

**Eichmessungen und systematische Untersuchungen zum
Nachweis kosmischer Teilchen im IceTop-Tank**

**Calibration measurements and systematic studies on the
detection of cosmic particles in the IceTop tank**

BACHELOR ARBEIT

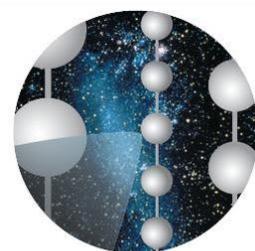
Christian Martens

2802062

Cottbus, September 2011



Brandenburgische Technische Universität Cottbus
Deutsches Elektronen-Synchrotron Zeuthen



I c e C u b e

Diese Bachelorarbeit wurde am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) in Zeuthen geschrieben.

1. Betreuer: Prof. Dr. Wolfgang Lohmann
Fakultät für Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik
Brandenburgische Technische Universität Cottbus
DESY Zeuthen
Deutschland
2. Betreuer: Dr. Michael Walter
Astroteilchenphysik, IceCube
DESY Zeuthen
Deutschland

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	v
Zusammenfassung	vi
1 Astroteilchenphysik	1
1.1 Entdeckung der kosmischen Strahlung	2
1.2 Teilchen aus dem Kosmos	5
1.2.1 Primäre kosmische Strahlung	6
1.2.2 Sekundäre kosmische Strahlung	8
1.3 Cherenkov-Strahlung	10
2 IceCube	12
2.1 IceTop	15
3 Aufbau des IceTop-Tanks am DESY Zeuthen	17
3.1 Tank	19
3.2 Szintillator Ebenen	20
3.3 optisches Modul	21
3.4 Signalverlauf	23
3.5 ADC - C.A.E.N. V265	24
3.6 LaCoMe	24
4 Programm „IceTop-Tank-Visualisierung“	26
5 Kalibrierung der Sekundärelektronenvervielfacher	28
5.1 Kalibrierung der Szintillator Ebenen	28
5.2 Kalibrierung der OM's	29
5.2.1 Ermittlung der minimalen Spannung der Diffuser-LED	29
5.2.2 Bestimmung der Arbeitspunkte der OM's	31
5.3 Stabilität der Messungen mit den OM's	33
6 Messungen im IceTop-Tank	35
6.1 Trigger mit den OM's ohne Szintillatorebenen	35
6.2 Untersuchungen mit den OM's und Szintillatorebenen	39
6.2.1 vertikale Messungen	39
6.2.2 horizontale Messungen	44
7 Ergebnisse	46
Anhang	48

Abbildungsverzeichnis	72
Tabellenverzeichnis	74
Literaturverzeichnis	75

Abkürzungen

ADC	Analog-to-Digital Converter
AMANDA	Antarctic Muon and Neutrino Detector Array
CH	Channel, Kanal
DAQ	Data Acquisition
DESY	Deutsches Elektronen-Synchrotron
DOM	digitales optisches Modul
ITT	IceTop-Tank
OM	optisches Modul
pe	Photoelektronen (Einheit)
Ped	Pedestal, Pedestalpeak
PEP	Photoelektronenpeak
PMT	Photomultiplier Tube (Sekundärelektronenvervielfacher)
Pos	Position (auf Position der Peaks bezogen)
SEV	Sekundärelektronenvervielfacher
TE	Triggerebenen, Szintillatorebenen
VEM	vertical equivalent muon, Einheit der Ionisation für ein vertikales Myon

Zusammenfassung

„Man kann einen Menschen nichts lehren, man kann ihm nur helfen,
es in sich selbst zu finden.“
Galileo Galilei

IceCube ist ein 1km^3 großes Observatorium am Südpol. Es besteht aus dem Oberflächen-Detektor IceTop und den Untergrund-Detektor In-Ice. Durch die Detektion von Cherenkov-Strahlung versucht IceCube die Quellen kosmischer Strahlung und kosmischer Neutrinos zu ermitteln.

IceTop besitzt eine große Anzahl an IceTop-Tanks (ITT), die mit Eis gefüllt sind. In diesen Tanks kann die Cherenkov-Strahlung der kosmischen Strahlung mit sogenannten digitalen optischen Modulen (DOM) detektiert werden. Dadurch ist es möglich die chemische Zusammensetzung der kosmischen Strahlung zu ermitteln. Gleichzeitig dient dieser Oberflächen-Detektor auch als Veto für den In-Ice-Detektor.

In dieser Bachelorarbeit wurden die Ladungs-Spektren am ITT beim DESY unter Betrachtung der elektromagnetischen, hadronischen und myonischen Komponenten der kosmischen Strahlung untersucht. Zusätzlich in Kooperation mit 6m^2 großen Szintillatorebenen konnte durch verschiedene Koinzidenz-Bedingungen eine Richtungsselektion der kosmischen Strahlung durchgeführt werden. Somit konnten die Positionen der Myonpeaks für verschiedene Bedingungen betrachtet werden.

Kapitel 1

Astroteilchenphysik

„Coming out of space and incident on the high atmosphere, there is a thin rain of charged particles known as the primary cosmic radiation.“

C. F. Powell, [CFPOW]

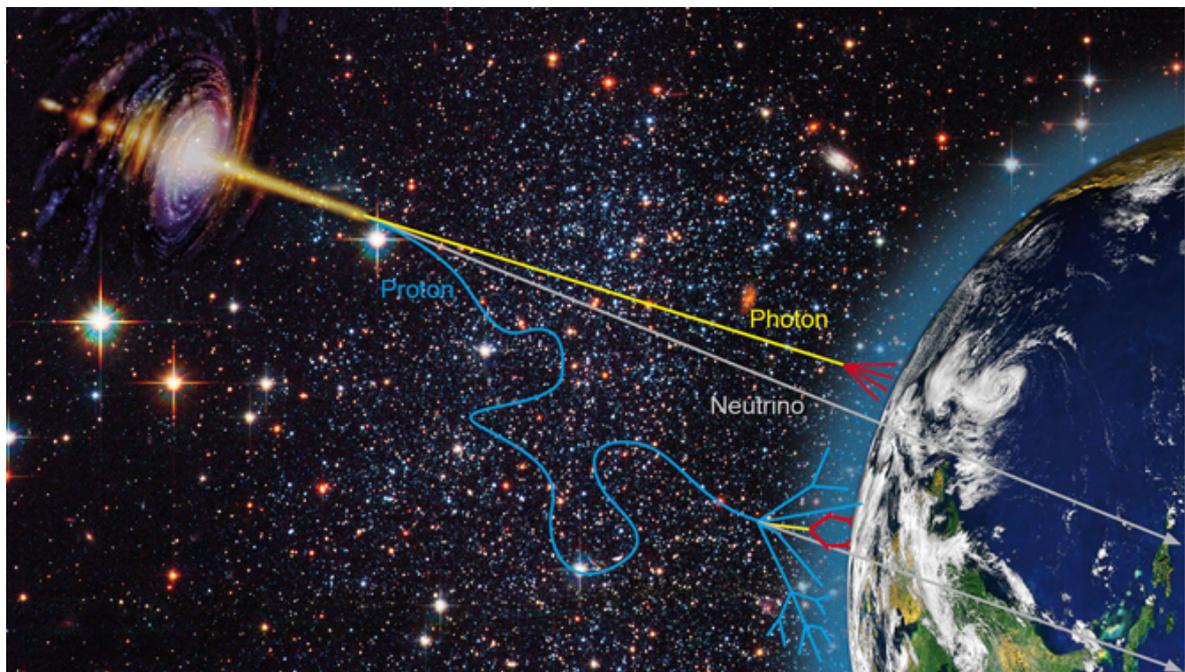


Abbildung 1.1: Quelle [DESYZ].

Begonnen hat die Entwicklung bis zu der heute bekannten Astroteilchenphysik mit der Astronomie vor hunderten von Jahren. Kosmische Objekte wurden durch Beobachtung mit dem Auge untersucht. Die Astronomie war somit nur auf das sichtbare Licht beschränkt.

Die sich später daraus entwickelte Astrophysik wollte speziell das physikalischen Verhalten der kosmischen Körper ergründen. Heute ist die beobachtende Astrophysik auf elektromagnetischen Wellen mit Wellenlängen unterhalb und oberhalb des sichtbaren Lichts, wie zum Beispiel Radiowellen, Röntgenstrahlung und Gammastrahlung, spezialisiert. Die theoretische Astrophysik benutzt Modelle, um Bewegungen und Verhalten von kosmischen Objekten vorhersagen zu können. Zu beachten ist, dass kosmischen Gegebenheiten nicht im Labor nachgestellt werden können.

Die Astroteilchenphysik untersucht kosmischen Teilchen, wie Protonen p , Neutronen n und Neutrinos ν , und hochenergetische Photonen, welche auf die Erde treffen. Über diese

kosmischen Teilchen lassen sich Quellen außerhalb unseres Sonnensystems und sogar außerhalb unserer Galaxie erforschen. Vor der Existenz von Beschleunigern wurde die Elementarteilchenphysik mit den kosmischen Teilchen betrieben. Als Untersuchungen mit Beschleunigern möglich waren, konnten Elementarteilchen und deren Wechselwirkungen besser analysiert werden. Zwischen folgende Teilchensorten wird im Standardmodell der Teilchenphysik unterschieden:

- Materieteilchen
- Wechselwirkungsteilchen
- Higgs-Teilchen

Die Materieteilchen lassen sich in Elektronen (e^-), Myonen (μ^-), Tauonen (τ^-), deren Neutrinos (ν_e, ν_μ, ν_τ) und Quarks (Up u , Down d , usw.) einteilen. Sie gehören somit zu der Gruppe der Fermionen. Photonen (γ), W-Bosonen, Z-Bosonen und Gluonen zählen zu den Wechselwirkungsteilchen und somit auch zu der Gruppe der Bosonen. Das Higgs-Teilchen konnte bisher nicht nachgewiesen werden. Der Higgs-Mechanismus beschreibt, wie Teilchen ihre Masse erhalten. Weiterhin existiert noch die Gruppe der Hadronen, die Teilchen mit drei Quarks (Baryonen) und Teilchen mit Quark und Antiquark (Mesonen) enthalten. Zu den Baryonen gehören zum Beispiel Protonen (p^+) und Neutronen (n) und zu den Mesonen Pionen ($\pi^{0,\pm}$) [DYLEX].

1.1 Entdeckung der kosmischen Strahlung

Im Jahr 1900 haben sich Julius Elster und Hans Geitel mit der Leitfähigkeit der Luft beschäftigt. „Ihre herausragenden wissenschaftlichen Leistungen vollbrachten Elster und Geitel auf den Gebieten der atmosphärischen Elektrizität, der Radioaktivität und des lichtelektrischen Effekts.“ [ELUGE] Mit einem Elektroskops hatten sie die Ionisation der Luft untersucht und stellten fest, dass diese variiert. Bei der Ionisation werden Elektronen aus den Atomen der Luft heraus gelöst, so dass positive Atome und freibewegliche Elektronen vorliegen. Diese Ladungen erhöhen die Leitfähigkeit der Luft.



Abbildung 1.2: Julius Elster und Hans Geitel, Quelle [ELUGE].

Ernest Rutherford erhielt 1908 den Nobelpreis für Untersuchungen an radioaktiven Elementen. Aufgrund von Experimenten mit radioaktiven Materialien durch Becquerel im Jahre 1896 (Nobelpreis 1903) stellte Rutherford die Vermutung auf, dass die Radioaktivität ihre Quelle in der Erde hat.

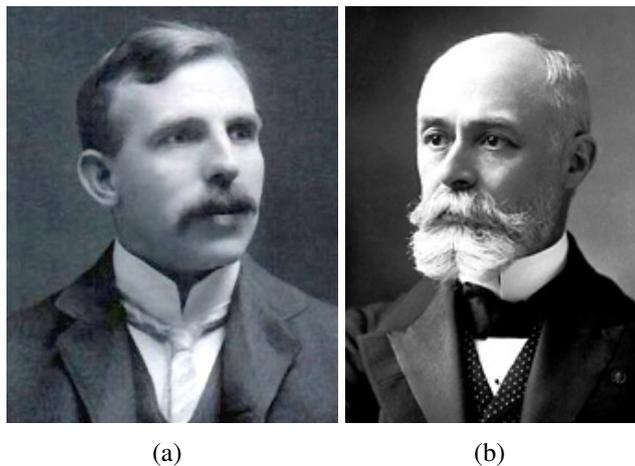


Abbildung 1.3: (a) Ernest Rutherford Quelle [ERUTH], (b) Antoine Henri Becquerel Quelle [BECQU].

Theodor Wulf bestätigte 1910 diese Hypothese nach seinen Experimenten auf dem Eiffelturm in rund 300m Höhe. Er prüfte die Intensität der Ionisation der natürlichen Strahlung und stellte fest, dass diese mit der Höhe sinkt. Jedoch war die Ionisation in 300m Höhe noch stärker als erwartet. „Theodor Wulf war einer der ersten, die an die Möglichkeit dachten, dass die Leitfähigkeit der Luft durch eine ionisierende Strahlung verursacht würde, die aus dem Weltall auf unsere Atmosphäre trifft.“ [HESS1] Er forderte andere Wissenschaftler auf Ballonexperimente in großen Höhen durchzuführen. Viktor Hess realisierte 1911/1912 als erster erfolgreiche Messungen. Er führte mehrere Ballonfahrten durch, bei denen er bis in 5000m Höhe die Leitfähigkeit der Luft gemessen hat.

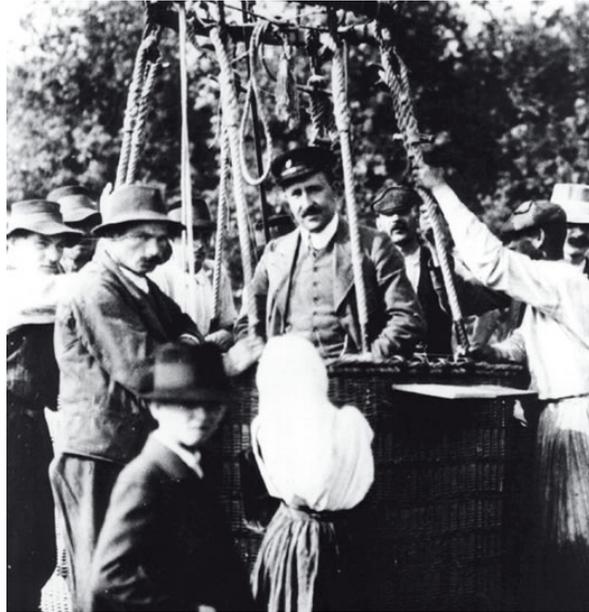


Abbildung 1.4: Viktor Hess in seinem Ballon, Quelle [HESS2].

Er stellte fest, dass die Intensität der Ionisation ab einer gewissen Höhe wieder stark zunahm. Eine Strahlung aus dem Weltall, wurde somit durch ihn entdeckt. Für diese Entdeckung erhielt er 1936 den Nobelpreis. 1912 wurde die Nebelkammer von Charles Thomson Rees Wilson entwickelt, welche als Detektor die ionisierende Strahlung wahrnehmbar und sichtbar macht.

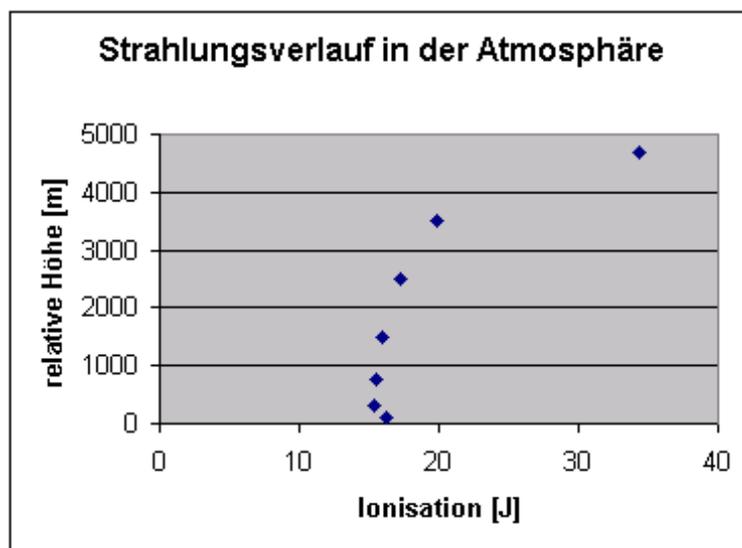


Abbildung 1.5: Ionisationsverlauf mit der Höhe, Quelle [HESS1].

Die Entdeckung der kosmischen Strahlung öffnete neue Bereiche der Physik. Es wurden neue Theorien und Experimente entwickelt, um die Natur der kosmischen Strahlung zu erforschen.

1.2 Teilchen aus dem Kosmos

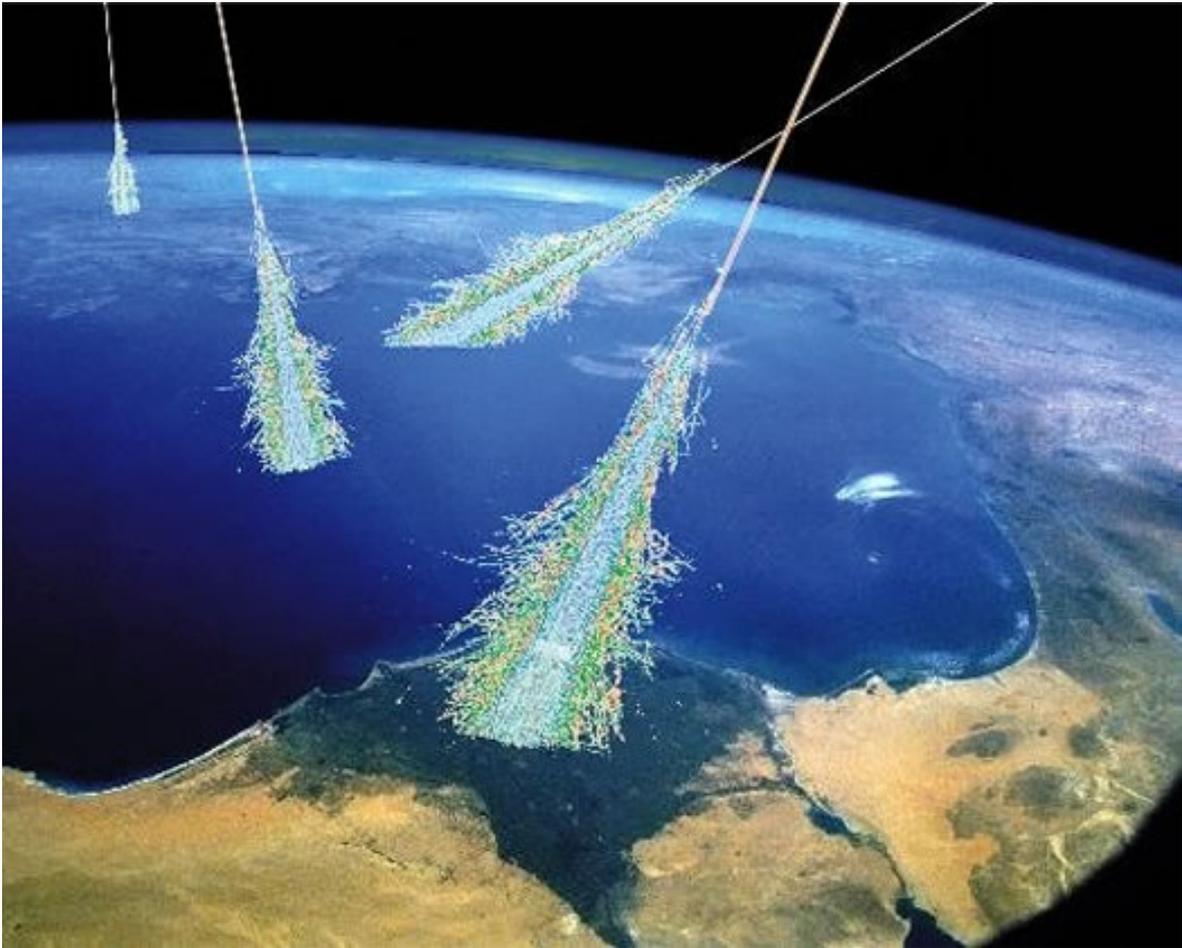
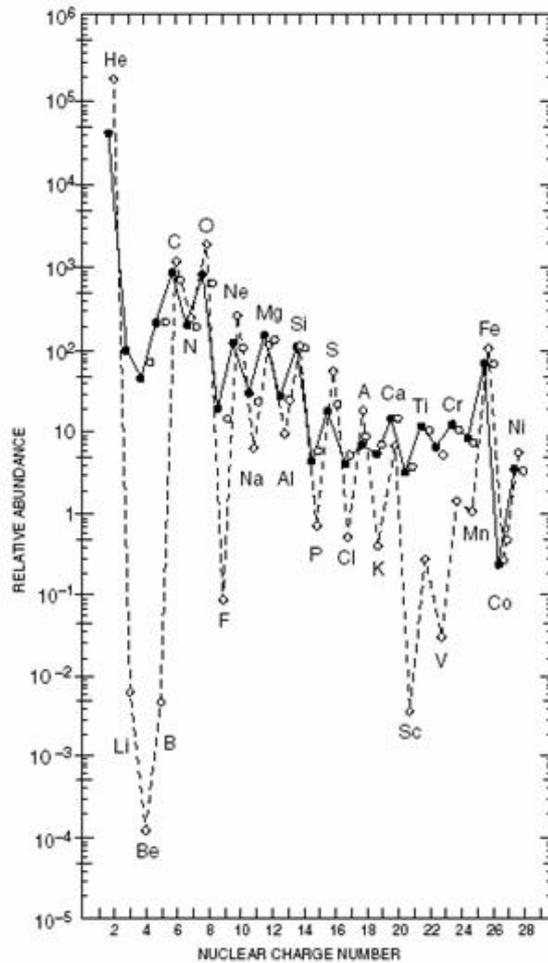


Abbildung 1.6: kosmische Strahlung, Quelle [HESS2].

Die kosmische Strahlung besteht aus hochenergetischen Teilchen, die aus dem Universum auf die Erde kommen. Die geladene Komponente besteht hauptsächlich aus Protonen und leichten Kernen. Neutronen, Neutrinos und Photonen stellen den neutralen Anteil dar. Diese Komponenten verfügen dabei über Energien bis zu $10^{21} eV$ und werden als primäre kosmische Strahlung bezeichnet. Die Quellen dieser Strahlung sind bis heute noch nicht vollständig geklärt. Es wird vermutet, dass die Teilchen mit Energien über dem PeV Bereich ihren Ursprung außerhalb unserer Galaxie haben. Die Erde wird von der primären kosmischen Strahlung regelrecht bombardiert. Die leichten Kerne und Protonen zerfallen in der Erdatmosphäre und erzeugen einen Schauer aus elementaren Teilchen. Diese Partikel werden als sekundäre kosmische Komponente bezeichnet [MBEIM].

1.2.1 Primäre kosmische Strahlung



Die Erde wird kontinuierlich von unzähligen Teilchen getroffen, welche höhere Energien besitzen, als heutzutage im Labor erzeugt werden können. Der geladene Anteil der primären kosmischen Strahlung besteht zu 85% aus Protonen, zu 12% aus Heliumkernen und zu 3% aus Elementen mit Kernladungszahlen $Z \geq 3$. In Abbildung 1.7 ist mit einer durchgezogenen Linie der Anteil an Elementen in der kosmischen Strahlung und mit einer gestrichelten Linie der Anteil in unserem Sonnensystem dargestellt. Lithium, Beryllium, Bor und die Elemente mit Kernladungen unterhalb von Eisen ($Z=26$) weisen eine höhere Häufigkeit in der kosmischen Strahlung auf. Diese kann durch Fragmentation bzw. 'Spallation' der schwereren Kerne O, C und N bei der Kollision mit Materie im interstellaren Raum erklärt werden. [TRIPO]

Abbildung 1.7: Häufigkeit der Elemente in der kosmischen Strahlung (durchgezogene Linie) und in unserem Sonnensystem (gestrichelte Linie), Quelle [TRIPO].

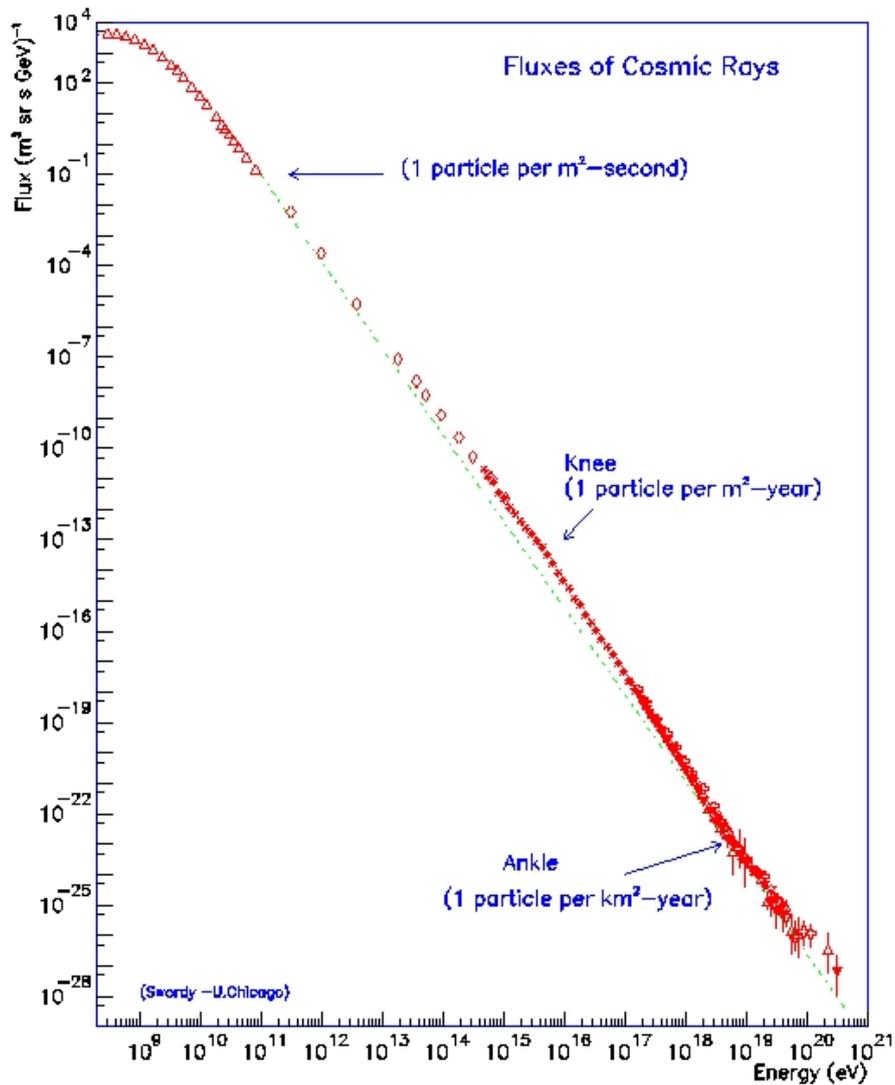


Abbildung 1.8: Energiehäufigkeit der geladenen kosmischen Strahlung, Quelle [ASTRP].

Das Energiespektrum der kosmischen Strahlung ist in der Abbildung 1.8 veranschaulicht. Die Gesamtenergie der Teilchen ist vergleichbar mit der Energie des Sternenlichts, welches bei uns ankommt. Der Teilchenfluss wird in Teilchenanzahl pro Fläche, pro Zeiteinheit und pro Winkeleinheit angegeben. Der Fluss sinkt mit höheren Energien und lässt sich mit folgendem Potenzgesetz beschreiben.

$$\frac{dN}{dE} \sim E^{-\gamma} \quad (1.2.1)$$

Bis zu einer Energie von 10^{15} eV hat γ den Wert 2,7. Ein möglicher Ursprung dieser Teilchen liegt in Supernovaexplosionen in unserer Galaxie. Nur Teilchen bis zu einer Energie von 10^{15} eV kann das Magnetfeld der Milchstraße innerhalb des sogenannten Gyradius behalten. Dieser kann durch gleichsetzten von Radialkraft und Lorentzkraft unter den Be-

dingungen $v \approx c$ und $E = mc^2$ hergeleitet werden.

$$F_{\text{radial}} = F_{\text{Lorentz}} \quad (1.2.2)$$

$$\frac{mv^2}{r_G} = evB \quad (1.2.3)$$

$$r_G \approx \frac{E}{ecB} \quad (1.2.4)$$

$$r_G \approx 4,8 \cdot 10^{-11} \frac{E \text{ Tm}}{B \text{ J}} \quad (1.2.5)$$

Ab einer Energie von 10^{15} eV beginnt das „Knie“. Da der Gyroradius hier zu hoch ist, beginnen die Teilchen die Galaxie zu verlassen. Diese Änderung des Gradienten in der Kurve entsteht außerdem, da jetzt anstatt einer Supernovaexplosion ein anderer Beschleunigungsmechanismus wirksam wird. Nach dem „Knie“ fällt das Energiespektrum bis zu dem „Knöchel“ (Energie von 10^{19} eV) steiler ab, so dass sich γ auf 3 erhöht. Es existiert die Vermutung, dass Aktive Galaktische Kerne (AGN) und Akkretionsscheiben um kleinere schwarze Löcher als Quelle der Teilchen in diesem Energiebereich dienen.

Oberhalb dieser Energie wird die Kurve wieder flacher und γ fällt wieder auf 2,7 zurück. Für diesen Energiebereich werden auch Aktive Galaktische Kerne als Ursprung für die kosmische Teilchen angenommen.

1.2.2 Sekundäre kosmische Strahlung

Wie schon unter 1.2 erwähnt, handelt sich bei der sekundären kosmischen Strahlung um Partikel, die durch Wechselwirkung der primären kosmischen Strahlung mit Atomen der Erdatmosphäre entstehen. Bei diesem Prozess entstehen hauptsächlich Protonen, Neutronen und neutrale sowie auch geladene Pionen.

Partikel	Zerfallsprodukt	Wahrscheinlichkeit	Lebensdauer des Partikels
π^0	$\rightarrow 2\gamma$	99%	$(8,4 \pm 0,6) \cdot 10^{-17} \text{ s}$
	$\rightarrow \gamma + e^+ + e^-$	1%	
π^+	$\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$	99,99%	$(2,6033 \pm 0,0005) \cdot 10^{-8} \text{ s}$
	$\rightarrow e^+ + \nu_e$	0,01%	
π^-	$\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$	99,99%	$(2,6033 \pm 0,0005) \cdot 10^{-8} \text{ s}$
	$\rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$	0,01%	
μ^+	$\rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$	100%	$(2,19703 \pm 0,00004) \cdot 10^{-6} \text{ s}$
μ^-	$\rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$	100%	$(2,19703 \pm 0,00004) \cdot 10^{-6} \text{ s}$

Tabelle 1.1: Teilchenzerfälle, Quellen [FRUTH] und [BEUSC].

Die neutralen Pionen zerfallen sofort in 2 Photonen, die mittels Paarbildung weitere Elektronen Positron Paare erzeugen können. Die geladenen Pionen können in Myonen und deren Neutrinos zerfallen sowie auch in Elektronen und deren Neutrinos. Wenn die Lebensdauer der Myonen überschritten wird, zerfallen diese weiter in Elektronen, Elektroneneutrinos und

Antimyonenneutrinos. Die Elektronen zerfallen nicht weiter, da sie stabil sind. Zumindest wurde bis heute noch kein Elektronenzerfall beobachtet.

Durch Wechselwirkungen, Zerfälle und Paarbildung entstehen lawinenartig weitere Teilchen, so dass sich ein regelrechter Schauer bildet. Dieser Schauer besteht aus einer elektromagnetischen, einer hadronischen und einer myonischen Komponente.

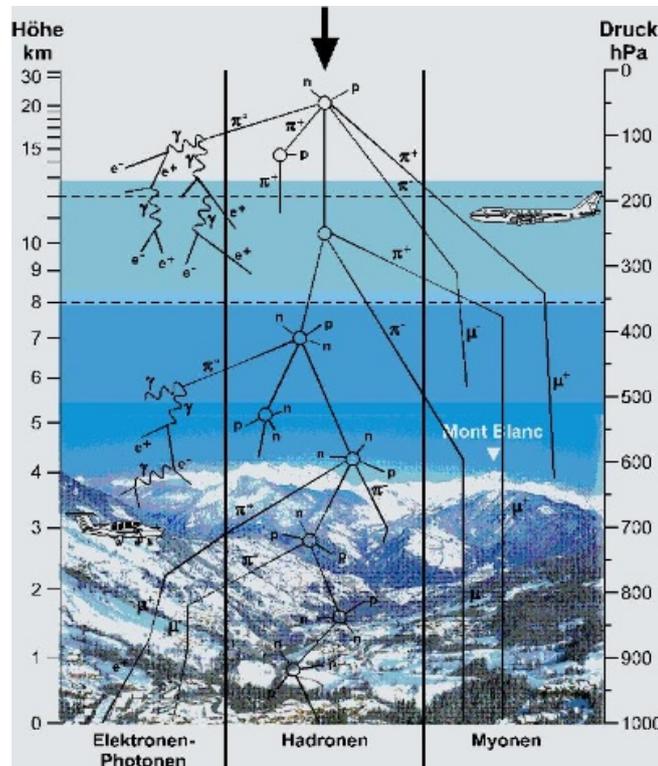


Abbildung 1.9: Schauer der sekundären Strahlung, Quelle [WHZDR].

Die Pionen und Kaonen, die mit den Protonen und Neutronen den hadronischen Schauer bilden, können auf Grund ihrer geringen Lebensdauer den Erdboden meist nicht erreichen. Die geladenen Pionen zerfallen in Myonen und deren Neutrinos. Diese Komponente ist somit stark höhenabhängig. Die Myonen werden größtenteils aus den Pionen erzeugt und bilden die myonische Komponente. Trotz ihrer geringen Lebensdauer können sie den Erdboden ohne großen Energieverlust erreichen. Der Grund liegt in ihrem hohen Durchdringungsvermögen und in der Zeitdilatation. Myonen, die vor Erreichen des Erdbodens zerfallen, erzeugen Elektronen oder Positronen, je nach der Ladung der Myonen, und je zwei Neutrinos

Elektronen und Photonen stellen den elektromagnetischen Anteil dar. Die Photonen haben ihren Ursprung hauptsächlich in der Bremsstrahlung und aus den π^0 -Zerfällen. Bei der Bremsstrahlung entstehen Photonen, da beschleunigte bzw. abgebremste Ladungen Licht emittieren. Ein Photon kann sich im elektromagnetischen Feld des Kerns in ein Elektron und Positron umwandeln, die wieder Bremsstrahlung erzeugen können. Um ein e^+e^- -Paar zu erzeugen, muss ein Photon mindestens die doppelte Ruheenergie eines Elektrons besitzen.

$$E_{min} = 2m_e c^2 \quad (1.2.6)$$

1.3 Cherenkov-Strahlung

Wenn sich ein Teilchen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit c_0 im Vakuum bewegt, besitzt es in einem Medium mit dem Brechungsindex $n > 1$ eine Geschwindigkeit v , die höher ist als die Lichtgeschwindigkeit c in diesem Medium. Unter der Bedingung $v \geq \frac{c}{n}$ wird Cherenkov-Strahlung entlang der Teilchenspur emittiert.

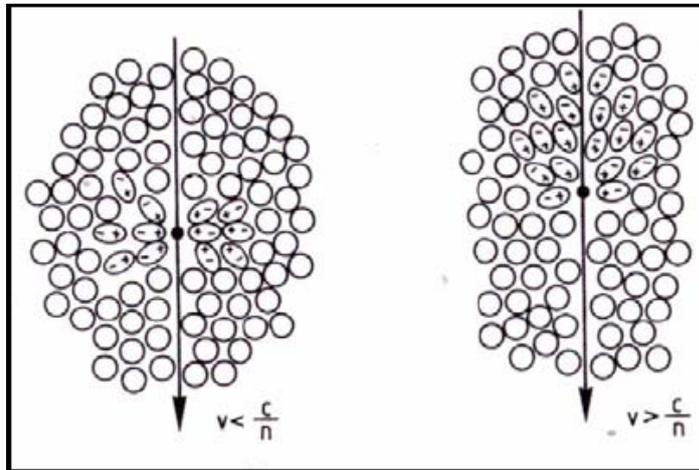


Abbildung 1.10: Polarisation durch den Cherenkov-Effekt, Quelle [TIPIC].

Der Grund liegt in der Polarisierung der Moleküle in dem Medium, sobald ein geladenes Partikel es durchquert. Durch diese Polarisierung bzw. Ladungsverschiebung werden elektromagnetische Wellen ausgesendet. Normalerweise interferieren diese Wellen destruktiv, so dass sich diese gegenseitig auslöschen. Wenn sich das geladene Teilchen jedoch schneller als das Licht bewegt, addieren sich die elektromagnetischen Wellen zu einer Schock-Front und es entsteht ein Lichtkegel in Bewegungsrichtung des einfallenden Partikels.

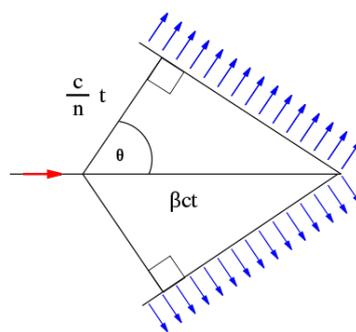


Abbildung 1.11: Cherenkov-Strahlung, Quelle [CEREN].

Daraus lässt sich eine Formel für den Ausbreitungswinkel Θ_C herleiten. Der Brechungsindex n stellt das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten im Vakuum und Medium ($\frac{c_0}{c}$) und β das Verhältnis der Geschwindigkeit des Teilchens zu der Lichtgeschwindigkeit des Vakuums ($\frac{v}{c_0}$) dar.

$$\cos \Theta_C = \frac{\frac{ct}{n}}{\beta ct} = \frac{1}{\beta n} \quad (1.3.1)$$

Die Anzahl N der erzeugten Photonen, die pro Weglänge dx emittiert werden, lassen sich mit einem Brechungsindex $n(\lambda) > 1$ folgendermaßen ausdrücken:

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi\alpha Z^2 \int \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2}\right) \frac{d\lambda}{\lambda^2} \quad (1.3.2)$$

$$\text{mit } \alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137} \quad (1.3.3)$$

α ist hier die Feinstrukturkonstante und Z die Ladung des Teilchens dar. Wird dies nun im Spektralbereich des sichtbaren Lichts integriert (400nm bis 700nm) und angenommen, dass n in diesem Bereich unabhängig von der Wellenlänge ist, so erhält man folgende Lösung.

$$\frac{dN}{dx} \approx 490 \cdot Z^2 \cdot \sin^2(\Theta_C) \frac{1}{cm} \quad (1.3.4)$$

Durch die Detektion der Cherenkov-Strahlung mit Sekundärelektronenvervielfacher ist es möglich Rückschlüsse auf die Art und Energie des Erzeugerteilchens zu ziehen.

Kapitel 2

IceCube

„Wir dürfen das Weltall nicht einengen, um es den Grenzen unseres Vorstellungsvermögens anzupassen, wie der Mensch es bisher zu tun pflegte. Wir müssen vielmehr unser Wissen ausdehnen, so dass es das Bild des Weltalls zu fassen vermag.“
Francis Bacon

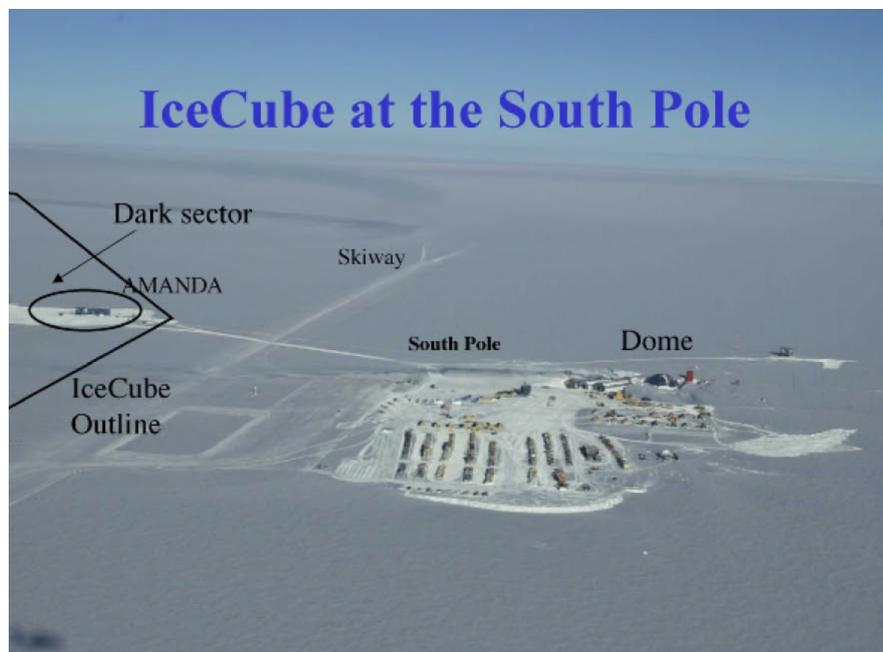


Abbildung 2.1: IceCube am Südpol, Quelle [ICEC5].

Neutrinos erreichen die Erde als primäre Strahlung aus dem Kosmos oder entstehen in der sekundäre Strahlung aus Teilchenzerfällen (siehe Tab. 1.1). Von größerem Interesse sind jedoch die kosmischen Neutrinos. Diese sind ladungsneutral, nahezu masselos, hochenergetisch und wechselwirken nur selten mit Materie. Um diese nachweisen zu können, sind große Detektoren nötig. Der Nachweis funktioniert indirekt, denn das Neutrino bleibt „unsichtbar“. Durch Wechselwirkungen mit Atomkernen (Proton, Neutron) entstehen Elektronen, Myonen oder Hadronenschauer. Die geladenen Teilchen können „sichtbar“ gemacht werden.

Eine mögliche Nachweismethode nutzt den Cherenkov-Effekt. In transparenten Medien, wie Wasser oder Eis, wird entlang der Teilchenspuren Licht im sichtbaren und UV-Bereich, wie im Abschnitt 1.3 beschrieben, erzeugt. Dieses Licht kann mit empfindlichen Lichtsensoren (SEV's) detektiert werden.

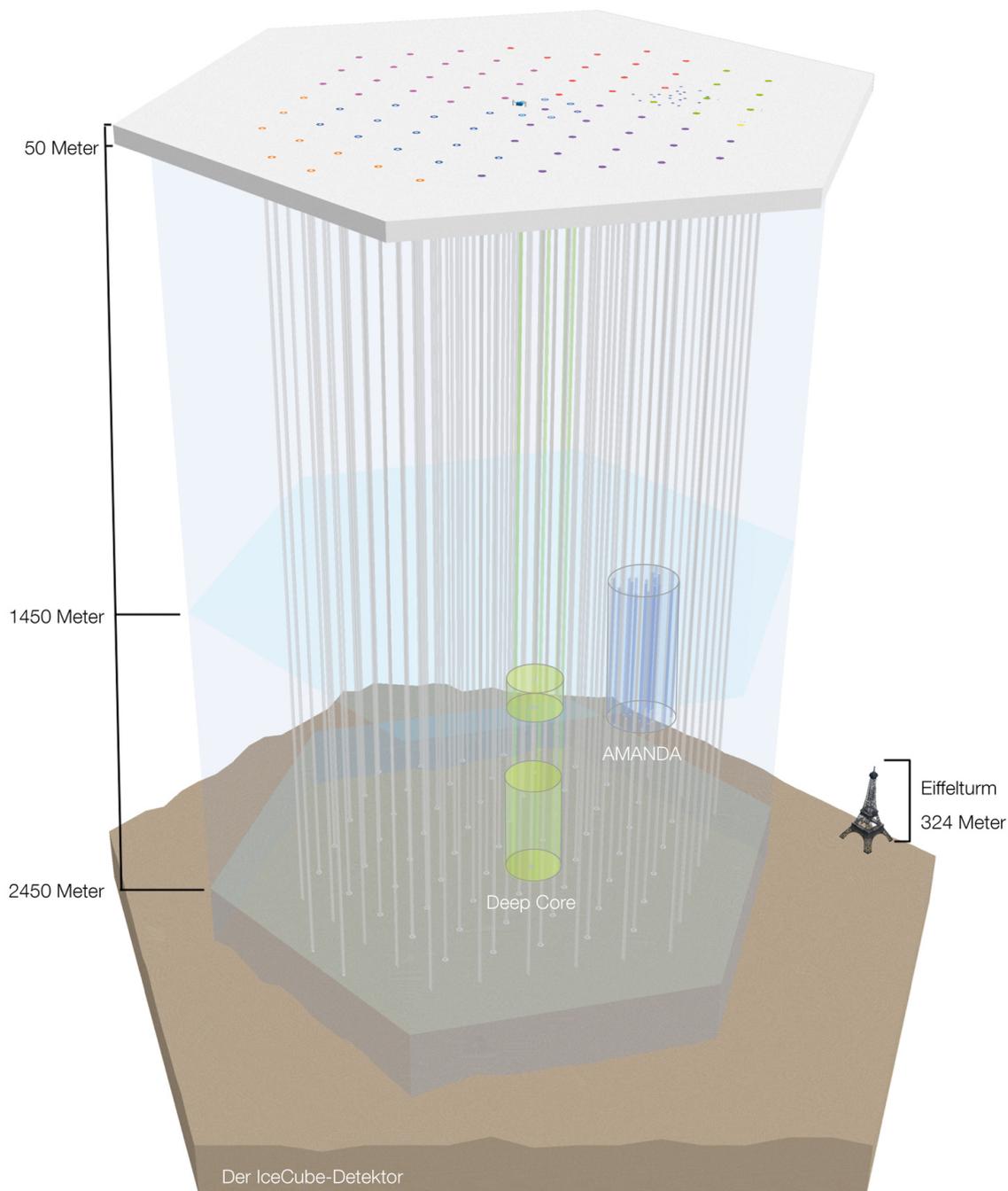


Abbildung 2.2: Aufbau der Detektoranlage von IceCube, Quelle [ICEC4].

Die ersten Experimente, welche kosmische Neutrinos untersuchen, waren Baikal und AMANDA. Der heutzutage größte Detektor, mit einem Volumen von 1km^3 , ist IceCube. IceCube besteht aus zwei Bereichen tief im Eis (In-Ice) und an der Oberfläche (IceTop). Der In-Ice Detektor liegt in 1450m bis 2450m Tiefe. Dort sind im Eis je 60 digitale optische

Module (DOM's) an 80 Kabeln befestigt, welche die Cherenkov-Strahlung im Eis detektieren. IceTop dagegen befindet sich oberhalb des Eises. Es besteht aus 80 Stationen mit 125m Abstand. In jeder Station befinden sich zwei IceTop-Tanks (ITT) mit 10m Abstand, in welchen sich je 2 DOM's befinden. Die DOM's sind kleine Computer, welche unter anderem einen Sekundärelektronenvervielfacher enthalten. Dadurch ist es möglich die Cherenkov-Strahlung geladener Teilchen zu detektieren und auszuwerten. Die DOM's werden im Abschnitt 3.3 näher erklärt.

Ein Problem bei der Detektion der gewünschten Neutrinos stellen die geladenen kosmischen Teilchen dar. Diese schauen auf die Erdoberfläche und sind viel häufiger vorhanden als die Teilchen aus der Neutrino-Wechselwirkung. Da ausschließlich nur hochenergetische Myonen tief in den Erdboden eindringen können, befindet sich der In-Ice-Detektor tief im Eis. Weiterhin dient auch der IceTop-Detektor als Veto für die geladenen kosmischen Teilchen. Gleichzeitig wird aber auch die Eigenschaft der Neutrinos genutzt, die Erde mit kleiner Wechselwirkungswahrscheinlichkeit durchdringen zu können. Somit konzentrieren sich die Detektoren auf Neutrinos, welche von „unten“, d.h. aus Richtung Erde in den IceCube-Detektor kommen. Dies ist möglich, da die DOM's auch die Zeit bei der Detektion übermitteln. Wird nun ein geladenes Teilchen aus Richtung Erde detektiert, so bemerken die DOM's in größerer Tiefe die Cherenkov-Strahlung früher, als weiter oben hängende DOM's. Es werden somit nur Daten betrachtet, die diese Bedingungen erfüllen.

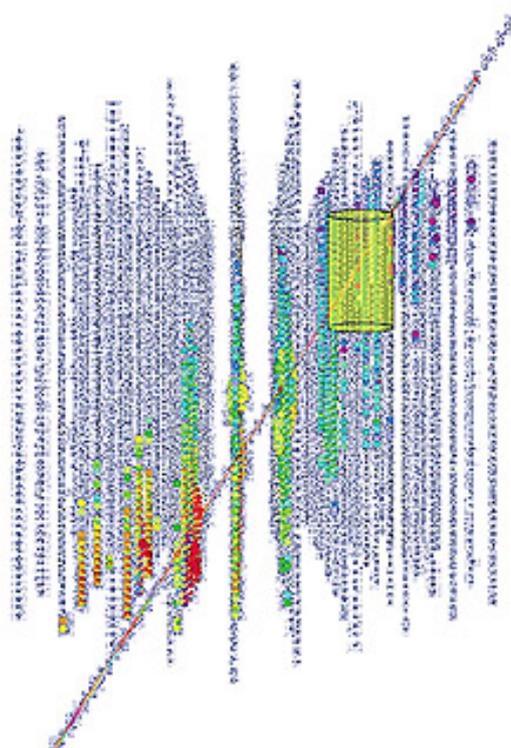


Abbildung 2.3: detektierte Teilchenspur bei IceCube, Quelle [ICEC3].

Mit dem IceCube-Detektor werden Quellen für kosmische Neutrinos gesucht. Weiterhin suchen sie nach schwach interagierenden schweren Partikeln, welche Hinweise auf dunkle

Materie geben könnten. Magnetischen Monopole, exotische Teilchen (seltsame Quarkmaterie) und unerwartete Phänomene sind auch für IceCube von großer Interesse.

2.1 IceTop



Abbildung 2.4: Das Innere eines IceTop-Tanks bei IceCube am Südpol, Quelle [ITTDO].

IceTop ist der Oberflächendetektor von IceCube und besteht aus 160 IceTop-Tanks (ITT's). Diese sind bis zu einer Höhe von 90cm mit Eis gefüllt und haben einen Durchmesser von 1,8m. Über dem Eis befindet sich eine Schicht aus Perlit, welche Licht von unterhalb reflektiert. Außerhalb sind die Tanks lichtdicht ummantelt und im Inneren mit einem reflektiven Material beschichtet, um die Cherenkov-Strahlung an den Wänden zu reflektieren. Durch Messungen mit den Tanks kann auf die chemische Zusammensetzung (TeV - EeV) der kosmischen Strahlung geschlossen werden [MBEIM]. Weiterhin dienen diese Tanks auch als Veto der In-Ice-Detektoren, d.h. In-Ice detektiert keine Teilchen, welche IceTop auch detektiert.

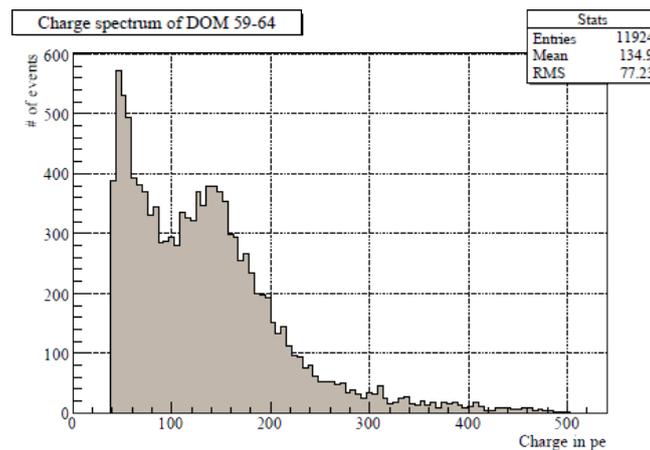


Abbildung 2.5: IceTop-Messung der DOM's 59-64, Quelle [MBEIM].

Die Abbildung 2.5 stellt ein Ergebnis der Messungen bei IceTop dar. In diesem Signal-Ladung-Diagramm sind zwei Peaks erkennbar. Die Signale beginnen bei rund 40pe, was

auf eine Triggerschwelle bei der Messung zurückzuführen ist. Der zweite Peak liegt bei rund 150pe und entstand durch die Detektion der Cherenkov-Strahlung von Myonen in den ITT's. Insgesamt wurden bei allen Messungen Myonen in einem Bereich von 150 bis 250 Photoelektronen (pe) detektiert [VNAHN]. Die Position des Myonpeaks steht für vertikale Myonen und wird auch als 1VEM (vertical equivalent muon). Eine Erklärung zu der Einheit Photoelektronen ist unter 5.3 zu finden.

Kapitel 3

Aufbau des IceTop-Tanks am DESY Zeuthen

„Wer die Geometrie begreift, vermag in dieser Welt alles zu verstehen.“
Galileo Galilei

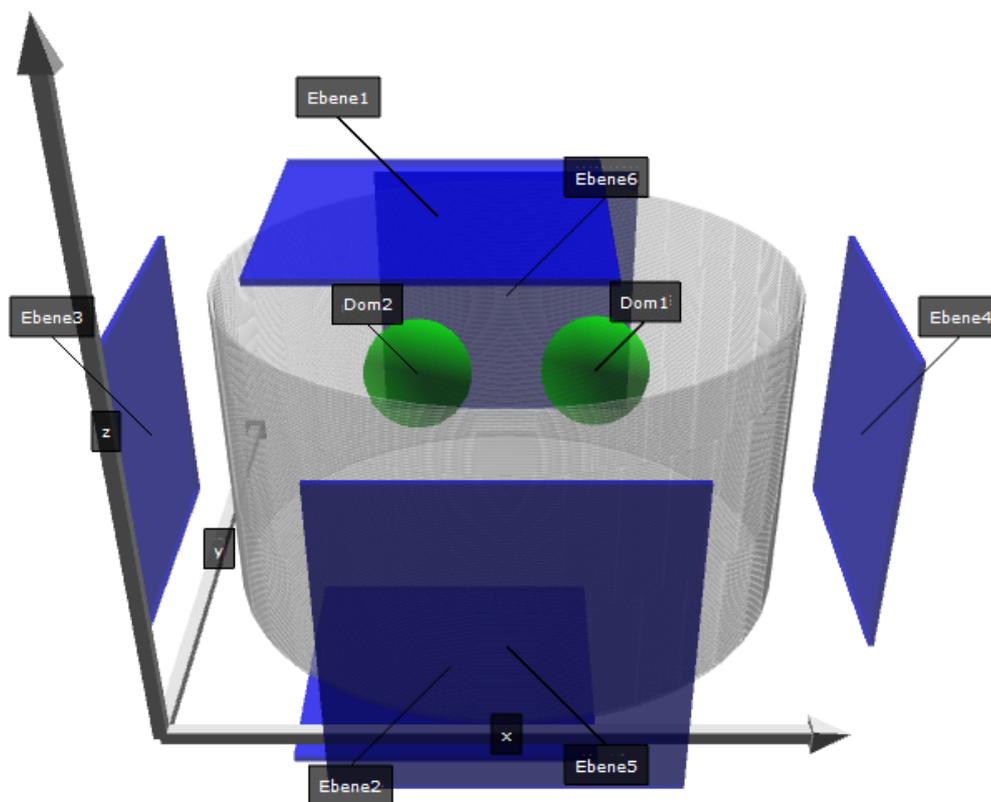


Abbildung 3.1: Dreidimensionale Darstellung des IceTop-Tank's bestehend aus einem zylinderförmigen Tank, 2 OM's und 6 Triggerebenen.

Am DESY Zeuthen wurde ein IceTop-Tank analog zu denen bei IceCube installiert. Dieser ist nicht mit Eis sondern mit Wasser gefüllt. Anfangs wurden Messungen mit dem luftgefüllten Tank durchgeführt und später wurde dieser mit Wasser gefüllt.

Für eine bessere Übersicht und Auswertung wurde ein Koordinatensystem eingeführt. Der Koordinatenursprung (0,0,0) befindet sich, wie in der Abbildung 3.1 zu sehen, außerhalb des

IceTop-Tanks. Der Mittelpunkt des Tanks befindet sich bei den Koordinaten $x=100\text{cm}$ und $y=100\text{cm}$. Der Tankboden liegt durch die Konfiguration unterhalb des Ursprungs bei $z=-5\text{cm}$.

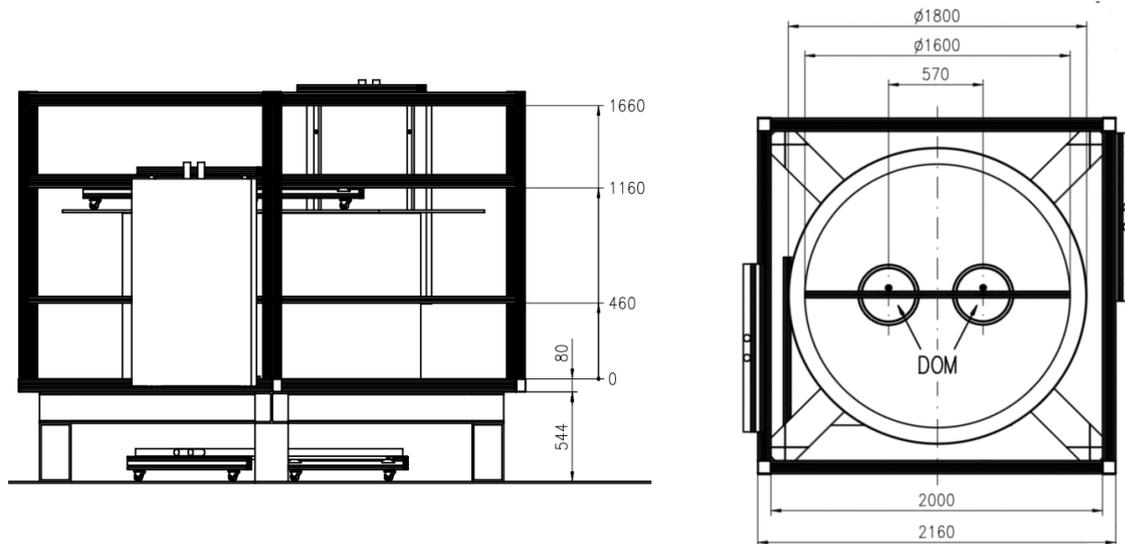


Abbildung 3.2: Dimensionierung des IceTop-Tanks.

In dem zylinderförmigen nach außen isolierten Tank befinden sich zwei optische Module (OM's, in der Abbildung 3.2 als DOM bezeichnet), welche die Cherenkov-Strahlung der sekundären kosmischen Strahlung detektieren und an die ADC-Messeinheit übermitteln. Die Beschreibung zu den OM's ist im Kapitel 3.3 zu finden. Am Tankboden befindet sich eine Leuchtdiode zur Kalibrierung der OM's. Diese ist in einem Plexiglaszylinder eingesetzt und strahlt das Licht diffus ab. Außerhalb des Tanks befindet sich ein Gerüst, an welchem 6 Szintillatorebenen positioniert sind. Diese dienen zum Triggern der einfallenden Teilchen, so dass für verschiedene Richtungen die kosmische Strahlung betrachtet werden kann. Es sind dabei vertikale, diagonale und horizontale Messungen möglich.

3.1 Tank

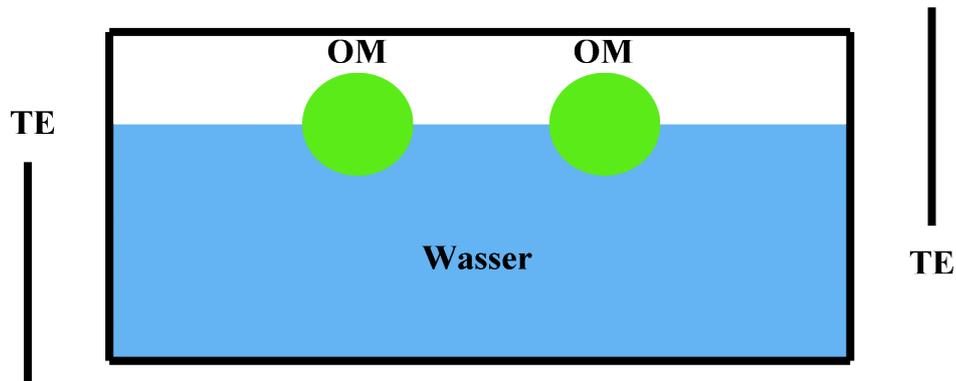


Abbildung 3.3: Darstellung des IceTop-Tanks. TE steht für Triggerebenen und bezeichnet die zur Messung benutzten Szintillatorebenen.

Der Tank hat einen Durchmesser von 180cm und eine Höhe von 105cm. Die Dicke der Wände beträgt 1cm. Bei dem Luft gefüllten Tank wurde die gesamte Höhe von 105cm bei der Auswertung betrachtet und bei dem Wasser gefüllten Tank eine Füllhöhe von 71cm.

Die Tankwände sind im Inneren mit einem Reflexionsfilm beschichtet, so dass die Cherenkov-Strahlung nahezu verlustfrei reflektiert werden kann, bis sie von den OM's detektiert wird. Der Film ist aber nicht homogen aufgebaut.

Vor der Befüllung des Tanks mit Wasser hatte dieses Wasser eine Leitfähigkeit von $850 \frac{1}{\Omega m}$. Während der Tank gefüllt wurde, wurde das Wasser mit 2 großen Patronen der Firma UT&S Umwelttechnik und Service GmbH & Co KG entionisiert. Dadurch lag nur noch eine Leitfähigkeit von rund $100 \frac{1}{\Omega m}$ vor. Die Blasen, welche sich an die OM's, die Diffuser-LED und dem Tankboden abgelagert hatten, wurden entfernt. Das Tanksystem wird mit einer Pumpe betrieben, um das Wasser sauber zu halten. Dies geschieht bei einem Durchlauf von 15 bis 20 Liter/Minute und 0,5 Bar. Die Filterbehälter sind mit Silikon abgedichtet und schwarz verhält, um die Algenbildung zu vermeiden. Nach mehreren Durchläufen sank die Leitfähigkeit auf rund $10 \frac{1}{\Omega m}$.

3.2 Szintillator Ebenen

Wie oben schon erwähnt, sind um den Tank 6 Szintillatorebenen an einem Gerüst verschiebbar befestigt. Ein Szintillator besteht aus einem transparenten Kunststoff, welcher beim Durchgang von energiereichen geladenen Teilchen gebundene Elektronen in den Atomen zu höheren Energien anregt. Beim Rücksprung dieser in den Grundzustand werden Photonen abgegeben, die mittels Lichtleiter in einen Sekundärelektronenvervielfacher geführt werden.

In der Abbildung 3.1 ist unter anderem die Nomenklatur der Szintillatorebenen dargestellt. Die Ebene 1 befindet sich über dem Tank und die Ebene 2 darunter. Sie sind dabei parallel zur x-y-Ebene und haben einen Abstand von 167cm zueinander. Die Ebenen 3 bis 6 sind entsprechend der Abbildung seitlich am Tank befestigt. Die Ebenen 3 und 4 und die Ebenen 5 und 6 haben einen Abstand von 234cm.

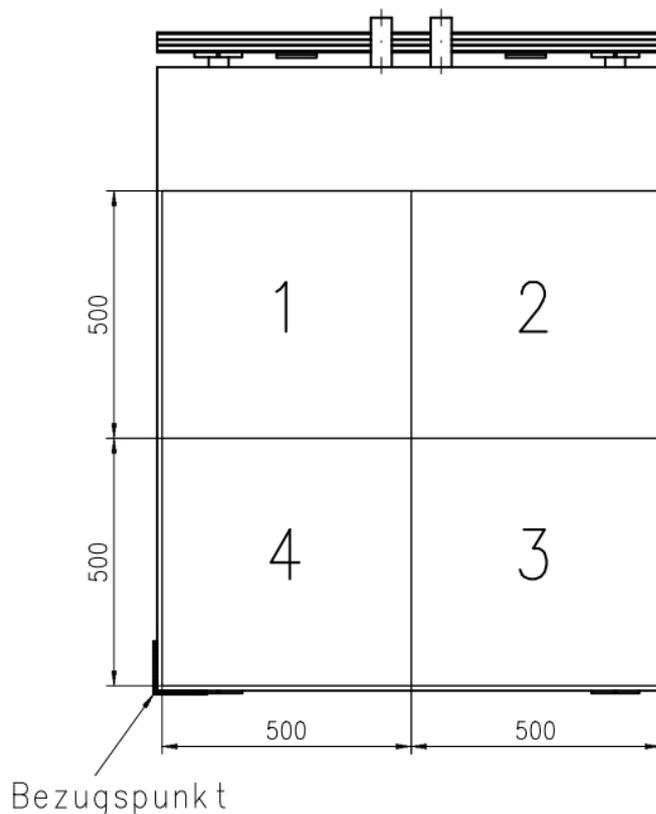


Abbildung 3.4: Aufbau einer Szintillatorebene mit seinen 4 Segmenten.

Jeder dieser Szintillatorebenen ist von einem Aluminiummantel umgeben und bestehen aus vier Segmenten. Diese Segmente sind $50 \times 50 \text{ cm}^2$ groß. Jedes Segment wird über Lichtleiterkabel mit zwei Sekundärelektronenvervielfacher verbunden. Wie in dem Bild 3.4 dargestellt, wurde die untere linke Ecke vom Segment 4 als Bezugspunkt für die Koordinaten der Ebenen im Koordinatensystem verwendet.

3.3 optisches Modul

In dem oberen Teil des IceTop-Tanks am DESY befinden sich zwei optische Module (OM), welche eine abgerüstete Form der IceCube-DOM's darstellen. Diese wurden an einer Halterung befestigt. Der Durchmesser beträgt 35cm, der Abstand zueinander 20cm und der Abstand zur Tankwand 45cm. Deren Mittelpunkte befinden sich somit bei folgenden Positionen:

	x [cm]	y [cm]	z [cm]
OM1	128,5	100	68,5
OM2	71,5	100	67,5

Tabelle 3.1: Positionen der OM's im IceTop-Tank.

Das optische Modul ist eine druckfeste und wasserdichte Glaskugel, in dem sich ein Sekundärelektronenvervielfacher (SEV) befindet. Ein SEV wandelt Photonen, zum Beispiel aus der Cherenkov-Strahlung oder von Szintillatoren, in elektrische Signale um.

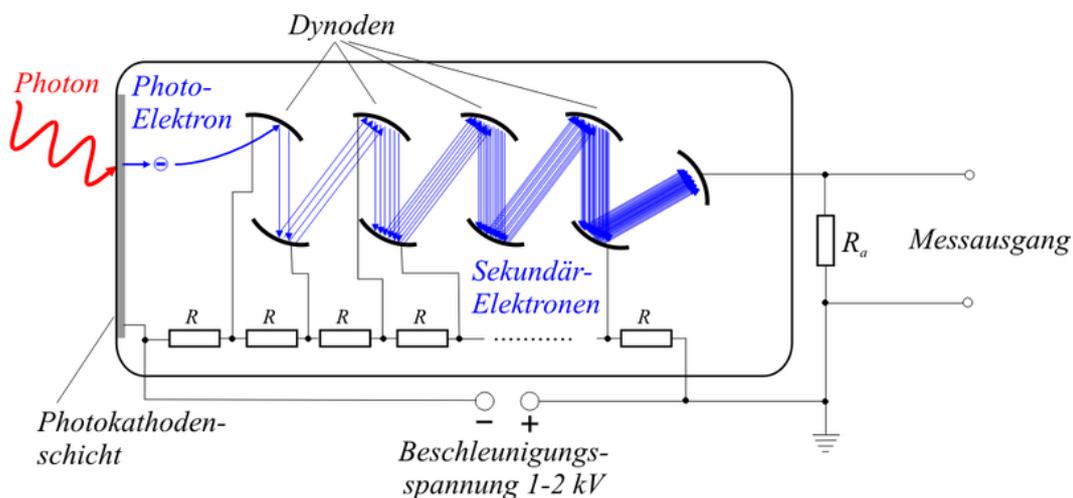


Abbildung 3.5: Aufbau und Funktionsweise eines Photomultipliers, Quelle [PHOMU].

Photonen, die auf die Kathode treffen, erzeugen auf Grund des Photoeffekts freie Elektronen. Dahinter sind Dynoden aufgebaut, die mit einer Spannung (Betriebsspannung) betrieben werden, so dass die Elektronen erst von einer Dynode angezogen werden und dann von der nächsten. Bei der Beschleunigung der Elektronen auf die Dynoden werden beim Zusammenstoß weitere Elektronen aus den Dynoden herausgeschlagen. Dadurch werden bis zur letzten Dynode lawinenartig Elektronen erzeugt, die das Eingangssignal um bis 10000 verstärken (rund 80dB) und somit gemessen werden können.

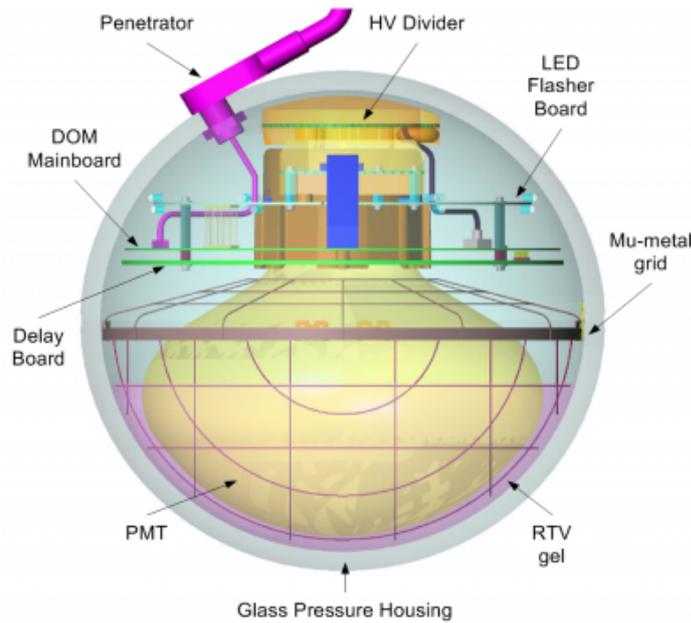


Abbildung 3.6: Aufbau eines DOM's, Quelle [DOMIC].

In der Abbildung 3.6 ist der schematische Aufbau eines DOM's dargestellt, welcher bei IceCube genutzt wird. Innerhalb des 13mm dicken Glasgehäuses mit einem Durchmesser von 35,6cm befindet sich ein R 7081-02 Hamamatsu Photomultiplier mit einem Durchmesser von 25cm und die DOM-Elektronik [ICEC1]. Umgeben ist das Ganze von einem Eisensteg, damit der SEV von dem äußeren Magnetfeld nicht beeinträchtigt wird.

Weitere wichtige Bestandteile sind das Mainboard, das High-voltage-board, das Delay-board und das Flasher-board. Das Mainboard wandelt die Messdaten sofort in digitale Signale um. Die eingehende Spannung wird vom High-voltage-board verstärkt, damit die Betriebsspannung (1 bis 2 kV) des DOM's erreicht wird. In dem Delay-board befindet sich ein 11,2m langes Kabel, welches zur Verzögerung des Signals dient. Das Flasher-board enthält 12 Galliumnitrit LED's (400-420nm), die für die Kalibrierung der benachbarten DOM's Verwendung finden.

Bei den OM's am DESY Zeuthen sind das Delay-board und das Flasher-board nicht enthalten. Eine externe Hochspannungsversorgung liefert die benötigte Spannung an die jeweiligen OM's. Das Delay-Modul verzögert extern die Signale der OM's.

3.4 Signalverlauf

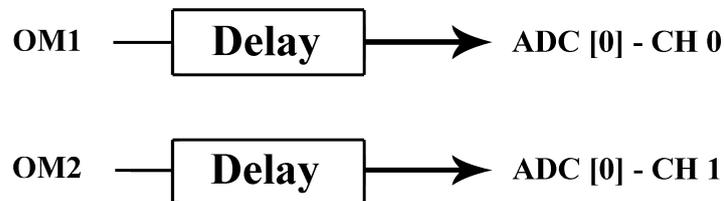


Abbildung 3.7: Datenübertragung der OM's. CH steht für Channel.

In der Darstellung 3.7 ist die Methode der Datenübertragung für die OM's zu sehen. Die Signale der OM's werden unabhängig voneinander durch ein Delay-Modul (*C.A.E.N. 108*), in welchem sie verzögert werden, in den ADC geleitet. Die Signale des OM1 gehen dabei in den ADC[0]-CH0 und die Signale des OM2 in den ADC[0]-CH1 Eingang. CH heißt Channel (Kanal) und steht für einen der acht Eingänge des ADC.

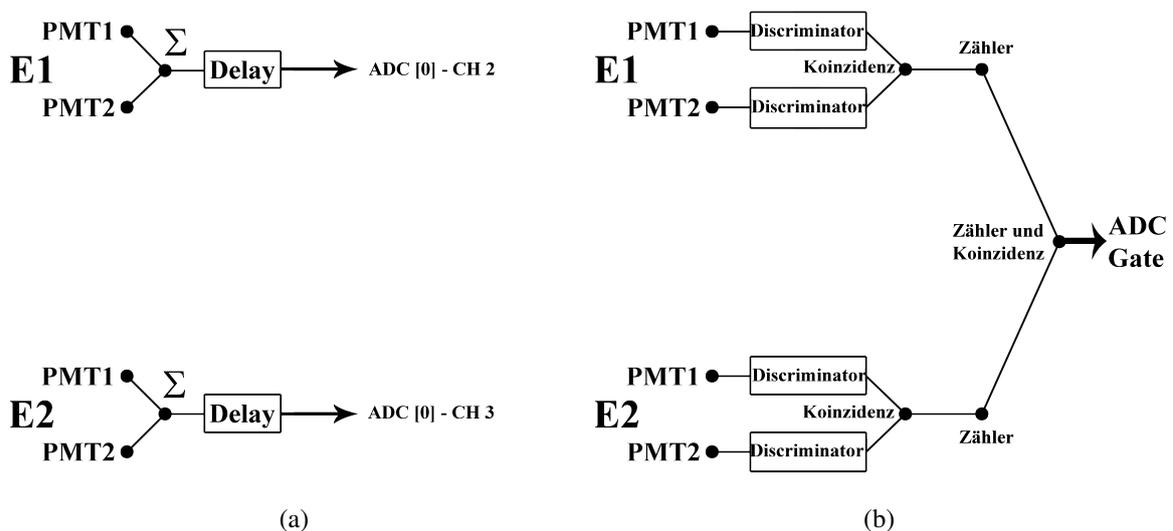


Abbildung 3.8: Datenübertragung der Szintillatorebenen. Die Anschlussmethoden (a) und (b) sind gleichzeitig vorhanden.

In der Figur 3.8 sind zwei gleichzeitig durchgeführte Anschlussmethoden für die Szintillatorebenen dargestellt. Die Signale werden jeweils von zwei verschiedenen Ebenen (E1, E2) mit je zwei Sekundärelektronenvervielfachern (PMT1, PMT2) übermittelt.

Wie oben erwähnt belegen die OM's die Kanäle 0 und 1 (CH0, CH1). Die Signale der PMT's pro Szintillatorebene werden summiert (Σ) und dann durch den Delay verzögert. Im Anschluss führen die Signale der zwei benutzten Triggerebenen (E1, E2) führen in den ADC[0]-CH2 (E1) und ADC[0]-CH3 (E2). In Abbildung 3.8a wird dies dargestellt.

Bei 3.8b ist eine Koinzidenz-Bedingung mit den Szintillatorebenen dargestellt. Die Signale gehen getrennt durch einen Diskriminator (*FD 256 Discriminator SEN*), an welchem die Schwellen für die Signale eingestellt sind. Zu schwache Signale werden dadurch ignoriert,

was eine Reduktion der detektierten Teilchenrate (Teilchen pro Sekunde) zur Folge hat. Im Anschluss gehen die PMT's pro Szintillatorebene in die *C.A.E.N. 3 Fold Logic Unit*. Dort kann zwischen den Einstellungen *And* und *Or* unterschieden werden. Unter *And* werden nur nahezu zeitgleiche Signale (Koinzidenz) beider PMT's weitergeleitet, während bei *Or* jedes Signal beider PMT's weitergeleitet wird. Die Triggersignale werden danach zu einem Zähler (*Quad Scaler and Preset Count-Timer, C.A.E.N. N 145*) geführt, welcher unabhängig von dem Datenaufnahmeprogramm die Signale zählt. Gleichzeitig gehen die Koinzidenzsignale der PMT's beider Ebenen in Koinzidenz, welche dann auch zu einem Zähler und zu dem ADC-Gate geführt werden und ein Gate-Signal für den ADC liefern. Nur wenn ein Gate-Signal den ADC erreicht, messen die Eingänge vom ADC[0].

Bei einer anderen Messmethode ohne Szintillatorebenen wurden nur die OM's benutzt. Dabei führten die Signale der OM's zusätzlich durch je einem Diskriminator und nach einer eventuellen Koinzidenz in das ADC-Gate.

3.5 ADC - C.A.E.N. V265

Der ADC wandelt analoge Eingangssignale in digitale Daten um. Die eingehenden Signale werden bezüglich Zeit und Amplitude quantisiert.

Für jede der 8 Kanäle wird die eingehende Spannung in eine Ladung umgewandelt, solange am Gate der Status *True* herrscht. Die Bedingung dafür ist die Koinzidenz der Triggerebenen am ADC-Gate, wie oben im Bild 3.8a gezeigt. Das Gate öffnet für die Eingänge des ADC je ein Zeitfenster von 200ns, in welchen je ein Signal eingeht. Die ersten 70ns akzeptiert der ADC keine Signale und misst daher nur für die übrigen 130ns. Das ganze wiederholt sich je nachdem wie viele Trigger geliefert werden sollen. Trigger sind Signale, welche die obige Koinzidenz-Bedingung erfüllen.

Das Gesamtintervall der Ladung liegt in einem Bereich von 0 bis 4095 counts. Bei dem benutzten 12-Bit Modus entsprechen 4counts einer Ladung von 1pC.

Die Signalhöhe hängt von der Anzahl der Photonen ab, welche Elektronen im Sekundärelektronenvervielfacher erzeugen. Werden zu viele Elektronen erzeugt (hohes Signal), dann können größere Ladungen entstehen, als der ADC darstellen kann. Diese werden als Overflow bezeichnet und vom ADC als 4095 counts angesehen.

Sollte von einem Messgerät kein Signal ankommen, dann hat dieses kein Licht gesehen. Der ADC nimmt je nach Gerät trotzdem eine minimale Ladung wahr. Diese entsteht durch optisches oder elektronisches Rauschen im SEV. In einem Signal-counts-Diagramm entsteht so ein Peak, welcher als Pedestalpeak bezeichnet wird. Unterhalb dieses Peaks dürfen keine Signale auftauchen, da der Pedestalpeak die Null-Signal-Ladung darstellt.

3.6 LaCoMe

Die entstehenden Ladungen oder Spannungen werden an den Computer zur Datenauswertung geschickt. Das Messprogramm LaCoMe wurde von Michael Winde am DESY Zeuthen programmiert. In dem Programm können Einstellungen, wie Hochspannungen und Ströme für die Geräte, Triggerzahl, usw., festgelegt werden. Das Programm erstellt während der

Messung eine Textdatei, in welcher die counts pro Signal und Kanal hineingeschrieben werden.

```
0 LaCoMe (SD) 2.1 1970/01/01 00:01:20
0      Run      135    100000      0
0      Comment
0 V265[0]      666600      12 0 1 2 3
1 V265[0]      4095  4095   373  105
2 V265[0]      532   454    62   38
3 V265[0]      321   494    58   69
4 V265[0]      455   609    45   53
5 V265[0]      4095  4095   106   82
6 V265[0]      422   440    55   85
7 V265[0]      436   623    72   47
8 V265[0]      323   411    79   70
9 V265[0]      355   486   106   49
10 V265[0]     466   578    35   67
```

Abbildung 3.9: Ausschnitt aus der von LaCoMe erstellten Textdatei.

In der Abbildung 3.9 ist ein Ausschnitt aus einer Textdatei, die während der Messung erstellt wird. Ab der fünften Zeile (Zeile beginnt mit einer 1) sind die Messdaten pro Gerät zu finden. Die letzten vier Zahlen in jeder Zeile stellen die Ladungen für den OM1, OM2, erste Triggerebene und zweite Triggerebene dar.

Kapitel 4

Programm „IceTop-Tank-Visualisierung“

Zur Visualisierung des Aufbaus habe ich das Programm „IceTop-Tank-Visualisierung“ mit Python 2.7 geschrieben. Ein weiteres Programm, was zur Ausführung benötigt wird, ist visual bzw. vpython. „IceTop-Tank-Visualisierung“ visualisiert die Positionen der Ebenen, der OM's und des Tanks und gibt dabei geometrische Informationen, wie Abstände und Winkel, aus. Für eine bessere Orientierung befindet sich ein Koordinatensystem, wie im letzten Kapitel beschrieben, in der Visualisierung. Die Szintillatorebenen haben die Farbe blau, dessen benutzten Segmente sind rot, die OM's sind grün und der Tank ist grau. Je nachdem, ob ein Luft gefüllter oder Wasser gefüllter Tank dargestellt werden soll, hat dieser eine unterschiedliche Höhe (siehe 3.1).

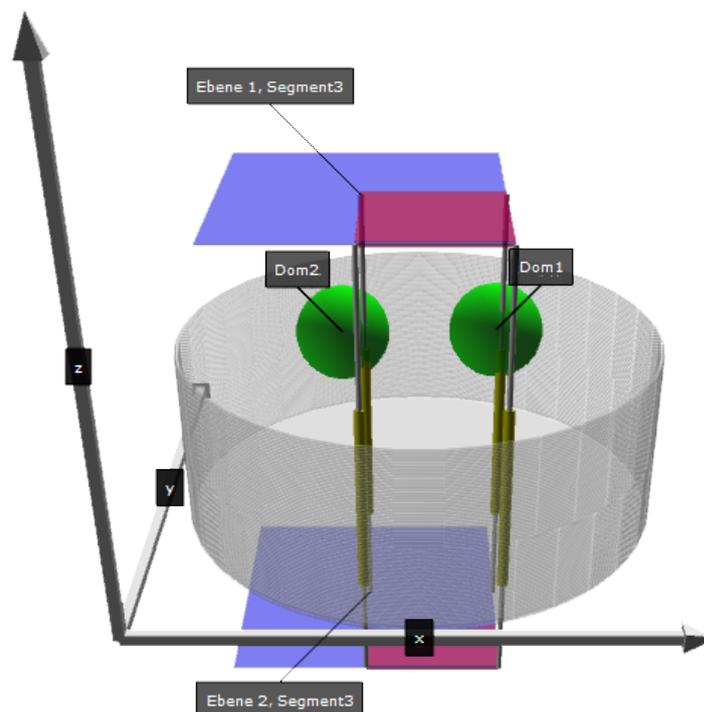


Abbildung 4.1: Darstellung des Programms „IceTop-Tank-Visualisierung“. Hier wurde eine Messung mit den Ebenen 1 und 2 verwendet.

Es müssen zu Beginn des Programms nur die Positionen der Ebenen (Bezugspunkt siehe 3.2) und die benutzten Segmente eingegeben werden. Das Programm erzeugt aus diesen Informationen eine 3D-Darstellung, in welcher der Aufbau von allen Seiten betrachtet werden kann.

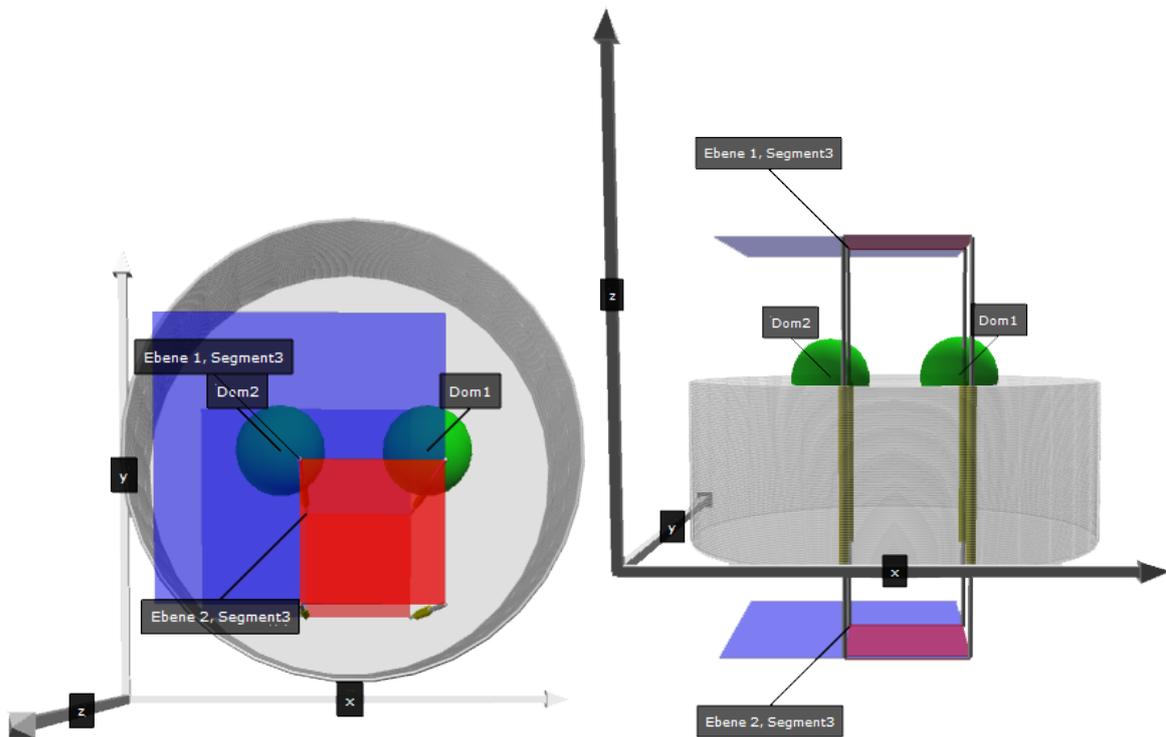


Abbildung 4.2: Darstellungen des Programms aus den Perspektiven x-y und x-z.

Die Abbildungen stellen eine Messung mit den Ebenen 1 und 2 und den Segmenten 3 dar. An den jeweiligen Komponenten befinden sich Beschriftungen, wie „Ebene 1, Segment3“. Die Ecken der Segmente sind mit Linien verbunden und stellen den Bereich dar, in welchem sich die detektierten Teilchen bewegen können. Diese Teilchen müssen dazu aber auch die beiden genutzten Segmente durchqueren. Die gelben Linien veranschaulichen den Bereich im Tank, in welchem die detektierte Cherenkov-Strahlung durch diese Teilchen erzeugt wird.

Das Programm gibt die Längen (l_1, l_2, l_3, l_4) der gelben Linien und die Winkel (α, β, γ) zu den Achsenebenen (x-y-Ebene, x-z-Ebene, y-z-Ebene) aus. Weiterhin wird auch der Azimutwinkel und der Polarwinkel berechnet. Der Azimutwinkel θ ist der Winkel zwischen der Länge l_1 und der z-Achse und der Polarwinkel ist der Winkel zu der Länge l_1 in der x-y-Ebene. All diese Daten speichert das Programm in eine Datei in den Pythonordner. Der Dateiname variiert dabei je nach Messung mit Wasser („Messdaten_Wasser.txt“) oder Luft („Messdaten_Luft.txt“).

Der Quelltext dieses Programms befindet sich im Anhang.

Kapitel 5

Kalibrierung der Sekundärelektronenvervielfacher

Egal in welchem Gebiet der Forschung man sich befindet. Wenn Messungen durchgeführt werden sollen, müssen die zu benutzenden Geräte kalibriert werden. Erst dadurch ist es möglich Ergebnisse von verschiedenen Geräten vergleichen und verstehen zu können. Bei dem IceTop-Tank am DESY Zeuthen mussten die Photomultiplier der OM's und der Szintillatorebenen kalibriert werden. Die Messungen am IceTop-Tank erfolgten daraufhin mit den jeweils bestimmten Arbeitspunkten der PMT's der OM's und Szintillatoren.

5.1 Kalibrierung der Szintillator Ebenen

Bei der Kalibrierung der 6 Szintillatorebenen wurden alle 12 Sekundärelektronenvervielfacher (2 pro Ebene) einzeln betrachtet und mit dem anderen PMT der gleichen Ebene verglichen. Es wurde überprüft, ob die Sekundärelektronenvervielfacher (PMT1, PMT2) der Segmente ähnlich empfindlich sind. Dabei wurden die gemessenen Teilchenraten unter Veränderung der Betriebsspannung und der Triggerschwellen betrachtet. Die Betriebsspannung ist die Hochspannung, mit der die SEV's betrieben werden. Die Triggerschwellen dienen als Filtrierung der Rausch-Signale.

Die Segmente der Ebenen sind $50 \times 50 \text{ cm}^2$ groß. Da ca. 1 Teilchen pro Minute und pro cm^2 den Erdboden erreichen, sollte eine Teilchenrate von rund 40Hz gemessen werden. Der Arbeitspunkt muss also dementsprechend eingestellt werden. Die Signale der Photomultiplier wurden an eine DAQ-Karte gesendet, welche diese Signale mit dem Programm „daq.py“ darstellt.

Bei der Kalibrierung wurden die Änderung der Betriebsspannung mit konstanten Triggerschwellen überprüft. Die Photomultiplier wurden mit 900V betrieben und die Schwellen so eingestellt, dass 40Hz pro PMT vorliegen. Im Anschluss wurden diese Triggerschwellen konstant gehalten und die Betriebsspannung in 10V Schritten bis auf 750V verringert.

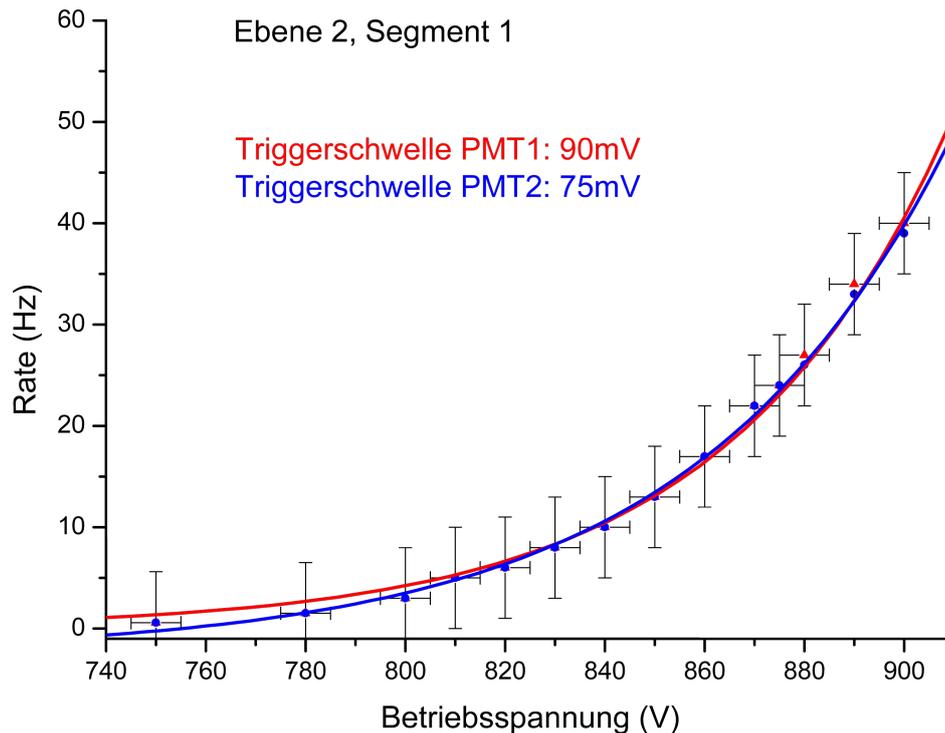


Abbildung 5.1: Teilchenrate unter Veränderung der Betriebsspannung bei konstanten Schwellen für die PMT's am Segment 1 der Ebene 2.

In der Abbildung 5.1 ist die exponentielle Zunahme der Teilchenrate durch Erhöhung der Betriebsspannung für die PMT's am Segment 1 der Ebene 2 dargestellt. Bei allen Segmenten fiel auf, dass die Kurven so gut wie deckungsgleich waren und somit gut zusammen passten.

Für die Ebenen wurden im ITT Triggerschwellen mit rund 30mV gewählt, da die Koinzidenz-Bedingung die unnötigen Signale ignoriert. Die Betriebsspannungen der Ebenen 1 bis 4 liegen bei 900V. Für die Ebenen 5 bis 6 liegt die Betriebsspannung bei 850V, da diese sich in diesem Spannungsbereich optimal verhalten.

5.2 Kalibrierung der OM's

5.2.1 Ermittlung der minimalen Spannung der Diffuser-LED

Die OM's wurden in dem luftgefüllten und wassergefüllten Tank kalibriert. Wie schon erwähnt, befindet sich am Tankboden eine Diffuser-LED. Beim ersten Schritt musste die Spannung der LED so bestimmt werden, dass das Licht im SEV nur ein Photoelektron erzeugt. Die LED wurde dabei mit einem 100MHz Pulsgenerator betrieben. Mit einem Oszilloskop konnte diese Spannung bestimmt werden. Eine weitere Möglichkeit für die Bestimmung der gesuchten Spannung besteht in der Verifizierung der Poissonverteilung.

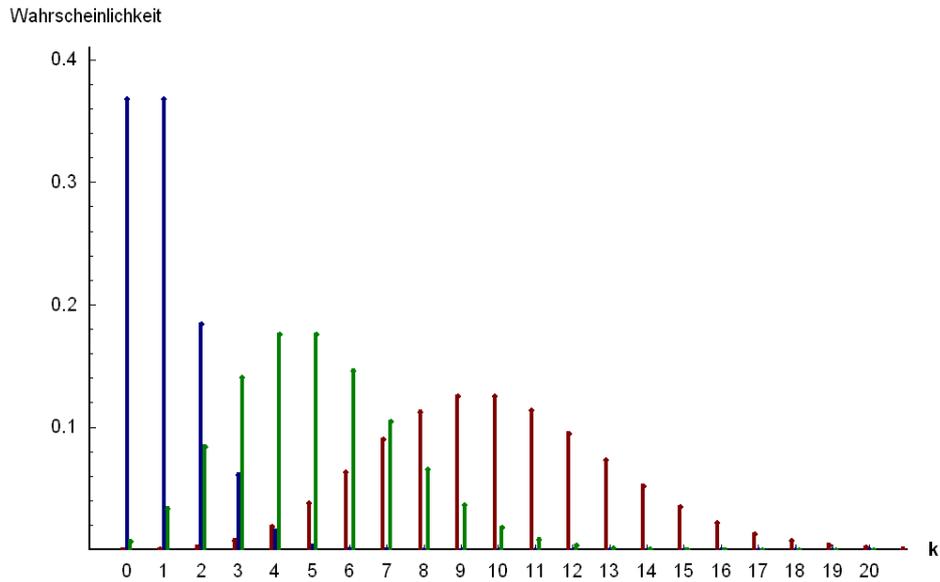


Abbildung 5.2: Poissonverteilung, Quelle [POISS].

In der Abbildung 5.2 ist eine Poissonverteilung dargestellt. Die blaue Kurve stellt den 0. Photoelektronenpeak bzw. den Pedestalpeak, die grüne den 1. Photoelektronenpeak (1.PEP) und die rote den 2. Photoelektronenpeak (2.PEP) dar. Diese Verteilung unterliegt dabei folgender Formel:

$$N_i = \frac{\langle N \rangle^i \cdot e^{-\langle N \rangle}}{i!} \quad (5.2.1)$$

$\langle N \rangle$ ist der Mittelwert und N_i entspricht dem Verhältnis der Teilchenzahl (Z_i) des i -ten Intervalls zu der Anzahl der Gesamtsignale (Z_{ges}). Da bei der gesuchten Spannung nur ein Photoelektron entstehen soll, müssen die Intervalle für mehrere Photoelektronen verschwindend gering sein. Um dies zu erreichen, muss der Pedestalpeak den größten Anteil ausmachen.

Für $i=0$ und $N_0 = \frac{Z_0}{Z_{ges}} = 0,75$ (entspricht 75%) als Beispiel kann $\langle N \rangle$ bestimmt werden und somit auch die restlichen Intervalle.

$$\langle N \rangle = -\ln N_0 = 0,29 \quad (5.2.2)$$

$$N_1 = \langle N \rangle \cdot e^{-\langle N \rangle} = 0,22 \quad (5.2.3)$$

$$N_2 = \frac{\langle N \rangle^2 \cdot e^{-\langle N \rangle}}{2} = 0,03 \quad (5.2.4)$$

$$\vdots \quad (5.2.5)$$

Für diese Beispielkonstellation kann man erkennen, dass die Peaks ab N_2 kaum noch Einfluss ausüben.

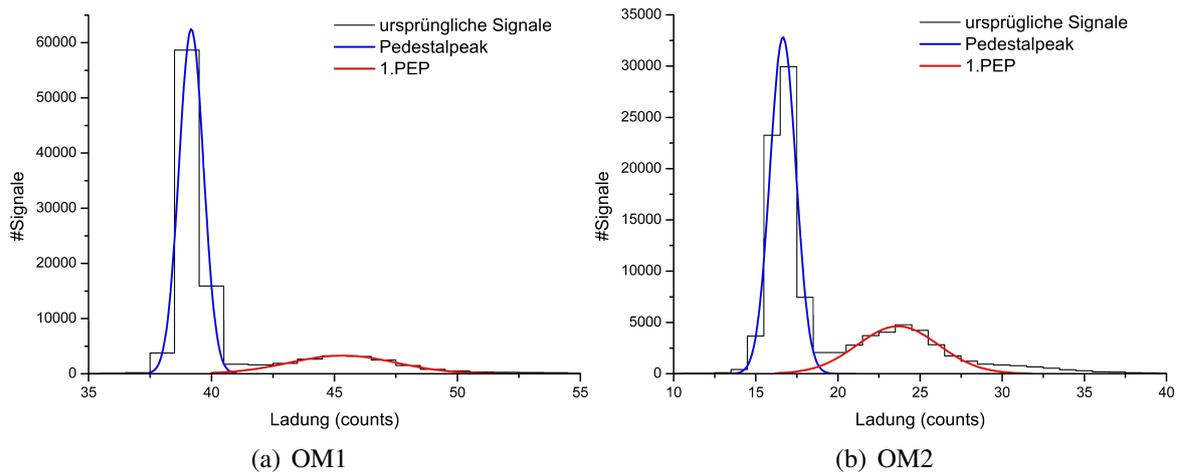


Abbildung 5.3: Signal-Ladung-Diagramm für (a) OM1 und (b) OM2 bei einer LED-Spannung von 2,5V.

Bei einer Betriebsspannung von 2,5V an der LED liegen im Wasser und in der Luft die gewünschten Bedingungen vor. Die Diagramme in der Abbildung 5.3 haben je einen großen Pedestalpeak und einen kleineren 1. PEP. Die Pedestals sind mir rund 70% vertreten und die 1. PEP mit rund 25%. Diese Einstellungen sind notwendig, um die Arbeitspunkte der OM's bestimmen zu können.

5.2.2 Bestimmung der Arbeitspunkte der OM's

Der Schwerpunkt der Kalibrierung liegt in der Bestimmung der Arbeitspunkte. Diese geben den optimalen Betrieb der OM's an. Bei einer LED-Spannung von 2,5V wurden die Betriebsspannungen der OM's in einem Intervall von 1300V bis 1500V variiert. Für jede Konstellation wurde der Abstand zwischen den Pedestalpeak und den 1. PEP ermittelt. Eine Vergrößerung der Betriebsspannung hatte eine Erhöhung des Abstandes und eine Verbreiterung der PEP's zur Folge. Der Pedestalpeak bleibt dabei aber immer an der gleichen Position.

Entsprechend der Gebrauchsanweisung der OM's liegt der Arbeitspunkt bei einer Ladung von $10^7 e$. Da der ADC im 12-Bit Modus betrieben wurde, entsprechen 4 ADC-counts 1pC. Die Peaks müssen somit folgenden Abstand zueinander haben:

$$10^7 e = 10^7 \cdot 1,602177 \cdot 10^{-19} C \quad (5.2.6)$$

$$= 1,602177 pC \quad (5.2.7)$$

$$= 6,408 counts \quad (5.2.8)$$

Für den luftgefüllten und den wassergefüllten ITT wurden analoge Messungen durchgeführt. Bei der Messung mit Luft konnten folgende Abstände der Peaks ermittelt werden, welche in der Abbildung 5.4 zu sehen sind.

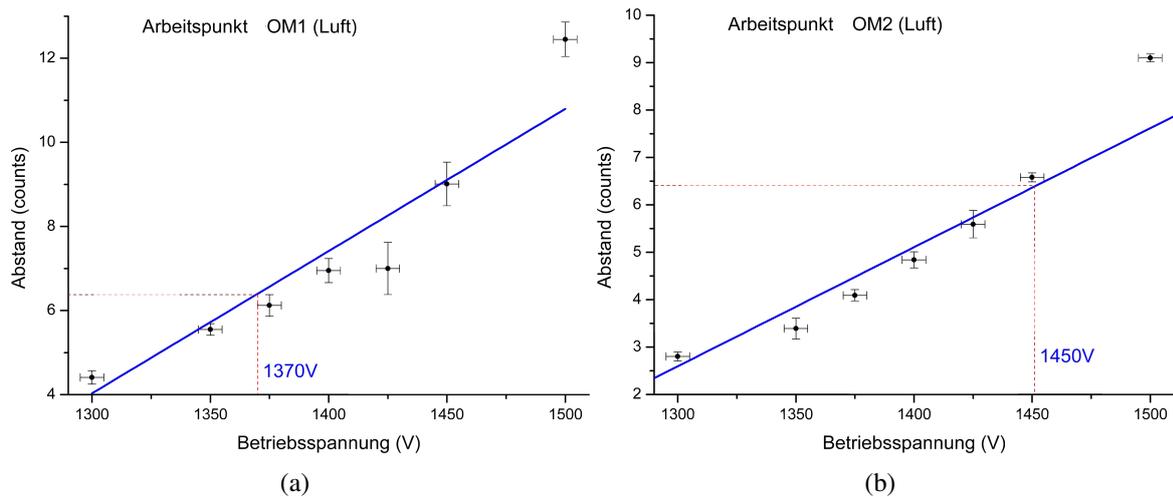


Abbildung 5.4: Kalibrierung der Arbeitspunkte in Luft. Darstellung der Abstände zwischen Pedestalpeak und 1. PEP für verschiedene Betriebsspannungen der OM's.

Wie in der Abbildung zu sehen nimmt der Abstand nahezu linear mit der Betriebsspannung zu. Für den OM1 wurde der erforderliche Abstand von 6,4 counts bei rund 1370V erreicht und bei dem OM2 bei 1450V. Bei der Messung in Wasser konnten, wie in der Abbildung 5.5 zu sehen, folgende Werte ermittelt werden.

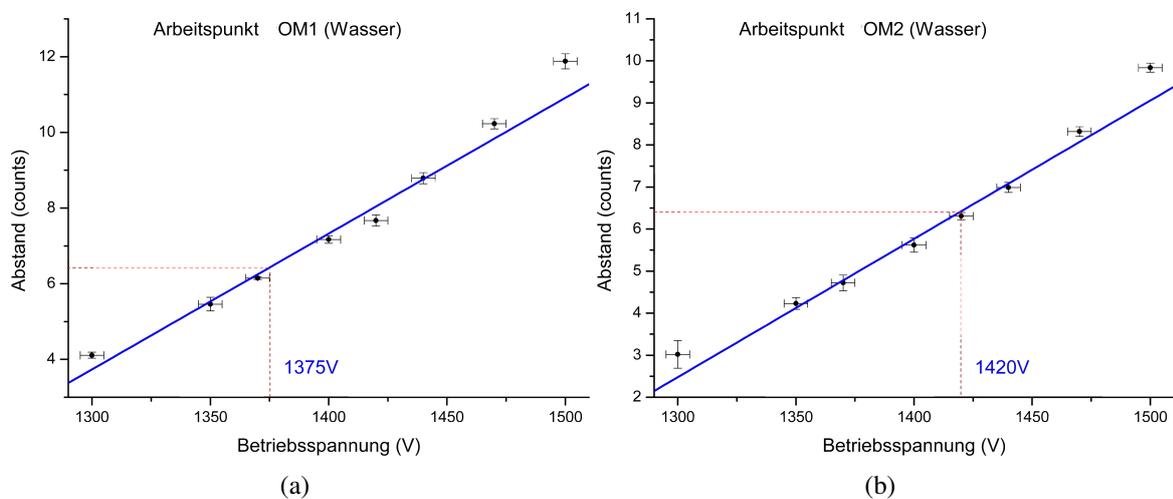


Abbildung 5.5: Kalibrierung der Arbeitspunkte im Wasser. Darstellung der Abstände zwischen Pedestalpeak und 1. PEP für verschiedene Betriebsspannungen der OM's.

In diesen Diagrammen sind wieder lineare Kurven erkennbar. Für den OM1 wurde eine Betriebsspannung von 1375V und für den OM2 eine von 1420V ermittelt. Es ist ein kleines Schwanken in den Arbeitspunkten von Luft und Wasser erkennbar, was auf die unterschiedlichen Medienübergänge Luft-OM und Wasser-OM zurückgeführt werden kann.

5.3 Stabilität der Messungen mit den OM's

Im Laufe der Messungen fiel auf, dass die Positionen der Peaks und somit auch dessen Abstände schwanken. Um dieses Schwanken bestimmen zu können, wurden Kalibrationsmessungen analog wie bei der Kalibrierung der OM's durchgeführt. Die OM's wurden bei den ermittelten Arbeitspunkten in Luft und Wasser und die LED bei einer Spannung von 2,5V betrieben.

Die Messungen in der Luft wurden nacheinander durchgeführt, während die Messungen im Wasser 1 mal wöchentlich ausgeführt wurden. Für die Signale der OM's in Luft und Wasser konnten folgende Positionen und Abstände ermittelt werden.

Messung	Spannung OM1 (V)	Pos. Ped (counts)	Pos. 1. PEP (counts)	Abstand (counts)
70	1370	40±0,02	45,7±0,23	5,7±0,23
71	1370	40,6±0,06	46,7±0,3	6,2±0,3
72	1370	40,9±0,01	46,4±0,05	5,5±0,05
73	1370	40,8±0,01	47,4±0,6	6,6±0,6
74	1370	40,8±0,01	46±0,6	5,2±0,6
∅		40,6±0,02	46,4±0,35	5,8±0,35

Tabelle 5.1: Schwankung der Stabilität am OM1 in Luft.

Messung	Spannung OM2 (V)	Pos. Ped (counts)	Pos. 1. PEP (counts)	Abstand (counts)
70	1450	18,4±0,01	26,1±0,3	7,7±0,3
71	1450	19±0,01	25,1±0,6	6,1±0,6
72	1450	19,7±0,004	26,8±0,2	7,1±0,2
73	1450	19,6±0,005	27,1±0,2	7,5±0,2
74	1450	19,7±0,005	26,5±0,1	6,8±0,1
∅		19,3±0,03	26,3±0,3	7±0,3

Tabelle 5.2: Schwankung der Stabilität am OM2 in Luft.

Messung	Spannung OM1 (V)	Pos. Ped (counts)	Pos. 1. PEP (counts)	Abstand (counts)
102	1375	44,4±0,02	50,8±0,2	6,4±0,2
120	1375	41,4±0,01	47,5±0,1	6,1±0,1
133	1375	39,3±0,02	45,3±0,1	6±0,1
136	1375	39,2±0,02	45,3±0,1	6,2±0,1
∅		41,1±2,6	47,2±2,7	6,2±3,8

Tabelle 5.3: Schwankung der Stabilität am OM1 im Wasser.

Messung	Spannung OM2 (V)	Pos. Ped (counts)	Pos. 1. PEP (counts)	Abstand (counts)
102	1420	$21,1 \pm 0,02$	$28,9 \pm 0,1$	$7,8 \pm 0,1$
120	1420	$19,3 \pm 0,004$	$26,8 \pm 0,1$	$7,5 \pm 0,1$
133	1420	$15,7 \pm 0,02$	$22,6 \pm 0,1$	$7 \pm 0,1$
136	1420	$16,7 \pm 0,03$	$23,7 \pm 0,1$	$7,01 \pm 0,1$
Ø		$18,2 \pm 2,7$	$25,5 \pm 3,1$	$7,3 \pm 4,1$

Tabelle 5.4: Schwankung der Stabilität am OM2 im Wasser.

Da die Messungen in Wasser in größeren Zeitabständen gemessen wurden, ist ein größeres Schwanken erkennbar. Für die Messungen im ITT wurden die Durchschnittswerte angenommen. Die Ladung wird von nun an nicht mehr in counts sondern in Photoelektronen (pe) angegeben. Dabei wird die Achse der Ladung so verschoben, dass der Pedestalpeak bei 0counts liegt. Weiterhin werden die Werte der Ladung durch den Abstand dividiert, so dass zwischen Pedestal und 1. PEP ein Abstand von rund 1pe vorliegt. 1pe entspricht der Ladung die ein Photoelektron aus dem SEV im ADC erzeugt.

Kapitel 6

Messungen im IceTop-Tank

„Die meisten Probleme entstehen bei ihrer Lösung.“

Leonardo da Vinci

Wie in der Einführung erwähnt, erreicht die sekundäre kosmische Strahlung den Erdboden. Es sollte somit eine elektromagnetische, hadronische und myonische Komponente messbar sein. Schon die Messungen bei IceTop am Südpol haben gezeigt, dass die Myonpeaks bei rund 150pe und die Elektronen- und Hadronenpeaks bei niedrigeren Werten liegen.

Unsere Messungen wurden in Luft ($n_l \approx 1$) und Wasser ($n_w \approx 1,33$) durchgeführt. Diese unterschiedlichen Medien haben verschieden starke Einflüsse auf die Cherenkov-Strahlung. Der Brechungsindex von Wasser ist ähnlich wie der von Eis ($n_e \approx 1,31$), so dass ähnliche gute Bedingungen vorliegen ($\frac{dN}{dx} \approx 200 \frac{1}{cm}$, siehe 1.3). In der Luft dagegen werden viel weniger Photonen pro Weglänge ausgesendet ($\frac{dN}{dx} \approx 1 \frac{1}{cm}$), so dass weniger Signale pro Zeiteinheit gemessen werden können.

Im ITT wurden Messungen mit den beiden OM's unter verschiedenen Koinzidenzen durchgeführt. Dabei wurden die Szintillatorebenen noch nicht verwendet. Nach diesen Messungen wurden die Triggerebenen mit einbezogen. Durch verschiedene Koinzidenzen mit den Szintillatorebenen konnte eine Richtungsselektion der kosmischen Strahlung durchgeführt werden.

6.1 Trigger mit den OM's ohne Szintillatorebenen

Ausschließlich unter Verwendung beider OM's wurden diese Messungen durchgeführt. Hier wird die im Wasser erzeugte Cherenkov-Strahlung von Teilchen aus allen Richtungen betrachtet, wobei die vertikale Komponente den Hauptteil ausmacht.

Für die OM's wurden verschiedene Koinzidenzen und Triggerschwellen benutzt. In den ersten beiden Fällen wurde bei einer Triggerschwelle von 50mV erst auf den OM1 und dann auf den OM2 getriggert, d.h. es wurden nur Signale genommen, den der getriggerte OM wahrnimmt.

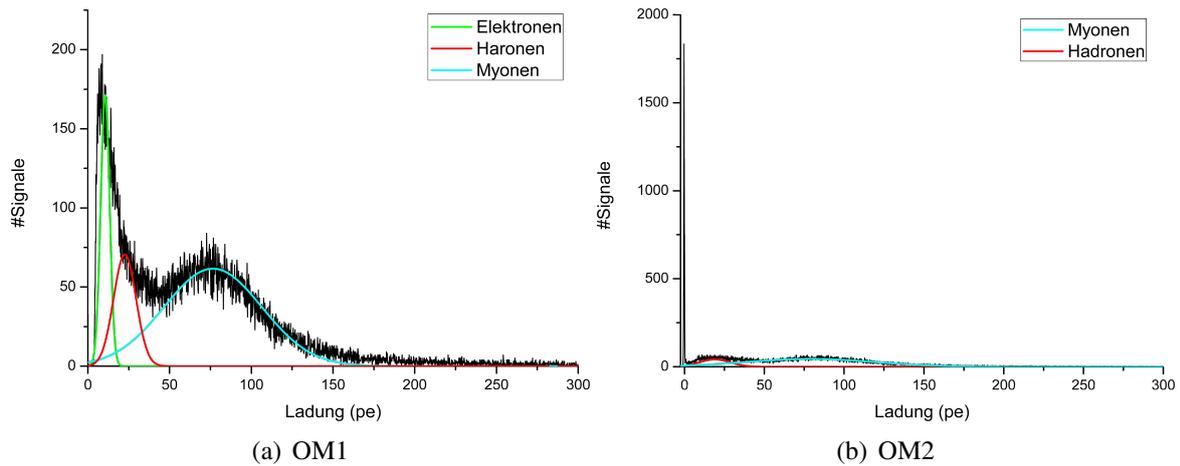


Abbildung 6.1: Trigger von OM1 bei 50mV Triggerschwelle.

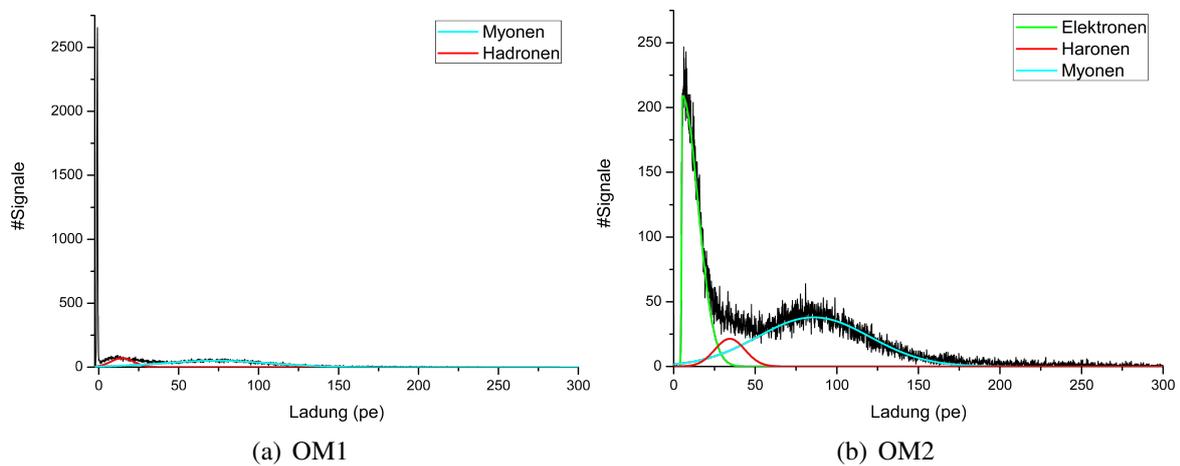


Abbildung 6.2: Trigger für OM2 bei 50mV Triggerschwelle.

In den Abbildungen 6.1 und 6.2 sind jeweils 3 Peaks erkennbar. Die Diagramme 6.1b und 6.2a der nichtgetriggerten OM's können in 3 Bereiche unterteilt werden:

- Pedestal: 0-3pe
- Hadronen: 3-50pe
- Myonen: ab 50pe

Dass es sich im Bereich 3-50pe um Hadronen handelt, ist bisher eine Annahme. Signale, welche der nichtgetriggerte OM aus den jeweiligen Bereichen wahrnimmt, sind im anderen OM in den entsprechenden Peaks zu finden. Jeweils beide OM's registrieren einen Hadronenpeak und einen Myonenpeak. Jedoch der OM, auf dem getriggert wurde, nimmt einen Elektronenpeak und der andere OM nimmt nur einen Pedestalpeak wahr. Wenn der eine OM also Licht von Elektronen detektiert, sieht der andere OM das Licht nicht.

Die nächste Messung wurde analog zu den vorherigen durchgeführt, jedoch wurde die Triggerschwelle auf 100mV erhöht.

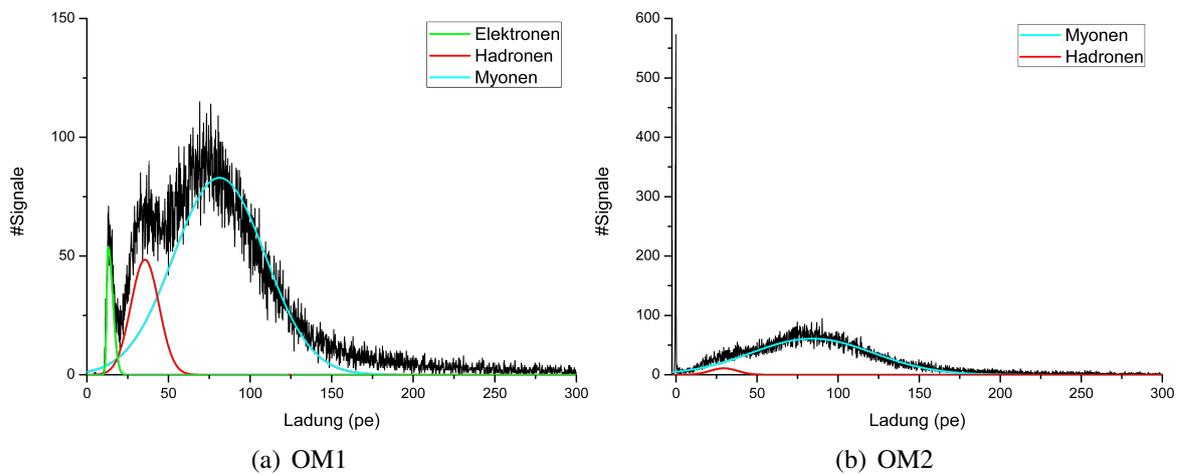


Abbildung 6.3: Trigger für OM1 und 100mV Triggerschwelle.

Die Abbildung 6.3 zeigt analoge Peakverteilungen, wie die beiden Abbildungen davor. Durch die erhöhte Triggerschwelle nimmt der Elektronenanteil und somit auch der Pedestanteil stark ab. Das liegt daran, dass eine Erhöhung der Triggerschwelle mehr niederenergetische Signale ausschließt.

In der nächsten Abbildung wurde bei 100mV auf beide OM's getriggert.

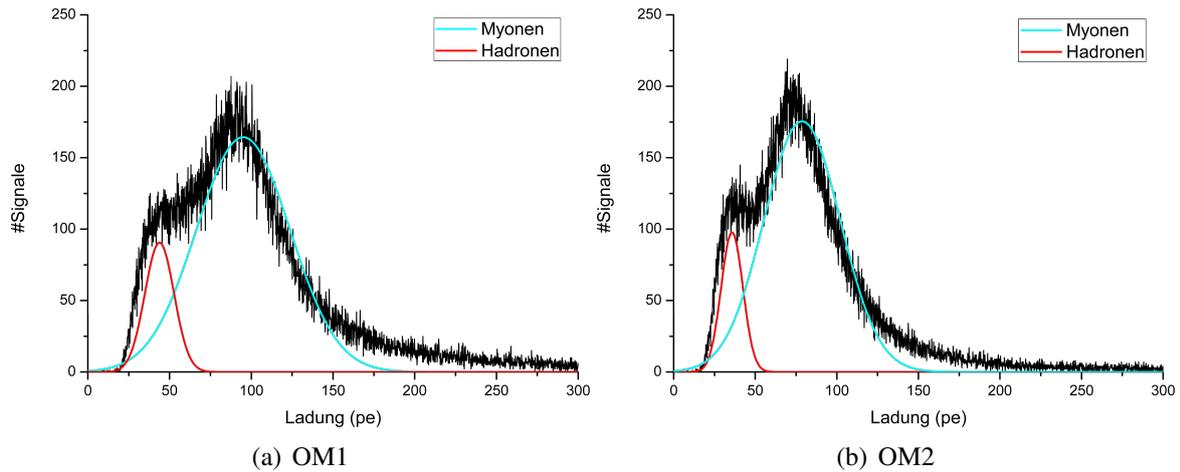


Abbildung 6.4: Trigger für beide OM's bei einer Triggerschwelle von 100mV.

Hier ist eindeutig erkennbar, dass beide Diagramme der Abbildung 6.4 keinen Elektronen und Pedestalpeak besitzen. Dies bekräftigt die Vermutung, dass nur ein OM die Elektronen wahrnehmen kann.

Abbildung	Elektronen (pe)		Hadronen (pe)		Myonen (pe)	
	Pos	Breite	Pos	Breite	Pos	Breite
6.1a	$10,6 \pm 0,2$	$3,2 \pm 0,1$	$22,6 \pm 0,2$	$8 \pm 0,2$	$76,5 \pm 0,4$	$35,2 \pm 0,3$
6.1b			$19 \pm 0,2$	$11,5 \pm 0,3$	$78,9 \pm 0,5$	$47,4 \pm 0,5$
6.2a			$14,7 \pm 0,3$	$8,3 \pm 0,3$	$73 \pm 0,4$	$39,3 \pm 0,6$
6.2b	$5,3 \pm 0,2$	$11,3 \pm 0,3$	$34,4 \pm 0,4$	$11 \pm 0,4$	$86 \pm 0,7$	$40,4 \pm 0,4$
6.3a	$13 \pm 0,1$	$4,6 \pm 0,1$	$35,6 \pm 0,4$	$10,1 \pm 0,2$	$81,3 \pm 0,5$	$33 \pm 0,3$
6.3b			$29,4 \pm 0,2$	$20,8 \pm 0,8$	$84 \pm 0,3$	$44,3 \pm 0,4$
6.4a			$43,9 \pm 0,3$	$10,5 \pm 0,2$	$95,1 \pm 0,4$	$33,7 \pm 0,3$
6.4b			$35,8 \pm 0,2$	$7,9 \pm 0,1$	$78,7 \pm 0,4$	$27,6 \pm 0,2$

Tabelle 6.1: Positionen und Breiten der Peaks für die Messungen ohne Triggerebenen.

In der Tabelle 6.1 wurden die Positionen und Breiten der Peaks von den Elektronen, Hadronen und Myonen dargestellt. Die Positionen und Breiten variieren nur gering. Die Position der Myonpeaks ist geringer, als die der Peaks bei IceTop, welche bei rund 150pe bis 250pe liegen. Dies kann einerseits auf die geringere Füllhöhe des Wasser zurückgeführt werden, andererseits aber auch auf unterschiedliche Umstände des ITT als bei IceTop.

6.2 Untersuchungen mit den OM's und Szintillatorebenen

Die zweite Methode der Messungen am ITT geschah mit Szintillatorebenen. Durch Koinzidenzen ausgewählter Ebenen ist es möglich die kosmische Strahlung aus bestimmten Richtungen zu untersuchen. Es wurden vertikale, diagonale und horizontale Richtungsselektionen durchgeführt. In der Auswertung wird jedoch nicht die diagonale Richtung besprochen, da diese eine Mischung aus der vertikalen und horizontalen Richtung darstellt. Der Schwerpunkt der Untersuchung lag bei den vertikalen Messungen. Weiterhin können die Messungen noch zwischen einem luftgefüllten und wassergefüllten Tank unterschieden werden.

6.2.1 vertikale Messungen

Bei den vertikalen Messungen wurden die Ebenen 1 und 2 zur Detektion benutzt (siehe 3.2). Es wird somit die kosmische Strahlung betrachtet die nahezu senkrecht auf den Erdboden auftrifft. Die folgende Abbildung zeigt einen Vergleich von einer Messung in Wasser und in Luft. Dabei liegt eine ähnliche Ebenenkonstellation vor.

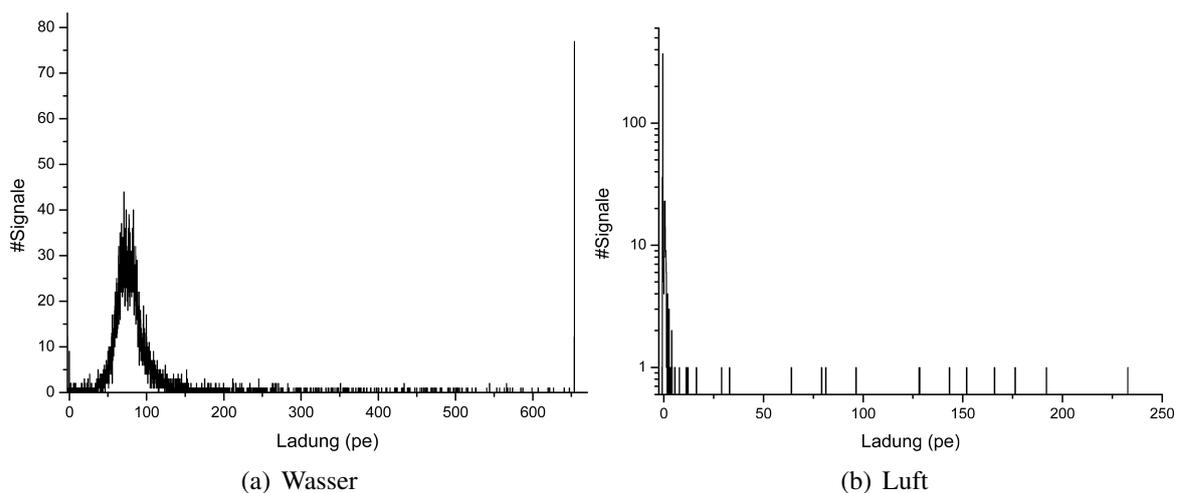


Abbildung 6.5: Vergleich der Messungen r93 (Wasser) und r40 (Luft) mit OM1.

Bei Messungen mit Luft ist hauptsächlich der Pedestalpeak und niedere PEP vorhanden. Bei einem wassergefüllten Tank liegt dagegen hauptsächlich der Myonenpeak vor. Die Elektronen und Hadronen sind auch kaum noch vorhanden. Dies kann daran liegen, dass die Elektronen und teilweise auch die Hadronen im Wasser stecken bleiben bzw. abgebremst werden. Dadurch können diese Teilchen nicht die zweite Szintillatorebene erreichen, so dass diese die Koinzidenz-Bedingungen nicht erfüllen.

Für die Ebenen 1 und 2 werden nun verschiedene Konstellationen betrachtet. Dabei wird auf ein Treffen oder Verfehlen der OM's eingegangen sowie auch auf unterschiedliche Abstände der OM's zu den Teilchenspuren.

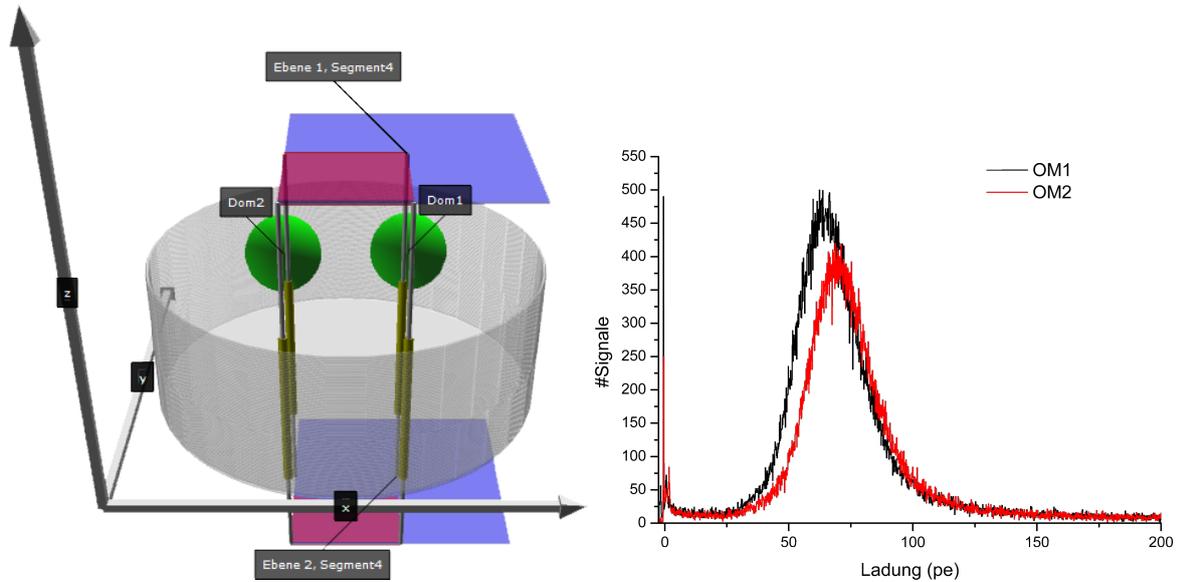


Abbildung 6.6: Messung r135 im Wasser ohne OM's zu treffen. Diese nehmen dabei einen ähnlichen Abstand zu den Teilchenspuren ein.

Die Abbildung 6.6 zeigt eine Messung in Wasser, bei welchem die OM's nicht getroffen wurden, die Teilchenspuren jedoch einen ähnlichen Abstand zu den OM's haben. Eine vergleichbare Messung in Luft wurde schon in dem Diagramm 6.5b gezeigt. Das Bild 6.6a zeigt eine 3D-Darstellung dieser Messung. Das Diagramm 6.6b enthält die Messung beider OM's. Wie erwartet unterscheiden sich die Positionen und Breiten der Myonpeaks nur gering.

Messung	Myonen (pe) OM1		Myonen (pe) OM2	
	Pos	Breite	Pos	Breite
r135	$65,1 \pm 0,1$	$12,3 \pm 0,1$	$70,6 \pm 0,1$	$13 \pm 0,1$

Tabelle 6.2: Positionen und Breiten der Myonpeaks (r135).

Im Vergleich zu den Messungen ohne Triggerebenen weichen die Positionen der Myonpeaks nur gering voneinander ab. Die Breiten der Peaks dagegen haben sich stark verringert. Eine Ursache dafür kann der Mangel an Elektronen und Hadronen sein. Mit Triggerebenen werden hauptsächlich nur noch Myonen detektiert, während ohne Triggerebenen Myonen, Elektronen und Hadronen detektiert werden.

Bei der nächsten Konstellation wurden die OM's ebenfalls nicht getroffen, jedoch haben die Teilchenspuren einen unterschiedlichen Abstand zu den OM's.

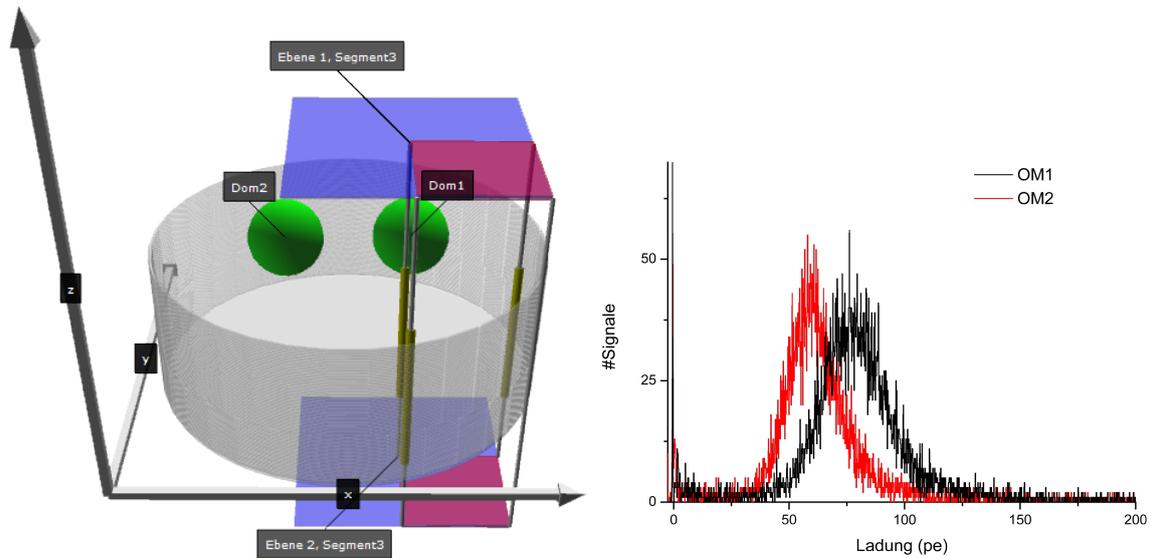


Abbildung 6.7: Messung r144 im Wasser ohne OM's zu treffen. Diese nehmen dabei unterschiedliche Abstände zu den Teilchenspuren ein.

Entsprechend der 3D-Darstellung ist erkennbar, dass der OM1 näher an den Teilchenspuren liegt als der OM2. Dies hat Auswirkungen im Diagramm 6.7b. Der OM1 sieht den Myonenpeak bei höheren pe als der OM2. Die Breiten der Peaks haben sich dagegen kaum verändert. Der Abstand zu den OM's nimmt somit Einfluss auf die Anzahl der erzeugten Elektronen im SEV ein.

Messung	Myonen (pe) OM1		Myonen (pe) OM2	
	Pos	Breite	Pos	Breite
r144	$77,6 \pm 0,3$	$14 \pm 0,2$	$60 \pm 0,2$	$11 \pm 0,1$

Tabelle 6.3: Positionen und Breiten der Myonpeaks (r144).

In dem nächsten Fall wird das Signalverhalten untersucht, bei denen jeweils nur der OM1 oder der OM2 getroffen wurden.

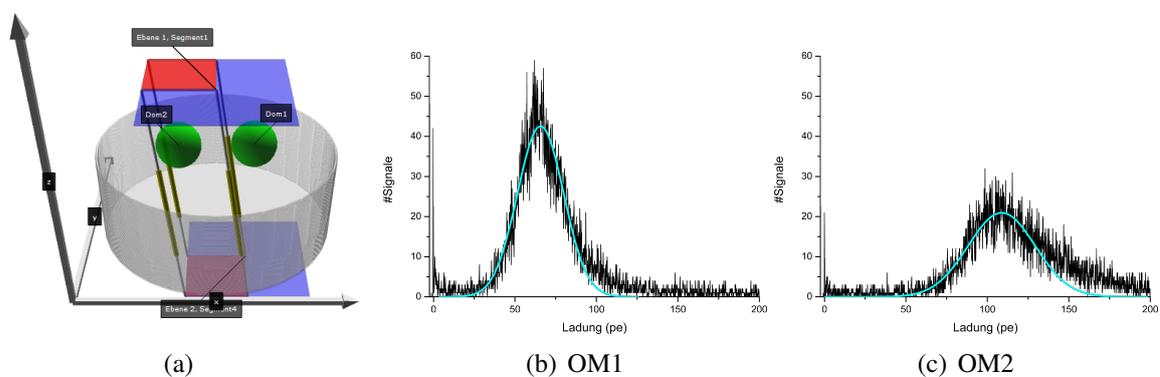


Abbildung 6.8: Messung r117 im Wasser mit Treffer am OM2.

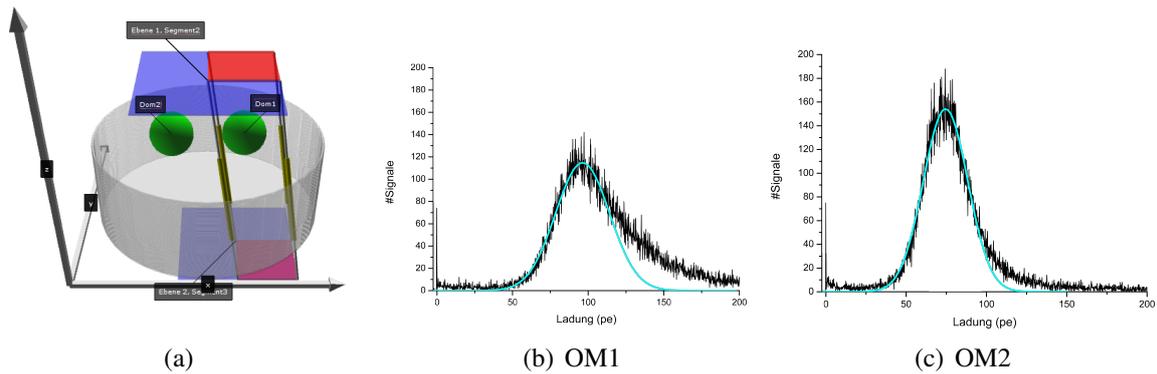


Abbildung 6.9: Messung r118 im Wasser mit Treffer am OM1.

In den Abbildung 6.8 und 6.9 ist gut erkennbar, dass die Myonpeaks der getroffenen OM's höhere Positionen und Breiten besitzen. Die Positionen und Breiten der nicht getroffenen OM's verhalten sich wie in den Messungen zuvor. Es ist möglich, dass in dem Glasgehäuse oder in der Photokathode der OM's zusätzliche Effekte entstehen. Da normales Glas einen Brechungsindex von $n_G \approx 1,5$ besitzt, erfüllt es gut die Bedingungen Cherenkov-Strahlung beim Teilchendurchtritt zu erzeugen. Diese zusätzlichen Signale können somit eine Verschiebung der Peaks verursachen.

Messung	Myonen (pe) OM1		Myonen (pe) OM2	
	Pos	Breite	Pos	Breite
r117	$65,7 \pm 0,2$	$14,2 \pm 0,3$	$109 \pm 0,2$	$20,6 \pm 0,1$
r118	$96,3 \pm 0,2$	$17,8 \pm 0,4$	$74,5 \pm 0,1$	$13,9 \pm 0,2$

Tabelle 6.4: Positionen und Breiten der Myonpeaks der Messungen r117 und r118.

Da bei diesen Messung auch der unterschiedliche Abstand der OM's zu den Teilchenspuren Einfluss ausübt, werden nun ähnliche Messungen in Luft betrachtet.

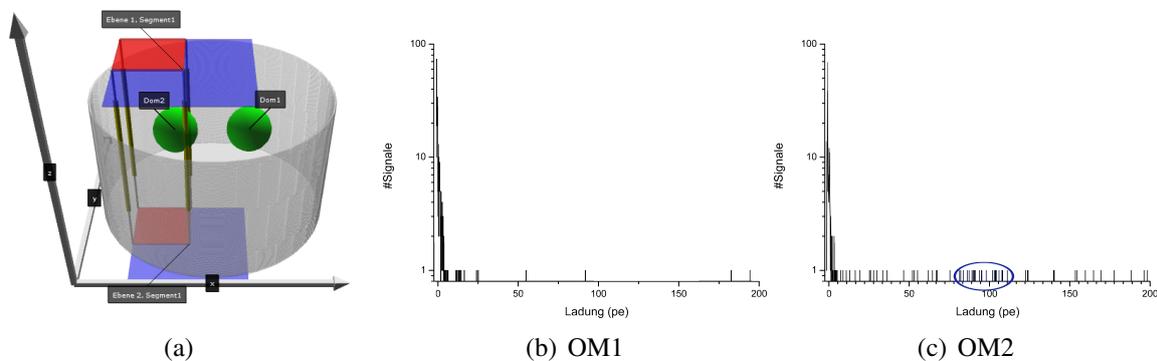


Abbildung 6.10: Messung r35 in Luft mit Treffer am OM2.

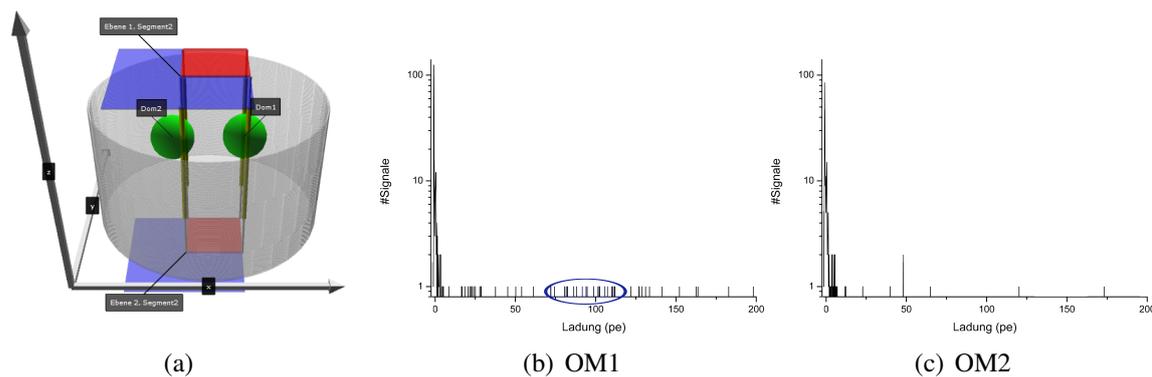


Abbildung 6.11: Messung r36 in Luft mit Treffer am OM1.

Bei den Messungen r35 und r36 wurde der OM1 oder der OM2 getroffen. Die OM's wurden bei diesen Ebenenkonstellationen nur teilweise getroffen, so dass keine Peaks erkennbar sind. Jedoch liegen bei den getroffenen OM's mehr Signale im Bereich des Myonenpeaks bei rund 100pe vor.

Eine weitere Messung, bei welcher der OM2 zu 100% getroffen wird, liegt in folgender Abbildung 6.12 vor.

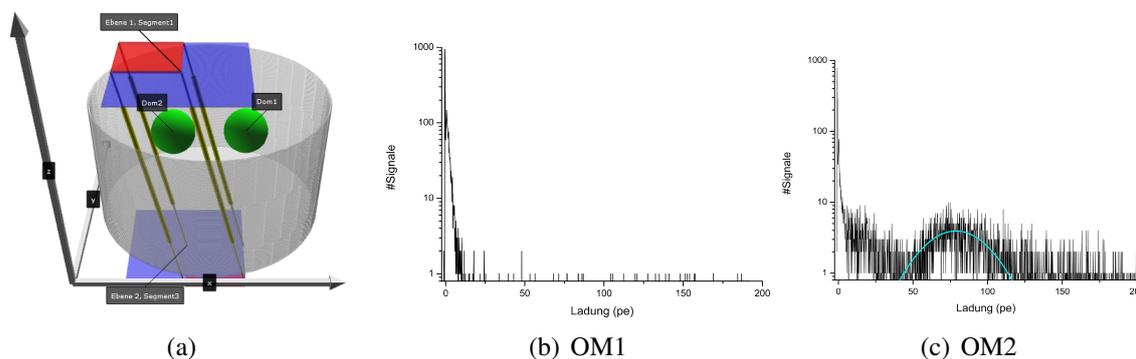


Abbildung 6.12: Messung r41 in Luft mit Treffer am OM2.

Durch einen besseren Treffer des OM2 sind auch hier in Luft Peaks erkennbar. Dabei fallen zwei Peaks im Myonen- (80pe) und Elektronen-Hadronen-Bereich (20pe) auf. Durch das Glas oder der Photokathode der getroffenen OM's werden somit auch hier zusätzliche Signale erzeugt.

Messung	Myonen (pe) OM2	
	Pos	Breite
r41	$78,8 \pm 1$	$21,1 \pm 2$

Tabelle 6.5: Position und Breite des Myonenpeaks der Messung r41 am OM2.

6.2.2 horizontale Messungen

Bei diesen Messungen wurden die Ebenen 3, 4, 5 und 6 benutzt. Diese wurden dabei mit einem Attenuator durchgeführt. Dieser sorgte dafür, dass die Ladung um 13,4dB bzw. um einen Faktor 4,7 verringert wurde. Dies war nötig, da sonst die meisten Signale (80%) im Overflow vorliegen würden. Der ITT ist von fast allen Seiten mit Häusern und Mauern umgeben, welche störende Effekte, wie Schauer, erzeugen können. Da jedoch nicht genug Messungen durchgeführt wurden, können dazu keine genauen Aussagen getroffen werden.

Die erste Messung beschreibt wieder den Fall, bei welchem die OM's nicht getroffen werden, jedoch gleichen Abstand zu den Teilchenspuren haben.

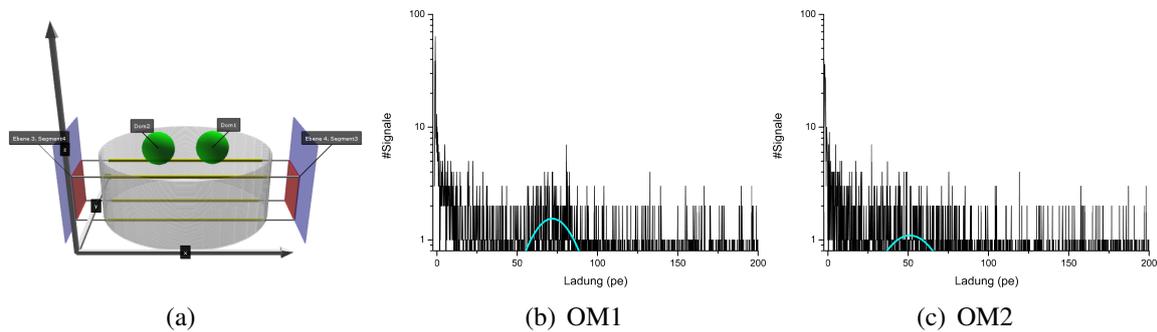


Abbildung 6.13: Messung r129 in Wasser. Die OM's werden mit einem Attenuator betrieben, aber nicht getroffen.

Durch die geringe Statistik ist es schwer die Peaks genau zu ermitteln. Jedoch konnten diese unter Korrektur des Attenuators bei viel höheren Photoelektronen gefunden werden. Diese starke Erhöhung entsteht speziell durch verlängerte Teilchenspuren im Tank. Bei den vertikale Messungen sind diese rund 71cm lang, während bei den horizontalen Messungen rund 175cm lange Teilchenspuren vorliegen. Es wird somit mehr Cherenkov-Strahlung pro Wegeinheit erzeugt ($\frac{dN}{dx} \sim \sin^2(\Theta_C)$, siehe 1.3). Bei den horizontalen Messungen liegen die Positionen und Breiten der Myonpeaks somit bei höheren Photoelektronen, als bei den vertikalen Messungen. Die Werte in der Tabelle 6.6 ergeben sich aus der Position des Peaks in Abbildung 6.13 multipliziert mit dem Faktor 4,7.

Messung	Myonen (pe) OM1		Myonen (pe) OM2	
	Pos	Breite	Pos	Breite
r129	$338 \pm 6,4$	$67,7 \pm 18$	240 ± 24	$84,6 \pm 22$

Tabelle 6.6: Positionen und Breiten der Myonpeaks der Messung r129.

Die folgende Abbildung stellt die Messung r122 dar. Bei dieser Konstellation wurden beide OM's gleichzeitig getroffen.

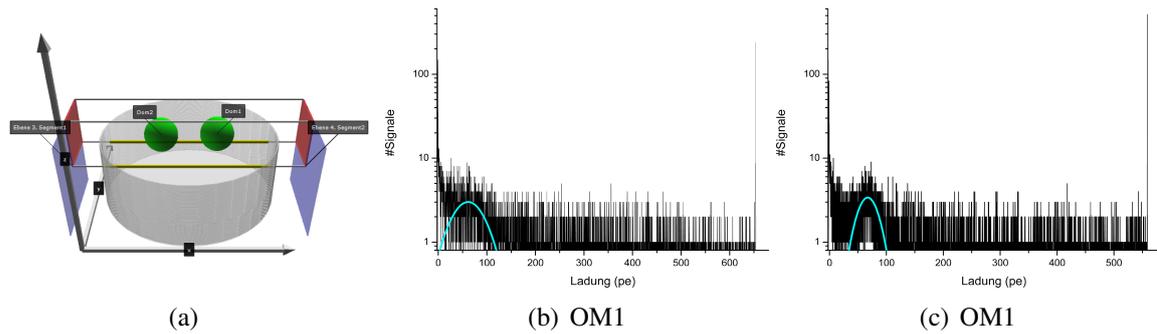


Abbildung 6.14: Messung r122 in Wasser. Die OM's werden getroffen und mit einem Attenuator betrieben.

Die Peaks der Myonen wurden hier bei ähnlichen Positionen gefunden, wie bei der Messung r129. Da die Teilchenspuren nur zur Hälfte durch das Wasser verlaufen, sollten die Peaks bei geringeren Positionen liegen. Gleichzeitig wurden aber auch die OM's getroffen, was eine Erhöhung der Peakpositionen bewirkt. Die Tabellenwerte ergeben sich auch hier wieder aus dem Peakwert der Abbildung 6.14 multipliziert mit dem Faktor 4,7.

Messung	Myonen (pe) OM1		Myonen (pe) OM2	
	Pos	Breite	Pos	Breite
r122	$288,6 \pm 20,2$	$168,2 \pm 25$	$315,8 \pm 5,2$	$91,2 \pm 5$

Tabelle 6.7: Positionen und Breiten der Myonpeaks der Messung r122.

Kapitel 7

Ergebnisse

Ziel der Bachelorarbeit waren systematische Untersuchungen mit kosmischen Teilchen im ITT. Es wurden ähnliche Messungen, wie bei IceTop, durchgeführt. Jedoch nur mit einem Tank. Zusätzlich konnte durch Messungen mit den Triggerebenen eine Richtungsselektion durchgeführt werden. Dadurch war es möglich spezielle Effekte ermitteln zu können.

Bei der Kalibrierung der OM's wurden die Arbeitspunkte der OM's für die Medien Luft und Wasser bestimmt. Für den OM1 wurde eine Spannung von rund 1370V und für den OM2 eine Spannung von rund 1430V bestimmt. Weiterhin wurde bei der Untersuchung der Stabilität der OM's ein Schwanken der Peaks und deren Abstände ermittelt. Dies hat zur Folge, dass in jeder Messung die Definition für $1pe$ variiert. Daher wurde, je nach Medium und OM im ITT, ein Durchschnittswert gewählt und ein mittlerer Fehler bestimmt.

In den Diagrammen der Messungen ohne Szintillatorebenen konnten je nach Koinzidenz-Bedingungen die Peaks der Elektronen (10pe), Hadronen (30pe) und Myonen (80pe) identifiziert werden. Je mehr Photoelektronen ein Peak besitzt, um so mehr Cherenkov-Strahlung wurde erzeugt. Die Myonen sind somit hochenergetisch und die Elektronen niederenergetisch.

Bei den Untersuchungen mit den Triggerebenen wurden hauptsächlich die Myonen detektiert. Mit den Ebenen ist es möglich bestimmte Richtungen der kosmischen Strahlung zu betrachten. Dabei kann zwischen vertikalen, diagonalen und horizontalen Messungen unterschieden werden. Die diagonale Komponente wurde nicht betrachtet, da sie eine Kombination aus vertikaler und horizontaler Messung darstellt.

In den Diagrammen der vertikalen Messungen sind nur die Myonenanteile erkennbar, da die Elektronen und Hadronen mit hoher Wahrscheinlichkeit im Wasser stecken bleiben. Bei den Messungen mit Luft sind, wenn die OM's nicht getroffen wurden, hauptsächlich nur Pedestal und niedrige PEP vorhanden. Im Vergleich zu den Messungen ohne Triggerebenen liegen die Positionen der Myonpeaks im gleichen Bereich (80pe). Je nach Konstellation der Szintillatorebenen am wassergefüllten ITT ergaben sich jedoch unterschiedliche Peakpositionen. Wenn die Teilchenspuren im ITT keinen OM trifft und einen ähnlichen Abstand zu beiden hat, dann liegen die Myonpeaks bei ähnlichen Positionen. Haben die OM's verschiedene Abstände zu den Teilchenspuren, dann detektiert der nähere OM die Myonen im höheren Photoelektronen-Bereich. Wird ein OM direkt durch die kosmischen Teilchen getroffen, verschiebt sich der Myonpeak auch weiter in den höheren Photoelektronen-Bereich. Dies kann seine Ursache in der Erzeugung von Cherenkov-Strahlung im Glas des OM's oder durch Effekte in der Photokathode haben.

Die horizontalen Messungen detektieren hauptsächlich kosmische Teilchen, die aufgrund der Richtung längere Wege in der Atmosphäre zurücklegen. Die OM's wurden mit einem Attenuator betrieben, welcher die Ladungen am ADC um 13,4dB verringert. Durch die geringe

Statistik sind die Peaks schwer ermittelbar und somit stärker fehlerbehaftet. Die Myonpeaks liegen unter Korrektur des Attenuators bei höheren Photoelektronen als bei den vertikalen Messungen. Dies liegt an den längeren Teilchenspuren von rund 175cm, welche fast doppelt so lang sind als im vertikalen Fall.

Mit diesen Messungen am ITT beim DESY wurden niedrigere Werte als bei IceTop ermittelt. Durch die Untersuchungen mit den Triggerebenen wurden zusätzliche Effekte an den OM's gefunden. Dazu gehören die Wechselwirkungen beim Durchgang der Teilchen durch die OM's sowie auch die Abhängigkeiten von den Spurlängen und den Positionen der Teilchenspuren. Diese Effekte müssen noch in weiteren Experimenten genauer untersucht werden.

Anhang

Programm „IceTop-Tank-Visuisierung“

```
from math import *
from visual import *
```

```
#####
##### Start des Programms #####
#####
```

```
## Dieses Programm dient zur Längen- und Winkelbestimmung für den ICETOP-Tank
## Es erstellt dabei auch eine 3D-Ansicht vom Tank mit den Szintillatorbenen und den Doms
```

```
#####
##### 1. Eingabe der Koordinaten der Ebenen #####
#####
```

```
## Hierbei dient die Ecke links unten bei den Ebenen als Referenz und gibt die Position der jeweiligen Ebene an
## Der Koordinatenursprung (0,0,0) liegt in der inneren unteren linken Ecke des Gerüsts
## Die X-Richtung, vom Türbereich betrachtet, geht entlang des Gerüsts von links nach rechts
## Die Y-Richtung, vom Türbereich betrachtet, geht von vorne nach hinten
## Die Z-Richtung geht von unten nach oben
```

```
def ebenenkoordinaten():
```

```
    global x1
    global x2
    global y1
    global y2
    global z1
    global z2
    global save
```

```
    print("Geben Sie die Koordinaten (x,y,z) der Ebenen an!")
    print("Beispiel: (10, 20, 30)")
    print("Hinweis: Zahlen in cm, aber ohne diese Einheit, angeben!!!")
```

```
    ebene1=input("Koordinaten erste Ebene:")
    ebene2=input("Koordinaten zweite Ebene:")
    x1=ebene1[0]
    y1=ebene1[1]
    z1=ebene1[2]
    x2=ebene2[0]
    y2=ebene2[1]
    z2=ebene2[2]
```

```
print("Sollen die zu ermittelnden Daten in eine Textdatei gespeichert werden? j/n")
save=raw_input()

## Bei 11. wird die Höhe eingesetzt
## Der Tank beginnt bei einer Höhe von z=-5cm

ebenen()

#####
##### 2. Analyse der vorhandenen Ebenen #####
#####

## Hier wird automatisch ermittelt, welche Ebene welcher Position entspricht
## Das Gerüst am ICETOP-Tank dient als Referenz

## Beschreibung Ebenen:
## Ebene 1: oben auf dem Tank, paallel zum Erdboden
## Ebene 2: unter dem Tank, parallel zum Erdboden
## Ebene 3: von der Tür aus links am Tank
## Ebene 4: von der Tür aus rechts am Tank
## Ebene 5: von der Tür aus vor dem Tank im Türbereich und parallel zur Tür
## Ebene 6: von der Tür aus hinter dem Tank und parallel zur Tür

def ebenen():
    global e11
    global e12
    global e13
    global e14
    global e15
    global e16
    global e21
    global e22
    global e23
    global e24
    global e25
    global e26
    global ersteebene
    global zweiteebene

    e11=0
    e12=0
    e13=0
    e14=0
    e15=0
    e16=0
    e21=0
    e22=0
    e23=0
    e24=0
    e25=0
    e26=0
```

```
if x1<=0:
    print("Die erste Ebene ist die Ebene 3")
    ersteebene="Ebene 3"
    e13=1
else:
    if x1>=200:
        print("Die erste Ebene ist die Ebene 4")
        ersteebene="Ebene 4"
        e14=1
    else:
        if y1>=200:
            print("Die erste Ebene ist die Ebene 6")
            ersteebene="Ebene 6"
            e16=1
        else:
            if y1<=0:
                print("Die erste Ebene ist die Ebene 5")
                ersteebene="Ebene 5"
                e15=1
            else:
                if z1<=-20:
                    print("Die erste Ebene ist die Ebene 2")
                    ersteebene="Ebene 2"
                    e12=1
                else:
                    if z1>=100:
                        print("Die erste Ebene ist die Ebene 1")
                        ersteebene="Ebene 1"
                        e11=1

if x2<=0:
    print("Die zweite Ebene ist die Ebene 3")
    zweiteebene="Ebene 3"
    e23=1
else:
    if x2>=200:
        print("Die zweite Ebene ist die Ebene 4")
        zweiteebene="Ebene 4"
        e24=1
    else:
        if y2>=200:
            print("Die zweite Ebene ist die Ebene 6")
            zweiteebene="Ebene 6"
            e26=1
        else:
            if y2<=0:
                print("Die zweite Ebene ist die Ebene 5")
                zweiteebene="Ebene 5"
                e25=1
            else:
                if z2<=-20:
```

```

print("Die zweite Ebene ist die Ebene 2")
zweiteebene="Ebene 2"
e22=1
else:
if z2>=100:
print("Die zweite Ebene ist die Ebene 1")
zweiteebene="Ebene 1"
e21=1

```

methode()

```

#####
##### 3. Messmethode (Luft, Wasser) #####
#####

```

def methode():

```

    global Methode
    global hohe
    global Methodename
    print("Fand die Messung in Wasser oder Luft statt? l/w")
    print("l...Luft (z(Luft)=105cm)")
    print("w...Wasser (z(Wasser)=71cm)")
    Methode=raw_input()

```

```

    if Methode=="l":

```

```

        print("Methode: Luft")
        hohe=105-5
        Methodename="Luft"

```

```

    else:

```

```

        if Methode=="w":
            print("Methode: Wasser")
            hohe=71-5
            Methodename="Wasser"

```

```

        else:

```

```

            print("Fehler!!! Falsche Methode eingegeben. Bitte nur Wasser oder
            Luft eingeben!")

```

```

        methode()

```

messmethode()

```

#####
##### 4. Ermittlung der Messrichtung #####
#####

```

def messmethode():

```

    global o

```

```

    o=1

```

```

    if abs(int(ersteebene[6])-int(zweiteebene[6]))==0:

```

```

        print("Fehler!!! Gleiche Ebenen!")

```

```

    else:

```

```

if (ersteebene=="Ebene 1" and zweiteebene=="Ebene 2")
or (ersteebene=="Ebene 2" and zweiteebene=="Ebene 1"):
print("vertikale Messung")
else:
if (ersteebene=="Ebene 3" and zweiteebene=="Ebene 4")
or (ersteebene=="Ebene 4" and zweiteebene=="Ebene 3"):
print("horizontale Messung gegenüberliegender Ebenen")
else:
if (ersteebene=="Ebene 5" and zweiteebene=="Ebene 6")
or (ersteebene=="Ebene 6" and zweiteebene=="Ebene 5"):
print("horizontale Messung gegenüberliegender Ebenen")
else:
print("diagonale Messung")
o=0

segmentkoordinaten()

#####
##### 5. Eingabe der Segmente der Ebenen #####
#####

def segmentkoordinaten():
global Segment1
global Segment2

print("Welche Segmente der Ebenen werden betrachtet? (nur Nummer angeben)")
Segment1=input("Segment der "+ersteebene+": ")
Segment2=input("Segment der "+zweiteebene+": ")

umpositionierung()

#####
# 6. Umpositionierung der Referenzpunkte abhängig vom Segment #
#####
def umpositionierung():
global deltax1
global deltax2
global deltay1
global deltay2
global deltax1
global deltax2

if Segment1==1:
s1x=0
s1z=1
else:
if Segment1==2:
s1x=1
s1z=1
else:
if Segment1==3:

```

```

        s1x=1
        s1z=0
    else:
        if Segment1==4:
            s1x=0
            s1z=0
        else:
            print("Fehler mit ersten Segment!!!")

if Segment2==1:
    s2x=0
    s2z=1
else:
    if Segment2==2:
        s2x=1
        s2z=1
    else:
        if Segment2==3:
            s2x=1
            s2z=0
        else:
            if Segment2==4:
                s2x=0
                s2z=0
            else:
                print("Fehler mit zweiten Segment!!!")

deltax1=(e15-e16)*(s1x*50)+(e11+e12)*(s1x*50)
deltay1=(e11+e12)*(s1z*50)+(-e13+e14)*(s1x*50)
deltaz1=(e15+e16)*(s1z*50)+(e13+e14)*(s1z*50)

deltax2=(e25-e26)*(s2x*50)+(e21+e22)*(s2x*50)
deltay2=(e21+e22)*(s2z*50)+(-e23+e24)*(s2x*50)
deltaz2=(e25+e26)*(s2z*50)+(e23+e24)*(s2z*50)
bild()

#####
##### 7. Aufbau des Bildschirms für die 3D Darstellung #####
#####

def bild():
    scene=display(title='Ebenenkonstellation', width=1000, height=1000,
    center=(100,0,50), background=(1,1,1))
    scene.exit=False
    eckpunkte()

```

```
#####
##### 8. Ermittlung der Eckpunkte der Segmente #####
#####
```

```
def eckpunkte():
```

```
    global c1x1
    global c1x2
    global c1y1
    global c1y2
    global c1z1
    global c1z2
    global c2x1
    global c2x2
    global c2y1
    global c2y2
    global c2z1
    global c2z2
    global c3x1
    global c3x2
    global c3y1
    global c3y2
    global c3z1
    global c3z2
    global c4x1
    global c4x2
    global c4y1
    global c4y2
    global c4z1
    global c4z2
```

```
    k=0
    s=0
    f=0
    r=0
```

```
    if (ersteebene=="Ebene 2" or zweiteebene=="Ebene 2")
    and (ersteebene=="Ebene 3" or zweiteebene=="Ebene 3"):
```

```
        k=1
```

```
    else:
```

```
        if (ersteebene=="Ebene 2" or zweiteebene=="Ebene 2")
        and (ersteebene=="Ebene 4" or zweiteebene=="Ebene 4"):
```

```
            k=1
```

```
        else:
```

```
            if (ersteebene=="Ebene 2" or zweiteebene=="Ebene 2")
            and (ersteebene=="Ebene 5" or zweiteebene=="Ebene 5"):
```

```
                k=1
```

```
        else:
```

```
            if (ersteebene=="Ebene 2" or zweiteebene=="Ebene 2")
            and (ersteebene=="Ebene 6" or zweiteebene=="Ebene 6"):
```

```
                k=1
```

```

if (ersteebene=="Ebene 1" or zweiteebene=="Ebene 1")
and (ersteebene=="Ebene 3" or zweiteebene=="Ebene 3"):
    s=1
else:
    if (ersteebene=="Ebene 1" or zweiteebene=="Ebene 1")
and (ersteebene=="Ebene 4" or zweiteebene=="Ebene 4"):
        s=1
    else:
        if (ersteebene=="Ebene 1" or zweiteebene=="Ebene 1")
and (ersteebene=="Ebene 5" or zweiteebene=="Ebene 5"):
            s=1
        else:
            if (ersteebene=="Ebene 1" or zweiteebene=="Ebene 1")
and (ersteebene=="Ebene 6" or zweiteebene=="Ebene 6"):
                s=1

```

```

if (ersteebene=="Ebene 3" or zweiteebene=="Ebene 3")
and (ersteebene=="Ebene 5" or zweiteebene=="Ebene 5"):
    f=1
else:
    if (ersteebene=="Ebene 3" or zweiteebene=="Ebene 3")
and (ersteebene=="Ebene 6" or zweiteebene=="Ebene 6"):
        f=1
if (ersteebene=="Ebene 4" or zweiteebene=="Ebene 4")
and (ersteebene=="Ebene 5" or zweiteebene=="Ebene 5"):
    r=1
else:
    if (ersteebene=="Ebene 4" or zweiteebene=="Ebene 4")
and (ersteebene=="Ebene 6" or zweiteebene=="Ebene 6"):
        r=1

```

8.1 erste Ecke der beiden Ebenen

```

c1x1=float(x1+deltax1+50*(o)*(-e16)+50*(k)*(-e16)+50*(s)*(-e16)
+50*(f)*(e15-e16)+50*(r)*(e15-e16))
c1y1=float(y1+deltay1+50*(o)*(0)+50*(k)*(-e13)+50*(s)*(-e13)+50*(f)*(0)+50*(r)*(0))
c1z1=float(z1+deltaz1+50*(o)*(0)+50*(k)*(e14+e16)+50*(s)*(e13+e15)+50*(f)*(0)
+50*(r)*(0))

c1x2=float(x2+deltax2+50*(o)*(-e26)+50*(k)*(-e26)+50*(s)*(-e26)
+50*(f)*(e25-e26)+50*(r)*(e25-e26))
c1y2=float(y2+deltay2+50*(o)*(e24-e23)+50*(k)*(-e23)
+50*(s)*(-e23)+50*(f)*(0)+50*(r)*(0))
c1z2=float(z2+deltaz2+50*(o)*(0)+50*(k)*(e24+e26)+50*(s)*(e23+e25)+50*(f)*(0)
+50*(r)*(0))

```

8.2 zweite Ecke der beiden Ebenen

```

c2x1=float(x1+deltax1+50*(o)*(e11+e21+e15)+50*(k)*(e12+e15)+50*(s)*(e11+e15)
+50*(f)*(0)+50*(r)*(0))
c2y1=float(y1+deltay1+50*(o)*(-e13+e14)+50*(k)*(-e13)+50*(s)*(-e13)
+50*(f)*(-e13)+50*(r)*(e14))

```

```
c2z1=float(z1+deltaz1+50*(o)*(0)+50*(k)*(e13+e16)+50*(s)*(e14+e15)+50*(f)*(0)
+50*(r)*(0))
```

```
c2x2=float(x2+deltax2+50*(o)*(e22+e12+e25)+50*(k)*(e22+e25)+50*(s)*(e21+e25)
+50*(f)*(0)+50*(r)*(0))
```

```
c2y2=float(y2+deltay2+50*(o)*(0)+50*(k)*(-e23)+50*(s)*(-e23)
+50*(f)*(-e23)+50*(r)*(e24))
```

```
c2z2=float(z2+deltaz2+50*(o)*(0)+50*(k)*(e23+e26)+50*(s)*(e24+e25)+50*(f)*(0)
+50*(r)*(0))
```

8.3 dritte Ecke der beiden Ebenen

```
c3x1=float(x1+deltax1+50*(o)*(e11+e21+e15)+50*(k)*(e12+e15)+50*(s)*(e11+e15)
+50*(f)*(0)+50*(r)*(0))
```

```
c3y1=float(y1+deltay1+50*(o)*(e11+e21-e13)+50*(k)*(e12+e14)+50*(s)*(e11+e14)
+50*(f)*(-e13)+50*(r)*(e14))
```

```
c3z1=float(z1+deltaz1+50*(o)*(e13+e14+e15+e16)+50*(k)*(e13+e15)
+50*(s)*(e14+e16)+50*(f)*(e13+e15+e16)+50*(r)*(e14+e15+e16))
```

```
c3x2=float(x2+deltax2+50*(o)*(e22+e12+e25)+50*(k)*(e22+e25)+50*(s)*(e21+e25)
+50*(f)*(0)+50*(r)*(0))
```

```
c3y2=float(y2+deltay2+50*(o)*(e22+e12-e23)+50*(k)*(e22+e24+e24)
+50*(s)*(e21+e24)+50*(f)*(-e23)+50*(r)*(e24))
```

```
c3z2=float(z2+deltaz2+50*(o)*(e24+e23+e26+e25)+50*(k)*(e23+e25)
+50*(s)*(e24+e26)+50*(f)*(e23+e25+e26)+50*(r)*(e24+e25+e26))
```

8.4 vierte Ecke der beiden Ebenen

```
c4x1=float(x1+deltax1+50*(o)*(-e16)+50*(k)*(-e16)+50*(s)*(-e16)
+50*(f)*(e15-e16)+50*(r)*(e15-e16))
```

```
c4y1=float(y1+deltay1+50*(o)*(e11+e21+e14)+50*(k)*(e12+e14)
+50*(s)*(e11+e14)+50*(f)*(0)+50*(r)*(0))
```

```
c4z1=float(z1+deltaz1+50*(o)*(e13+e14+e15+e16)+50*(k)*(e14+e15)
+50*(s)*(e13+e16)+50*(f)*(e13+e15+e16)+50*(r)*(e14+e15+e16))
```

```
c4x2=float(x2+deltax2+50*(o)*(-e26)+50*(k)*(-e26)
+50*(s)*(-e26)+50*(f)*(e25-e26)+50*(r)*(e25-e26))
```

```
c4y2=float(y2+deltay2+50*(o)*(e22+e12+e24)+50*(k)*(e22+e24)
+50*(s)*(e21+e24)+50*(f)*(0)+50*(r)*(0))
```

```
c4z2=float(z2+deltaz2+50*(o)*(e24+e23+e26+e25)+50*(k)*(e24+e25)
+50*(s)*(e23+e26)+50*(f)*(e23+e25+e26)+50*(r)*(e24+e25+e26))
```

```
geraden()
```


9. Ermittlung der Geraden #####
#####

```
def geraden():
```

```
    global s1x1
```

```
    global s1x2
```

```
    global s1y1
```

```
    global s1y2
```

```
    global s1z1
```

```

global s1z2
global s2x1
global s2x2
global s2y1
global s2y2
global s2z1
global s2z2
global s3x1
global s3x2
global s3y1
global s3y2
global s3z1
global s3z2
global s4x1
global s4x2
global s4y1
global s4y2
global s4z1
global s4z2
global l1
global l2
global l3
global l4

```

Die Geraden verbinden die zueinander passenden Ecken der Segmente, um die Laufspur ermitteln zu können

9.1 erste Ecke

```

if (ersteebene=="Ebene 1" and zweiteebene=="Ebene 2")
or (ersteebene=="Ebene 2" and zweiteebene=="Ebene 1"):
    if ersteebene=="Ebene 1":
        s1z1=hohe
        vektor1=float(s1z1-c1z1)/float(c1z2-c1z1)
        s1x1=c1x1+vektor1*(c1x2-c1x1)
        s1y1=c1y1+vektor1*(c1y2-c1y1)
    else:
        if zweiteebene=="Ebene 1":
            s1z2=hohe
            vektor2=float(s1z2-c1z1)/float(c1z2-c1z1)
            s1x2=c1x1+vektor2*(c1x2-c1x1)
            s1y2=c1y1+vektor2*(c1y2-c1y1)

        if ersteebene=="Ebene 2":
            s1z1=-5
            vektor1=float(s1z1-c1z1)/float(c1z2-c1z1)
            s1x1=(c1x1+vektor1*(c1x2-c1x1))
            s1y1=(c1y1+vektor1*(c1y2-c1y1))
        else:
            if zweiteebene=="Ebene 2":
                s1z2=-5
                vektor2=float(s1z2-c1z1)/float(c1z2-c1z1)

```

```

s1x2=(c1x1+vektor2*(c1x2-c1x1))
s1y2=(c1y1+vektor2*(c1y2-c1y1))
else:
vektor2=(-100*c1x1+c1x1**2-c1y2*c1y1+c1y1**2-c1x2*c1x1+100*c1x2
+100*c1y2-100*c1y1+sqrt(abs(-200*c1y2*c1y1*c1x2+3800*c1x2*c1x1
+3800*c1y2*c1y1-1900*c1y2**2-1900*c1x2**2+200*c1y2**2*c1x1
-200*c1x1*c1y2*c1y1-1900*c1y1**2-1900*c1x1**2-c1x2**2*c1y1**2
+200*c1x2**2*c1y1-c1y2**2*c1x1**2-200*c1x2*c1x1*c1y2
+2*c1y2*c1y1*c1x2*c1x1-200*c1x2*c1x1*c1y1-20000*c1x1*c1y2
+20000*c1x1*c1y1+200*c1x1**2*c1y2+200*c1y1**2*c1x2
+20000*c1x2*c1y2-20000*c1x2*c1y1)))/(c1x2**2-2*c1x2*c1x1
+c1x1**2+c1y2**2-2*c1y2*c1y1+c1y1**2)

vektor1=(-100*c1x1+c1x1**2-c1y2*c1y1+c1y1**2-c1x2*c1x1+100*c1x2
+100*c1y2-100*c1y1-sqrt(abs(-200*c1y2*c1y1*c1x2
+3800*c1x2*c1x1+3800*c1y2*c1y1-1900*c1y2**2-1900*c1x2**2
+200*c1y2**2*c1x1-200*c1x1*c1y2*c1y1-1900*c1y1**2
-1900*c1x1**2-c1x2**2*c1y1**2+200*c1x2**2*c1y1-c1y2**2*c1x1**2
-200*c1x2*c1x1*c1y2+2*c1y2*c1y1*c1x2*c1x1-200*c1x2*c1x1*c1y1
-20000*c1x1*c1y2+20000*c1x1*c1y1+200*c1x1**2*c1y2
+200*c1y1**2*c1x2+20000*c1x2*c1y2-20000*c1x2*c1y1))
/(c1x2**2-2*c1x2*c1x1+c1x1**2+c1y2**2-2*c1y2*c1y1+c1y1**2)

## Geradengleichungen der ersten Ecke:
s1x1=c1x1+vektor1*(c1x2-c1x1)
s1y1=c1y1+vektor1*(c1y2-c1y1)
s1z1=c1z1+vektor1*(c1z2-c1z1)

s1x2=c1x1+vektor2*(c1x2-c1x1)
s1y2=c1y1+vektor2*(c1y2-c1y1)
s1z2=c1z1+vektor2*(c1z2-c1z1)

if int((s1x1-100)**2+(s1y1-100)**2)>8100
and int((s1x2-100)**2+(s1y2-100)**2)>8100:
s1x2=s1x1
s1y2=s1y1
s1z2=s1z1
else:
if int((s1x1-100)**2+(s1y1-100)**2)>8100:
vektor1=(-100*c1x1+c1x1**2-c1y2*c1y1+c1y1**2-c1x2*c1x1+100*c1x2
+100*c1y2-100*c1y1-sqrt(abs(-200*c1y2*c1y1*c1x2+3800*c1x2*c1x1
+3800*c1y2*c1y1-1900*c1y2**2-1900*c1x2**2+200*c1y2**2*c1x1
-200*c1x1*c1y2*c1y1-1900*c1y1**2-1900*c1x1**2-c1x2**2*c1y1**2
+200*c1x2**2*c1y1-c1y2**2*c1x1**2-200*c1x2*c1x1*c1y2
+2*c1y2*c1y1*c1x2*c1x1-200*c1x2*c1x1*c1y1-20000*c1x1*c1y2
+20000*c1x1*c1y1+200*c1x1**2*c1y2+200*c1y1**2*c1x2
+20000*c1x2*c1y2-20000*c1x2*c1y1)))/(c1x2**2-2*c1x2*c1x1+c1x1**2
+c1y2**2-2*c1y2*c1y1+c1y1**2)

s1x1=c1x1+vektor1*(c1x2-c1x1)
s1y1=c1y1+vektor1*(c1y2-c1y1)

```

```

s1z1=c1z1+vektor1*(c1z2-c1z1)

if int((s1x2-100)**2+(s1y2-100)**2)>8100:
vektor2=(-100*c1x1+c1x1**2-c1y2*c1y1+c1y1**2-c1x2*c1x1+100*c1x2
+100*c1y2-100*c1y1+sqrt(abs(-200*c1y2*c1y1*c1x2+3800*c1x2*c1x1
+3800*c1y2*c1y1-1900*c1y2**2-1900*c1x2**2+200*c1y2**2*c1x1
-200*c1x1*c1y2*c1y1-1900*c1y1**2-1900*c1x1**2-c1x2**2*c1y1**2
+200*c1x2**2*c1y1-c1y2**2*c1x1**2-200*c1x2*c1x1*c1y2
+2*c1y2*c1y1*c1x2*c1x1-200*c1x2*c1x1*c1y1-20000*c1x1*c1y2
+20000*c1x1*c1y1+200*c1x1**2*c1y2+200*c1y1**2*c1x2
+20000*c1x2*c1y2-20000*c1x2*c1y1)))
/(c1x2**2-2*c1x2*c1x1+c1x1**2+c1y2**2-2*c1y2*c1y1+c1y1**2)

s1x2=c1x1+vektor2*(c1x2-c1x1)
s1y2=c1y1+vektor2*(c1y2-c1y1)
s1z2=c1z1+vektor2*(c1z2-c1z1)

if s1z1>hohe and s1z2>hohe:
s1x2=s1x1
s1y2=s1y1
s1z2=s1z1
else:
if s1z1>hohe:
s1z1=hohe
s1y1=c1y1+(hohe-c1z1)*(c1y2-c1y1)/(c1z2-c1z1)
s1x1=c1x1+float((hohe-c1z1)*(c1x2-c1x1)/(c1z2-c1z1))

if s1z2>hohe:
s1z2=hohe
s1y2=c1y1+float((hohe-c1z1)*(c1y2-c1y1)/(c1z2-c1z1))
s1x2=c1x1+float((hohe-c1z1)*(c1x2-c1x1)/(c1z2-c1z1))

if s1z1<-5:
s1z1=-5
s1y1=c1y1+float((-5-c1z1)*float(c1y2-c1y1)/float(c1z2-c1z1))
s1x1=c1x1+float((-5-c1z1)*(c1x2-c1x1)/(c1z2-c1z1))

if s1z2<-5:
s1z2=-5
s1y2=c1y1+(-5-c1z1)*(c1y2-c1y1)/(c1z2-c1z1)
s1x2=c1x1+float((-5-c1z1)*(c1x2-c1x1)/(c1z2-c1z1))

## erste Lauflänge im Tank:
l1=sqrt((s1x2-s1x1)**2+(s1y2-s1y1)**2+(s1z2-s1z1)**2)

##### 9.2 zweite Ecke #####

if (ersteebene=="Ebene 1" and zweiteebene=="Ebene 2")
or (ersteebene=="Ebene 2" and zweiteebene=="Ebene 1"):
if ersteebene=="Ebene 1":
s2z1=hohe

```

```

vektor1=float((s2z1-c2z1)/(c2z2-c2z1))
s2x1=c2x1+vektor1*(c2x2-c2x1)
s2y1=c2y1+vektor1*(c2y2-c2y1)
else:
if zweiteebene=="Ebene 1":
    s2z2=hohe
    vektor2=float((s2z2-c2z1)/(c2z2-c2z1))
    s2x2=c2x1+vektor2*(c2x2-c2x1)
    s2y2=c2y1+vektor2*(c2y2-c2y1)

if ersteebene=="Ebene 2":
s2z1=-5
vektor1=float((s2z1-c2z1)/(c2z2-c2z1))
s2x1=c2x1+vektor1*(c2x2-c2x1)
    s2y1=c2y1+vektor1*(c2y2-c2y1)
else:
if zweiteebene=="Ebene 2":
    s2z2=-5
    vektor2=float((s2z2-c2z1)/(c2z2-c2z1))
    s2x2=c2x1+vektor2*(c2x2-c2x1)
    s2y2=c2y1+vektor2*(c2y2-c2y1)

else:
vektor2=(-100*c2x1+c2x1**2-c2y2*c2y1+c2y1**2-c2x2*c2x1+100*c2x2
+100*c2y2-100*c2y1+sqrt(abs(-200*c2y2*c2y1*c2x2+3800*c2x2*c2x1
+3800*c2y2*c2y1-1900*c2y2**2-1900*c2x2**2+200*c2y2**2*c2x1
-200*c2x1*c2y2*c2y1-1900*c2y1**2-1900*c2x1**2-c2x2**2*c2y1**2
+200*c2x2**2*c2y1-c2y2**2*c2x1**2-200*c2x2*c2x1*c2y2
+2*c2y2*c2y1*c2x2*c2x1-200*c2x2*c2x1*c2y1-20000*c2x1*c2y2
+20000*c2x1*c2y1+200*c2x1**2*c2y2+200*c2y1**2*c2x2+20000*c2x2*c2y2
-20000*c2x2*c2y1)))/(c2x2**2-2*c2x2*c2x1+c2x1**2+c2y2**2
-2*c2y2*c2y1+c2y1**2)

vektor1=(-100*c2x1+c2x1**2-c2y2*c2y1+c2y1**2-c2x2*c2x1+100*c2x2
+100*c2y2-100*c2y1-sqrt(abs(-200*c2y2*c2y1*c2x2+3800*c2x2*c2x1
+3800*c2y2*c2y1-1900*c2y2**2-1900*c2x2**2+200*c2y2**2*c2x1
-200*c2x1*c2y2*c2y1-1900*c2y1**2-1900*c2x1**2-c2x2**2*c2y1**2
+200*c2x2**2*c2y1-c2y2**2*c2x1**2-200*c2x2*c2x1*c2y2
+20000*c2x1*c2y1+200*c2x1**2*c2y2+200*c2y1**2*c2x2+20000*c2x2*c2y2
-20000*c2x2*c2y1)))/(c2x2**2-2*c2x2*c2x1+c2x1**2+c2y2**2
-2*c2y2*c2y1+c2y1**2)

## Geradengleichungen der zweiten Ecke:
s2x1=c2x1+vektor1*(c2x2-c2x1)
s2y1=c2y1+vektor1*(c2y2-c2y1)
s2z1=c2z1+vektor1*(c2z2-c2z1)

s2x2=c2x1+vektor2*(c2x2-c2x1)
s2y2=c2y1+vektor2*(c2y2-c2y1)
s2z2=c2z1+vektor2*(c2z2-c2z1)

```

```

if int((s2x1-100)**2+(s2y1-100)**2)>8100
and int((s2x2-100)**2+(s2y2-100)**2)>8100:
    s2x2=s2x1
    s2y2=s2y1
    s2z2=s2z1
else:
    if int((s2x1-100)**2+(s2y1-100)**2)>8100:
        vektor1=(-100*c2x1+c2x1**2-c2y2*c2y1+c2y1**2-c2x2*c2x1+100*c2x2
            +100*c2y2-100*c2y1-sqrt(abs(-200*c2y2*c2y1*c2x2+3800*c2x2*c2x1
            +3800*c2y2*c2y1-1900*c2y2**2-1900*c2x2**2+200*c2y2**2*c2x1
            -200*c2x1*c2y2*c2y1-1900*c2y1**2-1900*c2x1**2-c2x2**2*c2y1**2
            +200*c2x2**2*c2y1-c2y2**2*c2x1**2-200*c2x2*c2x1*c2y2
            +2*c2y2*c2y1*c2x2*c2x1-200*c2x2*c2x1*c2y1-20000*c2x1*c2y2
            +20000*c2x1*c2y1+200*c2x1**2*c2y2+200*c2y1**2*c2x2
            +20000*c2x2*c2y2-20000*c2x2*c2y1)))/(c2x2**2-2*c2x2*c2x1
            +c2x1**2+c2y2**2-2*c2y2*c2y1+c2y1**2)

        s2x1=c2x1+vektor1*(c2x2-c2x1)
        s2y1=c2y1+vektor1*(c2y2-c2y1)
        s2z1=c2z1+vektor1*(c2z2-c2z1)

    if int((s2x2-100)**2+(s2y2-100)**2)>8100:
        vektor2=(-100*c2x1+c2x1**2-c2y2*c2y1+c2y1**2-c2x2*c2x1+100*c2x2
            +100*c2y2-100*c2y1+sqrt(abs(-200*c2y2*c2y1*c2x2+3800*c2x2*c2x1
            +3800*c2y2*c2y1-1900*c2y2**2-1900*c2x2**2+200*c2y2**2*c2x1
            -200*c2x1*c2y2*c2y1-1900*c2y1**2-1900*c2x1**2-c2x2**2*c2y1**2
            +200*c2x2**2*c2y1-c2y2**2*c2x1**2-200*c2x2*c2x1*c2y2
            +2*c2y2*c2y1*c2x2*c2x1-200*c2x2*c2x1*c2y1-20000*c2x1*c2y2
            +20000*c2x1*c2y1+200*c2x1**2*c2y2+200*c2y1**2*c2x2
            +20000*c2x2*c2y2-20000*c2x2*c2y1)))/(c2x2**2-2*c2x2*c2x1
            +c2x1**2+c2y2**2-2*c2y2*c2y1+c2y1**2)

        s2x2=c2x1+vektor2*(c2x2-c2x1)
        s2y2=c2y1+vektor2*(c2y2-c2y1)
        s2z2=c2z1+vektor2*(c2z2-c2z1)

    if s2z1>hohe and s2z2>hohe:
        s2x2=s2x1
        s2y2=s2y1
        s2z2=s2z1
    else:
        if s2z1>hohe:
            s2z1=hohe
            s2y1=c2y1+float((hohe-c2z1)*(c2y2-c2y1)/(c2z2-c2z1))
            s2x1=c2x1+float((hohe-c2z1)*(c2x2-c2x1)/(c2z2-c2z1))

        if s2z2>hohe:
            s2z2=hohe
            s2y2=c2y1+float((hohe-c2z1)*(c2y2-c2y1)/(c2z2-c2z1))
            s2x2=c2x1+float((hohe-c2z1)*(c2x2-c2x1)/(c2z2-c2z1))

```

```

if s2z1<-5:
s2z1=-5
s2y1=c2y1+(-5-c2z1)*(c2y2-c2y1)/(c2z2-c2z1)
s2x1=c2x1+float((-5-c2z1)*(c2x2-c2x1)/(c2z2-c2z1))

if s2z2<-5:
s2z2=-5
s2y2=c2y1+(-5-c2z1)*(c2y2-c2y1)/(c2z2-c2z1)
s2x2=c2x1+float((-5-c2z1)*(c2x2-c2x1)/(c2z2-c2z1))

## zweite Lauflänge im Tank:
l2=sqrt((s2x2-s2x1)**2+(s2y2-s2y1)**2+(s2z2-s2z1)**2)

```

9.3 dritte Ecke

```

if (ersteebene=="Ebene 1" and zweiteebene=="Ebene 2")
or (ersteebene=="Ebene 2" and zweiteebene=="Ebene 1"):
  if ersteebene=="Ebene 1":
    s3z1=hohe
    vektor1=float((s3z1-c3z1)/(c3z2-c3z1))
    s3x1=c3x1+vektor1*(c3x2-c3x1)
    s3y1=c3y1+vektor1*(c3y2-c3y1)
  else:
    if zweiteebene=="Ebene 1":
      s3z2=hohe
      vektor2=float((s3z2-c3z1)/(c3z2-c3z1))
      s3x2=c3x1+vektor2*(c3x2-c3x1)
      s3y2=c3y1+vektor2*(c3y2-c3y1)

    if ersteebene=="Ebene 2":
      s3z1=-5
      vektor1=float((s3z1-c3z1)/(c3z2-c3z1))
      s3x1=c3x1+vektor1*(c3x2-c3x1)
      s3y1=c3y1+vektor1*(c3y2-c3y1)
    else:
      if zweiteebene=="Ebene 2":
        s3z2=-5
        vektor2=float((s3z2-c3z1)/(c3z2-c3z1))
        s3x2=c3x1+vektor2*(c3x2-c3x1)
        s3y2=c3y1+vektor2*(c3y2-c3y1)

else:
vektor2=(-100*c3x1+c3x1**2-c3y2*c3y1+c3y1**2-c3x2*c3x1+100*c3x2
+100*c3y2-100*c3y1+sqrt(abs(-200*c3y2*c3y1*c3x2+3800*c3x2*c3x1
+3800*c3y2*c3y1-1900*c3y2**2-1900*c3x2**2+200*c3y2**2*c3x1
-200*c3x1*c3y2*c3y1-1900*c3y1**2-1900*c3x1**2-c3x2**2*c3y1**2
+200*c3x2**2*c3y1-c3y2**2*c3x1**2-200*c3x2*c3x1*c3y2
+2*c3y2*c3y1*c3x2*c3x1-200*c3x2*c3x1*c3y1-20000*c3x1*c3y2
+20000*c3x1*c3y1+200*c3x1**2*c3y2+200*c3y1**2*c3x2+20000*c3x2*c3y2
-20000*c3x2*c3y1)))/(c3x2**2-2*c3x2*c3x1+c3x1**2+c3y2**2
-2*c3y2*c3y1+c3y1**2)

```

```

vektor1=(-100*c3x1+c3x1**2-c3y2*c3y1+c3y1**2-c3x2*c3x1+100*c3x2
+100*c3y2-100*c3y1-sqrt(abs(-200*c3y2*c3y1*c3x2+3800*c3x2*c3x1
+3800*c3y2*c3y1-1900*c3y2**2-1900*c3x2**2+200*c3y2**2*c3x1
-200*c3x1*c3y2*c3y1-1900*c3y1**2-1900*c3x1**2-c3x2**2*c3y1**2
+200*c3x2**2*c3y1-c3y2**2*c3x1**2-200*c3x2*c3x1*c3y2
+2*c3y2*c3y1*c3x2*c3x1-200*c3x2*c3x1*c3y1-20000*c3x1*c3y2
+20000*c3x1*c3y1+200*c3x1**2*c3y2+200*c3y1**2*c3x2+20000*c3x2*c3y2
-20000*c3x2*c3y1)))/(c3x2**2-2*c3x2*c3x1+c3x1**2+c3y2**2
-2*c3y2*c3y1+c3y1**2)

## Geradengleichungen der dritten Ecke:
s3x1=c3x1+vektor1*(c3x2-c3x1)
s3y1=c3y1+vektor1*(c3y2-c3y1)
s3z1=c3z1+vektor1*(c3z2-c3z1)

s3x2=c3x1+vektor2*(c3x2-c3x1)
s3y2=c3y1+vektor2*(c3y2-c3y1)
s3z2=c3z1+vektor2*(c3z2-c3z1)

if int((s3x1-100)**2+(s3y1-100)**2)>8100
and int((s3x2-100)**2+(s3y2-100)**2)>8100:
    s3x2=s3x1
    s3y2=s3y1
    s3z2=s3z1
else:
    if int((s3x1-100)**2+(s3y1-100)**2)>8100:
        vektor1=(-100*c3x1+c3x1**2-c3y2*c3y1+c3y1**2-c3x2*c3x1+100*c3x2
+100*c3y2-100*c3y1+sqrt(abs(-200*c3y2*c3y1*c3x2+3800*c3x2*c3x1
+3800*c3y2*c3y1-1900*c3y2**2-1900*c3x2**2+200*c3y2**2*c3x1
-200*c3x1*c3y2*c3y1-1900*c3y1**2-1900*c3x1**2-c3x2**2*c3y1**2
+200*c3x2**2*c3y1-c3y2**2*c3x1**2-200*c3x2*c3x1*c3y2
+2*c3y2*c3y1*c3x2*c3x1-200*c3x2*c3x1*c3y1-20000*c3x1*c3y2
+20000*c3x1*c3y1+200*c3x1**2*c3y2+200*c3y1**2*c3x2
+20000*c3x2*c3y2-20000*c3x2*c3y1)))/(c3x2**2-2*c3x2*c3x1+c3x1**2
+c3y2**2-2*c3y2*c3y1+c3y1**2)

        s3x1=c3x1+vektor1*(c3x2-c3x1)
        s3y1=c3y1+vektor1*(c3y2-c3y1)
        s3z1=c3z1+vektor1*(c3z2-c3z1)

    if int((s3x2-100)**2+(s3y2-100)**2)>8100:
        vektor2=(-100*c3x1+c3x1**2-c3y2*c3y1+c3y1**2-c3x2*c3x1+100*c3x2
+100*c3y2-100*c3y1+sqrt(abs(-200*c3y2*c3y1*c3x2+3800*c3x2*c3x1
+3800*c3y2*c3y1-1900*c3y2**2-1900*c3x2**2+200*c3y2**2*c3x1
-200*c3x1*c3y2*c3y1-1900*c3y1**2-1900*c3x1**2-c3x2**2*c3y1**2
+200*c3x2**2*c3y1-c3y2**2*c3x1**2-200*c3x2*c3x1*c3y2
+2*c3y2*c3y1*c3x2*c3x1-200*c3x2*c3x1*c3y1-20000*c3x1*c3y2
+20000*c3x1*c3y1+200*c3x1**2*c3y2+200*c3y1**2*c3x2
+20000*c3x2*c3y2-20000*c3x2*c3y1)))/(c3x2**2-2*c3x2*c3x1+c3x1**2
+c3y2**2-2*c3y2*c3y1+c3y1**2)

```

```

s3x2=c3x1+vektor2*(c3x2-c3x1)
s3y2=c3y1+vektor2*(c3y2-c3y1)
s3z2=c3z1+vektor2*(c3z2-c3z1)

if s3z1>hohe and s3z2>hohe:
s3x2=s3x1
s3y2=s3y1
s3z2=s3z1
else:
if s3z1>hohe:
    s3z1=hohe
    s3y1=c3y1+float((hohe-c3z1)*(c3y2-c3y1)/(c3z2-c3z1))
    s3x1=c3x1+float((hohe-c3z1)*(c3x2-c3x1)/(c3z2-c3z1))

if s3z2>hohe:
    s3z2=hohe
    s3y2=c3y1+float((hohe-c3z1)*(c3y2-c3y1)/(c3z2-c3z1))
    s3x2=c3x1+float((hohe-c3z1)*(c3x2-c3x1)/(c3z2-c3z1))

if s3z1<-5:
s3z1=-5
s3y1=c3y1+(-5-c3z1)*(c3y2-c3y1)/(c3z2-c3z1)
s3x1=c3x1+float((-5-c3z1)*(c3x2-c3x1)/(c3z2-c3z1))

if s3z2<-5:
s3z2=-5
s3y2=c3y1+(-5-c3z1)*(c3y2-c3y1)/(c3z2-c3z1)
s3x2=c3x1+float((-5-c3z1)*(c3x2-c3x1)/(c3z2-c3z1))

```

dritte Lauflänge im Tank:

```
l3=sqrt((s3x2-s3x1)**2+(s3y2-s3y1)**2+(s3z2-s3z1)**2)
```

9.4 vierte Ecke

```

if (ersteebene=="Ebene 1" and zweiteebene=="Ebene 2")
or (ersteebene=="Ebene 2" and zweiteebene=="Ebene 1"):
    if ersteebene=="Ebene 1":
        s4z1=hohe
        vektor1=float((s4z1-c4z1)/(c4z2-c4z1))
        s4x1=c4x1+vektor1*(c4x2-c4x1)
        s4y1=c4y1+vektor1*(c4y2-c4y1)
    else:
        if zweiteebene=="Ebene 1":
            s4z2=hohe
            vektor2=float((s4z2-c4z1)/(c4z2-c4z1))
            s4x2=c4x1+vektor2*(c4x2-c4x1)
            s4y2=c4y1+vektor2*(c4y2-c4y1)

if ersteebene=="Ebene 2":
s4z1=-5
vektor1=float((s4z1-c4z1)/(c4z2-c4z1))

```

```

s4x1=c4x1+vektor1*(c4x2-c4x1)
s4y1=c4y1+vektor1*(c4y2-c4y1)
else:
    if zweiteebene=="Ebene 2":
        s4z2=-5
        vektor2=float((s4z2-c4z1)/(c4z2-c4z1))
        s4x2=c4x1+vektor2*(c4x2-c4x1)
        s4y2=c4y1+vektor2*(c4y2-c4y1)
else:
vektor2=(-100*c4x1+c4x1**2-c4y2*c4y1+c4y1**2-c4x2*c4x1+100*c4x2
+100*c4y2-100*c4y1+sqrt(abs(-200*c4y2*c4y1*c4x2+3800*c4x2*c4x1
+3800*c4y2*c4y1-1900*c4y2**2-1900*c4x2**2+200*c4y2**2*c4x1
-200*c4x1*c4y2*c4y1-1900*c4y1**2-1900*c4x1**2-c4x2**2*c4y1**2
+200*c4x2**2*c4y1-c4y2**2*c4x1**2-200*c4x2*c4x1*c4y2
+2*c4y2*c4y1*c4x2*c4x1-200*c4x2*c4x1*c4y1-20000*c4x1*c4y2
+20000*c4x1*c4y1+200*c4x1**2*c4y2+200*c4y1**2*c4x2
+20000*c4x2*c4y2-20000*c4x2*c4y1)))/(c4x2**2-2*c4x2*c4x1
+c4x1**2+c4y2**2-2*c4y2*c4y1+c4y1**2)

vektor1=(-100*c4x1+c4x1**2-c4y2*c4y1+c4y1**2-c4x2*c4x1+100*c4x2
+100*c4y2-100*c4y1-sqrt(abs(-200*c4y2*c4y1*c4x2+3800*c4x2*c4x1
+3800*c4y2*c4y1-1900*c4y2**2-1900*c4x2**2+200*c4y2**2*c4x1
-200*c4x1*c4y2*c4y1-1900*c4y1**2-1900*c4x1**2-c4x2**2*c4y1**2
+200*c4x2**2*c4y1-c4y2**2*c4x1**2-200*c4x2*c4x1*c4y2
+2*c4y2*c4y1*c4x2*c4x1-200*c4x2*c4x1*c4y1-20000*c4x1*c4y2
+20000*c4x1*c4y1+200*c4x1**2*c4y2+200*c4y1**2*c4x2
+20000*c4x2*c4y2-20000*c4x2*c4y1))
/(c4x2**2-2*c4x2*c4x1+c4x1**2+c4y2**2-2*c4y2*c4y1+c4y1**2)

## Geradengleichungen der vierten Ecke:
s4x1=c4x1+vektor1*(c4x2-c4x1)
s4y1=c4y1+vektor1*(c4y2-c4y1)
s4z1=c4z1+vektor1*(c4z2-c4z1)

s4x2=c4x1+vektor2*(c4x2-c4x1)
s4y2=c4y1+vektor2*(c4y2-c4y1)
s4z2=c4z1+vektor2*(c4z2-c4z1)
if int((s4x1-100)**2+(s4y1-100)**2)>8100
and int((s4x2-100)**2+(s4y2-100)**2)>8100:
    s4x2=s4x1
    s4y2=s4y1
    s4z2=s4z1
else:
    if int((s4x1-100)**2+(s4y1-100)**2)>8100:
vektor1=(-100*c4x1+c4x1**2-c4y2*c4y1+c4y1**2-c4x2*c4x1+100*c4x2
+100*c4y2-100*c4y1-sqrt(abs(-200*c4y2*c4y1*c4x2+3800*c4x2*c4x1
+3800*c4y2*c4y1-1900*c4y2**2-1900*c4x2**2+200*c4y2**2*c4x1
-200*c4x1*c4y2*c4y1-1900*c4y1**2-1900*c4x1**2-c4x2**2*c4y1**2
+200*c4x2**2*c4y1-c4y2**2*c4x1**2-200*c4x2*c4x1*c4y2
+2*c4y2*c4y1*c4x2*c4x1-200*c4x2*c4x1*c4y1-20000*c4x1*c4y2
+20000*c4x1*c4y1+200*c4x1**2*c4y2+200*c4y1**2*c4x2

```

```

+20000*c4x2*c4y2-20000*c4x2*c4y1)))/(c4x2**2-2*c4x2*c4x1
+c4x1**2+c4y2**2-2*c4y2*c4y1+c4y1**2)

s4x1=c4x1+vektor1*(c4x2-c4x1)
s4y1=c4y1+vektor1*(c4y2-c4y1)
s4z1=c4z1+vektor1*(c4z2-c4z1)

if int((s4x2-100)**2+(s4y2-100)**2)>8100:
vektor2=(-100*c4x1+c4x1**2-c4y2*c4y1+c4y1**2-c4x2*c4x1+100*c4x2
+100*c4y2-100*c4y1+sqrt(abs(-200*c4y2*c4y1*c4x2+3800*c4x2*c4x1
+3800*c4y2*c4y1-1900*c4y2**2-1900*c4x2**2+200*c4y2**2*c4x1
-200*c4x1*c4y2*c4y1-1900*c4y1**2-1900*c4x1**2-c4x2**2*c4y1**2
+200*c4x2**2*c4y1-c4y2**2*c4x1**2-200*c4x2*c4x1*c4y2
+2*c4y2*c4y1*c4x2*c4x1-200*c4x2*c4x1*c4y1-20000*c4x1*c4y2
+20000*c4x1*c4y1+200*c4x1**2*c4y2+200*c4y1**2*c4x2
+20000*c4x2*c4y2-20000*c4x2*c4y1)))/(c4x2**2-2*c4x2*c4x1
+c4x1**2+c4y2**2-2*c4y2*c4y1+c4y1**2)

s4x2=c4x1+vektor2*(c4x2-c4x1)
s4y2=c4y1+vektor2*(c4y2-c4y1)
s4z2=c4z1+vektor2*(c4z2-c4z1)

if s4z1>hohe and s4z2>hohe:
s4x2=s4x1
s4y2=s4y1
s4z2=s4z1
else:
if s4z1>hohe:
s4z1=hohe
s4y1=c4y1+float((hohe-c4z1)*(c4y2-c4y1)/(c4z2-c4z1))
s4x1=c4x1+float((hohe-c4z1)*(c4x2-c4x1)/(c4z2-c4z1))

if s4z2>hohe:
s4z2=hohe
s4y2=c4y1+float((hohe-c4z1)*(c4y2-c4y1)/(c4z2-c4z1))
s4x2=c4x1+float((hohe-c4z1)*(c4x2-c4x1)/(c4z2-c4z1))

if s4z1<-5:
s4z1=-5
s4y1=c4y1+(-5-c4z1)*(c4y2-c4y1)/(c4z2-c4z1)
s4x1=c4x1+float((-5-c4z1)*(c4x2-c4x1)/(c4z2-c4z1))

if s4z2<-5:
s4z2=-5
s4y2=c4y1+(-5-c4z1)*(c4y2-c4y1)/(c4z2-c4z1)
s4x2=c4x1+float((-5-c4z1)*(c4x2-c4x1)/(c4z2-c4z1))

## vierte Lauflänge im Tank:
l4=sqrt((s4x2-s4x1)**2+(s4y2-s4y1)**2+(s4z2-s4z1)**2)

##### 9.5 Ausgabe der Lauflängen #####

```

```

print("Lauflänge l1="+str(l1))
print("Lauflänge l2="+str(l2))
print("Lauflänge l3="+str(l3))
print("Lauflänge l4="+str(l4))

winkel()

#####
##### 10. Ermittlung der Winkel #####
#####

def winkel():
    global alpha
    global beta
    global gamma
    global theta
    global phi

##### 10.1 Winkel bezüglich den Achsen #####

## alpha beschreibt den Winkel zwischen der Lauflänge und der y-z-Ebene
## beta beschreibt den Winkel zwischen der Lauflänge und der x-z-Ebene
## gamma beschreibt den Winkel zwischen der Lauflänge und der x-y-Ebene
## l beschreibt den Abstand zwischen 2 zugehörigen Ecken der 2 Segmente

l=sqrt((c1x2-c1x1)**2+(c1y2-c1y1)**2+(c1z2-c1z1)**2)
a=abs(c1x2-c1x1)/l
b=abs(c1y2-c1y1)/l
c=abs(c1z2-c1z1)/l

## Berechnung der Winkel:
alpha=(pi/2-acos(a))*360/(2*pi)
beta=(pi/2-acos(b))*360/(2*pi)
gamma=(pi/2-acos(c))*360/(2*pi)

## Ausgabe der Winkel:
print("Winkel zur y-z-Ebene: alpha="+str(alpha)+"°")
print("Winkel zur x-z-Ebene: beta="+str(beta)+"°")
print("Winkel zur x-y-Ebene: gamma="+str(gamma)+"°")

##### 10.2 Azimut- und Polarwinkel #####

## Azimutwinkel
lazi=sqrt((c1x2-c1x1)**2+(c1y2-c1y1)**2+(c1z2-c1z1)**2)
aazi=abs(c1z2-c1z1)/lazi
theta=(acos(aazi))*360/(2*pi)
print("Azimutwinkel: theta="+str(theta)+"°")

## Polarwinkel
lpol=sqrt((c1x2-c1x1)**2+(c1y2-c1y1)**2+(0)**2)
if lpol==0:

```

```

        apol=0
    else:
        apol=abs(c1x2-c1x1)/lpol
    phi=(acos(apol))*360/(2*pi)
    print("Polarwinkel: phi="+str(phi)+"°")

    tank()

#####
##### 11. Erstellung des ICETOP-Tanks #####
#####

def tank():
    for i in range(hohe, -4, -1):
        ring(pos=(100,100,i), axis=(0,0,100), radius=90, thickness=1,opacity=0.2)

        cylinder(pos=(100,100,-5), axis=(0,0,1), radius=90,opacity=0.2)

        komponenten()

#####
##### 12. Erstellung der Ebenen, Segmente und DOMs #####
#####

def komponenten():
    for (g, h) in ((1,1),(2,0)):
        posx1=x1+deltax1*h+(25*g)*(e11+e12+e15-e16)
        posy1=y1+deltay1*h+(25*g)*(e11+e12-e13+e14)
        posz1=z1+deltaz1*h+(25*g)*(e13+e14+e15+e16)

        posx2=x2+deltax2*h+(25*g)*(e21+e22+e25-e26)
        posy2=y2+deltay2*h+(25*g)*(e21+e22-e23+e24)
        posz2=z2+deltaz2*h+(25*g)*(e23+e24+e25+e26)

        a1=50*g*(e11+e12+e15+e16)+2/g*(e13+e14)
        b1=50*g*(e11+e12+e14+e13)+2/g*(e15+e16)
        c1=50*g*(e13+e14+e15+e16)+2/g*(e11+e12)
        a2=50*g*(e21+e22+e25+e26)+2/g*(e23+e24)
        b2=50*g*(e21+e22+e24+e23)+2/g*(e25+e26)
        c2=50*g*(e23+e24+e25+e26)+2/g*(e21+e22)

        pointerx = arrow(pos=(0,0,0), axis=(200,0,0), shaftwidth=1)
        pointery = arrow(pos=(0,0,0), axis=(0,200,0), shaftwidth=1)
        pointerz = arrow(pos=(0,0,0), axis=(0,0,200), shaftwidth=1)
        label(pos=(100,0,0), text="x", height=9, border=6,color=color.white
        ,background=color.black,linecolor=color.black)
        label(pos=(0,100,0), text="y", height=9, border=6,color=color.white
        ,background=color.black,linecolor=color.black)
        label(pos=(0,0,100), text="z", height=9, border=6,color=color.white
        ,background=color.black,linecolor=color.black)

```

```

if g==1:
    segm1=box(pos=vector(posx1,posy1,posz1),
              size=(a1,b1,c1),color=color.red,opacity=0.5)
    segm2=box(pos=vector(posx2,posy2,posz2),
              size=(a2,b2,c2),color=color.red,opacity=0.5)
else:
    if g==2:
        eb1=box(pos=vector(posx1,posy1,posz1),
                size=(a1,b1,c1),color=color.blue,opacity=0.3)

        eb2=box(pos=vector(posx2,posy2,posz2),
                size=(a2,b2,c2),color=color.blue,opacity=0.3)

        label(pos=(posx1,posy1,posz1), text=ersteebene+", "+"Segment"
              +str(Segment1),xoffset=(e11+e13)*(-60)+(e14+e16)*(60)+e15*(60)
              +e12*(-60),yoffset=(e11+e13)*60+(e14+e16)*(60)+e15*(-60)
              +e12*(-60),zoffset=(e11+e13)*60+(e14+e16)*(60)+e15*(-60)
              +e12*(-60), height=9, border=6
              ,color=color.white,background=color.black,linecolor=color.black)

        label(pos=(posx2,posy2,posz2), text=zweiteebene+", "+"Segment"
              +str(Segment2),xoffset=(e21+e23)*(-60)+(e24+e26)*(60)+e25*(60)
              +e22*(-60),yoffset=(e21+e23)*60+(e24+e26)*(60)+e25*(-60)
              +e22*(-60),zoffset=(e21+e23)*60+(e24+e26)*(60)+e25*(-60)
              +e22*(-60), height=9, border=6
              ,color=color.white,background=color.black,linecolor=color.black)

greenball1=sphere(pos=vector(128.5,100,68.5), radius=17.5
, color=color.green,opacity=0.7)

greenball1=sphere(pos=vector(71.5,100,67.5), radius=17.5
, color=color.green,opacity=0.7)

label(pos=(128.5,100,68.5), text="Dom1", xoffset=30,yoffset=30,zoffset=30, height=9
, border=6,color=color.white,background=color.black,linecolor=color.black)

label(pos=(71.5,100,67.5), text="Dom2", xoffset=-30,yoffset=30,zoffset=30, height=9
, border=6,color=color.white,background=color.black,linecolor=color.black)

geradenzeichnung()

#####
##### 13. Erstellung der Geraden #####
#####

def geradenzeichnung():

    ## im Tank:
    skurve1=curve(pos=[[s1x1,s1y1,s1z1], (s1x2,s1y2,s1z2)], radius=2,color=color.yellow)
    skurve2=curve(pos=[[s2x1,s2y1,s2z1], (s2x2,s2y2,s2z2)], radius=2,color=color.yellow)
    skurve3=curve(pos=[[s3x1,s3y1,s3z1], (s3x2,s3y2,s3z2)], radius=2,color=color.yellow)

```

```

skurve4=curve(pos=[(s4x1,s4y1,s4z1), (s4x2,s4y2,s4z2)], radius=2,color=color.yellow)

## zwischen den Segmentecken:
kurve1=curve(pos=[(c1x1,c1y1,c1z1), (c1x2,c1y2,c1z2)], radius=1)
kurve2=curve(pos=[(c2x1,c2y1,c2z1), (c2x2,c2y2,c2z2)], radius=1)
kurve3=curve(pos=[(c3x1,c3y1,c3z1), (c3x2,c3y2,c3z2)], radius=1)
kurve4=curve(pos=[(c4x1,c4y1,c4z1), (c4x2,c4y2,c4z2)], radius=1)

if save=="j":
    speichern()
else:
    neustart()

def speichern():
    print("Wie soll die Messung heißen?")
    name=raw_input()

    try:
        texttest=open("Messdaten"+"_"+Methodename+".txt","r")
        inhalt=texttest.read()
        texttest.close
    except:
        print("Messdaten"+"_"+Methodename+".txt wird erstellt.")

    text=open("Messdaten"+"_"+Methodename+".txt","w")

    try:
        text.write(inhalt)
    except:
        leer=5-5
        text.write("#####")
    text.write("\n")
    text.write(str(name))
    text.write("\n")
    text.write("\n")
    text.write(ersteebene+": "+"("+str(x1)+"," +str(y1)+"," +str(z1)+")")
    text.write("\n")
    text.write(zweiteebene+": "+"("+str(x2)+"," +str(y2)+"," +str(z2)+")")
    text.write("\n")
    text.write("\n")
    text.write(Methodename)
    text.write("\n")
    text.write("\n")
    text.write("Segment"+str(Segment1))
    text.write("\n")
    text.write("Segment"+str(Segment2))
    text.write("\n")
    text.write("\n")
    text.write("Lauflänge l1="+str(l1)+"cm")
    text.write("\n")
    text.write("Lauflänge l2="+str(l2)+"cm")

```

```

text.write("\n")
text.write("Lauflänge l3="+str(l3)+"cm")
text.write("\n")
text.write("Lauflänge l4="+str(l4)+"cm")
text.write("\n")
text.write("\n")
text.write("Winkel zur y-z-Ebene: alpha="+str(alpha)+"°")
text.write("\n")
text.write("Winkel zur x-z-Ebene: beta="+str(beta)+"°")
text.write("\n")
text.write("Winkel zur x-y-Ebene: gamma="+str(gamma)+"°")
text.write("\n")
text.write("\n")
text.write("Azimutwinkel: theta="+str(theta)+"°")
text.write("\n")
text.write("Polarwinkel: phi="+str(phi)+"°")
text.write("\n")
text.write("\n")
text.write("#####")
text.write("\n")
text.write("\n")

text.close()

neustart()

def neustart():
    print("Soll das Programm erneut ausgeführt werden? j/n")
    ns1=raw_input()

    if ns1=="j":
        print("Sollen die Ebenen die gleichen positionen haben? j/n")
        ns2=raw_input()

        if ns2=="j":
            methode()
        else:
            if ns2=="n":
                ebenenkoordinaten()
            else:
                print("Falsche Eingabe!!!")
                neustart()
    else:
        if ns1!="n":
            print("Falsche Eingabe!!!")
            neustart()

ebenkoordinaten()

```

Abbildungsverzeichnis

1.1	Quelle [DESYZ].	1
1.2	Julius Elster und Hans Geitel, Quelle [ELUGE].	2
1.3	(a) Ernest Rutherford Quelle [ERUTH], (b) Antoine Henri Becquerel Quelle [BECQU].	3
1.4	Viktor Hess in seinem Ballon, Quelle [HESS2].	4
1.5	Ionisationsverlauf mit der Höhe, Quelle [HESS1].	4
1.6	kosmische Strahlung, Quelle [HESS2].	5
1.7	Häufigkeit der Elemente in der kosmischen Strahlung (durchzogene Linie) und in unserem Sonnensystem (gestrichelte Linie), Quelle [TRIPO].	6
1.8	Energiehäufigkeit der geladenen kosmischen Strahlung, Quelle [ASTRP].	7
1.9	Schauer der sekundären Strahlung, Quelle [WHZDR].	9
1.10	Polarisation durch den Cherenkov-Effekt, Quelle [TIPIC].	10
1.11	Cherenkov-Strahlung, Quelle [CEREN].	10
2.1	IceCube am Südpol, Quelle [ICEC5].	12
2.2	Aufbau der Detektoranlage von IceCube, Quelle [ICEC4].	13
2.3	detektierte Teilchenspur bei IceCube, Quelle [ICEC3].	14
2.4	Das Innere eines IceTop-Tanks bei IceCube am Südpol, Quelle [ITTDO].	15
2.5	IceTop-Messung der DOM's 59-64, Quelle [MBEIM].	15
3.1	Dreidimensionale Darstellung des IceTop-Tank's bestehend aus einem zylinderförmigen Tank, 2 OM's und 6 Triggerebenen.	17
3.2	Dimensionierung des IceTop-Tanks.	18
3.3	Darstellung des IceTop-Tanks. TE steht für Triggerebenen und bezeichnet die zur Messung benutzten Szintillatorebenen.	19
3.4	Aufbau einer Szintillatorebene mit seinen 4 Segmenten.	20
3.5	Aufbau und Funktionsweise eines Photomultipliers, Quelle [PHOMU].	21
3.6	Aufbau eines DOM's, Quelle [DOMIC].	22
3.7	Datenübertragung der OM's. CH steht für Channel.	23
3.8	Datenübertragung der Szintillatorebenen. Die Anschlussmethoden (a) und (b) sind gleichzeitig vorhanden.	23
3.9	Ausschnitt aus der von LaCoMe erstellten Textdatei.	25
4.1	Darstellung des Programms „IceTop-Tank-Visualisierung“. Hier wurde eine Messung mit den Ebenen 1 und 2 verwendet.	26
4.2	Darstellungen des Programms aus den Perspektiven x-y und x-z.	27
5.1	Teilchenrate unter Veränderung der Betriebsspannung bei konstanten Schwellen für die PMT's am Segment 1 der Ebene 2.	29

5.2	Poissonverteilung, Quelle [POISS].	30
5.3	Signal-Ladung-Diagramm für (a) OM1 und (b) OM2 bei einer LED-Spannung von 2,5V.	31
5.4	Kalibrierung der Arbeitspunkte in Luft. Darstellung der Abstände zwischen Pedestalpeak und 1. PEP für verschiedene Betriebsspannungen der OM's.	32
5.5	Kalibrierung der Arbeitspunkte im Wasser. Darstellung der Abstände zwischen Pedestalpeak und 1. PEP für verschiedene Betriebsspannungen der OM's.	32
6.1	Trigger von OM1 bei 50mV Triggerschwelle.	36
6.2	Trigger für OM2 bei 50mV Triggerschwelle.	36
6.3	Trigger für OM1 und 100mV Triggerschwelle.	37
6.4	Trigger für beide OM's bei einer Triggerschwelle von 100mV.	38
6.5	Vergleich der Messungen r93 (Wasser) und r40 (Luft) mit OM1.	39
6.6	Messung r135 im Wasser ohne OM's zu treffen. Diese nehmen dabei einen ähnlichen Abstand zu den Teilchenspuren ein.	40
6.7	Messung r144 im Wasser ohne OM's zu treffen. Diese nehmen dabei unterschiedliche Abstände zu den Teilchenspuren ein.	41
6.8	Messung r117 im Wasser mit Treffer am OM2.	41
6.9	Messung r118 im Wasser mit Treffer am OM1.	42
6.10	Messung r35 in Luft mit Treffer am OM2.	42
6.11	Messung r36 in Luft mit Treffer am OM1.	43
6.12	Messung r41 in Luft mit Treffer am OM2.	43
6.13	Messung r129 in Wasser. Die OM's werden mit einem Attenuator betrieben, aber nicht getroffen.	44
6.14	Messung r122 in Wasser. Die OM's werden getroffen und mit einem Attenuator betrieben.	45

Tabellenverzeichnis

1.1	Teilchenzerfälle, Quellen [FRUTH] und [BEUSC].	8
3.1	Positionen der OM's im IceTop-Tank.	21
5.1	Schwankung der Stabilität am OM1 in Luft.	33
5.2	Schwankung der Stabilität am OM2 in Luft.	33
5.3	Schwankung der Stabilität am OM1 im Wasser.	33
5.4	Schwankung der Stabilität am OM2 im Wasser.	34
6.1	Positionen und Breiten der Peaks für die Messungen ohne Triggerebenen. .	38
6.2	Positionen und Breiten der Myonpeaks (r135).	40
6.3	Positionen und Breiten der Myonpeaks (r144).	41
6.4	Positionen und Breiten der Myonpeaks der Messungen r117 und r118. . . .	42
6.5	Position und Breite des Myonpeaks der Messung r41 am OM2.	43
6.6	Positionen und Breiten der Myonpeaks der Messung r129.	44
6.7	Positionen und Breiten der Myonpeaks der Messung r122.	45

Literaturverzeichnis

[ASTRP] <http://astroparticle.uchicago.edu/sciam1.jpg>

[BECQU] *The Nobel Prize in Physics 1903*, http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1903/becquerel-bio.html

[BEUSC] K. Bethge und U. E. Schröder, *Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen*, WILEY-VCH Verlag, 3. erweiterte Auflage, 2006

[CAUGO] Robert N. Cahn und Gerson Goldhaber, *The Experimental Foundations of Particle Physics*, Cambridge University Press 1989, 1989.

[CEREN] <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Cherenkov.svg&filetimestamp=20060316122634>

[CFPOW] Cecil F. Powell, *The cosmic radiation**, Nobel Lecture, 11 December 1950, http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1950/powell-lecture.pdf

[CGRUP] Claus Grupen, *Astroteilchenphysik Das Universum im Licht der kosmischen Strahlung*, Vieweg Verlag, 1. Auflage September 2000.

[DESYZ] *Astroteilchenphysik*, http://nuastro-zeuthen.desy.de/index_ger.html

[DOMIC] http://gallery.icecube.wisc.edu/external/main.php?g2_view=core.DownloadItem&g2_itemId=850&g2_serialNumber=6

[DYLEX] <http://kworkquark.desy.de/lexikon/index/2/index.html>

[ELUGE] *Julius Elster und Hans Geitel*, <http://www.elster-geitel.de/start.php>

[ERUTH] *Lord Ernest Rutherford (1871-1937)*, <http://scientistsinformation.blogspot.com/2011/03/lord-ernest-rutherford-1871-1937.html>

[FRUTH] David H. Frisch und Alan M. Thorndike, *Elementary Particles*, 1964

- [HESS1] *Viktor Hess und die Entdeckung der Kosmischen Strahlung*, <http://www.federmann.co.at/vfhess/Kapiteluebersicht.html>
- [HESS2] *Teilchen aus dem All*, http://www.wissensnetz.org/seiten/themenseiten/kosmische_strahlung/
- [ICEC1] *IceCube Preliminary Design Document*, <http://icecube.wisc.edu/icecube/static/reports/IceCubeDesignDoc.pdf>
- [ICEC2] *Invited Review Article: IceCube: An instrument for neutrino astronomy*, <http://icecube.wisc.edu/icecube/static/reports/IceCubeReview2010.pdf>
- [ICEC3] *IceCube Explained*, <http://www.icecube.wisc.edu/about/explained>
- [ICEC4] *IceCube: Neutrino-Teleskop der neuen Generation*, http://nuastro-zeuthen.desy.de/e13/e63159/index_ger.html
- [ICEC5] <http://physics.ua.edu/faculty/toale.html>
- [ITPAP] *IceTop tank response to muons*, <http://indico.nucleares.unam.mx/getFile.py/access?contribId=1059&sessionId=40&resId=0&materialId=paper&confId=4>
- [ITTDO] *World's Strangest Telescope - The IceCube*, <http://www.optcorp.com/edu/articleDetailedEDU.aspx?aid=1873>
- [KNOED] Michael Knödlseher, *Kosmische Strahlung-Energie und Zusammensetzung*, http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/wegscheider/gebhardt_files/skripten/KosStrahl.pdf
- [MBEIM] Michael Beimforde, *Diplomarbeit: Calibration of air shower signals in the ICETOP detector using cosmic ray muons*, Dezember 2006. http://nuastro-zeuthen.desy.de/neutrino_experimete/icecube/publikationen/diplomarbeiten/e597/infoboxContent684/MBeimforde_icecube_200702002_v1.pdf
- [MFRID] Michael W. Fridlander, *Cosmic Rays*, WILEY Verlag, 1989.
- [MORIS] Ian Morison, *Introduction to Astronomy and Cosmology*, WILEY Verlag, 2008.

[MWALT] Konversationen mit Dr. Michael Walter

[PHOMU] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photomultiplier_schema_de.png?uselang=de

[PHOTO] Neuauflage von S-O Flyckt und Carole Marmonier, *PHOTOMULTIPLIER TUBES principles & applications*, Photonis.

[POISS] *Poisson-Verteilung*, <http://de.wikipedia.org/wiki/Poisson-Verteilung>

[RNAHN] Konversationen mit Dr. Rolf Nahnauer

[RSCHL] Reinhard Schlickeiser, *Cosmic Ray Astrophysics*, Springer Verlag Berlin Heidelberg 2002.

[TIPIC] <http://i32.tinypic.com/b6aplf.jpg>

[TRIPO] Christoph Boden, *Die kosmische Strahlung als Fenster zum Universum*, <http://tmpberlin.tripod.com/temp.htm>, Januar 2004

[VNAHN] Vortrag Rolf Nahnauer, *First Results from the Zeuthen IceTop Tank Test Facility*, September 2011.

[WHZDR] *Sekundäre kosmische Strahlung*, <http://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=13181&pNid=2455>

Danksagung

„Wenn man eine Arbeit mag, dann ist es keine Arbeit.“
Anders Jonas Angström

An diesem Punkt möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mir das Physikstudium und die Bachelorarbeit ermöglicht haben.

Ich bedanke mich bei meinen Eltern, die mich all die Jahre während des Studiums unterstützt haben und mir somit das Physikstudium ermöglichten.

Weiterhin bedanke ich mich bei Prof. Dr. Wolfgang Lohmann. Er ist Professor an der BTU Cottbus und ermöglichte mir meine Bachelorarbeit am DESY zuschreiben. Durch seine Vorlesung brachte er mir die Astroteilchenphysik näher und hat mein Interesse für dieses Gebiet somit gefestigt.

Ich bedanke mich besonders bei Dr. Michael Walter und Dr. Rolf Nahnauer. Sie haben mich bei den Experimenten und während der Bearbeitung der Bachelorarbeit tatkräftig unterstützt und standen für alle Fragen zur Verfügung.

Vielen Dank an alle

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Cottbus, 20.09.2011

Christian Martens