebnisse**

Durch eine größere Stichprobe ließe sich die statistische Signifikanz der Messung sicherlich noch verbessern. Derzeit sind die Werte stark davon beeinflusst, dass einzelne Drähte bereits bei verhältnismäßig kleinen Kräften rissen. Dies kann mehrere Ursachen haben. Die wichtigsten sind meines Erachtens Produktionsfehler, Beschädigungen während der Lagerung und menschlicher Fehler beim Einspannen der Drähte. Es ist also darauf zu achten die Drähte sorgsam zu behandeln, um Beschädigungen am Detektor zu verhindern.

Desweiteren ist zu untersuchen, wie sich der Draht im Verhältnis zu den Mylar Röhren dehnt. Denn wenn diese unterschiedlich durchhängen, befinden sich die Drähte nicht mehr in der Mitte der Röhren, was eine Verschlechterung der Messqualität zur Folge hat.

# 3 Strawtube Detektoren

Im folgenden Kapitel möchte ich auf den Straw-Tube Teststand, welcher in meiner Zeit in der Arbeitsgruppe untersucht und aufgebaut wurde, eingehen und diesen in den Kontext des SHiP-Experimentes einordnen.

## 3.1 Das SHiP-Experiment

Die Abkürzung SHiP [15] steht für „Search for Hidden Particles“ und ist ein Experiment, welches am CERN am SPS, dem „Super Proton Synchrotron“ Beschleuniger aufgebaut werden soll. Der SPS [10] ist einer der Vorbeschleuniger des LHC und wird aus dem PS, dem Proton Synchrotron, gespeist. Es handelt sich beim SPS um ein Synchrotron, also einen Ringbeschleuniger. Der Beschleuniger hat einen Umfang von 6912 m. Für SHiP werden die beschleunigten Protonen auf ein festes Target geschossen. Die bei dieser Reaktion frei gewordenen Teilchen werden dann mit mehreren verschiedenen Detektoren untersucht (siehe Abbildung 3.1). Nachdem aus dem Teilchenstrahl die Hadronen gestoppt wurden und mit einem 30 m langen Myonenschild die Anzahl der Myonen um sechs Größenordnungen gesenkt wurden, durchfliegen die übrig gebliebenen Teilchen den SHiP-Detektor. Er besteht aus zwei Komponenten, dem „Hidden Sector decay spectrometer“ (HS) und dem „Scattering and Neutrino Detector“ (SND). In dieser Bachelorarbeit wird der SST, der „Spectrometer Straw Tracker“, betrachtet. Er ist Teil des HS und folgt auf ein Zerfallsvolumen mit einem Druck unter  $10^{-2}$  bar. Beim SST handelt es sich um einen Driftröhrendetektor aus etwa 16000 mit Gold und Kupfer bedampften Mylar-Röhren von 5 m Länge und 2 cm Durchmesser, welche mit einem  $30\ \mu\text{m}$  Draht durchzogen sind. Insgesamt wird er auf einer Fläche von 10 m Höhe und 5 m Breite die Impulse sowie Spuren und die Massen geladener Teilchen bestimmen [1]. Mit den gewonnenen Informationen können die Zerfalls-Vertices der Teilchen bestimmt werden und auf die abgelaufenen Prozesse zurückgerechnet werden. Dies ist eine klassische Methode zum Nachweis schwer oder nicht detektierbarer Teilchen. Es werden messbare Teilchen, welche aus dem Zerfall der schwer detektierbaren Teilchen resultieren, gemessen. Ziel des Experiments ist es bisher nicht nachgewiesene Teilchen zu untersuchen. Besonderes Ziel ist es das Heavy Neutral Lepton zu finden und das Anti-Tau Neutrino nachzuweisen. Beide Prozesse sind durch Messung der Zerfallsprodukte, welche aus einem Vertex stammen, nachweisbar.

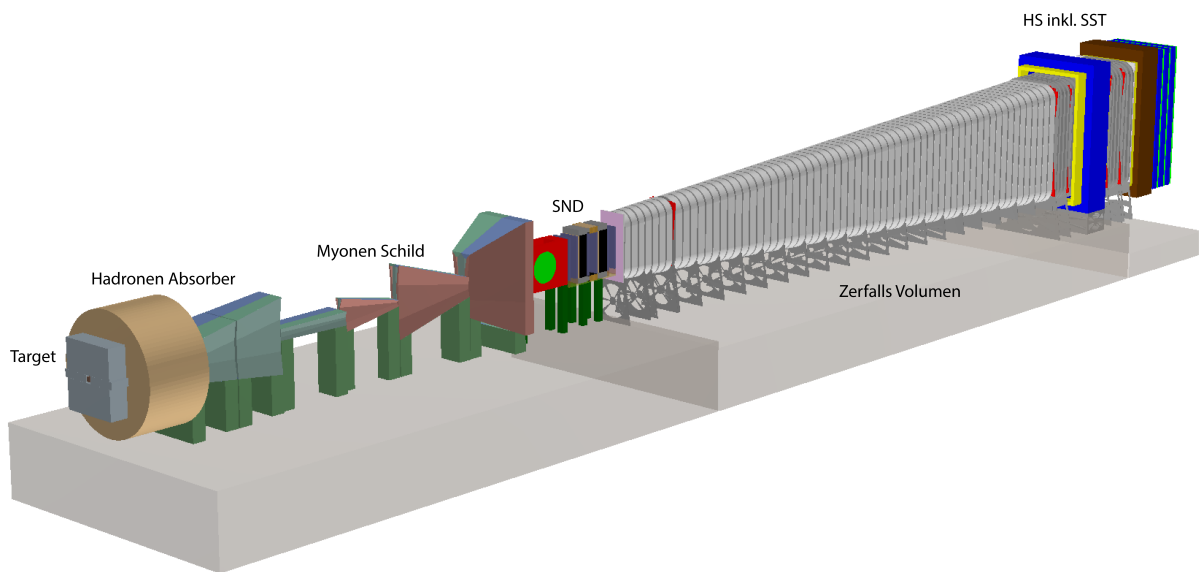


Abbildung 3.1: Geplanter Aufbau SHiP

Bei Teilchen des „Hidden Sector“ handelt es sich um hypothetische Teilchen, für die es bislang keinen Nachweis gibt. Sie würden das Standardmodell ergänzen und Hinweise auf dunkle Materie, Supersymmetrie oder String-Theorie bieten. Diese sind besonders schwierig nachzuweisen, da sie nicht oder kaum mit den bekannten Teilchen des Standardmodells wechselwirken. Es handelt sich bei SHiP um ein Experiment an der Intensitätsgrenze. Das bedeutet, dass besonders viele Ereignisse erwartet werden. Die Energie der Teilchen ist dabei nicht so hoch wie es bei Experimenten an der Energiegrenze der Fall wäre, wie zum Beispiel die Experimente, die am LHC stattfinden. Zur Erzeugung der zu untersuchenden Teilchen sind niedrigere Energien ausreichend. Die hohe Intensität hingegen ist unerlässlich, da die Ereignisse, welche zu untersuchen sind, eine geringe Wahrscheinlichkeit haben. Eine geringe Intensität würde eine erheblich längere Messzeit voraussetzen.

## 3.2 Driftröhren

Driftröhren werden zum Nachweis von ionisierenden Teilchen verwendet. Sie bestehen aus einer Röhre und einem dadurch laufenden Draht. Zwischen diesen beiden wird eine Hochspannung angelegt, sodass ein radialsymmetrisches elektrisches Feld entsteht. Zudem wird die Driftröhre mit einem Driftgas gefüllt.

### 3.2.1 Ionisation

Durchfliegen geladene Teilchen Materie, wechselwirken sie mit den enthaltenen Atomen. Die Atome werden hierbei angeregt oder ionisiert. Die deponierte Energie kann mit Hilfe der Bethe-Bloch-Formel (Gl. 3.1) beschrieben werden [3][2]. Da Myonen sowohl schwer als auch hochre-

lativistisch sind, können sie damit gut beschrieben werden. In Abbildung 3.2 [12] ist der Verlauf der Formel für verschiedene Teilchen und Materialien zu sehen.

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A \rho r_e^2 c^2 z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right] \quad (3.1)$$

- $\frac{dE}{dx}$  = deponierte Energie pro Wegstrcke
- $N_A$  = Avogadrokonstante
- $\rho$  = Dicht Material
- $r_e$  = Elektronenradius
- $m_e$  = Elektronenmasse
- $c$  = Vakuumlichtgeschwindigkeit
- $z$  = Ladungszahl Teilchen
- $Z$  = Kernladung Material
- $A$  = Atomgewicht Material
- $\beta = \frac{v}{c}$  = für relativistische Geschwindigkeiten
- $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} =$  Lorentzfaktor
- $I$  = mittlere Anregungsenergie Material
- $\delta$  = Dichteeffekt auf Grund der Polarisation

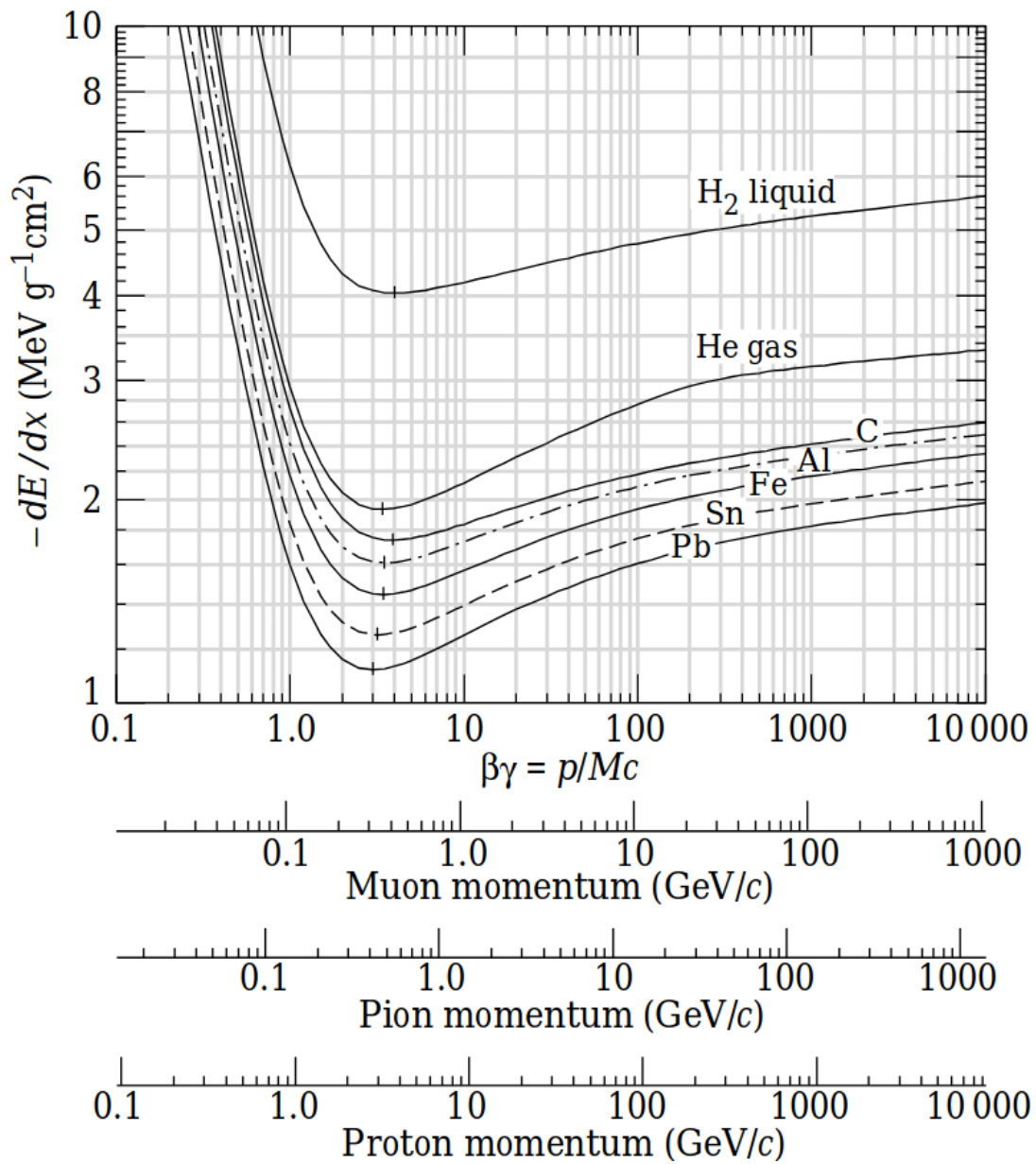


Abbildung 3.2: Verlauf der Bethe-Bloch-Formel für verschiedene Materialien und verschiedene Teilchen



### 3.2.2 Funktionsweise Driftröhren

Durchfliegt nun ein ionisierendes Teilchen die Driftröhre wird das Driftgas entlang der Teilchenspur ionisiert. Das bedeutet, dass Elektronen aus den Atomen ausgeschlagen werden. Die entstehenden positiv geladenen Ionen wandern zum Rand der Driftröhre, da die Außenwand negativ geladen ist. Die freigesetzten Elektronen werden ebenfalls durch das E-Feld beschleunigt und wandern mit zunehmender Geschwindigkeit zum Draht. Je näher sich die Elektronen am Draht befinden, desto stärker ist die auf sie wirkende Kraft, da das elektrische Feld auf Grund der Geometrie dort am stärksten ist, wie man in Abbildung 3.3 sieht. Dort wo der Abstand der Feldlinien am geringsten ist, ist das elektrische Feld am größten. Die Pfeile zeigen in die Richtung der Kraft auf ein positiv geladenes Teilchen innerhalb des Feldes.

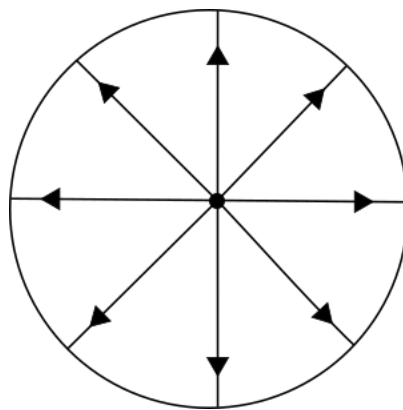


Abbildung 3.3: Elektrisches Feld innerhalb der Driftröhre

Das Auslösen von Elektronen durch ein externes ionisierendes Teilchen nennt man Primärionisation. Diese Elektronen haben am später gemessenen Signal nur wenig Anteil. Der Hauptteil sind Elektronen aus Sekundärionisationen. Dieser Prozess beschreibt das Ausschlagen weiterer Elektronen durch die primären Elektronen. Deshalb wird das Driftgas benötigt. Aus der Driftzeit, die die Elektronen von ihrem Ursprung bis zum Draht brauchen, lässt sich mit der Driftzeitortbeziehung der Abstand der Spur zum Draht berechnen. Der kürzeste Abstand ergibt den Radius des Kreises, an dem die Teilchenspur eine Tangente bildet. Der größte Abstand ist immer der Radius der Driftröhre. Daher wird dieser Wert nicht betrachtet, sondern nur die Zeit bis zum Eingang des ersten Elektronensignals. In Abbildung 3.4 ist der Zusammenhang leicht erkennbar. Die durchgezogene Linie zeigt einen Teilchendurchgang. Die eingezeichnete „Driftzeit“ zeigt den kürzesten Weg von der Teilchenspur zum Draht. Der längste Weg ist als Radius der Driftröhre eingezeichnet.

Die Zeiten werden mithilfe eines zweiten Detektors gemessen. Hierfür eignet sich zum Beispiel ein Szintillator in Kombination mit einem Photomultiplier. Sobald dieser einen Teilchendurchgang detektiert, wird die Zeit bis zum ersten Signal in der Driftröhre gemessen. Ohne einen externen Trigger lässt sich beim heutigen Stand kein Driftröhrendetektor realisieren, der eine entsprechende Genauigkeit liefert. Die Zeitdifferenz die das Teilchen nach Durchgang durch die Driftröhre bis zum Szintillator benötigt ist unerheblich, da das Teilchen signifikant

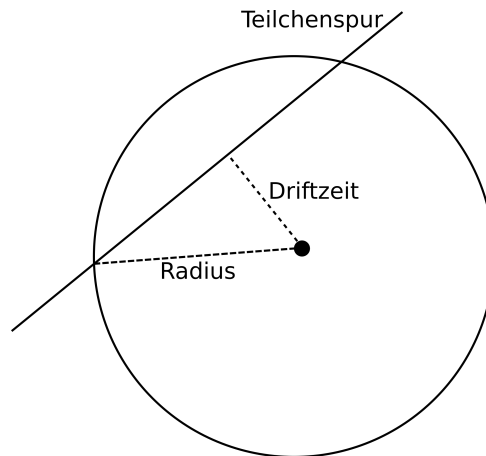


Abbildung 3.4: Querschnitt der Driftzählröhre bei Teilchendurchgang

schneller ist, als die driftenden Elektronen. Ein kosmisches Myon beispielsweise hat beim Eintreffen auf der Erde etwa eine Geschwindigkeit von 99,8% der Lichtgeschwindigkeit. Die Zeit, die ein Myon für einen Meter benötigt, beträgt etwa 3,3 ns. Die Driftzeit der Elektronen zum Draht liegt im ms Bereich. Dass der Weg zum Szintillator kaum ins Gewicht fällt, ist offensichtlich. Aus den Messungen einer Röhre lässt sich die Teilchenbahn noch nicht rekonstruieren. Die Teilchenspur kann eine beliebige Tangente an den bestimmten Radius bilden. Bei 2 Röhren reduziert sich die Anzahl auf 4 mögliche Wege wie man in Abbildung 3.5 sieht. In der Abbildung wird ebenfalls deutlich, dass mindestens 3 Röhren getroffen werden müssen. Dies muss bei der Anordnung der Röhren im Detektor mit eingeplant werden, sodass nach Möglichkeit alle eingehenden Teilchen eine ausreichende Anzahl trifft, um die Teilchenspur rekonstruieren zu können.

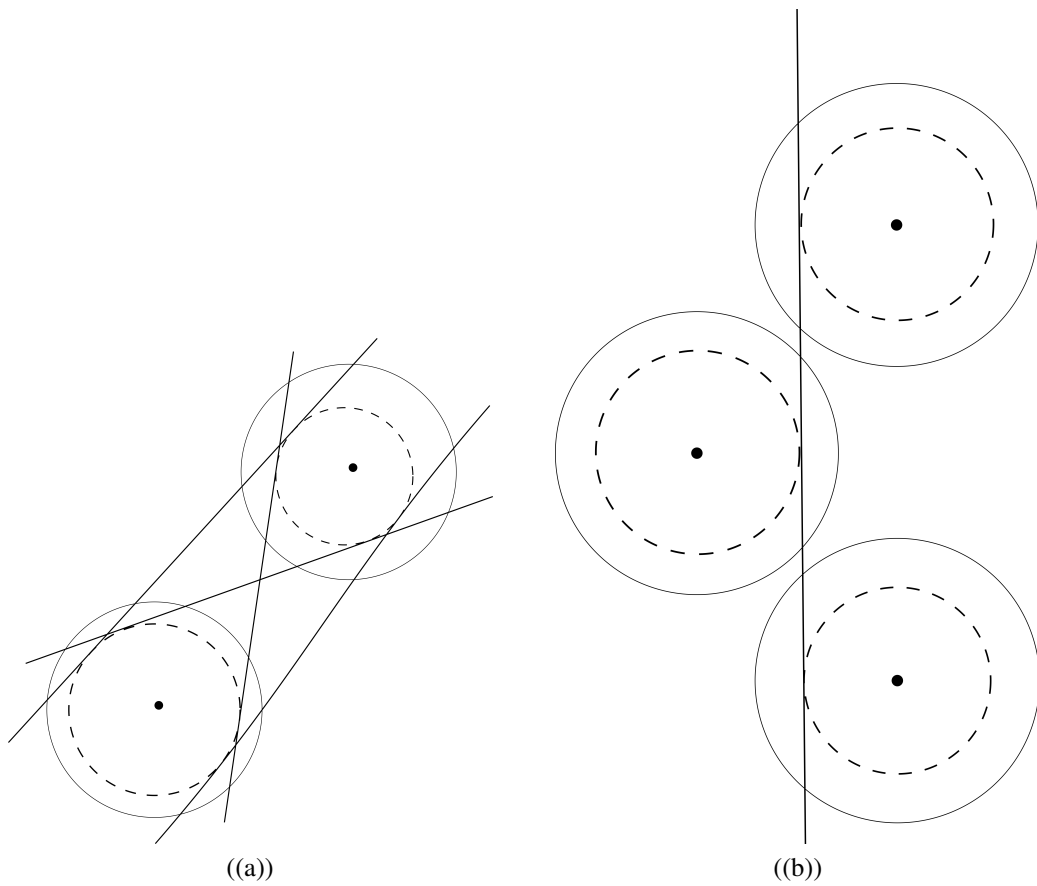


Abbildung 3.5: Mögliche Teilchenspuren bei (a) 2 und (b) 3 getroffenen Röhren

### 3.2.3 Driftgase

Die Driftröhren sind mit Gas gefüllt. Es besteht aus zwei Komponenten einem leicht ionisierbaren Gas und eine Quencher. Zur Ionisation eignen sich Edelgase besonders gut, da sie eine volle Außenschale haben. Je weiter unten das Edelgas im Periodensystem steht, desto leichter lässt es sich ionisieren. Dies liegt daran, dass die Außenschalen weiter vom Atomkern entfernt sind und somit die enthaltenen Elektronen weniger stark gebunden sind. Allerdings nimmt nicht nur ihre Ionisationsfähigkeit sondern auch ihr Preis zu. Den besten Preis-Leistungs-Kompromiss bietet in unserem Fall Argon.

Nachdem das durchfliegende Myon eine Primäriionisation ausgelöst hat, löst dieses Elektron weitere Sekundärelektronen aus. Diese Lawine ist notwendig, da einzelne Elektronen von der Elektronik nicht gemessen werden können. Allerdings muss diese Lawine gedämpft werden, um eine dauerhafte Entladung zu unterdrücken. Diese Aufgabe übernimmt der Quencher. Als Quencher werden Gase verwendet, die nach der Aufnahme von Energie durch Photonen vornehmlich in Rotations- oder Schwingungszustände angeregt werden anstatt weitere Photonen auszusen- den. Gase wie CO<sub>2</sub> können das leisten. Auf diese Weise wird die Ladungslawine gebremst und es kommt nicht zu einer dauerhaften Entladung der Röhre, was eine Messung einzelner Ereig- nisse unmöglich machen würde. Außerdem sind Störungen des Signals durch hochenergetische Photonen reduziert.

## 3.3 Szintillatoren und Photomultiplier

Als Trigger für die Opera-Detektormodule und die Straw-Tubes wurden Szintillatorplatten und Photomultiplier verwendet. Szintillatorplatten bestehen aus einem Material, welches durch ge- ladene Teilchen angeregt wird. Die aufgenommene Energie wird in Form von Photonen wieder abgegeben. Dieser Prozess nennt sich Szintillation. In der Regel wird das entstandene Licht gemessen und daraus geschlossen, um was für ein Teilchen es sich gehandelt hat anhand seiner Energie. In unserem Fall soll das Signal nur als Trigger für unser Experiment dienen. Daher ist die Information, dass ein Teilchen die Szintillatorplatte durchquert hat, ausreichend. Die Szin- tillatorplatten sind mit zwei Folienschichten umwickelt, einer reflektierenden innen und außen herum mit einer lichtundurchlässigen, schwarzen Folie . Die reflektierende Folie soll bewirken, dass möglichst jedes Photon am Photomultiplier ankommt. Ohne diese würden nur die Photo- nen den Detektor treffen, welche zufällig in die richtige Richtung ausgesandt worden waren. Da die Richtung, in welche die Photonen ausgesendet werden, rein zufällig verteilt ist, ist es of- fensichtlich warum die reflektierende Folie für diesen Anwendungsfall Sinn hat. Die schwarze Ummantelung schützt vor Umgebungslicht. Dieses könnte die Photomultiplier beschädigen.

Photomultiplier (Abb.3.6) sind geeignet wenig Licht zu detektieren. Sie können ja nach Bauwei- se bis zu einzelne Photonen detektieren. Das Primärphoton trifft auf eine Photoplatte, die Pho- tokathode. Durch den Photoelektrischen-Effekt wird ein Elektron herausgelöst. Dieses Elek- tron wird durch ein elektrisches Feld beschleunigt. Das beschleunigte Elektron trifft auf weitere

Elektroden, sogenannte Dynoden. Bei jedem Elektrodenkontakt werden mehr Sekundärelektronen herausgelöst, da die Elektronen zwischen den Elektroden immer weiter beschleunigt werden. Am Ende des Aufbaus wird der verstärkte Strom gemessen und als Messsignal ausgegeben. Die Ummantelung mit schwarzer Folie ist nicht nur wichtig, um die Messung nicht zu verfälschen, sie ist auch unerlässlich zum Schutz der Photomultiplier. Denn sie sind sehr empfindlich gegenüber starken Lichtsignalen. Sollte dieser mit Umgebungslicht in Kontakt kommen, besteht die Gefahr, dass die Beschichtungen der Dynoden zerstört werden. Das Auslösen von Sekundärelektronen wäre so nicht mehr möglich und der Photomultiplier nicht mehr verwendbar.

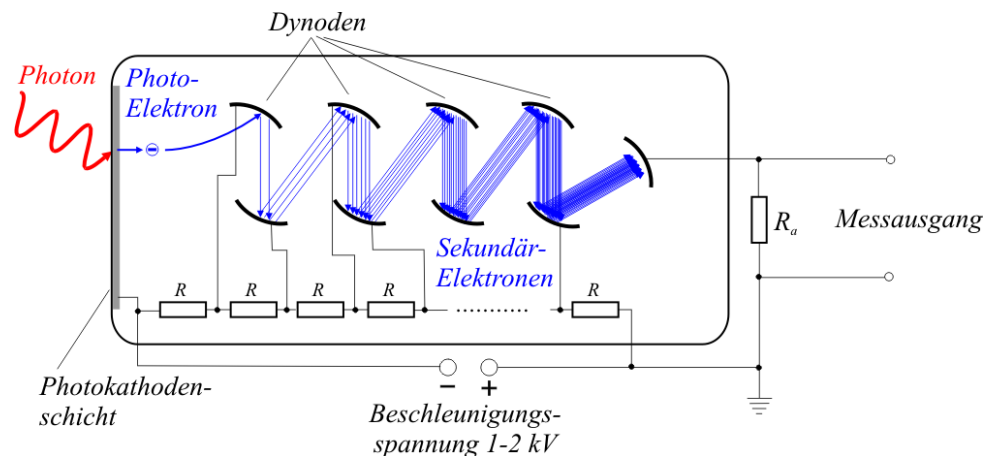


Abbildung 3.6: Schematische Darstellung von Photomultipliern[9]

### 3.4 Der OPERA-Detektor

OPERA ist die Abkürzung für Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus. Es handelt sich hierbei um ein Appearance-Experiment. Es wurde zum Nachweis von Tau-Neutrinos und Untersuchung von Neutrino-Oszillation verwendet. Der Hauptbetriebszeitraum war von 2008 bis 2012, obwohl im August 2016 bei einem Testlauf bereits die ersten Neutrinos nachgewiesen werden konnten. Verwendet wurde der CNGS-Strahl. CNGS steht für CERN Neutrinos to Gran Sasso. Im Namen steckt bereits, worum es sich dabei handelt. Der Neutrinostrahl, welcher durch den SPS erzeugt wird, besteht nur aus Myon-Neutrinos. Daher eignet er sich besonders gut zum Nachweis von Neutrino-Oszillationen. Da Neutrinos kaum mit Materie interagieren, kann er die 730 km bis zum LNGS (Gran Sasso National Laboratory) problemfrei unterirdisch zurücklegen. [7]. Gran Sasso liegt etwa 120 km östlich von Rom in Italien. Hier soll auch das SHiP-Experiment aufgebaut werden, sobald die Planung beendet ist. Der OPERA-Detektor besteht aus mehreren Modulen. Für unseren Versuchsaufbau haben wir Driftröhren verwendet, welche den Driftröhren aus dem OPERA-Experiment entsprechen, mit den Ausnahme, dass sie lediglich 1 m lang sind. Die Wandstärke der 48 Aluminiumröhren pro Modul beträgt 0,85 mm bei einem Röhrendurchmesser von 38 mm. Die Röhren sind so angeordnet, das möglichst viele Röhren bei einem Teilchendurchgang getroffen werden. Es handelt sich um 4 Lagen mit jeweils 12 Röhren. Die Anordnung ist in Abbildung 3.7 zu sehen.

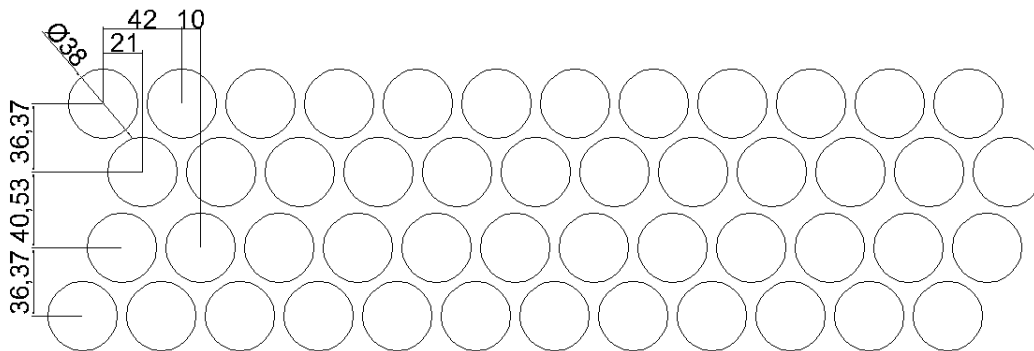


Abbildung 3.7: Zeichnung eines OPERA-Moduls zu sehen sind die Außendurchmesser der Röhren

## 3.5 Teststand

Der Teststand, welcher im Labor aufgebaut ist, besteht aus 4 Straw-Tubes mit einem Triggersystem und OPERA-Modulen als Referenzmessung. Von den 4 Tubes funktionieren lediglich 3. Wir vermuten, dass dies an einem Problem in der Elektronik liegt.

### 3.5.1 Aufbau

In Abbildung 3.8 ist ein Gesamtüberblick des Aufbaus zu sehen. Zentrales Element sind die Strawtubes, welche waagrecht zwischen zwei Aluminiumplatten (Abb. 3.9) eingespannt sind.

Am linken Ende der Abbildung ist ein Aluminiumgehäuse, welches die Verstärkerelektronik und die Spannungsversorgung mit den Strawtubes verbindet. Zu sehen sind sowohl die NIM-Kabel, welche das invertierte Signal zur Ausleseelektronik führen, als auch die Kabel, welche das originale Signal zur Ansicht an ein Oszilloskop (Abb. 3.10) führen. Auf den Bildern des Oszilloskops lässt sich gut erkennen, dass Röhre 1 (Kanal 1, in gelb dargestellt) keine verwertbaren Ergebnisse liefert. Die Ursache hierfür ist ungeklärt geblieben, da eine weitere Analyse des Problems zeitintensiv gewesen wäre und ggf. eine Beschädigung der anderen drei funktionierenden Röhren nach sich gezogen hätte. Daher wurden die Messungen mit 3 Röhren durchgeführt. Bei den initial vier aufgebauten Röhren, sind zwei mit dem 45  $\mu\text{m}$  Draht und zwei mit dem 30  $\mu\text{m}$  Draht durchzogen, die im vorhinein bereits auf ihre mechanischen Eigenschaften untersucht wurden. Die beiden fensterseitigen Röhren enthalten den 45  $\mu\text{m}$  Draht. Die obere hiervon ist die defekte erste Röhre. In den Effizienzmessungen konnten also nur Messwerte einer 45  $\mu\text{m}$  Röhre mit denen von zwei 30  $\mu\text{m}$  Röhren verglichen werden.

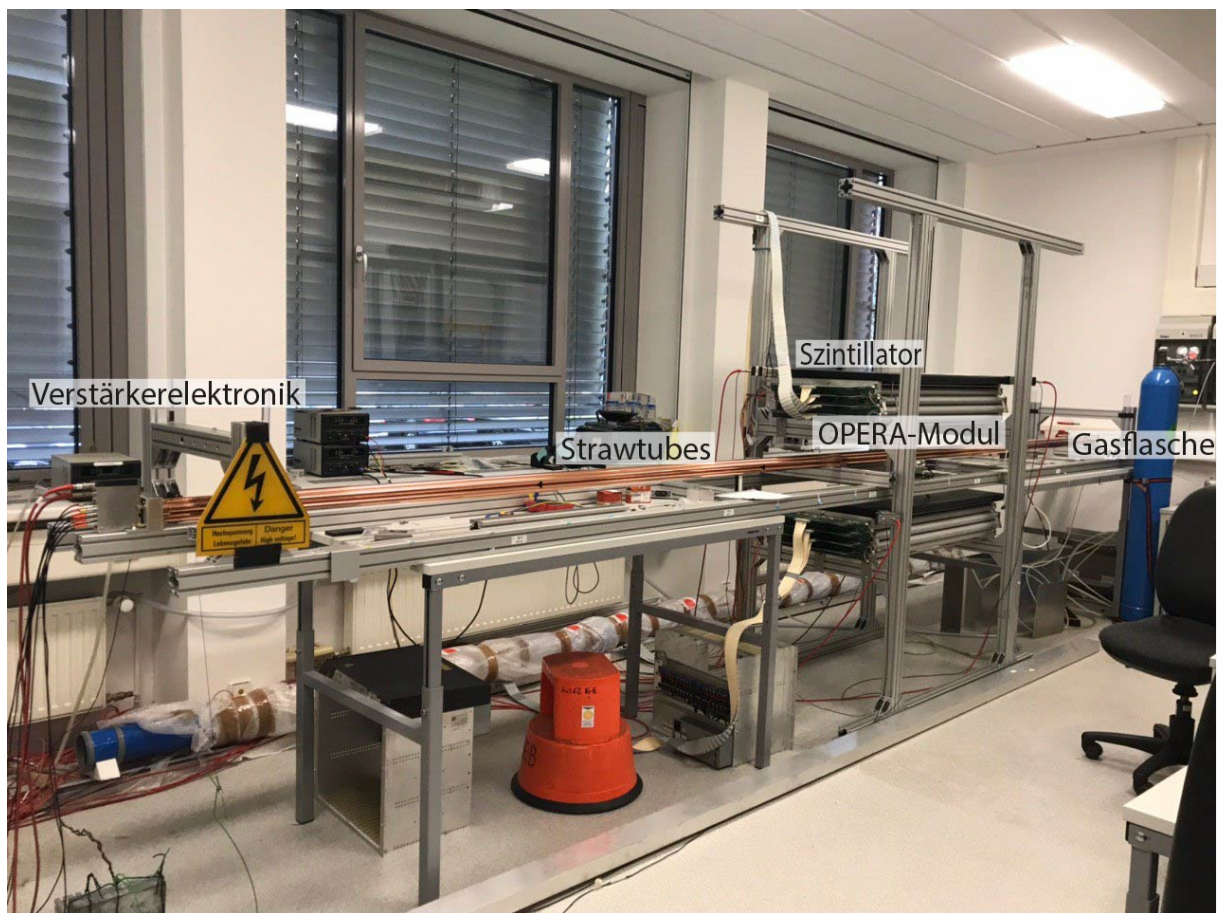


Abbildung 3.8: Gesamtüberblick über den Versuchsaufbau

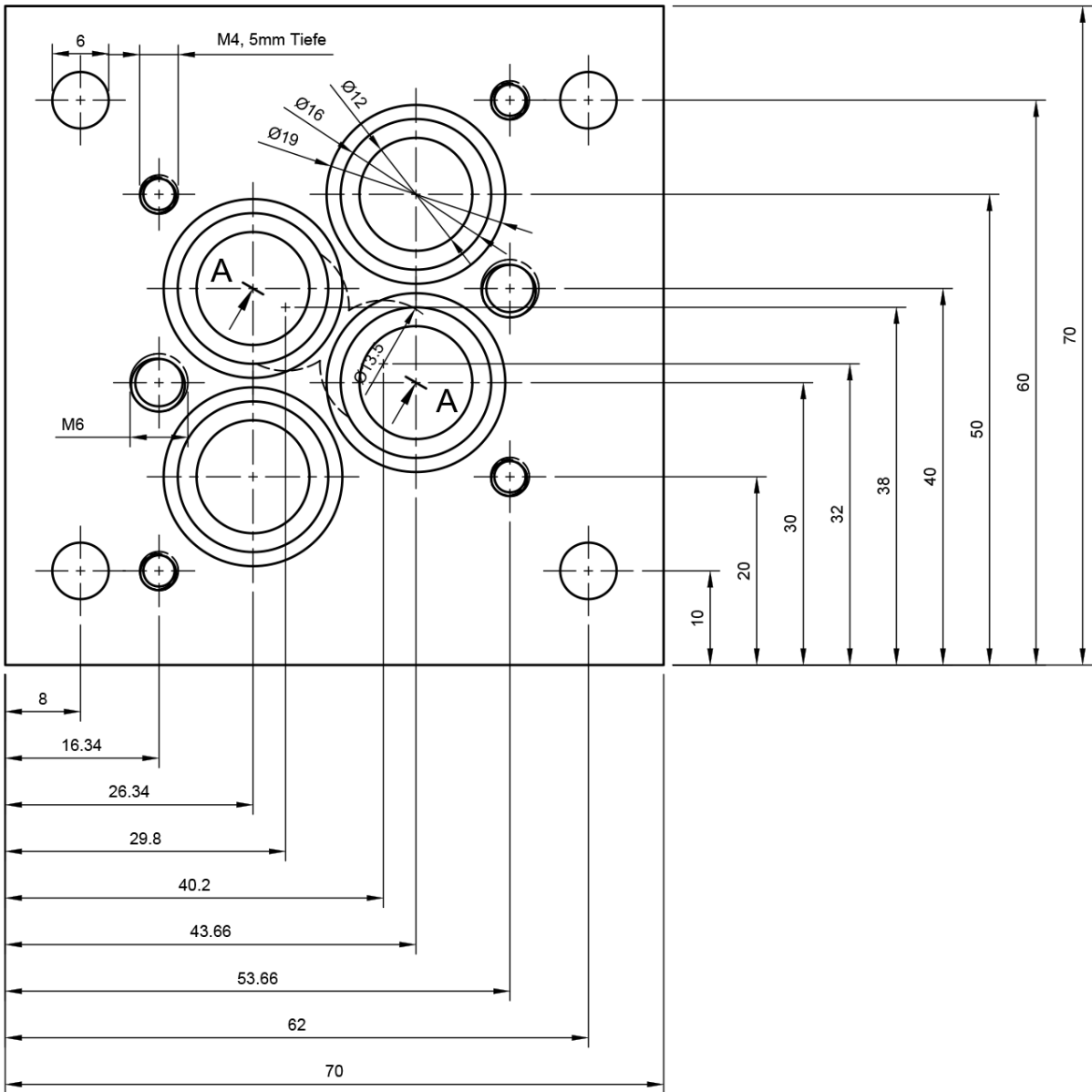


Abbildung 3.9: Technische Zeichnung der verwendeten Endplatte [14]





Abbildung 3.10: Oszilloskopbild eines Strawtubesignals in Röhre 2, 3 und 4

### 3.5.2 Elektronik

Die Elektronik muss mehrere Aspekte leisten. Hierzu zählt die Versorgung der Apparatur mit Hochspannung zum Betrieb der Röhren, aber auch die Datenauslese mithilfe eines TDCs (Time to Digital Converter) und eines FADCs (Flash Analog to Digital Converter). Verwendet wurde ein CAEN V1190A-2eSST 128 Channel Multihit TDC und ein CAEN V1720 8 Channel FADC. Der TDC dient zum Auslesen der OPERA-Module, der FADC zur Auslese der Straw-Tubes. Die Höhe der verwendeten Spannungen wird im Abschnitt section 3.5.3 genauer beschrieben. Die Messung wird mit Hilfe eines Triggersignals aus vier Photomultipliern durchgeführt. Diese 4 Photomultiplier befinden sich an jeweils zwei Ecken von den zwei Szintillatorplatten. Sie sind 110 cm lang, 55 cm breit und 2,5 cm hoch und überspannen die OPERA-Module fast vollständig. Das Triggersignal resultiert aus einer Koinzidenz der Signale aus den vier Photomultipliern, welche die eingestellte Diskriminatorschwelle übersteigen. Die Diskriminatorschwelle ist so eingestellt, dass thermisches Rauschen mit hoher Wahrscheinlichkeit herausgefiltert wird und trotzdem möglichst alle tatsächlichen Signale weitergegeben werden. Auf diese Weise werden TDC und FADC nur ausgelesen, wenn ein Myonendurchflug zu erwarten ist, welcher beide OPERA-Module mit hoher Wahrscheinlichkeit trifft. Die Geometrie ist nicht optimal, sodass Events aufgenommen werden, welche keinen Myonendurchgang durch beide Module enthalten. Allerdings löst so das thermische Rauschen des Triggersystems praktisch keine Auslesen aus.

Bei den ersten Datennahmen gab es das Problem, dass die Ausgabedateien des TDC und des FADC nicht dieselbe Größe hatten. Dies lag daran, dass der TDC mehrere Signaleingänge hat und damit bereits weitere Ereignisse aufzeichnen kann, während der FADC noch ausgelesen

wird, da dieser nur ein Ereignis zur Zeit verarbeiten kann. Dies tritt immer dann auf, wenn zwei Myonenereignisse sehr kurz nacheinander auftreten. Um dieses Problem zu lösen haben wir ein Triggerbusy eingeführt (Abb. 3.11). Hierdurch wird nach dem Auslösen einer Messung der Trigger für einen gewissen Zeitraum praktisch ausgeschaltet, sodass der TDC erst nach Beendigung der Messung mit dem FADC mit diesem gleichzeitig wieder Triggersignale erhält. Der Triggerbusy wurde durch einen zwischengeschalteten Gate-Generator erzeugt. Der Gate-Generator öffnet bei Eingang eines Triggersignals ein Gate, dessen negatives Ausgangssignal mit unserer Trigger-Koinzidenz über ein AND-Gate verbunden wird. Es wird somit das Triggersignal für die Länge des Gates unterdrückt.

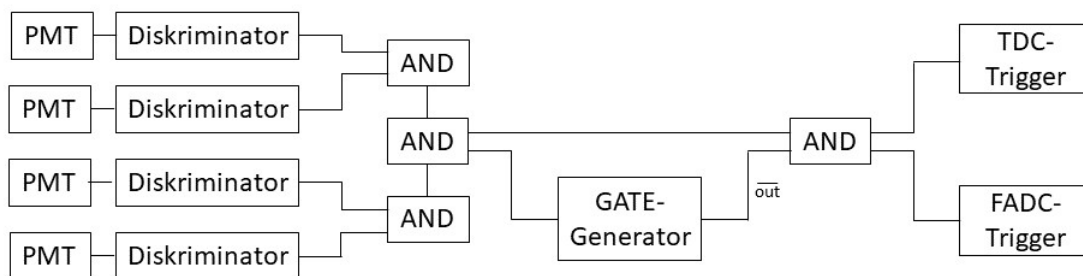


Abbildung 3.11: Schaltplan der Triggersystems; Die Signale der PMTs werden durch Koinzidenzen verrechnet, der GATE-Generator wird für den Triggerbusy verwendet

Um die Signale der OPERA-Module auslesen zu können, wurden Vorverstärkerplatinen verwendet, welche noch vorhanden waren. Es wird eine Platine pro Driftröhrenlage mit Driftröhren benötigt. Eingespeist werden die Signale der 12 Anodendrähte einer Lage, welche dann durch drei L3-Verstärkerchips verstärkt werden. Jeder dieser Verstärkerchips hat 3 Kanäle. Bereits zur Platine gehören 12 Diskriminatoren, sodass die Signale jedes einzelnen Drahtes diskriminiert werden können. Auf diese Weise wird bereits hier Rauschen herausgefiltert. In unseren Messungen haben wir eine Schwelle von 100 mV verwendet.

### 3.5.3 Hochspannungsversorgung der Röhre

Beim Bau des ersten Prototypen mit 4 Röhren wurden 2 verschiedene Drahtstärken verwendet. Auf diese Weise können in Experimenten die Eigenschaften des 30  $\mu\text{m}$  Draht und des 45  $\mu\text{m}$  verglichen werden. Um die beiden Bauweisen vergleichen zu können, ist die Wahl der Hochspannung zum Betrieb der verschiedenen Röhren relevant. Um in beiden Röhren eine gleiche Gasverstärkung zu erreichen, müssen unterschiedliche Spannungen angelegt werden. Beim Betrieb mit derselben Spannung ist das elektrische Feld des dünneren Drahtes schwächer. Dies geht aus Gleichung 3.2 [5], hervor.

$$E(r) = \frac{U_{HV}}{\ln\left(\frac{b}{a}\right) r} \quad (3.2)$$

Mit dem Drahradius  $a$  verändert sich das elektrische Feld  $E(r)$ . Da der Drahradius unter dem Bruchstrich im Logarithmus steht, wird das Argument des Logarithmus größer. Der Logarithmus ist folglich ebenfalls größer. Da dieser Wert antiproportional zum elektrischen Feld ist, ist dieses kleiner bei einem kleineren Drahradius. Gleichung 3.2 wird benötigt, um die Gasverstärkung in verschiedenen elektrischen Feldern bei verschiedenen Drahtstärken zu berechnen. Hierfür werden mithilfe von Gleichung 3.3 [8] die Gasverstärkungen  $G$  der beiden Drähte gleichgesetzt. Hierbei fällt, da die Werte in allen Röhren gleich sind,  $\frac{\ln(2)}{\Delta V}$  weg.  $\Delta V$  ist direkt proportional zur benötigten Ionisationsenergie des Gases, weil in allen Röhren dasselbe Gas verwendet wird.

$$\ln(G) = \frac{\ln(2)}{\Delta V} \frac{U_{HV}}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \ln\left(\frac{E(a)}{E(r_{min})}\right) \quad (3.3)$$

Durch Gleichsetzen der Gasverstärkungen  $G_1$  und  $G_2$  und Umstellen der Gleichung erhält man:

$$U_1 = \frac{U_2}{0,8206} \ln\left(\frac{\lambda}{\exp\left(\frac{E_{Ion}}{qU_2} \ln\left(\frac{b}{a_2}\right)\right)} \frac{1}{a_2}\right) \quad (3.4)$$

Setzt man in Gleichung 3.4 folgende Werte ein, kann das Verhältnis von  $U_1$  zu  $U_2$  berechnet werden.

- $U_1 = 2141$  V
- $\lambda = 2,7$   $\mu\text{m}$  [16]
- $E_{Ion} = 19$  eV [11]
- $q = e$
- $b = 10$  mm
- $a_2 = 15$   $\mu\text{m}$

$U_1$  entspricht der Spannung der Röhre mit dem 45  $\mu\text{m}$  Draht. Sie wurde für dieses Rechenbeispiel frei gewählt und entspricht der Spannung, welche für die ersten Messungen verwendet wurde. Die freie Weglänge der Elektronen wird durch  $\lambda$  und die Ionisationsenergie des Driftgases durch  $E_{Ion}$  angegeben. Die Ladung  $q$  der Elektronen entspricht trivialerweise der Elektronenladung. Die Größe  $b$  entspricht dem Radius der Röhre und  $a_2$  ist der Radius des dünneren Drahtes.

### 3.5.4 Driftgas

Die Röhren werden aus einer Druckgasflasche mit Driftgas versorgt. Sie ist durch Schläuche mit dem Aufbau verbunden. Die Driftröhren der OPERA-Module und die Strawtubes werden derzeit mit demselben Gasgemisch versorgt, da sich dieses für die OPERA-Module als gut geeignet [5] erwiesen hat. Es besteht zu 80% aus Argon und 20% aus Kohlenstoffdioxid und

hat in den Röhren und Tubes atomosphärischen Druck. Zum Betrieb der Straw-Tubes ist dieses ebenfalls gut geeignet, obwohl eine Mischung aus Argon, Kohlenstoffdioxid und Stickstoff im Verhältnis 96:3:1 besser geeignet wäre [4]. Dies wurde so gewählt, da Kosten und Aufwand gespart werden, wenn nur eine Druckgasflasche verwendet wird. Optimalerweise kann man beim Durchfluten der OPERA-Module und der Straw-Tubes das ausfließende Gas aus einem Detektor für die Versorgung des nächsten verwendet werden. So befindet sich lediglich am Ende der letzten zu versorgenden Röhre ein Gasauslass. An diesem Gasauslass befindet sich ein Bubbler. Das ist ein Gestell, in dem das Ende des Gasschlauches unter einer Flüssigkeit liegt. So ist sichtbar, dass ein Gasfluss besteht. Je weniger Gasauslässe im Aufbau angelegt sind, desto weniger Gas muss am Beginn der Gasversorgung eingespeist werden. Die Röhren werden durchgehend mit frischem Gas versorgt.

### 3.6 Spurrekonstruktion

Zur Analyse der Daten verwendeten wir Software, welche ROOT verwendet und in C++ geschrieben ist. Diese „Track-fit“-Software wird von der Arbeitsgruppe nach und nach um die nötigen Zusätze ergänzt.

Um die OPERA-Module als Referenz für die Strawtubes benutzen zu können, müssen zuerst die TDC Daten ausgewertet werden. Die Auswertung muss eine möglichst genaue Spurrekonstruktion liefern. Hierzu durchlaufen die Ereignisse eine Musterkennung (Pattern Recognition). Hierbei wird jede getroffenen Driftröhre mithilfe einer vorläufigen Driftzeit-Ortsbeziehung ein Driftradius zugeordnet.

Die vorläufige Driftzeit-Orts-Beziehung basiert auf der Annahme, dass alle Driftradien gleich wahrscheinlich sind (Gl. 3.5). Dies gibt an, dass die Teilchenzahl  $N$  über alle Driftradien gleichverteilt sind.

$$\frac{dN}{dr} = \frac{N}{R} = const. \quad (3.5)$$

Setzt man Gl. 3.5 in Gleichung 3.6 ein, erhält man eine Verteilung der Teilchen über alle Driftzeiten. Diese geht auf das Integral über die Driftgeschwindigkeiten der verschiedenen Driftradien zurück. Diese Formel wird mit dem Röhrenradius  $R$  normiert.

$$r(t_D) = \int_0^{t_D} v(t) dt = \int_0^{t_D} \frac{dr}{dt} dt = \int_0^{t_D} \frac{dr}{dN} \frac{dN}{dt} dt = \frac{R}{N} \int_0^{t_D} \frac{dN}{dt} dt \quad (3.6)$$

Zu jedem Ereignis überprüft die Software nun zu jeder Kombination aus zwei Röhren die vier möglichen Tangenten auf Plausibilität. Am Ende wird die Tangente ausgewählt, welche zu möglichst vielen Driftradien passt und Röhren, welche weit von dieser „idealen“ Tangente liegen, werden aussortiert. Dies kann vorkommen, da die Driftröhren nicht ganz frei von Rauschen sind und Effekten wie Cross-Talk unterliegen. Sobald auf diese Weise bestimmt wurde, welche Röhren wahrscheinlich zu dieser Teilchenspur gehören, beginnt der Fit dieser Teilchenspur.

Hierbei werden die Residuen minimiert. Das Residuum  $\delta = r - d$  ist die Differenz des Driftradius  $r$  und dem Abstand zum Draht  $d$ . Die Residuen der Spur werden minimiert. Voraussetzung für einen guten Fit ist, dass die Kombination aus beiden Modulen gefittet werden kann, mindestens eines der beiden Module eigenständig eine fitbare Teilchenspur hervorbringt und insgesamt mindestens die Hälfte der Röhrentreffer in die Spur mit einbezogen werden und nicht von der Mustererkennung aussortiert worden sind. Die letzte Bedingung verhindert, dass aus Ereignissen mit viel Crosstalk oder einem zufälligen Ansprechen nahezu aller Röhren, zufällig vier davon eine passable Teilchenspur ergeben und diese beibehalten wird. Hieraus wird eine neue Driftzeitortbeziehung erstellt, indem die Teilchenspuren jeweils Driftradien und aus den TDC-Daten Driftzeiten zugeordnet werden. Diese Zuordnung wird dann in einem 2D-Histogramm aufgetragen. Aus dem Fit von Gauß-Funktionen an Projektionen auf die y-Achse folgt die neue Driftzeitortbeziehung. Diese wird über ein iteratives Verfahren immer weiter verbessert, indem sie als neue Grundlage für einen erneuten Durchlauf der Mustererkennung und des Fits verwendet wird. Die resultierende beste Driftzeitortbeziehung wird für die Analyse der Strawtubes verwendet, sodass möglichst gute Spuren als Referenz verwendet werden können.

## 3.7 Messung und Analyse

Zur Auswertung und Untersuchung der Effizienz der Röhren wurde ein Datensatz vom 07. Februar 2020 genutzt, welcher der bis zu diesem Zeitpunkt größte Datensatz ist, welcher ohne Probleme in der Datennahme durchgelaufen ist.

### 3.7.1 Driftzeitortbeziehung Strawtubes

Zur Bestimmung der Driftzeitortbeziehung der Strawtubes eignet sich das iterative Verfahren, welches für die OPERA-Module verwendet wurde, schlecht, da wir nur wenige Strawtubes und damit wenige Datenpunkte haben. Daher entstand die Idee, die Spuren, welche aus den OPERA-Modulen rekonstruiert werden, als Referenz für die Radien der Ereignisse nutzen.

#### Verfahren

Zum neuen Verfahren wird der Abstand (Gl. 3.7 [6]) der Strawtube Drähte zu den Spuren mit der entsprechenden Driftzeit des Ereignisses gleich gesetzt. Die drei Röhren werden für jede Spur unabhängig betrachtet und nur Spuren gewertet, welche zu einem Driftradius kleiner 10 mm passen, da dort die Grenze der Röhren liegt. Die 2D-Histogramme werden dann auf die y-Achse projiziert. Fittet man an diese Projektionen Gaußkurven erhält man aus den Mittelwerten die Driftzeit-Orts-Beziehung.

$$d = x \cos(\alpha) + y \sin(\alpha) - p \quad (3.7)$$

Als Position der Strawtubedrähte verwenden wir die zuvor bestimmte Position der Strawtubes aus einem Verfahren, bei welchem alle Spuren, die einen Hit in den Strawtubes verursachen, miteinander geschnitten und die Punkte in Histogramme eingetragen werden. In Abbildung 3.12 kann man die Poasition der Straw bereits grob erkennen. Projeziert man dieses Histogramm auf die x- und y-Achse entstehen Gauß-Verteilungen (Abb. 3.13 3.14) und die zu vermutende Position der Straw-Tubes (Abb. 3.15 Abb. 3.16). In der Abbildung sind nur 3 Straws zu sehen, da nur diese Daten liefern. Außerdem sieht man, das sich die drei Kreise überlappen. Die Radien der Kreise betragen 10 mm, was den Röhren in der Realität entspricht. In der Realität überlappen sich die Strawtubes nicht. Dies legt nahe, dass die Positionen nicht dem tatsächlichen Aufbau entsprechen.

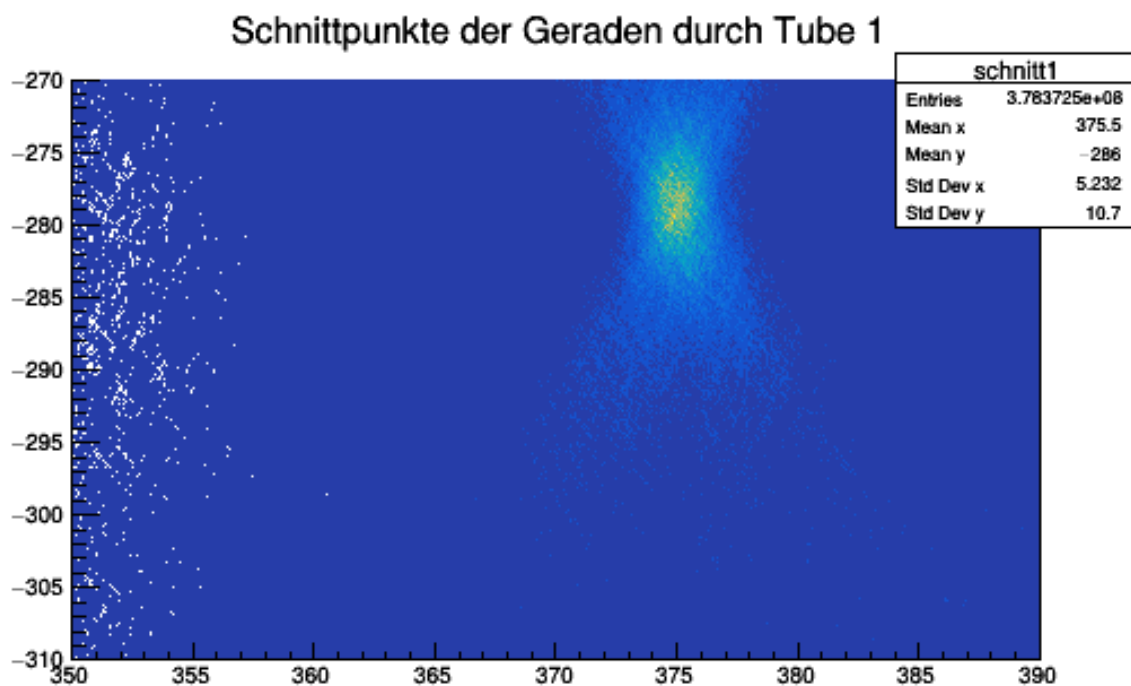


Abbildung 3.12: Histogram mit den Schnittpunkten der Geraden durch Straw 1

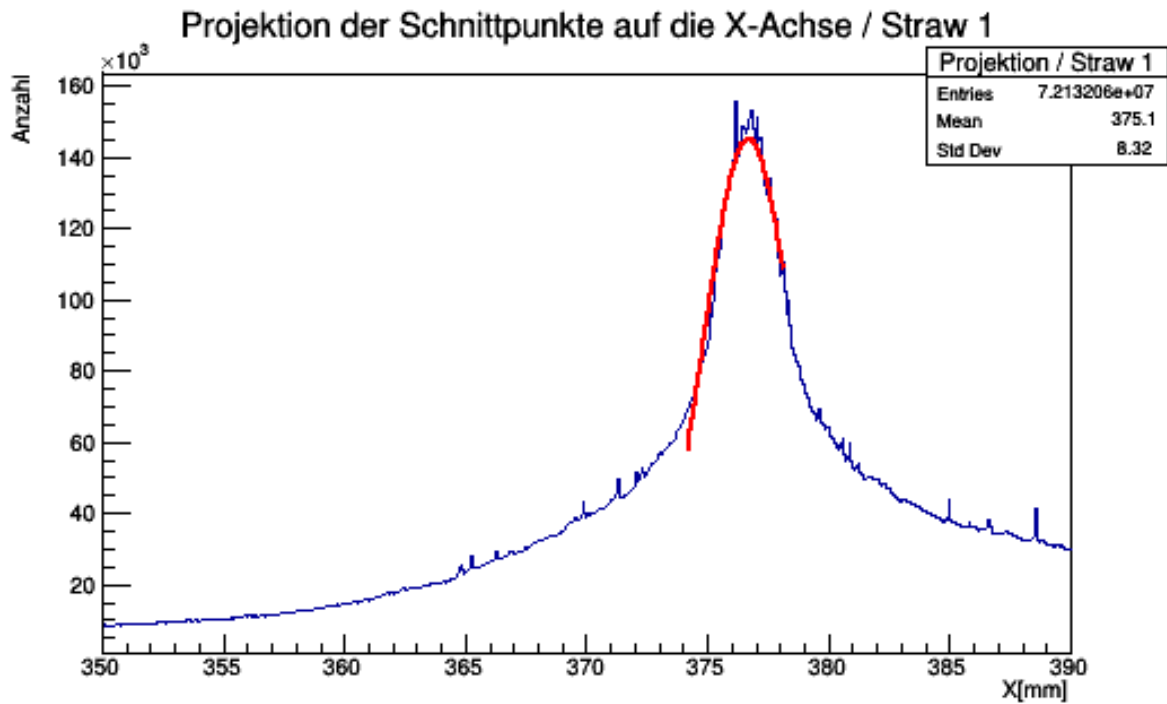


Abbildung 3.13: Projektion des Histogramms aus Abbildung 3.12 auf die x-Achse

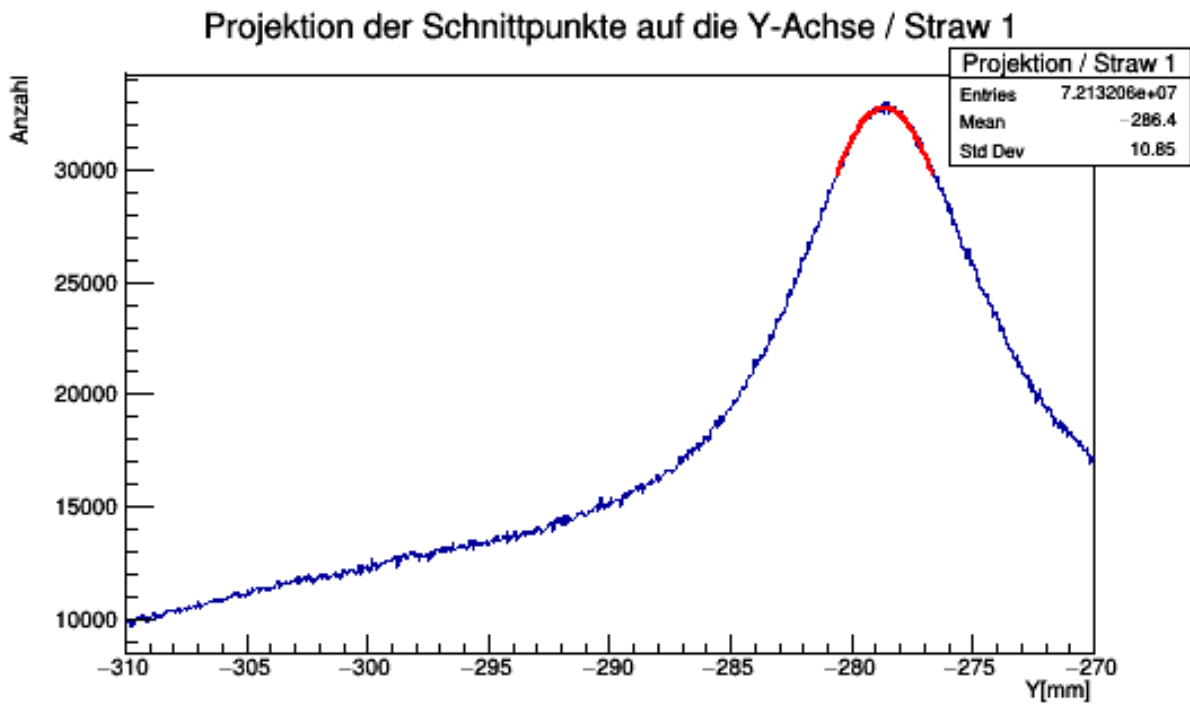


Abbildung 3.14: Projektion des Histogramms aus Abbildung 3.12 auf die y-Achse

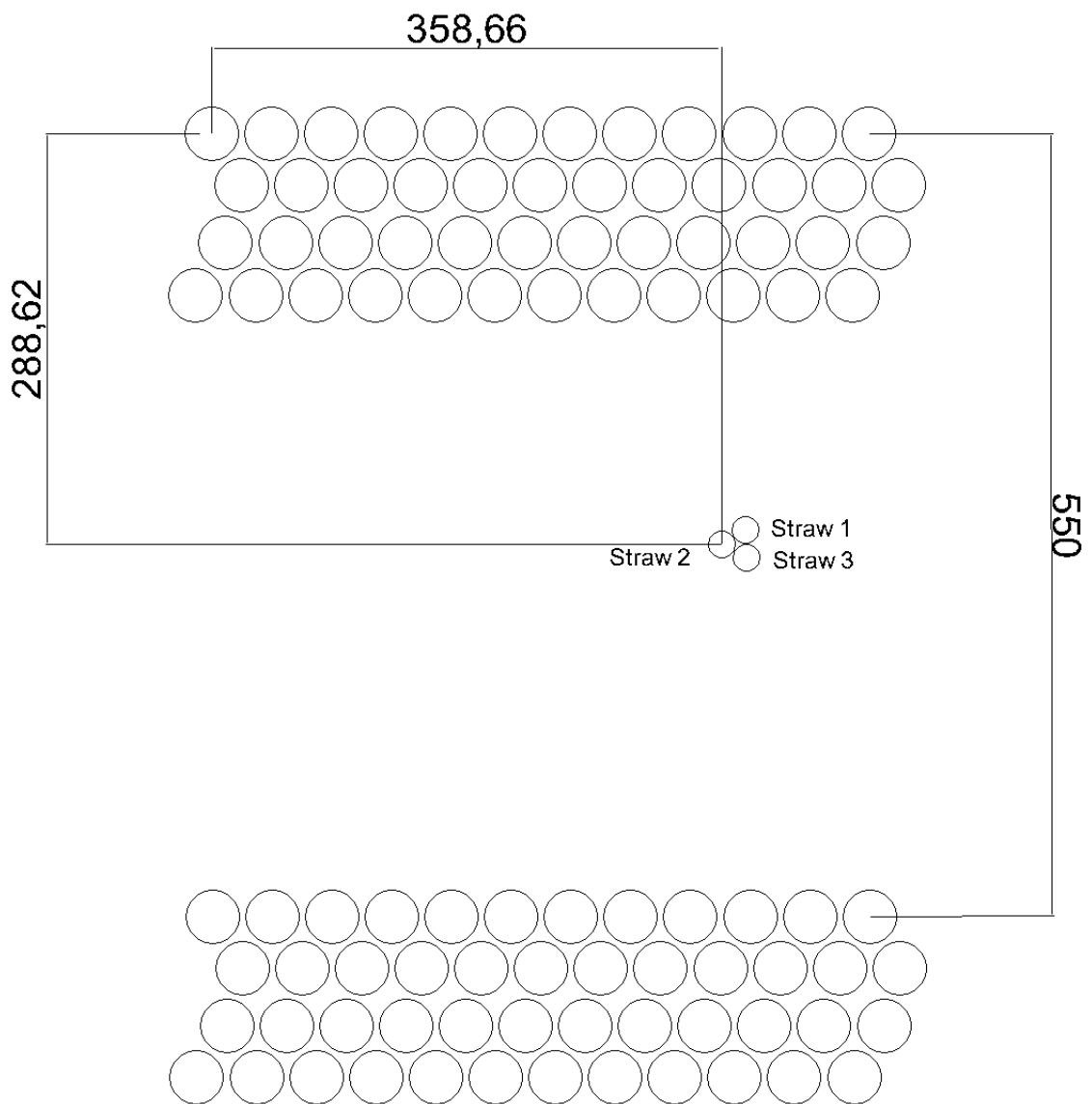


Abbildung 3.15: Vorläufiges Alignment der Strawtubes zwischen den OPERA-Modulen; Die relative Position der OPERA-Module ist relativ genau bekannt



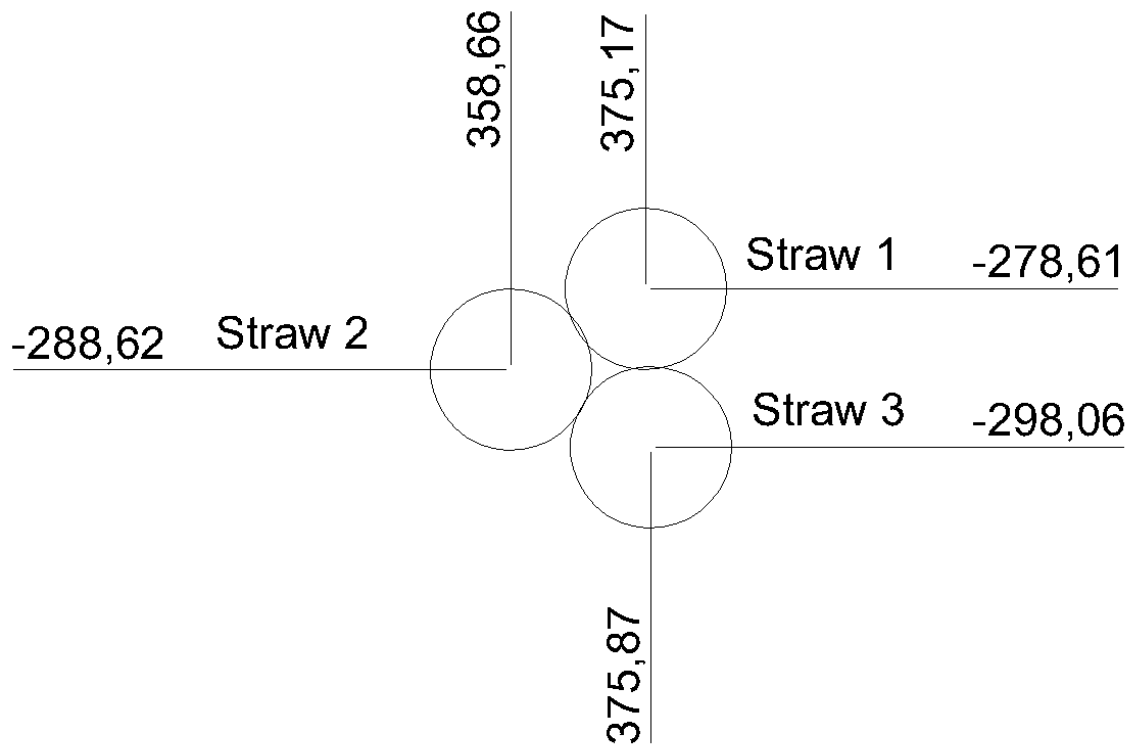


Abbildung 3.16: Darstellung der drei vermessenen Straws in Relation zueinander

### Probleme durch Alignment

Das angenommene Alignment des Aufbaus ist in den Abbildung 3.15 und 3.16 zu sehen.

Wie sich bei Durchführung der Methode herausstellt, bilden sich im 2D-Histogramm aus den Driftzeiten zwei „Arme“. In Abbildung 3.18 ist dies zu sehen. Die Trennung resultiert vermutlich daraus, dass die angenommenen Straw-Tube Position, nicht der Realität entspricht. Besonders deutlich sieht man die Aufteilung in zwei Arme, wenn man nicht die Driftzeit gegen die Radien aufträgt, sondern gegen den vorzeichenbehafteten Abstand. Wie in Abbildung 3.19 gut sichtbar, verlagert sich dadurch der längere der beiden Arme unter die x-Achse. Dass sich die beiden Arme bei Betrachtung des Radius überlagern liegt daran, dass der Radius dem Betrag des Abstandes entspricht. Deutlich sichtbar ist, dass es mehr Punkte unterhalb der x-Achse bei längeren Driftzeiten gibt. Wäre das Alignment der Strawtubes relativ zu den Driftröhren perfekt parallel und die tatsächliche Position genau bekannt, würde man in der vorzeichenbehafteten Darstellung gleich viele Punkte oberhalb und unterhalb der x-Achse sehen und beide Arme wären gleich geformt und würden bei der gleichen Driftzeit enden, da durch die Gleichverteilung der Teilchen über die gesamte Fläche ein symmetrisches Problem vorliegt. Daraus folgt in der Betrachtung der rein positiven Radien eine glatte Driftzeitortsbeziehung (Abb. 3.17).

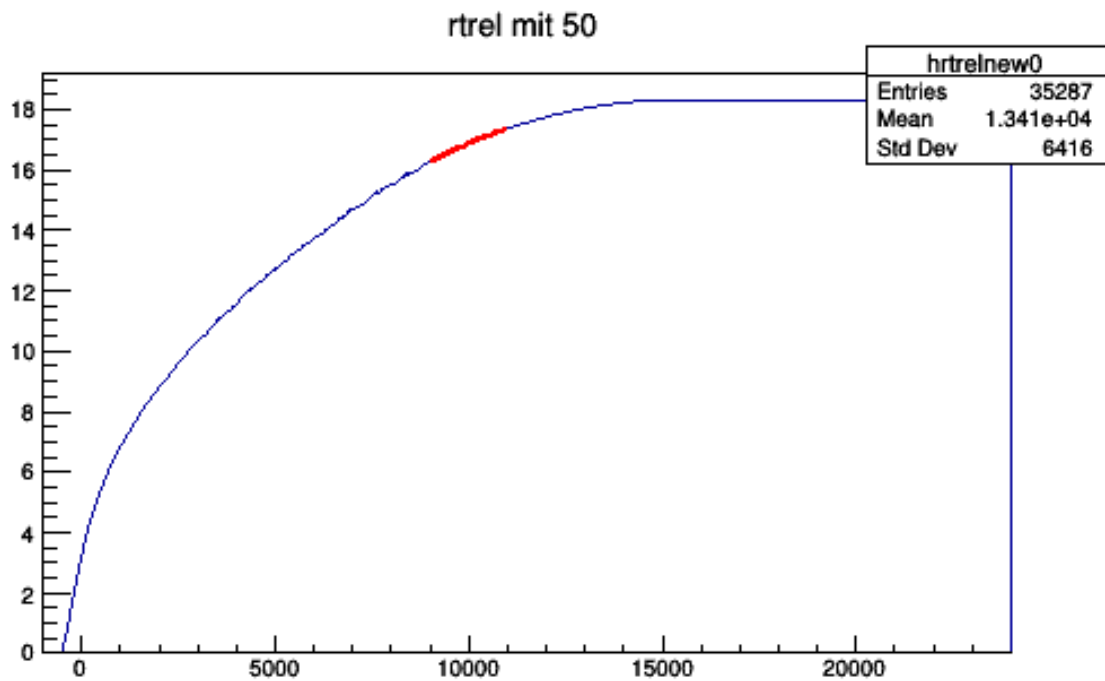


Abbildung 3.17: Driftzeitortsbeziehung der OPERA-Module als Beispiel für den erwarteten Kurvenverlauf der Driftzeitortsbeziehung der Strawtubes

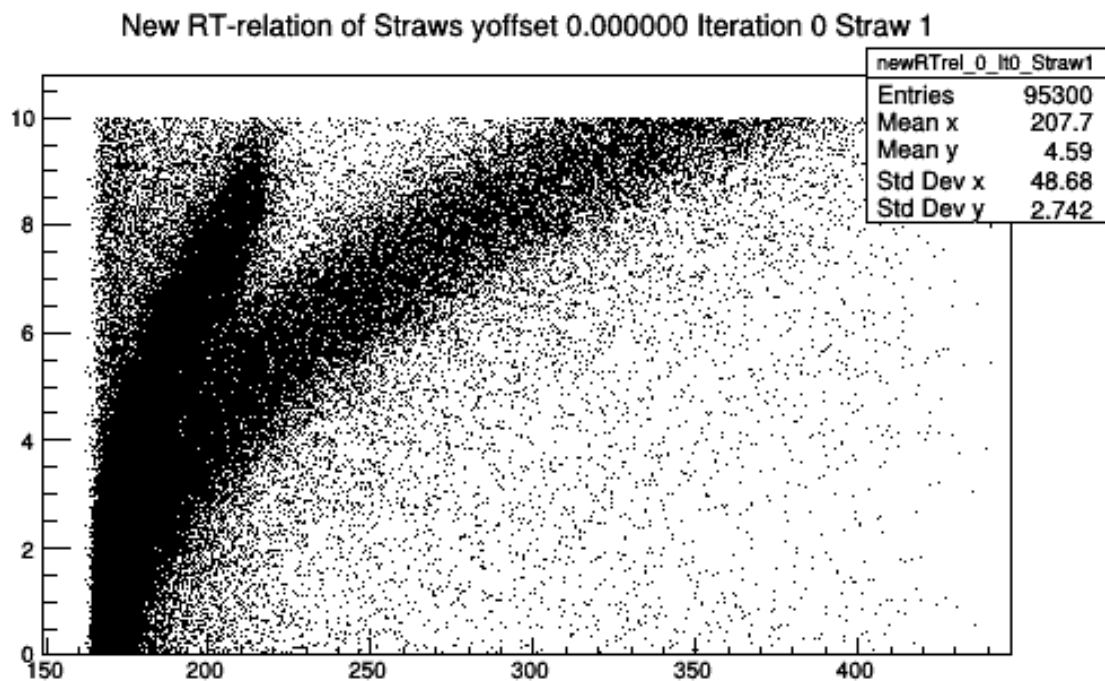


Abbildung 3.18: Berechneter Driftradius gegen die Driftzeit aufgetragen, Zwei sich überlagernde Arme entstehen

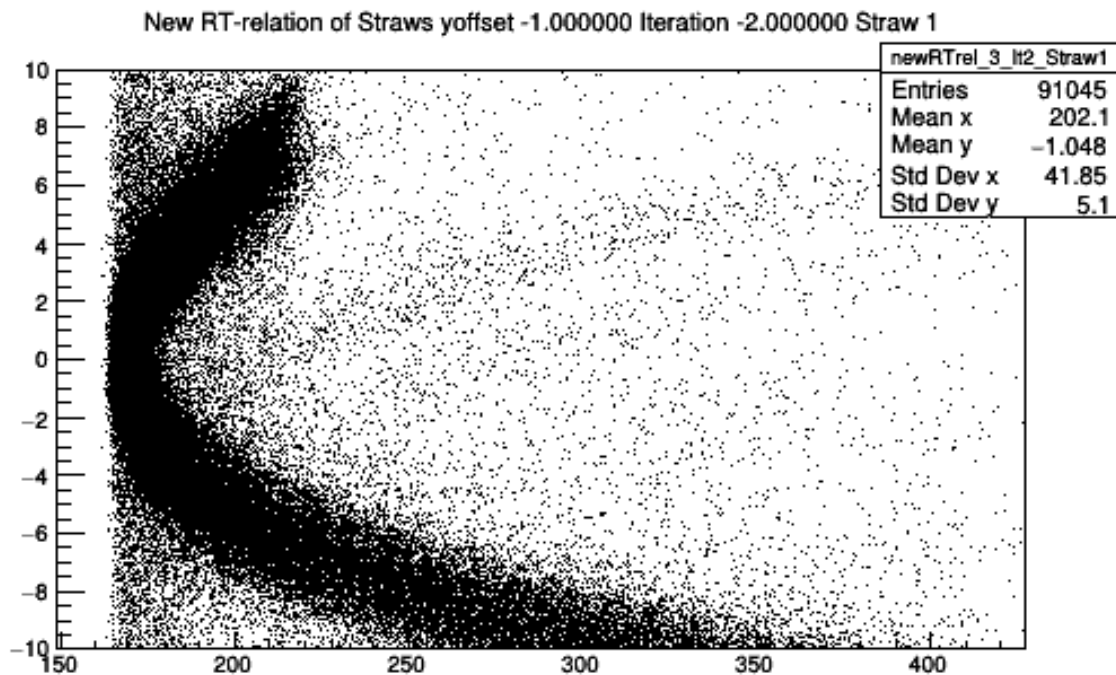


Abbildung 3.19: Driftzeit gegen den vorzeichenbehafteten Abstand aufgetragen, Arme trennen sich in positive und negative Vorzeichen

In Folge dieser Messungen wurde noch einmal mithilfe eines Lots überprüft, ob die Straws perfekt gerade unter den OPERA-Modulen liegen. Es stellte sich hierbei heraus, dass die Straws in der  $x$ - $z$ -Ebene rotiert sind. Dadurch entsteht unter der Fläche der OPERA-Module ein Versatz in  $x$ -Richtung um etwa 4 mm. Dies ist deutlich größer als die Auflösung der OPERA-Spuren und der erwarteten Auflösung der Straw-Tubes. Ohne eine  $z$ -Auflösung lassen sich in diesem Aufbau keine adäquaten Messungen mit den OPERA-Modulen als Referenzspuren vornehmen. Sie dienen lediglich einer groben Orientierung. Die Erstellung einer Driftzeitort Beziehung ist nicht möglich. Im weiteren Vorgehen gibt es zwei Optionen, um dieses Problem zu lösen. Durch anbringen weiterer OPERA-Module, welche um  $90^\circ$  zu den bereits bestehenden OPERA-Modulen in der  $x$ - $z$ -Ebene rotiert sind, könnte eine  $z$ -Auflösung der Spuren erreicht werden und eine Bestimmung der Radien im dreidimensionalen Raum ermöglichen. Eine weitere Möglichkeit stellt der erneute Aufbau bzw. die Nachjustierung der OPERA-Module in Relation zu den Strawtubes dar. Dies birgt die Gefahr erneut nicht genau genug zu arbeiten. Eine Präzision eines solchen Aufbaus unterhalb eines Millimeters erfordert großes Geschick und gute Messverfahren.

### 3.7.2 Effizienz

Ein wichtiger Indikator für die Güte eines Detektors ist die Effizienz und das Rauschen. Als besonders effizient gilt ein Detektor, wenn immer dann ein Hit registriert wird, wenn ein Teilchen durch den Detektor fliegt. Rauschen ist dann besonders hoch, wenn viele Hits aufgezeichnet werden, obwohl kein Teilchendurchgang vorliegt. Ob sich während eines Ereignisses ein Teilchen in der Driftröhre befand, wird durch die Spuren des OPERA-Detektors bestimmt. Allerdings ist bereits bekannt, dass das Alignment des Detektors nicht optimal ist. Daher ist auch auf diese Effizienzmessung ein Fehler anzunehmen. Eine grobe Abschätzung der Effizienz des Detektors ist trotzdem möglich. Ich erwarte eine höhere Effizienz, sobald das Alignment optimiert wird. Denn offensichtlich ist die Qualität der Messung schlechter, wenn die Grundannahmen des Modells nicht der Realität entsprechen.

Die Effizienz wurde mit Vierfeldertafeln (Tab. 3.1 - Tab. 3.3) bestimmt. Daraus wird die Anzahl der Ereignisse, bei denen sowohl „Track“ als auch „Hit“ zutrifft. Track beschreibt, dass die Spur innerhalb des Röhrenradius von 10 mm am Draht der jeweiligen Röhre vorbeigeht. Hit bedeutet, dass die Strawtube einen Treffer registriert hat.

	Hit	!Hit	
Track	96342	17316	113648
!Track	47547	2410276	2457823
	143889	2427592	2571471

Tabelle 3.1: Vierfeldertafel Straw 1

	Hit	!Hit	
Track	104892	21451	126343
!Track	16562	2398566	2445128
	151454	2420017	2571471

Tabelle 3.2: Vierfeldertafel Straw 2

	Hit	!Hit	
Track	98177	19924	118101
!Track	44465	2408905	2453370
	142642	2428829	2571471

Tabelle 3.3: Vierfeldertafel Straw 3

	<b>Draht</b>	<b>Effizienz</b>	<b>Rauschen</b>
<b>Straw 1</b>	30 $\mu\text{m}$	84,77%	1,93%
<b>Straw 2</b>	45 $\mu\text{m}$	83,02%	1,90%
<b>Straw 3</b>	30 $\mu\text{m}$	83,13%	1,81%

Tabelle 3.4: Effizienzen und Rauschen der verschiedenen Straws

Aus der Berechnung der Effizienzen zeigt sich eine Effizienz von 84,77% für Straw 1. Straw 2 und 3 liegen mit 83,02% und 83,13% knapp unter der Effizienz von Straw 1. Straw 2 ist die einzige mit einem 45  $\mu\text{m}$  Draht betriebene Röhre. Dies scheint bei dieser Vorgehensweise keinen signifikanten Unterschied zu machen. Alle drei Röhren zeigen ein Rauschen von knapp 2% (Tab. 3.4).

Ich gehe davon aus, dass mit den Strawtubes eine Effizienz weit über 90% erreicht werden kann.

## 4 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde der Aufbau eines Prototypen aus vier Strawtubes innerhalb zweier OPERA-Module als Referenzdetektor begleitet und verschiedene Aspekte hiervon untersucht. Zuerst wurden die mechanischen Eigenschaften der zwei verschiedenen im Aufbau verwendeten Drähte untersucht. Hierbei ergab sich, dass das Durchhängen der Drähte über längere Zeit in den Mylarröhren ein Problem darstellen könnte, da eine dezentrale Position in den Röhren zu ungenauen Messergebnissen führt. Dass dies im betrachteten Messaufbau nicht bereits ein Problem ist, ist nicht auszuschließen. Desweiteren wurde festgestellt, dass Stabilität gegen Zerreißen des 45  $\mu\text{m}$  Drahtes etwa 2,5 mal so hoch ist wie die des 30  $\mu\text{m}$  Drahtes. Trotzdem reicht die Widerstandsfähigkeit gegen Belastungen von bis zu  $1,5 \pm 0,067 \text{ N}$  aus, um einem Schlagen des Drahtes gegen die Röhre, potentiell ausgelöst durch das elektrische Feld, ohne Probleme stand zu halten. Beim Aufbau sollte vorsichtig mit den Drähten umgegangen werden, um eine Beschädigung dieser und somit ein vorzeitiges Reißen dieser zu vermeiden.

Im folgenden wurde der Aufbau des Teststandes begleitet und beschrieben. Er besteht aus zwei OPERA-Modulen mit je 48 Driftröhren, zur Bestimmung von Referenzspuren, zwei Szintillatorplatten mit Photomultipliern, als Trigger und vier Strawtubes. Zwei dieser Strawtubes sind mit dem 45  $\mu\text{m}$  Draht durchzogen und zwei mit dem 30  $\mu\text{m}$  Draht. Allerdings funktioniert die obere der 45er Röhren nicht, sodass nur drei für die anschließende Messungen verwendet werden konnten.

Untersucht wurde mit Hilfe der Trackfit-Software wie hoch die Effizienz der Strawtubes ist und ob sich aus den Messdaten eine Driftzeit-Orts-Beziehung erstellen lässt. Ergebnis dieser Untersuchung zeigte, dass das Alignment des Aufbaus noch nicht ideal ist. Unser Modell, welches in der Software abgebildet wird, entspricht nicht der Realität. Dies liegt daran, dass die Strawtubes in der x-z-Ebene rotiert sind. Eine Bestimmung der Driftzeitortsbeziehung erfordert ein besseres Alignment, wenn man die OPERA-Module zur Bestimmung der Driftradien zu den Driftzeiten verwenden möchte. Alternativ ist eine z-Auflösung nötig, um den tatsächlichen Abstand der Teilchenspuren zu den Drähten der Strawtubes berechnen zu können. Dies gilt ebenso für präzisere Effizienzmessungen. Bisher erreichen wir unter der falschen Annahme, dass die Straws perfekt parallel zu den OPERA-Modulen liegen eine Effizienz von etwa 83-84%. Ich erwarte, dass bei präziserem Aufbau eine höhere Effizienz erreicht werden kann. Desweiteren ist nicht sicher, dass die Position des Drahtes innerhalb der Röhre perfekt in der Mitte liegt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein funktionierender Prototyp für Strawtubesdetektoren aufgebaut wurde. Aus diesem Aufbau ist bereits viel gelernt worden, sodass der nächste Prototyp bereits bessere Messergebnisse zeigen wird. Untersuchungen zu weiteren Details der

Strawtubes ist in meinen Augen vielversprechend im Hinblick auf eine Verbesserung der Messmethode.

## 5 Ausblick

Zusätzlich zu den Stabilitätsmessungen sollte untersucht werden, wie weit sich der Draht und das Material der Röhre über die Jahre des Experiments durch den Einfluss der Schwerkraft längt. Das SHiP-Experiment ist auf 10 Jahre ausgelegt. Hierbei sind die Fragen zu betrachten, welche Drahtstärken einen solchen Zeitraum durchhalten, ob der Wechsel auf ein anderes Metall die mechanische Problematik besser löst, bei gleich bleibenden oder besseren elektrischen Eigenschaften, inwiefern sich die Geometrie des Aufbaus über den Untersuchungszeitraum verändern wird und natürlich, ob sich die Entwicklungen durch einen modifizierten Versuchsaufbau suffizient reduzieren lassen. Zusätzlich zu technischen Lösungsansätzen könnte eine Softwarelösung zur besseren Auswertung und Rekonstruktion die mechanischen Defizite ausgleichen. Denn auf Grund der unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften vom Wolframdraht und der Mylar Folie muss eine Lösung gefunden werden, wie der Draht im Zentrum der Röhre gehalten werden kann.

Außerdem sollte untersucht werden, wie man das Rauschen der Messung weiter reduzieren sowie die Effizienz steigern kann. Hierfür hat Felix Bergholz in seiner Bachelorarbeit bereits untersucht wie sich verschiedene Spannungen auf die Effizienz auswirken. Eine Untersuchung verschiedener Driftgase in den Straw Tubes könnte die Messwerte weiter verbessern. Eine stabile Messelektronik muss ebenfalls entworfen werden, sodass eine Produktion in großen Stückzahlen mit geringer Fehleranfälligkeit möglich ist. In dem von uns verwendeten Aufbau haben Lötstellen und elektrische Kontakte mit dem Aluminiumrahmen Probleme bereitet.

Als nächster Schritt sollte ein weiterer Prototyp mit mehr Straws gebaut werden. Bei diesem Aufbau kann aus den bisher aufgetretenen Problemen gelernt werden und eine präzisere Charakterisierung des Detektors erreicht werden. Da wir zurzeit nur 3 funktionierende Röhren haben, lassen sich aus den Messdaten wenig Spuren rekonstruieren. Sobald ein größeres Raster aus Driftröhren zur Verfügung steht, treten mehr Ereignisse mit mindestens 3 getroffenen Röhren auf, welche somit die Mindestanforderung für eine eindeutig rekonstruierbare Spur erfüllen.



# Literatur

- [1] C Ahdida u. a. *SHiP Experiment - Comprehensive Design Study report*. Techn. Ber. CERN-SPSC-2019-049. SPSC-SR-263. Geneva: CERN, 2019. URL: <http://cds.cern.ch/record/2704147>.
- [2] H. Bethe. “Bremsformel für Elektronen relativistischer Geschwindigkeit”. In: *Zeitschrift für Physik* 76.5 (1932), S. 325–400. DOI: 10.1007/BF01342532. URL: <https://doi.org/10.1007/BF01342532>.
- [3] H. Bethe. “Zur Theorie des Durchgangs schneller Korpuskularstrahlen durch Materie”. In: *Annalen der Physik* 397.3 (1930), S. 293–299. DOI: 10.1002/andp.19303970303. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/andp.19303970303>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/andp.19303970303>.
- [4] Stefan Bieschke. *Examination of different drift gas mixtures for the muon magnetic spectrometer for the SHiP experiment*. Master thesis.
- [5] Stefan Bieschke. “Inbetriebnahme und Aufbau eines Teststandes zur Charakterisierung unterschiedlicher Prüfgasgemische”. Bachelor-Arbeit. Universität Hamburg.
- [6] Musiol Mühling Bronstein Semendjajew. “Taschenbuch der Mathematik”. In: 10. Aufl. D-42781 Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH Co. KG, 2016. Kap. 3.5.2.6 Geometrie - Geraden, S. 202. ISBN: 978-3-8085-5789-1.
- [7] *CERN Neutrinos to Gran Sasso - CNGS*. <http://proj-cngs.web.cern.ch/proj-cngs/ProjetOverview/projetoverview2002.htm>. Accessed: 09.02.2020.
- [8] Torben Ferber. “Messung der Gaseigenschaften unter Einfluss von molekularem Sauerstoff und Aufbau eines Gassystems für das Driftröhren-Myon-Spektrometer des OPERA-Detektors”. Diplom-Arbeit. Universität Hamburg.
- [9] user Jkrieger. *Darstellung Photomultiplier Wikipedia*. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photomultiplier\\_schema\\_de.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photomultiplier_schema_de.png). Accessed: 16.03.2020. Wikipedia.
- [10] *Large Hadron Collider - SPS*. <http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=sps>. Accessed: 09.05.2019.

- [11] H.-K.Bothe P. Adler. “Der Ionisierungsaufwand  $W$  organischer Moleküle und seine Abhängigkeit von der Molekülstruktur”. In: *Zeitschrift für Naturforschung A* 20.12 (1965), S. 1700–1707. DOI: 10.1515/zna-1965-1225. URL: <https://www.degruyter.com/view/j/zna.1965.20.issue-12/zna-1965-1225/zna-1965-1225.xml?rskey=C2W3SM&result=3>.
- [12] M. J. Berger R. M. Sternheimer und S. M. Seltzer. “DENSITY EFFECT FOR THE IONIZATION LOSS OF CHARGED PARTICLES IN VARIOUS SUBSTANCES ”. In: ().
- [13] Günther Rau und Reinhold Ströbel. “Die Metalle:Werkstoffkunde mit ihren chemischen und physikalischen Grundlagen”. In: 19. Aufl. D-81206 München: Verlag Neuer Merkur GmbH, 2004. Kap. 3.23 Wolfram, S. 74–75. ISBN: 3929360446.
- [14] *Setup of a prototype for the SHiP Spectrometer Straw Tracker*.
- [15] *SHiP - Search for Hidden Particles*. <https://ship.web.cern.ch/ship/>. Accessed: 09.05.2019. CERN.
- [16] Dr Rob Veenhof. *Simulation of detectors and related physical processes - IV*. <https://agenda.infn.it/event/4542/contributions/53648/attachments/38405/45162/Veenhof-II.pdf>. Accessed: 20.12.2019. CERN.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Ausgeübte Kraft gegen die Elongation aufgetragen sowie Trendlinie durch den elastischen Bereich für den 30 $\mu\text{m}$ und den den 45 $\mu\text{m}$ Draht . . . . .	7
2.2	Dreieck zur Näherung der Auslenkung des Drahtes bis zum Radius der Röhre .	8
3.1	Geplanter Aufbau SHiP . . . . .	11
3.2	Verlauf der Bethe-Bloch-Formel für verschiedene Materialien und verschiedene Teilchen . . . . .	13
3.3	Elektrisches Feld innerhalb der Driftröhre . . . . .	14
3.4	Querschnitt der Driftröhre bei Teilchendurchgang . . . . .	15
3.5	Mögliche Teilchenspuren bei (a) 2 und (b) 3 getroffenen Röhren . . . . .	16
3.6	Schematische Darstellung von Photomultipliern[9] . . . . .	18
3.7	Zeichnung eines OPERA-Moduls zu sehen sind die Außendurchmesser der Röhren . . . . .	19
3.8	Gesamtüberblick über den Versuchsaufbau . . . . .	20
3.9	Technische Zeichnung der verwendeten Endplatte [14] . . . . .	21
3.10	Oszilloskopbild eines Strawtubesignals in Röhre 2, 3 und 4 . . . . .	22
3.11	Schaltplan der Triggersystems; Die Signale der PMTs werden durch Koinzidenzen verrechnet, der GATE-Generator wird für den Triggerbusy verwendet .	23
3.12	Histogramm mit den Schnittpunkten der Geraden durch Straw 1 . . . . .	27
3.13	Projektion des Histogramms aus Abbildung 3.12 auf die x-Achse . . . . .	28
3.14	Projektion des Histogramms aus Abbildung 3.12 auf die y-Achse . . . . .	28
3.15	Vorläufiges Alignment der Strawtubes zwischen den OPERA-Modulen; Die relative Position der OPERA-Module ist relativ genau bekannt . . . . .	29
3.16	Darstellung der drei vermessenen Straws in Relation zueinander . . . . .	30
3.17	Driftzeitortsbeziehung der OPERA-Module als Beispiel für den erwarteten Kurvenverlauf der Driftzeitortsbeziehung der Strawtubes . . . . .	31
3.18	Berechneter Driftradius gegen die Driftzeit aufgetragen, Zwei sich überlagernde Arme entstehen . . . . .	31
3.19	Driftzeit gegen den vorzeichenbehafteten Abstand aufgetragen, Arme trennen sich in positive und negative Vorzeichen . . . . .	32

# Tabellenverzeichnis

- 3.1 Vierfeldertafel Straw 1 . . . . . 33
- 3.2 Vierfeldertafel Straw 2 . . . . . 33
- 3.3 Vierfeldertafel Straw 3 . . . . . 33
- 3.4 Effizienzen und Rauschen der verschiedenen Straws . . . . . 34

## 6 Danksagung

Nun, da ich mit meiner Bachelorarbeit fertig bin und auf die vergangene Zeit zurück blicke, möchte ich an dieser Stelle einmal herzlich Danke sagen. Natürlich bedanke ich mich bei Daniel Bick und Caren Hagner dafür, dass ich meine Bachelorarbeit in dieser Arbeitsgruppe durchführen darf und so die Chance bekommen habe, an einem großen Projekt meinen Teil bei zu steuern. Zudem bedanke ich mich bei den weiteren Gruppenmitgliedern für die tatkräftige Unterstützung. Bei Felix Bergholz, mit dem ich zusammen an Problemen scheitern und sie dann doch gemeinsam lösen konnte. Benedict Kaiser, dem ich nur zu Beginn meiner Arbeit mit meinen Fragen auf die Nerven gehen konnte, der aber auch nachdem er die Uni gewechselt hat, gerne auf meine Mail geantwortet hat und mich mit seinen Ergebnissen versorgt hat. Morten Henken, der neben seiner Arbeit für seinen Master immer ein offenes Ohr für Felix und meine Probleme hatte und mit großer Selbstverständlichkeit bei den kleinen und großen Problemen geholfen hat und mitgeknobelt hat. Besonderen Dank möchte ich Stefan Bieschke aussprechen. Er arbeitet bereits länger in der Arbeitsgruppe und hat neben seiner Dissertation immer Zeit gefunden uns etwas genauer zu erklären. Auch den Kollegen von Juno möchte ich herzlich Danken. Besonders bei Softwarefragen, wart ihr eine große Hilfe. Nicht zuletzt auch bei Hans-Jürgen Ohmacht, der bei Aufbau der Teststandes tatkräftig geholfen hat und immer eine Gasversorgung bereitgestellt hat.

Doch nicht nur im Büro habe ich viel Zeit an dieser Arbeit verbracht. Auch zu Hause am Schreibtisch bin ich Timo immer fleißig auf die Nerven gegangen und habe dumme Fragen gestellt, obwohl er ja garnicht Physik studiert. Mit Geduld hast du dir dann meine Erklärung, was gerade eigentlich das Problem ist angehört und mir nicht nur einmal einen guten Schubs in die richtige Richtung gegeben. Vielen Dank für die Geduld und dein Interesse hierbei, ebenso für das Rückenfreihalten und Beschäftigen, wenn es gerade mal viel war. Neben ihm geht mein Dank natürlich auch an meine Eltern, die mir mit Rat und Tat beiseite standen und vor allem beim Ausbügeln meiner schrecklichen Rechtschreibung am PC geholfen haben.

So wie es bei Danksagungen nunmal ist, habe auch ich sicherlich viele, viele Leute vergessen, die man erwähnen könnte. Meine Kollegen beim ASB, die mir mit dem Katastrophenschutz und des Fortbildungen durch mein Studium viel Abwechslung und Ausgleich gebracht haben. Den Pfadfindern des Stammes Norwing, wo ich meine Wurzeln habe, aber auch der Waldreiter, mit denen ich zwei wunderbare Fahrten im letzten Jahr verbringen durfte und auch dem Landesverband Schleswig-Holstein/Hamburg möchte ich einen besonderen Dank aussprechen. Denn hier findet man nicht nur einen Ort, an dem man aus dem Strom des Alltags auftauchen und einfach mal frei sein kann, sondern wahre Freunde, auf die man sich in jeder Lebenssituation verlas-

sen kann... Bevor ich jetzt rührseelig und philosophisch werde: Ein großes Danke, an alle die Teil meines Lebens sind, mich zu dem gemacht haben, was ich bin und damit dazu beigetragen haben, diese Bachelorarbeit zu schreiben. Danke

## 7 Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die beigefügte schriftliche Bachelorarbeit selbstständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, habe ich in jedem einzelnen Fall unter genauer Angabe der Quelle deutlich als Entlehnung kenntlich gemacht. Dies gilt auch für alle Informationen, die dem Internet oder anderer elektronischer Datensammlungen entnommen wurden. Ich erkläre ferner, dass die von mir angefertigte Bachelorarbeit in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht Bestandteil einer Studien- oder Prüfungsleistung im Rahmen meines Studiums war. Die von mir eingereichte schriftliche Fassung entspricht jener auf dem elektronischen Speichermedium. Ich bin damit einverstanden, dass die Bachelorarbeit veröffentlicht wird.

Hamburg, 16. März 2020