

Nachweis kosmischer Strahlung anhand von Myonen mittels Kamiokannen und Szintillator-Platten

Besondere Lernleistung im Fachbereich Physik 2017/18

Henriette Pöttsch
Betreuer: Silke Tonndorf
Dipl. Phys. Birgit Schneider

Versuchstermine: 04.10.2016 - 14.10.2016

Abgabetermin: 08.01.2018

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Das Standardmodell der Elementarteilchen	3
2	Theorie	5
2.1	Kosmische Strahlung	5
2.2	Das Myon	5
2.3	Detektoren zum Teilchennachweis	6
2.3.1	Cherenkov-Effekt	7
2.3.2	Photomultiplier	8
2.3.3	Szintillatoren	9
2.3.4	Effizienz	10
2.4	Zielstellung der Arbeit	10
2.4.1	Forschungsmethoden	10
3	Praxis	12
3.1	Charakterisierungsmessungen	12
3.1.1	Messaufbau	12
3.1.2	Üblicher Verlauf einer Messung	12
3.1.3	Analyse der Daten	14
3.2	Effizienzmessungen	17
3.2.1	Messaufbau	17
3.2.2	Analyse der Daten	18
4	Schlussenteil	21
4.1	Fazit	21
5	Anhang	22
6	Quellenverzeichnis	26
6.1	Internet-Quellen	26
6.2	Buch-Quellen	26
6.3	Bild-Quellen	27

1 Einleitung

Die Themen kosmische Strahlung und Radioaktivität beschäftigen die Menschheit schon lange. Früher wurde angenommen, dass die Radioaktivität von der Erde kommt. Dies ist zwar grundsätzlich nicht falsch, jedoch ist die irdische Radioaktivität viel geringer als die der kosmischen Strahlung. Dieser Annahme zufolge müsste die Intensität der kosmischen Strahlung deutlich abnehmen, wenn man sich von der Erde entfernt. Zur Überprüfung dieser These unternahm Viktor Hess einige Ballonflüge mit zwei Detektoren. So entdeckte Hess am 07.08.1912, dass die kosmische Strahlung nicht von der Erde, sondern aus dem Kosmos kommt. [20, 21]

1.1 Das Standardmodell der Elementarteilchen

Das Standardmodell beschreibt die Elementarteilchen, deren Eigenschaften und Wechselwirkungen. Elementarteilchen sind die kleinsten Bausteine der Materie, sie sind nicht weiter teilbar. Eine erste Unterteilung des Standardmodells kann durch die Einteilung in Eichbosonen und Fermionen erfolgen. Die Eichbosonen mit einem ganzzahligen Spin sind die sogenannten Austauschteilchen und vermitteln die Wechselwirkungen zwischen den Fermionen. Fermionen haben einen halbzahligen Spin und sind die eigentlichen Bausteine der Materie. [III / S.3 f.]

Zu allen Fermionen existieren Anti-Teilchen, die die „Anti-Materie“ bilden. Sie sind bis auf die Masse, da diese lediglich positiv sein kann, ein exaktes Spiegelbild ihrer ursprünglichen Fermionen. Trifft ein Teilchen auf sein Antiteilchen, kommt es allerdings zur Annihilation, also zur Auslöschung beider. Die Masse wird als äquivalente Energie in Gamma-Strahlung freigesetzt. Dies gilt nur für die geladenen Fermionen. [I / S.10 f.]

Die elementaren Fermionen unterteilen sich in Quarks und Leptonen (s. Abb. 1). Quarks sind die Bausteine der Hadronen. Das sind Teilchen, die der starken Wechselwirkung ausgesetzt sind. Diese ist eine der vier Wechselwirkungen der Physik: Die starke Wechselwirkung, die zum Beispiel den Zusammenhalt der Nukleonen (Protonen und Neutronen) im Atomkern bewirkt, die schwache Wechselwirkung, die bei Betazerfall und Kernfusion eine Rolle spielt, die elektromagnetische Wechselwirkung, die z.B. für Photoeffekt und Magnetismus verantwortlich ist und die Gravitation, die für die Anziehung von Massen wichtig ist; jedoch für die Wechselwirkung zwischen einzelnen Teilchen keine Rolle spielt. Durch diese Wechselwirkungen können alle physikalischen Phänomene und Prozesse der Erde und des Weltraums beschrieben werden. [6]

Quarks kommen nicht isoliert vor; sie verbinden sich sofort zu Baryonen oder Mesonen. Baryonen sind Verbände aus drei Quarks. Mesonen hingegen sind eine Quark-Antiquark-Kombination. Sie haben allerdings eine extrem kurze Lebensdauer, da sie instabil sind und damit schnell zerfallen. Daher spielen Mesonen keine Rolle in der stabilen Materie. Alle Quarks werden in drei Generationen unterteilt: Die Up- und Down-Quarks bilden dabei die 1. Generation. Aus ihnen setzen sich Protonen zusammen. Die zweite Generation sind Charm- und Strange-Quarks und die 3. Generation besteht aus Top- und Bottom-Quarks.

Leptonen unterliegen nicht der starken Wechselwirkung. Sie werden nochmals in geladene und ungeladene Teilchen unterteilt. Die ungeladenen Teilchen sind hierbei Neutrinos. Die drei Generationen bestehen aus Elektronen, Myonen, Tauonen und entsprechend Elektronen-

Neutrinos, Myon-Neutrinos und Tau-Neutrinos. Die Neutrinos reagieren nur durch schwache Wechselwirkung mit der Materie. Die letzte Teilchen-Gruppe des Standardmodells sind die Eichbosonen. Photonen sind die Austauschteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung, Gluonen sind die der starken Wechselwirkung und W^+ , W^- und Z^0 - Bosonen bilden die Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung. Durch die Masse der Eichbosonen und aller Fermionen existiert die Notwendigkeit eines Higgs-Felds, bzw. eines Higgs-Bosons. Dieses hat keinen Spin und keine Ladung. [I / S.10 ff.]

Drei Generationen
der Materie (Fermionen)

	I	II	III		
Masse →	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	0	125,9 GeV
Ladung →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
Name →	u up	c charm	t top	γ Photon	H Higgs Boson
	4,8 MeV	95 MeV	4,18 GeV	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
Quarks	d down	s strange	b bottom	g Gluon	
	<2 eV	<0,19 MeV	<18,2 MeV	91,2 GeV	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e Elektron- Neutrino	ν_μ Myon- Neutrino	ν_τ Tau- Neutrino	Z⁰ Z Boson	
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV	
	-1	-1	-1	±1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
Leptonen	e Elektron	μ Myon	τ Tau	W[±] W Boson	Eichbosonen

Abbildung 1: Standardmodell der Elementarteilchen, [A]

2 Theorie

2.1 Kosmische Strahlung

Grundsätzlich wird bei der kosmischen Strahlung zwischen primärer und sekundärer kosmischer Strahlung unterschieden. Pro Sekunde treffen etwa 1000 Teilchen pro Quadratmeter und Sekunde die äußere Erdatmosphäre. Dieser „Energiefluss“ ist jedoch abhängig von Sonnenwind und Erdmagnetfeld. Es gibt verschiedene Quellen der kosmischen Strahlung. Diese sind zum Beispiel: Sonnenwinde, Sonneneruptionen, oder die Sterne in unserer Galaxie, wobei es sich um galaktische kosmische Strahlung handelt [18]. Durch die Wechselwirkung der primären kosmischen Strahlung mit der äußeren Erdatmosphäre entsteht sekundäre kosmische Strahlung.

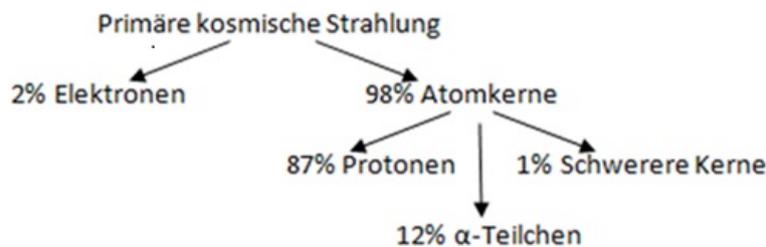


Abbildung 2: Unterteilung der primären kosmischen Strahlung;

Genauer gesagt, zerschlagen die Protonen der primären kosmischen Strahlung die Atomkerne der oberen Atmosphäre und dabei entstehen Pionen, Kaonen und Nukleonen. Die Kaonen und Pionen zerfallen zu Photonen, Neutrinos und Myonen (s. Abb.2). Myonen haben eine - für kosmische Teilchen - lange Lebensdauer (2,2 Mikrosekunden). Dadurch sind 80 Prozent der geladenen Teilchen auf Meereshöhe Myonen. Durch eine - auf Grund der Lichtgeschwindigkeit notwendige - relativistische Betrachtung ergibt sich, dass circa 100 Myonen pro Quadratmeter und Sekunde die Erdoberfläche auf Meeresebene erreichen. Hierbei spielt die Zeitdilatation eine Rolle. Diese besagt, dass die Zeit für sich bewegende Teilchen langsamer vergeht als für ruhende Teilchen. [III / S.5 ff.; II / S.12 f.; 7]

2.2 Das Myon

Das Myon wurde 1936 von Carl D. Anderson und Seth Neddermeyer entdeckt. Myonen gehören zu der Übergruppe der Fermionen und genauer zugeordnet zu den Leptonen. Sie haben wie alle Fermionen einen halbzahligen Spin. Die Ladung des Myons ist negativ. Ihm zugeordnet ist das Antimyon mit einer positiven Ladung.

Beide haben eine Masse von 105,6 MeV, was etwa dem zweihundertfachen der Elektronenmasse entspricht.

Ein Myon zerfällt in ein Elektron und zwei Neutrinos. [7]

2.3 Detektoren zum Teilchennachweis

Teilchendetektoren werden zum Nachweis von Teilchen genutzt. Dabei gibt es zahlreiche Arten mit verschiedenen Spezialisierungen. Ihre Aufgaben sind neben dem allgemeinen Nachweis die Identifikation von Teilchen und die Bestimmung derer Eigenschaften, wie zum Beispiel die Energie. Die meisten Detektoren der Grundlagenforschung, die heutzutage gebaut werden, sind Großdetektoren. Diese bestehen aus einer Vielzahl an Schichten der unterschiedlichsten modernen Detektoren.

Teilchendetektoren werden in zwei Gruppen unterteilt: Historische und Moderne Detektoren. Historische Detektoren benötigen alle eine visuelle Auswertung der Ergebnisse. Da dies jedoch bei großen Datenmengen sehr unpraktisch ist, sind diese Methoden veraltet. Dazu zählen zum Beispiel Nebelkammern. In diesen wird ein übersättigter Wasserdampf kondensiert, wenn dieser von elektrisch geladenen Teilchen durchflogen wird. Dadurch bilden sich Nebelspuren entlang der Teilchenbahnen. Diese können fotografiert werden. Die Aufnahmen nennt man Kernspuraufnahmen.

Des Weiteren gibt es Blasenkammern. Das sind mit Flüssigkeit gefüllte Kammern, bei denen die Flüssigkeit durch plötzliches Druckabsenken über den Siedepunkt gebracht wird. Die ionisierenden Teilchen bilden dann die Keime für die Gasblasen. Dann wird ein Bild von der Blasenkammer gemacht und der Druck wieder erhöht, sodass die Temperatur der Flüssigkeit wieder unter dem Siedepunkt liegt. Der ganze Vorgang spielt sich im Bereich von etwas mehr als einer Zentelsekunde ab. Es liegt ein homogenes Magnetfeld vor, welches Teilchen, die sich senkrecht dazu bewegen, auf eine Kreisbahn zwingt. Anhand des Durchmessers kann mit Kenntnis der Stärke des Magnetfelds berechnet werden, was der Impuls und die Ladung des Teilchens war.

Auch die Funkenkammer gehört zu den historischen Detektoren. Dabei handelt es sich um parallele Platten zwischen denen sich Edelgas befindet. Dieses wird durch ein geladenes Teilchen entlang seiner Bahn ionisiert. Durch eine kurzzeitig angelegte Spannung ist ein Funkenüberschlag sichtbar.

Die modernen Detektoren werden heutzutage in der Forschung verwendet. Sie haben gegenüber den historischen Detektoren den großen Vorteil der elektronischen Auswertung der Ergebnisse. Als moderne Detektoren werden zum Beispiel Ionisationskammern bezeichnet. Bei diesen befinden sich zwei Elektroden in einer gasgefüllten Kammer. Dazwischen wird eine Spannung angelegt. Ein einfallendes Teilchen erzeugt durch Stöße mit den Gasmolekülen Ionen und freie Elektronen. Durch Beschleunigung dieser werden weitere Ionen und Elektronen erzeugt. An den äußeren Elektroden der Ionisationskammer wird ein kurzer messbarer Spannungsimpuls erzeugt.

Auch Halbleiter-Detektoren werden in der heutigen Forschung verwendet. Sie basieren auf der Idee der Ionisationskammer mit einem Nachweis durch Halbleiter mit sehr niedrigen Ionisationsenergien, was einen eindeutigen Vorteil zur Ionisationskammer darstellt.

Die Drahtkammer ist ebenfalls eine Weiterentwicklung eines historischen Detektors. Es handelt sich um die Verbesserung der Funkenkammer, da die Drahtkammer elektrische Impulse für einfallende Teilchen liefert, die von Computern ausgewertet werden können.

Ebenfalls häufig verwendet wird das Kalorimeter, wobei es Hadronen-Kalorimeter und elek-

tromagnetische Kalorimeter gibt. Dieses bremst geladene Teilchen vollständig ab. Die einfallenden Teilchen werden in sogenannten Absorberplatten abgegeben, gestoppt und zerfallen in Sekundärteilchen, welche einen Teilchenschauer erzeugen. Dieser wird durch die Detektorschicht erfasst. Durch die Teilchenanzahl und die Länge des Schauers kann auf die Energie des ursprünglichen Teilchens geschlossen werden.

Cherenkov-Zähler nutzen den Cherenkov Effekt, der im Nachfolgenden noch genauer beschrieben ist, um die Geschwindigkeit der Teilchen durch Vermessungen des Cherenkov-Winkels (Winkel der Abstrahlung der Lichtfront) zu bestimmen.

Auch Photomultiplier und Szintillatoren, auf denen im Folgenden ein besonderer Fokus liegt, zählen zu den modernen Detektoren. [4, 9, 10]

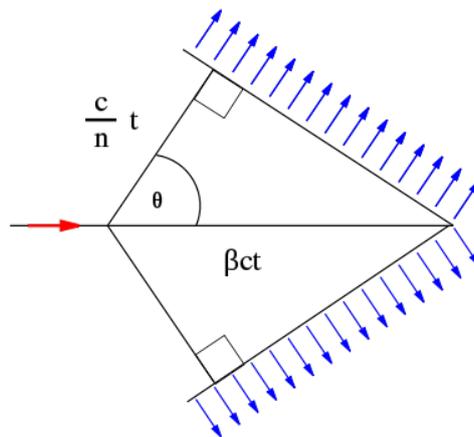


Abbildung 3: Das Cherenkov-Licht abgestrahlt unter dem Cherenkov-Winkel; [B]

2.3.1 Cherenkov-Effekt

Der Cherenkov-Effekt ist ein physikalisches Phänomen, das auftritt, wenn sich ein geladenes Teilchen mit relativistischer Geschwindigkeit in einem Medium schneller bewegt als das Licht in diesem Medium. Dadurch werden kurzzeitig Atome polarisiert und elektromagnetische Strahlung emittiert. Diese wird Cherenkov-Strahlung genannt.

Die Elementarwellen der einzelnen Punkte der Teilchenspur überlagern sich nach dem Huygens'schen Prinzip: 'Jeder Punkt einer Wellenfront kann als Ausgangspunkt von Elementarwellen betrachtet werden, die sich mit gleicher Geschwindigkeit und Frequenz wie die ursprüngliche Welle ausbreiten. Die Elementarwellen überlagern sich zu einer neuen Wellenfront.' [19]. Ist jedoch die Teilchengeschwindigkeit größer als die des Lichts, so überlagern sich die Elementarwellen der Punkte der Teilchenspur an bestimmten Stellen konstruktiv und es entsteht Cherenkov-Strahlung. Die Aussendung des Cherenkov-Lichts erfolgt unter dem Cherenkov-Winkel Θ (s. Abb.3, Gleichung 1). Dieser ist abhängig von der Brechzahl n des Mediums und der Geschwindigkeit des Teilchens v . Das Cherenkov-Licht wird vom optischen Bereich bis in den UV-Bereich erzeugt, wobei mehr Cherenkov-Licht im UV-Bereich erzeugt wird.

$$\cos(\Theta) = \frac{c}{n \cdot v} \quad (1)$$

Die als Lichtkegel erfolgte Überlagerung der Elementarwellen ähnelt dem Prinzip des Überschallknalls in der Luft. [II / S.437 ff.; III / S.10 ff.]

2.3.2 Photomultiplier

Myonen können nur indirekt nachgewiesen werden. Ihre Spuren werden über das Cherenkov-Licht, also das Licht, das die Myonen auf dem Weg durch die Kamiokande erzeugen, detektiert. Diese Detektion erfolgt durch Photomultiplier.

Der Photomultiplier - oder auch Sekundärelektronenvervielfacher - reagiert hoch empfindlich auf äußere Licht-Reize, denn seine Funktion besteht darin, Photonen zu sammeln und zu verstärken.

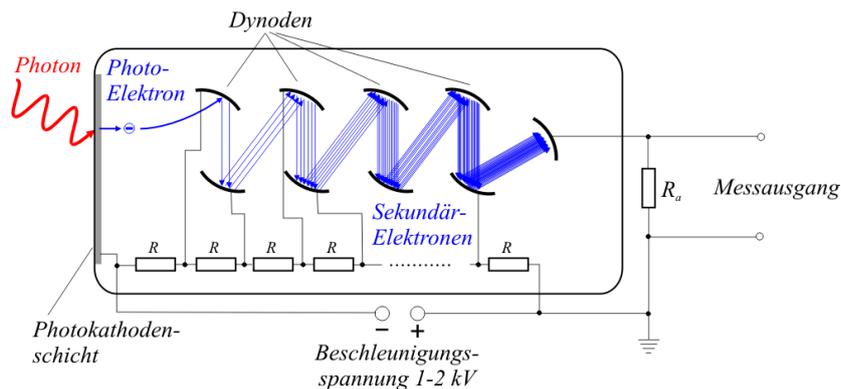


Abbildung 4: Schematischer Aufbau eines Photomultipliers; [C]

Wie in der schematischen Abbildung erkennbar, ist der Photomultiplier eine Elektronenröhre mit mehreren Parallelelektroden und einer anliegenden Hochspannung. Ganz am Anfang der Röhre befindet sich eine Photokathoden-Schicht. Die letzte Parallelelektrode ist eine Anode. Die innere Spannung des Photomultipliers steigt von Elektrodenpaar zu Elektrodenpaar. Die Spannung muss allerdings nicht immer zwingend direkt steigen. Es geht z.B. auch, dass ganz links ein negatives Potential anliegt und die rechte Seite geerdet ist (=0V).

Trifft also ein Photon auf die Photokathode auf, so schlägt dieses über den Photo-Effekt Elektronen aus der Photokathodenschicht. Durch die anliegende Spannung wird das Elektron zur nächsten Dynode hin beschleunigt und schlägt dort weitere Elektronen (=Sekundärelektronen) aus. Dieser Elektronenstrahl trifft auf die nächste Dynode und es werden noch mehr Elektronen gelöst. Die Dynoden erzeugen so eine Verstärkung des Signals jedes einzelnen Photons. Bedingung für den immer größer werdenden Elektronenstrahl ist, dass sich die Dynoden auf einem zunehmend positivem Potential befinden. Daher ist die anliegende Hochspannung mit Spannungsteilern auf die Dynoden aufgeteilt. Die jeweilige Verstärkung der Photonen ist von der anliegenden Spannung, bzw. von der Anzahl der Dynoden und der Anzahl der pro Dynode herausgeschlagenen Elektronen abhängig. Das Signal wird solange verstärkt, bis die Spannung

messbar ist. Das PMT-Modell, mit dem die folgenden Messungen aufgenommen wurden, hat eine Verstärkung von $1,2 \cdot 10^7$, d.h. aus einem Elektron können 10 Millionen werden, was ein gut messbarer Strom ist.

Auch ohne Eingangssignal wird permanent ein geringer Anodenstrom gemessen. Der Verstärkungsfaktor bestimmt dabei wie groß der Rauschstrom ist. Das heißt, bei geringerer Spannung, liegt die Baseline bei einem geringeren Wert und rauscht weniger stark. Um diesen Rauschstrom nicht mit zu messen, muss ein sogenannter Trigger, bzw. Schwellenwert für die Messungen am Oszilloskop festgelegt werden. Der Rauschstrom entsteht durch Elektronen aus elektronischer Emission - also einer Aussendung von Elektronen. Bei einem Photomultiplier ist meistens eine Sekundärelektronenemission der Fall. Diese tritt in Elektronenröhren an Anoden auf. Des Weiteren kann auch eine Feldemission - erzeugt durch ein starkes elektrisches Feld - der Fall sein. Sie tritt an den Kathoden auf. Auch eine thermische Emission kann vorliegen. Ein weiterer datenverfälschender Aspekt ist eine Lichtrückkoppelung. Diese liegt vor, wenn der Photomultiplier nicht exakt auf der Kamiokanne, einer möglichst dunklen und lichtundurchlässigen Kanne, aufgeschraubt ist und dadurch äußeres Licht einfällt. Dies ist in jedem Fall zu vermeiden! Das - für die Messungen verwendete - PMT-Modell ist in einem Bereich von 185 bis 730 nm sensitiv und hat die höchste Effizienz bei 410 nm. [I / S.34 ff.; II / S.13 ff.; III / S.414 ff.; 3]

2.3.3 Szintillatoren

Szintillatoren dienen der Emission von Photonen. Dies geschieht nach einer Anregung von Atomen oder Molekülen des szintillierenden Materials durch Gamma- oder Teilchenstrahlung. Ein solcher Szintillationsdetektor besteht aus einem szintillierenden Medium und einem Photodetektor.

Im szintillierenden Medium wird Gamma- oder Teilchenstrahlung in sichtbares oder UV Licht umgewandelt. Meistens enthält der primäre Szintillator zusätzlich einen Wellenlängenschieber. Das szintillierende Medium sendet eine bestimmte Wellenlänge aus und der Wellenlängenschieber absorbiert und reemittiert diese auf einer längeren Wellenlänge. Diese kann vom Szintillator selbst nicht mehr absorbiert werden. Somit kann das geschobene Licht sich sehr weit im Szintillator ausbreiten. Der Photodetektor wandelt dann das Licht in ein elektrisches Signal um. Hierfür wird meistens ein Photomultiplier verwendet.

Es gibt sehr viele szintillierende Materialien. Dazu gehören anorganische und organische Kristalle, sowie organische Flüssigkeiten. Letztere sind Gemische aus ein oder mehreren organischen Szintillatoren und einem organischen Lösungsmittel in einem Konzentrationsverhältnis von drei Gramm pro Liter Lösungsmittel (zum Beispiel Benzol (C_6H_6)) im primären Szintillator. Ein möglicher primärer Szintillator wäre p-Terphenyl ($C_{18}H_{14}$). Die am häufigsten eingesetzten Szintillatordetektoren sind Plastikszintillatoren. Diese sind grundsätzlich aufgebaut wie Flüssigkeitszintillatoren: Ein Gemisch aus gelösten organischen Szintillatoren mit einem anderen organischen Additiv. Dabei ist die Trägersubstanz Plastik, bzw. Polyvenyltoluol, Polyphenylbenzol, Polystyrol oder Polymethylmethacrylat; allesamt transparente thermoplastische Kunststoffe. Das Mischungsverhältnis beträgt zehn Gramm pro Liter Lösungsmittel. Vorteile der Plastikszintillatoren liegen in einer enorm schnellen Fluoreszenzzeit (um die drei Nanosekunden). Außerdem sind diese billig und einfach herzustellen. Sie können in beliebige Formen, wie zum Beispiel Blöcke, Platten, Folien oder Fasern, gebracht werden. Jedoch sind

sie sehr empfindlich auf organische Lösungsmittel wie Aceton. Weitere szintillierende Materialien sind gasförmige und flüssige Edelgase.

Dabei werden überwiegend Helium, Xenon, Krypton oder Argon verwendet. Für die Neutronendetektion eignen sich besonders gut szintillierende Gläser.

Anwendung finden die szintillierenden Materialien in Kalorimetern, als Trigger für besonders langsame Detektoren und als Neutronenkonverter für den Nachweis und Spektroskopie thermischer und schneller Neutronen. Außerdem werden Szintillatoren häufig als Myonveto in Experimenten eingesetzt, da die Myonen in der Lage sind das gesamte Experiment zu durchqueren und in allen Detektorschichten Energie deponieren können. Die Myonen stellen für solche Experimente Untergrundereignisse dar und diese können von den eigentlich untersuchten Ereignissen getrennt werden, indem Szintillatorplatten über (Myonen kommen von oben) dem eigentlichen Experiment angebracht werden, oder ein Flüssigszintillator das Experiment umgibt.[I / S.294 ff.; II / S.522 ff.; 14]

2.3.4 Effizienz

Der Begriff Effizienz, bzw. Effektivität wird häufig und in verschiedenen Themengebieten verwendet: Statistik, Wirtschaft und weitere. Der Gegensatz zur Effizienz besteht darin, dass bei der Effizienz auch die Kosten-Nutzen-Relation und der Aufwand eine Rolle spielt, während die Effektivität Ergebnis, Ziel und Wirksamkeit erfasst. Im Fall der Teilchendetektionen der folgenden Messungen liegt allerdings eine Mischung aus Effizienz und Effektivität vor, da es ebenfalls um das Erreichen des Optimums geht. Es handelt sich um eine gegenüberstellende Rechnung der nachgewiesenen Teilchen und der tatsächlichen Teilchen, die den Detektor durchquert haben.

2.4 Zielstellung der Arbeit

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf dem Nachweis von möglichst vielen Myonen. Es soll mit einfachen Experimenten ein Teil der kosmischen Strahlung auf der Erde nachgewiesen werden. Des Weiteren soll eine Charakterisierung aller zur Verfügung stehenden Photomultiplier erreicht werden. Als abschliessendes Resultat soll die Effizienz der verschiedenen Photomultiplier berechnet werden.

2.4.1 Forschungsmethoden

Die verwendeten Forschungsmethoden unterteilen sich grundlegend in Kurzzeit- und Langzeitmessungen. Die Kurzzeitmessungen erfolgten für die einzelnen Photomultiplier mit Kamiokannen. Sie wurden oft und in regelmäßigen Abständen mit veränderten Spannungswerten und Triggerhöhen durchgeführt (s. Analyse der Daten). Die Langzeitmessungen hingegen erfolgten in zwei Teilabschnitten. Dabei wurden Daten in einem 5-Sekunden-Intervall aufgenommen. Der 1. Teil enthielt eine Messung für die beiden Szintillator-Platten und die Kamiokanne mit dem Photomultiplier. Beim 2. Teil wurden nur Daten der beiden Szintillator-Platten erfasst.

Der genaue Aufbau der Kurz- und Langzeitmessungen, sowie alle Ergebnisse sind in den folgenden Kapiteln zu finden.

3 Praxis

3.1 Charakterisierungsmessungen

3.1.1 Messaufbau

Die Charakterisierungsmessungen dienen dazu, die Photomultiplier (PMT) einzeln zu charakterisieren. Alle vier sind zwar baugleich, doch das bedeutet nicht, dass sie sich exakt gleich verhalten. Um trotzdem seriöse und vergleichbare Messergebnisse zu erhalten, muss eine Einzelcharakterisierung erfolgen. Dabei ist der Photomultiplier auf der Kamiokanne über ein Signalkabel mit dem RedPitaya verbunden. Ein RedPitaya ist grundlegend ein Oszilloskop, auf dem ein Linux-System läuft, um Messungen gleichzeitig automatisch aufzunehmen und auszuwerten, bzw. weiterzuverarbeiten. Dieses, ein Drucksensor und ein Temperatursensor sind an einen Computer angeschlossen, der die Daten auswertet.

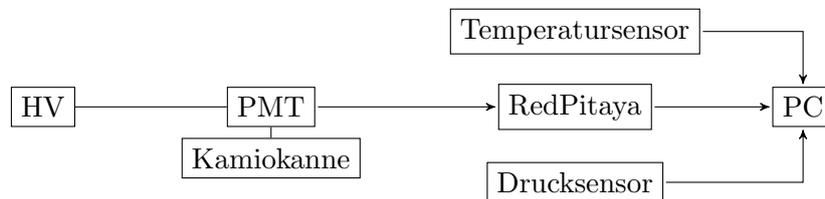


Abbildung 5: Schematischer Messaufbau

3.1.2 Üblicher Verlauf einer Messung

Zu Beginn einer Messung muss die optimale Triggerhöhe ermittelt werden. Diese stellt die Grenze zwischen Untergrund (Rauschen) und Signal (Cherenkov-Licht) dar. In diesem Bereich können optimal die meisten Myonen gemessen werden. Dafür wird die Triggerhöhe bei einer gleichbleibenden Spannung systematisch verändert und mittels der Messzeit und der Zahl der Ereignisse kann die Rate ermittelt werden. Diese wird als Punktdiagramm mit der Rate auf der Ordinate und der Triggerhöhe auf der Abszisse abgetragen. Dadurch lässt sich die optimale Triggerhöhe erkennen. Bei derselben Triggerhöhe kann es zu Abweichungen der Ereigniszahl kommen.

Anschliessend wird der PMT in die mit Wasser gefüllte Kamiokanne eingetaucht; jedoch nur der wasserdichte Teil des Photomultipliers, da Hochspannung anliegt! Danach wird bei einer konstanten Triggerhöhe die Spannung systematisch hoch gedreht und die Werte der Spannung, die Dauer der Messung, die Zahl der Ereignisse und die errechnete Rate auf der Ordinate und der Spannung auf der Abszisse erstellt. Die Messungen haben als Ziel, den Plateau-Bereich zu erreichen.

Der ideale Graph einer Messung (s. Abb. 6) weist drei Bereiche auf: Im Proportionalzähl-Bereich werden je mehr Elektronen aus den Dynoden ausgeschlagen, desto stärker die Photoelektronen beschleunigt werden (Proportionalität zwischen den ausgelösten Photoelektronen und der Anzahl der Cherenkovelektronen in der Kamiokanne). Diese Beschleunigung ist abhängig von der angelegten Hochspannung. Ab einer bestimmten Spannung wird allerdings ein Maximum erreicht, sodass eine höhere Spannung nicht mehr zum Ausschlagen von mehr Elektronen führt (Plateu-Bereich). In diesem Bereich haben kleine Spannungsschwankungen

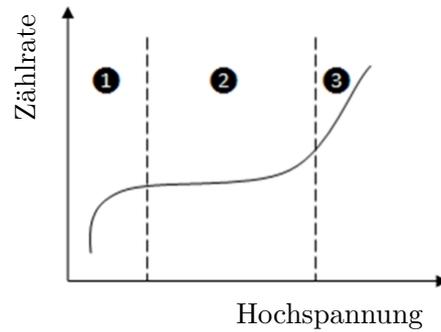


Abbildung 6: Idealer Verlauf einer Messung, 1: Proportionalzähl-Bereich, 2: Plateau-Bereich, 3: Durchbruch-Bereich

keine Auswirkungen auf die Zählrate des Photomultipliers. Wird die Spannung trotzdem weiter erhöht, werden Elektronen aus den Dynoden freigesetzt, ohne dass ein Photoelektron diese ausschlägt. Dadurch entsteht der Durchbruch-Bereich. Um genau zu überprüfen, ob ein Plateau-Bereich vorliegt, können zusätzlich die mittleren Signalhöhen pro Spannung gemessen werden. Im Plateau-Bereich bleiben die Signalhöhen - genau wie die Anzahl der ausgeschlagenen Elektronen - konstant.

3.1.3 Analyse der Daten

Bei einer ersten Messung mit dem PMT (hier: PMT 1) wird deutlich, dass die Pulsspuren sehr verrauscht sind (s. Abb. 7). Im Vergleich zu den anderen PMTs fällt das Signal bei PMT 1 deutlich langsamer ab. Das liegt daran, dass Licht in die Kamiokanne gelangt. Nach einer Abdichtung der Kamiokanne und des Photomultipliers vor einfallendem Licht durch blickdichten Stoff liegt eine glatte Baseline und somit eine deutlichere Graphik (s. Abb. 7) vor.

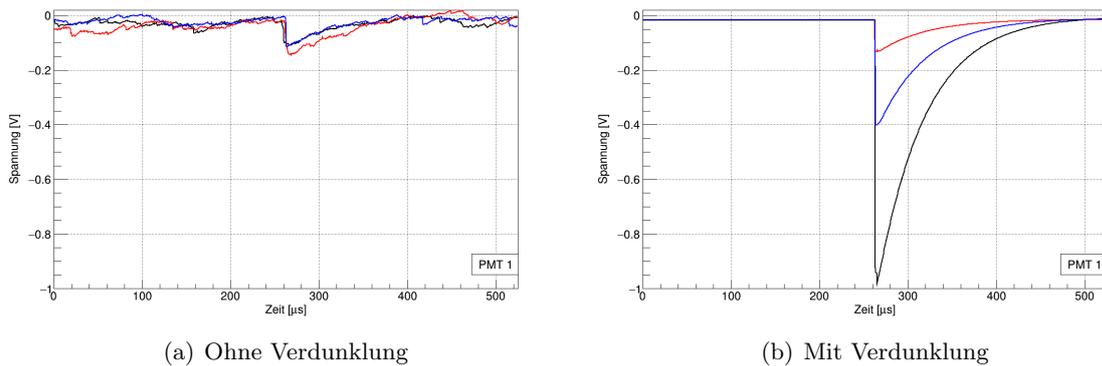


Abbildung 7: Vergleich der Pulsspuren über die Zeit für PMT 1 im Bezug auf die Verdunklung

In den Diagrammen sind jeweils 3 Pulsspuren abgetragen. Die Auswahl ist zufällig. Auf der Ordinate (Maßstab: $1 \text{ LE} \equiv -0.2 \text{ V}$) ist die Spannung in Volt und auf der Abszisse (Maßstab: $1 \text{ LE} \equiv 100 \mu\text{s}$) die Zeit in Mikrosekunden abgetragen. Die Baseline der rechten Abbildung, also der genaueren Messung mit Verdunklung liegt ungefähr bei -0.02 V . Durch ein Signal am PMT durch Hochspannung kommt es zum negativen Spannungsausgleich der Pulsspur, da am PMT eine negative Hochspannung anliegt. Sobald ein Signal gemessen wird, kommt es zu einem stark monotonen Abfall der Spannung. Danach steigt der Graph wieder langsam zurück zur Baseline. Die Baseline liegt bei den vier PMTs nicht immer beim gleichen Wert, obwohl diese exakt baugleich sind. Sie sind zwar makroskopisch gleich, aber mikroskopisch nicht. Das heißt, dass das Metall z.B. unterschiedlich alt sein kann oder unterschiedlichen Umweltfaktoren ausgesetzt wurde. Ein weiterer Einfluss liegt beim Füllgas. Dieses sollte theoretisch immer einen genau gleichen Gasdruck haben. Dies ist aber nur selten der Fall. Auch Alterserscheinungen des PMTs oder der Widerstände können eine Rolle spielen. Der jeweilige genaue Grund für die unterschiedlichen Baselines kann aber nicht bestimmt werden. Eine komplette Pulsspur ist ungefähr 524 Mikrosekunden lang.

Auch die anderen PMTs erzeugen mit der Verdunklung genauere Graphiken (s. Anhang), jedoch ist der Unterschied bei PMT 1 am Besten zu erkennen.

Nun erfolgt eine exakte Triggerhöhen-Bestimmung für alle vier PMTs. Dafür wird eine Spannung von 1100 V gewählt. Die Triggerschwelle wird - wie in 3.1.2 schon beschrieben - systematisch erhöht (s. Abb. 8).

In diesem Diagramm ist die Triggerschwelle in Volt (Abszisse, Maßstab: $1 \text{ LE} \equiv -0.01 \text{ V}$) in Abhängigkeit von der Ereignisrate $1/s$ (Ordinate, Maßstab: $1 \text{ LE} \equiv 0.5 \text{ 1/s}$) dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Triggerschwelle bei -0.06 V liegt. Vorher sind die Messungen nur als einzelne Punkte zu erkennen, doch ab dem Wert von -0.06 V beginnt ein deutlicher Anstieg

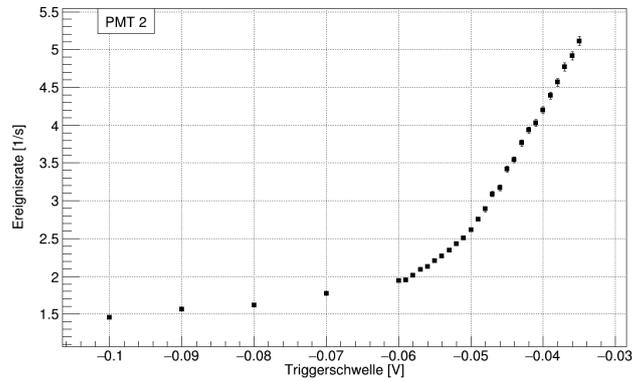


Abbildung 8: Systematische Triggerhöhen-Bestimmung PMT 2

eng aneinanderliegender Messpunkte. Auch die Triggerhöhen der anderen PMTs lassen sich gut bestimmen (s. Anhang). PMT 1 weicht erneut deutlich von den anderen PMTs ab, da die Triggerhöhe deutlich größer als die der anderen PMTs ist.

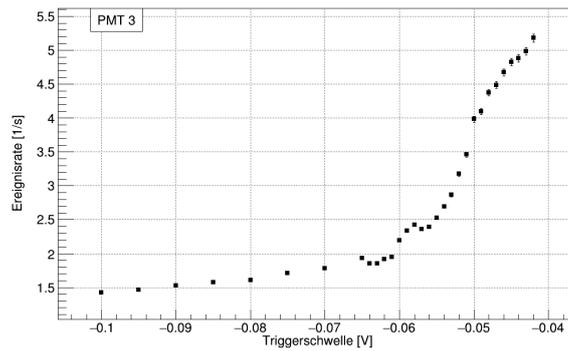


Abbildung 9: Systematische Triggerhöhen-Bestimmung PMT 3, auffällig

Bei PMT 3 liegen die Messpunkte auf keiner gleichmäßigen Linie (s. Abb. 9), wie das für die Triggerhöhen-Messung üblich ist. Da mehrere Messpunkte erst nachträglich eingefügt wurden und in dieser Zeit die Temperatur gefallen ist, könnte eine Temperaturabhängigkeit vorliegen. Da alle Messungen in einem Raum mit Klimaanlage, die nicht permanent läuft, stattfinden, kann es häufig zu Temperaturschwankungen kommen.

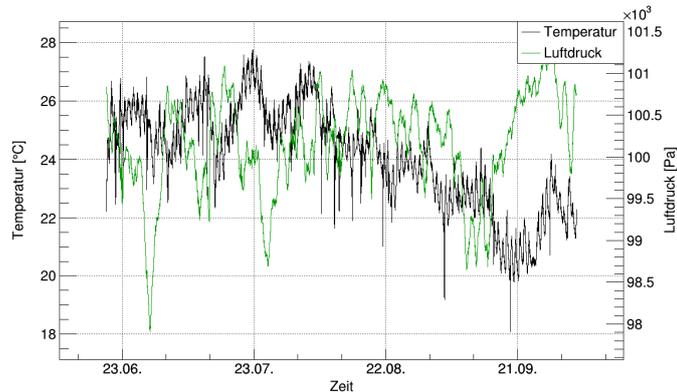


Abbildung 10: Temperatur- und Luftdruckverlauf

Der allgemeine Temperatur- und Luftdruckverlauf ist in diesem Diagramm (s. Abb. 10) ersichtlich. Vor Allem der Tag-Nacht-Rhythmus ist gut erkennbar. Die extremen Ausschläge liegen in der Klimaanlage begründet.

Deshalb erfolgt eine Untersuchung der Temperatur-Verläufe der PMTs. Am folgenden Diagramm ist gut erkennbar, dass die Temperatur keinen Einfluss auf die Ereignisrate hat.

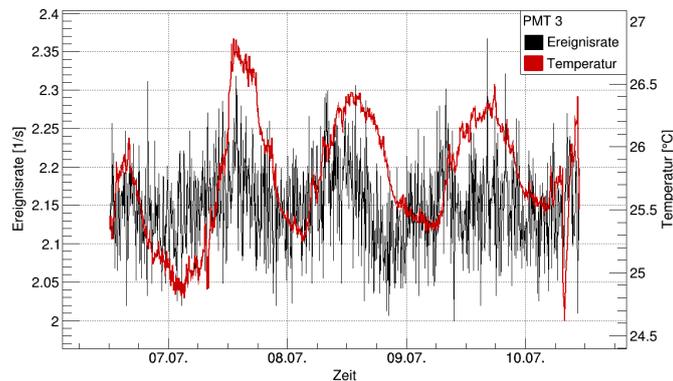


Abbildung 11: Ereignisrate-Temperatur-Verlauf PMT 3

Es liegt also keine Temperaturabhängigkeit vor.

Nach der erfolgreichen Triggerhöhen-Bestimmung kann die Messung fortgesetzt werden. Es werden nun die Spannungen hochgedreht (s. Abb. 12). Die folgende Graphik ist eine Darstellung der Abhängigkeit der Spannung V (Abszisse, Massstab: 1 LE \equiv 50 V) von der Ereignisrate 1/s (Ordinate, Massstab: 1 LE \equiv 0.2 1/s) bei einer konstanten Triggerhöhe von $-0.06V$. Es lässt sich keine eindeutiges Plateau erkennen, sondern nur der Proportionalzähl-Bereich. Bei der Spannungsversorgung der PMTs liegt die maximale einstellbare Spannung bei 1100 Volt. Es ist also vom Hersteller nicht vorgesehen, die PMTs bei höheren Spannungen zu betreiben. Es könnte allerdings ein sehr kurzes Plateau vorliegen. Da der Betrieb im Durchbruch-Bereich den PMT allerdings beschädigen würde, dient die Spannungsabriegelung als Schutz des PMTs. Vermutlich liegt bei 1100 Volt der Übergang in den Plateau-Bereich.

Die Spannungskurven der anderen PMTs sehen sehr ähnlich aus (s. Anhang), was auf die Baugleichheit zurückzuführen ist.

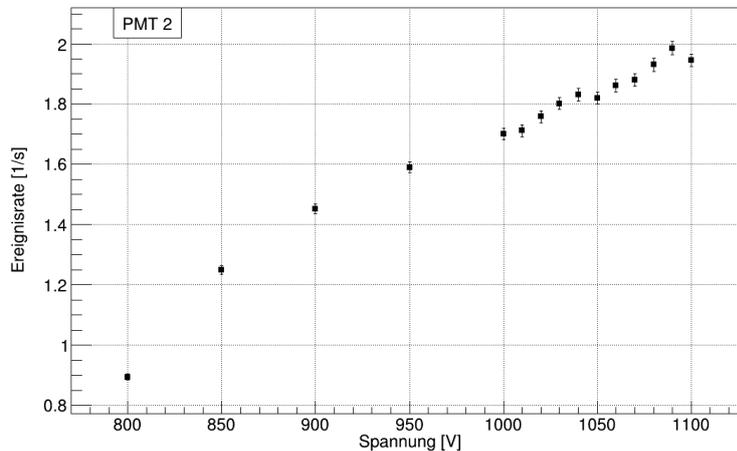


Abbildung 12: Systematische Spannungs-Veränderung PMT 2

3.2 Effizienzmessungen

3.2.1 Messaufbau

Durch die Effizienzmessungen soll die Effizienz des Photomultipliers berechnet werden. Dafür werden Messungen mit den Cosmo-Platten, bzw. Szintillator-Platten, von denen die Effizienz schon bekannt ist, durchgeführt. So kann aus der Ereigniszahl und der Messzeit wieder die Ereignisrate und daraus die Effizienz berechnet werden. Dafür befinden sich oberhalb und unterhalb des Photomultipliers, an dem eine Hochspannung anliegt, auf der Kamiokanne die Szintillator-Platten. Die drei Messgeräte sind über die DAQ-Platte, die verschieden Daten (z.B. Triggerhöhe) anzeigen kann, mit dem PC verbunden. Auch ein Temperatur- und ein Drucksensor sind an den Computer angeschlossen. Die Messungen unterteilen sich in zwei Teile. Koinzidenz 2 beschreibt die Messung mit den Cosmo-Platten in Koinzidenzschtaltung und Koinzidenz 3 die Kamiokanne und die Szintillator-Platten.

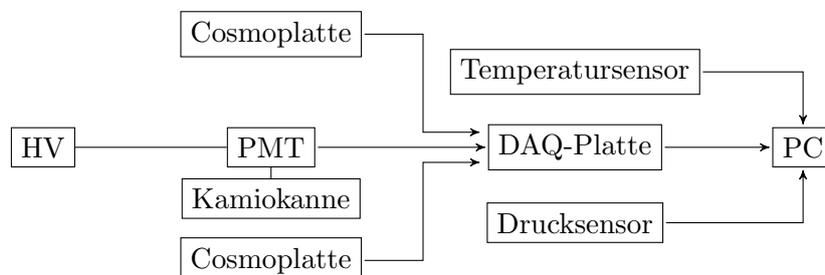


Abbildung 13: Schematischer Messaufbau

3.2.2 Analyse der Daten

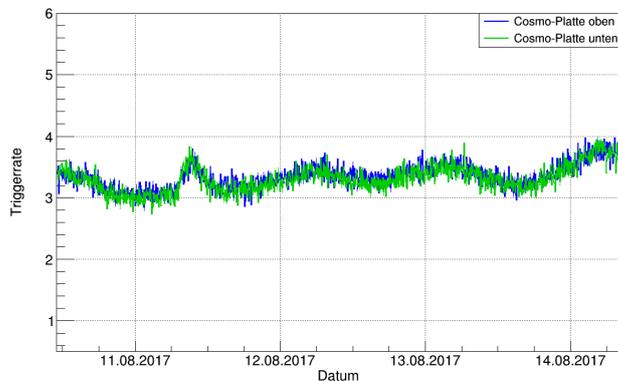


Abbildung 14: Koinzidenz 2, PMT 4

Die Triggerrate der beiden Koinzidenzen wird über einen längeren Zeitraum gemessen. Die Werte des Photomultipliers sind relativ stabil (s. Abb. 15), wohingegen die der Koinzidenz 2 Schwankungen aufweisen (s. Abb. 14). Dies zeigt, dass die Szintillator-Platten einer sehr hohen Temperaturabhängigkeit unterliegen.

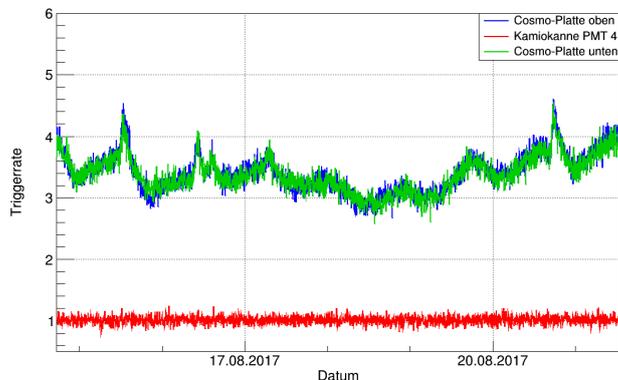
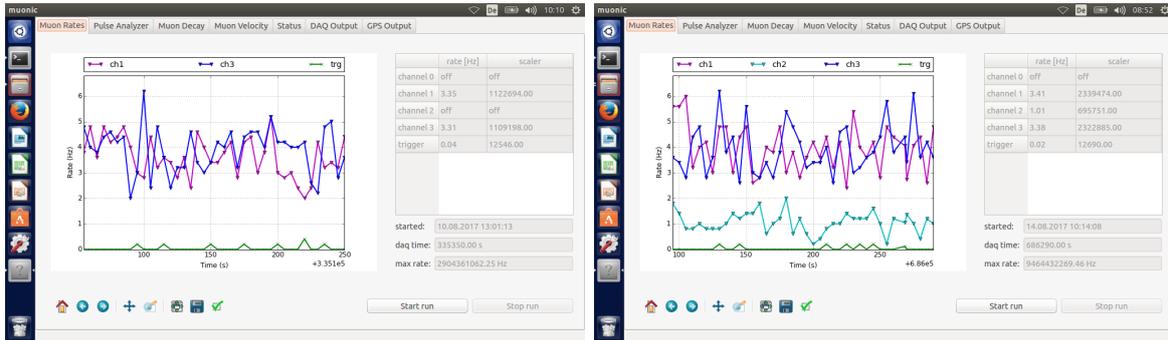


Abbildung 15: Koinzidenz 3, PMT 4

Auf dem angeschlossenen Computer läuft während der Messungen das Programm Muonic, das die Messungen auswertet und Werte für zum Beispiel die Ereigniszahl und die Messzeit liefert (s. Abb. 16).



(a) Koinzidenz 2

(b) Koinzidenz 3

Abbildung 16: PMT 4, Muonic

Solche Graphiken ergeben sich ebenfalls für die anderen drei PMTs (s. Anhang). Die Effizienz einer Cosmo-Platte liegt bei 74,81 Prozent. Beide Platten in Koinzidenz haben eine Effizienz von $(0,7481)^2 = 0,5597 = 55,97$ Prozent. Die Effizienz der Kanne ist die Anzahl der nachgewiesenen Myonen durch die Anzahl der Myonen, die die Kanne durchquert haben. Die Anzahl der nachgewiesenen Myonen ist die Rate der Koinzidenz 3 und die Anzahl der Myonen, die die Kanne durchquert haben, sind aus Koinzidenz 2 bestimmbar, da die Effizienz der Szintillator-Platten bekannt ist. Also:

Anzahl der Myonen, die die Kanne durchquert haben = Rate Koinzidenz 2 / Effizienz der beiden Cosmo-Platten. Daraus ergibt sich:

$$\epsilon_k = \frac{R3}{\frac{R2}{\epsilon_{2P}}} \quad (2)$$

Hierbei ist ϵ_k die Effizienz der Kamiokanne mit dem Photomultiplier, R3 die Rate der Koinzidenz 3, R2 die Rate der Koinzidenz 2 und ϵ_{2P} die Effizienz beider Szintillator-Platten. Durch die Messungen mit allen Photomultipliern in der beschriebenen Art ergeben sich folgende Messwerte:

PMT1

Koinzidenz: 2 Ereigniszahl: 41023 Messzeit: 429560s Ereignisrate: 0,0955

Koinzidenz: 3 Ereigniszahl: 40494 Messzeit: 670680s Ereignisrate: 0,0603775

Beispielrechnung:

$$\epsilon_k = \frac{0,0603775}{\frac{0,0955}{0,5597}} \quad (3)$$

Effizienz PMT+Kanne: 0.35385641

PMT2

Koinzidenz: 2 Ereigniszahl: 31370 Messzeit: 533705 s Ereignisrate: 0.0587778

Koinzidenz: 3 Ereigniszahl: 14848 Messzeit: 530506 s Ereignisrate: 0.0279884

Effizienz PMT+Kanne: 0,266514015

PMT3

Koinzidenz: 2 Ereigniszahl: 7741 Messzeit: 103555 s Ereignisrate: 0.0747525

Koinzidenz: 3 Ereigniszahl: 20020 Messzeit: 592965 s Ereignisrate: 0.0337625

Effizienz PMT+Kanne: 0,252792499

PMT4

Koinzidenz: 2 Ereigniszahl: 12546 Messzeit: 335355 s Ereignisrate: 0.0374111

Koinzidenz: 3 Ereigniszahl: 12690 Messzeit: 686290 s Ereignisrate: 0.0184907

Effizienz PMT+Kanne: 0,276635672

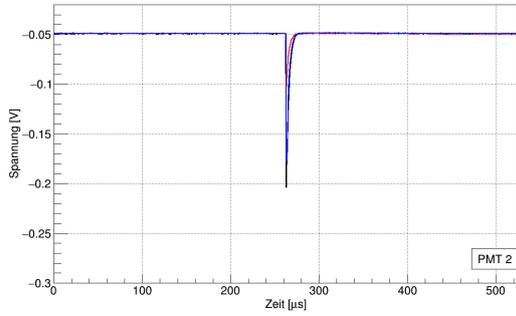
Die Werte von PMT 1 weichen - wie bei den vorherigen Messungen - von den anderen Werten ab. Die Effizienz ist deutlich höher. Das liegt daran, dass bei PMT 1 die Signale - wie bereits erwähnt - viel langsamer abfallen und in dieser Zeit noch weitere Myonen in den Cosmo-Platten detektiert werden könnten. Dieser Wert ist also mit den anderen Werten nicht direkt vergleichbar. Die Effizienzen von PMT 2 bis PMT 4 liegen zwischen 25 und 28 Prozent, was eine typische Effizienz von Photomultipliern und Kamiokannen ist.

4 Schlussteil

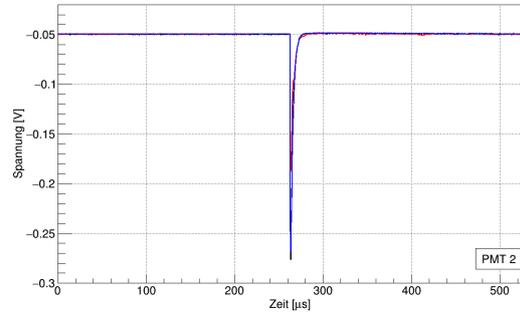
4.1 Fazit

PMT 1 unterscheidet sich in allen Messungen deutlich von den anderen. Er lässt sich zwar noch verwenden, ist jedoch stark beschädigt. Vermutlich entstand die Beschädigung durch eine zu hohe Lichtaussetzung. Für wichtige, bzw. genaue Messungen sollte er daher nicht mehr verwendet werden. Die anderen PMTs sind sich sehr ähnlich und funktionieren. Es sollte aber bei weiteren Messungen darauf geachtet werden, dass die PMTs und die Kamiokanne mit einem lichtundurchlässigen Material verhüllt sind, damit einfallendes Licht absorbiert werden kann und nicht die Messergebnisse beeinflusst. Für alle PMTs konnten die optimalen Hochspannungen und Triggerhöhen ermittelt werden, sodass sie in Zukunft mit den bestmöglichen Parametern betrieben werden können und so optimierte Messergebnisse erreichen können.

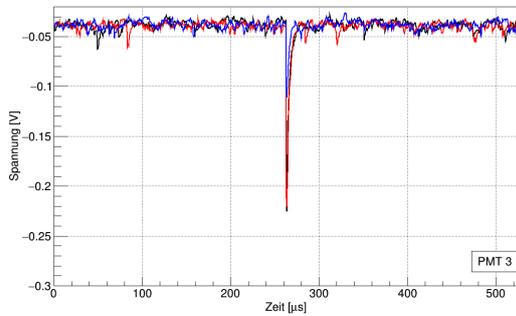
5 Anhang



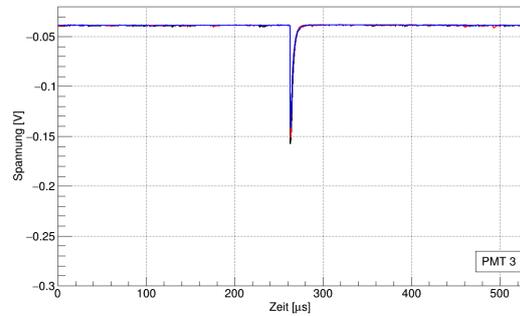
(a) PMT 2, ohne Verdunklung



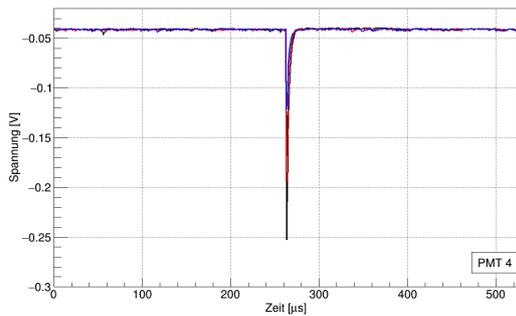
(b) PMT 2, mit Verdunklung



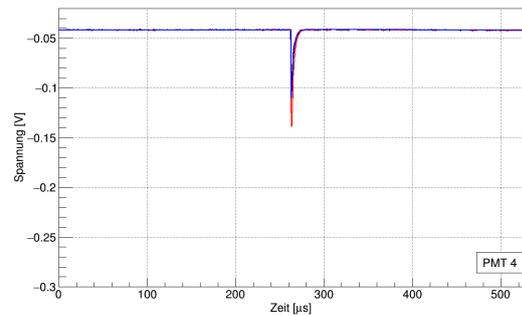
(c) PMT 3, ohne Verdunklung



(d) PMT 3, mit Verdunklung

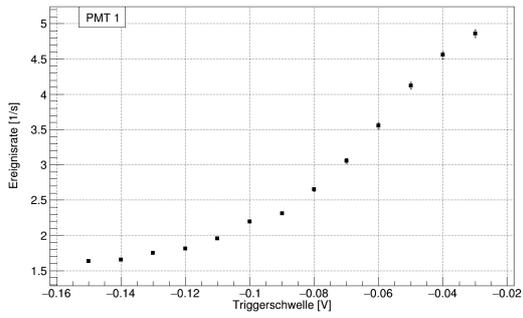


(e) PMT 4, ohne Verdunklung

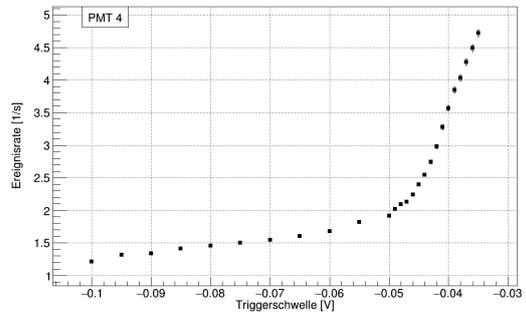


(f) PMT 4, mit Verdunklung

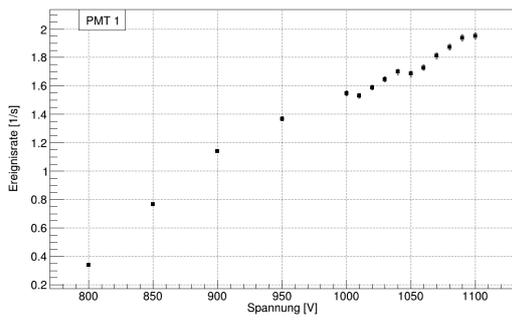
Abbildung 17: Vergleich der Pulsspuren PMT 2 - 4 im Bezug auf die Verdunklung



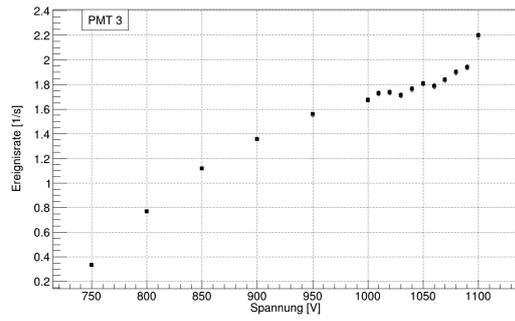
(a) PMT 1, T.-B.



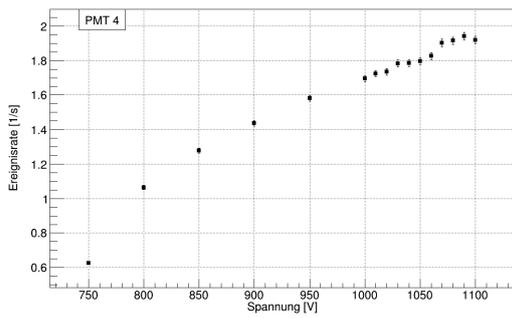
(b) PMT 4, T.-B.



(c) PMT 1, S.

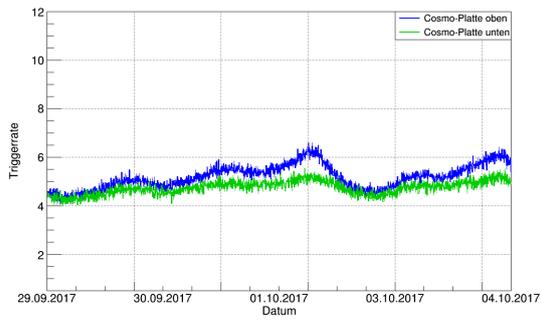


(d) PMT 3, S.

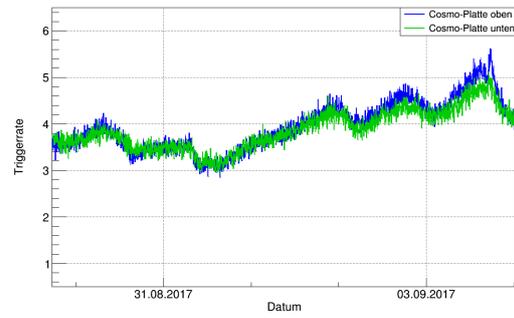


(e) PMT 4, S.

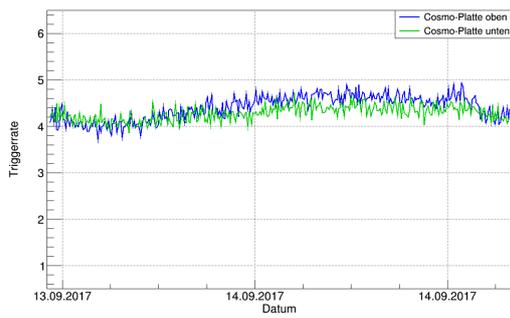
Abbildung 18: Triggerhöhen-Bestimmung (T.-B.); Systematische Spannungserhöhung unter konstanter Triggerhöhe (S.)



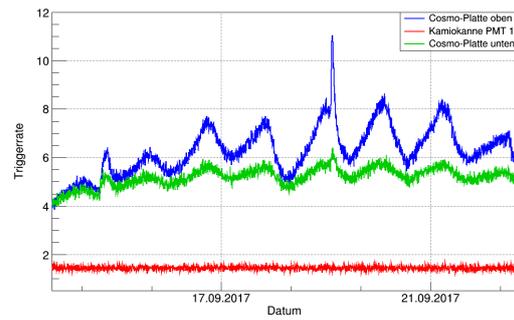
(a) PMT 1, 2



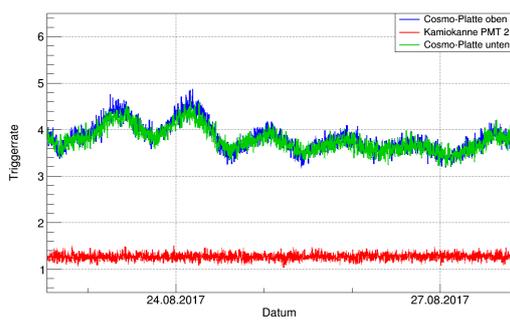
(b) PMT 2, 2



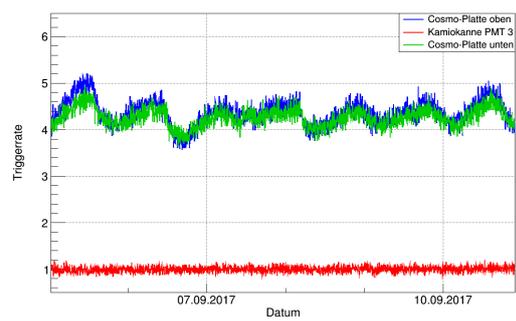
(c) PMT 3, 2



(d) PMT 1, 3

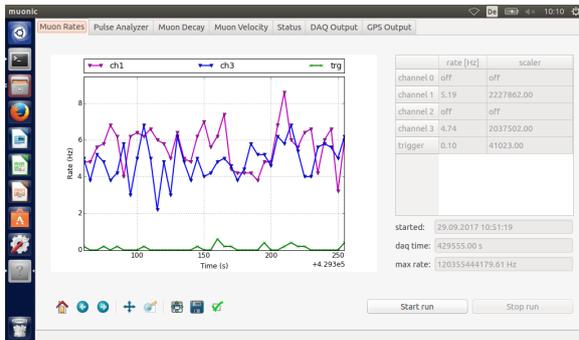


(e) PMT 2, 3

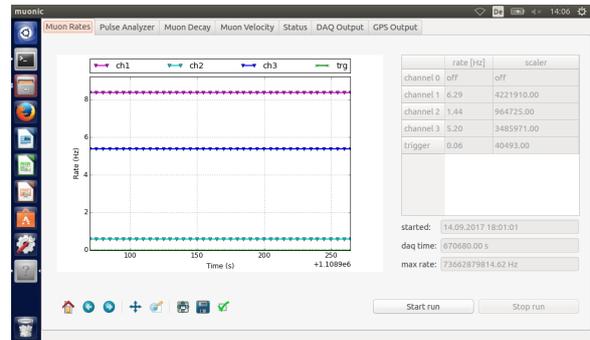


(f) PMT 3, 3

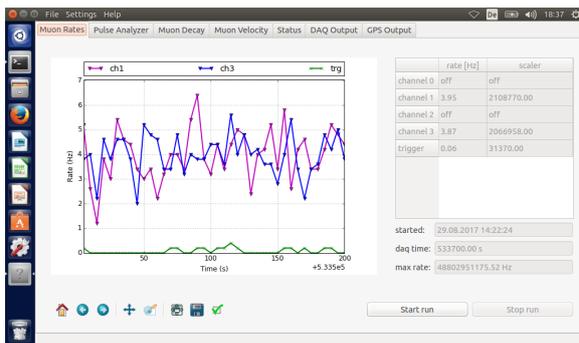
Abbildung 19: Effizienz Koinzidenz 2 (2); Effizienz Koinzidenz 3 (3), PMT 1 - 3



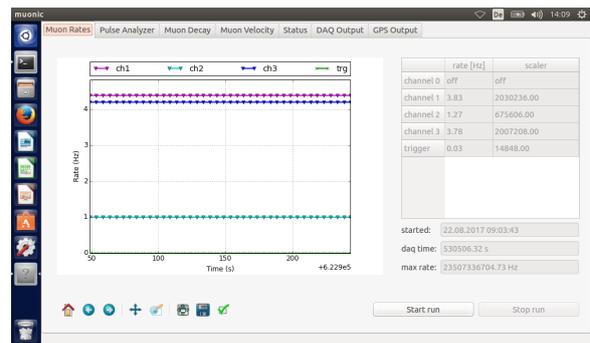
(a) PMT 1, Koinzidenz 2



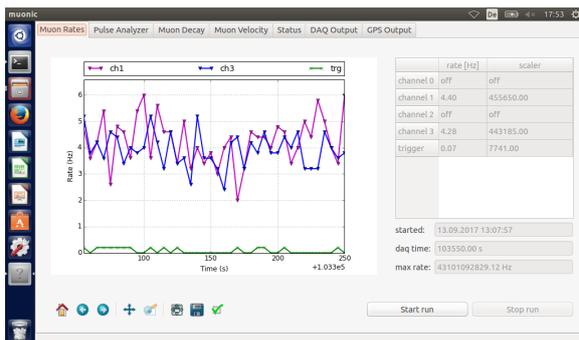
(b) PMT 1, Koinzidenz 3



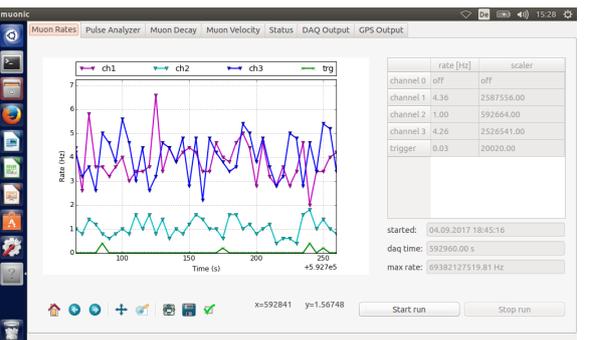
(c) PMT 2, Koinzidenz 2



(d) PMT 2, Koinzidenz 3



(e) PMT 3, Koinzidenz 2



(f) PMT 3, Koinzidenz 3

Abbildung 20: Muonic, PMT 1 - 3

6 Quellenverzeichnis

6.1 Internet-Quellen

- 1: <https://de.wikipedia.org/wiki/Elektronenemission>
- 2: <http://ekpwww.physik.uni-karlsruhe.de/gebauer/SlidesHS14/slidesFuhrer.pdf>
- 3: <https://www.univie.ac.at/mikroskopie/3fluoreszenz/clsm/2fpmt.htm>
- 4: <http://www.idn.uni-bremen.de/cvpm/content/elementarteilchenphysik/>
- 5: <http://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/myonen/308>
- 6: <https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/teilchenphysik/die-vier-fundamentalen-wechselwirkungen>
- 7: <http://www.physik.uni-bielefeld.de/yorks/pro13/poertner.pdf>
- 8: <http://www.physi.uni-heidelberg.de/menzemer/KeyexperimentsWS1415/Detektoren.pdf>
- 9: <http://kworkquark.desy.de/lexikon/lexikon.teilchendetektor/1/index.html>
- 10: <http://erlangen.physicsmasterclasses.org/expetek/expetek0.html>
- 11: <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/sl/0201111.htm>
- 12: <http://hacol13.physik.uni-freiburg.de/fp/Versuche/FP1/FP1-7-LangeHalbwertzeiten/StaatsexArbeitKapitel/PDFs/Kapitel33-Szintillationszaehler.pdf>
- 13: http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/gebhardt/gebhardt_files/skripten/KosStrahl.pdf
- 14: <https://web-docs.gsi.de/wolle/Schuelerlabor/TALKS/DETEKTOREN/VO-5-Szintillatoren.pdf>
- 15: <http://wwwa1.kph.uni-mainz.de/Vorlesungen/>
- 16: <https://web-docs.gsi.de/wolle/Schuelerlabor/TALKS/DETEKTOREN/VO-2-Wechselwirkungen.pdf>
- 17: <https://de.wikipedia.org/wiki/Myon>
- 18: http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/gebhardt/gebhardt_files/skripten/QuellenKS.pdf
- 19: <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/das-huygenssche-prinzip>
- 20: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/astro/kosmische-strahlung/entdeckung-der-kosmischen-strahlung/>
- 21: <https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/public/vfHess.pdf>

6.2 Buch-Quellen

I: Reaktortechnik: Physikalisch-technische Grundlagen

Albert Ziegler, Hans-Josef Allelein

Springer-Verlag, 2. Auflage, 2013

II: Teilchendetektoren: Grundlagen und Anwendungen

Hermann Kolanoski, Norbert Wermes

Springer-Verlag, 2016

III: Bachelorarbeit

Kalibration eines Photomultipliers für den Nachweis kosmischer Myonen mittels des Cherenkov-Effekts

Calibration of a photomultiplier tube for the detection of cosmic myons using the Cherenkov-Effect

angefertigt am II. Physikalisches Institut von Hans Weger aus Göttingen

6.3 Bild-Quellen

A: <http://michael.kraibacher.com/images/wissenschaft/StandardModelofElementaryParticles-de.svg.png>

B: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/6b/Cherenkov.svg/378px-Cherenkov.svg.png?w=240>

C: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=732808>

Hiermit bestätige ich, dass ich die vorliegende Arbeit verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen benutzt habe.

Henriette Pöttsch