

# Studien zur Myonenzählstrategie der AMIGA-Erweiterung des Pierre-Auger-Observatoriums

Bachelorarbeit  
zur Erlangung des akademischen Grades  
**Bachelor of Science**  
**(B.Sc.)**

der Universität Siegen



Department Physik

vorgelegt von  
**Christian Dehn**

31. Mai 2013



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>1</b>
<b>1 Abstract</b>	<b>3</b>
<b>2 Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>3 Kosmische Strahlung</b>	<b>7</b>
3.1 Die Entdeckung der kosmischen Strahlung . . . . .	7
3.2 Chemische Zusammensetzung der primären kosmischen Strahlung . . . . .	8
3.3 Energiespektrum der primären kosmischen Strahlung . . . . .	9
3.4 Ursprung der primären kosmischen Strahlung . . . . .	11
3.5 GZK-Unterdrückung . . . . .	12
3.6 Sekundäre kosmische Strahlung . . . . .	13
3.7 Eindringtiefe . . . . .	15
3.8 Bestimmung des Primärteilchens . . . . .	15
<b>4 Das Pierre-Auger-Observatorium</b>	<b>19</b>
4.1 Oberflächendetektor . . . . .	20
4.2 Fluoreszenzdetektor . . . . .	21
4.3 Schauerbeispiel . . . . .	22
4.4 Erweiterungen des Pierre-Auger-Observatoriums . . . . .	23
<b>5 AMIGA</b>	<b>25</b>
5.1 Aufbau einer Myondetektorstation . . . . .	25
5.2 Detektion von Ereignissen . . . . .	28
5.3 AMIGA-Ereignisdatenstruktur . . . . .	30
<b>6 Datenanalyse</b>	<b>33</b>
6.1 Software-System . . . . .	33
6.2 Verwendeter Datensatz . . . . .	34
6.3 Verhalten bei unterschiedlichen Schwellenspannungen . . . . .	35
6.4 Vorbereitende Strukturanalyse . . . . .	38
6.5 Messzeitanalyse . . . . .	41

<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>47</b>
<b>8 Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>i</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>iii</b>
<b>Danksagung</b>	<b>v</b>
<b>Eidesstattliche Erklärung</b>	<b>vii</b>

## Abbildungsverzeichnis

3.1	Vergleich der Elementhäufigkeit . . . . .	9
3.2	Energiespektrum der primären kosmischen Strahlung . . . . .	10
3.3	Ausgedehnter Teilchenschauer . . . . .	14
3.4	Deponierte Energie als Funktion der Eindringtiefe . . . . .	16
3.5	Monte Carlo Simulation der deponierten Energie als Funktion der Eindringtiefe für verschiedene Teilchenarten . . . . .	17
4.1	Landkarte mit dem Pierre-Auger-Observatorium . . . . .	19
4.2	Schematischer Aufbau eines Wasser-Cherenkov-Tank-Detektors . . . . .	20
4.3	Fluoreszenzteleskop . . . . .	21
4.4	Rekonstruierter Schauerverlauf eines einfallenden kosmischen Teilchens . . . . .	22
4.5	Erweiterungen des Pierre-Auger-Observatoriums . . . . .	23
5.1	Vollständig montierte AMIGA-Untergrundelektronik . . . . .	27
5.2	Schematische Darstellung des Messprinzip der AMIGA-Erweiterung . . . . .	28
5.3	Schematische Darstellung der Verarbeitung eines AMIGA T1- und T3-Trigger-Signals . . . . .	29
5.4	Zeitintervallbeispiel . . . . .	30
5.5	Aufbau der Daten eines Zeitintervalls in einer AMIGA-Ereignisdatei . . . . .	30
5.6	Vergleich zwischen unkomprimierten und komprimierten Daten . . . . .	32
6.1	Häufigkeit der Dateigrößen von komprimierten AMIGA-Ereignis-Dateien . . . . .	34
6.2	Typisches AMIGA-Ereignis . . . . .	35
6.3	Aufsummierte Zeitverteilung der gemessenen Signale der Myondetektorstation Corrientes . . . . .	36
6.4	Signalmengen der Kanäle der Myondetektorstation Corrientes . . . . .	37
6.5	Häufigkeit der Signallängen in den Myonzähler-Daten . . . . .	38
6.6	Signalmengen der Kanäle des Detektors Corrientes . . . . .	40
6.7	Anzahl der Messungen aller Myondetektorstationen je Stunde für den Zeitraum von April bis November 2012 . . . . .	42
6.8	Anzahl der Messungen aller Myondetektorstationen je Stunde für den Zeitraum vom 11.09.2012 bis zum 17.09.2012 . . . . .	43
6.9	Messende Myonendetektorstationen . . . . .	44
6.10	Messzeit der einzelnen Myondetektorstationen . . . . .	44



## Tabellenverzeichnis

6.1	Absinkende Signalmengen der Detektorstation Corrientes . . . . .	37
6.2	Untersuchte Signalstrukturen . . . . .	39
6.3	Verhältnisse der Häufigkeiten . . . . .	41
6.4	Mittelwerte der Verhältnisse der Häufigkeiten . . . . .	41
6.5	Verwendete Myondetektorstationen . . . . .	42





## 1 Abstract

Diese Arbeit beschäftigt sich mit vorbereitenden Studien zur Entwicklung einer Myonzählstrategie der AMIGA-Erweiterung des Pierre-Auger-Observatoriums. Zum einen wird untersucht welche Signalstrukturen Myonen in den Daten der AMIGA-Erweiterung hinterlassen. Dazu werden die Länge und die Form der entsprechenden Strukturen untersucht. Zum anderen wird die Messzeit des verwendeten Detektors untersucht, um Zeiträume mit maximaler Messaktivität des Detektors und maximaler Anzahl an beteiligten Messstationen zu identifizieren.

Es wurden sechs Signalstrukturen auf ihr Vorkommen in den AMIGA-Daten analysiert und deren Häufigkeit festgestellt. Im Zuge weiterer Messungen müssen diese Häufigkeiten mit entsprechenden Erwartungswerten interpretiert werden, um eine Zählstrategie zu entwickeln. Dabei wurden die zwei längsten Zeiträume während der gesamten Messzeit der AMIGA-Erweiterung identifiziert, in denen ein Maximum an Messstationen an den Messungen beteiligt gewesen ist.



## 2 Einleitung

Die Astroteilchenphysik ist ein relativ neuer Wissenschaftszweig, der sich aus der Astrophysik zu Beginn des 20. Jahrhunderts entwickelt hat und mit dem sich Wissenschaftler weltweit beschäftigen. Er beinhaltet noch viele offene oder nicht abschließend beantwortete Fragen bezüglich dem Verhalten hochenergetischer Teilchen im Universum, deren Herkunft, ihrer Entstehung oder den Beschleunigungsmechanismen. Um diese Fragen zu klären, werden unterschiedlichste Arten von Beobachtungseinrichtungen von Satelliten bis hin zu großflächigen bodengebundenen Anlagen, wie dem Pierre-Auger-Observatorium in der argentinischen Pampa, verwendet. Erweiterungen und Modifikationen sorgen dafür, dass die während der Experimente gewonnenen Erkenntnisse genutzt werden können, um den Antworten zu diesen Fragen näher zu kommen. Eine Erweiterung des Pierre-Auger-Observatoriums ist AMIGA.

Die AMIGA-Erweiterung (Auger Muon and Infill for the Ground Array) besteht aus einer räumlich begrenzten Verdichtung der zur Messung verwendeten Stationen des Pierre-Auger-Observatoriums deren Stationen zusätzlich mit Zählern zur Beobachtung von Myonen ausgestattet sind (Abschnitt 4). In dieser Arbeit werden Messungen mit der AMIGA-Erweiterung untersucht.

Zunächst werden die Messdaten im Hinblick auf typische Datenstrukturen (Abschnitt 6.4) analysiert. Diese Analyse dient zur Vorbereitung der Entwicklung eines Zählalgorithmus, welcher aus den Messdaten einen Wert für die Menge der beobachteten Myonen ermitteln soll. Die Entwicklung des Algorithmus selbst ist nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Der zweite Schwerpunkt liegt in der Entwicklung eines Werkzeugs, das die Messdaten so aufbereitet, dass die Messzeiten der einzelnen Detektoren dargestellt werden können. Damit können dann Messdauer-Zeiträume ausgewählt werden, die bestimmten Kriterien entsprechen, um weiterführende Analysen zu erstellen (Abschnitt 6.5).

Zunächst folgt eine Einführung in das Gebiet der kosmischen Strahlung. Diese befasst sich zuerst mit einigen historischen Entdeckungen, die zum Verständnis der kosmischen Strahlung beigetragen haben. Des Weiteren werden mehrere Eigenschaften und mögliche Quellen der kosmischen Strahlung, sowie deren Propagation und Interaktion auf ihrem Weg bis zur Erdoberfläche beschrieben. Im Anschluss wird das Pierre-Auger-Observatorium vorgestellt. Es wird auf die verwendeten Detektoren eingegangen und deren jeweilige Funktionsweise erläutert. Außerdem werden Erweiterungen des Pierre-Auger-Observatoriums genannt. Den Myonzählern der AMIGA-Erweiterung ist das darauf folgende Kapitel gewidmet, in dem deren Elektronik und Funktionsweise, sowie das verwendete Datenformat erläutert werden. Anschließend wird die Analyse der Daten und

---

deren Ergebnisse vorgestellt. Als Abschluss der Arbeit werden alle Ergebnisse nochmals kurz zusammengefasst und ein Ausblick für mögliche zukünftige Schritte gegeben.

# 3 Kosmische Strahlung

Als kosmische Strahlung werden Teilchen extraterrestrischen Ursprungs bezeichnet. In der Wissenschaft werden sie dazu genutzt, Informationen über das Universum und die darin herrschenden Phänomene zu gewinnen. Dazu werden sowohl orbitale Beobachtungssatelliten als auch bodengebundene Detektoranlagen verwendet. Dieses Kapitel gibt eine Einführung in die kosmische Strahlung, beginnend mit ihrer Entdeckung sowie ihrer chemischen und energetischen Zusammensetzung und ihrem Ursprung. Anschließend werden mehrere Aspekte der Propagation der kosmischen Strahlung diskutiert. Danach wird das Pierre-Auger-Observatorium vorgestellt, welches der Erstellung von Studien zur kosmischen Strahlung dient.

## 3.1 Die Entdeckung der kosmischen Strahlung

Der französische Physiker Henry Antoine Becquerel entdeckte 1896 während seiner Arbeit mit Uransalzen, dass diese eine ionisierende Strahlung abgeben. Er schlussfolgerte, dass diese Strahlung beim Zerfall von radioaktiven Nukliden emittiert wird. Somit resultiert diese Strahlung aus Prozessen, die auf oder in der Erde stattfinden. 1903 wurde ihm für die Entdeckung der ionisierenden Strahlung der Nobelpreis für Physik verliehen [1].

Victor Franz Hess startete 1912 Messungen um das Abnehmen dieser Strahlung mit steigender Höhe zu studieren. Falls diese Strahlung ausschließlich von radioaktiven Nukliden der Erde emittiert werden sollte, müsste mit steigender Höhe die Intensität der Strahlung abnehmen. Seine ersten Messungen bestätigten die ursprüngliche Hypothese der abnehmenden Strahlung. Ab einer bestimmten Höhe stellte er allerdings einen Anstieg der Intensität der Strahlung fest. Daraus folgerte er, dass es sich nicht allein um Strahlung von der Erde handeln konnte, sondern er einen Teilchenfluss kosmischen Ursprungs gefunden haben musste [2]. Diese kosmische Strahlung, welche von ihm zunächst Höhenstrahlung genannt wurde, trifft die Erde zu jeder Zeit.

Sekundärteilchen entstehen durch Interaktion der primären kosmischen Strahlung mit Teilchen oder Kernen. In Nebelkammerversuchen gelang dem russischen Physiker Dmitri V. Skobeltsyn 1927 der erste Nachweis von Sekundärteilchen kosmischer Strahlung. Er fotografierte die Spuren der Teilchen, welche im gesättigten Dampfdruck einer Nebelkammer sichtbar werden [3].

Am Schweizer Jungfrauojoch auf 3500 m Höhe wies schließlich Pierre Victor Auger 1938 durch gleichzeitiges Ansprechen seiner 300 m voneinander entfernt aufgebauten Messgeräte ausgedehnte Teilchenschauer in Luft nach [4].

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse wird die Strahlung in primäre kosmische Strahlung und sekundäre kosmische Strahlung unterteilt.

Die kosmische Strahlung besteht aus Teilchen mit so hohen Energien, wie sie bis heute von keinem existierenden, von Menschen gebauten Beschleuniger erzeugt werden können. Sie liefert der Wissenschaft neben Informationen über unsere galaktischen Nachbarn auch viele Herausforderungen. Dazu zählen unter anderem die Fragen nach dem Ursprung der Strahlung und den zugrunde liegenden Beschleunigungsmechanismen.

### 3.2 Chemische Zusammensetzung der primären kosmischen Strahlung

Falls nicht genauer spezifiziert ist im folgenden Abschnitt unter Strahlung die primäre kosmische Strahlung zu verstehen.

Bei den Teilchen der Strahlung wird zwischen ionisierender und nicht-ionisierender Strahlung unterschieden. Erstere besteht aus etwa 2% Elektronen, 85% Wasserstoffkernen, 12% Heliumkernen, sowie weiteren Kernen mit Massenzahlen  $Z \geq 3$ . Diese Teilchen entstehen bei Elementsynthesen, ausgenommen Elektronen. Die chemische Zusammensetzung der kosmischen Strahlung entspricht nahezu der Elementhäufigkeit unseres Sonnensystems [5, S. 63].

Die Unterschiede in der Häufigkeit von Li, Be und B zwischen der kosmischen Strahlung und der Elementhäufigkeit im Sonnensystem ist ein Resultat der Spallation der schwereren Kerne Kohlenstoff und Sauerstoff. Die Spallation von Eisenkernen mit einer Massenzahl von  $Z=54$  sorgt dafür, dass die Häufigkeit der Elemente mit einer kleineren Massenzahl ebenfalls erhöht ist (Abbildung 3.1).

Eine Ablenkung elektrisch neutraler Teilchen auf ihrer Bahn durch elektrische oder magnetische Felder findet nicht statt. Daher eignen sie sich besser zur Bestimmung ihres Ursprungs als ionisierende Teilchen [5, S.63].

Gravitative Effekte haben auf Neutrinos aufgrund ihrer Masse von  $m_\mu < 2 \text{ eV}/c^2$  [6], die mehr als 400 Millionen mal kleiner ist als die Protonmasse von  $m_p = 938,3 \cdot 10^6 \text{ eV}/c^2$  [6], wesentlich geringere Auswirkungen. Daher erfahren Neutrinos während ihrer Propagation eine entsprechend kleinere Bahnablenkung durch gravitative Effekte und eignen sich deshalb ebenfalls zur Bestimmung ihres Ursprungs. Da Photonen masselos und elektrisch neutral sind, eignen sie sich mit den gleichen Argumenten von allen bis jetzt genannten Teilchen am besten zur Ursprungsbestimmung. Dabei erreicht die Strahlung teilweise Energien von  $10^{21} \text{ eV}$  (Abbildung 3.2).

Die entsprechenden Fachrichtungen sind die Neutrino-Astronomie und abhängig von der Energie der Photonen die Röntgenastronomie bei Primärteilchenenergien von 1 keV bis 100 keV und die Gammaastronomie bei Energien größer als 100 keV [5, S. 99].

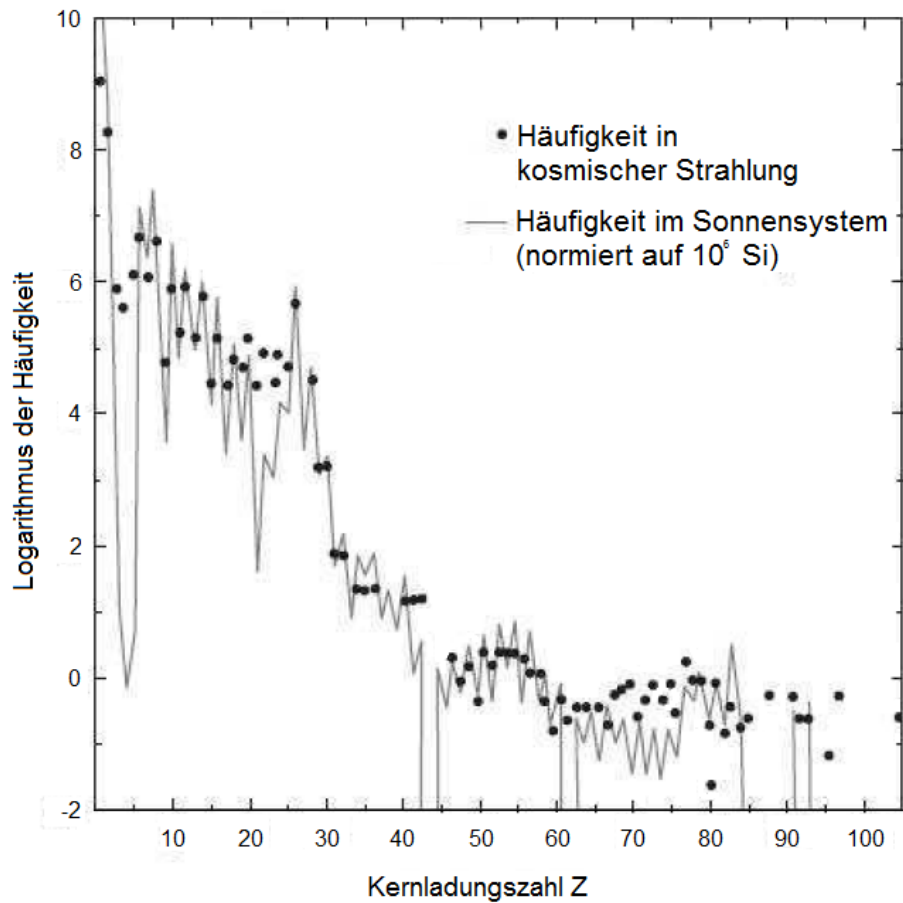


Abbildung 3.1: Vergleich der Elementhäufigkeit zwischen Vorkommen in primärer kosmischer Strahlung und Vorkommen im Sonnensystem [5, S. 63].

### 3.3 Energiespektrum der primären kosmischen Strahlung

Die kosmische Strahlung deckt einen Energiebereich von mehr als 14 Größenordnungen von  $10^6$  eV bis zu ultrahohen Energien von über  $10^{20}$  eV ab.

Der zur Zeit größte Teilchenbeschleuniger Large Hadron Collider (LHC) des europäischen Labors für Teilchenphysik (CERN) in Genf erreicht eine Schwerpunktsenergie von 14 TeV, welche um einen Faktor von mehr als  $10^7$  kleiner ist als die höchsten Energien der kosmischen Strahlung: Der Teilchenfluss  $\Phi$  der kosmischen Strahlung folgt einem Potenzgesetz und ist abhängig von der Energie  $E$  der Teilchen:

$$\Phi(E) \propto E^{-\gamma}. \quad (3.1)$$

Abbildung 3.2 zeigt den differentiellen Fluss der primären kosmischen Strahlung in Abhängigkeit von der Energie für einen Energiebereich von  $10^9$  eV bis  $10^{20}$  eV und ist das Ergebnis der Mes-

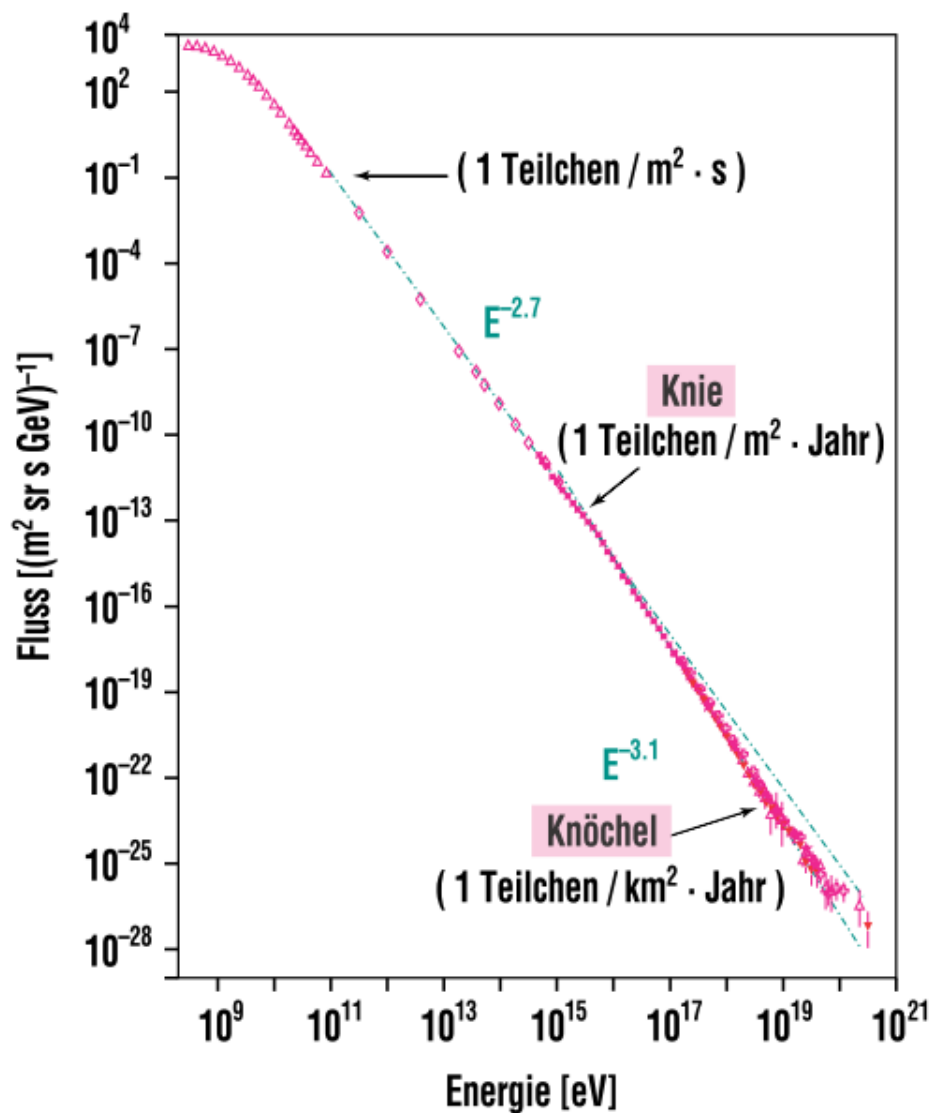


Abbildung 3.2: Energiespektrum der primären kosmischen Strahlung [7].

sungen mehrerer Experimente. Der Verlauf wird nur durch den spektralen Index  $\gamma$  beschrieben, womit eine Unterteilung des Spektrums in drei Bereiche möglich ist.

Der erste Bereich mit einem spektralen Index von  $\gamma = 2,7$  erstreckt sich bis etwa  $10^{15}$  eV [5, S. 64]. Im zweiten Bereich steigt der spektrale Index auf einen Wert von  $\gamma = 3,1$  bis circa  $10^{18}$  eV [5, S. 64] an. Der angeschlossene dritte Bereich zeigt ein Abflachen von  $\gamma$  auf einen Wert von 2,7. In Analogie zum menschlichen Bein werden die beiden abknickenden Bereiche als Knie und Knöchel bezeichnet. Insgesamt sinkt der Teilchenfluss mit steigender Energie. Erreicht die Erde im Energiebereich des Knies ein Teilchen pro Jahr und Quadratmeter, so ist es im Bereich des Knöchels ein Teilchen pro Jahr und Quadratkilometer (Abbildung 3.2).

Die Teilchen der ersten beiden Bereiche bis zum Knöchel stammen aus unserer Galaxis und erhalten ihre Energie durch Fermi-Beschleunigung. Für Teilchen höherer Energien konnten die



Fragen nach deren Ursprung, Beschleunigung oder Zusammensetzung noch nicht abschließend geklärt werden [7].

## 3.4 Ursprung der primären kosmischen Strahlung

Als mögliche Quellen der primären kosmischen Strahlung gibt es mehrere unbestätigte Kandidaten. Falls nicht anders gekennzeichnet, wurden alle Angaben im folgenden Abschnitt aus [5] entnommen.

### Sonnenflecken

Stern- oder Sonnenflecken sind Gebiete auf Sternen, deren thermische Energie geringer ist, als die ihrer Umgebung. Ein Teil der thermischen Energie geht in magnetische Energie über, wodurch die Gebiete im Vergleich zu ihrer Umgebung dunkler erscheinen. Das resultierende Magnetfeld hat seinen Ursprung in turbulenten Bewegungen des Sonnenplasmas, welches im Wesentlichen aus Protonen und Elektronen besteht. Sonnenflecken haben eine Feldstärke von einigen 1000 Gauß und erreichen auf unserer Sonne Durchmesser von bis zu  $10^7$  m.

In während dem Auf- und Abbau dieser magnetischen Felder entstehenden elektrischen Feldern können geladene Teilchen beschleunigt werden. Es wurden Teilchen mit Energien von bis zu 100 GeV beobachtet, die durch diesen Mechanismus beschleunigt wurden.

Eine ähnlich große Beschleunigung wird durch Sonnenfleckenpaare beobachtet. Sonnenflecken treten oft paarweise auf, wobei sie jedoch entgegengesetzte Magnetfelder aufweisen. Sie bewegen sich aufeinander zu, um zu einem späteren Zeitpunkt miteinander zu verschmelzen. Diese Bewegung des Plasmas erzeugt wiederum ein veränderliches Magnetfeld, durch das Teilchen beschleunigt werden können.

### Fermi-Mechanismus 2. Ordnung

Trifft ein Teilchen mit Geschwindigkeit  $v$  auf eine Gaswolke mit Geschwindigkeit  $u$ , beträgt der mittlere Energiezuwachs des Teilchen, den es durch Stöße mit Teilchen der Gaswolke erhält:

$$\frac{\Delta E}{E} = 2 \frac{u^2}{v^2}. \quad (3.2)$$

Der Energiezuwachs  $\Delta E$  ist damit proportional zum Quadrat des Verhältnisses der Wolken- zur Teilchengeschwindigkeit. Da  $u \ll v$  ist der Energiezuwachs je Kollision gering. Magnetisiertes Plasma (Magnetwolke) hat eine höhere Gasdichte und somit einen entsprechend höheren Wechselwirkungsquerschnitt. Zwischen den Stößen mit dem Plasma verlieren die Teilchen durch

andere Interaktionen Energie, was dazu führt, dass die Teilchen eine minimale Injektionsenergie benötigen.

## Pulsare

Rotierende Neutronensterne (Pulsare) sind Überreste von Supernova-Explosionen. Sie besitzen neben einer hohen Dichte von  $6 \cdot 10^{13} \text{ g/cm}^3$  und einer Rotationszeit im Millisekundenbereich, extrem starke Magnetfelder mit magnetischen Feldstärken in der Größenordnung von  $10^8 \text{ T}$ . Die Magnetfelder induzieren starke elektrische Felder, in denen geladene Teilchen beschleunigt werden können.

Ein Pulsar oder Neutronenstern bildet zusammen mit einem normalen Stern ein Doppelsystem. In diesem System wird von dem Normalstern ständig Materie abgesaugt, die von dem kompakten Begleiter akkreditiert wird. Diese Plasmabewegung führt ebenfalls zu entsprechend starken elektrischen Feldern, welche als Beschleuniger dienen können.

## Aktive Galaktische Kerne

Ein aktiver galaktischer Kern (AGN) besteht aus einem supermassiven schwarzen Loch, um welches sich eine Akkretionsscheibe bildet. Senkrecht zur Akkretionsscheibe wird ein Plasmastrom mit einer Länge von einigen Megaparsec ausgestoßen. AGNs sind gute Kandidaten, Quellen ultrahochenergetischer Teilchen mit Energien von über  $10^{20} \text{ eV}$  zu sein.

## 3.5 GZK-Unterdrückung

Die GZK-Unterdrückung ist ein nach den Physikern Kenneth Greisen, Georgi Zatsepin und Wadim Kuzmin benannter Effekt [8] [9]. Er tritt bei ultrahochenergetischen geladenen kosmischen Teilchen während ihrer Propagation durch das Universum auf. Sie wechselwirken mit Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung  $\gamma_{CMB}$ . Protonen wechselwirken gemäß den beiden Reaktionen:

$$p + \gamma_{CMB} \rightarrow p + \pi^0, \quad (3.3)$$

$$p + \gamma_{CMB} \rightarrow n + \pi^+. \quad (3.4)$$

Durch diese Reaktionen verliert ein Proton ca. 20% seiner Energie und erfährt eine zufällige Richtungsänderung. Liegt die restliche Energie des Teilchens nach der Reaktion weiterhin über der Schwellenenergie von  $6 \cdot 10^{19} \text{ eV}$ , so kann eine erneute Reaktion stattfinden. Aufgrund der

Reaktionswahrscheinlichkeit nimmt man deshalb an, dass Teilchen mit einer Energie größer  $6 \cdot 10^{19}$  eV die Erde aus einer Entfernung kleiner als 100 Mpc erreichen.

Durch die Unterdrückung des Teilchenflusses bei Energien größer als  $6 \cdot 10^{19}$  eV erreichen die Erde wesentlich weniger Teilchen als ohne die Unterdrückung zu erwarten wären. Im HiRes-Experiment wurden ohne Unterdrückung bei einer Energie von  $10^{19,8}$  eV 43,2 Ereignisse erwartet, wobei lediglich 13 detektiert werden konnten. Daraus schließt man, eine Unterdrückung mit einer Signifikanz von mehr als fünf Standardabweichungen beobachtet zu haben, bei der es sich um den GZK-Effekt handeln könnte [10].

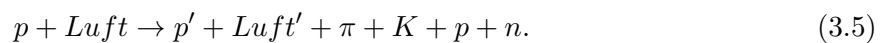
Diese Unterdrückung konnte eindeutig mittels der Daten des Pierre-Auger-Observatoriums nachgewiesen werden [11].

## 3.6 Sekundäre kosmische Strahlung

Die sekundäre kosmische Strahlung, welche, wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, durch Wechselwirkung der primären kosmischen Strahlung mit den Teilchen der Erdatmosphäre entsteht, bildet ausgedehnte Teilchenschauer (Abbildung 3.3). Die Produkte dieser Wechselwirkung differieren stark für unterschiedliche Wechselwirkungsarten der Teilchen. Ein Schauer kann in vier Komponenten unterteilt werden:

- hadronische Komponente,
- elektromagnetische Komponente,
- Neutrino-Komponente,
- myonische Komponente.

Wechselwirkt ein Proton mit Teilchen der Erdatmosphäre, so entstehen dabei in mehreren Prozessen Kaonen  $K$ , Pionen  $\pi$  und neue Nukleonen  $p$  und  $n$ :



Die Kaonen zerfallen bevorzugt in Myonen  $\mu$  und Myonneutrinos  $\nu_\mu$ , sowie Pionen  $\pi$ . Wahrscheinliche Möglichkeiten sind:

- $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu,$
- $K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu,$
- $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0,$
- $K^- \rightarrow \pi^- + \pi^0.$

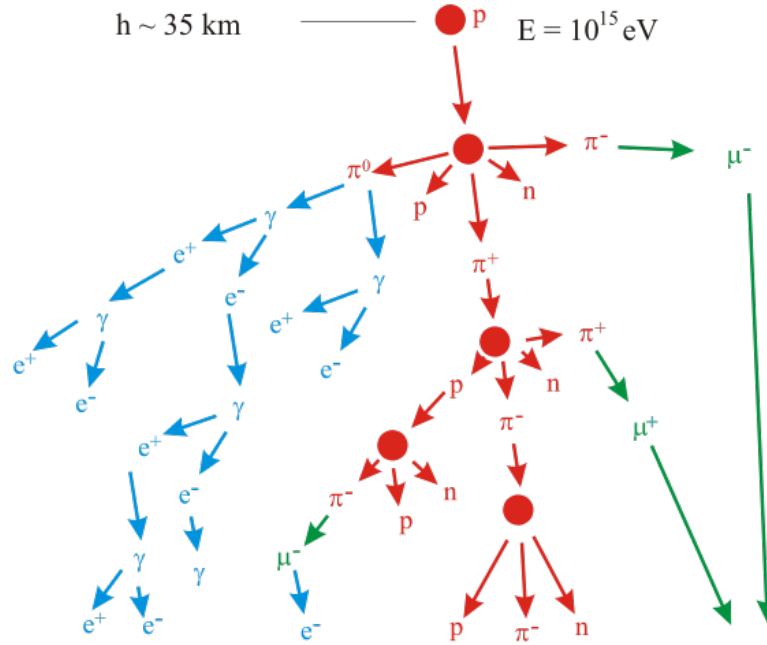


Abbildung 3.3: Ausgedehnter Teilchenschauer eines Proton-Primärteilchens mit einer Energie von  $10^{15}$  eV mit den drei Hauptschauerkomponenten ohne die Neutrino-Komponente [12].

Es werden genau so viele elektrisch neutrale wie geladene Pionen erzeugt. Dies führt dazu, dass doppelt so viele neutrale Pionen vorhanden sind wie positiv oder negativ geladene. Die neutralen Pionen  $\pi^0$  haben eine so kurze Lebensdauer, dass sie quasi instantan zerfallen mit dem bevorzugten Zerfallskanal:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma. \quad (3.6)$$

Die geladenen Pionen  $\pi^\pm$  zerfallen hauptsächlich in:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad (3.7)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu. \quad (3.8)$$

Der größte Teil der Myonen zerfällt weiter in:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu, \quad (3.9)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu. \quad (3.10)$$

Alle während dieser Prozesse entstehenden Hadronen, die nicht zerfallen, bilden die hadronische Komponente des Schauers. Diese bildet einen kleinen Teil der Gesamtanzahl der Teilchen an der Erdoberfläche.

Hadronen wechselwirken wegen ihres hohen Wechselwirkungsquerschnitts häufiger mit der Atmosphäre als andere Teilchen. 30% der bei hadronischer Wechselwirkung entstehenden Teilchen sind Teil der elektromagnetischen Komponente. Dies führt dazu, dass 85% der primären Energie auf Elektronen, Positronen und Photonen entfällt. Diese drei Teilchensorten machen 99% der während der Schauerbildung entstehenden Teilchen aus. Aufgrund von Absorption durch die Atome und Moleküle der Atmosphäre erreichen sie jedoch kaum den Boden. Dadurch ist die elektromagnetische Komponente trotz ihres hohen Anteils an den Schauerteilchen auf der Erdoberfläche stark unterdrückt.

Myonen mit einer mittleren Lebensdauer von  $2,197 \cdot 10^{-6}$  s [6], welche aufgrund der relativistischen Zeitdilatation nicht zerfallen, bilden die myonische Komponente des Schauers auf dem Erdboden.

Als letztes bleibt die Neutrino-Komponente. Sie besteht aus nahezu allen, während der Wechselwirkungen entstehenden Neutrinos. Aufgrund ihres sehr kleinen Wechselwirkungsquerschnitts kommen sie mit hoher Wahrscheinlichkeit auf der Erdoberfläche an, sind dort jedoch eben wegen der geringen Reaktionswahrscheinlichkeit schlecht nachzuweisen.

## 3.7 Eindringtiefe

Während der Propagation des Teilchenschauers durch die Atmosphäre verringert sich dessen Energie je Teilchen aufgrund der verschiedenen Wechselwirkungen der Teilchen mit der Atmosphäre. Dieser Prozess setzt sich bis zu einer Eindringtiefe  $X_{max}$  fort, in der die Sekundärteilchen nicht mehr ausreichend Energie besitzen, um weitere Teilchen zu erzeugen. Ab diesem Zeitpunkt sinkt die Anzahl der Teilchen mit fortschreitender Ausbreitung. Diese Eindringtiefen werden in  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$  angegeben, um unabhängig von der Dichte des Absorbermaterials zu sein.

Die in Abbildung 3.4 gezeigte Abhängigkeit der maximalen Eindringtiefe  $X_{max}$ , in welcher die Teilchenanzahl maximal ist, hängt sowohl von der Art des Primärteilchens, als auch von der zurückgelegten Strecke ab. Luftschauerexperimente können diese Tatsache verwenden, um Rückschlüsse auf die Art des Primärteilchens zu ziehen. Mittels der Bethe-Bloch-Formel kann die während der Propagation abgegebene Energie eines Teilchens berechnet werden:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = \frac{4\pi n z^2}{m_e c^2 \beta^2} \cdot \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \cdot \left[ \ln \left( \frac{2m_e v^2}{I} \right) \right]. \quad (3.11)$$

## 3.8 Bestimmung des Primärteilchens

Um die Art des Primärteilchens zu bestimmen, werden beim Pierre-Auger-Observatorium zur Zeit fünf Größen betrachtet. Dazu zählen die maximale Eindringtiefe  $X_{max}$ , deren Schwankung

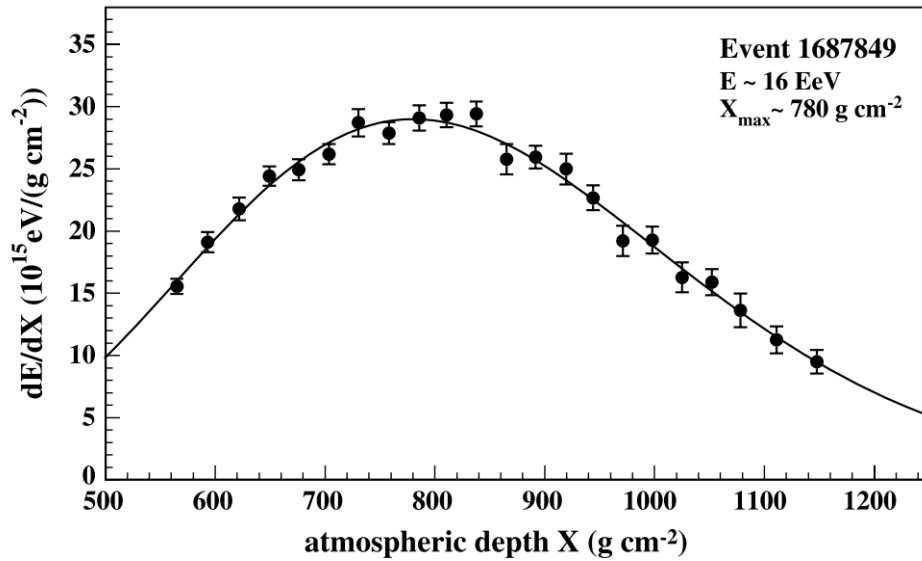


Abbildung 3.4: Deponierte Energie als Funktion der Eindringtiefe  $X$ . Die Eindringtiefe mit der höchsten deponierten Energie entspricht gleichzeitig derjenigen mit der maximalen Anzahl an Sekundärteilchen [13].

$\Delta X_{max}$ , die Zeit, welche das von einem Schauer in einem Detektor erzeugte Signal benötigt, um eine gewisse Schwellenspannung zu erreichen, sowie die Anzahl der Myonen in einem Schauer als auch die Krümmung der Schauerfront.

In Abbildung 3.5 ist die Anzahl der Partikel eines Schauers in Abhängigkeit von der atmosphärischen Eindringtiefe  $X$  für Eisen, Protonen und Photonen aufgetragen. Als Grundlage dienen simulierte Schauer.

Die Gesamtheit aller Photonenkurven lässt sich dabei von der Gesamtheit der Eisenkurven unterscheiden, wobei die maximale Eindringtiefe  $X_{max}$  als Indikator genutzt werden kann. Eine ereignisbasierte Identifizierung indes ist unsicher aufgrund der Überschneidung. Weiterhin sichtbar ist die geringere mittlere Schwankung  $\Delta X_{max}$  der Werte von  $X_{max}$  der Eisenkurven um einen mittleren Wert  $\langle X_{max} \rangle$  im Vergleich zur Schwankung der  $X_{max}$  Werte der Protonkurven.

Die Anstiegszeit des Signals, welches ein Teilchen im Detektor erzeugt, auf eine bestimmte Schwellenspannung ist für Myonen charakteristisch kürzer als bei anderen Teilchen und wird zur Identifikation des Primärteilchens untersucht.

Ein Photon-induzierter Schauer weist einen wesentlich geringeren Myonenanteil als z.B. ein Proton- oder ein Eisen-induzierter Schauer auf. Dies ist einer der Gründe, warum das Pierre-Auger-Observatorium derzeit mit zusätzlichen Detektoren ausgestattet wird, um den Myonenanteil eines Schauers genauer bestimmen zu können.

Die Krümmung der Schauerfront von Eisen- und Proton-induzierten Schauern unterscheidet sich aufgrund der höheren maximalen Eindringtiefe  $X_{max}$  von Proton-induzierten Schauern im Ver-

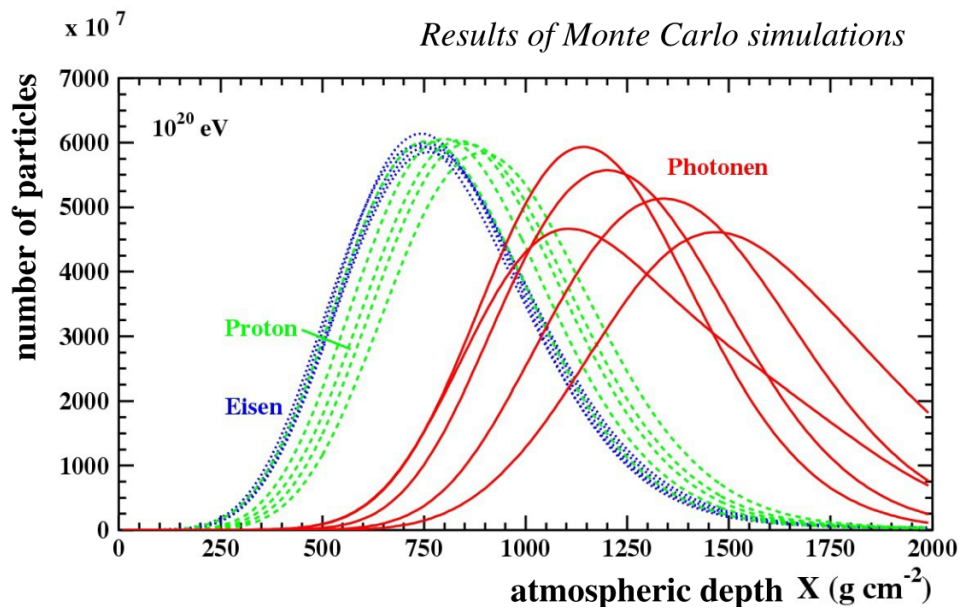


Abbildung 3.5: Monte Carlo Simulation der deponierten Energie als Funktion der Eindringtiefe  $X$  für verschiedene Teilchenarten. Die höchste deponierte Energie entspricht gleichzeitig der maximalen Anzahl an Sekundärteilchen [14].

gleich zu der von schwereren Eisenkernen induzierten Schauern. Weiterhin ist die Schauerfront eines photonischen Schauers nochmals stärker gekrümmt als die eines hadronischen Schauers aufgrund der höheren maximalen Eindringtiefe.





## 4 Das Pierre-Auger-Observatorium

Das nach dem französischen Physiker Pierre Victor Auger benannte Pierre-Auger-Observatorium ist das flächenmäßig größte Experiment zur indirekten Beobachtung kosmischer Strahlung. Es befindet sich auf ca. 1400 m Höhe in der Hochebene der Pampa Amarilla in der Provinz Mendoza von Argentinien und erstreckt sich über 3000 km<sup>2</sup>. Zur Messung von sekundärer kosmischer Strahlung wird eine Hybridtechnik aus zwei Verfahren verwendet. Mittels dieser Technik wird ein Energiebereich von 10<sup>18</sup> eV bis 10<sup>21</sup> eV untersucht. Die zwei grundlegenden Detektorformen sind ein aus mehr als 1660 Wasser-Cherenkov-Tanks bestehender Oberflächendetektor (SD) und ein aus 24 Teleskopen bestehender Fluoreszenzdetektor (FD). Die Wasser-Cherenkov-Tanks bilden ein hexagonal aufgebautes Netz und stehen jeweils 1,5 km voneinander entfernt. Die 24 Fluoreszenzteleskope befinden sich in Gruppen von jeweils sechs Teleskopen an den Rändern des Feldes. Sie sind jeweils auf den Himmel über dem Detektorfeld ausgerichtet (Abbildung 4.1) [15].

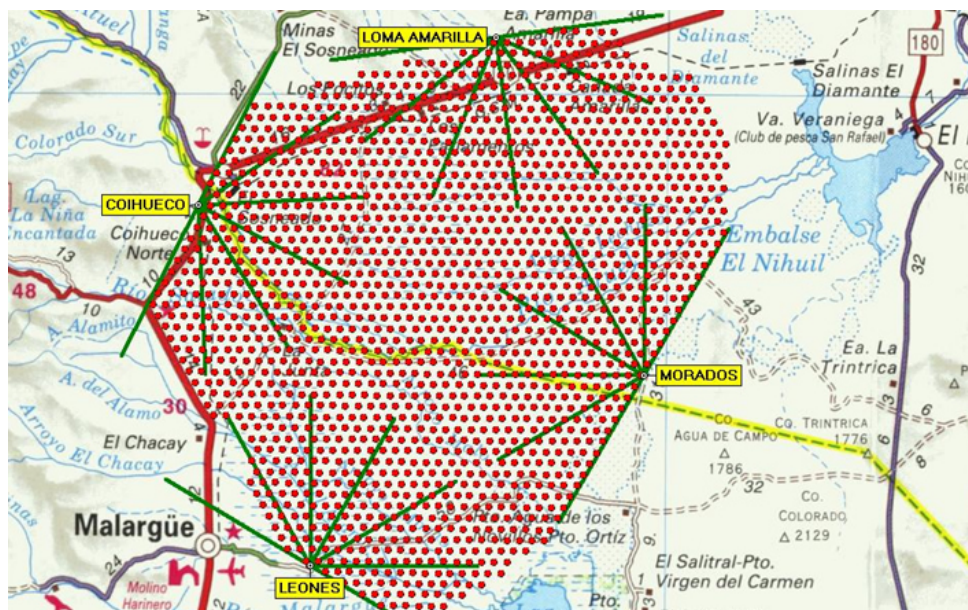


Abbildung 4.1: Landkarte mit dem Pierre-Auger-Observatorium: Das Bild zeigt das Pierre-Auger-Observatorium in der argentinischen Pampa. Mit roten Punkten sind die Wasser-Cherenkov-Tanks angedeutet. Die grünen Strahlen markieren die Blickfelder der Fluoreszenzteleskope [16].

Das Pierre-Auger-Observatorium wurde 2004 in Betrieb genommen und liefert seitdem zuverlässig Daten zur kosmischen Strahlung im ultrahohen Energiebereich.

## 4.1 Oberflächendetektor

Die zylinderförmigen Wasser-Cherenkov-Tanks haben eine Grundfläche von  $10\text{ m}^2$  und eine Höhe von  $1,2\text{ m}$  (Abbildung 4.2). Jeder ist mit  $12000\text{ l}$  hochreinem Wasser gefüllt. Im Inneren ist der Detektor mit einem UV-reflektierenden Material ausgekleidet, das das emittierte Cherenkov-Licht am Austritt aus dem Detektor hindern soll und die Detektionswahrscheinlichkeit durch einen der drei Photomultiplier (PMT) erhöht, die sich in jedem Tank befinden. Betrieben wird ein solcher Detektor über eine wiederaufladbare Batterie, die mit einer Solaranlage auf dem Detektor verbunden ist. Wasser begünstigt den Cherenkov-Effekt, da die Lichtgeschwindigkeit in Wasser nur ca.  $75\%$  der Lichtgeschwindigkeit in Vakuum entspricht. Hochreines Wasser bietet zudem Bakterien keine Ausbreitungsmöglichkeiten und unterstützt so die Langlebigkeit der Elektronik.

Erfolgt eine Messung, wird die genaue GPS-Zeit des Ereignisses an die zentrale Datennahmestelle gesendet. Mittels der Daten mehrerer Tanks lässt sich die Energie und Ankunftsrichtung des

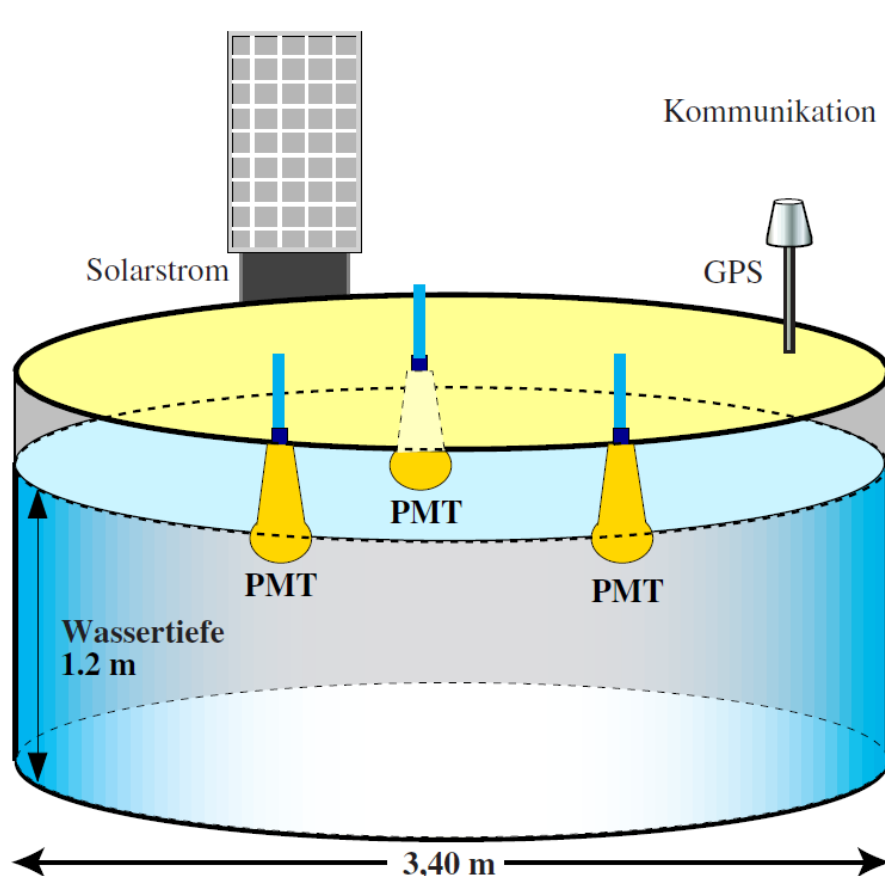


Abbildung 4.2: Schematischer Aufbau eines Wasser-Cherenkov-Tank-Detektors, wie er im Pierre-Auger-Observatorium zur Rekonstruktion von Energie, Ankunftsrichtung und Art eines Teilchens verwendet wird [17].

Primärteilchens rekonstruieren. Wie in Kapitel 3 erwähnt, kann mittels der Eigenschaften des Teilchenschauers die Art des primären kosmischen Teilchens rekonstruiert werden [18].

## 4.2 Fluoreszenzdetektor

Jedes der 24 Fluoreszenzteleskope (Abbildung 4.3) hat ein Sichtfenster von  $30^\circ \times 30^\circ$ . Bei einer Station, bestehend aus sechs solcher Teleskope, ergibt sich ein Fenster von  $30^\circ \times 180^\circ$ . Jedes Teleskop besteht aus einem UV-Filter, einem sphärischen Spiegel sowie einer Korrekturlinse und einer Kamera. Die Kamera besteht aus jeweils 440 PMTs. Die durch geladene Teilchen des kosmischen Schauers energetisch angeregten Stickstoffatome der Luft emittieren bei der Rückkehr in den Grundzustand Fluoreszenzlicht. Dieses wird von dem genannten Aufbau aufgenommen. Anhand dieser Aufnahmen lässt sich der Schauerverlauf beobachten und mittels der Lichtintensität die zugehörige Energie berechnen. Die Teleskope können für Teilchen mit Energien größer als  $10^{17}$  eV eingesetzt werden. Das zivilisatorische Licht ist in der argentinischen Pampa ein verschwindend kleiner bis kein Störfaktor für die Teleskope. Dies ist ein Grund für den Standort des Observatoriums. Weitere Faktoren für den Standort sind die saubere Atmosphäre, ein trockenes Klima und ein stabiles Wetter [19].

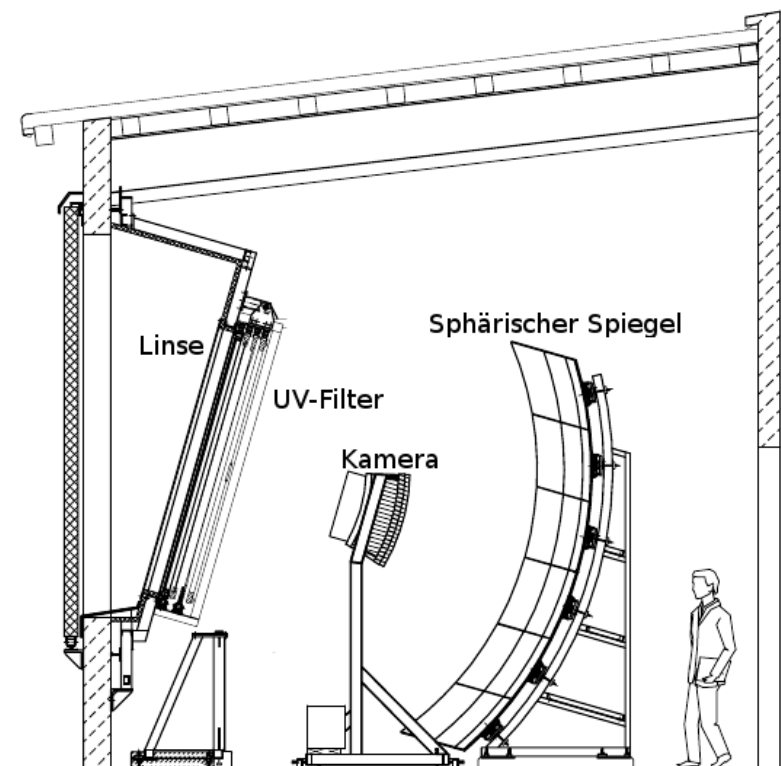


Abbildung 4.3: Fluoreszenzteleskop von denen jeweils sechs in einer Station stehen, bestehend aus Korrekturlinse, UV-Filter, sphärischem Spiegel und einer Kamera mit 440 Photomultipliern [19].

### 4.3 Schauerbeispiel

Wird ein Schauer kosmischer Teilchen mittels Daten von mehreren Wasser-Cherenkov-Tanks oder Fluoreszenzteleskopen rekonstruiert, kann daraus ein Schauerverlauf erstellt werden (Abbildung 4.4).

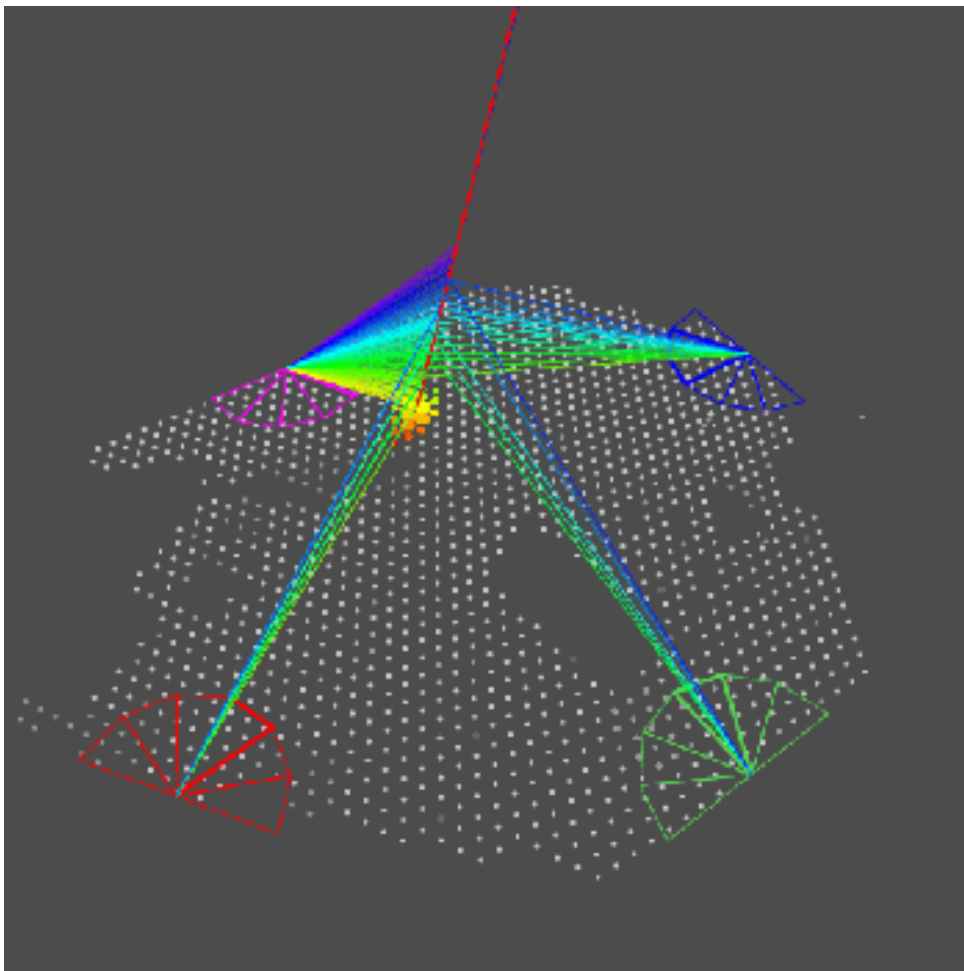


Abbildung 4.4: Rekonstruierter Schauerverlauf eines einfallenden kosmischen Teilchens, der von mehreren Fluoreszenzteleskopen und Wasser-Cherenkov-Tanks beobachtet wurde. Jeder Punkt entspricht dabei einem Wasser-Cherenkov-Tank und jedes gleichschenklige Dreieck in grün, rot, pink und blau markiert das Sichtfenster eines Teleskops. Die in den Tanks deponierte Energie wird durch die Größe der Punkte und die Ankunftszeit durch deren Farbe dargestellt. Die Energie des beobachteten Fluoreszenzlichtes wird durch die Farbe der Linien zwischen Teleskop und Schauersfront gekennzeichnet [20].

#### 4.4 Erweiterungen des Pierre-Auger-Observatoriums

Zu dem grundlegenden Experiment existieren mehrere Erweiterungen, die das Ziel haben, die Messungen zu verbessern oder neue Messtechniken zu erproben. Diese Erweiterungen befinden sich in einem Teil des Auger-Detektorfeldes, das Infill genannt wird (Abbildung 4.5). Durch eine Erhöhung der Tankdichte wird der beobachtbare Energiebereich von  $10^{18}$  eV bis  $10^{21}$  eV um eine Zehnerpotenz nach unten auf  $10^{17}$  eV erweitert. Eine höhere Tankdichte erlaubt es, kleinere Schauerfronten von niedrigeren Energien zu beobachten, die von Teilchen im Bereich des Knies erzeugt werden. Zudem soll der Myonenanteil der Schauer besser bestimmt werden, um die Art des primären Teilchens genauer zu identifizieren.

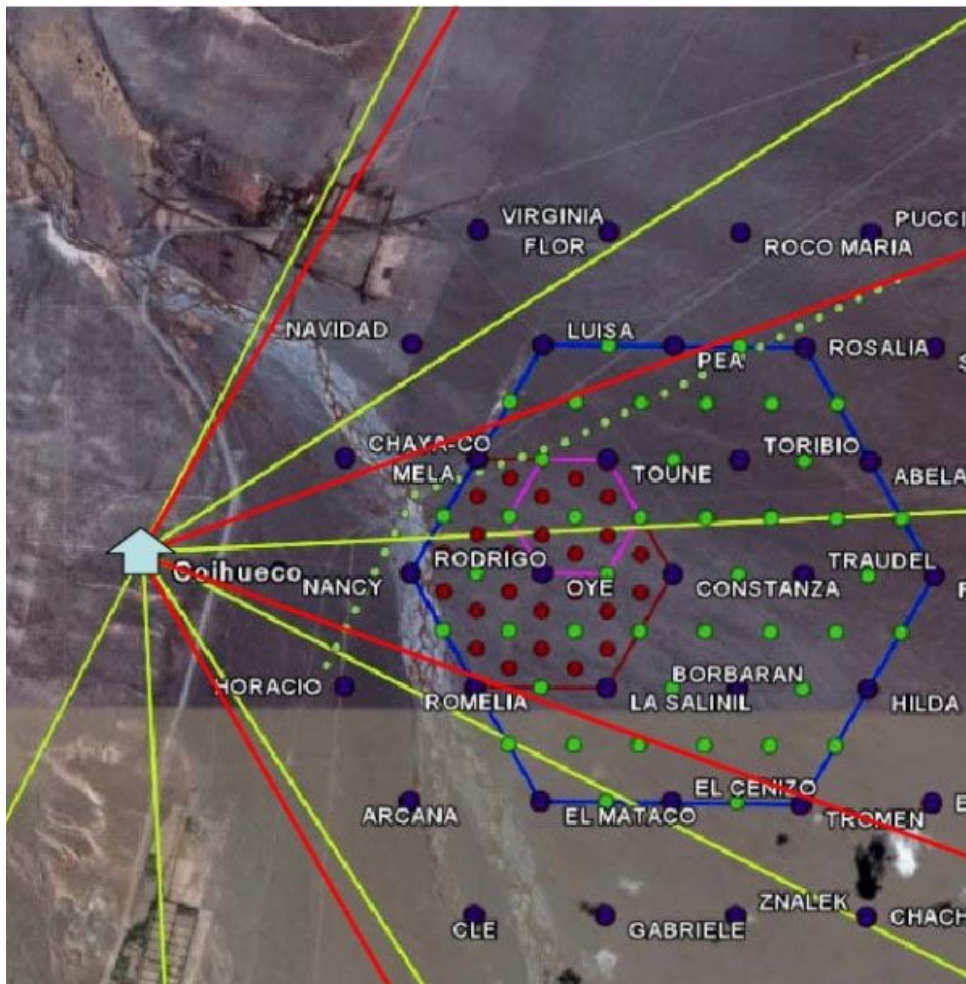


Abbildung 4.5: Erweiterungen des Pierre-Auger-Observatoriums im Infill nahe der Teleskop-Station Coihueco. Zu sehen ist das Wasser-Cherenkov-Tank-Feld (blaue Punkte), sowie das Infill mit einem Detektorabstand von 750 m (hellgrüne Punkte) und 433 m (rote Punkte). Das Sichtfeld der Teleskope des Fluoreszenzdetektors wird durch gelbe Strahlen angedeutet und das der Teleskope der HEAT Erweiterung durch rote Strahlen [20].

### HEAT

Die HEAT-Erweiterung (High Elevation Auger Telescopes) besteht aus drei zusätzlichen Fluoreszenzteleskopen (Abbildung 4.5: rote Strahlen), welche sich in der Nähe der sechs Teleskope (Abbildung 4.5: gelbe Strahlen) der Coihueco-Station befinden. Sie erweitern den beobachtbaren Polarwinkel des Nachthimmels um  $28^\circ$  mit ihrem Sichtfeld von  $28^\circ$  bis  $58^\circ$ . Damit werden Teilchenschauer mit Energien ab  $10^{17}$  eV beobachtet, die aufgrund ihrer geringeren Energie und der damit verbundenen schnelleren Absorption durch die Atmosphäre nur in geringem Maße den Erdboden erreichen, da sie sich in höheren Atmosphärenschichten entwickeln. Zusätzlich kann dadurch der Schauererlauf höherenergetischer Teilchen über größere Distanzen hinweg beobachtet und damit genauer rekonstruiert werden [21].

### AMIGA

Die AMIGA-Erweiterung (Auger Muon and Infill for the Ground Array) hat sich zum Ziel gesetzt, die Auflösung für Energien ab  $10^{17}$  eV zu verbessern und die Zusammensetzung der Schauer genauer zu analysieren. Dies soll durch zwei Schritte erreicht werden. Nahe der Station Coihueco existiert ein Gebiet von ca.  $25 \text{ km}^2$ , in dem die Detektoren nicht in den üblichen  $1,5 \text{ km}$  Entfernungen zueinander stehen (Abbildung 4.5). Durch den geringeren Abstand der Detektoren können Teilchenschauer von Primärteilchen mit einer Energie kleiner als  $10^{18}$  eV besser aufgelöst werden, da diese aufgrund der kleineren Energie eine entsprechend kleinere Schauerfront erzeugen. Diese zusätzlichen Detektoren werden jeweils mit Myonzählern ausgerüstet. Bis 2013 wurden sieben dieser Myonzähler in Betrieb genommen. Mittels dieser Myonzähler soll der Anteil der Myonen im Teilchenschauer genauer bestimmt werden, was zu einer besseren Bestimmung der Art des Primärteilchens führen wird [21].

### AERA

Die AERA-Erweiterung (Auger Engineering Radio Array) ist ein  $20 \text{ km}^2$  großes Feld von Radio-Antennen, das sich ebenfalls im Infill-Detektorfeld befindet. Diese Erweiterung soll als neue Detektorart für hochenergetische Teilchenschauer erprobt und optimiert werden, um in Zukunft kostengünstigere und effiziente Detektoren bauen zu können [21].



## 5 AMIGA

Die AMIGA-Erweiterung (Auger Muon and Infill for the Ground Array) des Pierre-Auger-Observatoriums soll die Sensitivität für die Energie des Primärteilchens von bisher  $3 \cdot 10^{18}$  eV [15] um eine Dekade nach unten erweitern (Abschnitt 4.4). Die so gewonnenen Daten können aufgrund der Überschneidung der Energiespektren mit den Daten des KASCADE-Grande-Experiments im Bereich von  $10^{17}$  eV bis  $10^{17.5}$  eV verglichen werden.

Mit Hilfe der durch die AMIGA-Erweiterung verbesserten Analyse der Zusammensetzung des kosmischen Schauers und dem durch die HEAT-Erweiterung (Abschnitt 4.4) verbesserten Schauerprofils, sollen die zugrunde liegenden Beschleunigungsmechanismen und die Anisotropie der Ankunftsrichtungen besser verstanden werden.

Die AMIGA-Erweiterung besteht aus einer räumlich begrenzten Verdichtung (Infill) der SD-Tanks (Surface Detektor), wovon jeder eine zugehörige Myondetektorstation besitzt, welche jeweils mittels einer Oberflächenelektronik mit dem SD-Tank verbunden ist (Abschnitt 4). Jede Myondetektorstation ist mit bis zu vier Myonzählern ausgestattet, wovon jeder einen  $10 \text{ m}^2$  großen Szintillationsdetektor besitzt. Diese Arbeit behandelt Daten, die mit den ersten sieben Myondetektorstationen (MD) genommen wurden.

### 5.1 Aufbau einer Myondetektorstation

Jeder SD-Tank bildet eine als Myonenschatten bezeichnete Region, in der einfallende Myonen vom SD-Tank absorbiert werden können. Daher befindet sich jeder Myonzähler versetzt zum zugehörigen SD-Tank und damit außerhalb des Myonenschattens. Da ein Szintillationsdetektor sensitiv auf die gesamte elektromagnetische Komponente eines Schauers ist, zu der auch Elektronen und Photonen zählen, muss der Myondetektor gegen diese für die AMIGA-Erweiterung uninteressanten Teilchen abgeschirmt werden. Dies geschieht, indem er unter einer absorbierenden Schicht aus Erde installiert wird, die einer atmosphärischen Tiefe von  $540 \text{ g/cm}^2$  entspricht. Der Großteil der Teilchen, die den Myonzähler trotz dieser absorbierenden Schicht erreichen, sind Myonen mit einer Energie größer als 1 GeV [22].

Ein Myonzähler besteht aus mehreren Elementen. Jeweils 64 szintillierende Streifen bilden die Szintillatoreinheit und sind durch optische Fasern an einem Ende mit einem Photomultiplier (PMT) verbunden. Dieser PMT konvertiert die optischen Signale in elektrische Signale.

le. Die eingehenden elektrischen Signale werden von einer Ausleseelektronik verarbeitet. Diese setzt sich aus einem Power Distributor Board (PDB), einem Motherboard (MB), einem Microcontroller Board (MCUB), einem Digital Board (DB) und acht auf dem MB verlöteten Analogue Boards (ABs) zusammen (Abbildung 5.1).

Eine detaillierte Beschreibung der Elektronik ist in [23] zu finden. Die Funktionsweise wird im Folgenden kurz erläutert. Alle weiteren Angaben wurden [24] entnommen.

### **AMIGA Myonzählerelektronik**

Das PDB erfüllt zwei Aufgaben. Es versorgt die gesamte Untergrundelektronik mit den nötigen Betriebsspannungen und trennt die Untergrundelektronik galvanisch von dem Oberflächen-Erdungsniveau, um Erdschleifen zu vermeiden und elektrisches Rauschen zu minimieren.

Ausleseelektronik und PMT sind durch ein MB miteinander verbunden. Das MB versorgt den PMT mit der zum Betrieb nötigen Hochspannung und leitet die Signale der 64 Kanäle des PMTs an die acht ABs weiter.

Um die eingehenden Signale des PMTs im Field-Programmable Gate Array (FPGA) des DBs weiter zu verarbeiten, werden sie in den ABs zu digitalen Eingangssignalen umgewandelt (Abschnitt 5.2). Die ABs sind damit die einzigen signalverändernden Komponenten der Ausleseelektronik. Jedes AB verarbeitet simultan acht PMT-Kanäle.

Nach dem Erhalt eines Trigger-Signals (Abbildung 5.3) werden die Daten an das Central Data Acquisition System (CDAS) weitergeleitet. Das DB speichert die letzten 2048 Myonzähler-Ereignisse. Dies entspricht bei einer ungefähren Triggerrate von 100 Hz etwa den letzten 20 s der Messzeit. Erhält das DB ein T3-Trigger-Signal, liefert es die Daten zeitlich korrespondierender Ereignisse, falls sie noch im Speicher liegen und bildet somit die Hauptkomponente des Datennahmesystems der AMIGA-Erweiterung. Neben der Verwaltung der eingehenden Daten des PMTs kontrolliert das FPGA des DBs die einzelnen Schwellenspannungen von jedem der 64 PMT-Kanäle.

Als Schnittstelle zwischen der Untergrundelektronik und der SD-Elektronik dient das MCUB. Die Daten werden durch einen CAN-Bus zwischen dem MCUB und einem Single Board Computer (SBC) an der Oberfläche ausgetauscht. Das FPGA des DB wird über das MCUB gesteuert und programmiert.



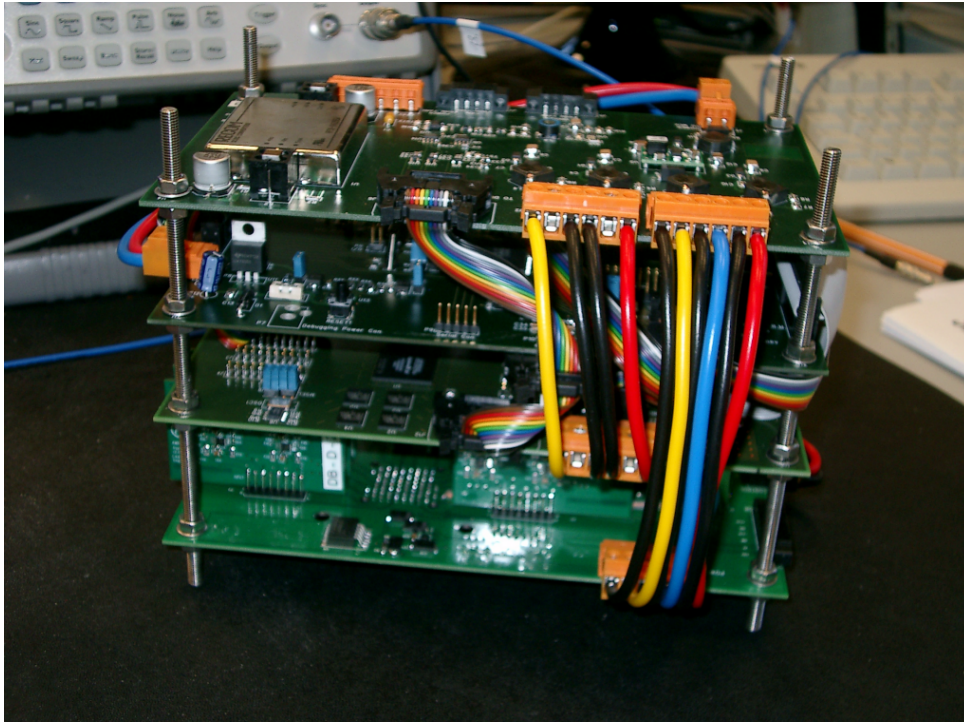


Abbildung 5.1: Vollständig montierte AMIGA-Untergrundelektronik: Von oben nach unten: das PDB, das MCUB, das DB, die acht vertikal verlöteten ABs und das MB [24].

### Die Oberflächenelektronik

Um die Kommunikation zwischen einem SD-Tank und der Untergrundelektronik zu realisieren, bedarf es zusätzlicher Elektronik. Hierzu werden das Auxiliary Board LS (AuxLS) und das Auxiliary Board SBC (AuxSBC) verwendet.

Erhält das AuxLS ein T1-Trigger-Signal von dem zugehörigen SD-Tank, leitet es dieses an den AuxSBC weiter. Weiterhin versorgt es den AuxSBC mit lokalen und globalen Zeitmarken (LTS und GTS) zur Datierung der Messwerte. Der AuxSBC hat neben seiner Funktion als Vermittler zwischen dem SBC der SD-Elektronik und bis zu zwei Untergrundausleseelektroniken über einen CAN-Bus die Aufgabe eines Spannungskonverters. Es wandelt die Spannung der Batterie, welche über ein Solarpanel gespeist wird, in die zur Versorgung des SBCs nötige Spannung um.

## 5.2 Detektion von Ereignissen

Passiert ein Teilchen einen Szintillatorstreifen (Abbildung 5.2), erzeugt es einen Lichtblitz. Dieser wird durch den PMT in ein elektrisches Signal umgewandelt und verstärkt. Die ABs vergleichen das elektrische Signal des PMTs mit einer Schwellenspannung und stellen dem DB das digitalisierte Signal zur Verfügung. Das DB liest dieses Signal nun mit einer Samplingrate von 320 MHz ein und speichert diese Information. In den Speichermodulen des DBs werden die letzten 2048 MD-Modul-Ereignisse gespeichert, die jeweils aus 768 Zeitintervallen bestehen, wovon jedes Intervall 12,5 ns andauert. Jedes Ereignis ist mit einer entsprechenden GTS versehen, die auf die Zeit der Detektion verweist.

Detektiert ein SD-Tank einen Teilchendurchgang, sendet er ein T1-Trigger-Signal an die Myon-detektorelektronik und das CDAS. Erhält das CDAS Signale von mindestens drei Tanks in Koinzidenz, sendet es ein T3-Trigger-Signal an die beteiligten SD-Tanks um die Daten abzurufen. Das Signal wird über den SBC an die AMIGA-Myonzählelektronik weitergeleitet. Nach Erhalt eines T1- oder T3-Trigger-Signals sendet die AMIGA-Myonzählelektronik das zu der GTS des Trigger-Signals korrespondierende Ereignis an den SBC, welcher es an das CDAS weiterleitet (Abbildung 5.3).

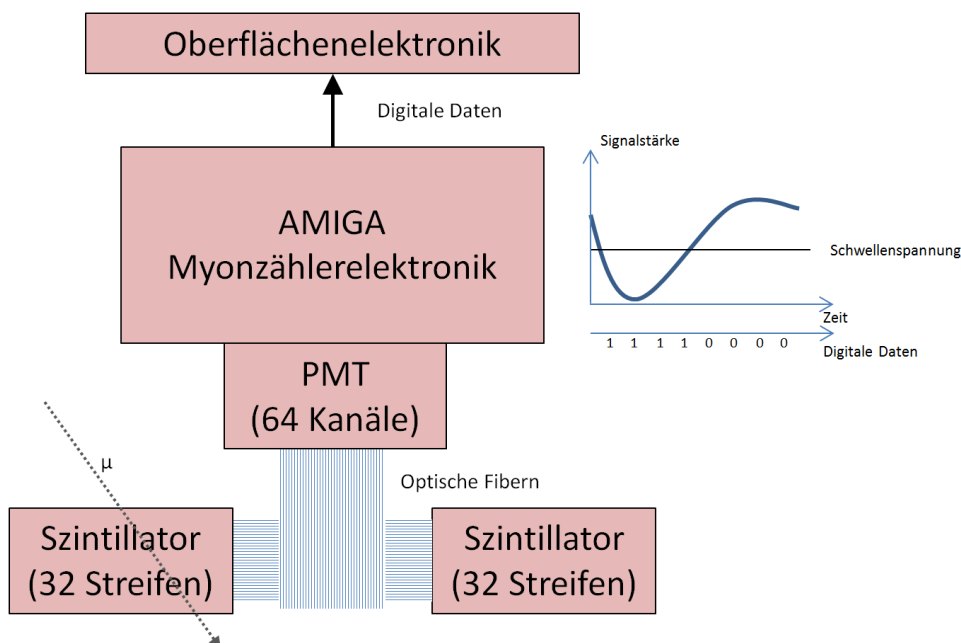


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung des Messprinzips der AMIGA-Erweiterung [25].

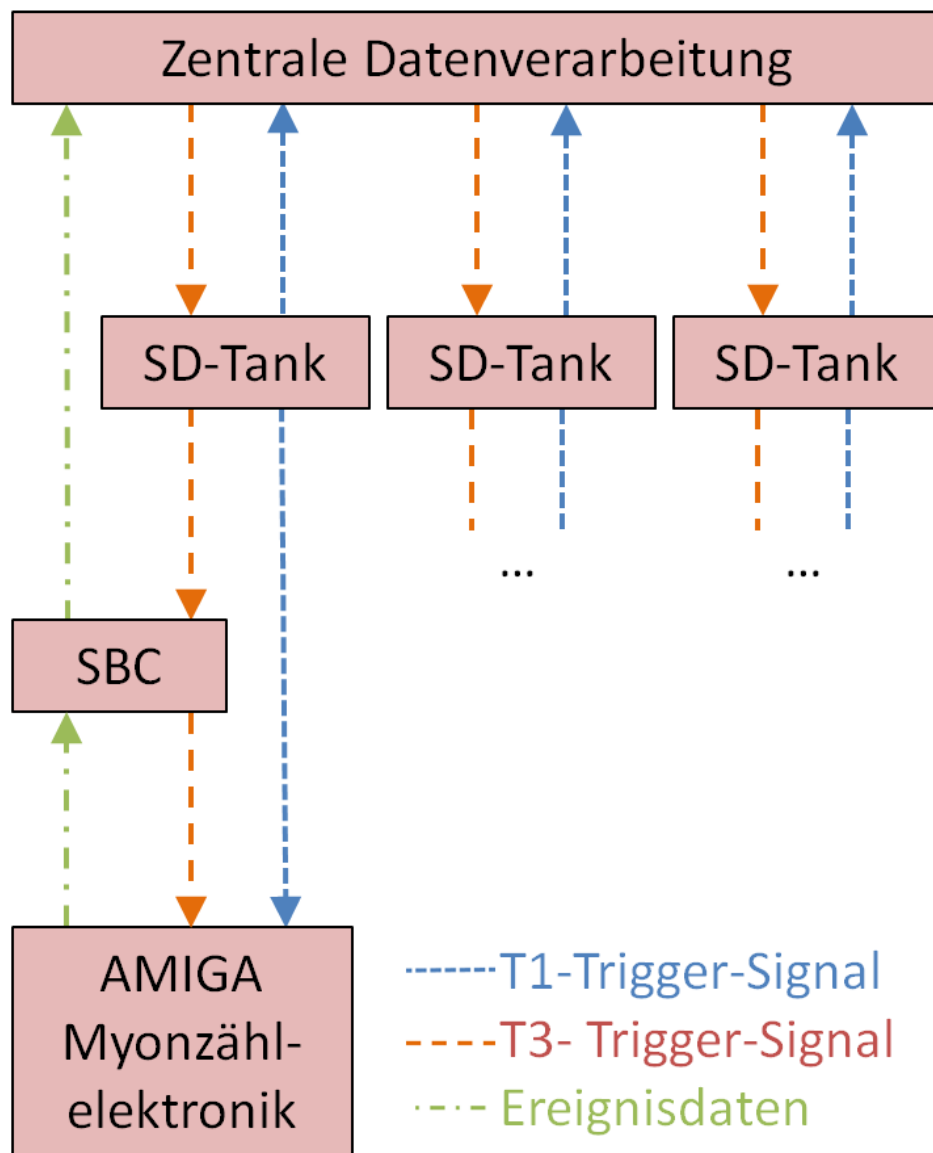


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung der Verarbeitung eines AMIGA T1- und T3-Trigger-Signals [25].

### 5.3 AMIGA-Ereignisdatenstruktur

Eine unkomprimierte AMIGA-Ereignisdatei ist 6144 Byte groß und beinhaltet die Daten von 9,6  $\mu$ s Messzeit. Darin enthalten sind die Daten der 64 Kanäle des PMTs von 768 jeweils 12,5 ns langen Zeitintervallen. Jeder Kanal des PMTs hat dabei einen Speicherbedarf von einem Bit je Zeitintervall. Somit belegt ein Zeitintervall 64 Bit bzw. acht Byte Speicher (Abbildung 5.4).

Innerhalb der acht Byte für jedes Zeitintervall werden Gruppen von je zwei Byte gebildet, die jeweils 16 Kanäle repräsentieren. Kanal 63 wird dabei ganz links und Kanal Null ganz rechts dargestellt (Abbildung 5.5).

Die gruppierten Bytes besitzen eine Big-Endian-Byte-Reihenfolge, womit das Byte mit den höchstwertigen Bits zuerst gespeichert wird. In ein 16-Bit-Datenwort überführt entspricht das niederwertigste Bit dem Wert der Daten des kleinsten Kanals und analog für alle weiteren 15 Kanäle.

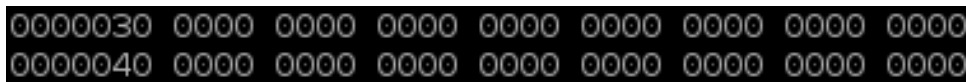


Abbildung 5.4: Zeitintervallbeispiel: Ausschnitt der hexadezimalen Ansicht einer AMIGA-Ereignisdatei. Zu sehen sind die Daten der Zeitintervalle sieben bis zehn, in denen keiner der 64 Kanäle ein Signal größer der eingestellten Schwellenspannung gemessen hat.

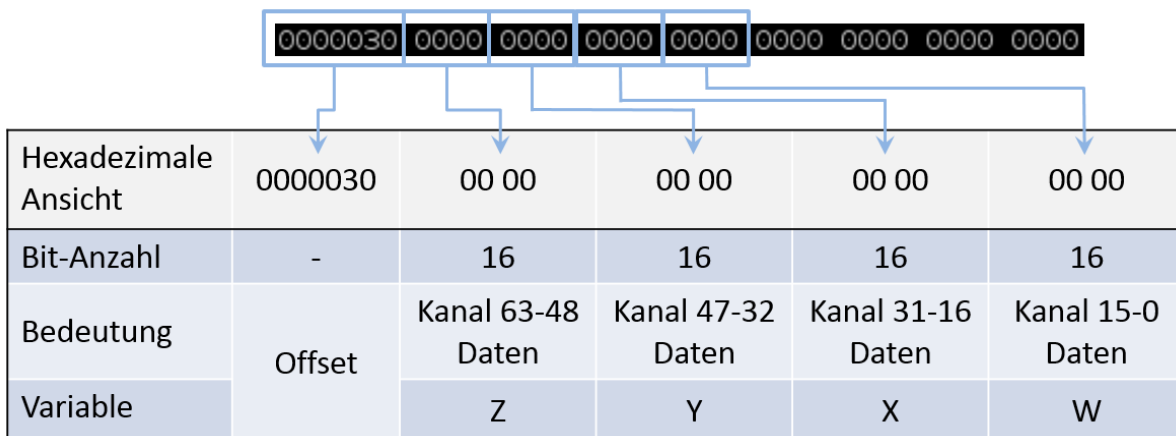


Abbildung 5.5: Aufbau der Daten eines Zeitintervalls in einer AMIGA-Ereignisdatei. Veranschaulichung der Aufspaltung der Daten aus einer Ereignis-Datei (oben) in Gruppen von jeweils zwei Byte und deren Interpretation (Tabelle).

Der Großteil der Daten in einer Datei hat den Wert Null (Abbildung 6.1) und jede Datei enthält somit nur wenige Signale. In einem Komprimierungsalgorithmus werden nur solche Daten behalten, die verschieden von Null sind. Dadurch wird der benötigte Speicherbedarf und damit das zu übertragende Datenvolumen zwischen den einzelnen SD-Tanks und dem CDAS reduziert. Das reduzierte Datenvolumen stellt insoweit eine Verbesserung dar, weil sich alle Module die zur Verfügung stehenden Übertragungsfrequenzen teilen. Kürzere Übertragungen ermöglichen Datentransfers zu mehreren Stationen in der gleichen Zeit.

Um die Daten effizient zu speichern, werden bei der Komprimierung die 16-Bit Datenworte der AMIGA-Ereignisdatei beginnend bei Null indexiert. Alle Datensätze mit einem Wert verschieden von Null werden behalten. Die restlichen Datensätze werden nicht gespeichert. Aus den verbleibenden Datensätzen wird eine Liste erstellt, wobei jedes Element der Liste 32 Bit Speichervolumen besitzt. Die ersten 16 Bit entsprechen dem zuvor definierten Datenwortindex. Die sich anschließenden 16 Bit entsprechen den Kanaldaten des vorangehenden Datenwortindex. Beide Werte werden im Big-Endian-Format gespeichert. Abschließend wird der Liste noch die Terminierungssequenz (Magic Word) 0x0a0b0c00 angefügt sowie ein Kontrollwert, der die Anzahl der gespeicherten 16-Bit-Kanaldatenblöcke enthält. Der Kontrollwert belegt abermals 32 Bit Speicher, verwendet jedoch nur die ersten 16 Bit zur Sicherung des Wertes im Big-Endian Format. Als Beispiel wird nun die Komprimierung eines 16-Bit-Datenwortes explizit berechnet. In einer unkomprimierten AMIGA-Ereignisdatei befindet sich auf dem Offset 0x11e4 das 16-Bit-Datenwort 0x2000 (Abbildung 5.6). Um den 16-Bit-Datenwortindex zu berechnen, muss der Offset, welcher einem Index entspricht, der alle acht Bit erhöht wird, halbiert werden. Damit erhält man im gegebenen Fall  $0x11e4 / 2 = 0x08f2$ . Komprimiert ergibt sich somit 0x08f2 0x2000. Dieses Wertepaar findet sich exakt in der Form in der komprimierten AMIGA-Ereignisdatei an dem Offset 0x0018. Alle anderen von Null verschiedenen Werte werden auf die gleiche Weise komprimiert. Für jedes komprimierte Datenwort, wird der Kontrollwert jeweils um eins erhöht.

Eine komprimierte Datei ist kleiner als die Originaldatei, wenn weniger als 1534 16-Bit-Datenworte komprimiert werden müssen. Besitzt eine Ereignisdatei mehr Datenworte nutzt das unkomprimierte Format den Speicherplatz effektiver.

**Unkomprimierte AMIGA-Ereignisdatei**

```

00000000  00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
*
                                Leere Zeitintervalle
00000630  00 02 00 00 00 02 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
00000640  01 00 00 00 01 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
00000650  00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
*
                                Leere Zeitintervalle
000011d0  00 00 00 00 00 00 00 00 04 00 00 00 04 00 00 00
000011e0  00 00 00 00 20 00 00 00 04 00 00 00 04 00 00 00
000011f0  00 00 00 00 04 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
00001200  00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
*
                                Leere Zeitintervalle
00001800

```

**Komprimierte AMIGA-Ereignisdatei**

00000000	03 18	00 02	03 1a	00 02	03 20	01 00	03 22	01 00
00000010	08 ec	04 00	08 ee	04 00	08 f2	20 00	08 f4	04 00
00000020	08 f6	04 00	08 fa	04 00	0a 0b	0c 00	00 0a	00 00

Wortindex  
 |

Daten  
 |

Wortindex  
 |

Daten  
 |

Magic Word  
 |

Kontrollwert  
 |

Abbildung 5.6: Vergleich zwischen unkomprimierten und komprimierten Daten. Alle von Null verschiedenen Daten einer AMIGA-Ereignisdatei (oben) und dieselben Daten nach der Komprimierung (unten) sind zu sehen. Das komprimierte Ereignis endet mit dem Magic Word und dem Kontrollwert.

## 6 Datenanalyse

Zur Erstellung der nachfolgend beschriebenen Analyse wurden die zwei Softwarepakete ROOT und CDAS verwendet. Darüber hinaus wurden Erweiterungen für das CDAS in C++ entwickelt.

### 6.1 Software-System

#### ROOT

Um die Daten des NA49<sup>1</sup> Experiments am CERN auszuwerten, welches die für seine Zeit beeindruckende Menge von 10 Terabyte an Daten je Datennahmeperiode generierte, wurde ein Programm benötigt, welches diese Datenmengen schnell und effizient verarbeiten konnte. Aus diesem Bedarf heraus ist ROOT entstanden. Dabei handelt es sich um ein am CERN in C++ geschriebenes Framework zur schnellen und ressourcenschonenden Analyse großer Datenmengen. Neben seinen auf Datenanalyse ausgelegten Komponenten bietet ROOT auch umfangreiche Möglichkeiten zur zwei- und dreidimensionalen Darstellung ausgewerteter Daten. Durch seinen objektorientierten Aufbau eignet es sich, um die vorhandenen Klassen um neue Funktionen zu erweitern. Dies ist im Vergleich zu den bis zu seiner Entwicklung vorherrschenden, auf FORTRAN basierten Anwendungen ein Vorteil, der sich gerade bei größeren Projekten zeigt.

#### CDAS und IOMD

Das Central Data Acquisition System (CDAS) des Pierre-Auger-Observatoriums ist ein unter Unix laufendes Framework, welches aus einer Sammlung von Anwendungen besteht, die eigens entwickelt wurden, um die Oberflächendetektoren des Pierre-Auger-Observatoriums zu betreiben und die Datennahme zu automatisieren. CDAS dient als Datennahmesystem für Surface- und Fluoreszenz-Detektoren. Eine Erweiterung des CDAS ist das Ein- und Ausgabesystem der Myondetektor-Daten (IOMD), welches das Datennahmesystem des Myondetektors ist und in dieser Arbeit zur Analyse verwendet wird.

---

<sup>1</sup>NA49: Hadron-Detektor zur Untersuchung von Blei-induzierten Reaktionen am CERN Super Proton Synchrotron

## 6.2 Verwendeter Datensatz

Zur Untersuchung von Mustern in den Signalen der AMIGA-Ereignisse wurden die Daten vom 06.05.2011 und vom 09.05.2011 der Detektorstation Corrientes mit der Identifikationsnummer 93 studiert. Alle Daten wurden von Ereignissen entnommen, die durch T1-Trigger (Abbildung 5.3) ausgelöst worden sind.

Der ausgewählte Datensatz besteht aus 1303313 Ereignissen, die im komprimierten Ereignisformat vorliegen. Unkomprimiert belegt dieser Datensatz 8007555072 Byte und komprimiert 11751904 Byte. Somit ergibt sich ein ungefährender Komprimierungsfaktor von 1000. Eine einzelne Datei belegt im Durchschnitt noch circa neun Byte. Zuvor waren es 6144 Byte in unkomprimierter Form. Ausgehend von diesen Werten kann gefolgert werden, dass die Komprimierung in diesem Fall dienlich war und die ihr zugrunde liegende Annahme, dass der Großteil aller Dateien keine Signale enthält (Abschnitt 5.3), richtig ist (Abbildung 6.1).

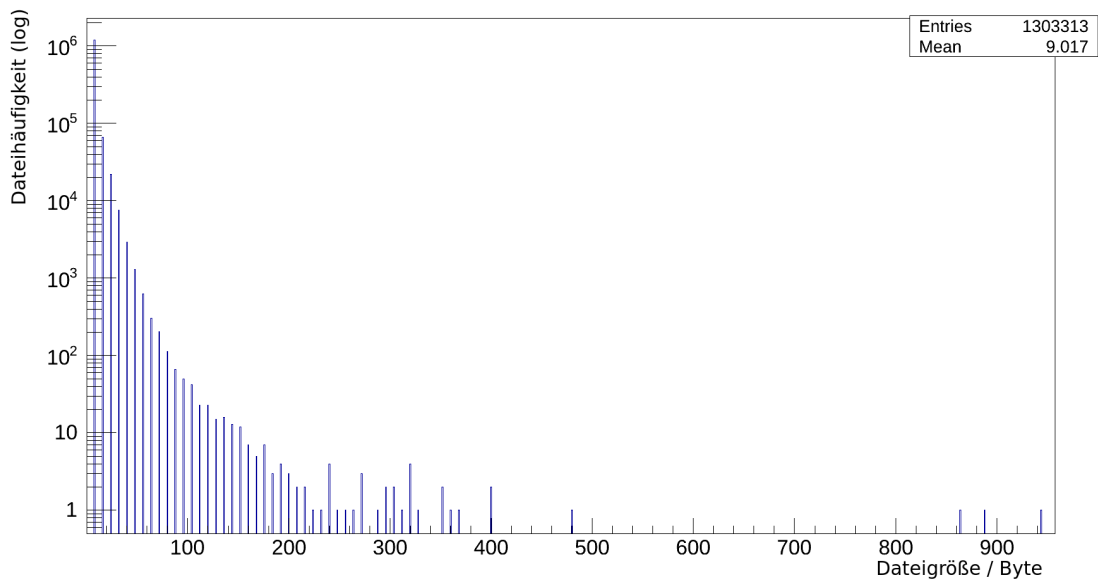


Abbildung 6.1: Häufigkeit der Dateigrößen von komprimierten AMIGA-Ereignis-Dateien. Die größte Häufigkeit weisen Dateien mit einer Länge von acht Byte auf, was einer Ereignis-Datei ohne Signale entspricht. Solche ungefüllten Ereignis-Dateien bestehen nur aus dem Magic Word und dem Kontrollwert (Abschnitt 5.3). Der Mittelwert ist eine Dateigröße von neun Byte.



### 6.3 Verhalten bei unterschiedlichen Schwellenspannungen

Alle mit Daten gefüllten AMIGA-Ereignis-Dateien haben bestimmte Merkmale. Zur Überprüfung der Korrektheit der einzelnen Datensätze, ist es sinnvoll, zunächst die Daten einer einzelnen Datei zu betrachten. Dazu verwendet man den in Abschnitt 5.3 vorgestellten Datenwortindex und rekonstruiert aus diesem die Zeitintervalle und Kanalnummern der Kanäle, welche ein Signal im angegebenen Zeitintervall gemessen haben. Sofern nicht anders gekennzeichnet sind unter Kanälen Frontendelektronik-Kanäle zu verstehen. Das Zeitintervall ergibt sich aus der Division des Datenwortindex durch vier. Multipliziert man das Ergebnis des Datenwortindex modulo vier mit 16 und addiert den Bitindex dazu, erhält man den Kanalindex:

$$\text{Zeitintervall} = \text{Datenwortindex}/4, \quad (6.1)$$

$$\text{Kanalindex} = (\text{Datenwortindex mod } 4) \cdot 16 + \text{Bitindex}. \quad (6.2)$$

Trägt man die so berechneten Werte graphisch auf (Abbildung 6.2), erkennt man, dass sich die Werte bei einem Zeitintervall häufen. Dieses Zeitintervall wird als Trigger-Intervall bezeichnet. Es wird erwartet, dass ein Großteil der Signale im Trigger-Intervall liegt und die restlichen Signale in nachfolgenden oder vorangegangenen Intervallen zu finden sind, welche als Post-Trigger-Region zusammengefasst werden. Alle Signale vor diesem Trigger-Intervall werden als Rauschen der Elektronik angesehen. Insgesamt wird somit eine Häufung der Werte ab dem Trigger-Intervall erwartet. Die Position des Trigger-Intervalls ist kein absoluter Wert sondern schwankt um den Wert 190 [25].

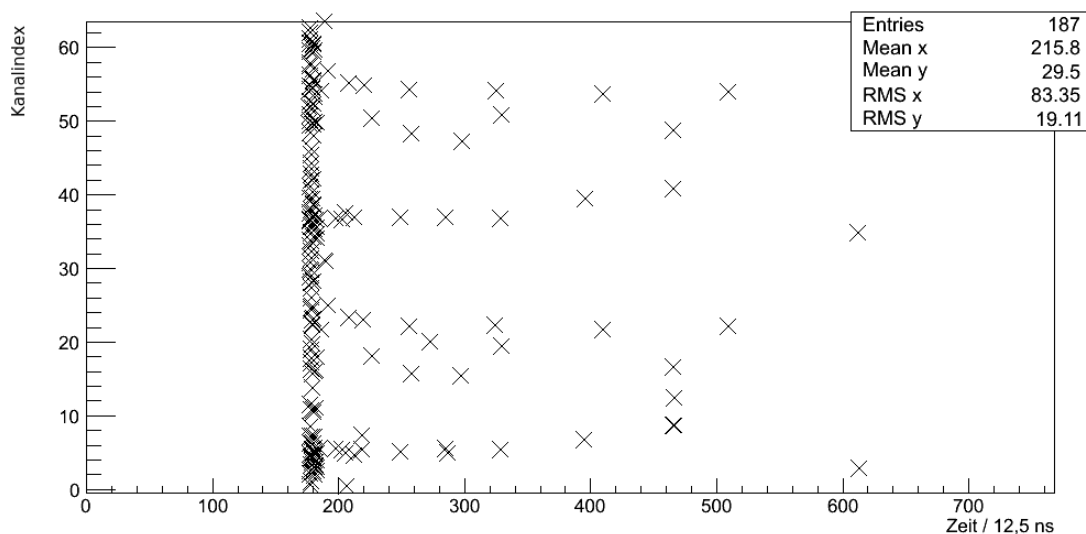


Abbildung 6.2: Typisches AMIGA-Ereignis.

Alle zur Analyse verwendeten Dateien müssen mehrere Qualitätskriterien erfüllen, damit sie in die Auswertung mit einbezogen werden. Eine Datei darf keine Signale aus dem ersten Zeitintervall aufweisen. Die Signale dürfen sich auf einem Kanal nicht mit einer festen Periodizität wiederholen. Eine Messung darf nicht der vorangegangenen Messung exakt entsprechen. Nur Dateien die diese Kriterien erfüllen, werden zur Analyse herangezogen, der Rest wird nicht weiter betrachtet.

Werden die Histogramme aller Messungen, die mit einer Schwellenspannung von 100 mV gemessen wurden, der Myondetektorstation Corrientes im ausgewählten Zeitraum aufsummiert, erhält man ein klares Maximum in der Anzahl der Einträge im 190. Zeitintervall (Abbildung 6.3). Nach dem Maximum ist eine Erhöhung der Einträge zu sehen, die auf die nach dem Trigger-Intervall folgenden Signale zurückzuführen ist. Der Rest kann als Untergrund angesehen werden.

Um sicherzustellen, dass die einzelnen Kanäle jeweils einen ungefähr gleichen Beitrag leisten, wurde untersucht, inwieweit sie zu der ermittelten Menge an Signalen beitragen. Fünf Fibern wurden während der Installation absichtlich nicht an den Photomultiplier (PMT) des Myonzählers der Corrientes-Station angeschlossen. Somit wurde sichergestellt, dass es sich bei allen auf den entsprechenden Kanälen gemessenen Signalen um ein Rauschen der Elektronik handeln muss. Die Kanäle 0, 10, 14, 48 und 51 wurden nicht mit ihren Fibern verbunden. Beobachtet wurde, dass von den Kanäle 0, 10, 14, 32, 42 und 46 jeweils eine ungefähr fünfmal geringe Signalmenge gemessen wurde, als von einem der restlichen Kanäle (Abbildung 6.4).

Bei den Kanälen 0, 10 und 14 kann dies somit darauf zurückgeführt werden, dass die entsprechenden Fibern nicht angeschlossen sind. Für die ebenfalls nicht verbundenen Fibern 48 und

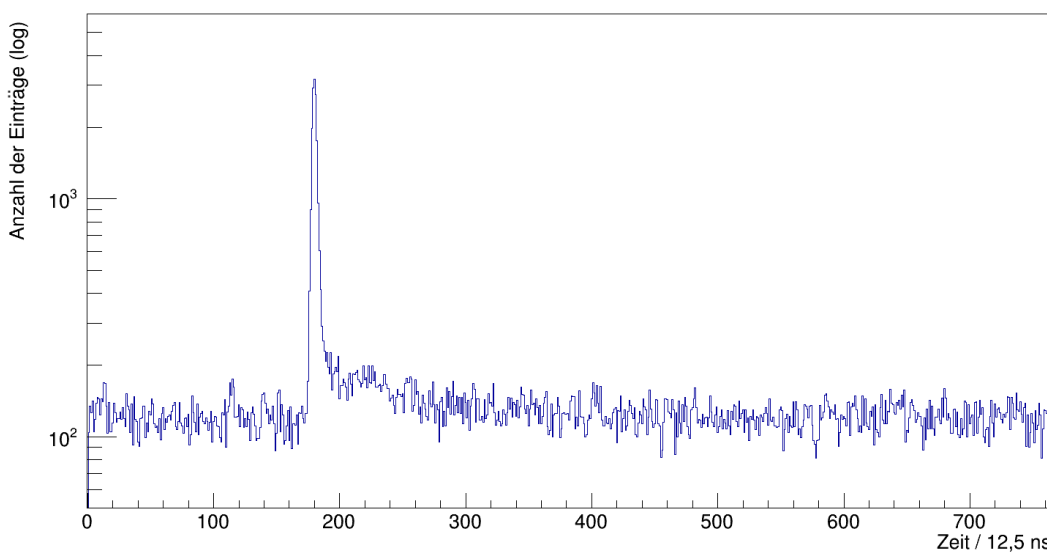


Abbildung 6.3: Aufsummierte Zeitverteilung der gemessenen Signale der Myondetektorstation Corrientes im ausgewählten Datensatz bei einer Schwellenspannung von 100 mV.

51 konnte dies nicht bestätigt werden. Die Kanäle 32, 42 und 46 weisen eine ähnlich niedrige Signalmenge auf, wie die Kanäle 0, 10 und 14.

Warum diese fünf Kanäle nicht den Erwartungen entsprechen konnte bislang nicht abschließend geklärt werden. Zur Klärung sind weitere Messungen notwendig.

Variiert man die Schwellenspannung, welche als Diskriminator für die eingehenden Signale dient, erwartet man bei steigender Schwellenspannung ein Absinken der Signalmenge auf allen Kanälen. Die Menge der registrierten Signale wurde für sechs unterschiedliche Schwellenspannungen untersucht und für steigende Schwellenspannungen wurde ein solches Absinken der Signalmenge beobachtet (Tabelle 6.1).

Schwellenspannung	50 mV	100 mV	300 mV	500 mV	700 mV	900 mV
Signalmenge	124667	113020	60846	21790	12615	8048

Tabelle 6.1: Absinkende Signalmengen der Detektorstation Corrientes im ausgewählten Datensatz bei steigenden Schwellenspannungen.

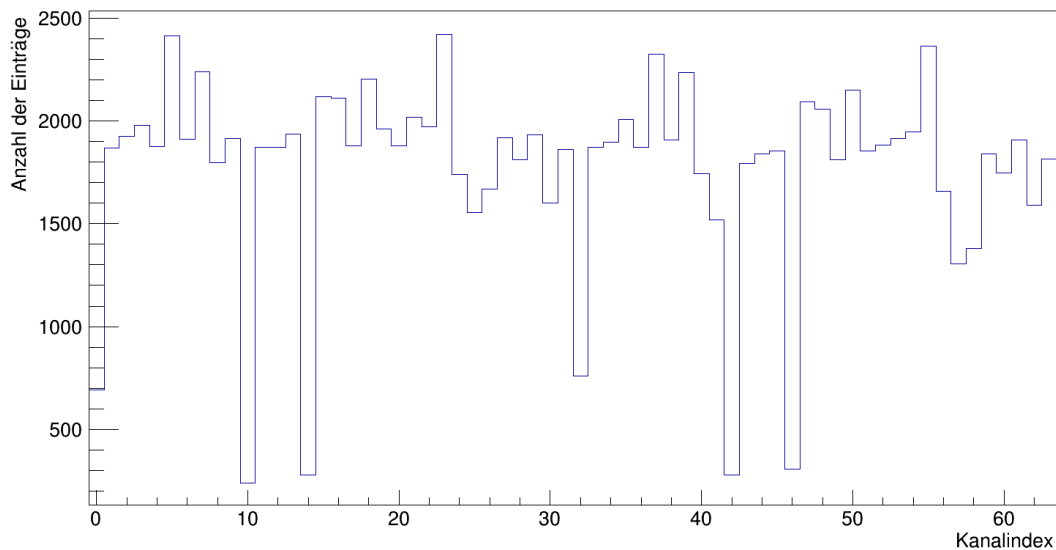


Abbildung 6.4: Signalmengen der Kanäle der Myon detektorstation Corrientes im ausgewählten Datensatz bei einer Schwellenspannung von 100 mV.

## 6.4 Vorbereitende Strukturanalyse

Um einen Zählalgorithmus, der die tatsächliche Zahl der Myonen aus dem Detektorsignal berechnet, zu entwickeln, wurden zunächst die Ereignis-Dateien bezüglich ihrer Signalstrukturen analysiert. Dabei können zu einem späteren Zeitpunkt Signalstrukturen, die ein Myon hinterlässt, leicht eingearbeitet werden.

Zu diesem Zweck wurde zunächst untersucht, in welcher Häufigkeit welche Längen von Signalen in den Daten zu finden sind, um im weiteren Verlauf Strukturen festzulegen, nach denen gesucht werden soll. Werden die Längen ununterbrochen aufeinanderfolgender Signale in einem Histogramm dargestellt (Abbildung 6.5), erkennt man, dass Signale, die sich über mehr als drei Zeitintervalle erstrecken, keinen signifikanten Beitrag zur Gesamtmenge der Signale leisten.

Aufgrund dieser Erkenntnis wurden mehrere theoretisch als möglich erachtete Strukturen auf ihre Häufigkeit in den Daten untersucht, um sie mit noch zu berechnenden Erwartungswerten aus einer entsprechenden Simulation zu vergleichen. Die Erstellung einer solchen Simulation würde jedoch den Rahmen dieser Arbeit überschreiten und ist somit zukünftigen Arbeiten überlassen.

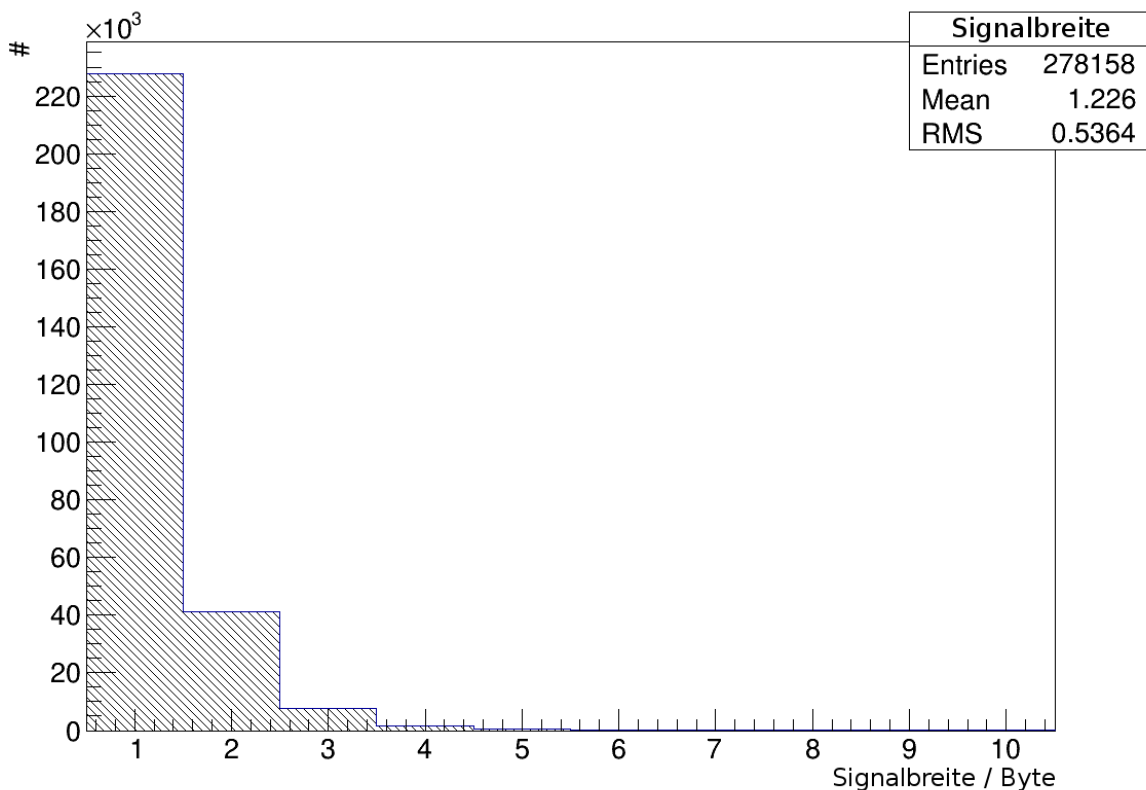


Abbildung 6.5: Häufigkeit der Signallängen in den Myonzähler-Daten im ausgewählten Datensatz.

Die in Tabelle 6.2 angegebenen sechs Strukturen bzw. Zählstrategien wurden zur weiteren Analyse der Daten der AMIGA-Ereignis-Dateien ausgewählt.

Nr.	Struktur	Beschreibung
1	*1*	Signal in genau einem Zeitintervall.
2	*11*	Signal in genau zwei aufeinander folgenden Zeitintervallen.
3	*101*	Signal gefolgt von einem leeren Intervall und einem erneuten Signal
4	*1001*	Signal gefolgt von zwei leeren Intervallen und einem erneuten Signal
5	*010*	Identisch zu Nr.1 mit einem umschließenden leeren Intervall
6	*0110*	Identisch zu Nr.2 mit einem umschließenden leeren Intervall

Tabelle 6.2: Untersuchte Signalstrukturen die ein einzelnes Ereignis darstellen könnten. Alle Signalformen sind von Sternen („\*“) umschlossen, die stellvertretend als Platzhalter für eine Null oder Eins stehen. Eine Null steht für ein Zeitintervall, in dem kein Signal gemessen wurde und eine Eins für ein Zeitintervall, in dem ein Signal registriert wurde. Jede Struktur wird als ein Ereignis in der entsprechenden Strategie gezählt.

Die Daten des ausgewählten Datensatzes wurden separat auf die Strukturen (Tabelle 6.2) untersucht. Konkret bedeutet dies, dass der gesamte Datensatz für jede Methode einzeln analysiert wurde und somit ein Signal, was bereits als Teil einer Struktur in einem vorher gegangenen Analysezyklus gezählt wurde, in einem weiteren Analysezyklus auch als Teil einer weiteren Struktur gezählt werden kann. Es ist damit eine mehrfache Zählung eines Signals möglich.

Außerdem wurden Signalstrukturen, die sich überschneiden, als zwei separate Einträge eingestuft. Wird also nach der \*101\*-Struktur gesucht und in den Daten die Signalfolge 10101 gefunden, so wird diese als zwei aufeinander folgende \*101\*-Strukturen registriert.

Die Analyse wurde für Datensätze mehrerer Schwellenspannungen durchgeführt, um deren Effekt auf die Zählraten zu beobachten. Es wurden Schwellenspannungen von 50 mV, 100 mV, 300 mV, 500 mV, 700 mV und 900 mV für alle Kanäle untersucht (Abbildung 6.6).

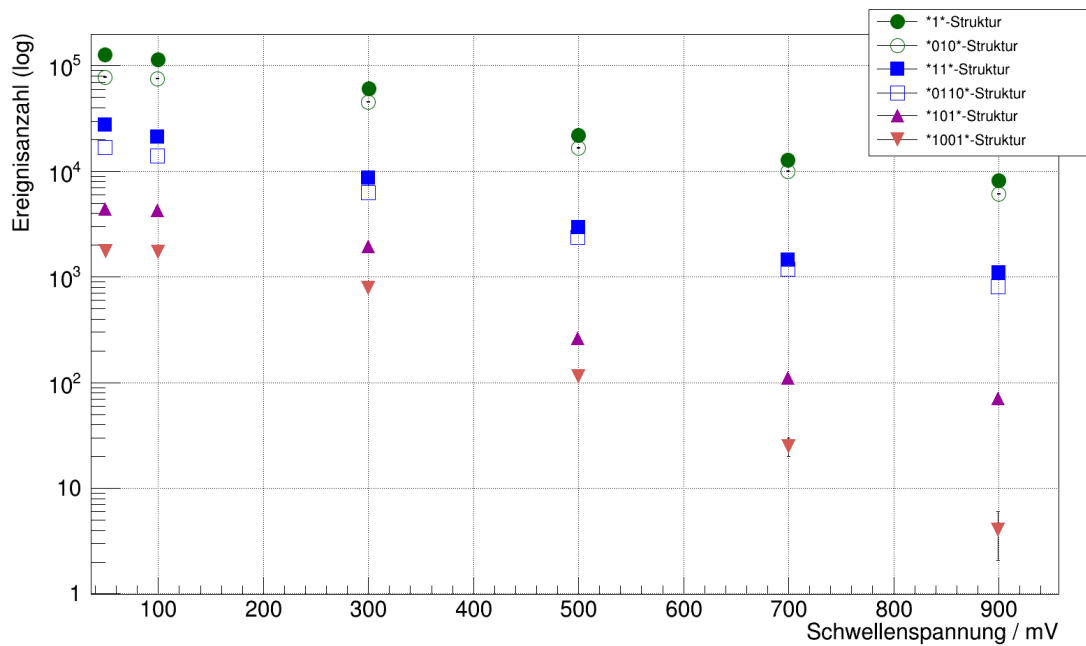


Abbildung 6.6: Signalmengen der Kanäle des Detektors Corrientes im ausgewählten Datensatz bei Schwellenspannungen von 50 mV bis 900 mV. Sind keine Fehlerbalken zu sehen, so ist der Fehler kleiner als die verwendete Markierung.

Die höchsten Werte weisen jeweils die Einträge der \*1\*-Struktur für alle Schwellenspannungen auf, da bei dieser Methode jedes detektierte Signal als Ereignis gewertet wird. Alle Einträge der \*010\*-Struktur liegen jeweils unterhalb denen der \*1\*-Struktur, wie zu erwarten war, da es sich bei den Ergebnissen der \*010\*-Struktur um eine Untermenge der Ergebnisse der \*1\*-Struktur handelt mit der Bedingung, dass das Signal beidseitig jeweils von einem nicht gefüllten Zeitintervall umschlossen ist. In der Häufigkeit der gemessenen Signale folgt diesen beiden Strategien für alle Schwellenspannungen die \*11\*-Struktur. Sie ist ebenfalls eine Untermenge der Ergebnisse der \*1\* Struktur und um einen Faktor zehn seltener in der Häufigkeit ihres Auftretens als diese. Auch die Häufigkeit der Ergebnisse der \*0110\*-Struktur liegen jeweils unterhalb denen der \*11\*-Struktur. Aufgrund der Tatsache, dass analog zu den beiden vorherigen Strukturen die Ergebnisse der \*0110\*-Struktur eine Untermenge der Ergebnisse der \*11\*-Struktur sein müssen, war dies zu erwarten.

Betrachtet man die Verhältnisse der von ungefüllten Zeitintervallen umschlossenen Strukturen (5, 6 in Tabelle 6.2) und den nicht-umschlossenen Strukturen (1, 2 in Tabelle 6.2) ist zu erkennen, dass diese jeweils ungefähr im Verhältnis drei zu vier zueinander stehen (Tabelle 6.3, 6.4).

Verhältnis	50 mV	100 mV	300 mV	500 mV	700 mV	900 mV
*010*/*1*	0,61	0,66	0,74	0,75	0,78	0,75
*0110*/*11*	0,60	0,65	0,73	0,81	$0,82 \pm 0,001$	$0,74 \pm 0,0012$

Tabelle 6.3: Verhältnisse der Häufigkeiten der von ungefüllten Zeitintervallen umschlossenen (\*010\*, \*0110\*) und nicht-umschlossenen (\*1\*, \*11\*) Strukturen. Wurde kein Fehler angegeben, so ist dieser geringer als  $10^{-3}$ .

Verhältnis	Mittelwert
*010*/*1*	$0,71 \pm 6,21 \cdot 10^{-5}$
*0110*/*11*	$0,72 \pm 4,92 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 6.4: Mittelwerte der Verhältnisse der Häufigkeiten der von ungefüllten Zeitintervallen umschlossenen (\*010\*, \*0110\*) und nicht-umschlossenen (\*1\*, \*11\*) Strukturen.

Die Werte der \*101\*-Struktur sind um etwa einen Faktor zehn kleiner als die Werte der \*11\*-Struktur. Allerdings weichen die Werte der \*101\*-Struktur ab einer Schwellenspannung von mehr als 300 mV stärker von denen der \*11\*-Struktur ab. Teilweise gibt es Unterschiede von bis zu einem Faktor einhundert. Für die \*1001\*-Struktur finden sich Werte der Häufigkeit für alle Schwellenspannungen die um einen kleinen Faktor von denen der \*101\*-Struktur abweichen, der jeweils in der Größenordnung einer Zehnerpotenz liegt. Aufgrund von geringer Statistik ist der Fehler für die Werte der letzten beiden Strukturen bei hohen Schwellenspannungen größer als bei niedrigen Schwellenspannungen.

Wie zu erwarten ist, geht für alle Zählstrategien mit steigender Schwellenspannung die Anzahl der gemessenen Ereignisse zurück. Weiterhin kann gefolgert werden, dass für eine steigende Komplexität der gesuchten Struktur ebenfalls weniger Übereinstimmungen in den Daten gefunden werden.

## 6.5 Messzeitanalyse

Der zweite Teil der Analyse beschäftigt sich mit der Messzeit der Myondetektorstationen (MDS) der AMIGA-Erweiterung. Aus den Messdaten der einzelnen MDS wird analysiert, welche MDS wann wie viele Ereignisse gemessen hat. Daraus kann extrahiert werden, welche MDS zu welcher Zeit Daten geliefert hat und mit wie vielen MDS jeweils gemessen wurde.

Zu diesem Zweck wurden die mittels dem CDAS und IOMD gesammelten Daten von sieben MDS verwendet (Tabelle 6.5).

Name	Los Piojos	Kathy Turner	Corrientes	Phil Colins	Heisenberg	Yeka	Toune
ID	1574	1764	93	1622	1733	1570	688

Tabelle 6.5: Verwendete Myondetektorstationen. Name und Identifikationsnummer (ID) der MDS, deren Daten in diesem Teil der Analyse verwendet werden.

Von diesen sieben MDS wurden alle genommenen Daten aus dem Zeitraum von April bis November 2012 zur Erstellung der Auswertung verwendet.

Es wird zunächst für jede MDS separat ausgewertet, wie oft diese innerhalb einer Stunde an einer Messung beteiligt gewesen ist. Die dadurch entstandenen Histogramme wurden zu einer Gesamtübersicht aufaddiert, in der zu sehen ist, wie viele Messungen je Stunde von allen MDS durchgeführt worden sind (Abbildung 6.7). Die Gesamtübersicht liefert damit deren Aktivität.

Anhand dieser Darstellung (Abbildung 6.7) ist zu erkennen, dass die MDS nicht zu jeder Zeit eine ähnliche Menge an Messungen lieferten. Die Ursachen dieser Unterschiede sind zumeist Wartungsarbeiten an der Hard- oder Software der MDS [25]. Einige Beispiele dazu sind Energieversorgungsengpässe durch defekte Batterien oder die Umrüstung der Kommunikation zwischen MDS und CDAS auf einen anderen Standard, sowie das Ausbessern von Fehlern in der Firmware der Elektronik.

Ebenfalls zu erkennen ist, wann sowohl mit den Surfacedetektor-Tanks(SD) als auch den Fluoreszenzdetektor-Teleskopen(FD) Trigger generiert wurden oder aber mit den SD-Tanks alleine.

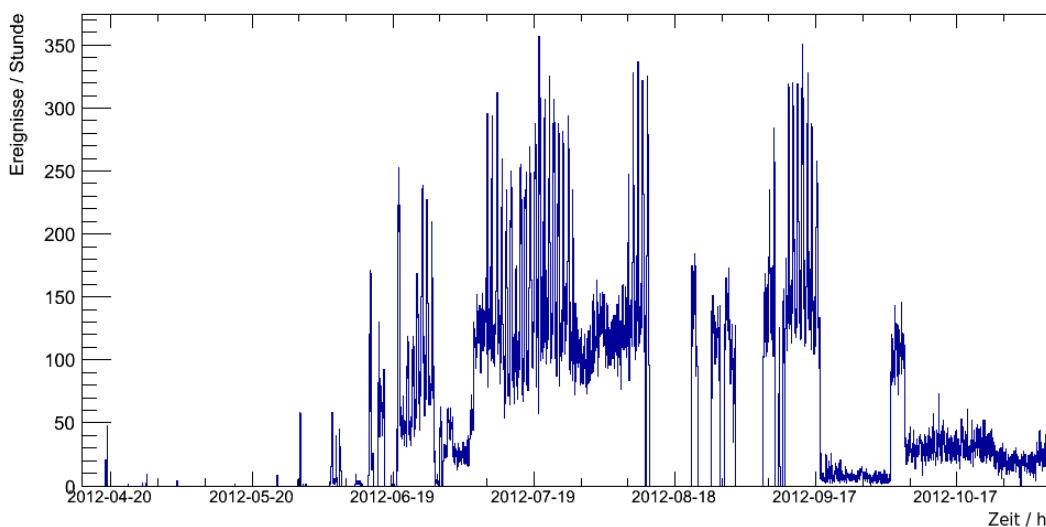


Abbildung 6.7: Anzahl der Messungen aller Myondetektorstationen je Stunde für den Zeitraum von April bis November 2012.



Zu sehen sind solche Zeiträume, in denen mit FD und SD Daten genommen wurden (Abbildung 6.8). Beide Detektoren können Trigger generieren, die zur Auslese von Myondaten führen. Dabei kann ein Ereignis mehrfach angefordert werden.

Geht man von der Aussage der Aktivität der einzelnen MDS dazu über die Menge der messenden MDS darzustellen (Abbildung 6.9) ist deutlich zu erkennen, dass es im Vergleich zur gesamten betrachteten Messdauer nur wenige Zeiträume gibt, in denen alle MDS Daten geliefert haben. Diese Darstellung kann dazu verwendet werden, um eine Aussage über die Beteiligung der MDS an den Messungen zu geben, wobei beachtet werden muss, dass es sich um eine Testphase handelt. Dementsprechend ist zu erkennen, dass in nur wenigen Zeiträumen alle Stationen Daten geliefert haben und meistens mit weniger als sieben Stationen gemessen worden ist. Mittels der aus Abbildung 6.9 gewonnenen Übersicht lassen sich Zeiträume aus der Testphase auswählen, in denen Messdaten von einer bestimmten Menge an MDS vorliegen, um diese zur weiteren Analyse zu verwenden.

Ein Zeitraum in dem nahezu alle MDS an den Messungen beteiligt waren, ist demnach der vom 08.07.2012 bis zum 28.07.2012 oder der vom 06.09.2012 bis zum 25.10.2012.

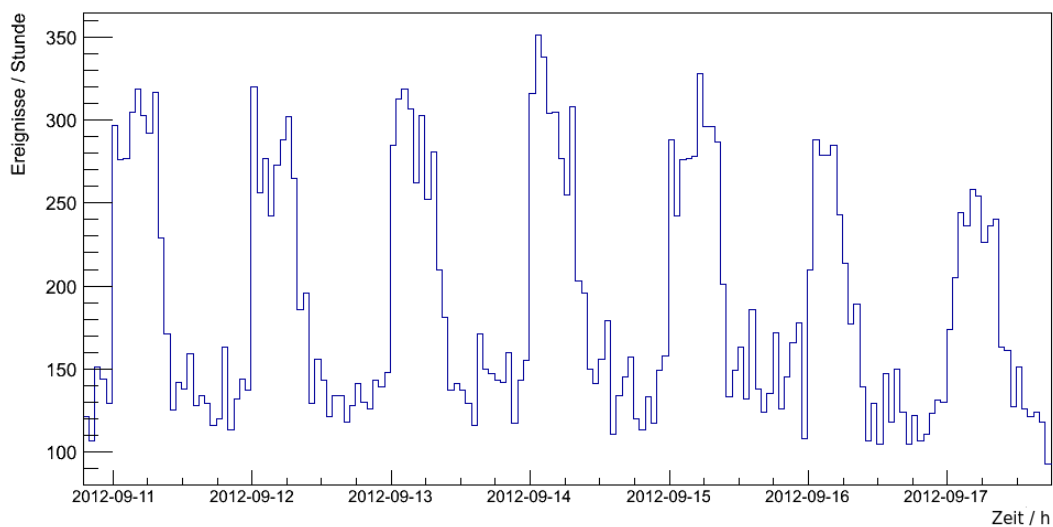


Abbildung 6.8: Anzahl der Messungen aller Myondetektorstationen je Stunde für den Zeitraum vom 11.09.2012 bis zum 17.09.2012.

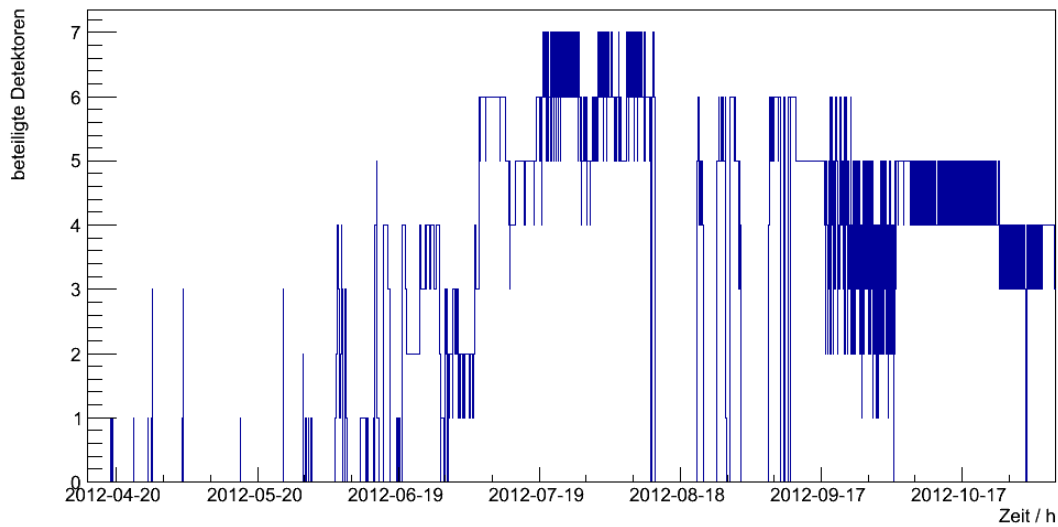


Abbildung 6.9: Messende Myonendetektorstationen. Menge der in einer Stunde an Messungen beteiligten Myonendetektorstationen im Zeitraum von April bis November 2012.

Aus Abbildung 6.9 kann die Menge der messenden MDS ermittelt werden. Welche MDS daran jeweils beteiligt gewesen sind, kann anhand einer weiteren Analyse ermittelt werden (Abbildung 6.10). Werden die Daten separiert, kann für jede Myonendetektorstation spezifisch eine Aussage getroffen werden, in welchen Zeiträumen sie an Messungen beteiligt gewesen ist.

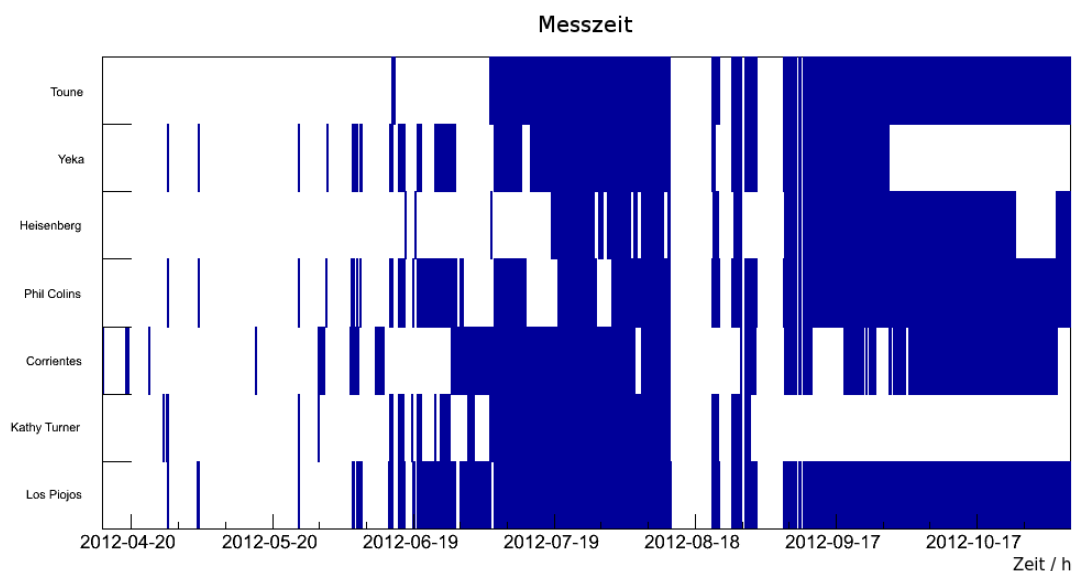


Abbildung 6.10: Messzeit der einzelnen Myonendetektorstationen basierend auf der Auswertung der stündlichen Aktivität der einzelnen Detektoren im Zeitraum von April bis November 2012.

Mittels der Aufspaltung in die Messzeiten für die einzelnen Myondetektorstationen kann die Auswahl der Messdaten dahingehend angepasst werden, dass Zeiträume ausgewählt werden können, in denen eine bestimmte Myondetektorstation an den Messungen beteiligt gewesen ist. Dies eignet sich im speziellen zur Untersuchung des Messverhaltens gewünschter MDS und um diese MDS miteinander zu vergleichen. So ist zum Beispiel klar ersichtlich, bis zu welchem Zeitpunkt die Myondetektorstation Kathy Turner Messdaten geliefert hat und ab wann diese mittlerweile nicht mehr aktive Myondetektorstation nicht mehr in Auswertungen mit einbezogen werden kann.

Durch die drei in diesem Abschnitt erstellten Analysen der Messdaten aller zur Verfügung stehenden MDS ist es damit möglich, eine präzise Anforderung an die zur Analyse verwendeten Messdaten zu stellen.



## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden Vorstudien zur Entwicklung einer Myonzählstrategie für die AMIGA-Erweiterung des Pierre-Auger-Observatoriums durchgeführt. Mit dieser Zählstrategie soll die Menge der gemessenen Myonen aus den gemessenen Signalen der AMIGA-Erweiterung ermittelt werden. Dabei wurde zunächst ein Vergleich zwischen komprimierten und unkomprimierten AMIGA-Ereignis-Dateien durchgeführt mit dem Ergebnis, dass die komprimierten Dateien um circa einen Faktor 1000 weniger Speicherplatz belegen wie im unkomprimierten Zustand. Nachdem aus dem Datensatz anhand mehrerer Qualitätskriterien solche Dateien ausgewählt wurden, die in der weiteren Analyse verwendet werden sollten, wurde die Signalmenge der einzelnen Kanäle des PMTs der Myondetektorstation Corrientes analysiert. Die Kanäle 0, 10 und 14 weisen eine wesentlich schwächere Signalmenge auf, da deren Fibern während der Installation nicht mit dem PMT verbunden wurden. Obwohl die Fibern der Kanäle 48 und 51 ebenfalls nicht mit dem PMT verbunden sind, weisen sie eine zu den meisten Kanälen ähnliche Aktivität auf. Im Gegensatz dazu zeigen die Kanäle 32, 42 und 46 eine Signalmenge ähnlich der Kanäle 0, 10 und 14. Warum diese Kanäle nicht den Erwartungen entsprechen, konnte bislang nicht geklärt werden. Zur Klärung werden weitere Messungen benötigt. Zur Eingrenzung der möglichen zu untersuchenden Strukturen für einen Zählalgorithmus, wurden die Daten zunächst auf die Häufigkeit der verschiedenen Längen eines Signals untersucht. Das Ergebnis ist, dass Signale mit einer Länge von mehr als drei Zeitintervallen bei einer Breite von 12,5 ns keinen signifikanten Beitrag leisten. Aus diesem Grund wurden sechs mögliche Strukturen gewählt. Für steigende Komplexität der Signalstrukturen und auch für steigende Schwellenspannungen kann ein Absinken der beobachteten Ereignisse verzeichnet werden. Die dabei ermittelten Zählraten für die einzelnen Schwellenspannungen müssen in weiteren Analysen mit den Erwartungswerten für Myonen abgeglichen werden. Zur Erstellung solcher Erwartungswerte würden sich Messungen mit dem Hodoskop im Siegener Dunkellabor anbieten. Das Hodoskop ist so eingestellt, dass es auf Myonen reagiert und als Trigger für einen AMIGA-Myonzähler dient. Mittels der dadurch gewonnenen Daten erhält man eine Grundlage, um die hier ermittelten Zählraten zu interpretieren.

Im zweiten Teil der Analyse wurde die Messaktivität der einzelnen Myondetektorstationen untersucht. Es wurde eine Auswertung vorgenommen, durch die präzise Anforderungen an gesuchte Messzeiträume gestellt werden können. Dazu wurden die Daten des Datennahmesystems des Myondetektors von sieben Myondetektorstationen während der Testphase von April 2012 bis November 2012 untersucht. Aus den Daten wurde die Anzahl der Messungen pro Stunde für alle Detektoren einzeln und auch insgesamt ermittelt. Ebenso wurde analysiert wie viele verschiedene Myondetektorstationen binnen einer Stunde Daten geliefert haben, als auch welche Station

---

gemessen hat. Aufgrund von Wartungsarbeiten haben über größere Zeiträume nicht alle Myon-detektorstationen Daten geliefert. Durch diese Analyse der Daten wurden die Zeiträume vom 08.07.2012 bis zum 28.07.2012 und vom 06.09.2012 bis zum 25.10.2012 ermittelt, die eine hohe Anzahl an verfügbaren Messungen und an der Messung beteiligter Detektoren bieten. Insgesamt wurden somit Werkzeuge zur Identifikation von zur Analyse geeigneten Messperioden erstellt.

## 8 Abkürzungsverzeichnis

- AB** Analogue Board
- AuxLS** Auxiliary Board LS
- AuxSBC** Auxiliary Board SBC
- CDAS** Central Data Acquisition System
- CERN** Europäische Organisation für Kernforschung
- DB** Digital Board
- FPGA** Field-Programmable Gate Array
- GPS** Global Positioning System
- GTS** Global Time Stamp
- ID** Identifikationsnummer
- IOMD** Ein- und Ausgabesystem der Myondetektor-Daten
- LHC** Large Hadron Collider
- LTS** Local Time Stamp
- MCUB** Microcontroller Board
- MD** Myondetektor
- MDS** Myondetektorstationen
- MB** Motherboard
- PDB** Power Distributor Board
- PMT** Photomultiplier
- SBC** Single Board Computer





---

## Literaturverzeichnis

- [1] Becquerel, H. On radioactivity, a new property of matter. Nobelprize.org, 1903.
- [2] Hess, V.F. Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten. *Physikalische Zeitschrift XIII*, pages 1084–1091, 1912.
- [3] Zatsepin, G. und Khristiansen, G. Dmitri V. Skobeltsyn. *Physics Today*, 45:74, Mai 1992.
- [4] Auger, P. and Ehrenfest, P. and Maze, R. and Daudin, J. and Fréon, Robley A. Extensive cosmic-ray showers. *Rev. Mod. Phys.*, 11:288–291, Jul 1939.
- [5] siehe z.B. Grupen, C. *Astroteilchenphysik. Das Universum im Licht der kosmischen Strahlung*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 2000.
- [6] Beringer, J. et al. (Particle Data Group). Review of particle physics. *Phys. Rev. D*, 86:010001, Jul 2012.
- [7] Blümer, H. und Guerard, F.-Kj. *Die höchsten Energien im Universum. Nachrichten*. Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe, 2001.
- [8] Greisen, Kenneth. End to the Cosmic-Ray Spectrum? *Phys. Rev. Lett.*, 16:748–750, Apr 1966.
- [9] Zatsepin, G. T. and Kuz'min, V. A. Upper Limit of the Spectrum of Cosmic Rays. *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 4:78, August 1966.
- [10] Abbasi, R. U. et al. (HiRes Kollaboration). First Observation of the Greisen-Zatsepin-Kuzmin Suppression. *Phys. Rev. Lett.*, 100:101101, Mar 2008.
- [11] Abraham, J. et al. (Pierre-Auger-Collaboration). Observation of the suppression of the flux of cosmic rays above  $4 \times 10^{19}$  eV. *Phys. Rev. Lett.*, 101:061101, Aug 2008.
- [12] Air shower formation in the atmosphere. [http://en.wikipedia.org/wiki/Air\\_shower\\_\(physics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Air_shower_(physics)), 2008.
- [13] Abraham, J. et al. An upper limit to the photon fraction in cosmic rays above  $10^{19}$  eV from the Pierre Auger Observatory. *Astroparticle Physics*, pages 155–168, 2007.
- [14] Homola, P. and Risse, M. and Engel, R. and Góra, D. and Pekala, J. and Wilczyńska, B. and Wilczyński, H. Characteristics of geomagnetic cascading of ultra-high energy photons at the southern and northern sites of the Pierre Auger Observatory. *Astroparticle Physics*, 27(2–3):174 – 184, 2007.

- [15] Abreu, P. and others. The Pierre Auger Observatory IV: Operation and Monitoring. 2011.
- [16] Pierre Auger Collaboration. Lage des Observatoriums (orig.: Ubicación del Observatorio). <http://visitantes.auger.org.ar/index.php/el-observatorio.html>, 2013.
- [17] Blümer, H. and Kampert, K.-H. Die Suche nach den Quellen der kosmischen Strahlung: Antworten versprechen die Luftschauerexperimente KASCADE und AUGER. *Physik Journal*, 56(3):39–45, 2000.
- [18] Allekotte, I. and others. The Surface Detector System of the Pierre Auger Observatory. *Nucl.Instrum.Meth.*, A586:409–420, 2008.
- [19] Abraham, J. and others. The Fluorescence Detector of the Pierre Auger Observatory. *Nucl.Instrum.Meth.*, A620:227–251, 2010.
- [20] Pierre Auger Collaboration. Rekonstruktion. <http://www.auger.de>, 2013.
- [21] Abreu, P. and others. The Pierre Auger Observatory V: Enhancements. *J.Phys.Conf.Ser.*, 375:052006, 2012.
- [22] Niechciol, M. *Muon counter simulation studies for the AMIGA enhancement of the Pierre Auger Observatory*. Masterarbeit, Universität Siegen, 2011.
- [23] Fröhlich, U. *Charakterisierung der Szintillatoren und der Ausleseelektronik des AMIGA-Myonsystems*. Masterarbeit, Universität Siegen, 2009.
- [24] Pontz, M. *System Tests, Initial Operation and First Data of the AMIGA Muon Detector for the Pierre Auger Observatory*. Dissertation, Universität Siegen, 2013.
- [25] Pontz, M., Private Mitteilung.

## Danksagung

Abschließend möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Ein großer Dank gilt Prof. Dr. Peter Buchholz für die Betreuung während dieser Arbeit und der damit verbunden Diskussion der Ergebnisse, sowie für die Möglichkeit eine interessante Arbeit im Rahmen des Pierre-Auger-Observatoriums zu schreiben.

Dr. Michael Pontz danke ich für die Unterstützung und die Erläuterungen während der gesamten Arbeit und im Besonderen in Bezug auf die technischen Details der verwendeten Hardware.

Zudem möchte ich Uwe Fröhlich und Dr. Rodica Teaciuc für ihren Rat und ihre Informationen zur Verarbeitung und zum Verständnis der verwendeten Daten danken.

Marcus Niechciol, Hendrik Czirr, Bakul Gaur und Dr. Marcus Rammes möchte ich für das Lösen von auftretenden Problemen bei der Programmierung der Analyse-Software danken.

Ich danke Sebastian Sonntag und Sebastian Keckert für das angenehme Arbeitsklima im Büro und die ausgiebigen Diskussionen bei verschiedenen Fragestellungen.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie und meiner Freundin, die mich während der Erstellung dieser Arbeit und während meines Studiums unterstützt haben.

Vielen Dank !



## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelor-Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie Zitate und Ergebnisse anderer kenntlich gemacht habe.

---

Siegen, den 31. Mai 2013