

Myonen in der kosmischen Strahlung und ihr ortsabhängiger Nachweis

Besondere Lernleistung

im Fach Physik
am Gymnasium Dreikönigsschule

eingereicht von

Moritz Bilow

12b

DKS-Betreuer der Arbeit: Frau Skowronski
Externer Betreuer der Arbeit: Steffen Turkat

Dresden, den 20.12.2016

1	Einleitung	3
2	Grundlagen	4
2.1	Einführung zu kosmischer Strahlung	4
2.2	Myonen	5
2.3	Entdeckung der kosmischen Strahlung	5
2.4	Wechselwirkung von Myonen mit Materie	6
2.5	Das CosMO-Experiment	8
2.6	Weitere Nachweismöglichkeiten für kosmische Strahlung	10
3	Planung und Durchführung der Messungen	11
3.1	Einfallswinkel der Myonen	12
3.2	Kalibrierung	13
3.3	Messungen zur Temperaturabhängigkeit	13
4	Ergebnisse und Diskussion	14
4.1	Mögliche Einflussfaktoren auf die kosmische Strahlung	14
5	Aktuelle Forschung zur kosmischen Strahlung	15
5.1	Aktuelle Forschungsfragen	15
5.2	Großexperimente	16
6	Zusammenfassung	17
7	Quellen- und Literaturverzeichnis	18
Anhang		19
1	Abbildungen	19
2	Erklärung zur Besonderen Lernleistung	33

1 Einleitung

Meine Motivation, über dieses Thema zu schreiben, hat eine längere Vorgeschichte. Schon in der 10. Klassenstufe, als ich meine Komplexe Leistung schrieb, kam ich mit der Astroteilchenphysik in Berührung. Im Zusammenhang mit der Komplexen Leistung nahm ich im Oktober 2014 am International Cosmic Day¹ teil, einem weltweiten Projekt, bei dem Schüler Experimente zu kosmischer Strahlung durchführen und ihre Messergebnisse in einer Videokonferenz miteinander vergleichen. Der International Cosmic Day wird von DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron) in Zeuthen veranstaltet, und das Institut für Kern- und Teilchenphysik der TU Dresden nimmt daran teil. An diesem Tag lernte ich an der TU Dresden das CosMO-Experiment (CosMO: Cosmic Muon Observer) kennen und habe kosmische Strahlung mit einer selbstgebauten Nebelkammern sichtbar gemacht.

Durch diesen Tag inspiriert schrieb ich meine komplexe Leistung zum Thema „Kosmische Strahlung und ihr Nachweis in Nebelkammern“ im zehnten Schuljahr. Angelehnt an diese Arbeit entstand diese Besondere Lernleistung, bei der ich mich tiefergehend mit der Astroteilchenphysik beschäftigt habe und eigene Messungen mit dem CosMO-Experiment machen konnte. Mit dem CosMO-Experiment kann man eine Reihe von Forschungsfragen bearbeiten. Ich habe mich auf die folgende Fragestellung konzentriert: Wie ändert sich die Rate der Myonen (Bestandteil der kosmischen Strahlung) in den verschiedenen Stockwerken eines mehrstöckigen Gebäudes? Ursprünglich wollte ich diese Messungen im Haus B des Gymnasiums Dreikönigschule vornehmen. Es zeigte sich aber, dass das Gebäude aufgrund seines Satteldachs ungeeignet war. Diese Dachform erschwert die Berechnung des Einfallswinkels der Myonen. Deshalb habe ich meine Messungen an der TU Dresden im Andreas-Schubert-Bau durchgeführt. Dieses Gebäude hat insgesamt sechs Stockwerke und ein Flachdach. Außerdem hat der Andreas-Schubert-Bau sehr großflächige Etagen, so dass ich bei meinen Messungen einen großen Abstand zu den Wänden hatte. Dadurch konnte ich ausschließen, dass durch die Wand einfallende Myonen erfasst wurden und so meine Messung verfälscht worden wäre.

Um diese Untersuchungen anzufertigen, habe ich mich zunächst mit der Theorie beschäftigt und mich über Eigenschaften der kosmischen Strahlung informiert. Danach habe ich die Handhabung des CosMO-Experiments kennengelernt. Anschließend habe ich mein Messprogramm geplant und über einen Zeitraum von mehreren Wochen durchgeführt. Die folgenden Arbeitsschritte waren die Auswertung der Messergebnisse und die Anfertigung der Dokumentation.

¹ <https://icd.desy.de/>

2 Grundlagen

2.1 Einführung zu kosmischer Strahlung

Kosmische Strahlung (eng. Cosmic Ray) ist im gesamten Universum vorhanden und hochenergetisch. Ihre Bestandteile sind zu 2 % Elektronen und zu 98 % Atomkerne; davon sind wiederum 87 % Protonen, 12 % α -Teilchen, und 1 % schwere Kerne (Abb. 1). Die besonderen Eigenschaften von kosmischer Strahlung geben Forschern viele Rätsel auf. Warum ist die kosmische Strahlung so energiereich? Woher kommt sie? Wie entsteht sie?

Bisher vermuten Wissenschaftler mehrere Quellen für kosmische Strahlung, wie beispielsweise in Abb. 2 in einer künstlerischen Darstellung gezeigt wird. Dafür kommen aber nur solche astrophysikalischen Objekte in Frage, die die kosmische Strahlung mit genug Energie anreichern können. Das sind sowohl die Sonne der Erde, als auch möglicherweise andere Sternensysteme.

Mögliche Quellen außerhalb unseres Sonnensystems sind Supernovae, Schwarze Löcher und Doppelsternsysteme. Sie werden Punktquellen genannt, da sie eine nur geringe räumliche Ausdehnung besitzen. Als weitere Quelle können aktive galaktische Kerne aufgeführt werden, also die Mittelpunkte von Galaxien, die wahrscheinlich gigantische Schwarze Löcher sind.

Die Sonne als Quelle der kosmischen Strahlung (eng. Solaric Cosmic Ray) ist schon recht gut untersucht. Man weiß, dass die Strahlung aus zwei Vorgängen stammt: aus nuklearen Fusionsprozessen und aus Sonneneruptionen. Bei diesen Masseauswürfen innerhalb der Sonnenchromosphäre werden Teilchen freigesetzt, die als Sonnenwind zur Erde gelangen.

Die im Weltall vorhandene Strahlung wird als primäre kosmische Strahlung bezeichnet. Von dieser Strahlung treffen jede Sekunde etwa 1000 Teilchen pro Quadratmeter auf die Erdatmosphäre. Sobald ein Teilchen auf die Atmosphäre trifft, entsteht die sekundäre kosmische Strahlung, die schließlich auf der Erde gemessen werden kann. Diese sekundäre kosmische Strahlung (Abb. 3) entsteht dadurch, dass die Teilchen der primären kosmischen Strahlung auf Atome, also zum Beispiel Stickstoff- oder Sauerstoffatome, in der obersten Erdatmosphäre treffen. Ein Großteil der dabei entstandenen Teilchen zerfällt aufgrund seiner kurzen Lebensdauer in Sekundenbruchteilen oder kollidiert mit anderen Teilchen in der Atmosphäre.

Dadurch entstehen wieder neue Teilchen, sodass ein einziges primäres kosmisches Teilchen in einer Kaskade bis zu mehreren Milliarden niederenergetische Teilchen erzeugen kann (Abb. 4). Fast alle dieser niederenergetischen Teilchen zerfallen jedoch wieder sehr schnell,

sodass meist nur Myonen und Neutrinos die Erdoberfläche erreichen. Myonen haben eine vergleichsweise lange Lebensdauer von $\tau_{\mu}=2,2 \mu\text{s}$. Deshalb erreichen jede Sekunde etwa 100 Myonen pro Quadratmeter die Erdoberfläche auf Meeresebene. Neutrinos, die man auch Geisterteilchen nennt, zeigen so gut wie keine Wechselwirkung mit Materie.

Diese sekundäre kosmische Strahlung ist mit speziellen Detektoren messbar. Dazu zählen das unter anderem in dieser Arbeit verwendete CosMO-Experiment und die Nebelkammer (siehe Kapitel 2.4 und 2.6).

2.2 Myonen

Das Myon ist ein Elementarteilchen. Alle bekannten Elementarteilchen werden eingeteilt in Materieteilchen und in Botenteilchen. Das Myon gehört zu den Materieteilchen. Es ist der „schwere Bruder“ des Elektrons, denn es hat bis auf die Masse dieselben Eigenschaften wie dieses. Es besitzt im Vergleich zum Elektron eine 207-mal so große Masse und gehört zusammen mit dem Elektron und dem Tauon zur Teilchenklasse der Leptonen.

Das Myon wurde 1936 mit Hilfe einer Nebelkammer von dem Physiker Isidor Isaac Rabi entdeckt. Die Entdeckung war für ihn so überraschend, dass er den berühmten Ausspruch tat: „Who ordered that? (Wer hat das bestellt?).“

Myonen entstehen in einer Höhe von 10-15 Kilometern über dem Meeresspiegel aufgrund von Spaltungen kosmischer Strahlung mit Atomen in der Erdatmosphäre. Während das direkte Produkt dieser Spaltungen sogenannte Pionen sind, zerfallen diese innerhalb kürzester Zeit in Myonen, die somit insgesamt ca. 80% der geladenen Komponente sekundärer Strahlung auf Meereshöhe ausmachen.

2.3 Entdeckung der kosmischen Strahlung

Nachdem Henri Becquerel im Jahre 1896 Radioaktivität entdeckt hatte, beschäftigten sich viele Forscher der Welt mit radioaktiver Strahlung. Sie fanden heraus, dass fast jedes Gestein radioaktive Isotope enthält. Da auch ohne radioaktive Präparate Strahlung messbar war, nahmen die Wissenschaftler an, dass diese Strahlung aus der Erde kommt. Diese Annahme wurde von dem Forscher Viktor Franz Hess (Abb. 5) widerlegt. Er führte Experimente in großer Höhe durch, indem er Ballonfahrten unternahm. Dabei stellte er fest, dass eine Luftschicht von mehreren hundert Metern radioaktive Strahlung des Gesteins fast vollständig absorbiert und sie in dieser Flughöhe nicht mehr nachweisbar ist. Allerdings konnte er trotzdem Strahlung messen, und zwar desto mehr, je höher er stieg.

Seine Ballonfahrten (Abb. 6) unternahm Hess in den Jahren 1911 und 1912. Er experimentierte tagsüber, nachts und sogar während einer Sonnenfinsternis, um den Einfluss der Sonne zu erkunden. Für seine Messungen verwendete er ein Zweifadenelektrometer. Dieses Gerät wurde von Theodor Wulf erfunden. Es besteht aus zwei dünnen Drähten, die in der Mitte eines Metallgehäuses gespannt werden. Vor dem Messvorgang wird eine Spannung angelegt. Die Drähte sind beide negativ elektrisch geladen und stoßen sich daher ab. Durch ihre negative Ladung ziehen die Drähte positive Ionen aus der Umgebung an. Dies führt dazu, dass sich sowohl die Ladung der Drähte verringert, als auch der Abstand der Drähte zueinander. Dieser Abstand kann mithilfe eines Mikroskops bestimmt werden, das in das Gehäuse eingelassen ist. Je größer der Fluss positiv geladener Teilchen ist, desto weniger Abstand haben die Drähte zueinander.

Bei seiner dritten Fahrt am 6. August 1912 entdeckte Hess, dass die Strahlung bis zu einer Höhe von 1000 Metern über dem Erdboden absank, in größere Höhen aber wieder schnell anstieg. Dies bestätigte Hess' Theorie, dass diese Strahlung von „oben“ in die Atmosphäre eindringt und dass somit zwei Quellen von Strahlung existierten: die Erde und der Weltraum. Hess konnte während des Fluges auch einen Teilchenschauer nachweisen. 1936 erhielt Hess für seine Forschung den Physik-Nobelpreis.

2.4 Wechselwirkung von Myonen mit Materie

Da sich der Hauptteil dieser Arbeit mit der Rate kosmischer Myonen auf verschiedenen Etagen eines Gebäudes beschäftigt, wird im Weiteren genauer darauf eingegangen, warum auf unteren Etagen überhaupt eine niedrigere Myonenrate erwartet wird und wie Myonen mit Materie wechselwirken.

Hochenergetische Teilchen wechselwirken beim Durchqueren von Materie auf verschiedenste Weise, je nach Art und Energie der Teilchen und den Eigenschaften des Materials. Dabei verlieren sie an Energie. Wenn man den vollständigen Energieübertrag geladener Teilchen in Materie betrachten möchte, so muss man folgende Effekte berücksichtigen:

- Ionisation der Atome
- Anregung der Atome
- Bremsstrahlung
- Cherenkov-Strahlung
- Übergangsstrahlung

In bestimmten Energiebereichen dominieren einige Effekte und andere können vernachlässigt werden. Übergangsstrahlung entsteht beim Passieren von Grenzschichten von Materialien mit verschiedenen Dielektrizitätskonstanten. Die sogenannte Cherenkov-Strahlung wird von Teilchen emittiert, die sich schneller als mit der Lichtgeschwindigkeit in dem jeweiligen Medium bewegen. Beide sind im Vergleich zu anderen Effekten vernachlässigbar und werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Der Energieverlust schwerer, elektrisch geladener Teilchen wie beispielsweise Myonen beruht im MeV- und GeV-Bereich im Wesentlichen auf Ionisation und Anregung der Atome, was durch die sogenannte Bethe-Bloch-Formel

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi \cdot r_e^2 \cdot N_0 \cdot m_e c^2 \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{1}{\beta^2} \cdot z^2 \cdot \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1-\beta^2)} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

beschrieben werden kann und in Abb. 7 am Beispiel Kupfer gezeigt ist. Der generelle Verlauf ist weitgehend unabhängig vom Material, sodass die qualitative Beschreibung für Kupfer und Beton die gleiche ist. Diese Gleichung an sich beschreibt den mittleren Energieverlust pro Weglänge durch inelastische Stöße mit Elektronen der Atomhüllen.

In erster Näherung beschreibt die Bethe-Bloch-Formel den Energieverlust kosmischer Myonen sehr präzise, da diese eine mittlere Energie von ca. 4 GeV auf Meeresbodenhöhe haben. Sie ist einerseits von der Kernladungszahl Z , der Massenzahl A und dem Ionisations-Potenzial I (näherungsweise proportional zu Z) des Materials und andererseits von der Geschwindigkeit β (Verhältnis der Geschwindigkeit zur Lichtgeschwindigkeit) und der Ladung z des Teilchens abhängig. Weiterhin fließen Konstanten wie der klassische Elektronenradius r_e , die Elektronenmasse m_e und die Avogadrokonstante N_0 in die Formel ein. Der δ -Term berücksichtigt eine Dichtekorrektur des Materials aufgrund seiner Polarisation und ist in Abb. 7 für die gestrichelte Kurve vernachlässigt worden und in der gestrichelt-gepunkteten Kurve mit einbezogen. Wie in Abb. 7 zu sehen ist, ist die Bethe-Bloch-Formel für höhere Energien (> 30 GeV) für Myonen nicht mehr anwendbar. Andere Effekte aus der vorhin genannten Aufzählung beginnen dort zu dominieren.

Bremsstrahlung spielt im MeV- und GeV-Bereich nur bei Elektronen und Positronen aufgrund ihrer kleinen Masse eine Rolle. Sie kommt zustande, wenn geladene Teilchen in einem äußeren elektrischen Feld abgelenkt werden. Myonen haben eine Masse, die ungefähr 2.000 mal größer ist als die der Elektronen. Da der Energieübertrag durch Bremsstrahlung umgekehrt proportional zum Quadrat der Massen ist, ist er bei Myonen 40.000 geringer als bei Elektronen und für Energien unter $E = 30$ GeV vernachlässigbar. Oberhalb dieser Energie beginnen dann Effekte wie inelastische Wechselwirkungen mit Kernen, direkte

Paarbildung und Bremsstrahlung zu dominieren, was in Abb. 8 für Eisen gezeigt ist, aber für diese Arbeit aufgrund der wesentlich niedriger liegenden mittleren Energie kosmischer Myonen ebenfalls vernachlässigbar ist.

Kosmische Myonen verlieren ungefähr 2 GeV aufgrund der Ionisationseffekte, bevor sie die Erdoberfläche erreichen. Der gesamte Myonenfluss, der auf Meeressniveau messbar ist, kann also als Überlagerung des Spektrums nach der Entstehung in 10 km Höhe, der Ionisationsverluste in der Atmosphäre auf dem Weg zur Erde und der Verluste durch Zerfall von Myonen beschrieben werden. Ein 2,4 GeV Myon hat beispielsweise eine mittlere Zerfallslänge von ca. 15 km, die allerdings durch Einbeziehung von Energieverlusten auf 8,7 km verringert wird.

In dieser Arbeit wird die Myonenrate auf verschiedenen Gebäudeetagen untersucht. Vergleicht man den Energieverlust von Myonen in Luft und in Beton, so ist der Verlust in Luft im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigbar gegenüber dem Verlust in Beton. Es wird daher davon ausgegangen, dass ein niedrigerer Fluss auf den vollständigen Energieverlust (Absorption) eines Teils der Myonen im Beton zurückgeführt werden kann. Die Luft dazwischen wird vernachlässigt.

2.5 Das CosMO-Experiment

Es gibt viele Möglichkeiten, kosmische Strahlung nachzuweisen bzw. sie sichtbar zu machen. Der für diese BeLL verwendete Versuchsaufbau heißt CosMO (Cosmic Muon Observer)-Experiment (Abb. 9). Er ist dazu bestimmt, durch die Messgeräte fliegende Myonen zu erfassen. Die Technische Universität Dresden und das Netzwerk Teilchenwelt stellten mir das CosMO-Experiment für meine Untersuchungen zur Verfügung.

Der Versuchsaufbau besteht insgesamt aus drei verschiedenen Komponenten: den Detektoren, der Datenauslekarte (DAQ-Karte, von eng. data acquisition: Datenerfassung) und dem Computer. Der Hauptbestandteil des Detektors ist eine Plastikszintillatorplatte. Diese erfasst die hindurch fliegenden Teilchen und leitet ein Signal an den Photomultiplier weiter, der dieses in ein messbares elektronisches Signal verstärkt und an die DAQ-Karte schickt. Diese verarbeitet den elektronischen Impuls und leitet ihn als Trigger an den Laptop/PC weiter. Im Weiteren werden die Komponenten noch mal detaillierter beschrieben.

Abb. 10 zeigt den Blick in einen Detektor. Normalerweise ist der Detektor in einem geschlossenen Aluminiumgehäuse, für das Foto wurde die Box geöffnet. In die Metallbox ist ein sogenannter Szintillator eingebettet. Szintillation kommt aus dem Lateinischen (scintillare), was so viel bedeutet wie funkeln oder flackern. Szintillatoren sind Körper, deren

Atome durch energiereiche Photonen oder geladene Teilchen angeregt werden und diese Anregungsenergie in Form von Licht abgeben. Szintillatoren werden vor allem zur Messung der Energie ionisierender Strahlung genutzt.

Man unterscheidet zwischen anorganischen und organischen Szintillatoren. Der Unterschied besteht vor allem in den Mechanismen, mit denen die Photonen emittiert werden. Anorganische Szintillatoren sind Kristalle, in denen durch ionisierende Strahlung Elektronen erzeugt werden, die wiederum die Aktivatorzentren anregen. Um in den Grundzustand zurückzukehren, geben die Aktivatorzentren Photonen ab. Bei der Relaxation der Atome in ihren Grundzustand werden Photonen emittiert.

In organischen Szintillatoren werden Moleküle angeregt, die beim Zerfall UV-Strahlung abgeben. Dieses Licht hat in organischen Szintillatoren aber nur eine sehr geringe Reichweite, weshalb meist ein Fluoreszenzstoff hinzugefügt wird, der das Licht verstärkt. Gemessen wird das UV-Licht dann mithilfe von Photomultipliern.

Jedes Myon, das den Szintillator durchquert, löst einen Lichtblitz aus, der erfasst und in elektronische Signale umgewandelt wird. Elektronen oder Protonen werden durch die Metallbox, die den Detektor umgibt, großteils abgeschirmt. Bei dem CosMO-Experiment werden in der Regel drei Szintillatorplatten verwendet und in Koinzidenz gemessen. Dadurch ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Elektron oder ein Proton gemessen wird, extrem unwahrscheinlich.

Wie zuvor beschrieben, messen die Photomultiplier (Abb. 11), zu Deutsch Photoelektronenvervielfacher, die Lichtsignale aus der Szintillatorplatte, wandeln diese in elektronische Signale um und verstärken diese zusätzlich. Dabei treffen Photonen aus dem Lichtleiter auf eine Photokathode, aus der, durch das Auftreffen verursacht, Elektronen „herausgeschlagen“ werden. Diese werden aufgrund der anliegenden Hochspannung von der Kathode abgestoßen, treffen auf Parallelelektroden, genannt „Dynodenstruktur“, und schlagen weitere Elektronen heraus. Dieser Vorgang wiederholt sich, bis eine gewünschte Anzahl an Elektronen herausgeschlagen wurde, die sich mithilfe der DAQ-Karte verarbeiten lassen.

Die DAQ-Karte (Abb. 12) verarbeitet Daten, die über einen oder mehrere Kanäle (Channels) gesendet werden. Diese sind analog und werden zu einem digitalen Signal verarbeitet. Die DAQ-Karte führt keine eigentlichen Messungen durch, diese Rolle übernimmt der angeschlossene Computer/Laptop und dort eine installierte Software (in meinem Fall Muonic). Die DAQ-Karte ist also die Verbindung zwischen Detektoren und Computer. In meinen Messungen war der sogenannte Trigger (Auslöser) wichtig, der je nach Kalibrierung

auslöst. Mittels seiner Hilfe kann man einstellen, was zum Beispiel die Mindestenergie eines elektrischen Impulses sein soll, um an den Computer als digitales Signal weitergeleitet zu werden. Diese Einstellung kann in der Software Muonic über sogenannte Thresholds (eng. Schwellspannungen) vorgenommen werden und ist wichtig, um elektronisches Rauschen und Hintergrundstrahlung auszublenden.

Das Programm Muonic ist eine von DESY entwickelte Software für Schüler, die die Signale von der DAQ-Karte verarbeitet und sowohl grafisch als auch tabellarisch darstellt (siehe Abb. 13). Muonic ist eigens auf die (auch von DESY gebauten) Detektoren abgestimmt und vereinfacht die Auswertung von Versuchen und Kalibrierung der DAQ-Karte sehr.

2.6 Weitere Nachweismöglichkeiten für kosmische Strahlung

Eine der einfachsten, auch im Schulunterricht anwendbaren Möglichkeiten, um kosmische Strahlung zu detektieren, ist die Nebelkammer. Es gibt käufliche Exemplare, die zum Beispiel in manchen Museen stehen. Sie sind allerdings sehr teuer in der Anschaffung. Man kann aber auch eine Nebelkammer selber bauen, sie wird mit Trockeneis gekühlt und ist folgendermaßen aufgebaut:

In eine Kiste mit niedrigem Rand wird Trockeneis gefüllt. Trockeneis ist festes Kohlenstoffdioxid. Es sollte möglichst den gesamten Boden bedecken, damit die Temperatur innerhalb der Kammer sinkt. Auf das Trockeneis legt man eine schwarze Metallplatte. Auf die Metallplatte wird eine durchsichtige Glas- oder Plastikkiste gestülpt, an deren Unterseite mithilfe von Magneten eine Filzmatte befestigt. Diese wird vorher mit Alkohol getränkt.

Nach Abschluss des Aufbaus verdunkelt man den Raum. Da der Alkohol im Filz verdunstet, wird die Luft in der Kammer nun mit Alkoholdampf gesättigt. Der Nebel, dem der Versuchsaufbau seinen Namen verdankt, entsteht. Das Trockeneis kühlt die Kammer herunter, sodass der Alkoholdampf eigentlich kondensieren müsste, da Luft mit niedriger Temperatur weniger Alkoholdampf aufnehmen kann als warme Luft. Es fehlt aber an Staubpartikeln bzw. Ionen, sogenannten Kondensationskeimen, damit das passiert. Oberhalb der Metallplatte bildet sich daher eine übersättigte Luftschicht.

Nun leuchtet man mit einer Taschenlampe oder einer anderen starken Lichtquelle in die Kammer. Geladene Teilchen ionisieren Atome entlang ihrer Flugbahn. Diese Ionen dienen nun in der gesättigten Schicht als Kondensationskeime. Es bilden sich Alkoholtröpfchen entlang der Flugbahn. Die kleinen aufleuchtenden Spuren in der Kammer zeigen daher an, dass geladene Teilchen den Nebel durchquert haben.

Es gibt drei Arten von Spuren: Lange gerade Spuren deuten auf hochenergetische Teilchen hin. Dabei sind dünne Spuren ein Zeichen für Myonen, Antimyonen, Elektronen oder Positronen, da diese wesentlich leichter sind und entlang ihrer Flugbahn weniger Ionen erzeugen können. Dicke kurze Spuren deuten auf α -Teilchen, die von radioaktivem Radongas aus der Luft emittiert werden.

3 Planung und Durchführung der Messungen

Die Messungen für diese BeLL fanden alle im Andreas-Schubert-Bau (Abb. 14) auf dem Gelände der TU Dresden statt. Das Gebäude bietet sowohl den Vorteil eines Flachdaches (was die Berechnung einfacher macht), als auch eines großflächiges Treppenhauses/Foyers. Da Wände den Myonenfluss ebenfalls beeinflussen, sind großflächige Räume elementar, um signifikante Aussagen zu der Abschirmung konkreter Betondicken treffen zu können.

Der Andreas-Schubert-Bau hat insgesamt sechs Stockwerke, die auf oder über dem Erdboden liegen. In jedem dieser Stockwerke mit Ausnahme des Erdgeschosses habe ich Messreihen zur Myonenrate durchgeführt. Dabei wurde auf jeder Etage nach Möglichkeit der gleiche Standort gewählt und darauf geachtet, dass dieser einen möglichst großen Abstand zu allen umliegenden Wänden hat.

An dem Messort wurde ein Holzregal mit 5 Böden aufgestellt. Auf die obersten drei Böden wurde jeweils ein Detektor gestellt, wobei die Detektoren so ausgerichtet wurden, dass sie exakt übereinander und waagrecht stehen (Abb. 15 bis Abb. 20). So wird mit einer sogenannten Dreifach-Koinzidenz gemessen: Nur wenn ein Teilchen in einem Zeitraum von 100 ns nacheinander durch alle drei Detektoren fliegt, wird es als Myon registriert.

Die Messreihe wurde im 5. Stock im Flur in der Mitte des Gebäudes begonnen und dort so lange gemessen, bis das CosMO-Experiment mindestens 1000 Myonen registriert hatte. Der Zeitraum für diese Messung betrug etwa eine Stunde. Diese Messung wurde an einem anderen Tag wiederholt. Anschließend habe ich mit meinem Betreuer die Detektoren im 4. Stock exakt unter der ursprünglichen Position aufgebaut und die Messung weiter durchgeführt. Dort hat es bereits 1,5 Stunden gedauert, bis 1000 Myonen im Detektor registriert waren. Auch diese Messung habe ich zweimal durchgeführt. So habe ich weitere Messungen durchgeführt bis in den ersten Stock. Im Erdgeschoss wurden keine Messungen durchgeführt, da dort die Myonenrate so gering ist, dass eine Messung viele Stunden dauern würde, in der der Detektor unbeaufsichtigt sein würde, so dass die Messwerte unter Umständen nicht verlässlich sind oder sogar Teile des Experiments abhandenkommen könnten.

Außerdem erfolgte eine Bestimmung der Abmessungen im Andreas-Schubert-Bau; hier wurden Deckenhöhen und Deckendicken mit einem Maßband vermessen.

3.1 Einfallswinkel der Myonen

Myonen fallen zu einem großen Teil aus vertikaler Richtung $\alpha = 0^\circ$ auf die Erdoberfläche ein. Es gibt aber auch welche, die eine horizontale Einfallrichtung $\alpha = 90^\circ$ haben. Diese quasi durch die Wand eintreffenden Myonen möchte ich in meiner Messung ausschließen. Deshalb habe ich vor der Planung meiner Messreihe folgendes berechnet: Die drei übereinander angeordneten Detektoren bilden zusammen einen limitierenden Öffnungswinkel für Myonen. Dieser Winkel vergrößert bzw. verkleinert sich mit dem Abstand der Platten zueinander. Der Abstand der Platten muss so bemessen sein, dass keine Wandmyonen innerhalb des Öffnungswinkels sind.

In Abb. 20 ist zu sehen, wie die Berechnung angesetzt ist (hier exemplarisch am Beispiel des 2. OG illustriert). Es gilt die Formel

$$\frac{b}{h} = \frac{B}{H}$$

mit

B: Abstand von der Mitte des Szintillators bis zur Wand

H: Höhe des Gebäudes, gemessen ab der Etage, auf der man misst

h: halbe Höhe des Versuchsaufbaus (Abstand zwischen Platte 1 und 3)

b: halbe Breite des Versuchsaufbaus.

Für eine Messung im ersten Stockwerk sind folgende Werte einzusetzen:

$$b = 10 \text{ cm}$$

$$h = 38,25 \text{ cm}$$

$$H = 19,84 \text{ m}$$

$$\text{Somit ergibt sich } B = \frac{19,84 \text{ m} \times 0,10 \text{ m}}{0,3825 \text{ m}} = 5,19 \text{ m}$$

Im ersten Stockwerk müsste also der Detektor mindestens 5,19 Meter Abstand zur Wand haben. Das Foyer ist allerdings etwas kleiner. Deshalb beträgt der Abstand der Szintillatoren bis zur Wand nur 4,10 m. Somit werden bei der Messung im 1. Stockwerk theoretisch nicht nur vertikal auftreffende Myonen gemessen, sondern auch durch Seitenwände einfallende Myonen.

Allerdings gelangen diese vertikal einfallenden Myonen ausschließlich im 5. Stockwerk durch die Wand. Und hier erfüllt die Außenwand dieselbe Funktion wie das Dach: Sie schirmt die Myonen ab. Myonen, die mit dem CosMO-Experiment im 1. Stock registriert werden, haben auf jeden Fall fünf Barrieren durchquert, entweder fünf Geschossdecken oder vier Decken und eine Außenwand. Myonen, die unterhalb des 5. OG durch die Wand eintreffen, werden von den Detektoren nicht mehr erfasst. Auf allen anderen Etagen hat der Detektor so viel Abstand zu den Wänden, dass ausschließlich Myonen erfasst werden, die durch das Dach in das Gebäude eintreten.

3.2 Kalibrierung

Für die Messungen standen zwei Dreier-Plattensets zur Verfügung; ein altes und ein neues Set. Um herauszufinden, welches Plattenset für meine Untersuchungen besser geeignet ist, musste ich eine Langzeitmessung vornehmen, die über 100 Stunden lief. In Abb. 21 ist das Ergebnis zu sehen. Die Raten der neuen Platten, blau dargestellt, verlaufen in einem Rahmen von 10 bis 15. Zwei der alten Platten (rot dargestellt) aber sind fehlerhaft, und es kommt zu sogenannten Pikes. Pikes sind extreme Abweichungen vom erwartbaren Normalwert. Dieser liegt bei 13. Ein paar der Messwerte der alten Platten steigen aber bis zu 55 an. Aus diesem Experiment war ersichtlich, dass das alte Plattenset vollkommen ungeeignet für die Messungen war.

Bei der Kalibrierung der Detektoren muss die sogenannte Schwellspannung (engl.: Threshold) eingestellt werden. Das ist der Wert, den ein Teilchen, das durch den Szintillator fliegt mindestens abgeben muss, um erfasst zu werden. Ist der Wert zu niedrig eingestellt, werden viele Störsignale erhalten. Liegt der Wert zu hoch, werden einige Myonen nicht mehr detektiert. Aus Vorversuchen, die mein Betreuer durchgeführt hatte, ist für das verwendete Plattenset eine Schwellspannung von 200/200/230 mV (für die drei Detektoren von oben nach unten) als geeignet bekannt. Entsprechend wurden die Werte eingestellt.

3.3 Messungen zur Temperaturabhängigkeit

Wie in Abbildung (Abb. 21) zu sehen ist, unterliegt die gemessene Rate einer zeitlichen Schwankung. Zu klären ist im Folgenden, ob die Effizienz der Platten temperaturabhängig ist, oder, ob sich der Myonenfluss selbst tageszeitbedingt verändert.

Die gemessenen Myonen sind hochenergetisch und stammen von Quellen ausserhalb unseres Sonnensystems. Myonen, die durch Teilchen aus der Sonne produziert werden,

sind niederenergetisch und können in den Messungen vernachlässigt werden. Da der Fluss kosmischer Teilchen außerhalb des Sonensystems nicht tag-nachtabhängig sein kann, muss die Schwankung in Abbildung (Abb. 21) anders erklärt werden, als von einer Tag/Nachtabhängigkeit. Mögliche Erklärungen sind eine temperaturabhängige Effizienz der Platte oder eine, durch Wetter bedingte Schwankung des Myonenflusses. Um dies genauer zu untersuchen, wurde an einem wolkenklaren Tag die Myonenrate zusammen mit der Temperatur gemessen.

Aus der Messkurve in Abb. 22 wird sichtbar, dass, sobald die Temperatur sinkt, die Myonenrate ansteigt. Bei ansteigender Temperatur fällt die Myonenrate dagegen wieder ab. Die CosMO-Platten haben also eine Effizienz, die gering temperaturabhängig ist.

4 Ergebnisse und Diskussion

Die Messergebnisse meiner Untersuchung werden in

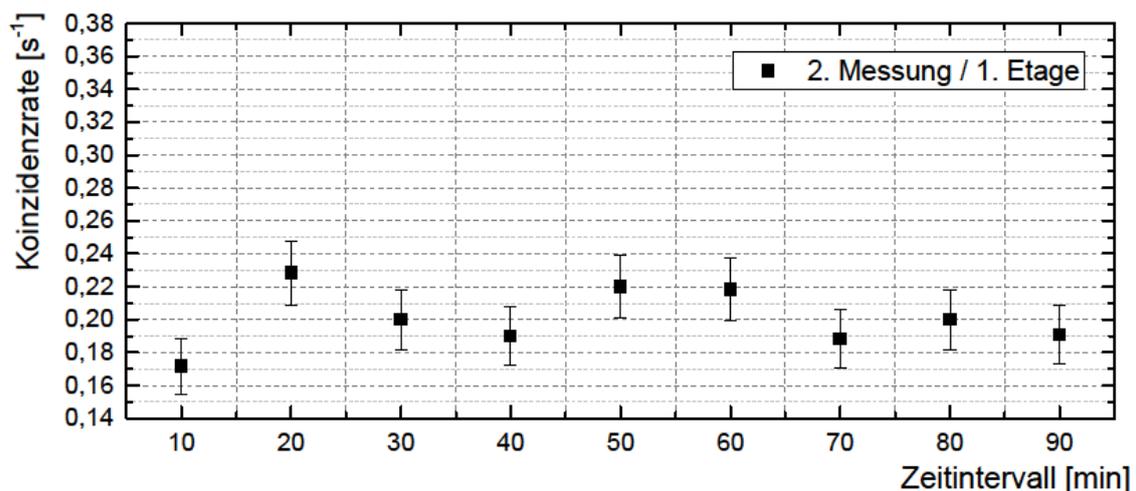


Abb. 323 bis Abb. 32 gezeigt. In jedem Histogramm ist die gemessene Koinzidenzrate aufgetragen über der Messzeit. Die Werte sind gemittelt, über einen Zeitraum von 10 min aufgetragen. Zusätzlich sind Fehlerbalken eingezeichnet, die den sogenannten 1σ -Bereich um den Messwert angeben. In jeder Etage des Gebäudes wurde die Myonenrate an zwei verschiedenen Tagen gemessen, um genügend Messwerte für eine verlässliche Statistik zu erhalten.

Aus den Histogrammen der verschiedenen Stockwerke ist ersichtlich, dass die mittlere Myonenrate immer weiter abnimmt, je tiefer das Stockwerk liegt. Dies erklärt sich aus der Abschirmung durch das Decken- und Wandmaterial Beton gemäß der Bethe-Bloch-Formel.

Abb. 33 zeigt den Myonenfluss in Abhängigkeit von der Deckendicke. Diese hängt vom gewählten Stockwerk im Andreas-Schubert-Bau ab; jede Decke ist 0,59 m dick. Für jede Etage sind die Werte der beiden Messungen aufgetragen, die mit einem Fit errechnet wurden. Zusätzlich wurde ein Mittelwert für jede Etage berechnet. Anhand dieser Punkte lässt sich ein Fit bestimmen, wie es in der Abbildung auch zu sehen ist.

Aus der Abbildung wird deutlich, dass sich die Myonenraten von Stockwerk zu Stockwerk in etwa halbieren. Die Kurve folgt somit einem exponentiellen Verlauf, wie er beispielsweise auch für radioaktive Zerfälle charakteristisch ist.

4.1 Mögliche Einflussfaktoren auf die kosmische Strahlung

Die Temperatur könnte einen störenden Einfluss auf meine Messungen haben. Weil jedoch die Messungen ausschließlich im Winter stattfanden, ist auszuschließen, dass die Temperatur sich innerhalb des Gebäudes stark geändert hat. Denn das Treppenhaus, an welches sich die breiten Foyers, in denen gemessen wurde, anschließen, wird im Winter gleichmäßig geheizt. Eine starke Temperaturänderung ist demnach auszuschließen. Was durch die Konstanz der Raten über die Zeit bestätigt wurde. Im Sommer kommt es hingegen nach Auskunft der Mitarbeiter an Tagen mit starker Sonneneinstrahlung zu erhöhten und gegenüber der Nacht schwankenden Temperaturen im Gebäude, wie auch die 22 Stunden Messung gezeigt hat. Die Messungen für diese BeLL sind innerhalb vergleichsweise kurzer Zeiträume entstanden. Die Dauer einer einzelnen Messung betrug niemals mehr als 2,5 Stunden. Somit sind signifikante temperaturbedingte Schwankungen der Messwerte ausgeschlossen.

In einem anderen Experiment („Observation of muon intensity variations by season with the MINOS far detector“) wurde ebenfalls die Temperaturabhängigkeit der gemessenen Myonenrate in einer Langzeitmessung untersucht. Dabei entstand das Diagramm in Abb. 34, in der die relative Myonenrate in Abhängigkeit zur Jahreszeit über einen Fünf-jahres-Zeitraum aufgetragen worden ist. Wie man in der Abbildung erkennen kann, ist die relative Rate im Sommer ca. 6% höher als im Winter. Da die Messungen innerhalb eines Monats durchgeführt wurde kann der Myonenfluss im Rahmen dieser Arbeit als konstant betrachtet werden. Außerdem habe ich die Diagramme bis

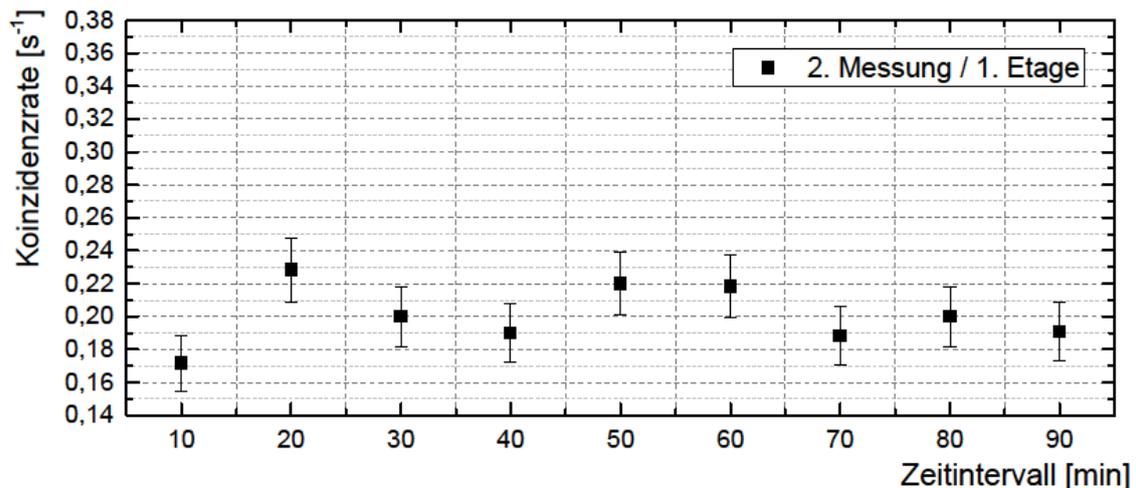


Abb. 32 in Bezug auf eine mögliche Temperaturabhängigkeit ausgewertet. Legt man einen Fit durch den Mittelwert aller Punkte in einem jeden Diagramm, so ergibt sich eine Gerade, die parallel zur x-Achse ist. Wenn nur vier Punkte mit ihren Fehlerbalken nicht auf dieser Linie liegen, dann ist das Ergebnis temperaturunabhängig.

5 Aktuelle Forschung zur kosmischen Strahlung

5.1 Aktuelle Forschungsfragen

In den vergangenen Jahrzehnten ist die Forschung in der Astroteilchenphysik weit vorangeschritten. Dennoch gibt es noch mehrere offene Fragen:

Wie entstand das Universum? Warum besteht es nicht zu gleichen Teilen aus Materie und Antimaterie, sondern nur aus Materie? Woraus besteht Dunkle Materie? Was haben Neutrinos mit der Entwicklung des Universums zu tun? Wie können uns Neutrinos bei den Forschungen über das Sonneninnere und über Sternexplosionen helfen? Was ist der Ursprung der kosmischen Strahlung?

Um diese Fragen beantworten zu können, wird an vielen Experimenten geforscht. Davon werden im folgenden Kapitel einige exemplarisch vorgestellt.

5.2 Großexperimente

Auf der gesamten Welt gibt es Versuchsaufbauten, die sich der Erforschung kosmischer Strahlung widmen. Ihnen allen ist gemeinsam, dass sie sehr groß und damit sehr empfindlich sind, und dass sie von großen internationalen Forschergruppen aufgebaut und betrieben werden.

Ein Beispiel ist das Pierre-Auger-Observatorium: Hier sollen Schauer von besonders energiereichen Teilchen rekonstruiert und erforscht werden. Dazu stehen auf einer argentinischen Hochebene (1400 m über dem Meeresspiegel) auf einer Fläche von ca. 3000 Quadratkilometern insgesamt 1600 Wassertanks (Abb. 35), die als Detektoren für kosmische Strahlung fungieren. Jeder dieser Wasser-Cherenkov-Detektoren ist knapp 2 Meter hoch und hat einen Durchmesser von 3,5 Metern (Abb. 36). Die Detektoren haben jeweils einen Abstand von 1,5 Kilometern untereinander, sie sind durch Solarpaneele energieautark und messen geladene Teilchen auf folgende Weise: Wenn ein Teilchen schneller als mit Lichtgeschwindigkeit in dem Medium durch das hochreine Wasser in den Wasser-Cherenkov-Detektoren fliegt, dann wird Strahlung in Form von Cherenkov-Licht emittiert. Dieses Licht wird von den Detektoren erfasst und an die Kontrollstation weitergeleitet. Fluoreszenz-Teleskope, von denen vier das Messgelände eingrenzen, können zusätzlich in mondlosen Nächten eingesetzt werden, um Teilchenschauer zu erfassen.

Aufgrund der Lage des Experiments in der argentinischen Pampa befinden sich keine Lichtquellen in der Nähe, die die Messergebnisse verfälschen könnten. Weil die Hochebene flach ist, gibt es keine Abschirmung der Teilchenschauer durch Berge oder Hügel.

Würde das Messfeld in Sachsen mit Dresden als Mittelpunkt aufgebaut werden, würde es in etwa eine Fläche bedecken, die von den tschechischen bis zur brandenburgischen Grenze und von Freiberg bis kurz vor Bautzen reicht (Abb. 37).

Ein weiteres Experiment ist H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System) in Namibia. Auf einer großen Fläche stehen fünf riesige Teleskope (Abb. 38), welche nach Quellen kosmischer Gamma-Strahlung suchen. Die Teleskope erlauben es, die Strahlung auf einer extrem großen Sensitivitätsstufe wahrzunehmen und zu erforschen. Vier Teleskope wurden von 2002 bis 2004 in Betrieb genommen, seit 2012 misst H.E.S.S. II mit einer noch größeren Intensivität.

6 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Besonderen Lernleistung war es, zu untersuchen, wie sich die Rate der Myonen in den verschiedenen Stockwerken eines mehrstöckigen Gebäudes ändert.

Myonen sind ein Bestandteil der sekundären kosmischen Strahlung und können auf der Erdoberfläche nachgewiesen werden. Dazu kann man beispielsweise das CosMO-Experiment verwenden, bei dem die Myonen mit drei übereinander angeordneten Szintillationsdetektoren registriert werden.

Gemäß der Bethe-Bloch-Formel ist zu erwarten, dass die Myonen an Energie verlieren, wenn sie ein Material wie Beton durchdringen. Dieser Energieverlust kommt durch verschiedene Prozesse zustande, von denen Ionisation und Anregung von Atomen am wichtigsten sind. Es ist daher davon auszugehen, dass der Myonenfluss auf jeder Etage des Gebäudes (von oben nach unten) geringer wird.

In meinen Untersuchungen konnte ich zeigen, dass der Myonenfluss von den Betondecken im Andreas-Schubert-Bau abgeschirmt wird. Je mehr Etagen sich über dem Messort befinden, desto geringer ist die gemessene Myonenrate. Trägt man die gemessene Rate gegen die Dicke des durchdrungenen Betons auf und legt einen Fit durch die gemessenen Werte, ergibt sich eine exponentiell abfallende Kurve. Dies entspricht vollauf den Erwartungen, die durch meine Arbeit also bestätigt wurden.

Durch zusätzliche Messungen und weitere Überlegungen konnte ich ausschließen, dass die Umgebungstemperatur einen signifikanten Einfluss auf meine Messwerte hat.

Literaturverzeichnis

Brandt, M., Aufbau und Test eines Wasser-Cherenkov-Detektors zur Demonstration kosmischer Strahlung, Bachelorarbeit, Münster, 2010.

Dietert, J., Aufbau eines mobilen Detektorsystems zur Vermessung kosmischer Myonen, Bachelorarbeit, Göttingen 2010.

Frauenfelder, H., Henley, E.M., Teilchen und Kerne. Die Welt der subatomaren Physik, R. Oldenbourg Verlag, München Wien 1999.

Joachim Herz Stiftung (Hg.), Teilchenphysik. Unterrichtsmaterial ab Klasse 10. Kosmische Strahlung, Hamburg 2016.

Klapdor-Kleingrothaus, H.V., Zuber, K., Teilchenastrophysik, Teubner Verlag, Stuttgart 1997, S. 229 ff.

Thiel, C., Wechselwirkung von Strahlung mit Materie, Seminar Fortgeschrittenen Praktikum Physik, Mainz, 2010.

Walter, M., Victor Hess und die Entdeckung der kosmischen Strahlung. 2012, weltderphysik.de, URL: <http://www.weltderphysik.de/gebiet/astro/kosmische-strahlung/entdeckung-der-kosmischen-strahlung/> (Stand 20.12.2016)

High Energy Stereoscopic System, H.E.S.S. - High Energy Stereoscopic System, URL: <https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/pages/about/> (Stand: 20.12.2016)

History, Pierre Auger Observatory, URL: <https://www.auger.org/index.php/about-us/history> (Stand: 20.12.2016)

Kosmische Strahlung, weltderphysik.de, URL: <http://www.weltderphysik.de/gebiet/astro/kosmische-strahlung/> (Stand: 20.12.2016)

Photomultiplier, Karlsruher Institut für Technologie - Die Physik Schülerlabor Initiative , URL: <http://psi.physik.kit.edu/103.php> (Stand: 20.12.2016)

Szintillationszähler, Chemie.de, URL: <http://www.chemie.de/lexikon/Szintillationsz%C3%A4hler.html> (Stand: 20.12.2016)

The KASCADE-Grande Experiment, KASCADE – Grande - KARlsruhe Shower Core and Array DEtector - Grande, URL: <https://web.ikp.kit.edu/KASCADE/> (Stand 20.12.2016)

Anhang

1 Abbildungen

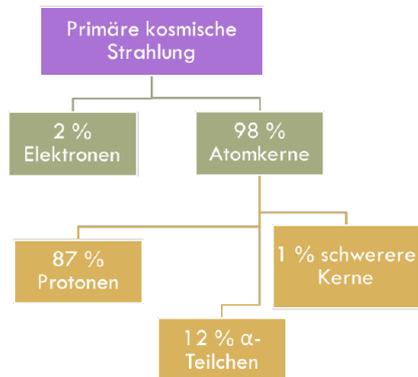


Abb. 1: Bestandteile primärer kosmischer Strahlung²

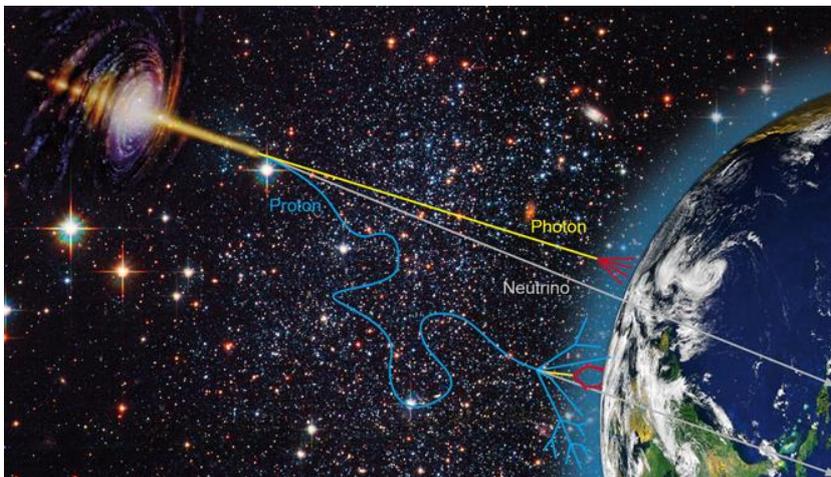


Abb. 2: Eintreffen der primären kosmischen Strahlung auf die Erdatmosphäre³

² Vortrag „Kosmische Strahlung“, Birgit Schneider, Vortrag gehalten am 05.12.2016 in Dresden

³ URL: https://astro.desy.de/index_ger.html (Stand 20.12.2016)

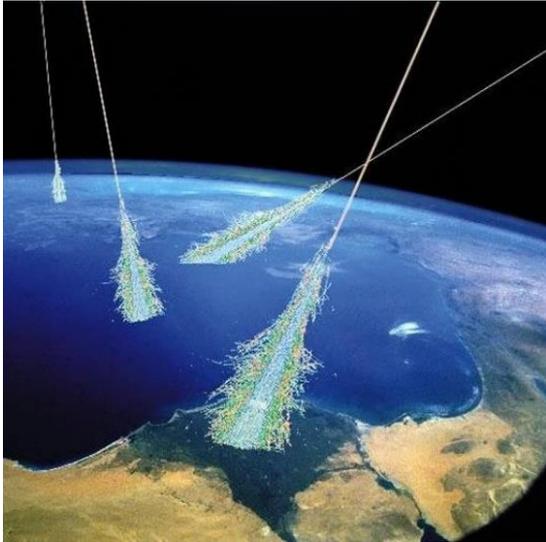


Abb. 3: Wechselwirkung von primärer kosmischer Strahlung in der Erdatmosphäre⁴

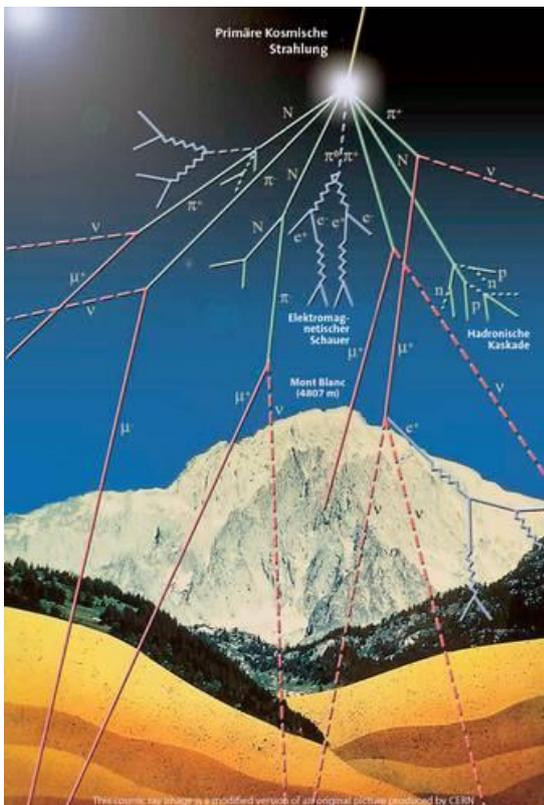


Abb. 4: Das primäre kosmische Teilchen erzeugt einen Teilchenschauer⁵

⁴ URL: <http://astroparticle.uchicago.edu/resources.html> (Stand 20.12.2016)

⁵ URL: <http://www.weltderphysik.de/gebiet/astro/kosmische-strahlung/die-energiereichsten-himmelskoerper/> (Stand 20.12.2016)



Abb. 5: Viktor Franz Hess, der Entdecker der kosmischen Strahlung⁶

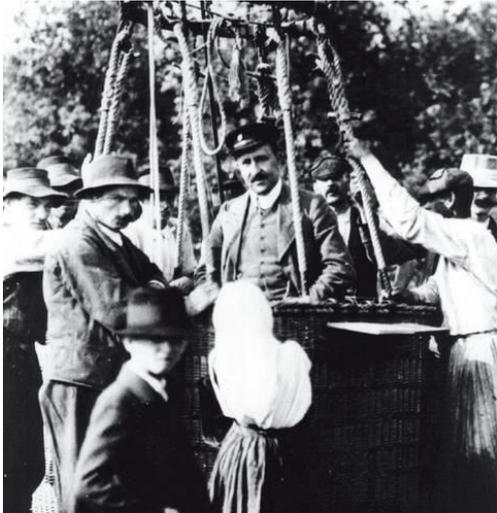


Abb. 6: Viktor F. Hess bei der Vorbereitung für einen Ballonflug⁷

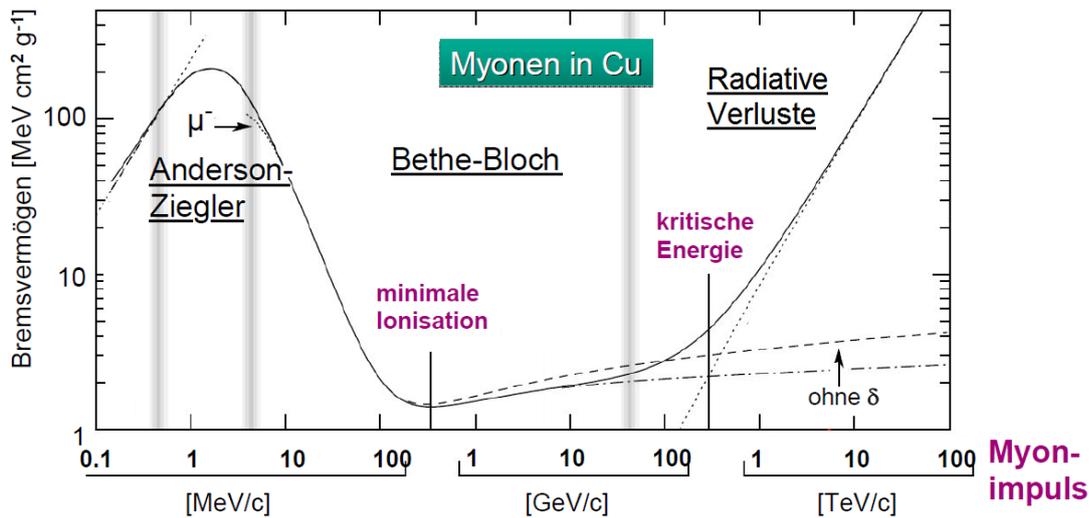


Abb. 7: Energieverlust von Myonen in Kupfer⁸

⁶ URL: http://www1.wdr.de/stichtag/stichtag6796~_v-gseapremiumxl.jpg (Stand 20.12.2016)

⁷ URL: <http://www.weltderphysik.de/gebiet/astro/kosmische-strahlung/die-energiereichsten-himmelskoerper/> (Stand 20.12.2016)

⁸ Verändert nach URL: <http://physik.uibk.ac.at/physik4/BetheBloch.gif> (Stand 20.12.2016)

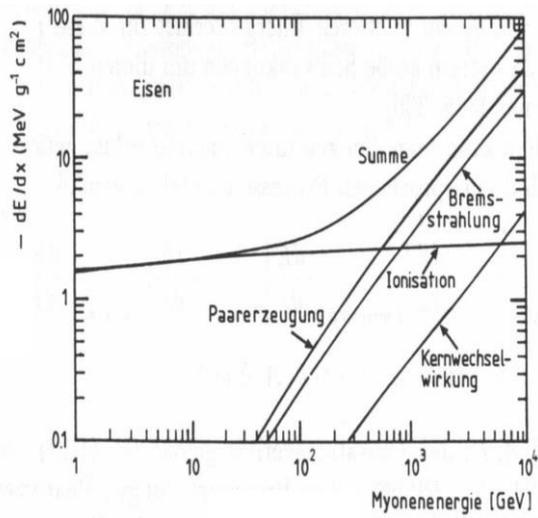


Abb. 8: Energieverlust von Myonen in Eisen⁹



Abb. 9: Versuchsaufbau des CosMO-Experiments

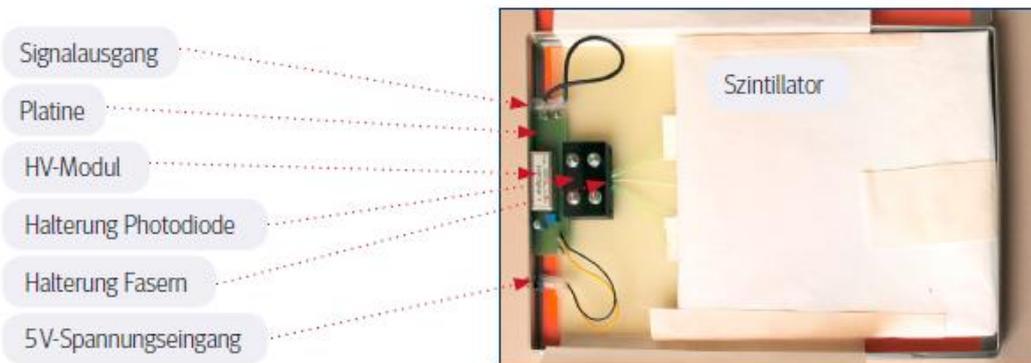


Abb. 10: Blick in einen Detektor des CosMO-Experiments mit Bezeichnung der Bauteile

⁹ URL: <http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~jwagner/WS0809/Vorlesung/TP-WS08-6.pdf> (Stand 20.12.2016)

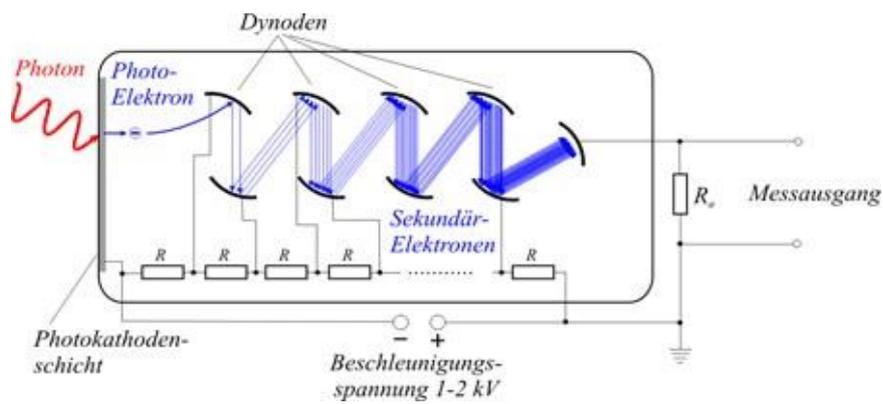


Abb. 11: Funktionsweise des Photomultipliers¹⁰



Abb. 12: DAQ-Karte (aufgeklappt)

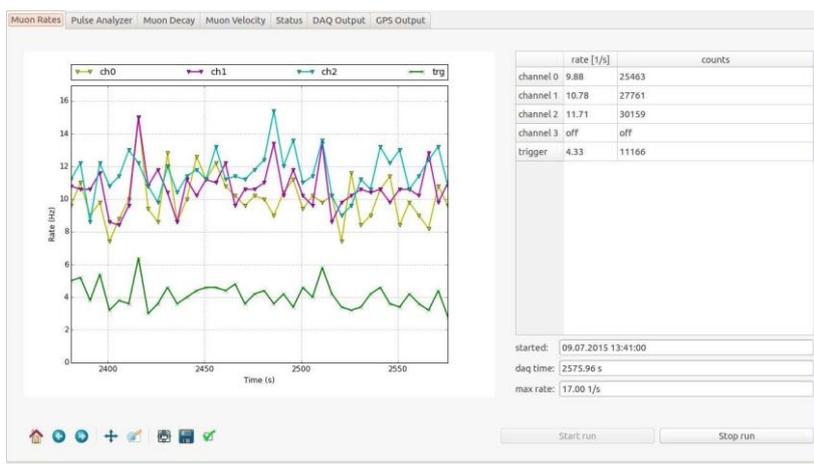


Abb. 13: Screenshot aus dem Datenauswertungsprogramm Muonic

¹⁰ URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photomultiplier_schema_de.png (Stand 20.12.2016)



Abb. 14: Andreas-Schubert-Bau der TU Dresden¹¹

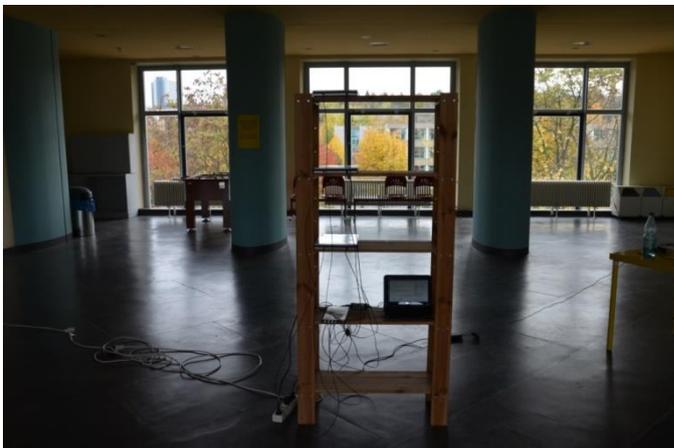


Abb. 15: Aufbau des CosMO-Experimentes im 1. Stock des Andreas-Schubert-Baus (Vorderansicht)



Abb. 16: Aufbau des CosMO-Experimentes im 1. Stock des Andreas-Schubert-Baus (Nahansicht)

¹¹ URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Andreas-Schubert-Bau_TU_Dresden.JPG (Stand 20.12.2016)



Abb. 17: Aufbau des CosMO-Experimentes im 1. Stock des Andreas-Schubert-Baus (Seitenansicht)

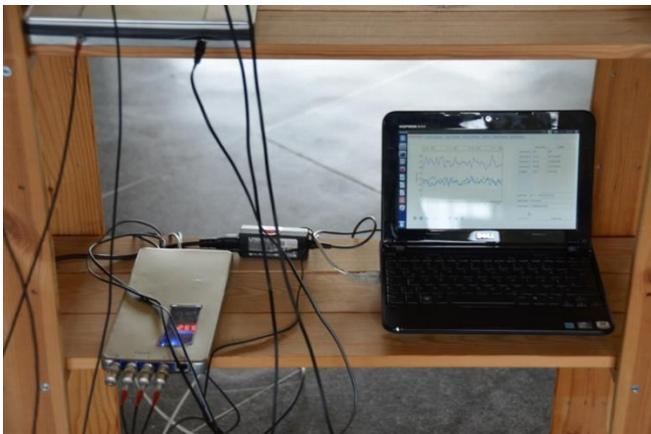


Abb. 18: Aufbau des CosMO-Experimentes im 1. Stock des Andreas-Schubert-Baus (Computer und DAQ-Karte)



Abb. 19: Aufbau des CosMO-Experimentes im 1. Stock des Andreas-Schubert-Baus (DAQ-Karte [geöffnet])

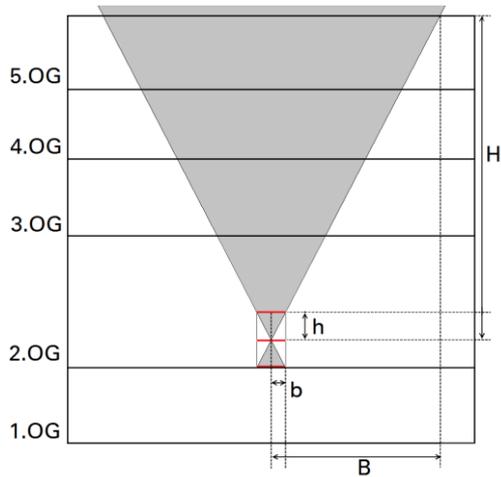


Abb. 20: Schematische Darstellung des Andreas-Schubert-Baus mit eingezeichnetem Myoneneinfallswinkel. Im 2. OG befindet sich das Patentinformationszentrum mit Bibliothek. Dort ist die Raumhöhe 5,00 m. In den anderen Etagen beträgt sie 3,71 m.

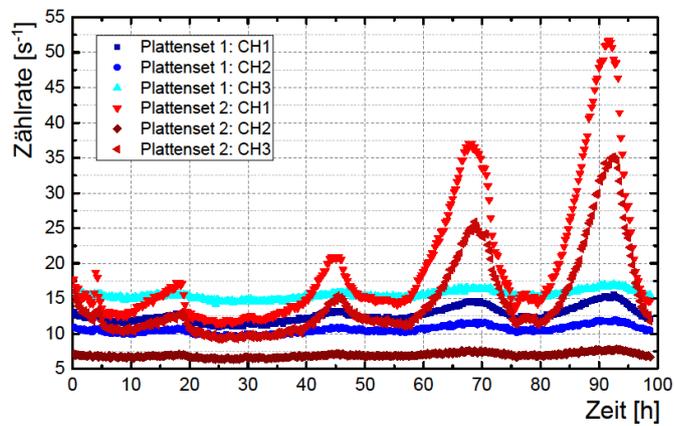


Abb. 21: Vergleich zweier Detektorsets (alt: rot, neu: blau)

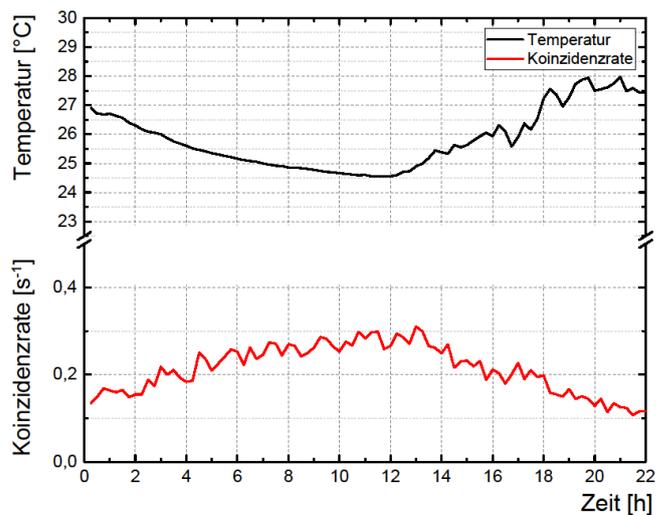


Abb. 22: 22 Stunden Messung zur Untersuchung der Temperaturabhängigkeit

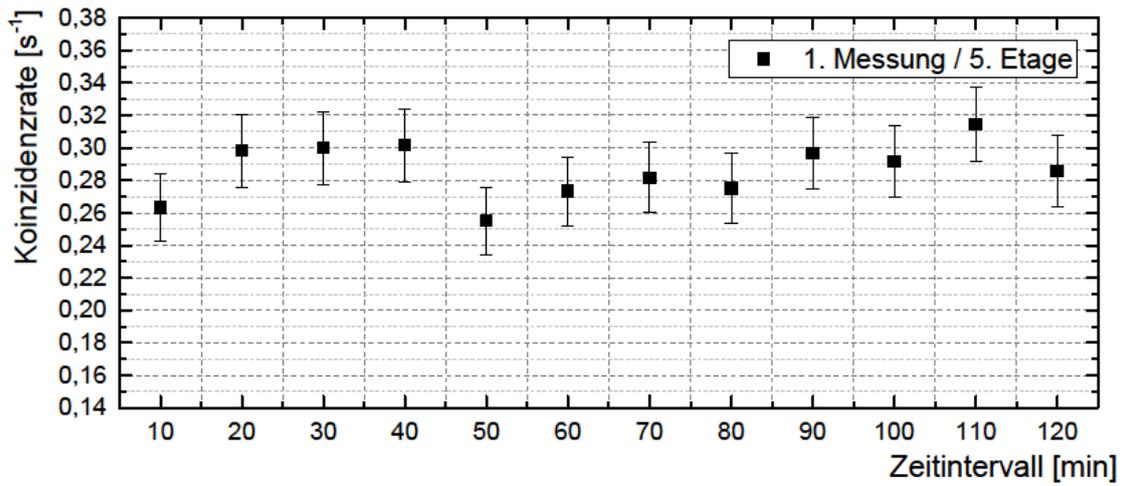


Abb. 23: Messung 1 der Myonenrate im 5. OG

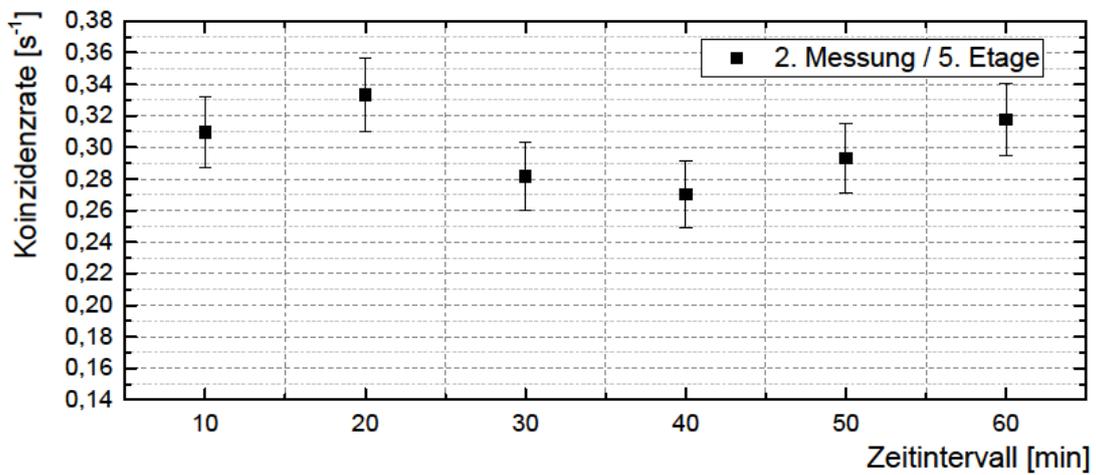


Abb. 24: Messung 2 der Myonenrate im 5. OG

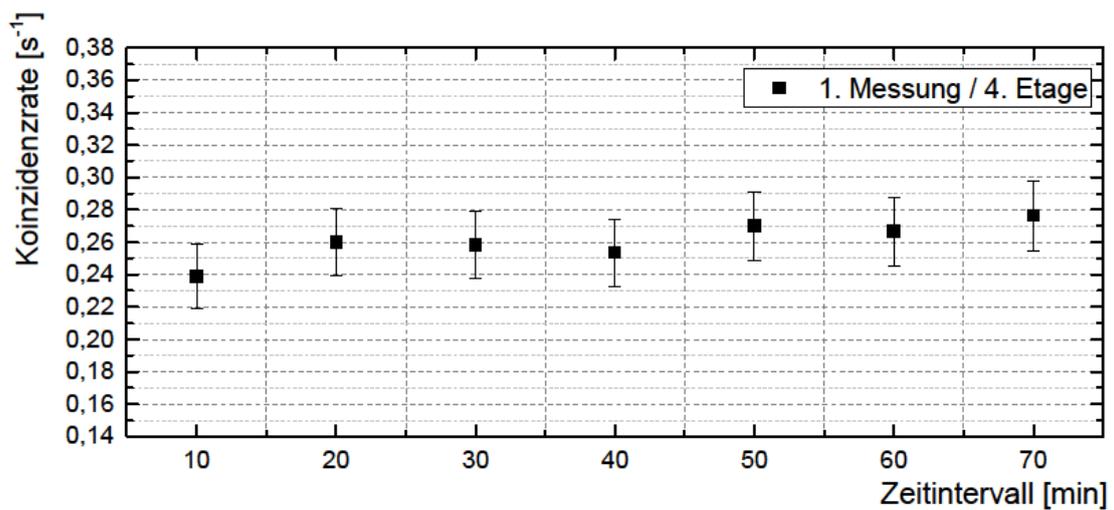


Abb. 25: Messung 1 der Myonenrate im 4. OG

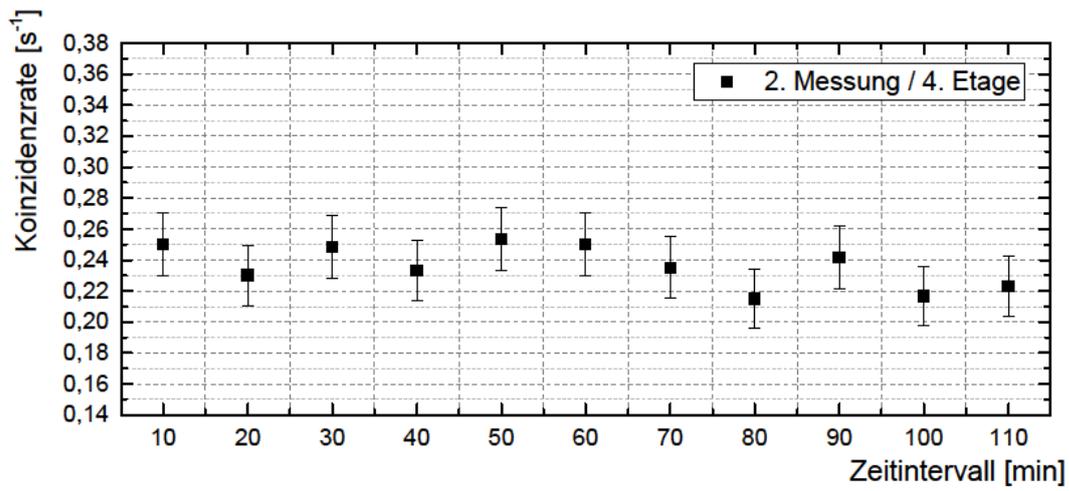


Abb.

26: Messung 2 der Myonenrate im 4. OG

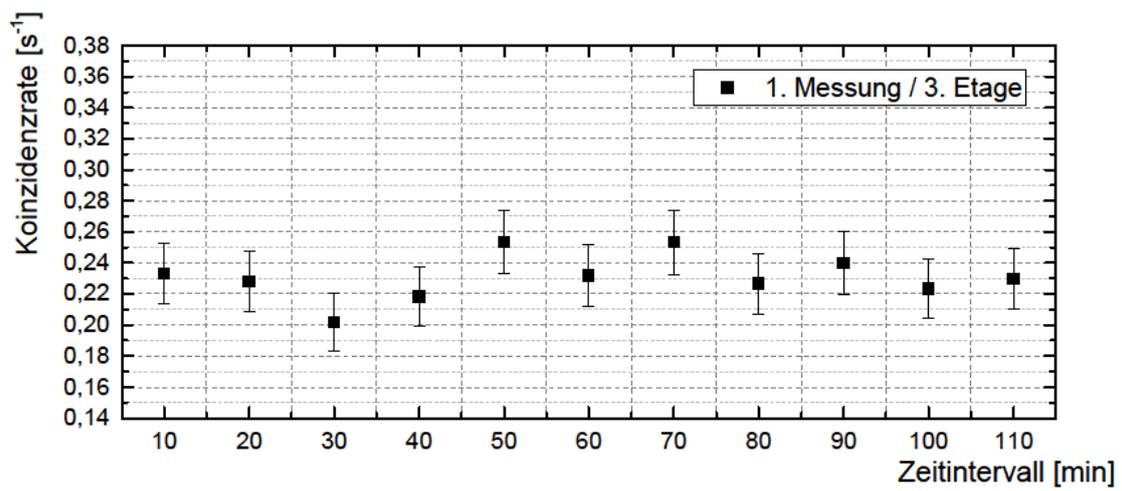


Abb. 27: Messung 1 der Myonenrate im 3. OG

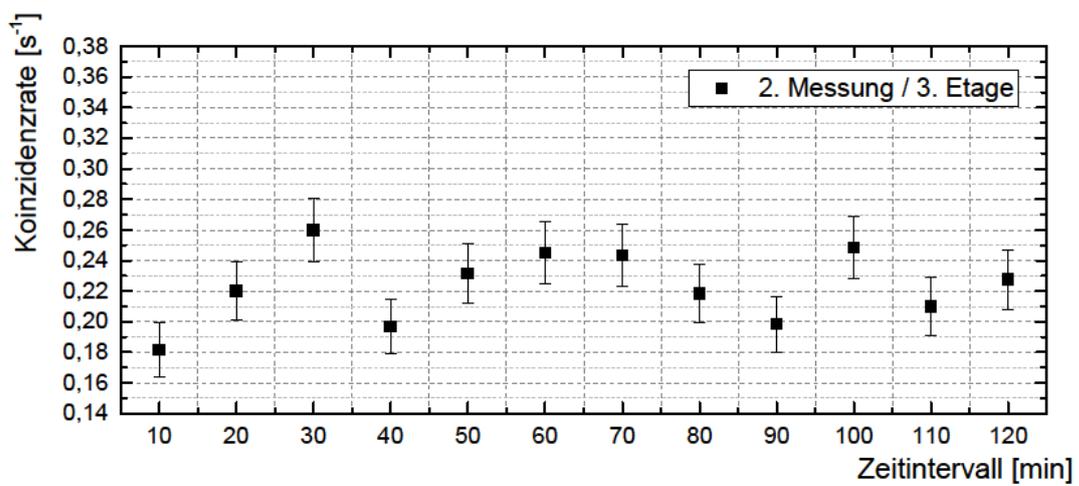


Abb.

28: Messung 2 der Myonenrate im 3. OG

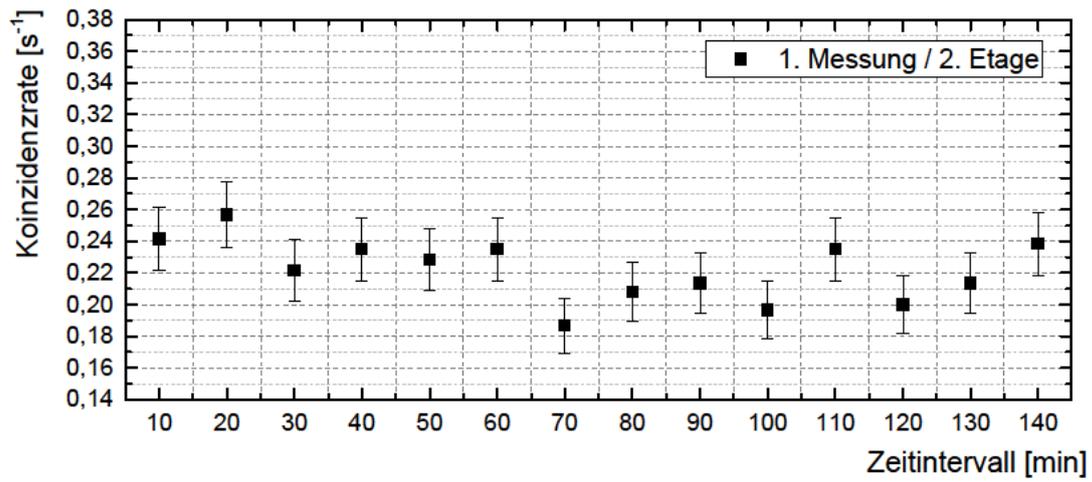


Abb. 29: Messung 1 der Myonenrate im 2. OG

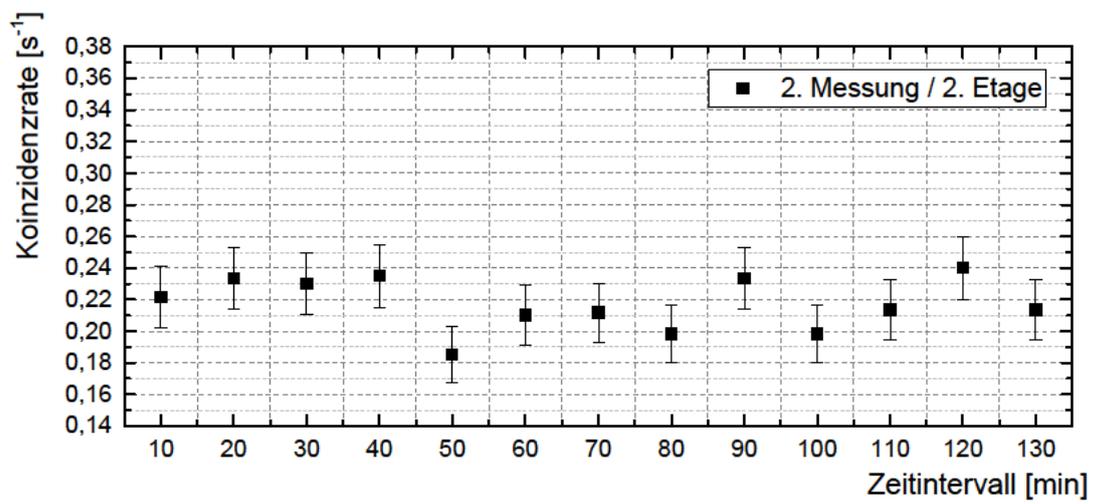


Abb. 30: Messung 2 der Myonenrate im 2. OG

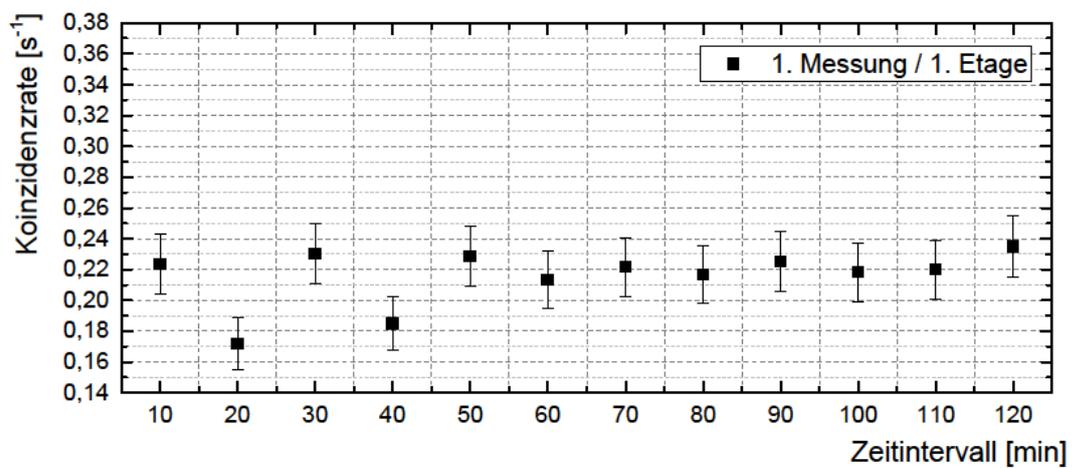


Abb. 31: Messung 1 der Myonenrate im 1. OG

Abb.

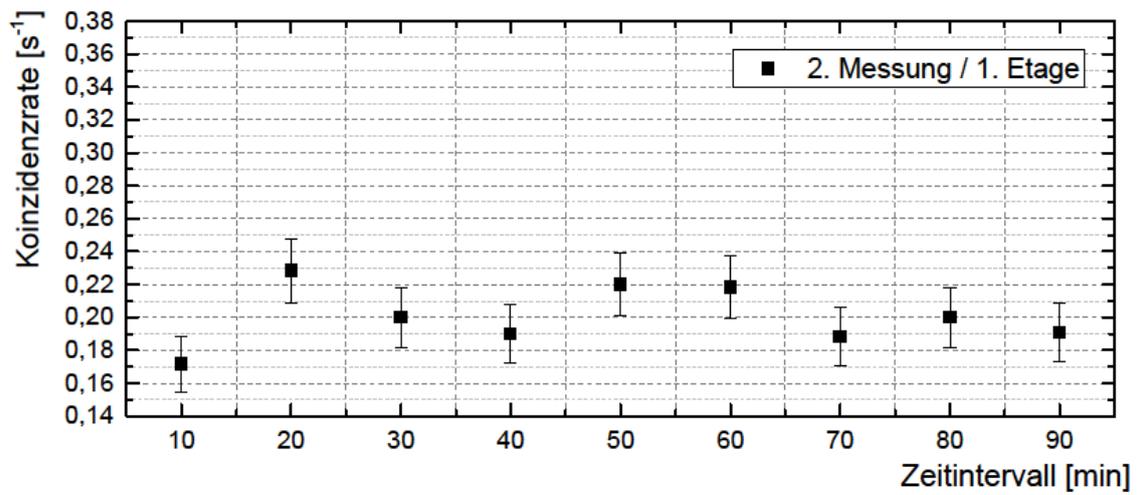


Abb. 32: Messung 2 der Myonenrate im 1. OG

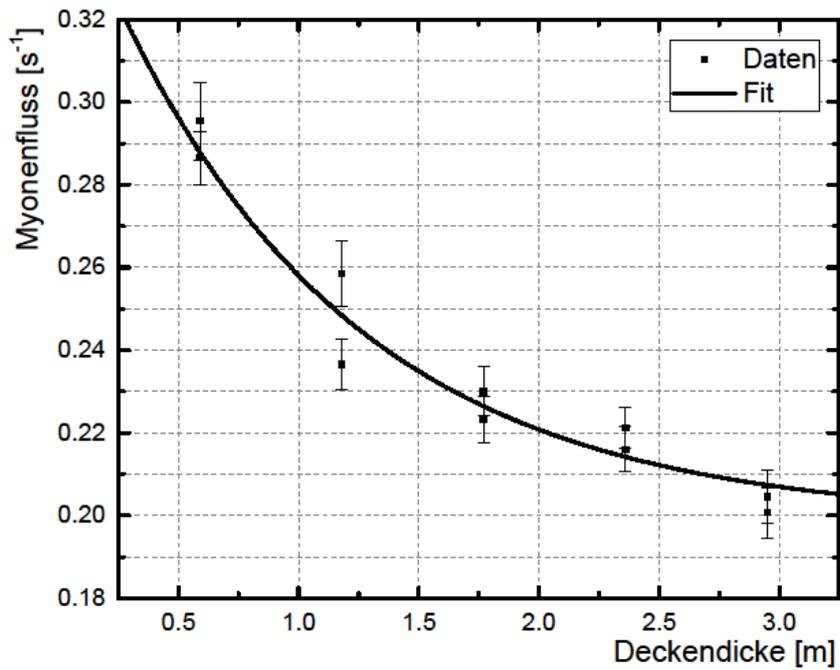


Abb. 33: Myonenfluss in Abhängigkeit von der Deckendicke

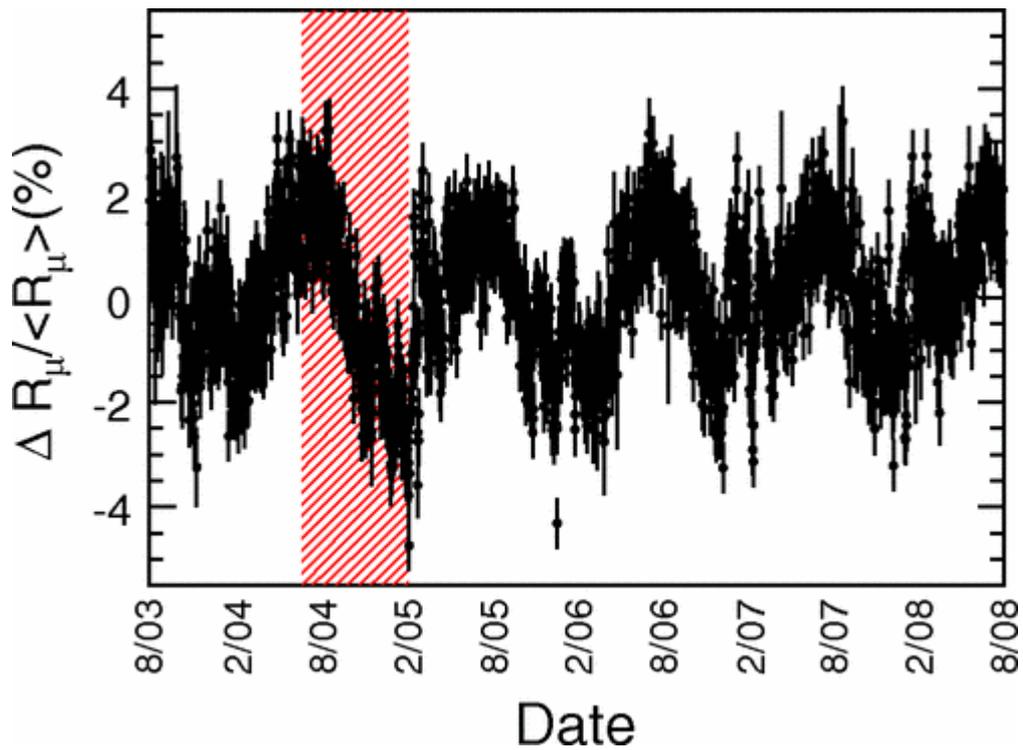


Abb. 34: Observation of muon intensity variations by season with the MINOS far detector: Graph

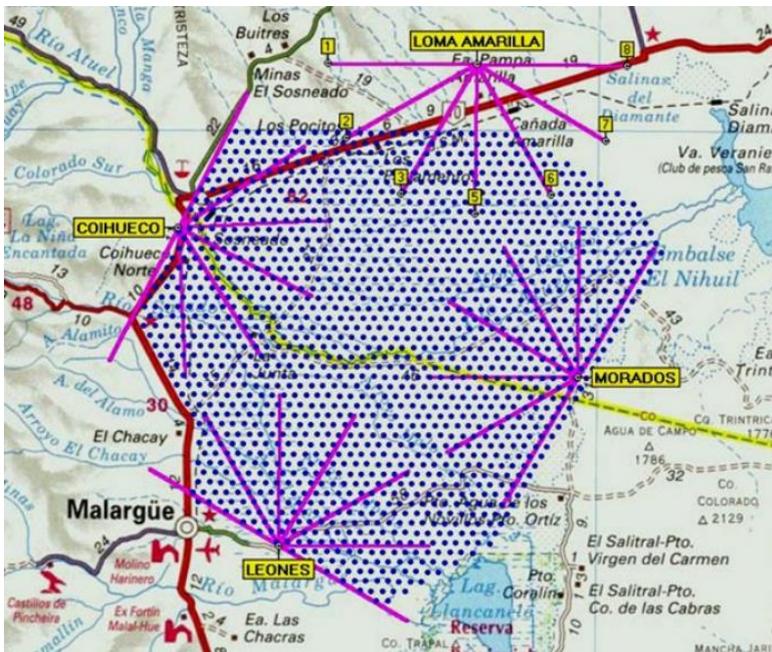


Abb. 35: Aufbau des Pierre-Auger-Observatoriums. Jeder blaue Punkt ist ein Wasser-Cherenkov-Detektor¹².

¹² Vortrag „Kosmische Strahlung“, Birgit Schneider, Vortrag gehalten am 05.12.2016 in Dresden



Abb. 36: Ein Wasser-Cherenkov-Detektor¹³

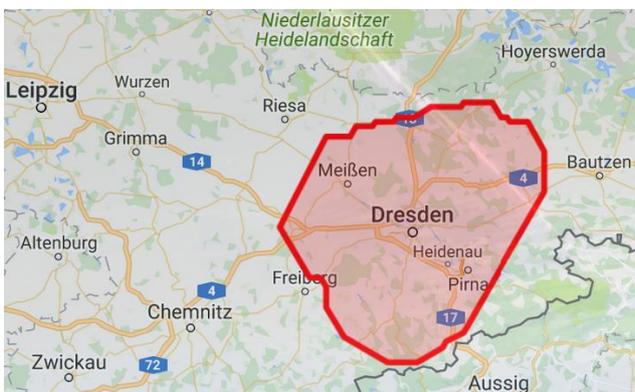


Abb. 37: Die Fläche des Pierre-Auger-Observatoriums mit Dresden als Mittelpunkt¹⁴



Abb. 38: H.E.S.S. Teleskop-Anlage in Namibia¹⁵

¹³ Vortrag „Kosmische Strahlung“, Birgit Schneider, Vortrag gehalten am 05.12.2016 in Dresden

¹⁴ Vortrag „Kosmische Strahlung“, Birgit Schneider, Vortrag gehalten am 05.12.2016 in Dresden

¹⁵ URL:

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/c/c3/HESS_II_gamma_ray_experiment_five_telescope_array.jpg (Stand 20.12.2016)

2 Erklärung zur Besonderen Lernleistung

Hiermit versichere ich, Moritz Bilow, die vorliegende Arbeit mit dem Titel
Myonen in der kosmischen Strahlung und ihr ortsabhängiger Nachweis
selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt zu haben sowie alle
Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, durch die
Angaben der Quellen als Entlehnung kenntlich gemacht zu haben.

Dresden, _____