

SOWAS-Projektgruppe D

Von Kasimir Lindemann, Denis Piechaczek, Niklas Döpfer, Jonas Hackfeld

Motivation

Ziel des Projekts ist es, Myonen in der kosmischen Strahlung mittels eines selbstgebauten Teilchendetektors nachzuweisen. Das Projekt ist an das Kamiokande-Experiment angelehnt und funktioniert vom Konzept her genauso. Beide nutzen für den Nachweis der Teilchen nämlich die Tscherenkow-Strahlung, die durch einen bzw. mehrere Photomultiplier registriert wird.

Physikalische Grundlagen

Tscherenkow-Strahlung :

- Die Tscherenkow-Strahlung tritt auf, wenn ein elektrisch geladenes Teilchen ein Medium mit einer Geschwindigkeit durchläuft, die größer als die Lichtgeschwindigkeit c/n in diesem Medium ist.
- Ursache ist die kurzzeitige Polarisation von Atomen, an denen das geladene Teilchen vorbei fliegt.
- Ist die Geschwindigkeit des Teilchens kleiner als die Lichtgeschwindigkeit, ordnen sich die Dipole symmetrisch an und das Gesamtdipolmoment ergibt sich zu Null.
- Übertrifft die Geschwindigkeit des Teilchens die Phasengeschwindigkeit des Lichtes, so kommt es zu einer asymmetrischen Anordnung der Dipole, da das geladene Teilchen die Kugelwellen des sich ausbreitenden elektrischen Feldes überholt.
- Man erhält ein von Null verschiedenes Gesamtdipolmoment.
- Durch die zeitliche Änderung des Dipolfeldes werden elektromagnetische Wellen emittiert, die als Tscherenkow-Strahlung bezeichnet werden.

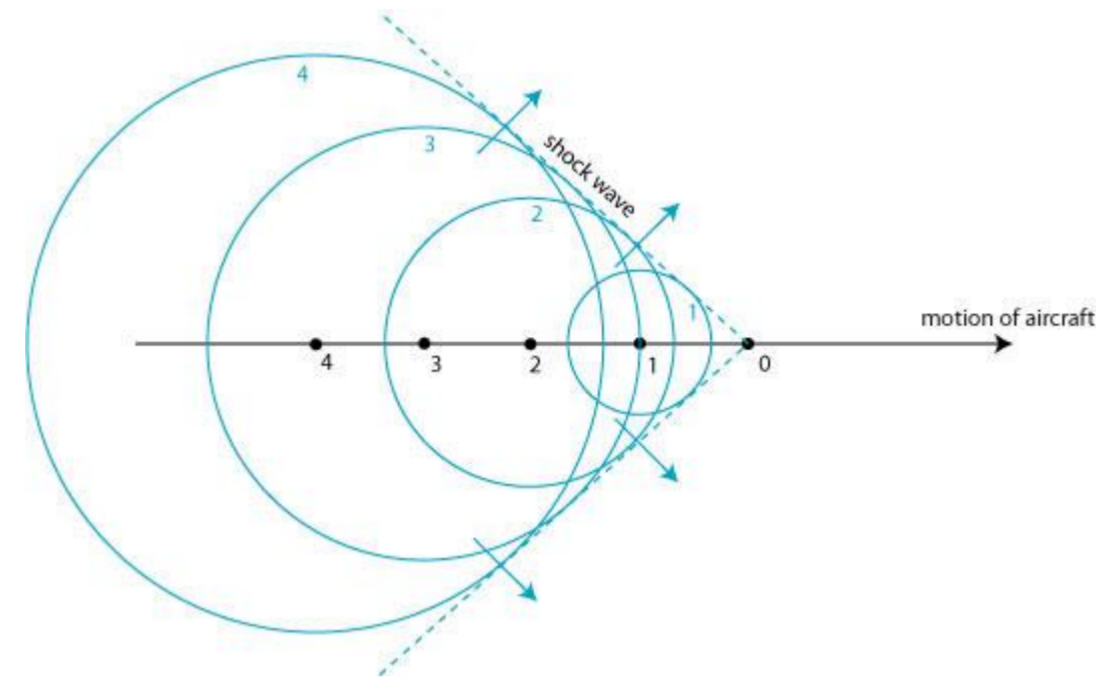


Abbildung 1: Machscher Kegel [1]

Myonen :

- Myonen sind Elementarteilchen, die die gleiche Ladung aufweisen wie Elektronen, aber eine wesentlich größere Masse besitzen.
- Sie sind Hauptbestandteil der sekundären kosmischen Strahlung, die durch Wechselwirkungen der primären kosmischen Strahlung mit der oberen Atmosphäre entsteht.
- Myonen entstehen in einer Höhe von etwa 10 km und erreichen trotz einer Lebensdauer von 2,2 Mikrosekunden aufgrund der Zeitdilatation die Erdoberfläche.

Theoretische Abschätzung

- Die Anzahl der erzeugten Tscherenkow-Photonen pro Wellenlänge und Längeneinheit lässt sich mit der Frank-Tamm-Formel bestimmen:

$$\frac{d^2N}{d\lambda dx} = 2\pi z^2 \alpha \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \frac{1}{\lambda^2}$$

N : Anzahl der Tscherenkow-Photonen
 z : Ladungszahl
 β : minimale Geschwindigkeit der Myonen
 α : Feinstrukturkonstante
 λ : Wellenlänge
 x : Längeneinheit
 Wasser

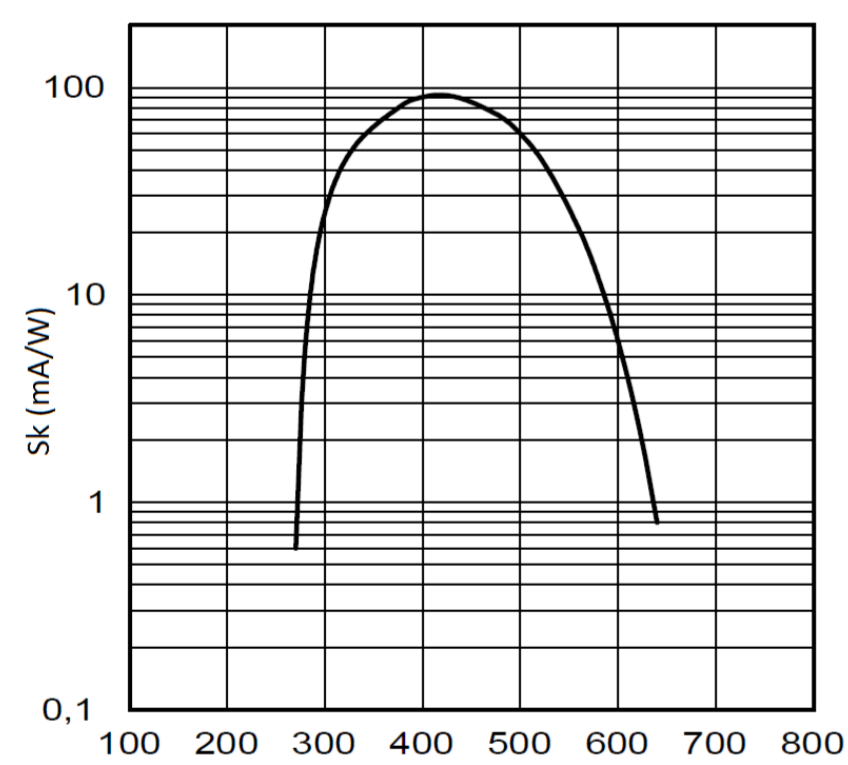


Abbildung 6: Spektrale Empfindlichkeit des PMT [2]

- Der Grafik ist zu entnehmen, dass der Photomultiplier im Bereich von 350nm bis 550nm am empfindlichsten ist.
- Damit gilt:

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi z^2 \alpha \left(1 - \frac{1}{(0,75c)^2 1,33^2}\right) \int_{350nm}^{550nm} \frac{1}{\lambda^2} \approx 450 \frac{\text{Photonen}}{\text{cm}}$$

- Die Myonen legen im Wasser einen Weg von 12 cm zurück, damit folgt:

$$N = 450 \frac{\text{Photonen}}{\text{cm}} \cdot 12\text{cm} \approx 5400 \text{ Photonen}$$

- Annahmen:
 - 50% der Photonen werden von der Innenseite des Behälters absorbiert
 - Aus geometrischen Überlegungen folgt, dass nur 25% der verbleibenden Photonen die Photokathode erreichen
 - Von den übrigen Photonen werden aufgrund der Quantenausbeute nur 25% detektiert
- Damit folgt:

$$N = 5400 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{4} = 168 \text{ Photonen}$$

- Diese Abschätzung zeigt, dass pro Myon genug Photonen an die Fotokathode gelangen, sodass mit hoher Wahrscheinlichkeit jedes Myon, das in den Wasserbehälter gelangt auch detektiert wird.
- Pro Quadratmeter und Sekunde erreichen ca. 100 Myonen auf Höhe des Meeresspiegels die Erdoberfläche[3]. Umgerechnet auf die Öffnung unseres Wasserbehälters ergibt sich:

$$N_{\text{Myonen}} = \pi(0,04\text{m})^2 \cdot 100 \frac{\text{Myonen}}{\text{m}^2\text{s}} \approx 0,5 \frac{\text{Myonen}}{\text{s}}$$

Auswertung

Messung ohne Wasser	Bereich I	Bereich II	Bereich III	Messung mit Wasser	Bereich I	Bereich II	Bereich III
1	7089700	14589	984	1	4288070	13323	1672
2	7040000	14927	952	2	4498420	13804	1622
3	7670080	16016	955	3	4606270	14557	1703
4	7028780	14088	874	4	4805510	14775	1690
5	6346000	13452	778	5	4963180	14903	1653
6	6308940	13849	733	6	4295630	13686	1698
7	6414430	14271	778	7	4369850	13790	1750
8	6488780	14646	776	8	4459860	13990	1705
9	5600000	12352	855	9	4698560	14856	1736
10	5220000	12379	805	10	4896940	14990	1659

- In den Tabellen sind jeweils die gemessenen Impulse der einzelnen Bereiche aufgetragen. Es wurden jeweils zehn 20-minütige Messungen ohne (Tabelle links) und mit (Tabelle rechts) Wasser durchgeführt.
- Bildet man den Durchschnitt der Differenzen im Bereich III mit der dazugehörigen Standardabweichung, kommt man auf einen Wert von $\sim(840 \pm 107)$ Impulse pro 20 Minuten, was etwa $(0,69 \pm 0,08)$ Impulsen pro Sekunde entspricht.
- Die Photonen, die ein Myon durch die Tscherenkow-Strahlung aussendet, wird von dem PMT größtenteils als nur ein Impuls gezählt, da die zeitliche Differenz der ausgesendeten Photonen eines Myons zu gering ist, als dass diese von dem PMT einzeln separiert dargestellt werden können.
- Somit befindet sich unser theoretischer Wert von etwa 0,5 Myonen pro Sekunde relativ nah an dem Experimentellen.

Versuchsaufbau

- Unser Photomultiplier (mit Spannungsteiler (1)) wird mit einer Netzspannung von 1,8kV (DC) vom Hochspannungsnetzgerät (2) betrieben.
- An dem Anodenausgang des Spannungsteilers muss nun aus verschiedenen Gründen ein Verstärker (4) angeschlossen werden:
 - Man benötigt eine größere Spannung für den Vielkanalanalysator (hier Faktor 300)
 - Umpolung von negativ auf positiv für den VKA
 - Man möchte bipolare anstatt unipolare Pulse haben
- Vom Verstärker aus messen wir separat an einem Oszilloskop (3) und an dem Vielkanalanalysator (Hier als Karte in PC eingebaut (5)).

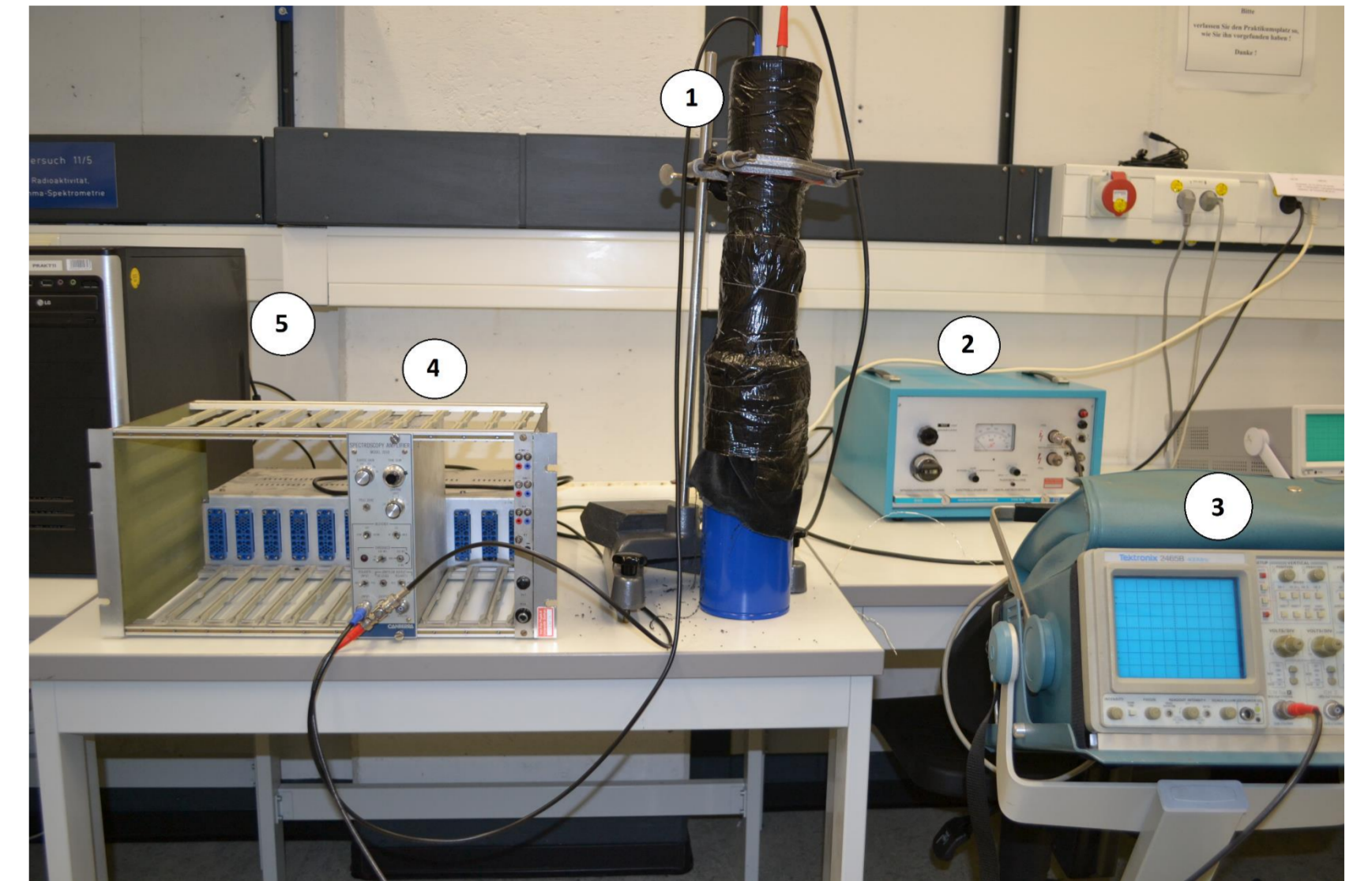


Abbildung 2: Versuchsaufbau

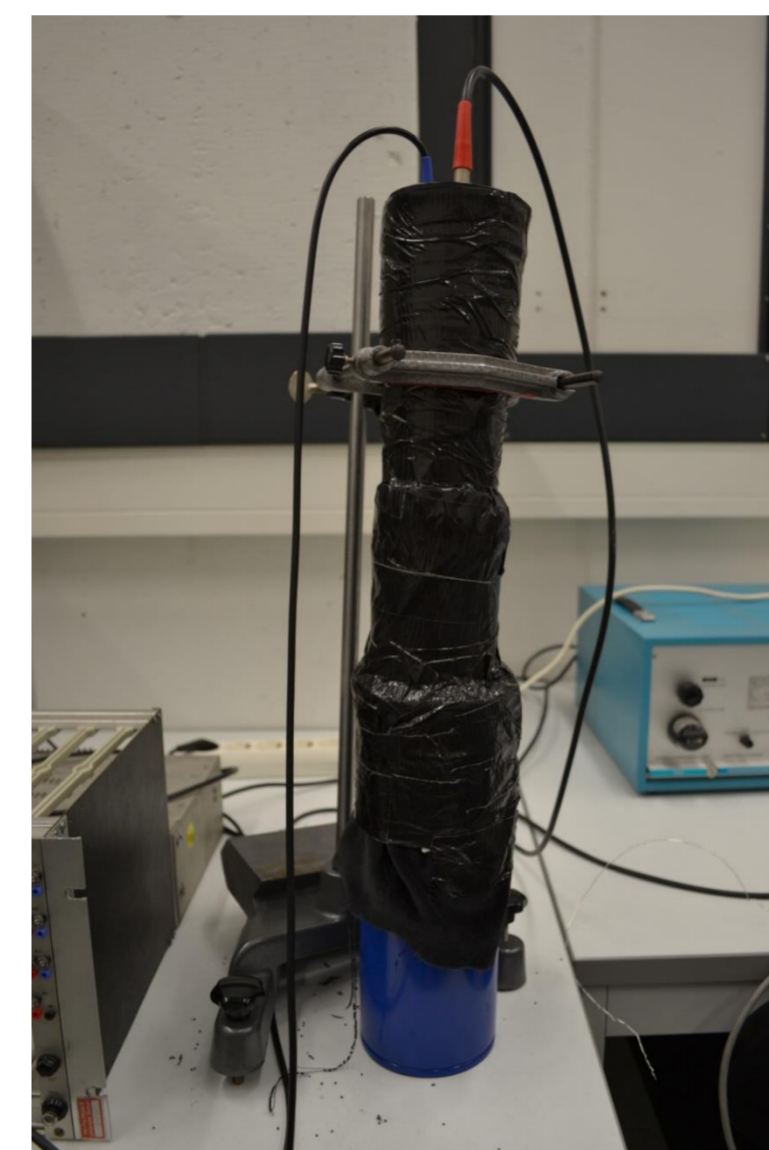


Abbildung 3: PMT mit Spannungsteiler und Isolierkanne

- Dabei war zu beachten, dass unser Oszilloskop eine relativ hohe Frequenz haben sollte (hier 400 MHz), um die schnellen Pulse aus dem PMT detektieren zu können.
- Für den Versuch haben wir uns eine von innen reflektierbare Isolierkanne für flüssigen N_2 ausgesucht (Abb.3, unten, blau) und diese mit einem halben Liter Wasser gefüllt, sodass der Glaskörper vom PMT nicht ins Wasser ragt. (Durchmesser der Öffnung der Kanne: 8cm ; Wassertiefe: 12cm)
- Darüber haben wir den PMT mit dem Spannungsteiler an einem Gerüst befestigt.
- Der ganze Aufbau wurde nun so gut es geht mit schwarzem Tuch und schwarzen Duct-Tape isoliert, um möglichst viel Umgebungslicht abzuschirmen.
- Der PMT mit Spannungsteiler ist zusätzlich noch von einem weichmagnetischen Werkstoff umgeben, um das empfindliche Gerät vor umliegenden Magnetfeldern abzuschirmen.

Durchführung

- Während des gesamten Versuchs sind wir auf Differenzmessungen angewiesen, da wir den Photomultiplier nicht komplett lichtundurchlässig verhüllen können und so jederzeit Photonen aus dem Streulicht detektiert werden. Also vergleichen wir Messungen mit und ohne Wasser in der Isolierkanne, um so Tscherenkow-Blitze zählen zu können
- Der Nachweis von Tscherenkow-Strahlung ist schon lediglich mit einem Oszilloskop möglich. Dafür regelt man die Triggerspannung so, dass die Impulse mit dem Auge zählbar sind. Durch eine Differenzmessung kann nun festgestellt werden, dass mit Wasser in der Isolierkanne mehr Impulse gemessen werden als ohne Wasser. Damit wurde Tscherenkow-Strahlung nachgewiesen, allerdings keine gute Zählrate bestimmt, da mit der Einstellung der Triggerspannung der Großteil der Impulse abgeschnitten wurde.
- Die Messung mit dem Vielkanalanalysator liefert eine Zählung der Impulse, welche nach der Spannungsamplitude sortiert werden. Der Verstärker wird so eingestellt, dass das Intervall, in dem der VKA zählen kann (0-10V auf 2048 Kanäle), ausgenutzt wird. Man kann erkennen, dass sich das Spektrum grob in 4 (sich teilweise überlappende) Bereiche unterteilen lässt:
 - Bereich I (\sim Kanal 50) : Hier befindet sich ein großer Rauschbereich. Dieser ist stark davon abhängig, wie lange der Photomultiplier schon in Betrieb ist. Es handelt sich wahrscheinlich zum größten Teil um thermisches Rauschen, als auch um Umgebungslicht, welches durch die Abdeckung hindurch gelangt.
 - Bereich II (\sim Kanal 50-200) : Auch hauptsächlich Rauschen, welches von der Betriebszeit des Photomultipliers abhängt, und Umgebungslicht. Allerdings befinden sich hier höchstwahrscheinlich auch schon einige Photonen aus Tscherenkow-Strahlung.
 - Bereich III (\sim Kanal 200-1700) : Hauptsächlich Photonen, da fast keine Abhängigkeit von der Betriebszeit besteht. (Thermisches Rauschen und Photonenbereich überlappen sich). Hier befindet sich unser gewünschter Messbereich.
 - Bereich IV (\sim Kanal 1700) : Artefakte des VKA, da so viele starke Pulse sonst auf dem Oszilloskop zu sehen sein müssten.
- Im Bereich III wird eine ausführliche Differenzmessung durchgeführt, um eine möglichst repräsentative Myonenrate zu bestimmen. Es ist zu beachten, dass durch die Auswahl des Messbereiches einige Myonen „abgeschnitten“ werden.

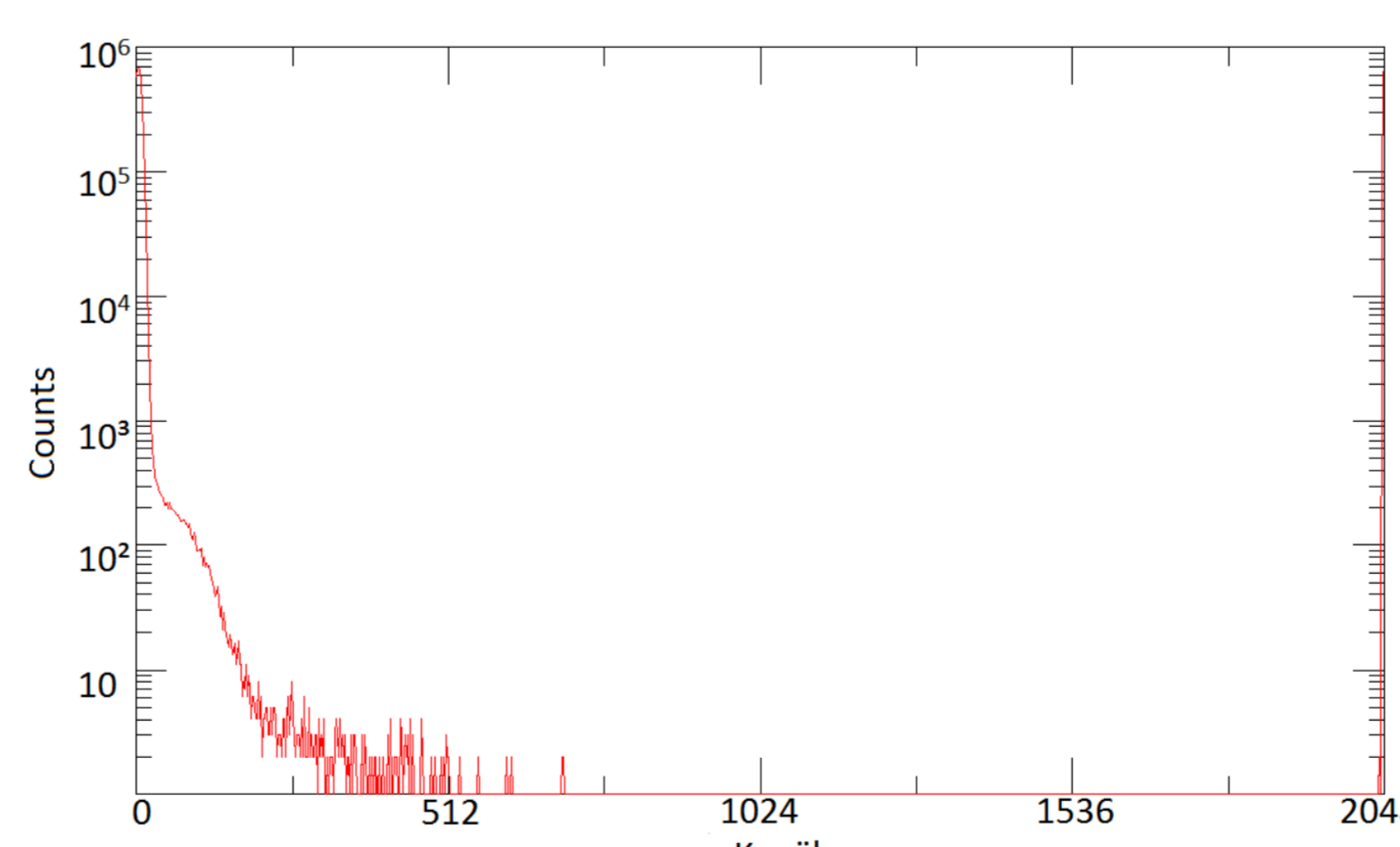


Abbildung 4: 20min Messung ohne Wasser

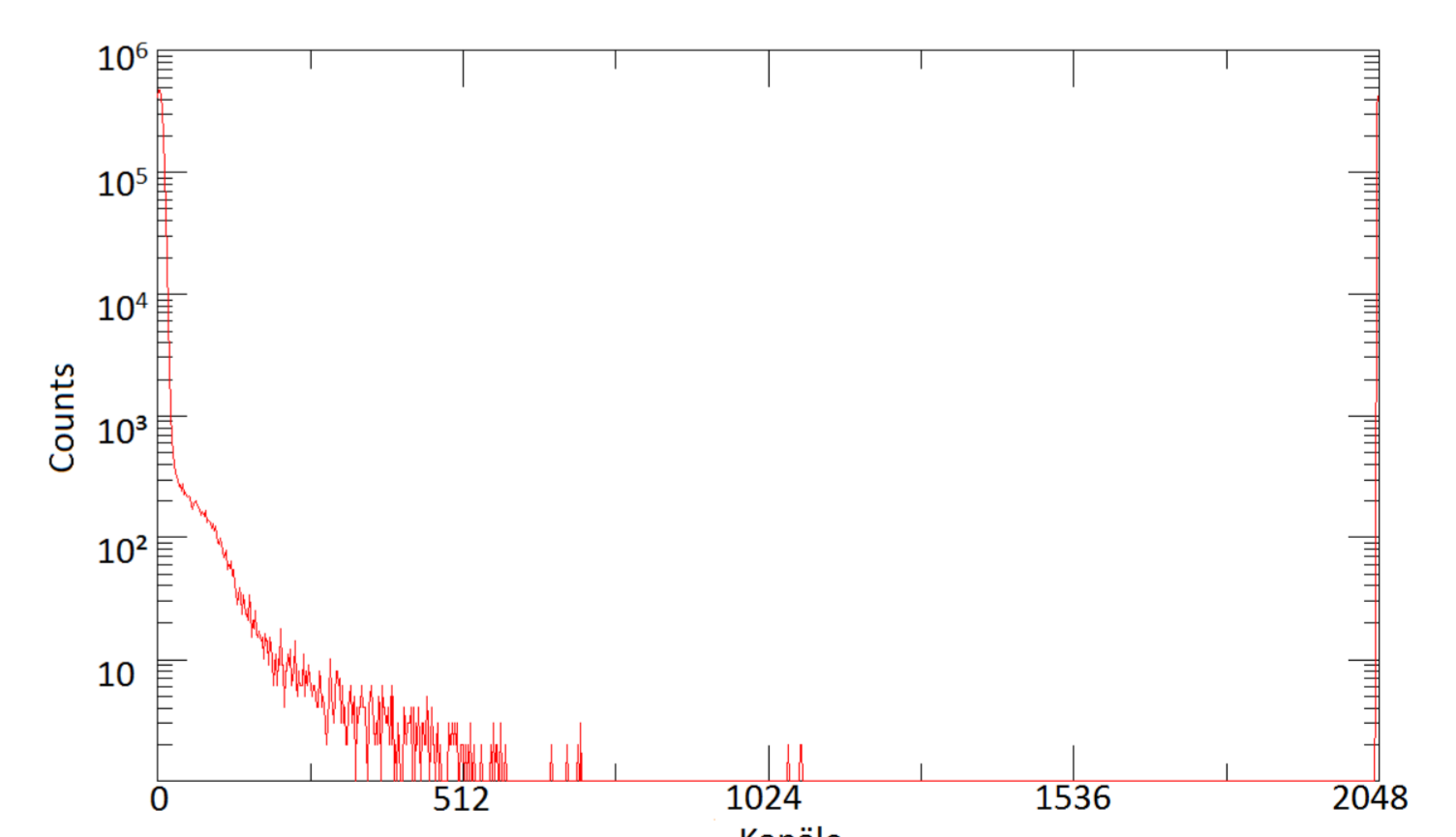


Abbildung 5: 20min Messung mit Wasser

Fazit

Der Nachweis von Myonen ist somit erbracht, da auch keine anderen bekannten geladenen Teilchen eine so hohe Impulsrate an Tscherenkow-Strahlung in dieser Versuchsumgebung verursachen könnten. Unser theoretischer Wert stimmt zwar etwa mit dem Gemessenen überein, dennoch muss man anmerken, dass wir bei den Messungen einige Myonen, die in den anderen Bereichen abgeschnitten wurden, nicht berücksichtigen konnten und auch das Rauschen der Geräte selber nur grob minimiert werden konnte. Verbessern könnte man den Versuch, indem man z.B. den PMT kühlt, um diesen auf konstanter Temperatur zu halten. Diese Einflüsse haben unter Anderem die Ratenmessung stark beeinflusst, weshalb sowohl die theoretischen als auch die experimentellen Werte mit Vorsicht zu genießen sind.

Referenzen

- <https://skullsinthestars.com/2010/07/21/cerenkov-sees-the-light-1937/> ; [21.07.2010]
- Datenblatt PMT XP2020: <https://my.et-enterprises.com/pdf/XP2020.pdf> ; [07.08.2007]
- C. Grupen: *Astroparticle Physics*. Springer 2005, S.149.

Danksagung

- Ein besonderer Dank geht an :
- Herrn Dr. D. Meyer
 - Herrn K. Ulrich
 - Unseren Projektleiter A. Noack
 - Herrn Dr. M. Steinke
 - Herrn T. Domanski