

UNTERSUCHUNG DER RADIOEMISSION IN AUSGEDEHNTEN LUFTSCHAUERN MIT DEM LOPES30-EXPERIMENT

DIPLOMARBEIT
VON
EVA BETTINI

Februar 2007

Referent *Priv.-Doz. Dr. J.R. Hörandel*
Korreferent *Prof. Dr. M. Feindt*

INSTITUT FÜR EXPERIMENTELLE KERNPHYSIK (IEKP)
UNIVERSITÄT KARLSRUHE (TH)

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1 Kosmische Strahlung und ausgedehnte Luftschauer	3
1.1 Das Energiespektrum	3
1.2 Die Elementzusammensetzung	5
1.3 Herkunft und Transport	6
1.4 Ausgedehnte Luftschauer	8
1.4.1 Teilchenkomponenten	9
1.4.2 Radioemission	11
2 Luftschauerexperimente	15
2.1 KASCADE-Grande	15
2.1.1 Das Detektorfeld	15
2.1.2 Weitere Komponenten	17
2.1.3 Das Grande-Array	18
2.2 LOPES	18
2.2.1 LOFAR	19
2.2.2 LOPES30 – Aufbau und Elektronik	20
2.2.3 LOPES30 – Analysesoftware	23
3 Korrelation mit Schauerparametern	25
3.1 Datenauswahl	25
3.2 Fehlerbetrachtung	26
3.3 Ausgewählte Schauerparameter	27
3.4 Diskussion der Ergebnisse	33

4	Lateralverteilung	35
4.1	Datenauswahl	35
4.2	Analyse	36
4.2.1	Durchführung	36
4.2.2	Fehlerbetrachtung	38
4.2.3	Einzelereignisse	38
4.3	Diskussion der Ergebnisse	41
5	Variation der Antennendichte	43
5.1	Einteilung der Antennen	43
5.2	Verwendete Daten	45
5.3	Analyse	45
5.3.1	Fehlerbetrachtung	47
5.3.2	Vergleich von Untergruppen und Gesamtfeld	47
5.3.3	Abhängigkeit vom Schwerpunkt	50
5.3.4	Auflösung der Pulshöhe	50
5.4	Diskussion der Ergebnisse	52
6	Zusammenfassung und Ausblick	55
	Literaturverzeichnis	57

Einleitung

Seit die kosmische Strahlung vor fast 100 Jahren entdeckt wurde, hat sie sich zu einem der spannendsten und interessantesten Gebiete der Astroteilchenphysik entwickelt. Astronomische Forschungen beschränkten sich nicht mehr nur auf die Beobachtung der Sterne, sondern umfassen auch die Messung der aus ionisierten Kernen bestehenden kosmischen Strahlung. Die ist die einzige Materie, die von außerhalb unseres Sonnensystems bis zur Erde vordringt und Informationen über das Universum mit sich trägt.

Beim Auftreffen der Teilchen auf die Erdatmosphäre können diese mit den Luftmolekülen wechselwirken und ausgedehnte Luftschauer erzeugen. Dabei entstehen eine Vielzahl von Sekundärteilchen, die auf dem Erdboden mit Detektoren nachgewiesen werden können und Rückschlüsse auf die Natur des Primärteilchens, dessen Ursprung und Energie geben. Des Weiteren entdeckte man, dass die leichten geladenen Teilchen im Luftschauer eine elektromagnetische Strahlung im Radio-Frequenzbereich emittieren, welche mit Antennen gemessen werden kann. Die heutige Digitaltechnik ermöglicht umfassende Studien mit Antennenfeldern, um zusätzliche Informationen aus dem Luftschauer zu gewinnen. Eines der ersten Experimente dazu ist das in Karlsruhe aufgebaute LOPES-Experiment, das die Radioemission von Luftschauern detektiert.

Parallel zu den experimentellen Arbeiten werden Theorie und Simulationen weiter entwickelt, um ein besseres Verständnis über die Abhängigkeiten von verschiedenen Schauerparametern zu erlangen. Diese Parameter stellt das bestehende Luftschauerexperiment KASCADE-Grande aus seiner Rekonstruktion zur Verfügung. Erste Analysen zu diesen Korrelationen wurden im Jahr 2005 mit 10 Antennen durchgeführt. Nach der Erweiterung von LOPES auf 30 Antennen, gilt es nun diese Resultate zu bestätigen und weitere Erkenntnisse zu gewinnen.

Im Hinblick auf großflächige Radioexperimente ist ein besseres Verständnis der lateralen Abschwächung des Radiosignals von Bedeutung, um eine optimale Antennenabdeckung zu erreichen. Erste Untersuchungen zur Lateralverteilung mit 30 Antennen und dem Einfluss der Antennendichte auf die Rekonstruktion des Radiopulses wurden durchgeführt.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich wie folgt:

In **Kapitel 1** werden die Grundlagen der kosmischen Strahlung und Luftschauer erläutert. Dabei wird auf den Mechanismus und die historische Entwicklung der Untersuchung der Radioemission eingegangen.

Kapitel 2 gibt einen Überblick über die Luftschauerexperimente KASCADE-Grande und

LOPES. Dabei werden die Elektronik und Analysesoftware von LOPES30 vorgestellt. Nach dieser allgemeinen Übersicht werden in **Kapitel 3** die Korrelationen zwischen Radiosignal und ausgewählten Schauerparametern untersucht und mit früheren Analysen und Theorien verglichen.

Die Abhängigkeit von der Entfernung zur Schauerachse wird in **Kapitel 4** für einzelne Ereignisse analysiert.

Kapitel 5 befasst sich mit der Rekonstruktionsmöglichkeit des Radiosignals bei einer Variation der Antennendichte. Dabei wird insbesondere im Hinblick auf zukünftige Polarisationsmessungen untersucht, ob im Vergleich mit dem Gesamtfeld auch mit 1/3 beziehungsweise 2/3 der Antennen zufrieden stellende Ergebnisse erzielt werden können.

Kapitel 6 fasst die Ergebnisse zusammen und gibt Einblicke in zukünftige Vorhaben.

Kapitel 1

Kosmische Strahlung und ausgedehnte Luftschauer

Die Entdeckung der kosmischen Strahlung erfolgte durch Victor F. Hess zu Beginn des 20ten Jahrhunderts. Während eines Ballonexperimentes stellte der österreichische Physiker fest, dass die elektrische Leitfähigkeit der Atmosphäre mit der Höhe zunahm und erklärte dies mit der Existenz einer extraterrestrischen Höhenstrahlung [Hes12].

Seit den 30er Jahren weiß man, dass die kosmische Strahlung hauptsächlich aus geladenen, relativistischen Teilchen besteht, welche einen Energiebereich von mehr als zehn Größenordnungen umfassen. Die höchstenergetischen Teilchen besitzen dabei ein Vielfaches der an Teilchenbeschleunigern möglichen Werte [cer06] und es stellt sich die Frage, woher diese Teilchen kommen und welche Mechanismen sie auf solch hohe Energien beschleunigen können. Da der Teilchenfluss mit zunehmender Energie stark abnimmt, sind großflächige Experimente am Boden nötig, um diese Fragen zu klären. Dabei werden die von den Primärteilchen erzeugten Luftschauer, beziehungsweise deren Sekundärprodukte, nachgewiesen und Rückschlüsse auf die Eigenschaften der kosmischen Strahlung gezogen. Neben den seit Jahrzehnten gängigen Teilchendetektoren ist durch den Fortschritt in der Digitaltechnik seit wenigen Jahren auch die Messung der Radiokomponente von Luftschauern möglich. Im Folgenden werden die Grundlagen der kosmischen Strahlung und der Schauerkomponenten erläutert [Ulr03].

1.1 Das Energiespektrum

Das Spektrum der kosmischen Strahlung reicht von Energien von 10^9 eV (1 GeV) bis zu 10^{20} eV und erstreckt sich um fast 30 Größenordnungen im Fluss (Abbildung 1.1). So liegt die Teilchenrate bei einer Energie von 10^{12} eV bei etwa 10 Teilchen pro Quadratmeter und Minute und fällt auf ein Teilchen pro Quadratkilometer in 100 Jahren bei Energien um 10^{20} eV. Teilchen mit Energien unter 1 GeV sind solaren Ursprungs, da die Sonnenaktivitäten ein Vordringen niederenergetischer Teilchen von außerhalb des Sonnensystems bis zur

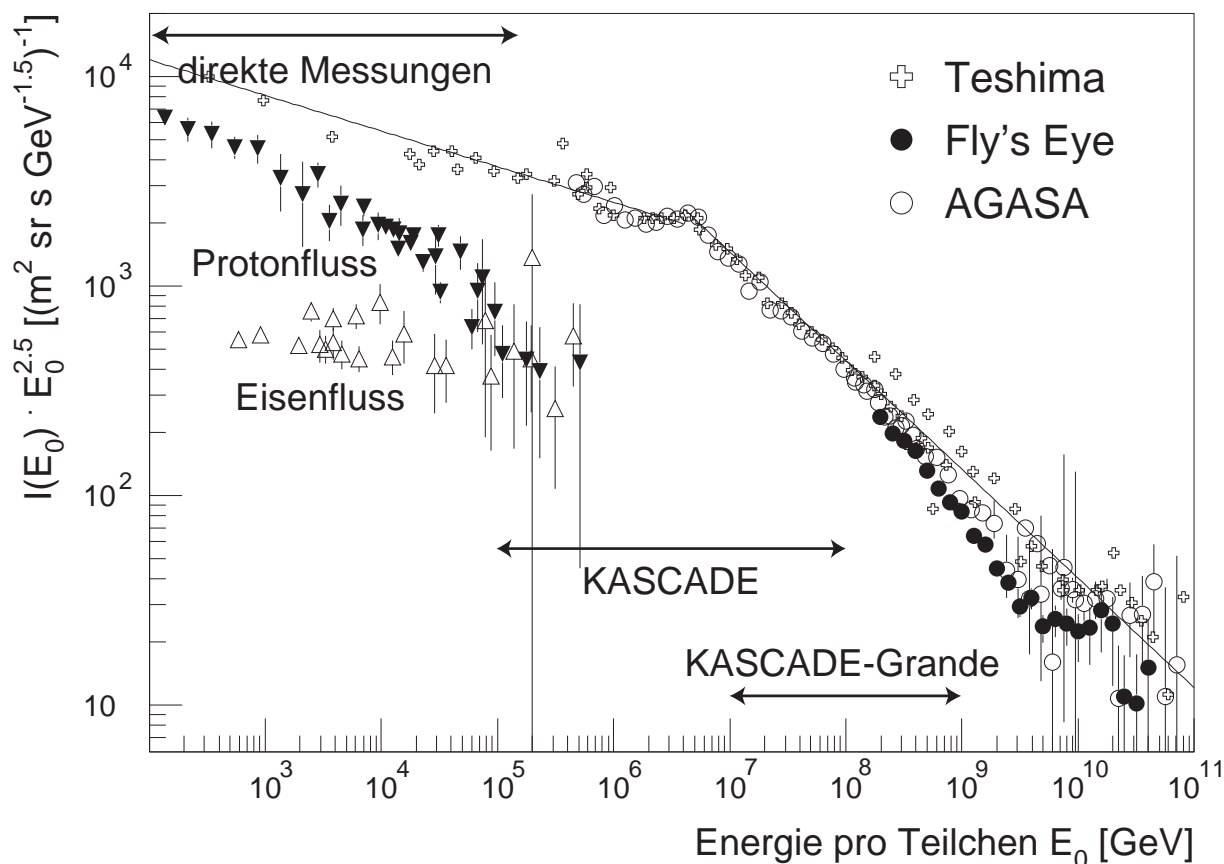


Abbildung 1.1: Energiespektrum der kosmischen Strahlung. Um die Änderungen im Spektralindex hervorzuheben, wurde der Fluss mit $E^{2,5}$ skaliert [Kna97].

Erde verhindern. Man spricht deshalb erst ab dem GeV-Bereich von kosmischer Strahlung und die ungestörte Beobachtung beginnt bei ca. 50 GeV.

Ab $2 \cdot 10^9$ eV folgt das Energiespektrum einem einfachen Potenzgesetz der Form

$$\frac{dN}{dE} \sim E^{-\gamma}$$

mit dem spektralen Index $\gamma \simeq 2,7$. Bei näherer Betrachtung zeigt sich, dass es von diesem Verhalten Abweichungen gibt. So erkennt man im Energiebereich um $4 \cdot 10^{15}$ eV ein Abknicken, das sogenannte *Knie*, und der Index ändert sich von $\gamma \simeq 2,7$ auf den Wert $\gamma \simeq 3,1$. Die Ursache dieses Effektes ist bisher noch nicht geklärt und es existiert eine Vielzahl verschiedener Theorien und Modelle [Hor04]. Nach dieser Indexänderung bleibt die Abnahme des Flusses bis zu Energien von etwa $3 \cdot 10^{17}$ eV konstant, um dann jedoch eine weitere Zunahme des Index (*zweites Knie*) anzudeuten. Die Untersuchung dieses Verhaltens ist Gegenstand aktueller Forschung und insbesondere das KASCADE-Grande-Experiment (siehe Abschnitt 2.1) untersucht die kosmische Strahlung und deren Zusammensetzung in diesem

Energiebereich. Bei sehr hohen Energien zwischen $5 \cdot 10^{18}$ eV und $1 \cdot 10^{19}$ eV flacht das Spektrum wieder ab und der spektrale Index nimmt im Bereich dieses *Knöchels* erneut den Wert $\gamma \simeq 2.7$ an.

Ab Energien von $5 \cdot 10^{19}$ eV können die Teilchen der kosmischen Strahlung durch Wechselwirkung mit den Photonen der 3K-Hintergrundstrahlung Pionen erzeugen und verlieren dabei einen Großteil ihrer Energie. Dadurch verkürzt sich ihre Reichweite und nur bei sehr nahe gelegenen Quellen sollte ein Nachweis auf der Erde möglich sein. Da hierfür jedoch keine geeigneten Objekte vorliegen, ist mit einem Abbruch des Energiespektrums, dem sogenannten GZK-Cutoff, zu rechnen. Dieser wurde bereits 1966 von Greisen, Zatsepin und Kuzmin vorhergesagt [Gre66, Zat66]. Ergebnisse des AGASA-Experiments haben hingegen bereits Teilchen mit Energien über 10^{20} eV nachgewiesen [Tak03]. Um diese Abweichungen zu klären, sind wegen des geringen Flusses großflächige Experimente nötig und man erhofft sich unter anderem durch das Pierre-Auger-Observatorium in Argentinien mit einer Detektorfläche von 3000 km^2 neue Erkenntnisse zu diesem Effekt [Wat04].

1.2 Die Elementzusammensetzung

Die Hauptbestandteile der kosmischen Strahlung sind Protonen und Heliumkerne. Im Energiebereich bis 100 GeV werden schwerere Kerne durch den Einfluss des Sonnenwindes unterdrückt und erst bei größeren Energien liegt deren Anteil bei etwa 1%, neben 87% Protonen und 12% Heliumkernen. Der Anteil an Elektronen und Gammastrahlung ist nur gering.

Bis zu Energien von etwa 10^{14} eV kann die chemische Zusammensetzung der kosmischen Strahlung direkt über Ballonflüge und Satelliten bestimmt werden. Abbildung 1.2 zeigt bei dem Vergleich zwischen kosmischer und solarer Elementzusammensetzung eine weitgehende Übereinstimmung hinsichtlich der Häufigkeit und dem Verhalten bei gerader beziehungsweise ungerader Massenzahl. Dies lässt darauf schließen, dass der Entstehungsprozess für diese Teilchen in Sternen stattfindet. Allerdings gibt es auch leichte Abweichungen, vor allem hinsichtlich der Elemente bis zur Ordnungszahl $Z=5$ und unterhalb der Eisengruppe. Die Unterhäufigkeit von Wasserstoff und Helium kann durch deren hohe Ionisationsenergie und die daraus resultierende kleinere Beschleunigungseffizienz erklärt werden, sowie durch mögliche Unterschiede in den Quellen. Bei Lithium, Beryllium, Bor und den Elementen unterhalb von Eisen liegt dagegen eine Anhäufung vor. Diese Elemente sind keine Endprodukte stellarer Nukleosynthese, sondern entstehen durch Spallationsprozesse der häufig auftretenden Kerne der CNO- und Eisengruppe im interstellaren Medium. Aus den verschiedenen Verhältnissen von C, N, O und Fe zu ihren Spallationsprodukten können wichtige Informationen hinsichtlich der durchquerten Materie (ca. $5 - 10 \text{ g/cm}^2$) bzw. durch Untersuchungen des radioaktiven Zerfalls von zum Beispiel Be^{10} nach Be^9 zur Verweildauer im interstellaren Medium (ca. 10^7 Jahre) gewonnen werden.

Bei höheren Energien ist man durch den geringen Teilchenfluss auf indirekte Messungen mit Luftschauerexperimenten angewiesen (Abschnitt 1.4 und Kapitel 2). Dabei ist eine exakte Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der kosmischen Strahlung nicht mehr

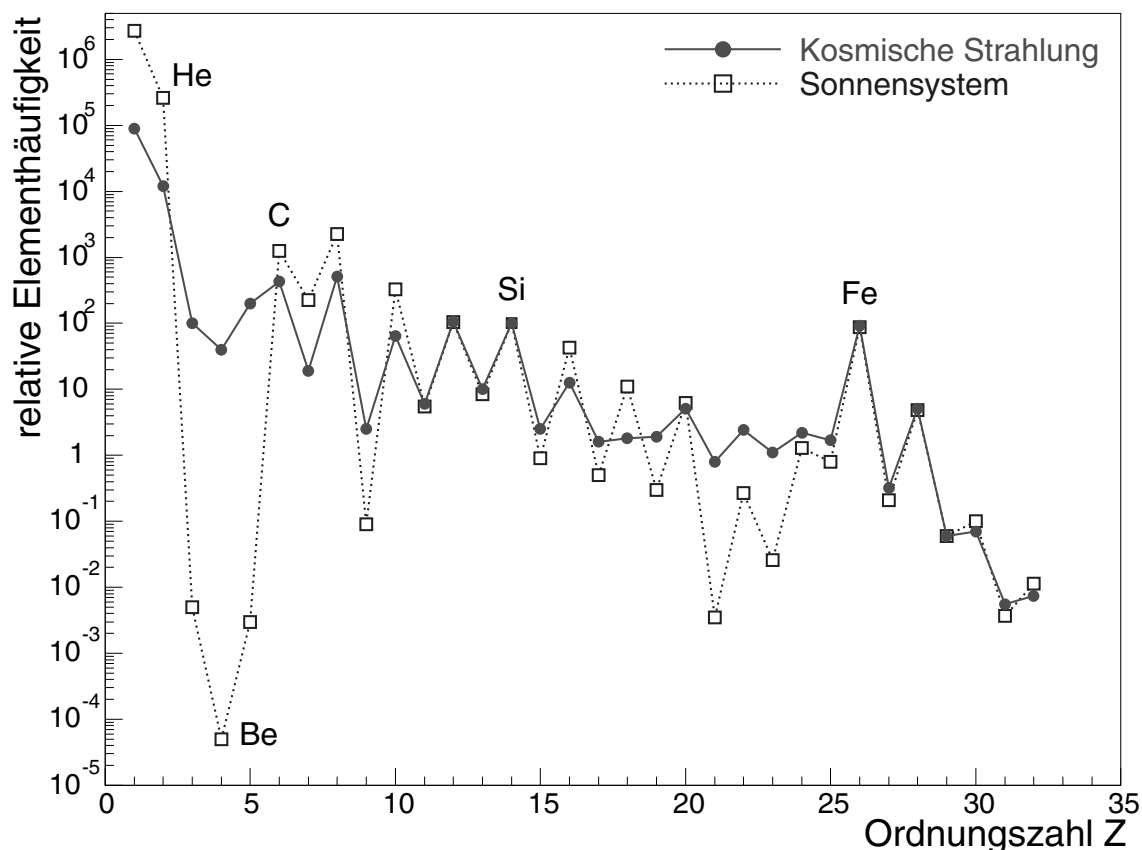


Abbildung 1.2: Elementzusammensetzung der kosmischen Strahlung im Vergleich zu der solaren Häufigkeit. Normiert auf Silizium = 100 [Lon81].

möglich, sondern nur noch eine grobe Einteilung in beispielsweise fünf Elementklassen. Diese können z.B. als H, He, CNO-Gruppe, mittelschwere Elemente und die Eisengruppe gewählt werden.

1.3 Herkunft und Transport

Trotz der Hinweise aus der chemischen Zusammensetzung bleiben viele Fragen offen in Bezug auf die Quellen, Beschleunigungs- und Transportmechanismen der kosmischen Strahlung. So gehen zum Beispiel durch die Ablenkung der geladenen Teilchen im interstellaren Magnetfeld wichtige Richtungsinformationen verloren und die kosmische Strahlung erreicht fast isotrop die Erde. Erst ab Energien oberhalb von 10^{18} eV erwartet man, dass die Ablenkung von der Flugbahn klein genug ist, um aus der Richtung auf mögliche Quellen zu schließen. Die Änderungen im Energiespektrum deuten außerdem darauf hin, dass es

unterschiedliche Quellen und Beschleunigungsmechanismen für die verschiedenen Energiebereiche gibt.

Quellen

Bei Teilchen bis zum Knie werden als Ursprung unter anderem Supernova-Explosionen und Pulsare (rotierende Neutronensterne) in unserer eigenen Galaxie betrachtet, da diese ausreichend Energie für deren Beschleunigung aufbringen können. So genügen bereits wenige Prozent der Leistung einer Supernova, um die Energiedichte der kosmischen Strahlung von 1 eV/cm^3 aufrecht zu erhalten, und auch Pulsare könnten durch ihr starkes elektrisches Feld zwischen Pol und Äquator Teilchen in den Bereich bis 10^{15} eV beschleunigen. Bei letzterem Prozess ist jedoch kein Potenzgesetz im Energiespektrum zu erwarten und es werden vor allem Supernovae-Überreste (SNR) als wichtigste Kandidaten für die galaktischen Quellen der kosmischen Strahlung angesehen. Insbesondere, da jüngste Untersuchungen des HESS-Experimentes ein von Völk und Berezhko vorhergesagtes Modell bestätigen konnten, wonach der Ausstoß der kosmischen Strahlung in SNR zu einem zunehmenden Magnetfeld führt, welches wiederum den Fluss der inversen Compton-Streuung und der Bremsstrahlung unterdrückt. Dadurch dominiert der Zerfall neutraler Pionen in Photonen, welcher gemessen werden konnte. Einen Überblick dazu gibt [Hor07].

Oberhalb von etwa 10^{17} eV können die genannten Prozesse den Ursprung der Teilchen nicht mehr erklären. Mögliche Quellen sind nun aktive galaktische Kerne (AGN) wie Quasare, Blasare oder Seyfert-Galaxien. Dabei handelt es sich um hochenergetische Galaxiekern, die Strahlung oder Teilchen entlang sogenannter Jets mit einer Geschwindigkeit nahe der Lichtgeschwindigkeit emittieren [Bie87, Rac93]. Daneben gibt es auch verschiedene theoretische Modelle, sogenannte "Top-Down-Szenarien", die neue Teilchen und Wechselwirkungen voraussetzen [Sig03]. Die genaue Herkunft der hochenergetischen kosmischen Strahlung ist immer noch unbekannt und die Antwort auf diese Frage ein zentrales Ziel in der Astroteilchenforschung.

Beschleunigung

Bei der Standardtheorie für die Beschleunigung der kosmischen Strahlung handelt es sich um eine diffuse Beschleunigung der Teilchen in starken Schockfronten, welche entstehen, wenn die ausgestoßene Materie, z.B. von Supernova-Explosionen, auf das interstellare Medium trifft. Bei dieser *Fermi-Beschleunigung 1. Ordnung* durchquert das Teilchen die Schockfront, wird reflektiert und gewinnt bei jedem Durchgang Energie [Bel78, Bla78]. Die insgesamt erreichbare Energie hängt ab von der Anzahl der Reflexionen, der relativen Geschwindigkeit v der Schockwelle und der Verweildauer in der Beschleunigungsregion und ist proportional zu $\beta = \frac{v}{c}$. Bei diesem Modell ergibt sich für das Energiespektrum das bereits bekannte Potenzgesetz $E^{-\gamma}$, jedoch mit einem abweichenden Index $\gamma \simeq 2$. Die Änderung auf den beobachteten Wert von $\gamma = 2.7$ kann durch Spallation und Ionisationsverluste während des Transports erklärt werden. Schockfronten bilden sich außer

bei Supernova-Explosionen zum Beispiel auch beim Auftreffen von Pulsarwinden auf die Atmosphäre eines stellaren Begleiters. Für hochenergetische Teilchen vermutet man als Beschleuniger vor allem die Schockwellen an den Enden der Jets von Quasaren (*Hot Spots*). Dabei sollen Teilchenenergien größer 10^{20} eV erreicht werden.

Daneben existiert die *Fermi-Beschleunigung 2. Ordnung*, die die Beschleunigung durch Reflexion an magnetischen Wolken beschreibt. Kandidaten hierfür sind Akkretionsscheiben von Doppelsternsystemen oder Polkappen von Pulsaren. Bei diesem Modell ist die Beschleunigung abhängig von β^2 und spielt damit wegen des geringeren Energiegewinns nur eine untergeordnete Rolle [Che86].

Propagation

Die Ausbreitung der kosmischen Strahlung wird stark von den galaktischen Magnetfeldern beeinflusst und führt zu einer diffusen Bewegung. Bei Teilchen bis 10^{17} eV ist der Gyroradius zu klein, um die Milchstrasse verlassen zu können und sie verbringen ihre Lebensdauer von etwa 10^7 Jahren in der Galaxis. Aus der Erkenntnis, dass die Teilchen in dieser Zeit ungefähr $5 - 10 \text{ g/cm}^2$ Materie durchqueren (siehe Kapitel 1.2) ergibt sich eine durchlaufene Teilchendichte von 0.3 Teilchen pro cm^3 . Die Dichte der Galaxis liegt jedoch bei einem Teilchen pro cm^3 , weshalb der Schluss nahe liegt, dass sich die kosmische Strahlung größtenteils im dünneren Halo aufhält. Die Diffusionsbewegung kann durch eine Transportgleichung beschrieben werden, für deren Lösung häufig vereinfachte Modelle, die die Ausbreitung der kosmischen Strahlung beschreiben, verwendet werden. Ein Beispiel ist das *Leaky-Box-Modell*, bei der man für die freie Bewegung eines Teilchens in einem festen Volumen (z.B. Galaxis) eine energieabhängige Wahrscheinlichkeit annimmt aus diesem Raum zu entkommen. Daneben gibt es noch das *Nested-Leaky-Box-Modell*, welches die Entkommwahrscheinlichkeit aus dem eigentlichen Quellgebiet und nicht aus der ganzen Galaxis beschreibt [Cow73, Ces80].

1.4 Ausgedehnte Luftschauer

Trifft ein Teilchen der kosmischen Strahlung (Primärteilchen) in der Erdatmosphäre auf den Kern eines Luftmoleküls, so entstehen durch die Wechselwirkung Sekundärteilchen, überwiegend Pionen und Kaonen. Diese produzieren ihrerseits durch hadronische und elektromagnetische Wechselwirkungen und Zerfall wieder neue Teilchen und es bildet sich ein ausgedehnter Luftschauer (EAS – extensive air shower) (Abbildung 1.3) [Aug39]. Die Zahl der Teilchen wächst in etwa logarithmisch mit der Energie. Wenn die Restenergie eines Sekundärteilchens eine Schwellenenergie (kritische Energie) unterschritten hat, dominiert die Absorption in der Atmosphäre und die Anzahl der Teilchen nimmt exponentiell mit der atmosphärischen Tiefe ab. Die entstandene Teilchenlawine breitet sich mit etwa der Lichtgeschwindigkeit aus und erreicht bei genügend großen Energien des Primärteilchens den Erdboden in Form einer gekrümmten Schauerscheibe. Die Dicke dieser Schauerfront

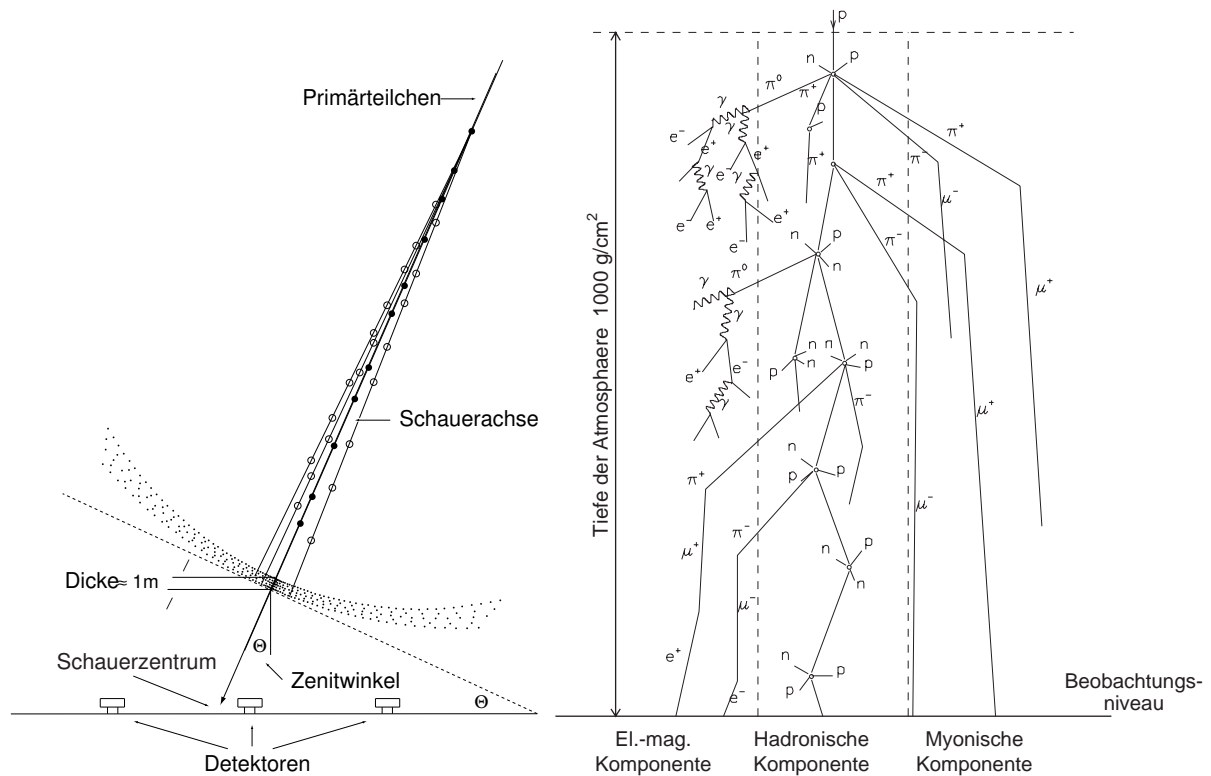


Abbildung 1.3: Schematische Darstellung eines ausgedehnten Luftschauers [All75]. *links:* Entwicklung des von einem Primärteilchen erzeugten Schauers. *rechts:* Darstellung der einzelnen Komponenten.

beträgt wenige Meter und hat eine laterale Ausdehnung von mehreren 10 bis 1000 Metern. Mit Hilfe von Detektorfeldern können die Sekundärteilchen am Boden nachgewiesen und Rückschlüsse auf Eigenschaften wie Energie, Massenzahl und Einfallsrichtung des Primärteilchen gezogen werden.

1.4.1 Teilchenkomponenten

Man teilt die Teilchen eines ausgedehnten Luftschauers – vorwiegend Elektronen, Positronen, Photonen, Myonen und Hadronen – in drei Komponenten ein: die elektromagnetische ($\approx 90\%$), die myonische ($\approx 5\%$) und hadronische Komponente ($\approx 1\%$) (Abbildung 1.3 rechts). Die ebenfalls produzierten Neutrinos werden dabei nicht berücksichtigt, da sie selber kaum wechselwirken und mit den gängigen Detektoren eines Luftschauerexperiments nicht nachweisbar sind.

Hadronische Komponente

Diese Komponente entsteht bei der ersten Reaktion des Primärteilchens und bildet die Grundlage der beiden anderen Komponenten. Die Hauptbestandteile sind Pionen, Kaonen, Protonen und Neutronen, die den Kern des Luftschauers bilden. Hochenergetische Hadronen konzentrieren sich dabei auf einen Bereich bis 30 Meter um die Schauerachse. Die hadronische Komponente bestimmt durch Fluktuationen in Ort und Anzahl der Wechselwirkungen wesentlich die weitere Schauerentwicklung.

Elektromagnetische Komponente

Die gebildeten neutralen Pionen zerfallen bereits nach kurzer Zeit und erzeugen mit Elektronen, Positronen und Photonen die Teilchen der elektromagnetischen Komponente:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

$$\pi^0 \rightarrow e^+ + e^- + \gamma$$

Diese wandeln sich wiederum durch Paarbildung und Bremsstrahlung ineinander um und vervielfältigen sich:

$$\gamma + \text{Kern} \rightarrow e^+ + e^- + \text{Kern}$$

$$e^\pm + \text{Kern} \rightarrow e^\pm + \gamma + \text{Kern}$$

Durch die niedrige kritische Energie $E_{krit} \simeq 84$ MeV und die geringe Strahlungslänge $X_0 \simeq 37$ g/cm² wächst die Zahl der Teilchen sehr schnell an und die gebildete elektromagnetische Kaskade ist bereits nach kurzer Zeit der Hauptbestandteil des Schauers. Erst wenn die Energie der Elektronen unter den kritischen Wert fällt, überwiegen die Ionisationsverluste und der Teilschauer stirbt aus. Die Elektronen sind wiederum Ausgangspunkt weiterer Phänomene. Unter anderem emittieren die von ihnen angeregten Luftmoleküle Fluoreszenzlicht, welches mittels Teleskopen nachgewiesen wird, und des Weiteren erzeugen sie eine elektromagnetische Strahlung im Radiofrequenzbereich.

Myonische Komponente

Die myonische Komponente entsteht überwiegend durch den Zerfall geladener Pionen aufgrund der schwachen Wechselwirkung:

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu)$$

Der Beitrag der Kaonen zur Myonproduktion ist nur sehr gering. Durch ihren kleinen Wirkungsquerschnitt werden die Myonen kaum gestreut und behalten ihre Flugrichtung fast unverändert bei¹. Die lange Lebensdauer aufgrund der relativistischen Zeitdilatation sorgt dafür, dass ein Großteil der Myonen den Erdboden erreicht und Rückschlüsse auf ihren Entstehungsort (siehe Abschnitt 2.1.2) möglich sind. Nur wenige Myonen zerfallen in Elektronen, Positronen oder Neutrinos und tragen in geringem Maße zur elektromagnetischen Komponente bei.

1.4.2 Radioemission

Seit den 60er Jahren ist bekannt, dass in Teilchenschauern auch Radiopulse entstehen. Vorhergesagt wurde dies 1962 von Askaryan und in den darauffolgenden Jahren von Jelley et al. experimentell bestätigt [Ask62, Ask65, Jel65].

Zu Beginn nahm man an, dass der Cherenkov-Effekt diesen Prozess hauptsächlich dominiert. Dabei emittieren Teilchen, die sich mit einer Geschwindigkeit größer als der Lichtgeschwindigkeit im betreffenden Medium fortbewegen, **Cherenkov-Strahlung**. Bei Luftschauern sind diese Teilchen durch den negativen Ladungsüberschuss überwiegend Elektronen. Der Cherenkov-Effekt spielt vor allem in dichten Medien wie Wasser, Eis und Salz eine große Rolle, kann jedoch bei Luftschauern wegen des geringen Brechungsindex der Luft² nicht den Hauptbeitrag zur Radioemission leisten.

Eine Vielzahl an Untersuchungen und Theorien, die auf die ersten Ergebnisse folgten, ermöglichte es H.R. Allan im Jahr 1971 die bisherigen Ergebnisse der Radiomessungen in einer Formel zusammenzufassen und damit erstmals den Zusammenhang der zu erwartenden Feldstärke ϵ von den Luftschauerparametern zu beschreiben [All71]:

$$\epsilon = 20 \cdot \left(\frac{E_p}{10^{17} \text{eV}} \right) \cdot \sin \alpha \cdot \cos \theta \cdot \exp \left(-\frac{R_{sa}}{R_0(\nu, \theta)} \right). \quad (1.1)$$

Die Gleichung beinhaltet sowohl eine Abhängigkeit von der Energie E_p des Primärteilchens, als auch von dem Abstand R_{sa} zwischen den Antennen und der Schauerachse. Der Skalenfaktor R_0 beträgt 110 m bei 55 MHz und $\theta < 35^\circ$ und nimmt für ansteigende Zenitwinkel θ und kleinere Frequenzen zu. Er ist eine charakteristische Größe für die Beschreibung der Radioemission und kann mit der Größe des "Abdruckes" am Erdboden assoziiert werden. Des Weiteren wurde ein Zusammenhang zwischen der Radioemission und dem Winkel α zwischen der Einfallsrichtung und dem Erdmagnetfeld (geomagnetischer Winkel) erkannt und dieser geomagnetische Effekt als Hauptursache angesehen. Neuen Theorien zufolge werden dabei die im Luftschauer erzeugten Elektron-Positron-Paare im Magnetfeld durch die Lorentzkraft in entgegengesetzter Richtung auf Kreisbahnen gelenkt und emittieren dabei senkrecht zu ihrer Ablenkrichtung eine stark gebündelte elektromagnetische

¹Viefachstreuung und Bremsstrahlung sind im Vergleich zu Elektronen um den Faktor $(m_\mu/m_e)^2 \simeq 43000$ unterdrückt

² $n_{Luft} = 1,00029$

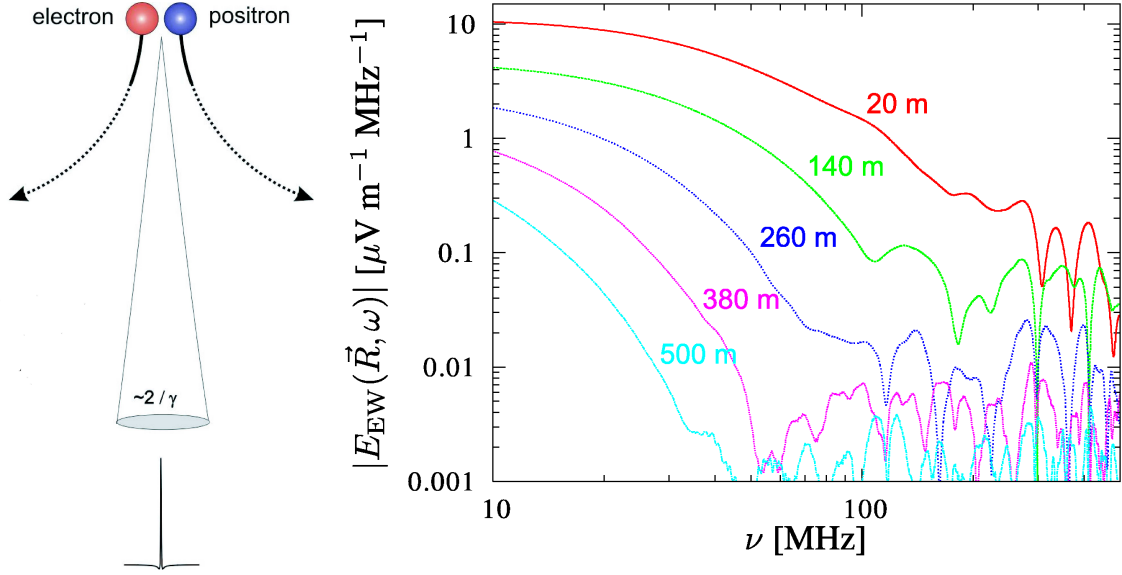


Abbildung 1.4: *links*: Emissionsmechanismus der Radiostrahlung (Geosynchrotron Effekt). *rechts*: Erwartetes Frequenzspektrum eines 10^{17} eV -Schauers für verschiedene Entfernungen zum Schauerzentrum [Hue05].

Strahlung, die **Geosynchrotron-Strahlung** (Abbildung 1.4), welche abhängig ist vom geomagnetischen Winkel α [Fal03, Hue03]. In Deutschland beträgt der Neigungswinkel des Magnetfeldes zur Horizontalen (Inklination) ungefähr 65° [ngdc06]. Die Radiosignale überlagern sich konstruktiv und durch die geringe Dicke der Schauerscheibe erreicht uns die elektromagnetische Welle als kohärenter Radiopuls. Dieser kann auf dem Erdboden bis Frequenzen von etwa 100 MHz nachgewiesen werden. In jüngster Zeit wurden ausführliche Simulationen und Modellbeschreibungen durchgeführt, die auf analytischen Modellen zur Radioemission durch Geosynchrotron-Strahlung basieren [Hue04, Hue05]. Dabei hat sich aufgrund dieser Modellvorhersagen folgende Parametrisierung ergeben [Hue05]:

$$\begin{aligned}
 \left| \vec{E}(\theta, \ell, \nu, E_p, X_{max}) \right| &\simeq E_\theta \left(\frac{E_p}{10^{17} \text{eV}} \right)^{0.96} \cdot \exp \left(-\frac{200 \text{ m} (\alpha(X_{max}) - 1) + R_{sa}}{\alpha(X_{max}) \ell_\theta} \right) \\
 &\cdot \exp \left(-\frac{\nu/\text{MHz} - 10}{47,96 \cdot \exp(-R_{sa}/b_\theta)} \right) \quad (1.2)
 \end{aligned}$$

mit $\alpha(X_{max}) = 1.00636 \cdot \left(\frac{X_{max}}{631 \text{g cm}^{-2}} \right)^{-1.50519}$, der Tiefe des Schauermaximums X_{max} in g/cm^2 und den Parametern E_θ , ℓ_θ und b_θ , die abhängig vom Zenitwinkel θ verschiedene Werte annehmen (siehe [Hue05]).

Im Vergleich mit der Formel von Allan hat sich der annähernd lineare Zusammenhang mit der Primärenergie ebenso bestätigt wie der exponentielle Abfall mit zunehmender Entfernung R_{sa} . Der Skalenfaktor ist abhängig von der Entfernung der Antennen zur Quelle der Radioemission, welche in erster Näherung mit dem Ort des Schauermaximums assoziiert werden kann. Er variiert für einen konstanten Wert X_{max} zwischen 130 m und 870 m für zunehmende Zenitwinkel. Durch die fast lineare Abhängigkeit von der Energie des Primärteilchens folgt des Weiteren eine quadratische Abhängigkeit der abgestrahlten Leistung von der Energie und die Kohärenz der Radioemission. Insbesondere für die Untersuchung der höchstenergetischen Teilchen der kosmischer Strahlung ist die Detektion der Radiopulse eine geeignete Messtechnik. Allerdings ist in den Simulationen keine einfache Abhängigkeit der Feldstärke vom geomagnetischen Winkel α erkennbar. Das Ergebnis der Allan-Formel zeigt dagegen eine offensichtliche Abhängigkeit von $\sin(\alpha)$.

Auf Grundlage der Analysen mit LOPES10-Daten wurde eine weitere Parametrisierung für die Ost/West-Polarisation durchgeführt [Hor06]:

$$\epsilon_{est} \simeq (1 + (0.1 \pm 0.02) - \cos \alpha) \cdot \cos \theta \cdot \exp\left(-\frac{R_{sa}}{(200 \pm 70)\text{m}}\right) \left(\frac{E_p}{10^{17}\text{eV}}\right)^{0.94 \pm 0.06} \quad (1.3)$$

(α : geom. Winkel, θ : Zenitwinkel, R_{sa} : Abstand zur Schauerachse, E_p : Primärenergie). Dabei wird ein Zusammenhang der Feldstärke mit $1 - \cos(\alpha)$ gesehen. Die zuvor gezeigten Abhängigkeiten von der Energie und dem Abstand bestätigen sich.

Durch die Korrelationen des Radiopulses mit Schauerparametern ist die Möglichkeit gegeben, mit der Messung und Analyse der Radiokomponente zusätzliche Informationen bezüglich der kosmischen Strahlung zu erhalten. Dies erwies sich in den 60er und 70er Jahren durch die damalige Analogtechnik jedoch als sehr schwierig, da zum Beispiel die Bandbreite begrenzt und ein Filtern von allen Störfaktoren nicht möglich war. Die Experimente wurden schließlich eingestellt, weil der Nachweis von Luftschauern mit Teilchendetektoren wesentlich vielversprechender und einfacher war. Erst die heutige Digitaltechnik ermöglichte ein Wiederaufgreifen dieser Messtechnik, da zum Beispiel die Unterdrückung von Störsignalen durch digitales Filtern und damit die Messung in dicht besiedelten Gebieten möglich wurde. In den letzten Jahren wurden mehrere Experimente gestartet, darunter das LOPES-Experiment in Karlsruhe, dessen Antennen zusätzlich zu den bestehenden Teilchendetektoren des KASCADE-Grande-Experimentes Luftschauer detektieren, sowie das CODALEMA-Experiment in Nancay, Frankreich [Ard05].

14KAPITEL 1. KOSMISCHE STRAHLUNG UND AUSGEDEHNTTE LUFTSCHAUER

Kapitel 2

Luftschauerexperimente

Auf dem Gelände des Forschungszentrum Karlsruhe befindet sich das Luftschauerexperiment KASCADE¹-Grande, eine Erweiterung des seit Mitte der Neunziger Jahren bestehenden KASCADE-Experimentes, sowie das Antennenfeld von LOPES. Entwicklung und Aufbau dieser beiden Experimente werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

2.1 KASCADE-Grande

Das KASCADE-Grande Experiment (Abbildung 2.1 links) weist mit seinen Teilchendetektoren Luftschauer im Energiebereich von 10^{14} eV bis 10^{18} eV nach und legt einen Schwerpunkt auf die Untersuchung des ersten und zweiten Knie im Energiespektrum sowie der chemischen Zusammensetzung der kosmischen Strahlung in diesem Bereich. Um möglichst viele Schauerparameter unabhängig voneinander zu vermessen, besteht KASCADE-Grande aus verschiedenen Detektorsystemen. Neben den ursprünglichen Komponenten Detektorfeld, Zentraldetektor und Myonspurdetektor [Ant03] kommen seit einer Erweiterung im Jahr 2003 die Stationen des Grande-Arrays hinzu.

2.1.1 Das Detektorfeld

Da die elektromagnetische und myonische Komponente ausgedehnter Luftschauer je nach Primärenergie eine laterale Ausdehnung von bis zu mehreren hundert Metern besitzt, sind für deren Nachweis großflächige Detektorfelder notwendig. Das seit 1996 bestehende KASCADE-Feld bedeckt eine Grundfläche von $200 \times 200 \text{ m}^2$ und ist in der Lage, Schauer bis 10^{17} eV zu messen. Dafür wurden 252 Detektorstationen gleichmäßig in einem Abstand von jeweils 13 Metern zueinander auf dem Feld verteilt und in 16 Einheiten (Cluster) zusammengefasst (Abbildung 2.1 rechts). In den äußeren zwölf Clustern befinden sich jeweils

¹KASCADE: **K**Arlsruhe **S**hower **C**ore and **A**rray **D**etector

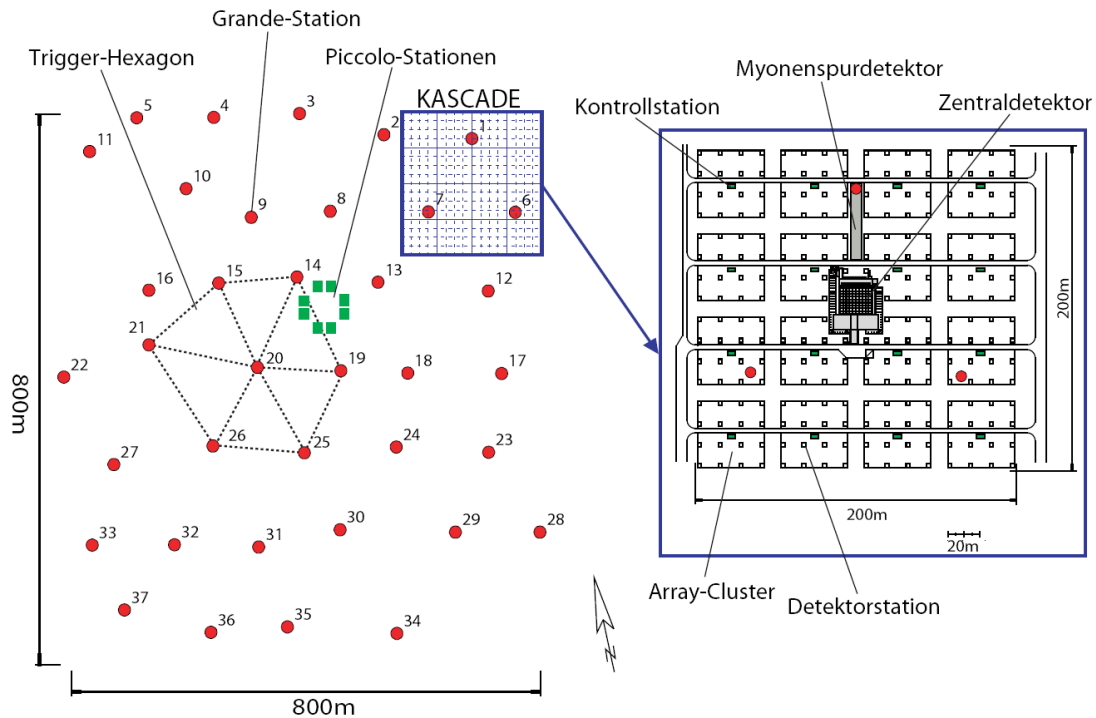


Abbildung 2.1: *links*: Layout von KASCADE-Grande. *rechts*: Vergrößerte Darstellung des Detektorfeldes mit Myonenspurdetektor und Zentraldetektorgebäude.

16 Stationen, in den inneren vier dagegen nur 15, da dort das Zentraldetektorgebäude steht. Die Stationen sind mit unterschiedlichen Detektorsystemen ausgestattet. In den Stationen der äußeren Cluster befinden sich jeweils zwei e/γ -Detektoren und ein Myondetektor, in den inneren nur vier e/γ -Detektoren.

Abbildung 2.2 (links) stellt eine der äußeren Hütten im Querschnitt dar. Die kegelförmigen e/γ -Detektoren mit einer Fläche von je 0.79 m^2 bestehen aus einem innen mit Reflektorfarbe bestrichenen Edelstahlbehälter, der knapp 5 cm mit einem Flüssigszintillator gefüllt ist. An der Spitze des Kegels registriert ein Photomultiplier das im Szintillator erzeugte Licht. Zum Schutz des Szintillators vor Oxidation ist das Kegelvolumen mit Argon gefüllt. Unter diesen Detektoren befindet sich eine Abschirmung aus 10 cm Blei und 4 cm Eisen. Dies entspricht etwa 20 elektromagnetischen Strahlungslängen und dient der Absorption der e/γ -Komponente. Myonen ab 230 MeV können diese Schicht jedoch durchdringen und im darunter befindlichen Myondetektor nachgewiesen werden. Bei diesem handelt es sich um vier $90 \times 90 \text{ cm}^2$ große und 3 cm dicke Plastikszintillatoren, an deren Kanten Wellenlängenschieber sitzen, die das Licht zu den vier Photomultiplier lenken (Abbildung 2.2 rechts).

Die Daten von jedem Detektor werden innerhalb des Cluster in der Kontrollstation gesammelt. Jedes Cluster arbeitet dabei unabhängig von den anderen. Wird in einem Cluster eine bestimmte Anzahl von Detektoren getroffen, sendet dieser ein Signal an die zentrale

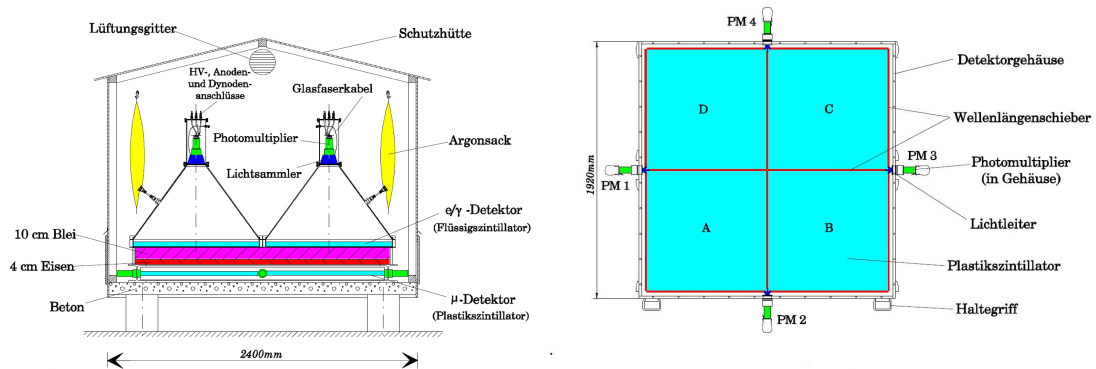


Abbildung 2.2: *links*: Vertikaler Schnitt durch eine der äußeren Detektorstationen. *rechts*: Aufsicht auf einen Myondetektor.

Datenerfassung und die Auslese aller anderen Komponenten wird veranlasst [Sch96]. Die Anzahl der durch die Photomultiplier detektierten Elektronen und Myonen erlaubt Rückschlüsse auf das Zentrum des Schauers, sowie die Gesamtzahl dieser Teilchen und damit die Energie des Primärteilchens. Für die Myonenzahl N_μ wird die rekonstruierte Anzahl der Myonen in einem Ring von 40-200 m um das Schauerzentrum verwendet, da diese im Vergleich zur Gesamtzahl kleinere systematische Fehler aufweist. Des Weiteren ist durch die unterschiedliche Ankunftszeit der Schauerfront an den Stationen die Rekonstruktion der Einfallsrichtung mit der Bestimmung von Zenit- und Azimutwinkel (θ, ϕ) möglich.

2.1.2 Weitere Komponenten

Der Zentraldetektor

Der Zentraldetektor in der Mitte des KASCADE-Arrays beinhaltet mehrere Detektorsysteme zum Nachweis aller drei Schauerkomponenten. Kernstück ist das Hadronkalorimeter, welches aus acht Lagen Flüssigionsisationskammern besteht, die durch Eisen- und Betonabsorber voneinander getrennt sind, und Hadronen oberhalb einer Energieschwelle von 50 GeV nachweist [Eng99]. Darüber befindet sich die ebenfalls aus Flüssigionsisationskammern bestehende Toplage zur Messung kleiner Luftschauber sowie das Topcluster aus 50 Plastikszintillatoren, welche die im Detektorfeld entstandene Lücke der e/γ -Detektoren schließen. Zwischen der zweiten und dritten Lage des Kalorimeters befindet sich die Triggerebene aus Plastikszintillatoren, welche einen schnellen Trigger für den Zentraldetektor liefert. Unterhalb des Kalorimeters befinden sich die Vieldraht-Proportionalkammern und Limited Streamer Tubes für die Detektion und Richtungsbestimmung einzelner Myonen mit Energien größer 2.4 GeV [Boz01].

Der Myonspurdetektor

Nördlich des Zentraldetektors befindet sich in einem fast 50 m langen unterirdischer Tunnel der Myonspurdetektor zur genauen Richtungsbestimmung hochenergetischer Myonen ab einer Energieschwelle von 0.8 GeV [Dol02]. Drei Lagen Limited Streamer Tubes ergeben eine Detektorfläche von insgesamt 128 m^2 und ermöglichen eine Winkelauflösung der Einfallrichtung von etwa 0.4 und die Rekonstruktion der Myonproduktionshöhe [But04].

2.1.3 Das Grande-Array

Um auch Schauer im Energiebereich des zweiten Knie (bis 10^{18} eV) nachzuweisen, wurde das KASCADE-Experiment zu KASCADE-Grande erweitert [Nav04]. Dazu wurden 37 Detektorstationen auf einer Fläche von $0,5\text{ km}^2$ in einem hexagonalen Gitter angeordnet. Der Abstand zwischen einzelnen Detektorstationen hat sich im Mittel auf 130m vergrößert. Jede Station besteht aus Szintillatorplatten mit einer Gesamtfläche von 10 m^2 zum Nachweis der elektromagnetischen und myonischen Komponenten (siehe Abschnitt 1.4.1) des Luftschauers. In der Mitte des Grande-Feldes befindet sich die zentrale Datenerfassung sowie das Piccolo-Feld, welches einen schnellen Trigger für KASCADE und Grande ermöglicht.

Durch die Erweiterung des KASCADE-Experimentes zu KASCADE-Grande hat sich nun auch die Möglichkeit ergeben, die Erfahrungen und Kenntnisse auf neue Messtechniken anzuwenden. Insbesondere bei dem noch relativ jungen Forschungsbereich zur Messung der Radiokomponente eines Luftschauers ist es hilfreich, Vergleiche mit bekannten Ergebnissen im Bereich um 10^{17} eV durchführen zu können.

2.2 LOPES

Nachdem einige Jahrzehnte die Erforschung der Radioemission in Luftschauern ins Stocken geriet, griffen Falcke und Gorham dieses Thema 2003 wieder auf [Fal03]. Sie stellten die These auf, dass eine Messung des Radiosignals mit modernen Radioteleskopen möglich sein sollte und wollten dies mit dem im Aufbau befindlichen LOFAR-Experiment (**L**ow **F**requency **A**rray) (Abschnitt 2.2.1) in den Niederlanden anwenden.

Um die empfangenen Signale richtig zu verstehen, ist es zu Beginn der Forschung unerlässlich, einen Bezug zu einem bestehenden Teilchendetektorfeld zu haben, um bereits wichtige Schauerparameter wie zum Beispiel die Anzahl der Myonen und den Einfallswinkel zu kennen. Dadurch ist es möglich, die Korrelation zwischen Radiopuls und diesen Schauergrößen zu untersuchen und außerdem durch Selektionen die Datenmenge einzuschränken. Aus diesen Gründen wurde eine Teststation, das LOPES-Experiment (**L**OFAR **P**rototype **S**tation), auf dem KASCADE-Feld im Forschungszentrum Karlsruhe installiert. Dieses bestand zunächst aus 10 Antennen (**L**OPES**10**) und wurde im Jahr 2005

auf 30 Antennen erweitert (**LOPES30**). Im gleichen Jahr gelang mit LOPES10-Daten der Nachweis, dass die Messung der Radioemission möglich ist und Korrelationen mit Schauerparametern vorhanden sind [Fal05]. Seit einigen Monaten werden mit den Antennen des **LOPES^{STAR}**-Experiments (**S**elf **T**rigger **A**rray of **R**adiodetectors) auch selbstgetriggerte Daten gemessen [Gem06]. Da sich die vorliegende Arbeit mit der Analyse der LOPES30-Daten beschäftigt, wird in Abschnitt 2.2.2 und 2.2.3 nur dieser Bereich beschrieben und kurz LOPES genannt.

2.2.1 LOFAR

Das LOFAR-Experiment [Rot03] zur Messung der Radioemission im Niederfrequenzbereich von 30 bis 240 MHz wird in den Niederlanden errichtet und soll nach dem Aufbau aus 77 Antennenfeldern (Stationen) bestehen, die sich spiralförmig auf einer Fläche mit einem Durchmesser von 350 km verteilen (Abbildung 2.3).

Jede Station besteht aus 200 invertierten V-Dipolantennen (siehe Abschnitt 2.2.2), 100 für den Frequenzbereich 30 - 80 MHz, sowie 100 für den Bereich 110 - 240 MHz. Die Gruppierung des Experimentes in einzelne Antennenfelder ist sinnvoll, um die enorme Datenmenge zu reduzieren. LOFAR ist das erste digitale Radiointerferometer und benutzt anstelle der bisher üblichen Antennen mit starker Richtcharakteristik solche mit kugelförmiger Richtcharakteristik (omnidirektional).

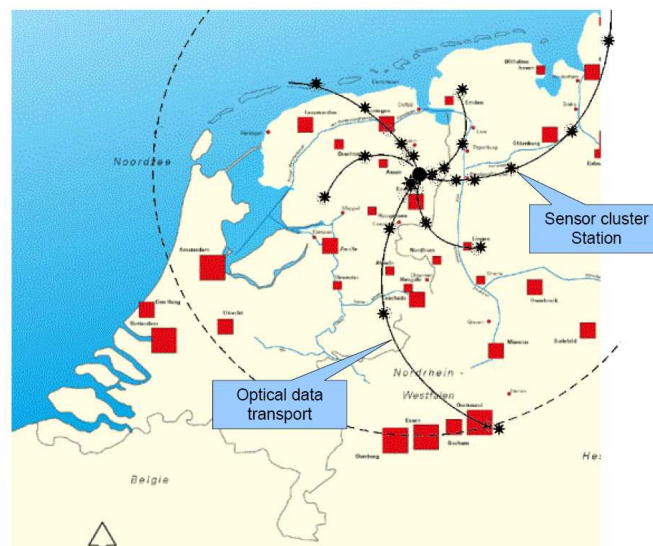


Abbildung 2.3: Das LOFAR-Experiment in den Niederlanden. Die einzelnen Stationen werden durch die Sterne entlang der Spiralarms symbolisiert, die Quadrate stellen Städte dar [Rot03].

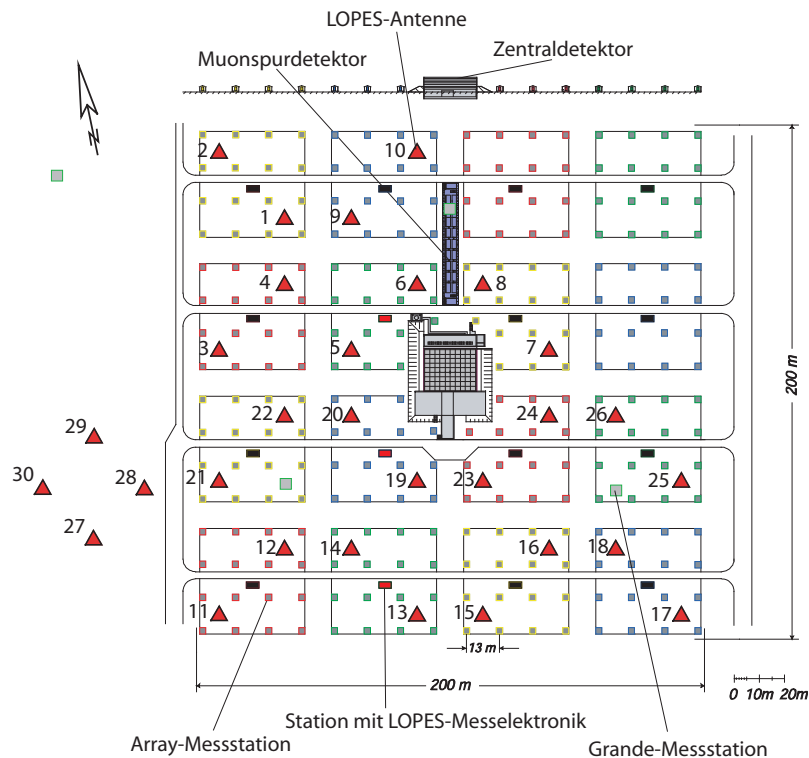


Abbildung 2.4: Darstellung des KASCADE-Detektorfeldes mit den Positionen der 30 LOPES-Antennen, symbolisiert durch Dreiecke.

2.2.2 LOPES30 – Aufbau und Elektronik

LOPES besteht aus 30 Antennen für den Frequenzbereich 40 - 80 MHz, die sich wie in Abbildung 2.4 gezeigt auf dem KASCADE-Feld verteilen und eine maximale Entfernung von 270 Metern haben. Vier der Antennen wurden außerhalb des Detektorfeldes installiert, da die e/γ -Detektoren eine elektromagnetische Störstrahlung emittieren, welche die Radiomessung beeinflusst. Möglichkeiten zur Reduktion dieser Störung wurden von [Deu06] erarbeitet. Das Frequenzband wurde mit 40 - 80 MHz so gewählt, dass die Stärke des Radiopulses größer ist als die kosmische Hintergrundstrahlung und die Einflüsse von anderen Radiosignalen (Radio Frequency Interference RFI) möglichst gering sind. Insbesondere liegen keine Radiosender in diesem Bereich², sondern lediglich ein TV-Sender bei 62.25 MHz, dessen Signal für Kalibrationszwecke genutzt und anschließend mittels digitaler Filterung unterdrückt werden kann. Unter RFI versteht man alle störenden Signale, die zwar detektiert werden, aber unerwünscht sind. Dazu gehören, vor allem in dicht besiedelten Gegenden, auch Auswirkungen z.B durch die umgebene Elektronik oder das Anlassen eines Motors.

²Kurzwellenband (3 - 30 MHz), UKW (87.5 - 108.0 MHz)

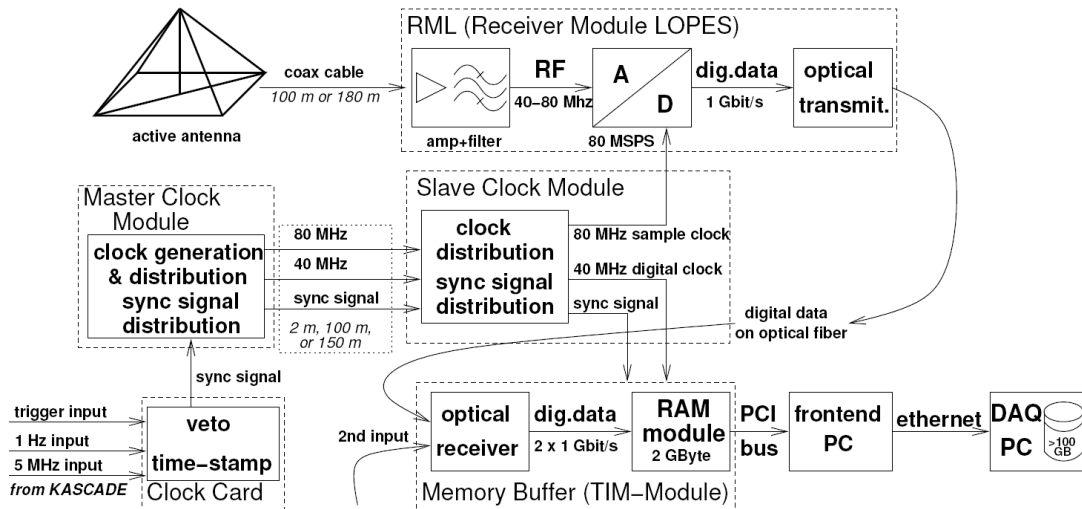


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung der Messelektronik.

Die Signalkabel von jeweils 10 Antennen laufen in einer Kontrollstation von KASCADE zusammen, die auch die Elektronik für LOPES sowie 3 PCs für die Datenverarbeitung enthält. Abbildung 2.5 zeigt schematisch die Elektronik. Die einzelnen Elemente sind als Prototyp für LOFAR konzipiert und werden im Folgenden beschrieben [Hor06].

Antenne Die verwendeten Antennen sind invertierte V-Dipolantennen und die Dipolarme bestehen aus 2 Kupferkabeln von 1 m Länge. Diese befinden sich in den gegenüberliegenden Armen einer Pyramidenkonstruktion aus 4 PVC Röhren und sind in Ost/West-Richtung polarisiert. (Abbildung 2.6 links). Bei invertierten V-Dipolantennen handelt es sich um einfache Dipole, bei denen die Arme geknickt sind und einen Winkel α einschließen (Abbildung 2.6 rechts). Dadurch ist im Vergleich zum gestreckten Dipol eine bessere Sensitivität zu den Seiten hin erreichbar. In der Regel beträgt die Länge eines Dipols $\frac{\lambda}{4}$, $\frac{\lambda}{2}$ oder λ . Bei LOPES beträgt der Winkel $\alpha = 87.2$ und für 75 MHz handelt es sich um einen $\frac{\lambda}{4}$ -Dipol.

Receiver-Modul-LOPES Nachdem ein Vorverstärker direkt an den Antennen das Radiosignal verstärkt hat, erreicht dieses nach 100 bzw. 180 m Kabellänge das Receiver-Modul-LOPES (RML). Dort wird das Signal erneut verstärkt und durchläuft einen Bandfilter von 40 MHz bis 80 MHz. Dieser unterdrückt alle Frequenzen ober- und unterhalb der Bandbreite. Anschließend wird das Signal mit einem Analog-Digital-Wandler (ADC) digitalisiert. Dabei ist entscheidend, dass die Abtastfrequenz von 80 MHz zentral von einem Master-Clock-Module an alle ADCs verteilt wird. Nach dem 2. Nyquist Theorem bleiben nur dann alle Dateninformationen erhalten, wenn das bandbegrenzte Signal mindestens mit der doppelten Bandbreite abgetastet wird.

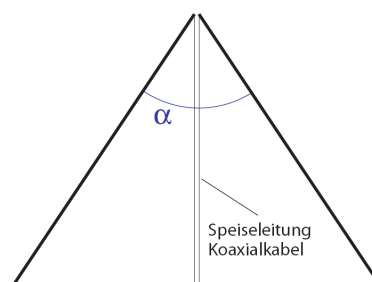


Abbildung 2.6: *links*: Fotografie der LOPES-Antennen zwischen den KASCADE-Hütten. *rechts*: invertierte V-Dipol-Antenne.

Durch diese Unterabtastung im Zeitbereich wird die Datenmenge, verglichen mit normaler Abtastung von hier 160 MHz, um einen Faktor zwei verringert. Um die Daten danach mit Glasfasern weiterleiten zu können, wird mit einem optischen Transmitter das elektrische Signal in ein Optisches umgewandelt.

Memory Buffer (Twin Input Module) Die Memory Buffer-Karte dient dem Zwischenspeichern der inzwischen wieder digitalisierten Daten von zwei RMLs und hat eine Kapazität von 2 GB. Bei gleichzeitigem Einlesen beider Eingänge ist das Speichern von 6.25 sec Daten möglich. Diese Module sind mit einem Standard PCI-Anschluss mit dem Front-end-PC verbunden.

Front-end - PC Dieser Computer verwaltet die Memory Buffer und leitet die Daten an den DAQ-PC weiter.

DAQ-PC Die Daten von allen Front-end-PCs werden hier gesammelt und zu einem Ereignis mit einem Zeitstempel kombiniert. Für 30 Antennen liegt die Größe eines Ereignisses bei etwa 4 MByte. Gespeichert werden je 0.4 ms vor und nach dem Triggersignal.

Clock-Boards Die Clock-Card empfängt von KASCADE-Grande ein Triggersignal und gibt dieses an das Master-Clock-Module weiter. Dort wird der Takt für die ADCs generiert und an die Slave-Clock-Module übergeben, welche für die Verteilung der Signale an RML zuständig sind.

Da LOPES in mehreren Schritten aufgebaut wurde, unterscheidet sich die Hardware der ersten zehn Antennen leicht von den letzten Zwanzig. Dies ist bei einer Einteilung des Antennenfeldes in Untergruppen, wie sie in Kapitel 5 durchgeführt wurde, zu beachten. Um

diesen Einfluss zu korrigieren und zu wissen, wie der gesamte Messaufbau das eingehende Radiosignal verändert, ist eine absolute Kalibration des Experimentes nötig [Hak06]. Die gewonnenen Ergebnisse der regelmäßig durchgeführten Kalibration werden in der Analyse-Software bereitgestellt. Des Weiteren können geringfügige zeitliche Verschiebungen anhand des feststehenden TV-Senders korrigiert werden.

2.2.3 LOPES30 – Analysesoftware

Für die Analyse und Darstellung der LOPES-Daten wurde eine neue Software entwickelt, basierend auf dem in der Astronomie verwendeten Softwarepaket AIPS++ [Bah06, Hor06]. Die digitale Bearbeitung ist notwendig, da in den Rohdaten ein Radiopuls noch nicht zu erkennen ist.

Zu Beginn werden die LOPES-Daten mit den dazugehörigen rekonstruierten KASCADE-Ereignissen korreliert. Schauerparameter wie Einfallswinkel, Position des Schauerzentrums und Anzahl der Elektronen bzw. Myonen werden als Grundlage für weitere Schritte wie die Vorselektion von interessanten und großen Ereignissen verwendet. Um möglichst viele Ereignisse bearbeiten zu können, wurde eine automatische Analyseketten (Pipeline) geschaffen. Da jedoch die Analysezeit pro Ereignis bis zu 30 Minuten beträgt, werden nur vorab ausgewählte Daten bearbeitet. Diese Zeit kann durch manuelle Einstellungen, wie z.B. das Streichen einzelner Antennen (*“flaggen”*) verkürzt werden.

Um schmalbandige Störsignale zu unterdrücken, wird nach einer ersten Selektion mittels der schnellen Fouriertransformation (FFT) in den Frequenzraum transformiert. Dort verteilt sich ein zeitlich kurzer Radiopuls (10 - 100 ns) über alle Frequenzen, während das Störsignal (RFI)- beispielsweise der Fernsehsender bei 62.25 MHz - auf einen Frequenzbereich konzentriert ist. Durch das Unterdrücken dieser Störfrequenz kann der Untergrund reduziert werden, ohne das Nutzsignal nennenswert zu beeinträchtigen. Dafür wird an jeder Stelle der Mittelwert des Amplitudenspektrums ermittelt und jeder Punkt mit Abweichungen von mehr als 3σ von dieser Anpassfunktion auf den Referenzwert gesetzt. Dieser Prozess wird insgesamt zweimal durchgeführt, um Einflüsse des Störsignals auf die Anpassung zu reduzieren.

Falls einzelne Antennen ein sehr abweichendes Signal zu den anderen zeigen, werden diese automatisch geflaggt und bei der folgenden Berechnung nicht verwendet. Gründe für eine Abweichung können ein ungewöhnlich hohes Rauschen oder eine Position in der Nähe des Myontunnels sein, wenn dieser vom Schauerkern getroffen wird.

Anschließend wird das sogenannte Beamforming durchgeführt. Mit der von KASCADE gemessenen Einfallsrichtung und dem Schauerzentrum können die Daten der einzelnen Antennen zeitlich so verschoben werden, dass die unterschiedlichen Laufzeiten von der Quelle zu den Antennen ausgeglichen werden und ein kohärenter Radiopuls zu erkennen ist (Abbildung 2.7 *links* u. *Mitte*). Aus diesen Daten wird dann der sogenannte cross-correlation-Beam oder CC-Beam berechnet, um einen Wert für die Größe des Radiosignals zu erhalten. Dabei werden die Feldstärken s_i, s_j von einem Antennenpaar (i,j) multipliziert und über die Anzahl N_{pairs} der Paare summiert. Anschließend wird die Wurzel des Betrags

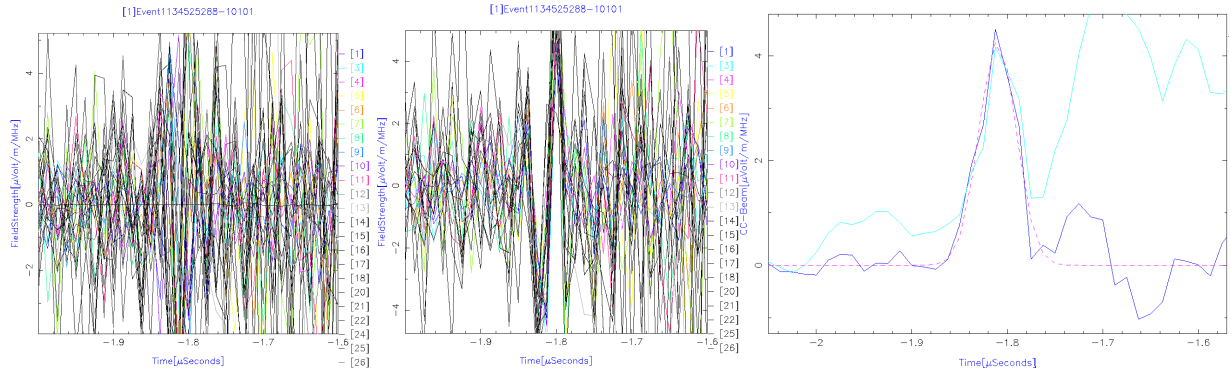


Abbildung 2.7: *links*: Überlagerte Rohdaten der LOPES-Antennen. *Mitte*: Korrigierte Daten nach dem Beamforming. Durch die zeitliche Verschiebung der einzelnen Signale ist nun der kohärente Radiopuls erkennbar. *rechts*: Der resultierende CC-Beam mit angepasster Gaußkurve (rot).

vom Mittelwert gebildet, wobei das Ergebnis dasselbe Vorzeichen hat wie die Summe unter der Wurzel

$$cc(t) = \pm \sqrt{\left| \frac{1}{N_{pairs}} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j>i}^N s_i(t) s_j(t) \right|}.$$

Der CC-Beam liefert für den Radiopuls immer ein positives Vorzeichen, während bei inkohärenten Pulsen das Vorzeichen auch negativ sein kann. Um von der Elektronik verursachte Strukturen im Puls zu entfernen, werden die Daten geglättet. Anschließend wird eine Gaußkurve an den größten Puls in den Daten angepasst, der sich in einem Zeitfenster um $-1.8 \mu s$ vor dem Triggersignal befindet. Die Anpassung dient dazu, einen stabilen Wert für die Pulshöhe zu erhalten. Diese wird in $[\mu V/m/MHz]$ angegeben, da die Feldstärke durch die Bandbreite geteilt wird (Abbildung 2.7 *rechts*).

Neben den vier Parametern aus den KASCADE-Daten (Azimut- und Höhenwinkel, X- und Y-Koordinaten des Schauerzentrums) gibt es noch einen weiteren, veränderlichen Parameter, den Krümmungsradius r_{curv} der elektromagnetischen Wellenfront. Da die Wellenfront nicht als Ebene, sondern näherungsweise als Kugeloberfläche auf die Erde trifft, beschreibt dieser den Grad der Krümmung. Er wird in einer Berechnung innerhalb der Pipeline zwischen 1000 m und 10000 m so gewählt, dass die Pulshöhe maximal wird. Eine manuelle Änderung oder feste Wertzuweisung ist ebenfalls möglich.

Mit den so gewonnenen Größen wird für jedes Radiosignal einzeln entschieden, ob es sich um ein "gutes" Ereignis handelt. Kriterium für akzeptierte Ereignisse ist dabei ein kohärenter Puls in den Radiodaten bei zeitgleichem Maximum der Gaußkurve. Die Pulshöhe ist mit den Schauergrößen korreliert und bildet die Grundlage für die weiteren Analysen.

Kapitel 3

Korrelation mit Schauerparametern

Nach der Parametrisierung von H.R. Allan ergeben sich in den historischen Daten Zusammenhänge zwischen der Feldstärke und verschiedenen Schauergrößen. Diverse weitere Modelle und Simulationen können diese Ergebnisse aus den 70er Jahren nur zum Teil bestätigen (siehe Abschnitt 1.4.2).

Um ein besseres Verständnis der Vorgänge bei der Radioemission zu erhalten, ist es wichtig, die gemessenen Daten richtig zu interpretieren. Mit Hilfe dieser Erfahrungen können die Theorien weiter ausgebaut und die Simulationen optimiert werden. Nur so ist die richtige Deutung der zusätzlichen Information möglich, die durch Radiodetektion gewonnen wird. Die ersten Analysen von LOPES10-Daten [Fal05, Hor06, Bad06] zeigten, dass die Messung von Radiopulsen in ausgedehnten Luftschauern erfolgsversprechend ist und Abhängigkeiten von verschiedenen Schauerparametern bestehen. Dabei gab es allerdings auch untereinander Abweichungen. Insbesondere der Einfluss des geomagnetischen Winkels α auf das Radiosignal bedarf noch weiterer Analysen.

In diesem Kapitel werden die LOPES30-Daten hinsichtlich der Korrelationen mit der Schauerenergie, der Einfallrichtung und der Entfernung zur Schauerachse untersucht. Die Ergebnisse werden mit früheren Analysen und Theorien verglichen.

3.1 Datenauswahl

Für die Untersuchung wurden in einer ersten Selektion 43 Ereignisse von Mitte November bis Mitte Dezember 2005 mit einer Mindestzahl an Elektronen von $N_e > 4 \cdot 10^6$ und einem maximalen Abstand von $r = 91$ m zwischen Schauerkern und Zentrum des KASCADE-Feldes untersucht. Die zweite Bedingung ist nötig, um eine sichere Rekonstruktion der KASCADE-Daten zu garantieren [Ant03]. Auf Grundlage der in Abschnitt 2.2.3 beschriebenen Klassifizierung ergaben sich 21 gute Ereignisse. Um diese Zahl zu erhöhen, wurden die Daten durch eine weitere Selektion mit Ereignissen bis Ende Januar ergänzt. Diese basierte aus zeitlichen Gründen gezielt auf energiereicheren Schauern ($N_\mu > 2.5 \cdot 10^5$), sowie einem von der ersten Selektion gewonnenen Zusammenhang zwischen der Myonzahl

N_μ und dem geomagnetischen Winkel α ($3.77 - 0.65 \cdot \log N_\mu < 1 - \cos\alpha$), um die lange Analysezeit durch das Programm zu verkürzen und eine möglichst hohe Reinheit der Daten zu erhalten. Von den 11 Ereignissen dieser Selektion waren bei Acht gute Radiopulse erkennbar. Um die Statistik bei sehr hohen Myonzahlen ($N_\mu \approx \cdot 10^6$) zu vergrößern, wurden in diesem Bereich Ereignisse bis März gesucht und von vier untersuchten alle akzeptiert. Für die folgende Analyse wurden insgesamt 31 der 33 guten Ereignisse untersucht, die folgende Kriterien erfüllen:

- $r \leq 91$ m , mit r : Abstand zwischen Schauerzentrum und der Mitte des Detektorfeldes
- $N_e > 4.1 \cdot 10^6$ und $N_\mu > 1.2 \cdot 10^5$
- $\alpha \leq 57^\circ$

Je ein Ereignis wurde aufgrund des Kriteriums bezüglich der minimalen Myonenzahl beziehungsweise des maximalen Winkels nicht in der Analyse verwendet.

3.2 Fehlerbetrachtung

Neben den statistischen und systematischen Fehlern von LOPES30 [Hor06] besitzen auch die von KASCADE ermittelten Schauergrößen Unsicherheiten aufgrund von Fehlern der direkt gemessenen Größen, sowie der Rekonstruktion [Eng03]. Diese haben auch Auswirkungen auf die Rekonstruktion des Radiopulses.

Fehler der KASCADE-Größen

Bei der Rekonstruktion der Myonenzahl beträgt der statistische Fehler im hier verwendeten Energiebereich von $E \approx 5 \cdot 10^{16}$ bis $E \approx 3.5 \cdot 10^{17}$ etwa $\Delta \log_{10} N_\mu = 0.05$, dies entspricht ungefähr 10%. Der systematische Fehler steigt mit zunehmender Myonenzahl stark an und erreicht bei hochenergetischen Schauern Werte um die 70% .

Der Fehler in der Einfallrichtung lässt sich über die Winkelauflösung beschreiben. Diese beträgt $\Delta_{\theta,\phi} = 0.1^\circ$ bei senkrechtem Einfall und nimmt auf maximal 0.4° in den hier betrachteten Winkelbereichen zu.

Die Position des Schauerzentrums kann mit einer Genauigkeit von unter $\Delta_{x,y} = 0.8$ m rekonstruiert werden.

Um den Fehler bei der Berechnung der mittleren Entfernung R_{sa} zwischen Antennen und Schauerachse abzuschätzen, müssen die Fehler von Einfallswinkel und Schauerzentrum berücksichtigt werden. Ebenfalls vorhandene Abweichungen in der Antennenposition von wenigen cm können vernachlässigt werden. Mit den oben genannten Auflösungen wird der Fehler bei der Abstandsbestimmung zu $\Delta R_{sa} = 1$ m abgeschätzt.

Im Folgenden können aufgrund der hier verwendeten Bereiche die Fehler von Einfallswinkel und Abstand zur Schauerachse bei den KASCADE-Daten vernachlässigt werden.

Statistische Fehler – LOPES30

Das Analyseprogramm ermittelt neben der Pulshöhe auch den dazugehörigen statistischen Fehler der Anpassungsfunktion an den CC-Beam. Dieser Fehler beinhaltet nicht die Unsicherheiten der Rohdaten und ist bei jedem Ereignis individuell. Im Mittel liegt die relative Abweichung bei $\Delta_{CC} \approx 12\%$.

Des Weiteren wird das Radiosignal durch das Rauschen beeinflusst. Außerdem verschlechtert ein Fehler beim Verschieben der Antennensignale zueinander die Kohärenz des Radiopulses und verringert damit die gemessene Pulshöhe. Ursachen dafür können Fehler in der von KASCADE rekonstruierten Schauergeometrie sowie der Berechnung des Krümmungsradius r_{curv} sein (Abschnitt 2.2.3). Diese Abweichungen werden zusammengefasst und zu 20% abgeschätzt.

Der gesamte statistische Fehler eines Ereignisses ergibt sich mit Gaußscher Fehlerfortpflanzung.

Systematische Fehler – LOPES30

Der unterschiedliche Einfluss der Elektronik auf die gemessenen Daten wird durch die absolute Kalibration ermittelt und bei der Berechnung der Radiopulshöhe berücksichtigt. Dieses Verfahren ist mit einem systematischen Fehler von ungefähr 32% behaftet [Hak06] und der Einfluss auf die Größe des CC-Beam beträgt nach Gaußscher Fehlerfortpflanzung etwa 8%.

Die Krümmung r_{curv} der Radiofront kann nur näherungsweise als Kugeloberfläche angenommen werden. Der durch das Analyseprogramm berechnete Wert für den Krümmungsradius zieht somit Fehler bis 5% in der Pulshöhe nach sich.

3.3 Ausgewählte Schauerparameter

Aufgrund der Modelle und Analysen wird ein Anstieg der Pulshöhe mit zunehmender Primärenergie E_p und damit mit zunehmender Myonen- und Elektronenzahl erwartet. Des Weiteren fällt die Pulshöhe exponentiell mit zunehmender Entfernung R_{sa} zwischen Antenne und Schauerachse ab und es existieren Zusammenhänge mit der Einfallrichtung, wie der Anstieg der Pulshöhe mit zunehmendem geomagnetischem Winkel α .

Die beschriebenen Größen sind auch zueinander korreliert, zum Beispiel ist die Anzahl der Teilchen am Boden abhängig von der Primärenergie, welche wiederum mit dem Zenitwinkel zusammenhängt. Die gesamten Abhängigkeiten der Pulshöhe können durch drei Parameter beschrieben werden [Hor06]. Dies sind die Schauergröße, ausgedrückt durch die Myonenanzahl N_μ , die Einfallrichtung, ausgedrückt durch den geomagnetischen Winkel α , und der Abstand zur Schauerachse R_{sa} . Die Myonenanzahl eignet sich besser als die Elektronenzahl um den Zusammenhang mit der Primärenergie zu untersuchen, da für den Energiebereich und die Beobachtungshöhe des KASCADE-Grande-Experimentes (127 m

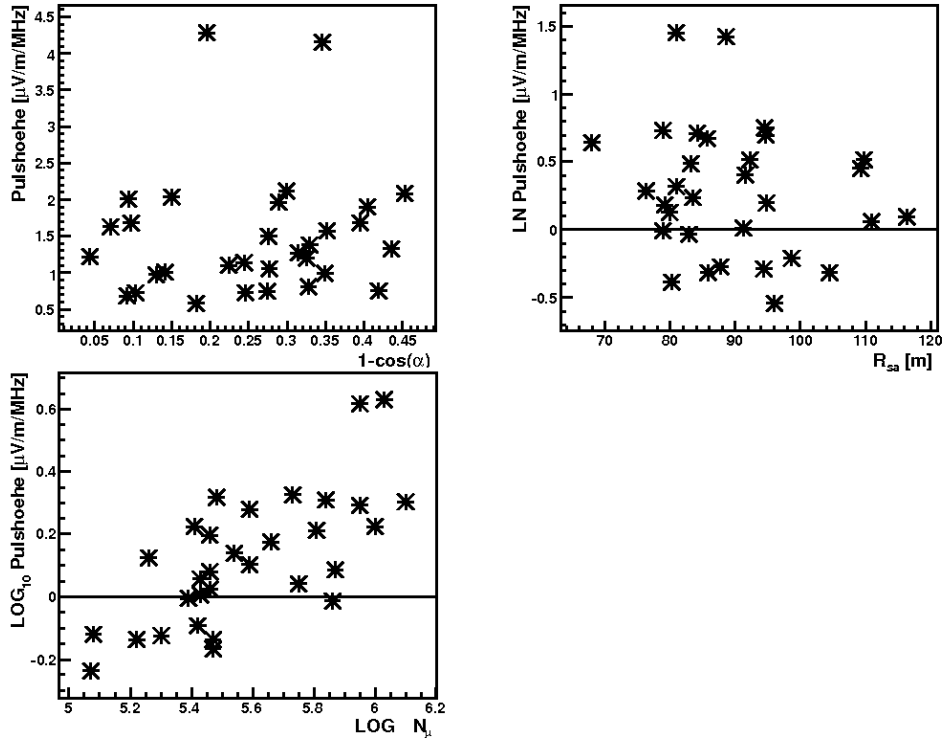


Abbildung 3.1: Unveränderte Pulshöhe in $[\mu\text{V/m/MHz}]$ aufgetragen über den geomagnetischen Winkel α (*oben links*), den Abstand R_{sa} (*oben rechts*) und die Myonenzahl N_{μ} (*unten*).

ü. NN) die elektromagnetische Komponente des Luftschauers allmählich ausstirbt. Die Anzahl der Myonen gibt einen zuverlässigeren Hinweis auf die Gesamtzahl der während des Luftschauers erzeugten Sekundärteilchen als die Elektronenzahl und hängt über $E_p \sim N_{\mu}^{0.9}$ mit der Energie zusammen [Fal05]. Mit dem theoretischen Modell einer annähernd linearen Abhängigkeit der Feldstärke von der Primärenergie ergibt sich damit der Zusammenhang des Radiosignals mit der Myonenzahl über ein Potenzgesetz.

Abbildung 3.1 zeigt die unveränderten Pulshöhen des CC-Beams aufgetragen über die drei ausgesuchten Schauerparameter. Für die Untersuchung von Feldstärke und geomagnetischem Winkel α wird hinsichtlich des Vergleichs mit früheren Analysen die Funktion $(1 - \cos\alpha)$ gewählt (*oben links*). Bei der Auftragung über die Entfernung R_{sa} wurde der natürliche Logarithmus der Pulshöhe gebildet, um den exponentiellen Zusammenhang als linearen Abfall darstellen zu können (*oben rechts*). Die Abhängigkeit von der Myonenzahl N_{μ} ist in dem doppeltlogarithmischen Diagramm (*unten*) eingezeichnet. Da die Größe des Radiosignals von vielen Faktoren abhängig ist, sind in den Abbildungen keine deutlichen Korrelationen sichtbar.

Für die weitere Untersuchungen werden die Korrelationen der drei Parameter α , R_{sa} und N_{μ} getrennt und mit Hilfe von Anpassungsfunktionen an die Daten berücksichtigt. Dies

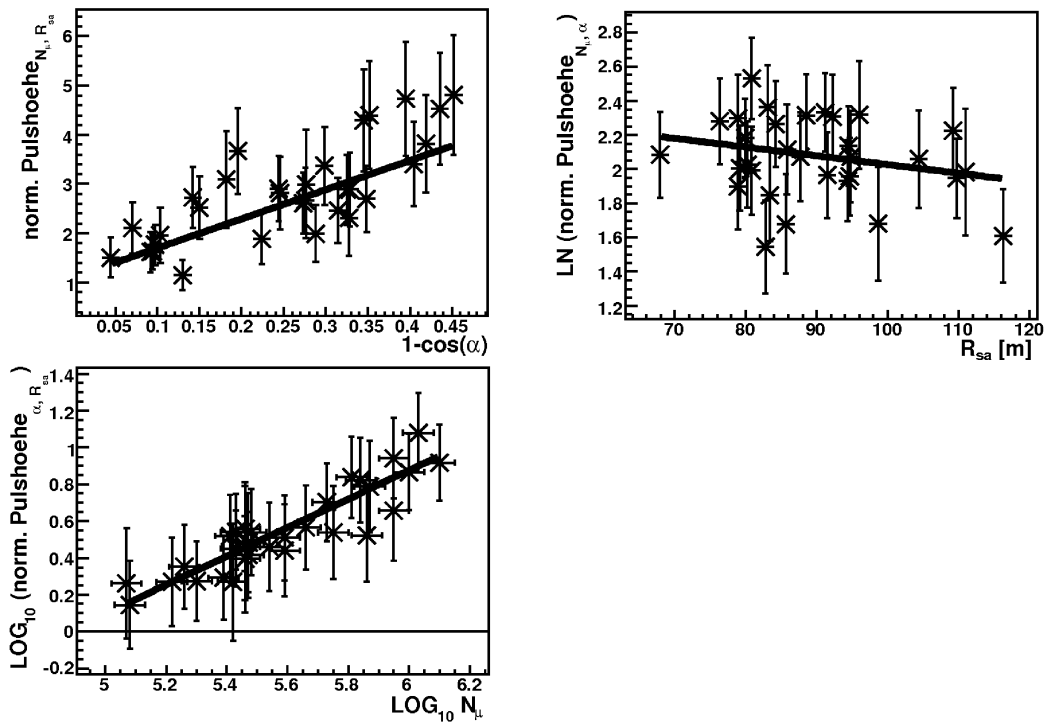


Abbildung 3.2: Normierte Pulshöhe in $[\mu\text{V}/\text{m}/\text{MHz}]$ aufgetragen über den geomagnetischen Winkel α (*oben links*), den Abstand R_{sa} (*oben rechts*) und die Myonenzahl N_μ (*unten*). Die Indizes bei der Pulshöhe geben an, auf welche Größen normiert wurde. Berücksichtigt werden die statistischen Fehler des Radiopulses sowie der Myonenzahl (Abschnitt 3.2).

geschieht iterativ und bei jedem weiteren Anpassungsschritt werden dabei die Abhängigkeiten reduziert, indem die Feldstärke des Radiosignals durch die Ergebnisse der beiden vorherigen Iterationsschritte dividiert wird [Hor06].

Im ersten Schritt wird die Pulshöhe in Abbildung 3.1 (*oben links*) durch die Anzahl der Myonen geteilt, um die Schauergröße zu berücksichtigen. Die Ergebnisse der daraus resultierenden linearen Anpassungsfunktion für den Zusammenhang mit $(1 - \cos\alpha)$ werden bei der Darstellung über die Entfernung R_{sa} (*oben rechts*) gemeinsam mit der Myonenzahl berücksichtigt. In Abbildung 3.1 (*unten*) wird danach sowohl durch die Ergebnisse der ersten als auch der zweiten Anpassung geteilt, um die Abhängigkeiten vom Winkel und dem Abstand aufzuheben. Diese Schritte wurden mehrmals wiederholt, bis die Abweichungen zwischen den entsprechenden Anpassungsfunktionen kleiner als die zugehörigen Fehler sind.

Abbildung 3.2 zeigt die so gewonnenen normierten Pulshöhen nach drei Iterationsschritten, aufgetragen über die drei Schauergrößen. Ein Vergleich dieser Abbildung mit 3.1 zeigt eine deutliche Unterdrückung der Einflüsse der anderen Schauergrößen auf die jeweilige Anpassung. Im Folgenden werden diese Zusammenhänge weiter diskutiert.

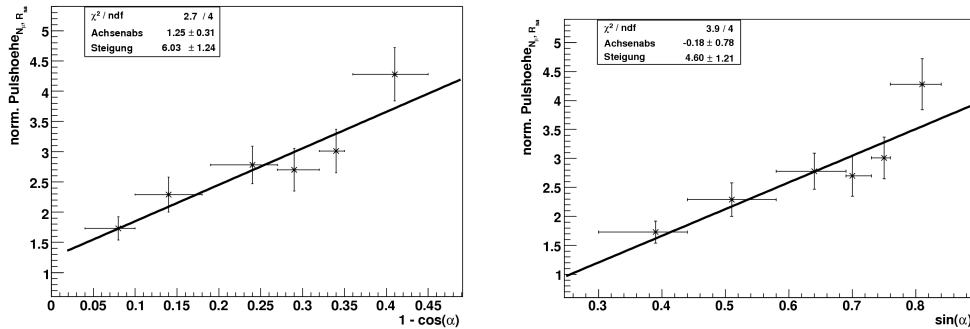


Abbildung 3.3: Zusammenhang zwischen der normierten Pulshöhe und $(1 - \cos \alpha)$ (*links*) bzw. $(\sin \alpha)$ (*rechts*). Die Daten sind gleichmäßig in sechs Bins eingeteilt. Die Fehler der Pulshöhen ergeben sich mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung aus den statistischen Einzelfehlern.

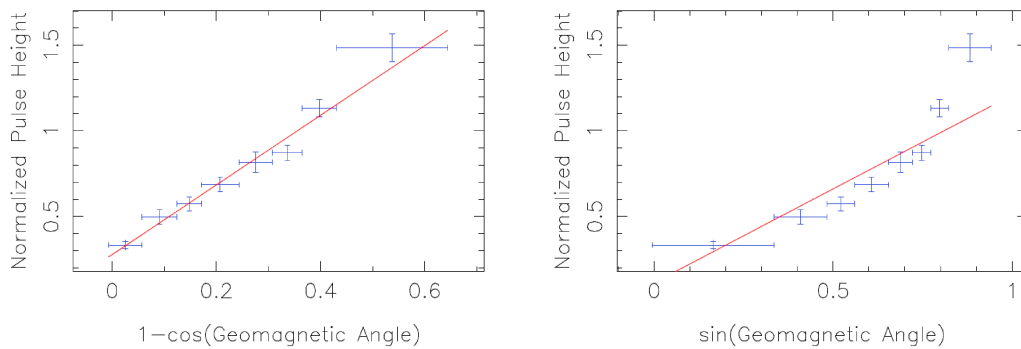


Abbildung 3.4: Ergebnisse der Winkelkorrelation in [Hor06] mit LOPES10-Daten. Die Pulshöhen sind normiert auf Myonenzahl und Abstand zur Schauerachse, aber noch nicht absolut kalibriert.

Abhängigkeit vom geomagnetischen Winkel

In Abbildung 3.3 sind die auf Myonenzahl und Schauerentfernung normierten Pulshöhen aus Abbildung 3.2 (*oben links*) für einen Vergleich mit früheren Ergebnissen [Hor06, All71] über $(1 - \cos \alpha)$ beziehungsweise $(\sin \alpha)$ dargestellt. Für eine bessere Übersichtlichkeit wurden die Daten gleichmäßig in sechs Bins eingeteilt. Beide Darstellungen ergeben einen Zusammenhang der gemessenen Pulshöhe mit α . Ein erster Blick zeigt kaum Unterschiede zwischen den verwendeten Anpassungsfunktionen, lediglich der kleinere Wert für χ^2/ndf bei $(1 - \cos \alpha)$ deutet auf eine bessere Anpassung des Cosinus hin. Die in früheren Analysen mit normierten aber nicht absolut kalibrierten LOPES10-Daten gefundene stärkere Abweichung bei der Darstellung des Sinus von der Geraden zeigte sich insbesondere bei größeren Winkeln ab 60° (Abbildung 3.4) und die hier vorliegende Übereinstimmung kann durch

den kleineren Winkelbereich bis $\alpha = 57^\circ$ herrühren ($1 - \cos(57^\circ) = 0.45$, $\sin(57^\circ) = 0.84$). Bei der Parametrisierung von [Hor06] existiert eine charakteristische Größe, die als der Beitrag der Radioemission interpretiert werden kann, der nicht durch den Geosynchrotron-Effekt entsteht. Sie berechnet sich aus dem Quotienten zwischen Achsenabschnitt und Steigung in Bild 3.3 (*links*). Die Untersuchungen der LOPES10-Daten ergaben einen Wert von 0.1 ± 0.02 (Gleichung 1.3), wohingegen die vorliegende Analyse einen Wert von 0.21 ± 0.07 ermittelt. Die Restfeldstärke, die sich ergibt, wenn der Schauer parallel zum Erdmagnetfeld einfällt, ist somit bei dem hier verwendeten Datensatz deutlich größer. Zukünftige Analysen mit größeren Winkeln können klären, ob die Diskrepanz an dem kleineren Winkelbereich und der geringeren Statistik liegt, oder die Messung mit dem erweiterten und inzwischen absolut kalibrierten Antennenfeld genauere Werte liefert.

Abhängigkeit vom mittleren Abstand zur Schauerachse

In Abbildung 3.5 wurde der natürliche Logarithmus der Pulshöhe, normiert auf α und N_μ , über den Abstand R_{sa} aufgetragen. Der für diese Darstellung vorhergesagte, lineare Abfall mit zunehmender Entfernung ist erkennbar. Über den negativen Kehrwert der Steigung $m \simeq -0.0045$ ergibt sich ein Skalenfaktor R_0 von 220 m. Dieser liegt im Bereich der Ergebnisse aus früheren Analysen mit LOPES10-Daten, die einen stabilen Wert um 230 m ergeben haben [Hor06, Bad06]. Allerdings liegt bei dem hier verwendeten Datensatz der Fehler der Steigung bei $\Delta m = \pm 0.0045$. Die Größe des Fehlers kann durch den kleinen

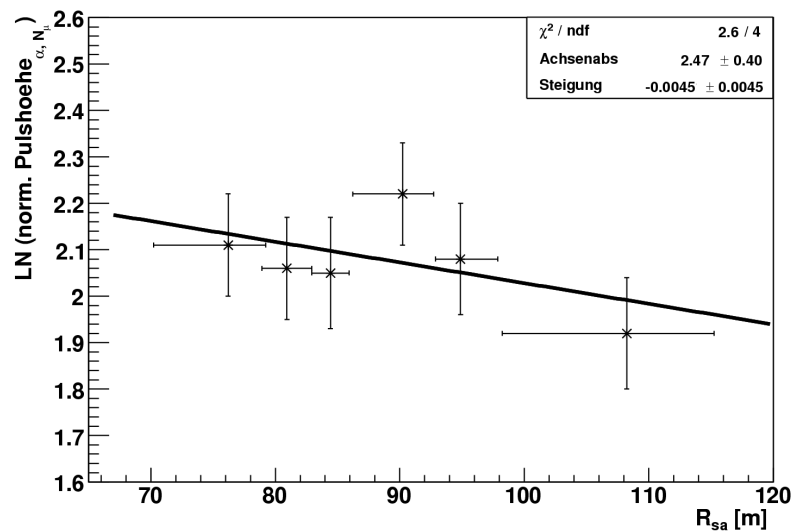


Abbildung 3.5: Darstellung des natürlichen Logarithmus der normierten Pulshöhe über R_{sa} . Die Daten sind gleichmäßig in sechs Bins eingeteilt. Die Fehler der Pulshöhen ergeben sich mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung aus den statistischen Einzelfehlern.

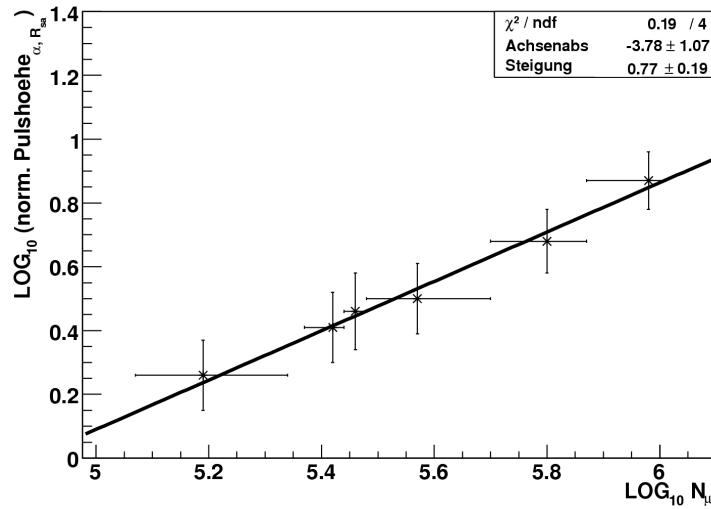


Abbildung 3.6: Doppellogarithmische Abbildung der normierten Pulshöhe über N_μ . Die Daten sind gleichmäßig in sechs Bins eingeteilt. Die Fehler der Pulshöhen ergeben sich mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung aus den statistischen Einzelfehlern.

Entfernungsbereich für R_{sa} von 70 m bis 120 m erklärt werden. In dem 50 m breiten Band ist der Abfall der Steigung kleiner als die statistischen Fehler. Der kleine Entfernungsbereich ergibt sich aufgrund der Bedingung, dass sich der Schauerkernel in einem Umkreis von 91 m um das KASCADE-Detektorzentrum befindet und durch die Erweiterung des LOPES-Experimentes auf 30 Antennen fast das gesamte Detektorfeld bedeckt ist. Weitergehende Analysen, die wie bei den LOPES10-Daten in [Bad06] unter Zuhilfenahme der KASCADE-Grande-Informationen diese Korrelation bei größeren Entfernungen untersuchen, könnten dies klären.

Abhängigkeit von der Myonenanzahl

Die doppellogarithmische Darstellung der auf α und R_{sa} normierten Pulshöhe zeigt sehr deutlich eine lineare Abhängigkeit von der Myonenzahl (Abbildung 3.6). Dadurch ergibt sich auch die postulierte Korrelation des Radiosignals mit der Energie des Primärteilchens. Die Anpassungsfunktion an die Daten liefert einen Zusammenhang zwischen der Feldstärke und der Teilchenzahl von $\epsilon \sim N_\mu^{0.77 \pm 0.19}$. Mit $E \sim N_\mu^{0.9}$ und dem aus bisherigen Parametrisierungen (siehe Abschnitt 1.4.2) resultierenden Zusammenhang $\epsilon \sim E^{\approx 0.95}$ ergibt sich theoretisch für den Exponenten ein Wert von 0.86, welcher innerhalb der Fehlergrenzen liegt.

3.4 Diskussion der Ergebnisse

Bei der gefundenen Abhängigkeit der Pulshöhe vom geomagnetischen Winkel ergibt sich im Winkelbereich bis 57° durch die Ähnlichkeit der Sinus- bzw. (1-Cosinus)-Darstellung ein vergleichbarer Zusammenhang sowohl mit der Allan-Formel (Abschnitt 1.4.2 Gleichung 1.1), als auch mit den Ergebnissen in [Fal03, Hor06]. Eine endgültige Aussage ist durch den gegebenen Winkelbereich nicht möglich. Die offensichtliche Abhängigkeit der Feldstärke vom geomagnetischen Winkel konnte bisher nicht in den Simulationen bestätigt werden. Diese erwarten einen komplexen Zusammenhang mit der Einfallrichtung. Um die Bedeutung des geomagnetischen Winkels besser zu verstehen, ist für die Zukunft die Messung beider Polarisationsrichtungen mit den LOPES-Antennen wichtig.

Der ermittelte Skalenfaktor liegt mit 220 m im Bereich der Ergebnisse von bisheriger Analysen von LOPES ($230 \text{ m} \pm (50\text{-}70 \text{ m})$) [Bad06, Hor06] und CODALEMA (215 m) [Ard05]. Da der Fehler in der Steigung, und damit in R_0 , aus den oben beschriebenen Gründen sehr groß ist, ist eine Interpretation aus physikalischer Sicht mit Vorsicht zu behandeln. Hinzu kommt, dass für Ereignisse mit unterschiedlichen Einfallswinkeln auch verschiedene Werte für den Skalenfaktor erwartet werden. Dieser hängt nach neuen Modellen von Schauerparametern wie Zenitwinkel ab und liegt im Bereich von 130 m bis 870 m [Hue05]. Im nächsten Kapitel werden die Skalenfaktoren von einzelnen Radiosignalen ermittelt und die Theorie erläutert.

Die Größe des Radiosignals hängt wie erwartet über ein Potenzgesetz von der Anzahl der Myonen ab. Dieses Ergebnis entspricht dem Zusammenhang der historischen Daten sowie den neuesten Simulationen. Der ermittelte Exponent stimmt im Rahmen der Fehler mit dem theoretischen Wert überein, liegt allerdings deutlich unter dem in [Hor06] erhaltenen Wert von 0.97 ± 0.06 . Gründe für diese Abweichung können zum einen an der größeren Anzahl der hier verwendeten Antennen liegen, sowie an der geringen Statistik der Daten, insbesondere bei Myonenzahlen um $N_\mu \approx 10^6$. Die gefundene Abhängigkeit zwischen der Pulshöhe und der Myonenzahl bestätigt den annähernd linearen Zusammenhang der Feldstärke mit der Primärenergie und damit die Kohärenz der Radioemission in der Schauerscheibe.

Kapitel 4

Lateralverteilung

In der bisher verwendeten Parametrisierung der Lateralverteilung geht ein exponentieller Zusammenhang mit dem Skalenfaktor R_0 ein. Er dient als Maß für die Größe des Abdruckes, den das Radiosignal auf dem Erdboden hinterlässt. Simulationen und Analysen anderer Antennenexperimente [Ard06] zeigen für unterschiedliche Ereignisse Variationen bei der Größe dieses Skalenfaktors. In diesem Kapitel werden die Skalenfaktoren von Einzelereignissen bestimmt und mit bestehenden Simulationen verglichen.

4.1 Datenauswahl

Bei der Rekonstruktion des Radiopulses müssen dem Analyseprogramm die Daten von mehreren Antennen zur Verfügung stehen, um für die Berechnung des CC-Beams Wertepaare bilden zu können (Vergleich Abschnitt 2.2.3). Daher ist eine Untersuchung der lateralen Verteilung von 25 Einzelantennen nicht möglich. Aus diesem Grund wurden für die analysierten Ereignisse Antennenuntergruppen mit unterschiedlichen Entfernungen zum Schauerzentrum gebildet.

Aus den Datenselektionen von Abschnitt 3.1 wurden elf der 33 Ereignisse ausgewählt, deren Schauerzentren so innerhalb des Antennenfeldes liegen, dass eine Unterteilung in verschiedenen weit entfernte Antennengruppen möglich ist und wenigstens vier Antennen je Untergruppe vorhanden sind. Diese Mindestzahl beruht auf den Erfahrungen mit LOPES10-Daten. Die Einteilung erfolgte mit Hilfe von Ringen, die um das betreffende Schauerzentrum gelegt wurden und jeweils eine Breite von 50 m haben. Dazu wurde für jede Antenne die Entfernung zum Schauerzentrum berechnet und ausgehend davon die Antenne in die Untergruppe (0-50 m), (50-100 m), (100-150 m) oder (150-200 m) eingeordnet. Das geschah für jedes der elf Ereignisse individuell. Abbildung 4.1 zeigt die Einteilung anhand eines Beispiels. Die Berechnung des Abstandes und die Klassifizierung in die Untergruppen wurde in Koordinaten des KASCADE-Feldes durchgeführt, wie die symmetrischen Ringe in der Abbildung zeigen. Für die Analyse wurde anschließend jedoch die mittlere Entfernung R_{sa}

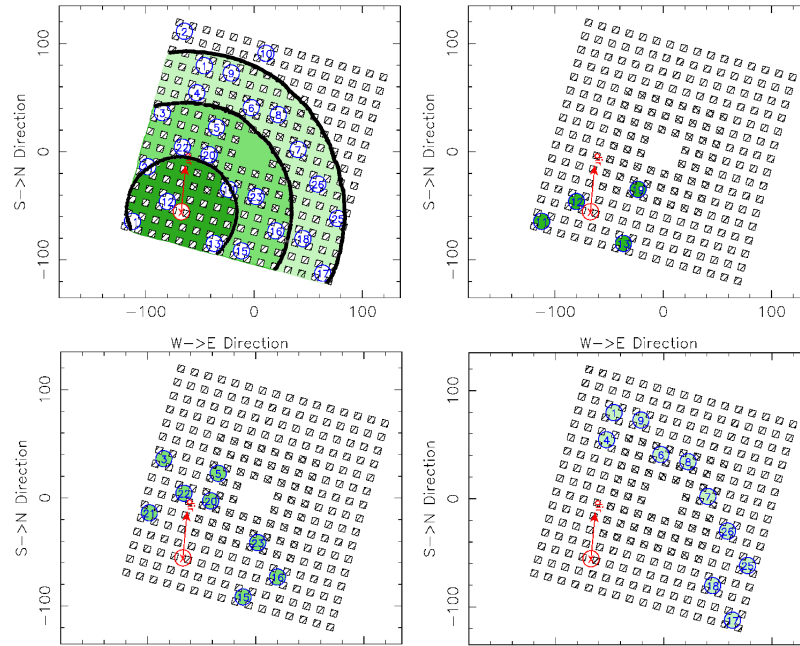


Abbildung 4.1: Beispiel für die ringförmige Einteilung des Antennenfeldes in verschieden weit entfernte Untergruppen.

in Schauerkoordinaten, also in Bezug zur Schauerachse, verwendet. Dadurch ist ein besserer Vergleich mit den Ergebnissen aus Kapitel 3 und der Theorie möglich.

Für jedes Radiosignal wurden auf diese Weise zwei bis vier Untergruppen gebildet, so dass sich insgesamt 31 Datenpakete ergaben, deren Pulshöhen rekonstruiert wurden.

4.2 Analyse

4.2.1 Durchführung

Jede Untergruppe der elf Ereignisse wurde einzeln mit der Software analysiert und die entsprechenden Antennen dazu manuell ausgewählt. Um für dasselbe Ereignis keine Variation in der Schauergeometrie zuzulassen, wurden die fünf Parameter bei der Analysekette konstant gehalten (siehe Abschnitt 2.2.3). Neben den festen Werten für die Einfallsrichtung (θ, ϕ) und Schauerposition (X, Y) wird der Parameter Krümmungsradius dazu manuell auf den Wert eingestellt, der sich aus der Rekonstruktion mit allen Antennen ergeben hat. Damit soll sichergestellt werden, dass die Schauergeometrie mit Hilfe der maximalen Informationen bestmöglich rekonstruiert wurde und bei einem Ereignis gleich bleibt. Abbildung 4.2 zeigt die Ergebnisse der Rekonstruktion bei einem Radiopuls für das gesamte Feld sowie die Untergruppen. Bei zwei Ereignissen konnte in Untergruppen mit kleiner An-

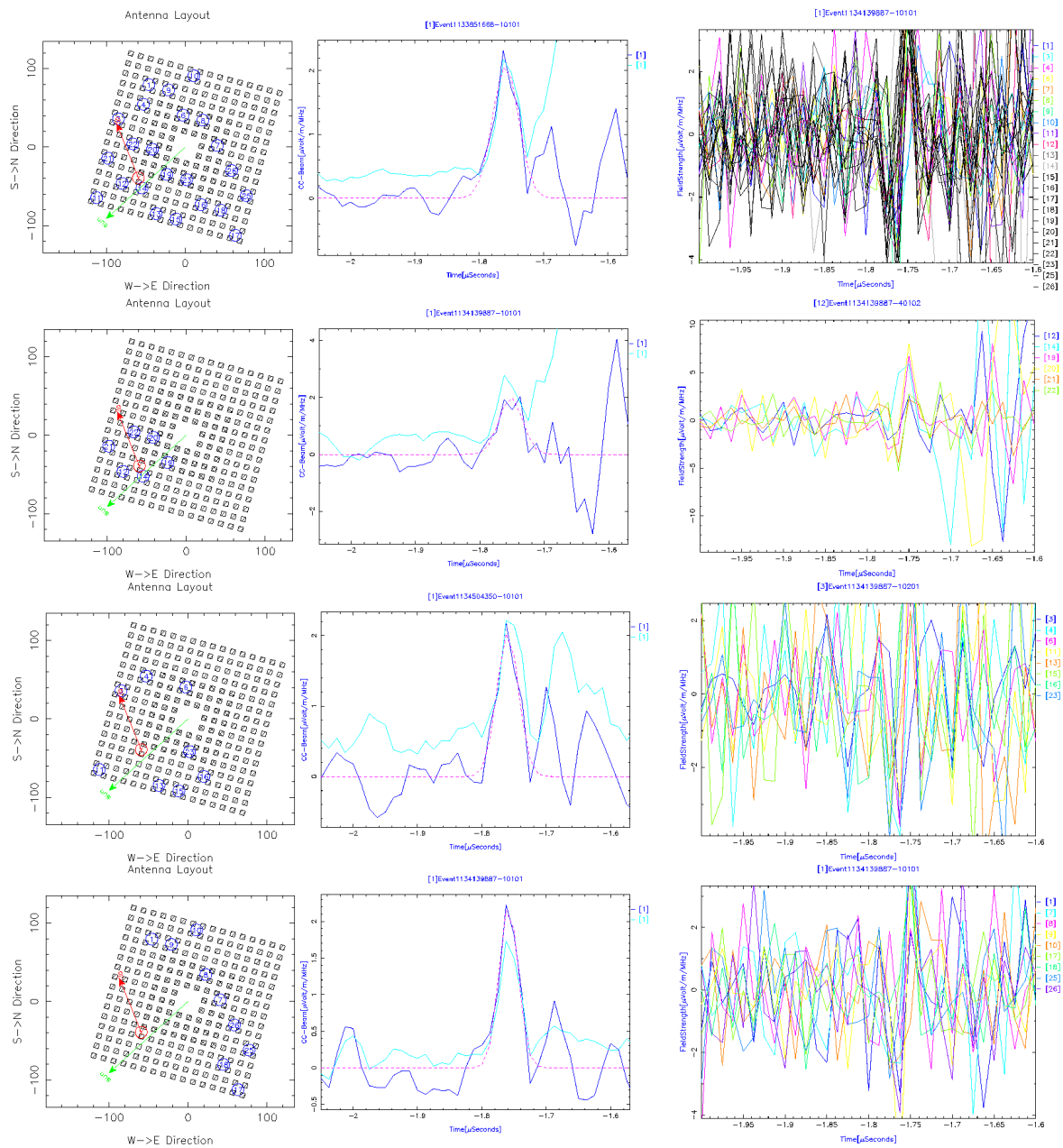


Abbildung 4.2: Ergebnisse der Rekonstruktion für das Gesamtfeld und drei Untergruppen. *links*: Darstellungen der Antennenfelder; *Mitte*: rekonstruierte Pulshöhen des CC-Beams; *rechts*: überlagerte Rohdaten.

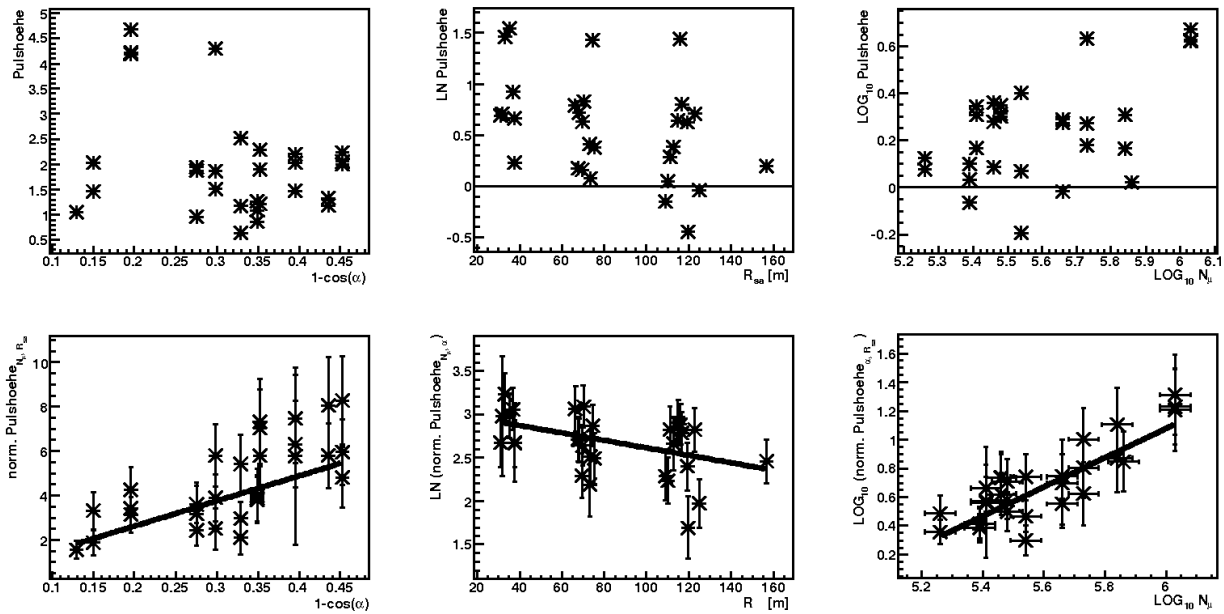


Abbildung 4.3: Unveränderte und normierte Pulshöhen in $[\mu\text{V}/\text{m}/\text{MHz}]$ aufgetragen über den geomagnetischen Winkel α (*links*), den Abstand R_{sa} (*Mitte*) und die Myonenzahl N_μ (*rechts*). Die Indizes bei der Pulshöhe geben an, auf welche Größen normiert wurde.

tennenanzahl kein Radiopuls mit den festen Einstellungen rekonstruiert werden. Mit den restlichen 29 Daten wurde analog zu Abschnitt 3.3 das Iterationsverfahren durchgeführt, um anschließend das laterale Verhalten des gesamten Datensatzes bzw. der einzelnen Radiosignale zu untersuchen. Abbildung 4.3 zeigt die rekonstruierten Pulshöhen vor (*oben*) und nach (*unten*) dem Iterationsverfahren. Die Korrelation ist wie in Kapitel 3 erkennbar.

4.2.2 Fehlerbetrachtung

Bei dem Iterationsverfahren und den Abbildungen wurden wie in Kapitel 3 der statistische Fehler der Feldstärke sowie der Myonenzahl berücksichtigt. Aufgrund der großen Entfernungen zur Schauerachse (30 m bis 160 m) konnte der Fehler von R_{sa} ebenso wie der Einfluss der Winkeländerung vernachlässigt werden. Die Werte der einzelnen Beiträge können aus Abschnitt 3.2 entnommen werden.

4.2.3 Einzelereignisse

Der Zusammenhang zwischen dem natürlichen Logarithmus der Pulshöhen und dem Abstand R_{sa} zur Schauerachse ist in Abbildung 4.4 vergrößert dargestellt. Es ergibt sich für

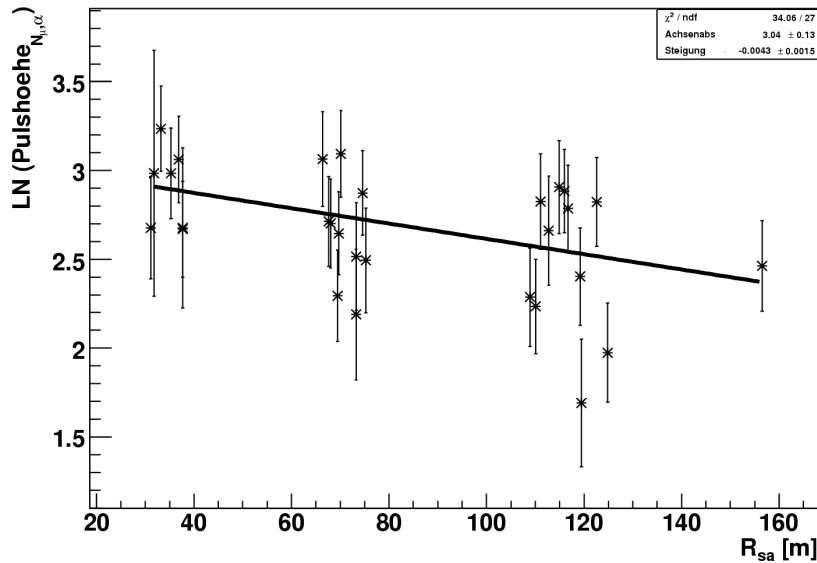


Abbildung 4.4: Der natürliche Logarithmus der normierten Pulshöhe aufgetragen über die Entfernung R_{sa} . Die Anpassungsfunktion liefert für den Skalenfaktor einen Wert von $R_0 = 230$ m.

alle Daten ein mittlerer Skalenfaktor von $(230 \text{ m} \pm 80 \text{ m})$. Der Fehler der Steigung hat sich durch den größeren Entfernungsbereich aufgrund der Bildung von Untergruppen im Vergleich zu dem Ergebnis aus Kapitel 3 deutlich verringert.

Für die Betrachtung des Skalenfaktors von Einzelereignissen wurden zusammengehörige Radiopulse separat dargestellt. Die Abbildungen 4.5 und 4.6 zeigen von jeweils vier Ereignissen die Daten mit der zugehörigen linearen Anpassungsfunktion. Für drei Ereignisse, bei denen nur Resultate von zwei Antennenuntergruppen vorlagen, wurde auf die Anpassung verzichtet. Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die einzelnen Ereignisse mit den dazugehörigen Winkeln und Skalenfaktoren.

In allen Fällen können die logarithmierten Daten durch eine Gerade angepasst werden. Wie die unterschiedlichen Steigungen bereits andeuten, liegen die berechneten Skalenfaktoren in einem sehr großen Bereich. Es ergeben sich Werte zwischen $R_0 = 60$ m (rote Gerade in Abbildung 4.5) und $R_0 = 835$ m (grüne Gerade in Abbildung 4.6). Bei einem Ereignis wurde der Skalenfaktor nicht angegeben, da bei diesem die rekonstruierten Pulshöhen trotz zunehmender Entfernung ungefähr gleich bleiben.

Der statistische Fehler der Einzelmessungen dominiert auch hier über den Abfall der Anpassung und ergibt für einige Ereignisse im Grenzfall negative Skalenfaktoren. Dies ist im Rahmen des Geosynchrotron-Modells physikalisch nicht erklärbar. Möglicherweise sind die betrachteten Fehler zu konservativ abgeschätzt, da die Abweichungen der Daten an die Anpassung deutlich kleiner sind als die angegebenen statistischen Fehler.

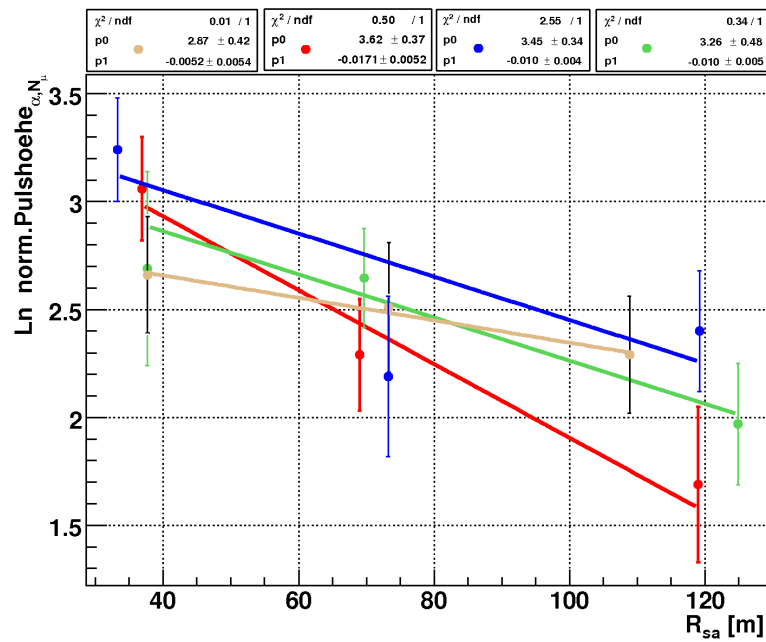


Abbildung 4.5: Darstellung des exponentiellen Zusammenhangs der Pulshöhe mit dem Abstand R_{sa} für die ersten vier Ereignisse.

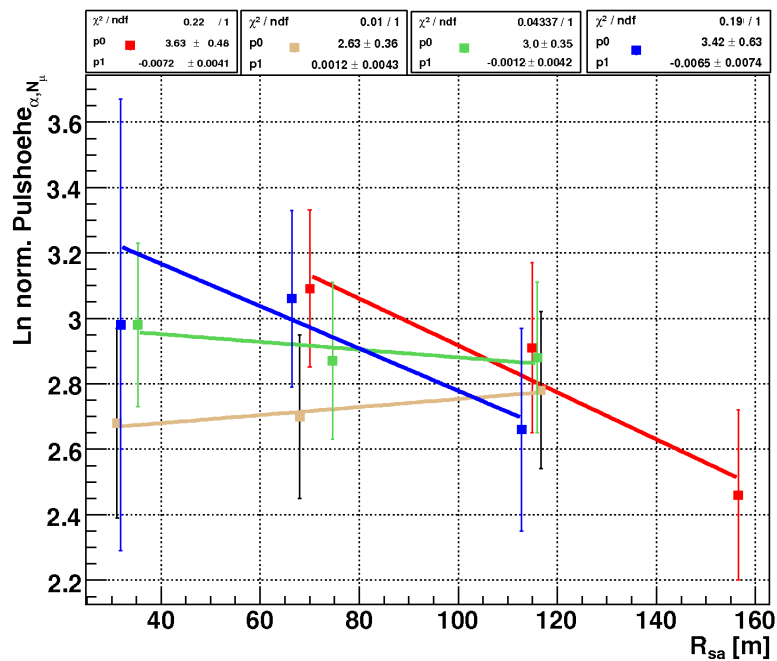


Abbildung 4.6: Darstellung des exponentiellen Zusammenhangs der Pulshöhe mit dem Abstand R_{sa} für die zweiten vier Ereignisse.

	Farbe	θ	ϕ	α	Steigung	R_0
1	gelb ●	25.2	19.8	49.4	-0.0052	190 m
2	rot ●	22.8	1.0	47.9	-0.0171	60 m
3	blau ●	26.7	55.3	45.5	-0.0100	100 m
4	grün ●	18.6	5.3	43.6	-0.0100	100 m
5	rot ■	26.0	333.9	49.6	-0.0072	140 m
6	gelb ■	32.9	338.1	56.8	+0.0012	–
7	grün ■	14.3	315.2	36.4	-0.0012	835 m
8	blau ■	34.5	53.8	52.8	-0.0065	155 m

Tabelle 4.1: Übersicht über die einzelnen Ereignisse aus Abbildung 4.5 und 4.6. (θ : Zenitwinkel, ϕ : Azimutwinkel, α : geom. Winkel, R_0 : Skalenfaktor)

4.3 Diskussion der Ergebnisse

Die vorgestellte Analyse zeigt, dass durch den größeren Entfernungsbereich bei dem gesamten Datensatz der Fehler des Skalenfaktors im Vergleich zu Kapitel 3 reduziert werden konnte. Der exponentielle Zusammenhang mit der Entfernung R_{sa} besteht auch bei Einzelereignissen. Für die verschiedenen gemessenen Daten zeigt sich wie erwartet eine starke Variation des Skalenfaktors. Dies bestätigen aktuelle Simulationen [Hue05]. Danach variiert dieser Faktor abhängig von der atmosphärischen Tiefe des Maximums X_{max} und dem Zenitwinkel (Abbildung 4.7). Ergebnisse des CODALEMA-Experimentes haben dies ebenfalls gezeigt. Bei den hier verwendeten Ereignissen konnte die Abhängigkeit vom Zenitwinkel auf Grund der geringen Statistik und der großen Fehler nicht erkannt werden. Zusammen mit dem kleinen Abstandsbereich sind dies auch mögliche Gründe für den zu kleineren Werten hin verschobenen Bereich des Skalenfaktoren mit Werten ab 60 m bis 835 m. Für einen konstanten Wert von X_{max} und einen Zenitwinkel bis 60° liegt der simulierte Skalenfaktor zwischen 130 m und 870 m.

Qualitativ zeigt sich jedoch die gleiche Größenordnung und lässt auf gute Ergebnisse in zukünftigen Analysen hoffen, die mit mehr Einträgen und größeren Entfernungen stabilere Werte für die Anpassung und damit den Skalenfaktor erhalten.

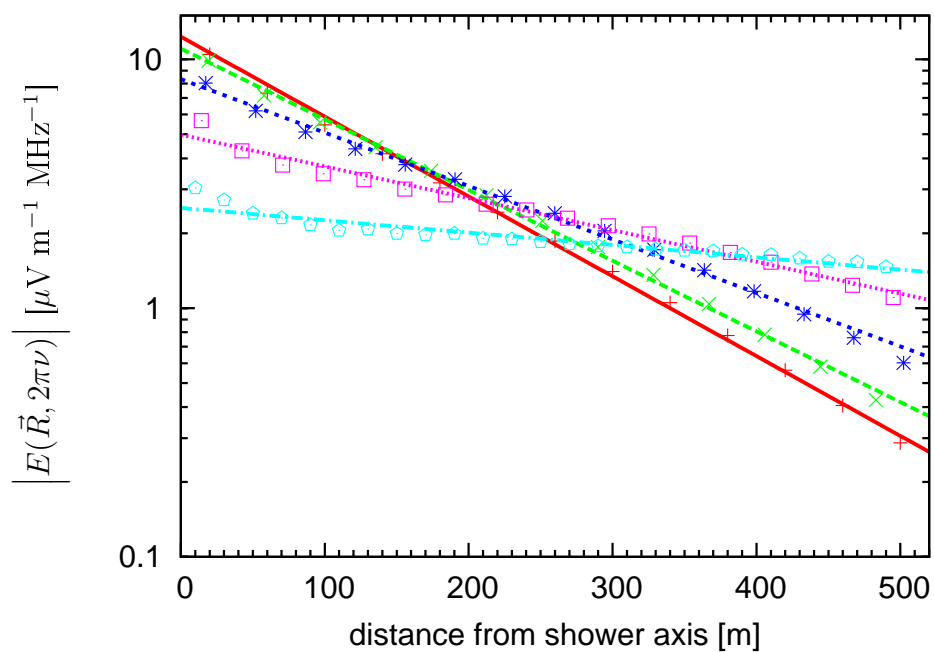


Abbildung 4.7: Simulation der radialen Abhängigkeit der Radioemission bei 10 MHz und festem Wert X_{max} für verschiedene Zenitwinkel (rot: 0°, grün: 15°, blau: 30°, violett: 45°, türkis: 60°) [Hue05].

Kapitel 5

Variation der Antennendichte

Ein weiterer Schritt bei der Detektion der Radioemission ausgedehnter Luftschauer mit dem LOPES30-Experiment ist die Messung beider Polarisationsrichtungen, um zusätzliche Informationen bezüglich des Einflusses des geomagnetischen Winkels auf das Radiosignal zu erhalten. Mit dem bisherigen Aufbau wird lediglich die Ost/West-Polarisation bestimmt. Wegen der begrenzten Anzahl der Datenkanäle, die auf dem Gelände des KASCADE-Experimentes zur Verfügung stehen, ist die maximale Anzahl benutzbarer Antennen erreicht und die Messung der Nord/Süd-Polarisation ohne unverhältnismäßig großen Aufwand nur durch den Verzicht auf Ost/West-Antennen möglich. Eine Untersuchung der Daten bei geringerer Antennendichte ist nötig, um sicherzustellen, dass auch mit einem ausgedünnten Antennenfeld zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden können und dass die Rekonstruktion des Radiopulses auch mit weniger Informationen zuverlässig ist. Dies ist auch im Hinblick auf großflächige Radio-Experimente sinnvoll, um Material und damit Kosten und Wartung einzusparen.

5.1 Einteilung der Antennen

Als Grundlage für die hier beschriebene Analyse wurde das Antennenfeld in mehrere unabhängige Untergruppen eingeteilt. In einem ersten Schritt wurden zwei Gruppen gebildet und diese, ausgehend von der Gesamtzahl der Antennen, in 1/3 (rot) und 2/3 (blau und gelb) eingeteilt (siehe Abbildung 5.1). Dabei wurde darauf geachtet, dass die bedeckten Flächen und Grundlinien der Untergruppen in etwa gleich groß sind.

Im Zeitraum der verwendeten Daten standen lediglich 25 Antennen zur Verfügung, da die vier Antennen außerhalb des Detektorfeldes (Nummer 27 bis 30) aufgrund einer benachbarten Baustelle nicht benutzt wurden und eine fünfte Antenne (Nummer 24) für anderweitige Untersuchungen verwendet wurde. Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die einzelnen Selektionen mit Anzahl und Antennennummern. Im Folgenden wird die Gruppe mit 25 Antennen als 3/3 - Selektion beziehungsweise Gesamtfeld bezeichnet.

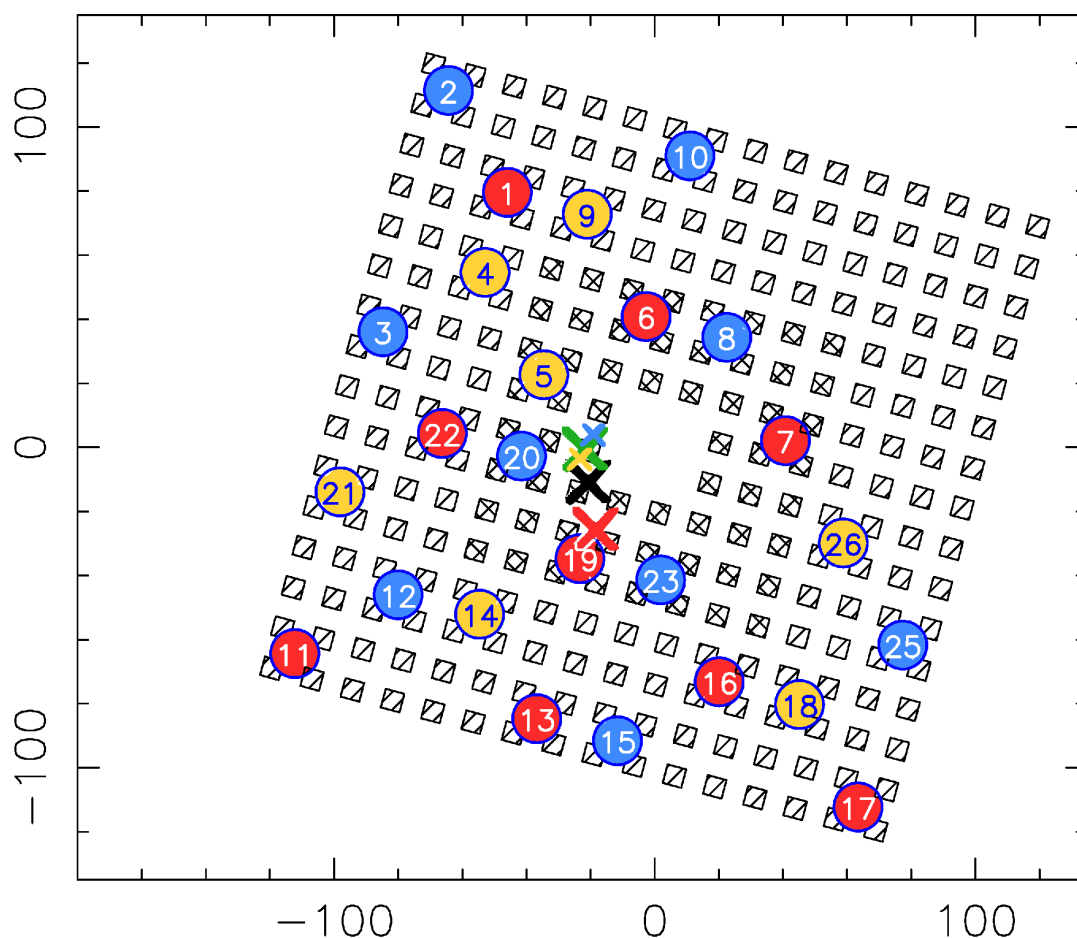


Abbildung 5.1: Darstellung des KASCADE-Detektorfeldes mit den LOPES-Antennen. Die Quadrate symbolisieren die 252 Detektorstationen und die farbigen Kreise stellen verschiedenen Antennengruppen dar. Dabei entsprechen die roten Felder den Antennenpositionen der Gruppe 1/3-1, die Übrigen diejenigen der Selektion 2/3. Diese 16 Antennen wurden nochmals in die Gruppen 1/3-2 (blau) und 1/3-3 (gelb) eingeteilt. Die Kreuze symbolisieren die Schwerpunkte der Antennengruppen (schwarz: 3/3 , grün: 2/3, rot: 1/3-1, blau: 1/3-2, gelb: 1/3-3)

Um Quervergleiche durchführen zu können und Rückschlüsse auf die Auflösung des Experimentes zu erhalten, wurde in einem zweiten Schritt die 2/3-Selektion weiter unterteilt, um insgesamt drei 1/3-Gruppen zu erhalten. Für das zweite Drittel (1/3-2, blau) wurden ebenfalls 9 Antennen gewählt, die von der maximalen Entfernung und bedeckten Fläche ungefähr der ersten 1/3-Selektion (im Folgenden als 1/3-1 bezeichnet) entsprechen. Die restlichen 7 Antennen bilden das letzte Drittel (1/3-3, gelb). Aufgrund des vorab durchgeführten ersten Schrittes mit der Bildung einer 16 Antennen großen Untergruppe, war es






	Selektion	Anzahl der Ant.	Antennennummern
	3/3	25 Antennen	alle außer 24, 27-30
	2/3	16 Antennen	2,3,4,5,8,9,10,12,14,15,18,20,21,23,25,26
	1/3-1	9 Antennen	1,6,7,11,13,16,17,19,22
	1/3-2	9 Antennen	2,3,8,10,12,15,20,23,25
	1/3-3	7 Antennen	4,5,9,14,18,21,26

Tabelle 5.1: Übersicht der Antennenselektionen mit Anzahl und Nummern der Antennen.

nicht möglich, drei in Anzahl und Abstand der Antennen gleichwertige 1/3-Gruppen zu bilden. Die Schwerpunkte der Antennen in jeder Gruppe sind mit den Antennenpositionen aus [Hor06] berechnet und in Abbildung 5.1 mit einem Kreuz gekennzeichnet. Die unterschiedliche Elektronik der ersten zehn Antennen (siehe Abschnitt 2.2.2) verteilt sich in den drei 1/3-Gruppen zu 3-4-3.

5.2 Verwendete Daten

Für die Analyse bezüglich der Antennendichte wurden alle guten Radiosignale der verschiedenen Datenselktionen aus Kapitel 3 verwendet. Dies ergab insgesamt 33 Ereignisse, die in drei der vier Untergruppen untersucht wurden. Für die Selektion 1/3-3 wurden nur 25 der 33 Radiosignale untersucht. Die Ereignisse erfüllen folgende Kriterien:

- $r \leq 91 \text{ m}$, (r : Abstand zwischen Schauerzentrum und der Mitte des Detektorfeldes)
- $N_e > 4.1 \cdot 10^6$

5.3 Analyse

Bei der Untersuchung wurden die rekonstruierten Pulshöhen beziehungsweise die Veränderungen beobachtet, die sich bei der Messung mit Untergruppen ergaben. Dazu wurde jedes Ereignis für die einzelnen Antennengruppen unabhängig von vorherigen Ergebnissen mit der Software analysiert und als Größe des Radiopulses die ermittelte Höhe des CC-Beams verwendet. Insbesondere wurde keine Information bezüglich des variablen Parameters Krümmungsradius weitergegeben, sondern lediglich die bekannten Parameter (Zenit- und Azimutwinkel, X- und Y- Koordinaten des Schauerzentrums) aus der KASCADE-Rekonstruktion, um zu überprüfen, ob das Analyseprogramm auch mit weniger Antennen einen vergleichbaren Radiopuls rekonstruieren kann (Abbildung 5.2).

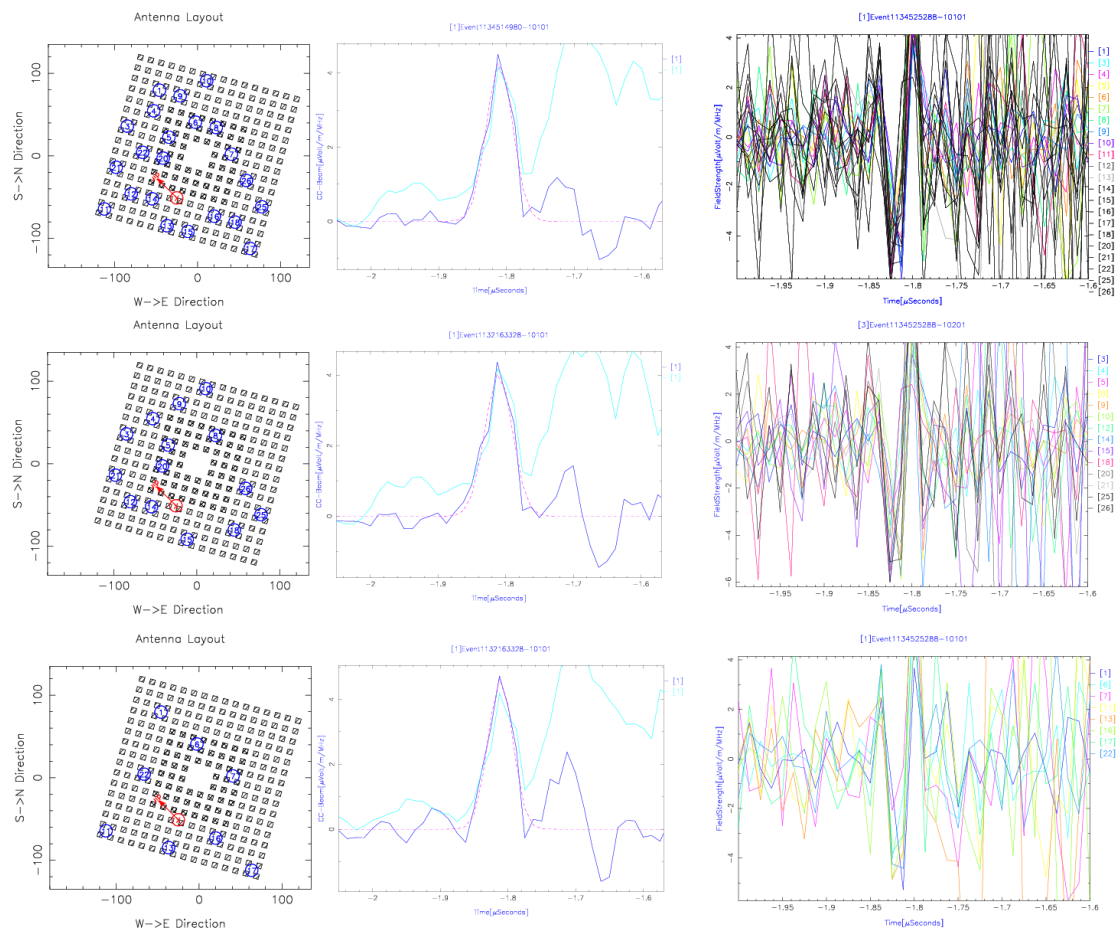


Abbildung 5.2: Die Ergebnisse des Gesamtfeldes (*oben*), der 2/3 - Selektion (*Mitte*) und der 1/3-1 - Selektion (*unten*) für ein Ereignis. Die Kohärenz des Radiosignals ist in allen Gruppen deutlich zu erkennen (*rechts*) und die rekonstruierte Pulshöhe in den drei Fällen etwa gleich groß (*Mitte*). *Links* sind die verwendeten Antennen der betreffenden Rekonstruktion dargestellt.

	2/3	1/3-1	1/3-2	1/3-3
untersuchte Ereignisse	33	33	33	25
akzeptierte Ereignisse	31	31	28	21
Effizienz	94%	94%	87%	84%

Tabelle 5.2: Effizienz der Antennenuntergruppen zum Gesamtfeld.

Die so gewonnenen Daten stellen damit die Ergebnisse dar, wie sie ein von LOPES30 unabhängiges Experiment messen würde. Die Ergebnisse von jeder Untergruppe wurden als neuer Datensatz behandelt und erneut eine Klassifikation der Radiosignale durchgeführt. Dadurch verringerte sich in den einzelnen Antennenselektionen die Anzahl der Ereignisse im Vergleich zur 3/3-Gruppe, da diese vereinzelt in Bezug auf Kohärenz und gleichzeitigem Radiopuls nicht den Anforderungen an akzeptierte Ereignisse genügten. Des Weiteren wurden, vor allem in der 1/3-3-Gruppe, Radiosignale verworfen, bei denen mehr als 20% der Antennen automatisch gestrichen wurden. Damit soll verhindert werden, dass bei Vergleichen mit dieser 1/3-Gruppe statt der bei den anderen Gruppen üblichen 9 Antennen weniger als fünf Antennen zur Verfügung stehen. Insbesondere bei den Untersuchungen zur Auflösung (Abschnitt 5.3.4) ist es von Bedeutung, dass die ohnehin kleinste Gruppe nicht zu große Abweichungen in der Antennenzahl aufweist. Tabelle 5.2 gibt einen Überblick über die untersuchten und akzeptierten Ereignisse in jeder Gruppe und die Effizienz, mit der die Rekonstruktion eines guten Radiopulses mit den Untergruppen möglich ist. Im Folgenden ist bei dem "Vergleich zweier Gruppen" der Vergleich der Ergebnisse desselben Radiopulses dieser beiden Gruppen gemeint.

5.3.1 Fehlerbetrachtung

Da die Fehler in den Schauerparametern wie Myonenzahl, Einfallswinkel oder Position des Schauerkerns für dasselbe Ereignis konstant bleiben, wurde für den direkten Vergleich der Pulshöhen nur der statistische Fehler der Anpassungsfunktion des CC-Beams verwendet, um direkt einen Zusammenhang der von der Analyseketten ermittelten Werte zu erhalten. Die Abweichung beim Verhältnis dieser Pulshöhen wurde mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung berechnet. Des Weiteren wurde der Fehler der mittleren Entfernung R_{sa} zwischen Antennen und Schauerachse zu $\Delta R_{sa} = 1$ m abgeschätzt (siehe Abschnitt 3.2).

5.3.2 Vergleich von Untergruppen und Gesamtfeld

Um einen Eindruck von der Genauigkeit der durch Untergruppen gewonnenen Ergebnisse im Vergleich zum Gesamtfeld zu erhalten, wurden die Pulshöhen der Ereignisse direkt gegeneinander aufgetragen. Die Werte wurden, ebenso wie der statistische Fehler der Gaußanpassung, dem Analyseprogramm entnommen. Falls sich aufgrund der erneuten Klassifikation kein Wertepaar ergeben hat, wird dies durch einen Eintrag auf der entsprechenden

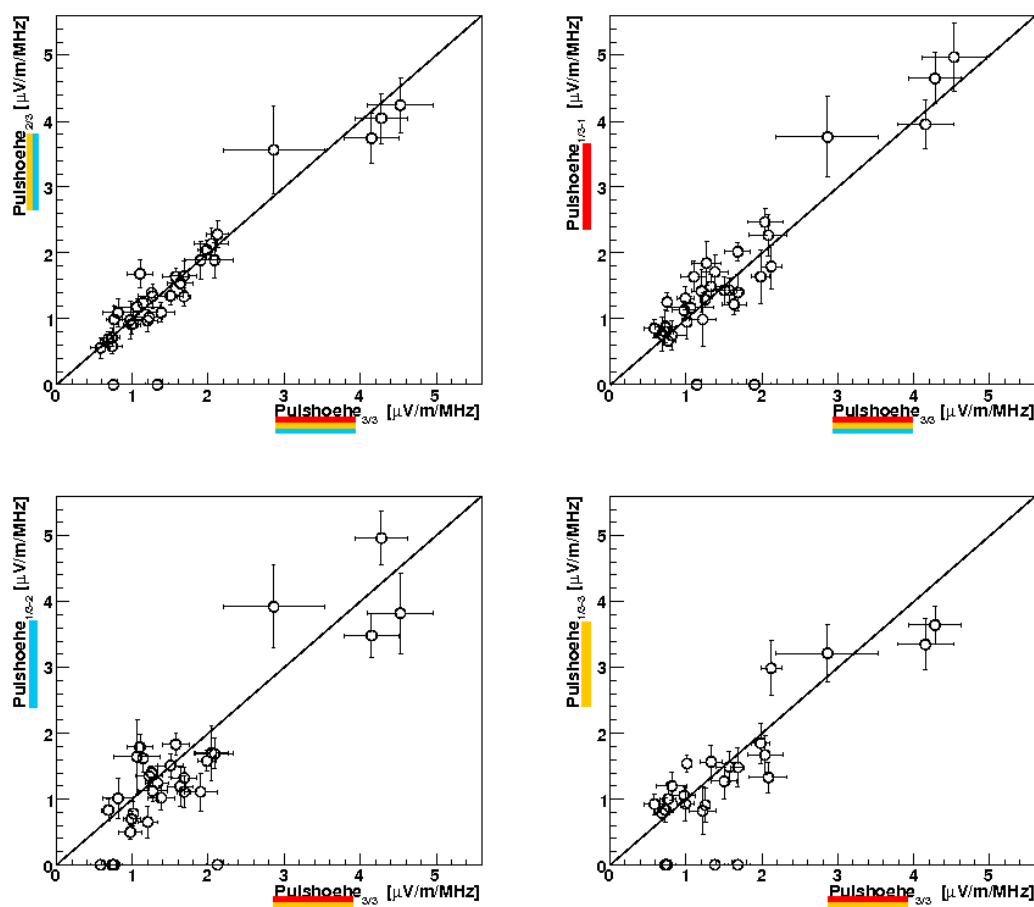


Abbildung 5.3: Vergleich der rekonstruierten Pulshöhen aus den Untergruppen mit den Ergebnissen des Gesamtfeldes. Die Fehlerbalken entsprechen dem statistischen Fehler.

Achse ersichtlich. Die vier Diagramme sind in Abbildung 5.3 dargestellt. Die eingezeichnete Gerade stellt dabei keine Anpassungsfunktion dar, sondern die Winkelhalbierende, um Deckungsgleichheit zwischen zwei Gruppen besser aufzuzeigen. Insbesondere bei der 2/3-Selektion mit 16 Antennen gibt es eine sehr gute Übereinstimmung, und auch das erste Drittel liefert im Rahmen der Fehler ähnliche Ergebnisse wie das Gesamtfeld. Die nachträglich zusammengestellten Selektionen 1/3-2 und 1/3-3 zeigen dagegen etwas größere Abweichungen, liegen aber ebenfalls im Größenbereich der Ergebnisse des Gesamtfeldes.

Zur besseren Darstellung der Differenzen zwischen Untergruppen und Gesamtergebnis wurden die Verteilungen der relativen Pulshöhen beziehungsweise deren natürlicher Logarithmus erstellt (Abbildung 5.4). Es ergibt sich für die 2/3-Selektion (oben links) über den RMS-Wert eine Streuung von 16% bei übereinstimmendem Mittelwert und für die Werte der 1/3-Gruppen Streuungen zwischen 22% (1/3-1) und 37% (1/3-2). Im Mittel sind die rekonstruierten Pulshöhen der 1/3-1-Selektion etwas größer als diejenigen des Gesamtfeldes,

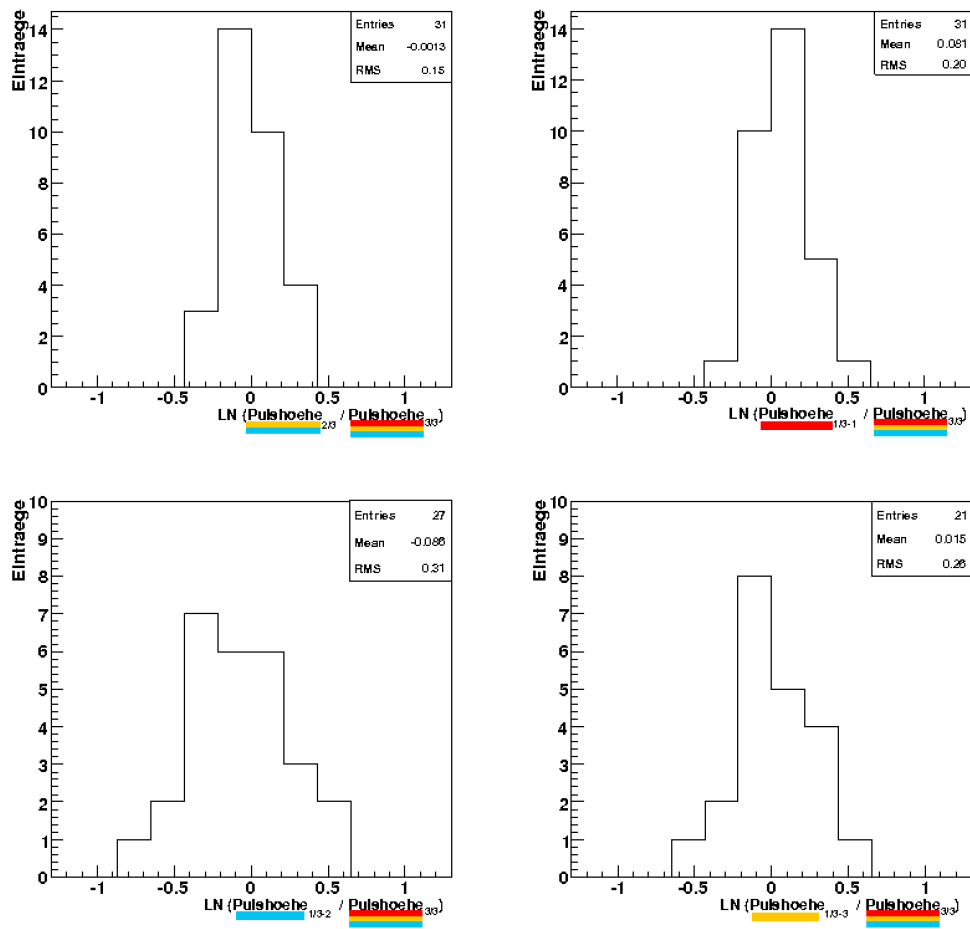


Abbildung 5.4: Verteilung über den natürlichen Logarithmus der relativen Pulshöhen.

Gruppen	3/3	2/3	1/3-3	1/3-2
1/3-1	17,4 m	27,2 m	23,6 m	30,2 m
1/3-2	12,9 m	3,5 m	7,9 m	–
1/3-3	6,5 m	4,4 m	–	–
2/3	9,8 m	–	–	–

Tabelle 5.3: Entfernungen der Schwerpunkte zweier Antennengruppen (siehe Abb. 5.1).

während die der 1/3-2-Selektion darunter liegen.

5.3.3 Abhängigkeit vom Schwerpunkt

Da die LOPES-Antennen unregelmäßig über das KASCADE-Detektorfeld verteilt sind, ist eine Einteilung in vergleichbare Untergruppen mit demselben Schwerpunkt nicht möglich. Tabelle 5.3 gibt einen Überblick über die Entfernungen der Schwerpunkte zueinander. Die Abweichungen untereinander ergeben Unterschiede in der mittleren Entfernung R_{sa} der Antennen zur Schauerachse und damit mögliche Änderungen in der Pulshöhe aufgrund der lateralen Verteilung. Die Analyse der Skalenfaktoren von einzelnen Ereignissen in Kapitel 4 lieferte Werte ab $R_0 = 60$ m. Im Folgenden wird untersucht, ob die laterale Abschwächung bei den hier verwendeten Dimensionen einen Einfluss hat, oder ob die statistischen Fehler in der Pulshöhe wie in den beiden vorherigen Kapiteln dominieren. Dazu wurde für jedes Ereignis und für jede Antennengruppe die mittlere Entfernung R_{sa} zur Schauerachse berechnet. Anschließend wurde die Differenz zur Entfernung $R_{sa,3/3}$ aus allen Antennen gebildet. In Abbildung 5.5 ist der natürliche Logarithmus der relativen Pulshöhen über diese Differenz aufgetragen. Die Fehlerbalken entsprechen den mit gaußscher Fehlerfortpflanzung berechneten statistischen Fehlern. Der Übersichtlichkeit wegen wurde der Fehler der Entfernung $\Delta(R_{sa,1}-R_{sa,2}) = 1.4$ m nicht eingezeichnet. Bei den Darstellungen der Gruppen 2/3 und 1/3-1 (*oben*) nehmen die Unterschiede in der Pulshöhe zum Gesamtfeld mit wachsender Änderung der Entfernungsdifferenz leicht zu.

Jedoch sind, wie in den anderen Abbildungen auch, diese Abweichungen nach beiden Seiten hin (positive und negative y -Werte) vorhanden, so dass kein Zusammenhang zwischen größerer Pulshöhe und geringerer Entfernung zu erkennen ist.

5.3.4 Auflösung der Pulshöhe

Die Einteilung der Antennen in die drei 1/3-Gruppen erlaubt durch Quervergleiche Rückschlüsse auf die Auflösung sowie mögliche systematische Fehler des Experimentes. Bei einem idealen Versuchsaufbau sollten bei vergleichbaren Untergruppen dieselben Ergebnisse für ein Ereignis gemessen werden. Ist dies nicht der Fall, müssen versteckte Systematiken existieren, die anhand der Variation der Pulshöhen abgeschätzt werden können. Dazu

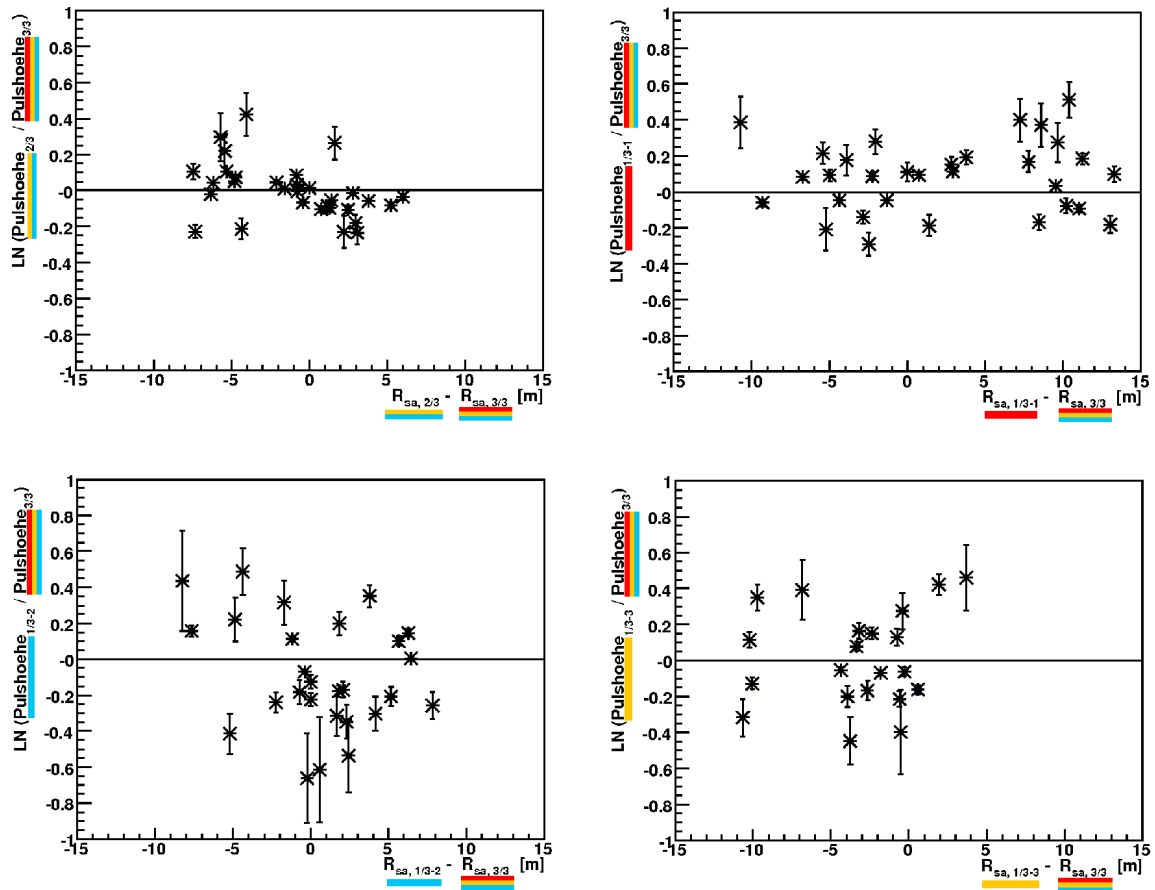


Abbildung 5.5: Darstellung der Pulshöhenänderung über die Entfernungsdifferenz für den Vergleich der Untergruppen mit dem Gesamtfeld (Oben: 2/3 (links), 1/3-1 (rechts); Unten: 1/3-2 (links), 1/3-3 (rechts)).

wurden analog zu Abschnitt 5.3.2 die Pulshöhen der 1/3-Selektionen (1/3-1, 1/3-2 und 1/3-3) miteinander verglichen und die Differenz der Größen betrachtet. Über die Breite der Verteilung des natürlichen Logarithmus der Pulshöhenverhältnisse bekommt man nach einer Korrektur um $\frac{1}{3}$ die Auflösung des Gesamtexperimentes. Dieser Korrekturfaktor ergibt sich aus der um ein Drittel geringeren Anzahl der Antennen (Faktor $\frac{1}{\sqrt{3}}$) und dem dadurch größeren mittleren Abstand zwischen ihnen (ebenfalls Faktor $\frac{1}{\sqrt{3}}$). Da bei den hier verwendeten Gruppen die Antennenzahl aufgrund des automatischen Streichens sowie der Restgruppe 1/3-3 variieren kann, ist das Ergebnis eine obere Abschätzung. Für LOPES erhält man aus dem Vergleich der Selektionen 1/3-1 und 1/3-2 eine Auflösung von 13%, beziehungsweise durch die Kombination mit der 1/3-3-Gruppe Werte von 11% (1/3-1+1/3-3) und 14% (1/3-2+1/3-3) (Abbildung 5.6).

Des Weiteren ergeben sich aus der Verteilung durch die Abweichungen vom Mittelwert Hinweise auf systematische Fehler innerhalb der Teilgruppen. So liegen die Ergebnisse der 1/3-2-Selektion im Mittel deutlich unter den Werten der 1/3-1 Gruppen (15%). Dies stimmt mit den Ergebnissen aus Abschnitt 5.3.2 überein.

5.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Untersuchungen mit den kleineren Antennengruppen haben gezeigt, dass die Antennendichte von LOPES30 ohne große Informationsverluste auf 2/3 reduziert werden kann, wenn der Schwerpunkt des neuen Antennenfeldes in der Nähe des Gesamtfeldes bleibt. Eine Reduktion auf 1/3 ist dagegen stärker von der Wahl dieser Antennen abhängig und sollte eine möglichst gleichmäßige Verteilung aufweisen, um die Abweichungen zwischen den Selektionen klein zu halten.

Bei den Dimensionen des LOPES30-Antennenfeldes verändert eine leichte Variation des Schwerpunktes das Ergebnis nicht signifikant, da der Einfluss der lateralen Abschwächung unter Berücksichtigung der Fehler vernachlässigbar ist. Die Rekonstruktion eines guten Radioereignisses mit dem Analyseprogramm ist im Vergleich zum Gesamtfeld in 94% der Fälle bei den Selektionen 2/3 und 1/3-1, beziehungsweise in etwa 85% bei den Gruppen 1/3-2 und 1/3-3 möglich. Die Abweichungen zum Gesamtfeld liegen für die 2/3-Gruppe mit 16% noch innerhalb der in Abschnitt 3.2 diskutierten statistischen Fehler von etwa 25%.

Für die 1/3 - Gruppen sind diese Abweichungen jedoch größer und nehmen Werte von 22% bis 37% an. Gründe für das unterschiedliche Verhalten der 1/3-Gruppen können in der Variation der Antennenanzahl, der bedeckten Fläche, der größeren Schwerpunktentfernung (bis zu 30 m) und der ungleichmäßigen Verteilung liegen. Da die Pulshöhen der Selektion 1/3-2 im Vergleich zu 1/3-1 systematisch kleinere Werte annehmen und sich diese beiden Gruppen am meisten ähneln, ist auch ein Unterschied in der Kalibration und ein Einfluss der unterschiedlichen Elektronik (siehe Abschnitt 2.2.2) nicht völlig auszuschließen. Dies gilt es weiter zu untersuchen. Des Weiteren konnte durch den Vergleich zweier etwa gleich

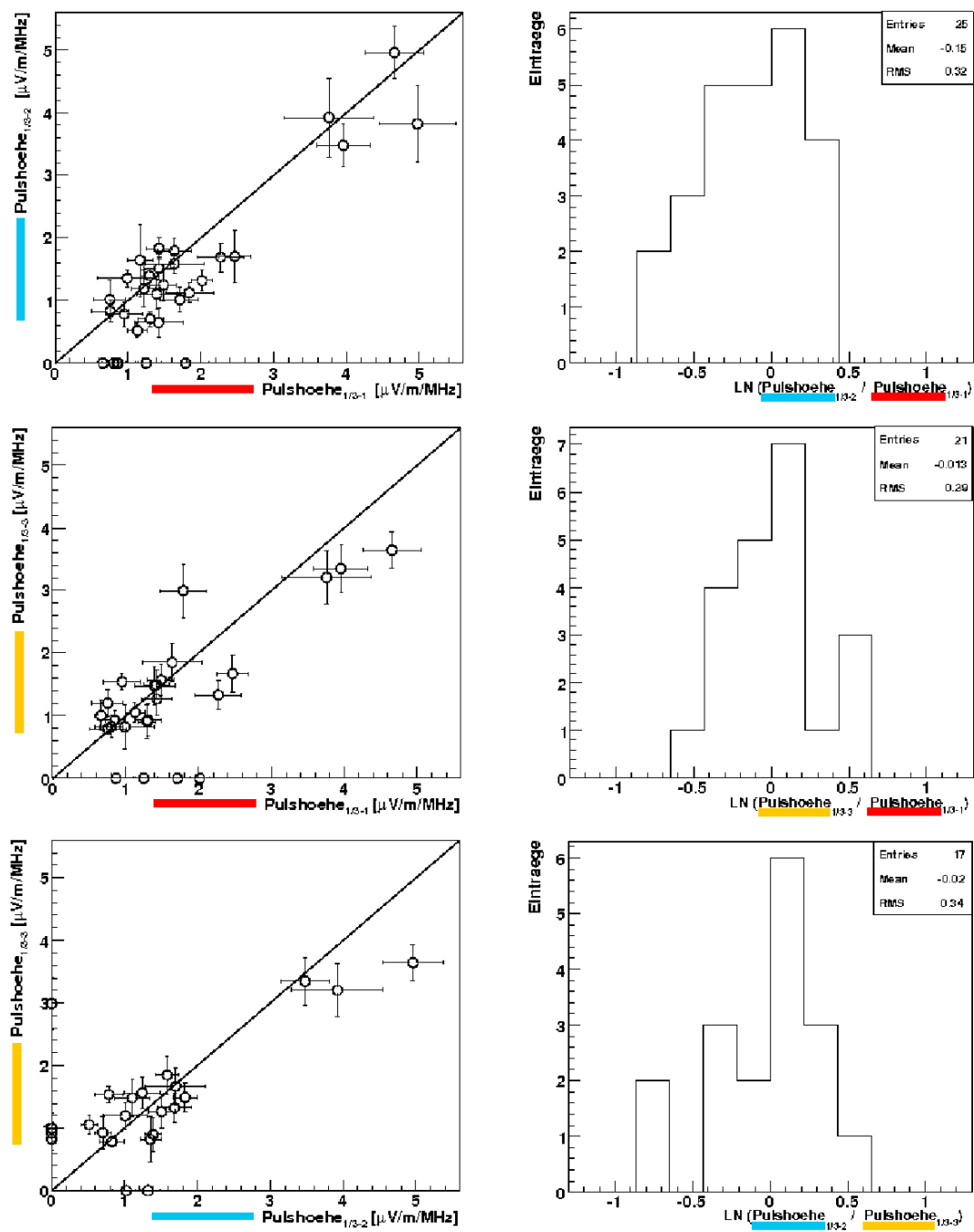


Abbildung 5.6: *links*: Vergleich der rekonstruierten Pulshöhen der 1/3-Gruppen. *rechts*: Verteilung über den natürlichen Logarithmus der Pulshöhenverhältnisse.

großer Untergruppen die Auflösung des LOPES-Experimentes zu einem Wert von 13% bestimmt werden, was im Bereich der systematischen Fehler liegt (siehe 3.2).

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

In den letzten Jahren hat die in ausgedehnten Luftschauern erzeugten Radiokomponente als Messtechnik der hochenergetischen kosmischen Strahlung eine Renaissance erlebt. Die Theorie sagt einen direkten Zusammenhang zwischen dem detektierten Radiopuls und der Primärenergie sowie verschiedenen Schauerparametern voraus. Das LOPES-Experiment im Forschungszentrum Karlsruhe dient als Testfeld für ein im Aufbau befindliches Radiointerferometer in den Niederlanden und für eine großflächige Anwendung der Messtechnik im Pierre-Auger-Observatorium in Argentinien. LOPES detektiert Radiosignale in der Ost/West-Polarisation. Im Rahmen dieser Arbeit wurden mit LOPES30-Daten die grundlegenden Zusammenhänge der Pulshöhe mit spezifischen Schauerparametern untersucht. Als Voraussetzung für eine in Zukunft angestrebte kombinierte Polarisationsmessungen wurde die Rekonstruktionsgenauigkeit des Analyseprogramms bei Variationen der Antennendichte überprüft.

Die Untersuchungen zu den Korrelationen mit Schauergrößen haben gezeigt, dass die auf Abstand und Einfallswinkel korrigierten Pulshöhen einen annähernd linearen Zusammenhang mit der Energie des Primärteilchens haben. Die von den Antennen detektierte Leistung des kohärenten Radiopulses ist somit quadratisch von der Energie abhängig. Damit ist diese Messtechnik insbesondere für Luftschauerexperimente wie das Pierre-Auger-Observatorium interessant, die höchstenergetische Teilchen ab 10^{18} eV detektieren.

Die Abhängigkeit der normierten Feldstärke vom Abstand zur Schauerachse folgt einer Exponentialfunktion. Dies konnte sowohl für den ganzen Datensatz, als auch für einzelne Ereignisse gezeigt werden. Für den Abfall der Funktion, ausgedrückt durch den Skalenfaktor R_0 , ergibt sich für den ganzen Datensatz ein Wert von $R_0 = 200$ m in Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus früheren Analysen. Bei einzelnen Ereignissen variiert der Skalenfaktor von 65 m bis 835 m. Diese Ergebnisse liegen im Größenbereich der durch Simulationen ermittelten Werte, welche die Änderungen mit einer Abhängigkeit des Skalenfaktors vom Zenitwinkel und der Tiefe des Schauermaximums begründen. Diese Theorie gilt es in weiteren Analysen mit mehr Ereignissen zu belegen.

Des Weiteren besteht ein Zusammenhang zwischen den rekonstruierten Pulshöhen der hier

verwendeten Daten und dem geomagnetischen Winkel. Die normierte Feldstärke steigt mit zunehmendem Winkel α zwischen der Einfallrichtung und der Richtung des Erdmagnetfeldes und bestätigt somit Ergebnisse der LOPES10-Daten.

Um zukünftige Polarisationsmessungen ohne Informationsverluste betreiben zu können, wurde die Rekonstruktionsmöglichkeit des Radiopulses bei ausgedünnten Antennenfeldern untersucht. Aus den Analysen folgt, dass eine Verringerung der Antennenzahl auf 2/3 sehr gut möglich ist. Die Rekonstruktion des Radiopulses mit dem verwendeten Analyseprogramm ist im Rahmen der Fehler in 94% der Fälle möglich. Eine weitere Reduktion auf 1/3 der Antennenanzahl ist möglich, allerdings stärker von der Wahl und Anordnung der Antennen abhängig. Um ein Maß für die Güte der Rekonstruktion zu erhalten, wurde mit Hilfe dreier gleich großer Antennengruppen die Auflösung der Pulshöhe bestimmt und ein Wert von 13% ermittelt. Auf Grundlage dieser Ergebnisse werden seit Mitte Dezember 2006 ein Teil der Antennen in Nord/Süd-Polarisation betrieben.

Mit der neuen Anordnung ist es möglich, die gesamte Feldstärke des Radiopulses zu detektieren und die unterschiedlichen Einflüsse der Schauerparameter auf die Pulshöhe besser zu untersuchen. Insbesondere für die Überprüfung und das Verständnis der Simulationen werden die neuen Daten eine wichtige Grundlage bilden. Bei den vorliegenden Analysen hat sich gezeigt, dass durch die geringe Statistik, insbesondere bei großen Winkeln, Energien und Abständen, wichtige physikalische Zusammenhänge nur unzureichend untersucht werden konnten. Nachfolgende Analysen, denen zusätzlich die Daten der KASCADE-Grande-Rekonstruktion zur Verfügung stehen, können durch den größeren Wertebereich neue Aufschlüsse zur Lateralverteilung und Winkelabhängigkeit geben.

Literaturverzeichnis

- [All71] H.R. Allan, *Prog in Elem. Part. and Cos. Ray Phys.*, Vol 10:171, 1971
- [All75] O.C. Allkofer, *Introduction to cosmic radiation*, Verlag Carl Thiemig München, 1975T
- [Ant02] T. Antoni et al.
- [Ant03] T. Antoni et al. *Nucl. Instr. Methods A*, 513:490, 2003
- [Ard05] D. Ardouin et al. *astro-ph/0505442*, 2005
- [Ard06] D. Ardouin et al. *Astroparticle Physics*, 26:341 2006
- [Ask62] G.A. Askaryan, *Soviet Phys. J. of Exp. and Theo. Physics*, 14:441, 1962
- [Ask65] G.A. Askaryan, *Soviet Phys. J. of Exp. and Theo. Physics*, 21:658, 1965
- [Aug39] P. Auger et al. *Reviews of Modern Physics*, 11:288, 1939
- [Bad06] A.F. Badea et al. *FZKA report 7229*, 2006
- [Bah06] L. Bähren, H. Falcke, A. Horneffer, S. Lafebre, A. Nigl, *The LOPES-Tools Software package manual*, 2006
- [Bel78] A.R. Bell, *Mon. Notices of Roy. Astr. Soc.*, 182:147, 1978
- [Bie87] P.L. Biermann und P.A. Strittmatter, *Astroph. J.*, 322:643, 1987
- [Bla78] R.D. Blandfort und J.P. Ostriker, *Astroph. J.*, 221:L29, 1978
- [Boz01] H. Bozdog et al. *Nucl. Instr. Methods A*, 465:455, 2001
- [But04] C. Büttner, *FZKA report 6948*, 2004
- [cer06] LHC homepage, <http://lhc.web.cern.ch/lhc/>, 15.06.2006
- [Ces80] C. Cesarsky, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 18:289, 1980
- [Che86] K.S. Cheng, C. Ho und M. Ruderman, *Astroph. J.*, 300:500, 1986

- [Cow73] R. Cowsik und L. Wilson, *Proc 13th ICRC*, Denver, 1:577, 1973
- [Deu06] M. Deutsch, *Reduktion von elektromagnetischen Störungen durch Szintillationsdetektoren bei der gleichzeitigen Messung ausgedehnter Luftschauer mit Radio-Antennen*, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2006
- [Dol02] P. Doll et al. *Nucl Instr. Methods A*, 488:517, 2002
- [Dru83] L.O'C. Drury, *Rep Prog Phys*, 46:973, 1983
- [Eng99] J. Engler et al. *Nucl. Instr. Methods A*, 427:528, 1999
- [Eng03] J. Engler et al. *Nucl. Instr. Methods A*, 513:490, 2003
- [Fal03] H. Falcke und P. Gorham, *Astroparticle Physics*, 19:477, 2003
- [Fal05] H. Falcke et al. *Nature*, 435:313, 2005
- [Gem06] H. Gemmeke et al. *Intern. Journal of Mod. Physics A*, 21:242, 2006
- [Gre66] K. Greisen, *Physical Review Letters*, 16:748, 1966
- [Hak06] A. Hakenjos, *FZKA report 7219*, 2006
- [Hes12] V.F. Hess, *physikalische Zeitschrift*, 13:1084, 1912
- [Hor04] J.R. Hörandel, *Astroparticle Physics*, 21:241, 2004
- [Hor06] A. Horneffer, *Measuring Radio Emission from Cosmic Ray Air Showers with a Digital Radio Telescope*, Dissertation, Universität Bonn, 2006
- [Hor07] J.R. Hörandel, *astro-ph/0702370*, 2007
- [Hue03] T. Huege und H. Falcke, *Astronomy & Astrophysics*, 412:19, 2003
- [Hue04] T. Huege, *Radio Emission from Cosmic Ray air Showers*, Dissertation, Universität Bonn, 2004
- [Hue05] T. Huege und H. Falcke, *Astroparticle Physics*, 24:116, 2005
- [Jel65] J.V. Jelley et al. *Nature*, 205:327, 1965
- [Kna97] J. Knapp, *FZKA report 5970*, 1997
- [Lon81] M.S. Longair, *High Energy Astrophysics*, Cambridge University Press, 1981
- [Nav04] G. Navarra et al. *Nucl. Instr. Methods A*, 518:207, 2004
- [ngdc06] National Geophysical Data Center (NGDC) homepage, <http://www.ngdc.noaa.gov>, 2006

-
- [Rac93] J.P. Rachen und P.L. Biermann, *Astron. Astrophys.*, 272:161, 1993
- [Rot03] H. Röttgering, *New Astron. Rev.*, 47:405, 2003
- [Sch96] H. Schieler, *Konzeption, Entwicklung und Test des lokalen Datenerfassungssystems für das strukturierte Detektor-Array von KASCADE*, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1996
- [Sig03] G. Sigl, *Annals Phys.*, 303:117, 2003
- [Tak03] M. Takeda et al. *Astroparticle Physics*, 19:447, 2003
- [Ulr03] H. Ulrich. *FZKA report 6952*, 2003
- [Wat04] A.A. Watson et al. *Nucl. Instr. Methods A*, 523:50, 2004
- [Zat66] G.T. Zatsepin und V.A. Kuz'min, *J. of Exp. and Theo. Physics*, 4:78, 1966

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben und am Aufbau und Betrieb der Experimente beteiligt sind.

Mein besonderer Dank gilt:

- Herrn Priv. Doz. Dr. Jörg Hörandel für die Übernahme des Referates sowie die Betreuung der Arbeit.
- Herrn Prof. Dr. Michael Feindt für die Übernahme des Korreferates.
- Herrn Prof. Dr. Johannes Blümer für die Ermöglichung dieser Arbeit am Institut für Experimentelle Kernphysik.
- Herrn Dr. Andreas Haungs für seine Unterstützung und Ratschläge.
- Herrn Dipl. Phys. Steffen Nehls für die gute Betreuung, Diskussionen und Hilfsbereitschaft.
- Herrn Dr. Tim Huege für seine vielen Anregungen und motivierenden Gespräche.
- Frau Dipl. Phys. Gina Isar und Herrn Adrian Hakenjos für die Diskussionen und kurzweiligen Unterhaltungen.
- Herrn Dr. Holger Ulrich und Dr. Jürgen Wochele für ihre Hilfsbereitschaft bei allen erdenklichen Computerangelegenheiten.
- allen anderen Mitgliedern der Kollaborationen für ihre Hilfe bei Fragen und Problemen.

Ganz besonders möchte ich meiner Familie und meinem Freund für ihre Geduld und Unterstützung danken. Sie haben mir immer den Rücken gestärkt und an mich geglaubt. Danke!

ERKLÄRUNG

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen angefertigt habe.

Eva Bettini

Karlsruhe, den 8. Februar 2007