

Analyse von Radiodaten einer Prototypantenne im Tunka-133-Experiment

Radio Data Analysis
of a Prototype Antenna
at the Tunka-133 Experiment

Bachelorarbeit
von

Jan Oertlin

Karlsruher Institut für Technologie - IEKP

Erstgutachter:
Betreuender Mitarbeiter:

Prof. Dr. Johannes Blümer
Dr. Andreas Haungs

August 2011

Kurzbeschreibung

Zur Messung hochenergetischer kosmischer Strahlung werden verschiedene Detektionsmethoden eingesetzt. Ab Primärenergien von ca. 10^{14} eV werden ausgedehnte Luftschauer detektiert, welche durch Kernreaktionen des Primärteilchens mit Atomkernen der Erdatmosphäre entstehen. Zu den Luftschauer-Detektionsmethoden zählt auch die Messung der Radioemission im MHz-Frequenzbereich. Um diese relativ neue Methode weiterzuentwickeln, wurden Experimente wie LOPES oder die Radioerweiterung AERA am Pierre-Auger-Observatorium geplant und gebaut, und die Messungen werden mit Signalen von Teilchendetektoren oder Fluoreszenz-Teleskopen verglichen. Für einen weiteren, neuartigen Vergleich wurde eine Prototyp-Antenne beim Tunka-133-Experiment installiert, bei dem die Cherenkov-Licht-Emission ausgedehnter Luftschauer gemessen wird.

Um herauszufinden, ob der Standort des Tunka-Tals zur Messung der Radioemission von ausgedehnten Luftschauern geeignet ist, wurden im Rahmen dieser Arbeit die Messdaten ca. eines Jahres dieser Antenne analysiert. Dabei wurden, neben vielen Störsignalen, einige Radiosignale gefunden, welche sehr wahrscheinlich direkt durch Luftschauer verursacht wurden. Hierzu wurden verschiedene elektronische Störquellen ausgeschlossen. Für einen Datensatz von ca. 70 Ereignissen wurden Zusammenhänge zum Schauerachsenabstand, Primärenergie und geomagnetischen Winkel untersucht. Der geomagnetische Winkel beschreibt den Winkel zwischen Schauerachse und Erdmagnetfeld. Dabei stellte sich heraus, dass es einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Pulshöhe des Radiosignals und dem Abstand zur Schauerachse gibt. Ebenso wurde ein Zusammenhang zur Primärenergie festgestellt. Jedoch wurde bisher noch keine Abhängigkeit zum geomagnetischen Winkel gefunden. Eine Abhängigkeit ist zu erwarten, da die Radioemission hauptsächlich durch die Ablenkung der geladenen Teilchen des Schauers im Erdmagnetfeld verursacht wird. Bei Experimenten wie LOPES wurde dieser Zusammenhang beobachtet. Es könnte sein, dass durch zu geringe Statistik dieser Zusammenhang bei der Prototyp-Antenne bei Tunka-133 noch nicht gesehen wurde. Ein Vergleich der Amplituden der Radiosignale zwischen Experiment und Monte-Carlo-Simulationen mit REAS3 ergab eine Übereinstimmung. Außerdem ist der Abfall der Signalstärke zu größer werdenden Abständen zur Schauerachse hin bei Simulation und Experiment im gleichen Bereich wie beim LOPES-Experiment.

Somit scheint das Tunka-133-Experiment für die Radiomessung hochenergetischer Luftschauer ein geeigneter Standort zu sein.

Abstract

Measurements of ultra-high-energy cosmic rays are possible in various ways. For energies higher than 10^{14} eV cosmic rays are measured indirectly via air showers by several detection methods. The air showers originate from nuclear reactions of the primary particles with nuclei of the atmosphere. One of these detection methods is the radio measurement in the MHz frequency range. For further development of the radio measurement technique, experiments like LOPES and AERA were planned and built. The data of these experiments are compared with signals in particle detectors and fluorescence telescopes. For another comparison, a prototype antenna has been installed at the Tunka-133-experiment. Tunka-133 measures cosmic air showers via the emission of Cherenkov-light.

To figure out if the location of Tunka-133 is suited for measurements of ultra-high-energy cosmic rays with radio detectors, radio data of almost one year have been analyzed within the scope of this thesis. A lot of noise signals have been found. But also radio signals most likely originating from cosmic air showers could be identified. Possible disturbances due to electronics could be excluded. For a dataset of nearly 70 events, correlations between the shower core position, primary energy and the geomagnetic angle have been studied. The geomagnetic angle describes the angle between shower axis and Earth's magnetic field. An expected correlation of the amplitude of the radio signal with the distance to the shower axis and correlation with the primary particle energy was found. So far, no correlation with the geomagnetic angle was found, which probably is caused by the low statistics. A correlation is expected, because the radio emission is mainly caused by deflection of charged particles of the air shower in the atmosphere. At experiments like LOPES these correlations have already been observed. Moreover, a rough agreement of the measured radio signal amplitude with expectations from Monte Carlo Simulations with REAS3 could be verified. In addition, the decrease of signal power with increasing shower axis distance seen by the antenna and the simulations are compatible with the results of LOPES.

Therefore, the Tunka-133-experiment seems to be suited for radio detection of ultra-high-energy cosmic rays.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Kosmische Strahlung	3
2.1	Geschichtliches	3
2.2	Massenspektrum	3
2.3	Energiespektrum	4
2.4	Ausgedehnte Luftschauer	6
3	Radioemission von Luftschauern	9
3.1	Emissionsmechanismen	9
3.2	Experimente	9
4	Experimenteller Aufbau	11
4.1	Das Tunka-133-Experiment	11
4.2	Die SALLA-Antenne	13
5	Analyse der Radiodaten	15
5.1	Suche nach Radiopulsen	16
5.1.1	Vorgehensweise	16
5.1.2	Bestimmung der Ankunftszeiten der Radiosignale und deren Hin- weise auf Luftschauer	19
5.2	Ausschluss elektronischer Quellen der Signale	20
5.2.1	Tests mit Kalibrations-LEDs	22
5.2.2	Analyse des Datensatzes ohne angeschlossene Antenne	22
5.3	Zusammenhang mit Schauerparametern	24
5.4	Vergleich zwischen Simulation und Experiment	26
5.4.1	Vergleich der Verhältnisse der Amplituden	26
5.4.2	Vergleich der Lateralverteilung	27
6	Zusammenfassung und Ausblick	29
	Literaturverzeichnis	i

1 Einleitung

Bereits 1912 wurde die kosmische Strahlung von dem österreichischen Physiker Viktor F. Hess entdeckt [Gru05]. Diese ist bis heute ein wichtiges Forschungsgebiet im Bereich der Astroteilchenphysik, da unter anderem deren Entstehungsmechanismen noch nicht vollständig verstanden sind. Vor der Teilchenbeschleuniger-Ära war die kosmische Strahlung die einzige Möglichkeit, Informationen über die Elementarteilchen und deren Wechselwirkungen bei hohen Energien zu gewinnen und stellte einen natürlichen Beschleuniger zur Verfügung. Auch heute ist und bleibt die kosmische Strahlung die einzige Möglichkeit, Wechselwirkungsmodelle bei höchsten Energien zu überprüfen und zu erforschen, da erdgebundene Beschleuniger nicht in ihren Energiebereich vordringen können. So decken die Teilchen ein Energiespektrum von etwa 10^9 eV bis über 10^{20} eV ab, wobei vor allem das Augenmerk auf Teilchen mit sehr hohen Energien gelegt wird, da für diese der Ursprung und die Beschleunigungsmechanismen noch weitgehendst unbekannt sind [BEH09, HRR03].

Bei der Detektion der kosmischen Strahlung wird zwischen direkter und indirekter Messung unterschieden. Die direkte Messung ist nur am Rand bzw. außerhalb der Erdatmosphäre möglich und auch nur bei Energien bis ca. 10^{14} eV. Oberhalb dieser Energie ist der Fluss zu gering. Deshalb wird bei höheren Energien auf die indirekte Messung zurückgegriffen. Hier werden sogenannte ausgedehnte Luftschauer detektiert. Diese werden erzeugt, wenn Teilchen der kosmischen Strahlung mit Atomkernen der Erdatmosphäre wechselwirken. Dabei wird ein Schauer aus Sekundärteilchen erzeugt, welcher auf unterschiedliche Weise beobachtet werden kann. So bieten sich z.B. Teilchendetektoren, Cherenkov-Teleskope, Fluoreszenz-Teleskope oder Radioantennen an [Gru05]. Letztere Nachweismethoden werden durch die große Anzahl an Elektronen und Positronen im Luftschauer ermöglicht. Cherenkov-Teleskope messen die Cherenkov-Strahlung, die durch die geladene Komponente des Luftschauers erzeugt wird. Das Fluoreszenz-Licht wird von Stickstoffmolekülen der Erdatmosphäre emittiert, welche zuvor durch geladenen Teilchen des Luftschauers angeregt wurden. Die durch das Magnetfeld der Erde abgelenkten Elektronen und Positronen erzeugen die Radiostrahlung. Der Vorteil der Radiomessung ist, dass die Antennen im Vergleich zu den Cherenkov- oder Fluoreszenz-Teleskopen kaum vom Wetter abhängig sind und nahezu rund um die Uhr messen können [SWR08]. Lediglich hohe atmosphärische elektrische Felder, wie sie z.B. bei Gewittern auftreten, beeinflussen die Detektion [AAB⁺11]. Ebenso wird die Messung durch Störsignale in dichter besiedelten Regionen erschwert.

Die Radiomessung ist in den letzten Jahren durch die gestiegene Leistungsfähigkeit von elektrischen Bauteilen und Computern wieder wichtiger geworden, nachdem sie nach ihrer Entdeckung in den 1960er Jahren fast in Vergessenheit geriet. So hat sich z.B. das

1 Einleitung

LOPES¹-Experiment [FAB⁺05] im KASCADE²-Grande-Feld [AAB⁺03, AAB⁺10] am Campus Nord des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) zu einem eigenständigen Experiment entwickelt. Außerdem wird in Argentinien beim Pierre-Auger-Observatorium ein zukünftig rund 150 Antennen umfassendes Experiment aufgebaut [Hue10]. Dort werden Luftschauer zusätzlich durch Teilchendetektoren und Fluoreszenz-Teleskope beobachtet [DAA⁺07].

Um das Potential der Radiodetektion mit dem der Cherenkov-Licht-Detektion von Luftschauern zu vergleichen, wurde im August 2009 beim Tunka-133-Experiment eine Prototyp-Antenne aufgebaut. Da sowohl die Radio- als auch die Cherenkovemission sensitiv auf die longitudinale Entwicklung des Luftschauers sind, besteht Interesse darin, die Radiodetektion mithilfe der Cherenkov-Detektion zu kalibrieren. Insbesondere könnte damit die Frage geklärt werden, ob mit der Radiomessung X_{\max} bestimmt werden kann. Das Experiment befindet sich im Tunka-Tal, in der Nähe des Baikalsees, in Sibirien. Es besteht aus einem Array mit 133 Photomultiplier, welche die Cherenkov-Licht-Emission der Teilchenschauer detektieren [BBB⁺11, BBC⁺09, BCG⁺07]. Mit den Daten der installierten Antenne wird im Rahmen dieser Arbeit untersucht, ob sich dieser Standort zur Radiomessung hochenergetischer kosmischer Strahlung eignet. Insbesondere wurde der Frage nachgegangen, ob es einen Zusammenhang zu Luftschauern gibt, welche durch das Tunka-133-Experiment nachgewiesen wurden.

Die Analyse der Radiodaten umfasst die Bestimmung der Ankunftszeiten der Radiosignale und deren Korrelation mit Luftschauer sowie den Ausschluss möglicher elektrischer Störquellen. So konnte gezeigt werden, dass spezifische Radiosignale sehr wahrscheinlich direkt durch Luftschauer verursacht wurden. Desweiteren werden Zusammenhänge zwischen dem Radiosignal und dem Schauerachsenabstand, der Primärenergie und dem geomagnetischen Winkel untersucht. Außerdem wird die Messungen mit REAS3-Simulationen der Radioemission der Luftschauer verglichen. So wird untersucht, ob die Signalstärken mit den Messdaten vergleichbar sind, und wie das Signal zu größer werdendem Abstand zur Schauerachse hin abfällt.

¹LOFAR PrototypE Station

²KARlsruhe Shower Core and Array DETector

2 Kosmische Strahlung

2.1 Geschichtliches

Bei Ballonflügen 1912 stellte der österreichische Physiker Viktor F. Hess fest, dass der Ionisierungsgrad der Luft nicht wie erwartet mit zunehmender Höhe abnimmt, sondern ansteigt. Damals war nur die natürliche Radioaktivität der Erde bekannt und Hess nannte daher diese neue Art von Strahlung, welche von außerhalb der Erdatmosphäre kommen musste, *Höhenstrahlung* bzw. *kosmische Strahlung*. Dieses Ergebnis wurde zwei Jahre später bestätigt. Nach der Entdeckung der kosmischen Strahlung wurde durch weitere Forschung festgestellt, dass die Strahlung aus geladenen Teilchen besteht. So wurde auch das von Dirac postulierte Elementarteilchen, das Positron, in den Sekundärteilchen eines Luftschauers 1932 mittels einer Nebelkammer von dem Amerikaner Carl David Anderson nachgewiesen [Gru05].

Zu dieser Zeit war die kosmische Strahlung die einzige Möglichkeit, Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen zu untersuchen. Auch heute gilt dies noch für hohe Energien, die nicht von neuen Teilchenbeschleunigern, wie z.B. dem LHC, erreicht werden.

2.2 Massenspektrum

Die kosmische Strahlung besteht zum größten Teil aus Protonen, ca. 85%, gefolgt von Helium-Kernen mit rund 12%. Die verbleibenden drei Prozent beinhalten schwerere Elemente, Gammastrahlung und andere Teilchen [Gru05]. Die genaue Zusammensetzung der Höhenstrahlung ist nur bei Energien bis ca. 10^{14} eV bekannt, da nur hier direkte Messungen vorgenommen werden können. Geht man zu höheren Energien über, nimmt der Fluss der Teilchen so stark ab, dass diese nur über indirekte Messungen auf der Erde zugänglich sind. Dies erschwert auch die Bestimmung der Masse des Primärteilchens, welche durch Vergleiche von Luftschauermessungen mit Simulationen bestimmt werden muss. Das Ergebnis hängt allerdings vom verwendeten Wechselwirkungsmodell ab, weshalb dieses Verfahren noch relativ hohe systematische Unsicherheiten hat.

Es wurde festgestellt, dass die Elementhäufigkeit der kosmischen Strahlung ähnlich der des Sonnensystems ist. Einige Elemente treten in der kosmischen Strahlung häufiger auf als die des Sonnensystems. Dass Lithium, Beryllium und Bor unter den kosmischen Teilchen häufiger vorkommen als im Sonnensystem, lässt sich durch Spallation erklären. Schwerere Elemente wie Kohlenstoff oder Sauerstoff sind hiervon primär betroffen. Ebenso wird durch das relativ häufige Eisen ein vermehrtes Auftreten von Elementen unterhalb der Ordnungszahl 26 begünstigt [Gru05].

2 Kosmische Strahlung

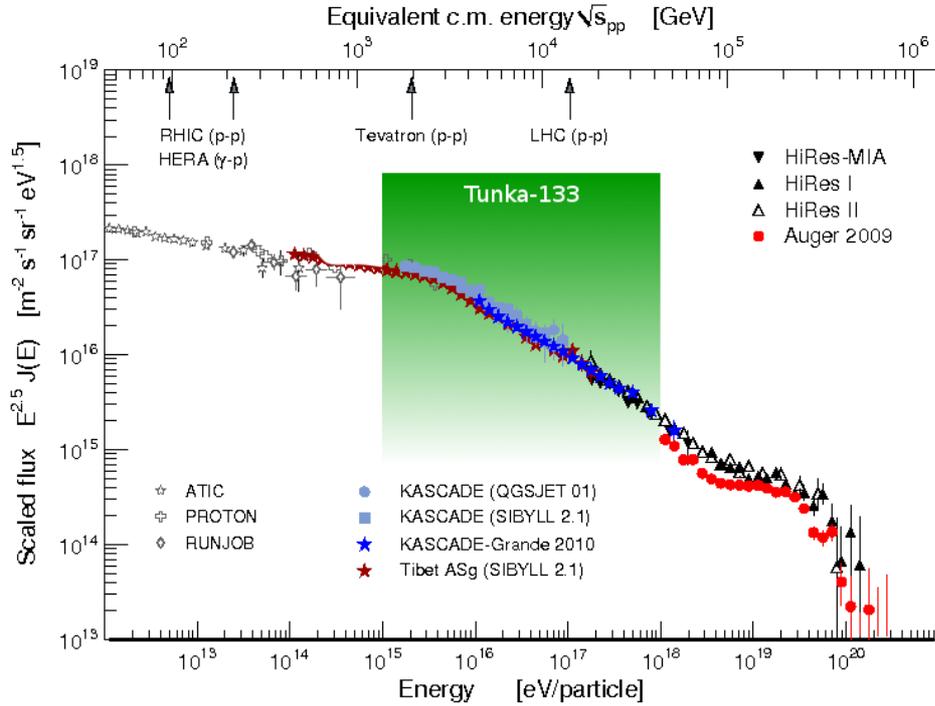


Abbildung 2.1: Energiespektrum der kosmischen Strahlung: Wird der Fluss der kosmischen Strahlung mit $E^{2,5}$ multipliziert, so kann man die markanten Stellen des Spektrums deutlicher erkennen [nach BEH09].

2.3 Energiespektrum

Das Energiespektrum der kosmischen Teilchen kann durch ein Potenzgesetz mit einem Spektralindex γ beschrieben werden:

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

Dieser bleibt über mehrere Größenordnungen nahezu konstant und ändert sich nur an wenigen markanten Punkten. Der erste liegt im Bereich von 10^{15} eV bis $5 \cdot 10^{15}$ eV und wird als „Knie“ bezeichnet. Dort nimmt der Fluss der kosmischen Strahlung stärker ab und der Index γ ändert sich von ungefähr 2,7 auf ca. 3,0. Die zweite starke Änderung findet bei einer Energie um $5 \cdot 10^{18}$ eV statt. Dort flacht das Spektrum wieder ab; dies wird als „Knöchel“ bezeichnet. Diese Namensgebung wird ersichtlich, wenn das ganze Spektrum mit $E^{2,5}$ skaliert (siehe Abbildung 2.1) wird [Gru05]. Bei noch höheren Energien fällt das Spektrum stark ab.

Das Energiespektrum bis ca. 1 GeV wird hauptsächlich durch die Sonne bestimmt. So trägt der Sonnenwind vor allem Protonen, Alpha-Teilchen und Elektronen zu uns. Außerdem verringert das Magnetfeld der Sonne die Zahl der auf der Erde eintreffenden galaktischen Teilchen. Bedingt durch Sonnenaktivitäten und deren 11jährigem Zyklus,

ändert sich bei diesen Energien leicht der Fluss der kosmischen Strahlung [Gru05].

Partikel mit Energien bis 10^{15} eV haben ihren Ursprung hauptsächlich in unserer Galaxie. Das Magnetfeld der Milchstraße ist hier noch stark genug, um die Teilchen innerhalb der Galaxie zu halten. Da Lorentz- und Zentrifugalkraft bei Kreisbewegungen für geladene Teilchen gleich sind, lässt sich aus $p = Ze r B$ (für $B \perp v$) der Radius r abschätzen (p ist der Impuls, Ze die Ladung und B die Magnetfeldstärke). Die Stärke eines großräumigen galaktischen Magnetfeldes bewegt sich um die Größenordnung 10^{-10} T. Somit ergibt sich für Energien bis 10^{15} eV ein Radius für die Kreisbahn der Teilchen (Gyrationsradius) von ca. 5 pc. Somit bleibt ein Teil der Teilchen in der Galaxie und hat auch keine ausgezeichnete Herkunftsrichtung. Da die Verweildauer der Kerne mehrere Tausend Jahre ist, steigt ab dieser Energie die Wahrscheinlichkeit, dass die Teilchen beispielsweise durch Inhomogenitäten des Magnetfeldes aus der Milchstraße entweichen [Gru05]. Der Beschleunigungsmechanismus bis zu diesen Energien kann durch die Fermi-Beschleunigung zweiter Art erklärt werden. Dabei wird die Energie der Ionen in den Schockfronten von Supernovaeüberresten erhöht. Diesen Effekt hatte der italienische Physiker Enrico Fermi bereits 1949 postuliert, weshalb er nach ihm benannt wurde [Fer49].

Für das Abfallen des Flusses im Bereich des Knies gibt es zwei Erklärungsansätze. Zum einen reicht die Energie dieser Teilchen aus, die Galaxie zu verlassen. So wäre es z.B. möglich, dass ein Teil der Protonen nicht mehr in der Milchstraße gehalten werden und so das Knie erzeugt wird. Das bedeutet aber auch, dass der Fluss der Teilchen, die extragalaktischer Natur sind, viel kleiner ist, als der Fluss der Teilchen, die aus der Milchstraße entweichen. Ab welcher Energie die Teilchen die Galaxie verlassen hängt allerdings von der Ladungszahl der Ionen ab; so ist das Knie für Eisen z.B. bei höheren Energien zu erwarten. Zum anderen kann die maximale Beschleunigung durch Schockfronten erreicht sein, wodurch das Spektrum wie erwartet abfällt. Deshalb kann das Knie durch die Änderung der Beschleunigungsprozesse bedingt sein [Gru05]. Dies herauszufinden war eine der Aufgaben des KASCADE-Grande-Experiments [AAB⁺10].

Bei Energien oberhalb von 10^{15} eV ist der Beschleunigungsmechanismus weitestgehend unbekannt. Seine Erforschung wird erschwert durch den geringen Teilchenfluss bei hohen Energien. Ebenso sind hier die galaktischen Magnetfelder noch groß genug, dass durch die Ankunftsrichtung nicht auf den Ursprung der Strahlung geschlossen werden kann. Zum besseren Verständniss in diesem Energiebereich wurde daher das Tunka-133-Experiment aufgebaut, das kosmische Strahlung in einem ähnlichen Energiebereich wie KASCADE-Grande misst, nämlich von 10^{15} eV bis 10^{18} eV, jedoch mit einer anderen Technik [BCG⁺07].

Das Abflachen des Spektrums im Bereich des Knöchels ist vermutlich durch eine extragalaktische Komponente bedingt. So sind die Teilchen mit Energien um und größer als $5 \cdot 10^{18}$ eV schnell genug, um aus den Galaxien zu entweichen. Ab einer Energie von ca. 10^{20} eV werden z.B. Protonen so schwach von galaktischen- und extragalaktischen Magnetfeldern abgelenkt, dass man auf deren Ursprung schließen kann [Gru05]. So gibt es Hinweise auf extragalaktischen Ursprung aus näheren Galaxien [PAC07].

Desweiteren ist das Abfallen des Spektrums um $6 \cdot 10^{19}$ eV interessant. Dort reicht die Energie der Protonen theoretisch aus, um mit der kosmischen Hintergrundstrahlung über eine Δ^+ -Resonanz wechselzuwirken. Dabei verlieren die Teilchen genügend Energie, um den Fluss in diesem Bereich deutlich abzusenken. Diesen Effekt haben die Physiker Ken-

2 Kosmische Strahlung

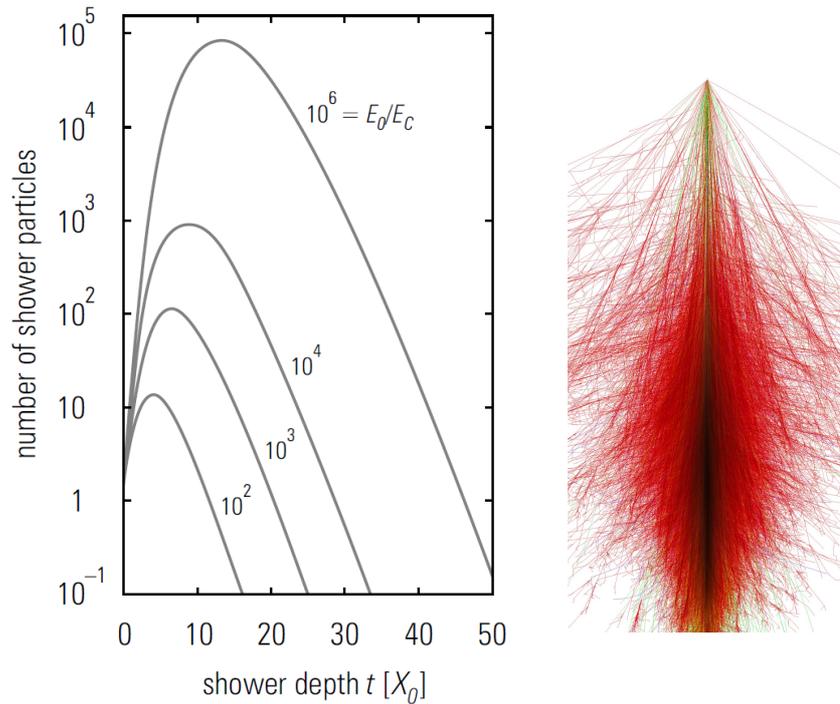


Abbildung 2.2: Die Ausbildung des Schauermaximums des elektromagnetischen Teiles für unterschiedliche Primärenergien E_0 . X_0 ist in $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$, also in Einheiten der Säulendichte der Atmosphäre (links) [Gru05].

CORSIKA-Simulation einer Teilchenkaskade, ausgelöst durch einen Eisenkern mit 10 TeV. Rot ist die elektromagnetische Komponente dargestellt, grün die myonische- und blau die Hadronen. Je dunkler die Farben, desto höher die Teilchendichte (rechts) [Sch11].

neth Greisen, Georgiy Zatsepin und Vadim Kuzmin 1966 vorhergesagt, weshalb er auch *GZK-cut off* genannt wird. Damit boten sie eine Erklärung, weshalb kaum kosmische Strahlung oberhalb von $6 \cdot 10^{19}$ eV gemessen wird. Durch die Tatsache, dass die mittlere freie Weglänge eines Wasserstoffkernes bis zur Wechselwirkung mit der Hintergrundstrahlung rund 10 Mpc beträgt und die Milchstraße einen Durchmesser von nur ungefähr 30.000 pc besitzen, ist es sehr wahrscheinlich, dass diese Teilchen extragalaktischer Natur sind [Gru05]. Das Abfallen des Flusses wurde durch das Pierre-Auger-Observatorium bestätigt [PAC08]. Andererseits könnte der Grund für das Abfallen des Spektrums darin liegen, dass die extragalaktischen Quellen ihre maximale Beschleunigung erreicht haben.

2.4 Ausgedehnte Luftschauer

Bei Energien über 10^{15} eV müssen aufgrund des geringen Flusses der Primärteilchen die Messungen indirekt erfolgen. Dabei werden die Sekundärteilchen auf der Erdoberfläche gemessen, die durch die kosmische Strahlung erzeugt werden. Trifft ein Teilchen der Höhenstrahlung auf ein Teilchen der Erdatmosphäre, erzeugt dieses eine Kaskade an

Sekundärteilchen. Diese wird *ausgedehnter Luftschauer* genannt (siehe Abbildung 2.2).

Der Schauer besteht aus drei Komponenten: der hadronischen-, elektromagnetischen- und der myonischen Komponente. Die Erstere ist vor allem für die Schauerbildung entscheidend, da diese einen Großteil der Energie transportiert. Zahlenmäßig macht sie nur einen kleinen Teil des Schauers aus und kommt hauptsächlich im Frühstadium vor. Durch Wechselwirkungen und Zerfälle der Hadronen entstehen viele Sekundärteilchen, aus denen die anderen beiden Komponenten hervorgehen. Der myonische Teil des ausgedehnten Luftschauers, entstanden aus dem Zerfall von geladenen Kaonen und Pionen, trägt nur zu 10% bei, welcher jedoch die größte Reichweite hat. Aus dem Verhältnis von der myonischen- zur elektromagnetischen Komponente kann man auf das Entwicklungsstadium des Schauers schließen. Der elektromagnetische Anteil, der auch den größten Teil der Teilchenkaskade ausmacht, besteht aus Elektronen, Positronen und Gamma-Quanten. So entstehen aus hochenergetischen Photonen durch Paarbildung Elektronen und Positronen, die je wieder Bremsstrahlung emittieren. Dies geschieht so lange, bis die Energie des emittierten Lichtes nicht mehr zur Paarbildung ausreicht. Dann nimmt auch die Anzahl der Teilchen im Schauer nicht mehr zu, womit das Schauermaximum erreicht ist. Das Schauermaximum kann eine Lateralausdehnung von mehreren hundert Metern erreichen. Die restliche Energie wird durch Ionisationsprozesse und Comptonstreuung abgegeben [Gru05].

Mit Teilchendetektoren wie Szintillatoren oder Wasser-Cherenkov-Tanks wurde als erstes die kosmische Strahlung untersucht [AEM⁺39]. Trifft nun eine Schauerfront, welche eine Dicke von rund einem Meter hat [Gru05], auf Detektoren in einem Array, kann durch unterschiedliche Ankunftszeiten die Herkunftsrichtung des Primärteilchens bestimmt werden. Betrachtet man die Anzahl der unterschiedlichen Sekundärteilchen und deren Verhältnisse zueinander, kann eine Aussage über die Energie des Primärteilchens getroffen werden. Zur Detektion des ausgedehnten Luftschauers können mehrere verschiedene Techniken zum Einsatz kommen. Durch deren Kombination kann die Bestimmung der einzelnen Parameter wie Masse, Energie oder Richtung genauer erfolgen. Jedoch ist bei dieser Methode die Bestimmung der Luftschauerparameter abhängig vom verwendeten Wechselwirkungsmodell und von Wirkungsquerschnitten, welche aus Beschleunigerexperimenten extrapoliert werden. Dies führt zu systematischen Unsicherheiten. Bei Fluoreszenzteleskopen wird die Emission von Licht im ultravioletten Bereich detektiert, welches von Stickstoffmolekülen der Luft stammt, die durch Luftschauer angeregt wurden. Diese Detektionstechnik ist im Gegensatz zur vorherigen sensitiv auf den Verlauf des Luftschauers. Denn hier kann der Luftschauer während seines ganzen Verlaufes beobachtet werden. Bei den Teilchendetektoren kann hingegen nur ein „Abdruck“ gemessen werden. Ein Nachteil von Fluoreszenzteleskopen ist allerdings, dass Messungen nur bei klaren und mondfreien Nächten erfolgen können. Diesen Nachteil teilen auch Cherenkov-Licht-Detektoren, wie sie im Tunka-Tal stehen. Hier wird die Cherenkov-Strahlung des Luftschauers mit Photomultipliern aufgenommen. Ebenso wie Fluoreszenzteleskope ist diese Methode sensitiv auf die zeitliche Entwicklung des Luftschauers, da die Emission des Cherenkovlichts während der gesamten Entwicklung des Luftschauers stattfindet. Eine neuere Nachweismethode, die ebenfalls sensitiv auf die Entwicklung des Luftschauers ist, ist die Radiomessung von ausgedehnten Luftschauern [HRR03]. Diese hat zum einen den Vorteil, dass sie nahezu unabhängig vom Wetter und von der Tageszeit ist,

2 Kosmische Strahlung

als auch, dass die Antennen zur Detektion im Vergleich kostengünstig hergestellt werden können. So beeinflussen lediglich hohe atmosphärische elektrische Felder, wie sie z.B. bei Gewittern auftreten, die Messungen [AAB⁺11]. Im folgenden Kapitel wird genauer auf die Radioemission von Luftschauern eingegangen.

3 Radioemission von Luftschauern

3.1 Emissionsmechanismen

F. D. Kahn und I. Lerche [KL66] schlugen 1966 und S. A. Colgate [Col67] 1967 einen Emissionsmechanismus von Radiostrahlung für Luftschauern vor, der auf der Ladungstrennung innerhalb des Erdmagnetfeldes beruht. Vorausgegangen war ein Modell von G. Askaryan aus dem Jahr 1962, welches Radioemission durch zeitliche Veränderung der Nettoladung des Luftschauers voraussagte [Ask65, Ask62a, Ask62b]. Die im Luftschauer entstandenen Elektronen und Positronen emittieren durch ihre annähernd Vakuumlichtgeschwindigkeit elektromagnetische Strahlung. Durch die geringe Dicke der Schauerfront wird so eine kohärente Radioemission im 100 MHz Bereich vorausgesagt. Jedoch stellten J. V. Jelley [JFP⁺65] und H. R. Allan [All71] in Experimenten fest, dass die Polarisation der Strahlung vom Winkel zwischen Schauerachse und Erdmagnetfeld abhängt.

Das Modell der transversalen Ströme [SWR08, WS08] erklärt auch die Polarisation, da es auf der Lorentzkraft basiert. Durch die Trennung der Ladung des Schauers durch das Erdmagnetfeld in der Erdatmosphäre entstehen Ströme, die bis zum Schauermaximum anwachsen. Kennt man die zeitabhängige Stromdichte, lässt sich daraus die Radioemission berechnen. Dabei werden in den meisten Simulationen Eigenschaften wie die Winkelverteilung oder Lateralverteilung der einzelnen Teilchen nicht berücksichtigt. Auch deren Driftgeschwindigkeit wird als konstant angenommen. Das in Karlsruhe entwickelte Programm REAS3¹ berücksichtigt bereits diese Parameter [LH10]. Tatsächlich hängt diese von der Wechselwirkung der Ladungsträger mit den Teilchen der Erdatmosphäre ab. Transformiert man nun die Stromdichte in das System des Beobachters auf der Erde, führt dies zu einer stark gebündelten Emission der Strahlung innerhalb eines Kegels um die Schauerachse herum. Vorausgesagt wird hier ebenfalls kohärente Radiostrahlung im 100 MHz Bereich. Ein weiterer Strahlungsbeitrag kommt durch den Ladungsdipol in der Erdatmosphäre zustande. Ebenfalls einen Beitrag liefert die Synchrotronstrahlung, die durch die Richtungsänderung der Elektronen und Positronen im Erdmagnetfeld entsteht. Anfangs wurde vermutet, dass diese den größten Teil beiträgt [HF03, FG03], jedoch stellte es sich heraus, dass diese nur eine untergeordnete Rolle spielt.

3.2 Experimente

Durch die heute zur Verfügung stehende leistungsfähigere Elektronik und Digitaltechnik ist das Messen der Radioemission von Luftschauern wieder interessant geworden. So gibt es mehrere aktuelle Experimente in diesem Bereich, welche hier kurz genannt werden:

¹Radio Emission from Air Showers

3 Radioemission von Luftschauern

Seit 2003 existiert im KASCADE²-Grande-Array [AAB⁺03, AAB⁺10] am KIT Campus Nord das LOPES³-Experiment, welches als Prototyp für das LOFAR-Experiment gebaut wurde. Das mittlerweile 30 Antennen umfassende Experiment misst kosmische Strahlung im Bereich von 10^{16} eV bis 10^{18} eV im Frequenzbereich von 40 MHz bis 80 MHz [FAB⁺05].

Das ebenfalls 2003 in Betrieb genommene Experiment CODALEMA⁴ am Nançay Radio Observatory, Frankreich, misst die Radioemission von Luftschauern im Frequenzbereich von 24 MHz bis 82 MHz mit 24 Antennen ab einer Primärenergie von 10^{16} eV [ABC⁺06].

Sowohl bei LOPES als auch bei CODALEMA konnten schon zahlreiche Radiosignale eindeutig Luftschauern zugeordnet werden. Es konnte ein Zusammenhang zwischen Radiosignalen und Luftschauerparameter, z.B. Primärenergie, -masse und Ankunftsrichtung, gezeigt werden [LAA⁺11, Rav10].

Das 40 Stationen mit je 192 Antennen umfassende, für astronomische Zwecke konzipierte, Radiointerferometer LOFAR⁵ mit mehreren hundert Kilometern Durchmesser soll im Frequenzbereich zwischen 30 MHz und 240 MHz messen und ist über den europäischen Kontinent verteilt [FVHDB⁺06].

AERA⁶ ist ein sich im Aufbau befindendes Experiment, das, wenn es fertig ist, 150 Antennen umfassen wird. Es ist Teil des Pierre-Auger-Observatorium in der argentinischen Pampa und misst im Frequenzband von 30 MHz bis 80 MHz ab einer Primärenergie von etwa $10^{17,2}$ eV [Fli10]. Erste Radioereignisse konnten bereits Luftschauern zugeordnet werden [AER11].

²Karlsruhe Shower Core and Array DEtector

³LOFAR Prototype Station

⁴COsmic ray DEtECTION Array with Logarithmic ElectroMagnetic Antennas

⁵LOW Frequency ARray

⁶Auger Engineering Radio Array

4 Experimenteller Aufbau

Die Daten der Antenne, die im Rahmen dieser Arbeit analysiert wurden, wurden beim Tunka-133-Experiment aufgenommen. In den folgenden Unterkapiteln werden sowohl das Tunka-Experiment zur Messung von kosmischer Strahlung mit Cherenkov-Licht von Luftschauern, als auch der aufgebaute Antennenprototyp vorgestellt.

4.1 Das Tunka-133-Experiment

Das Tunka-133-Experiment befindet sich im Tunka-Tal, rund 50 km westlich des Baikalsees in Sibirien, Russland. Es ist ein 133 Detektoren umfassendes Array, das eine Fläche von ungefähr einem Quadratkilometer einnimmt. Bei den Detektoren handelt es sich um nach oben gerichtete, offene Photomultiplier, die die Cherenkov-Licht-Emission von Luftschauern detektieren. Somit ist eine Messung nur bei mondlosen Nächten und bei guten Wetter möglich, weshalb gerade dieser Standort ausgewählt wurde. Bei diesem Experiment wird die kosmische Strahlung in einem ähnlichen Energiebereich wie bei KASCADE-Grande, nämlich von 10^{15} bis 10^{18} eV, untersucht. Dabei soll das Energiespektrum genauer bestimmt werden sowie die Massenzusammensetzung der Primärteilchen, um den Ursprung und die Propagation in unserer Galaxie und den Übergang zur extragalaktischen Komponente zu studieren.

Aufgeteilt ist das Detektorfeld in 19 Cluster mit je sieben Photomultipliern. Jeder Cluster hat eine hexagonale Struktur, wobei sich der siebte Photomultiplier in der Mitte befindet (siehe auch Abbildung 4.1). Die einzelnen Detektoren haben dabei einen Abstand von ca. 85 m. Sie haben ein Gehäuse mit einem Durchmesser von 50 cm und sind bei Tag mit einem Deckel verschlossen, der in der Nacht geöffnet wird. Dort befindet sich eine Photokathode mit einem Durchmesser von 20 cm. Die volle Effizienz haben die Detektoren bei Zenitwinkeln bis 20° ; danach fällt sie ab. Jedoch sind die Photomultiplier so gebaut, dass sie ein Sichtfeld von bis zu 50° zum Zenit abdecken. In dem Gehäuse befindet sich des Weiteren, zusammen mit einer Heizung, um Frost vorzubeugen, eine LED¹ zur Kalibrierung der Photomultiplier. Abgedeckt ist die Elektronik mit einer Plexiglasplatte [BBB⁺11, BBC⁺09, BCG⁺07]. Wird in einem Cluster von mindestens drei Photomultipliern ein Signal innerhalb eines Zeitfensters von $0,5 \mu\text{s}$ gemessen, so wird dieser Cluster getriggert [BCG⁺08].

Das Array wurde in den Jahren 2005 bis 2009 aufgebaut, wobei die ersten sieben Detektoren bereits ab Oktober 2006 Daten aufgenommen haben. Pro Jahr wird eine Betriebszeit von 400 Stunden erwartet mit mehr als 300 registrierten Ereignissen mit Primärenergien über 10^{17} eV und von mehr als einer halben Million Ereignissen über $3 \cdot 10^{15}$ eV. Der im Vorgängerexperiment Tunka-25 entwickelte Rekonstruktionsalgorithmus erlaubt zudem eine Genauigkeit zur Bestimmung von X_{max} von $25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ und vom

¹Light-Emitting Diode

4 Experimenteller Aufbau

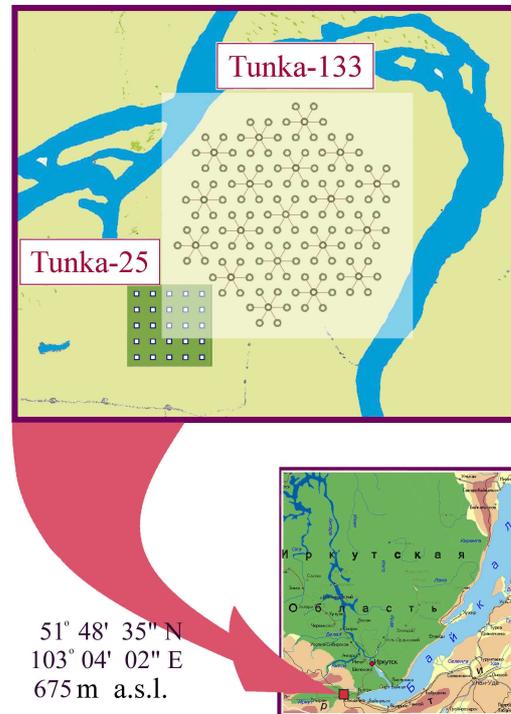


Abbildung 4.1: Karte des Tunka-Experiments mit 133 Photomultipliern in der Nähe des Baikalsee [Tun11].



Abbildung 4.2: Im Vordergrund sieht man die aufgebaute SALLA-Antenne; links daneben ist ein Photomultiplier (zylinderförmig) und der Elektronikkasten. Im Hintergrund kann man noch weitere Photomultiplier erkennen [Sch10].

Schauerzentrum von 6 m [BBB⁺11, BBC⁺09, BCG⁺07]. X_{\max} bezeichnet die Tiefe des Luftschauers in der Erdatmosphäre, an dem dieser die größte Anzahl an Sekundärteilchen besitzt (Schauermaximum). Angegeben wird dieser in Einheiten der Säulendichte der Atmosphäre. Über X_{\max} kann die Eindringtiefe des Primärteilchens in die Atmosphäre bestimmt werden, worüber sich die Masse des Primärteilchens abschätzen lässt.

4.2 Die SALLA-Antenne

Das Tunka-Tal ist wegen der Vergleichsmöglichkeit zwischen Radio- und Cherenkovsignal und wegen des geringen Radio-Untergrunds sehr interessant für Radiomessungen. Um den Standort für die Radiomessung ausgedehnter Luftschauer zu untersuchen, wurde im August 2009 eine Prototyp-Antenne installiert. Dabei handelt es sich um eine SALLA²-Antenne mit einem Durchmesser von 120 cm, die beim LOPES-Experiment am KIT vom IPE³ entwickelt wurde [KGA⁺09]. Konzipiert ist dieser Antennentyp für das Pierre-Auger-Observatorium in Argentinien, weshalb sie sehr robust gegen hohe Windgeschwindigkeiten ist. Außerdem ist sie relativ unempfindlich gegen Veränderungen des Bodens, wie z.B. durch Nässe oder Frost. Aufgestellt wurde sie neben dem Photomultiplier in der Mitte eines Clusters (Cluster 7). Somit konnte die Antenne einfach nach einem Bandpassfilter an die Elektronikbox angeschlossen werden (siehe auch Abbildung 4.3). Denn in jedem Cluster werden zwei Kanäle nicht durch das Tunka-Array belegt. Der Bandpassfilter unterdrückt alle Signale die nicht im Frequenzbereich von 30 bis 80 MHz sind. Die Datenaufnahme erfolgt gemeinsam mit den Photomultipliern. Getriggert wird die Antenne durch Cluster 7.

Gemessen wird in einem Frequenzbereich von 30 bis 80 MHz in zwei Polarisierungen: Ost-West und Nord-Süd. Das analoge Signal wird mit einem LNA⁴ verstärkt, dann gefiltert und wieder verstärkt und mit einer Rate von 200 MHz in ein 12 bit tiefen digitalen Datensatz umgewandelt [BBC⁺09]. Die Umwandlung erfolgt mit der Elektronik des Tunka-Arrays. Die jeweils aufgenommenen Spuren haben dabei eine Länge von 5120 ns mit 1024 Datenpunkten.

²Small Aperiodic Loaded Loop Antenna

³Institut für Prozessdatenverarbeitung und Elektronik

⁴Low Noise Amplifier

4 Experimenteller Aufbau

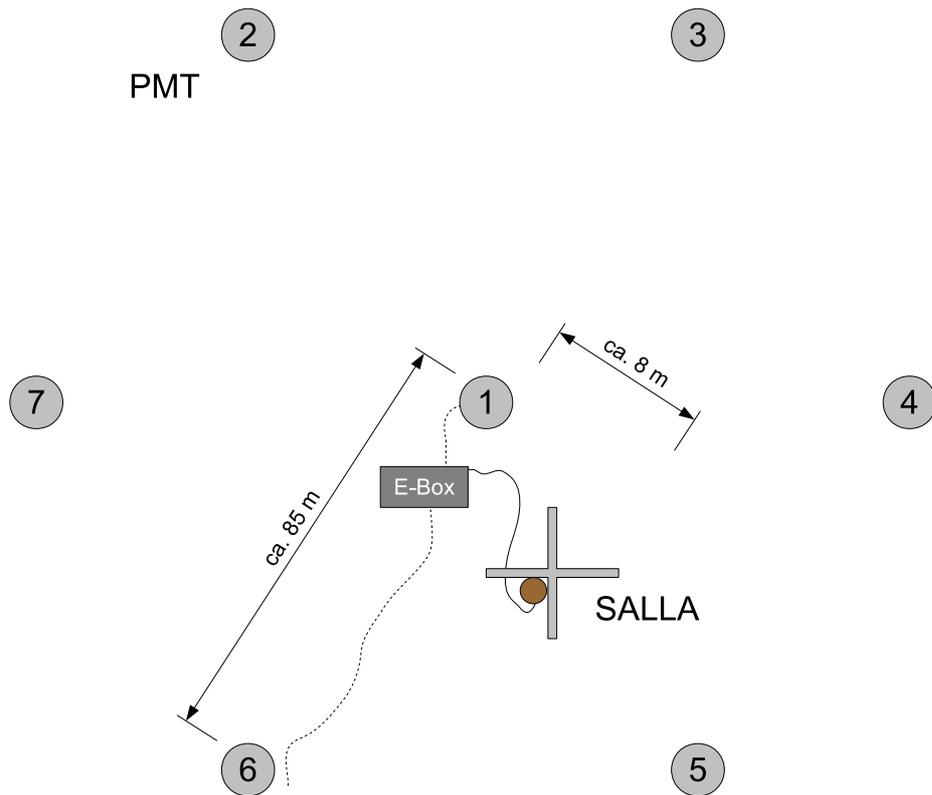


Abbildung 4.3: Skizze von Cluster 7, nicht maßstabsgetreu. Die SALLA-Antenne hat einen Abstand von ca. 8 m vom inneren PMT. Die anderen sechs PMTs sind hexagonal angeordnet und haben einen Abstand von ca. 85 m zueinander.

5 Analyse der Radiodaten

Bei der Analyse der Messdaten ging es darum, die Frage zu klären, ob man mit der SALLA bei Tunka Radiosignale von Luftschauern messen kann. Dabei waren nicht nur die Zeitreihen der Messwerte (Spur) der Antenne verfügbar, sondern auch die zur selben Zeit aufgenommenen Spuren der Photomultiplier aus dem Cluster 7. Später, während der Analyse, kam eine weitere Frage auf, nämlich, ob die gemessenen Radiosignale, die Luftschauern zuordnen werden können, tatsächlich direkt durch diese verursacht wurden. Denn es gibt die Möglichkeit, dass die Signale durch die Messelektronik oder durch die Photomultiplier als Folge von Luftschauern zustande gekommen sind.

Die Daten wurden im Zeitraum zwischen Oktober 2009 und März 2011 aufgenommen. Insgesamt handelt es sich um 380.474 Datensätzen. Dabei können sie in zwei Kategorien unterteilt werden: Die Zeiträume zwischen Oktober 2009 und Mitte Dezember 2010 und zwischen Mitte Januar 2011 und Ende März 2011 beinhalten normal aufgenommene Ereignisse. Dabei ist der Radiountergrund der Daten seit Oktober 2010 etwas größer. Im zweiten Teil, im Zeitraum zwischen Mitte Dezember 2010 bis Mitte Januar 2011, sind die Messungen ohne angeschlossene Antenne vorgenommen worden. Das heißt, nur der LNA und der Bandfilter ist mit der Datenaufnahme verbunden, die Antenne jedoch nicht. Damit wurde überprüft, ob Pulse in den Kanälen der Antenne durch Übersprechen der Elektronik durch die Signale der Photomultiplier verursacht wurden.

Von der Tunka-Kollaboration wurden weitere Daten über einzelne Luftschauer zur Verfügung gestellt. Dies umfasste die Primärenergie, Ankunftsrichtung und Schauerachsenabstand für ausgewählte Luftschauer. Der Schauerachsenabstand beschreibt den Abstand zwischen dem Zentrum von Cluster 7 und dem Schnittpunkt mit der Schauerachse.

Auch Datensätze von Testmessungen mit LEDs standen zur Verfügung. Dabei kamen die LEDs in den Gehäusen der Photomultiplier zum Einsatz.

Bei den Datensätzen ist zu beachten, dass nur nachts in den Wintermonaten gemessen wurde. Das heißt, in den Monaten von Oktober bis März war das Experiment in Betrieb. In den Sommermonaten sind die Nächte zu kurz, weshalb sich Messungen nicht lohnen. Deshalb wurden u. a. Reparaturen und Verbesserungen am Tunka-Experiment vorgenommen. Weiterhin gilt für alle Datensätze, dass die Einheiten in ADC-Werten angegeben sind, da bis jetzt keine Absolutkalibration der Antenne bei Tunka durchgeführt wurde. Dies ist allerdings kein Problem für diese Analyse, da hier untersucht wird, ob überhaupt Radiosignale bei Tunka gemessen werden.

Einige Ergebnisse dieser Analyse wurden bereits auf der *DPG-Frühjahrstagung* in Karlsruhe vorgestellt [OSH⁺11] und werden bei der *International Cosmic Ray Conference* in Peking gezeigt [BBB⁺11].

5 Analyse der Radiodaten

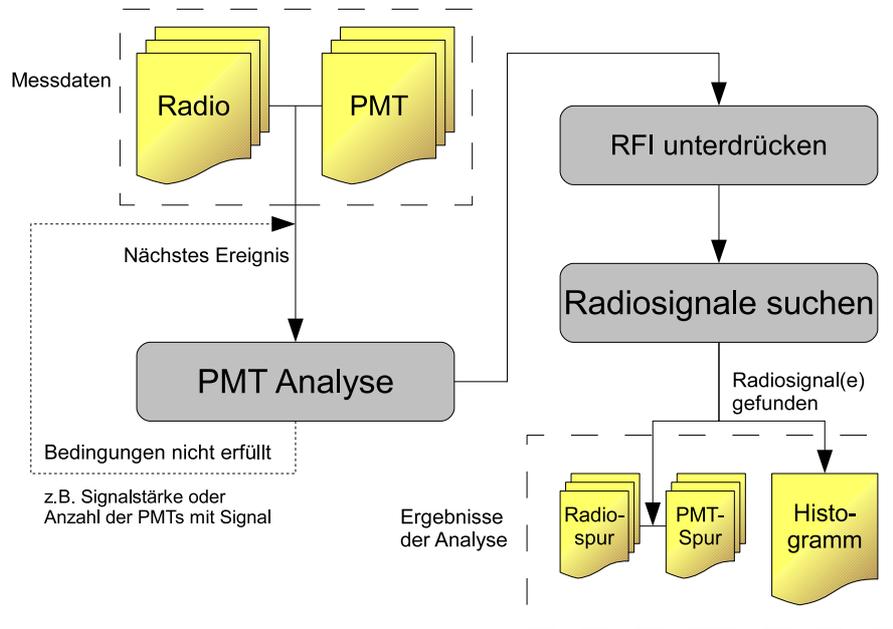


Abbildung 5.1: Schematischer Ablauf der Datenanalyse. Dieser Prozess wird solange durchgeführt, bis keine Ereignisse mehr als Eingabe vorliegen. Neben den Spuren der PMTs und der Radioantenne können Histogramme der Radiopulszeiten ausgegeben werden.

5.1 Suche nach Radiopulsen

5.1.1 Vorgehensweise

Bei der Analyse wurden zuerst die Daten zwischen Oktober 2009 und März 2010 untersucht. Später kamen noch die Ereignisse von Oktober 2010 bis Mitte Dezember 2010 hinzu und zum Schluss wurden die Daten mit abgetrenntem Antennenkabel analysiert. Bei jeder dieser Analysen wurde das selbe Verfahren angewendet, das nun im Folgenden erklärt wird.

Da sowohl die Radiodaten als auch die Daten der Photomultiplier (PMT) zur Verfügung standen, wurden auch beide Signalquellen betrachtet. Somit waren für jedes Ereignis die Daten aus sieben PMTs und aus der Antenne zu untersuchen. Es wurden dabei im Wesentlichen zwei Schritte durchgeführt: Die Analyse der Photomultiplier-Daten und die Analyse der Radiodaten. Zwischen diesen beiden Schritten wurden schmalbandige Si-

gnale rausgefiltert, sogenannte RFI¹. Denn die Spektren der Radiodaten weisen mehrere solcher Störsignale im Bereich zwischen 30 und 80 MHz auf (siehe auch Abbildung 5.2). Da für Radiosignale aus Luftschauern ein breitbandiger Puls erwartet wird, können zur Reduzierung des Untergrundes schmalbandige Signale unterdrückt werden. Diese haben ihren Ursprung z.B. in Fernseh- und Radiosendern.

Im Folgenden wird die Analyse der PMT- und Radiodaten erläutert (siehe auch Abbildung 5.1):

1. Analyse der Photomultiplier-Daten:

Aus der Amplitude des PMT-Signals lässt sich grob die Primärenergie abschätzen. Denn die einfallende Lichtmenge hängt zum einen von der Anzahl der Teilchen im Luftschauer, zum anderen vom Schauerachsenabstand ab. Die Anzahl der Teilchen hängt wiederum von der Primärenergie ab. Da hier nur eine relativ grobe Betrachtung der Daten gemacht wurde, wurde die Entfernung zur Schauerachse vernachlässigt. Somit wurde, je höher die Amplitude der PMT-Signale, eine höhere Primärenergie angenommen.

Im ersten Schritt wurden anhand einer Schwelle für die Signalstärke der PMTs einzelne Ereignisse aussortiert. Als weiteres Kriterium zur Mindestsignalstärke wurde eine Mindestanzahl an PMTs hinzugefügt, die diese Schwelle zu überschreiten hatten. So variierten die Schwellen für das PMT-Signal im Wesentlichen bei der Analyse zwischen 0 und 110 ADC-Einheiten. Dabei hatten mindestens fünf der sieben PMTs von Cluster 7 diese Amplitude zu überschreiten.

2. Analyse der Radiodaten:

Bevor die Spuren der Antenne auf Signale untersucht wurden, wurden schmalbandige Störungen herausgefiltert. Danach wurden die einzelnen Kanäle separat betrachtet. Als Radiosignal wurde erst ein Puls gewertet, wenn dieser eine bestimmte Schwelle überschritten hatte. Dabei wurde nicht verlangt, dass dieser Puls in beiden Kanälen der Antenne (Nord-Süd und Ost-West) vorkommt. Somit wurde jeder gefundene Radiopuls separat behandelt und auch als ein Radiosignal gewertet. Das heißt, trat dieser in beiden Polarisierungen auf, wurden zwei Signale gezählt.

Das Rauschen hat eine maximale Amplitude von ungefähr sechs ADC-Einheiten. Um ein Radiosignal zu identifizieren wurde die Schwelle auf zehn gesetzt, um ein deutliches Signal zu erhalten.

Als Informationen über einen Radiopuls konnten die Breite (von dem Punkt, an dem die Schwelle überschritten wurde, bis zu dem, an dem sie unterschritten wurde), der Beginn, das Ende und das Maximum (Zeit in der Spur und Amplitude) erhalten werden. Das Maximum wurde später als Ankunftszeit des Signales verwendet.

5 Analyse der Radiodaten

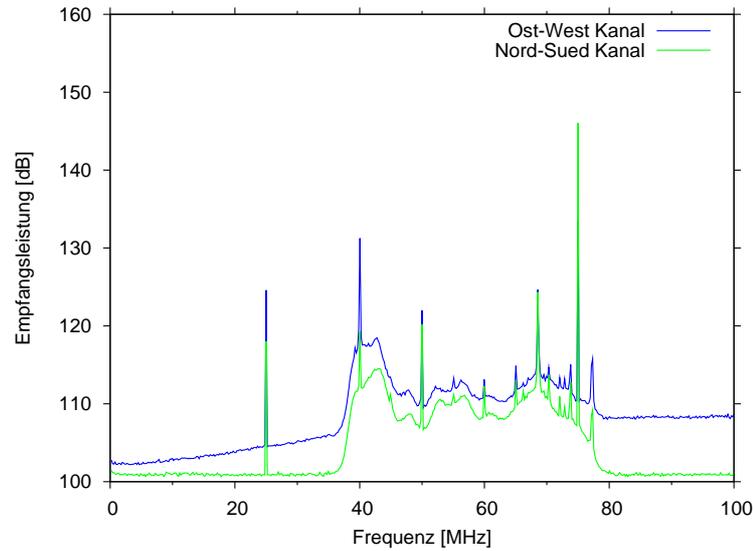


Abbildung 5.2: Hintergrundspektrum der SALLA-Antenne vom September 2009. Gemittelt wurde über die ersten 2000 Ereignisse diesen Monats. Sowohl im Ost-West- als auch im Nord-Süd-Kanal sind schmalbandige Störsignale zu sehen.

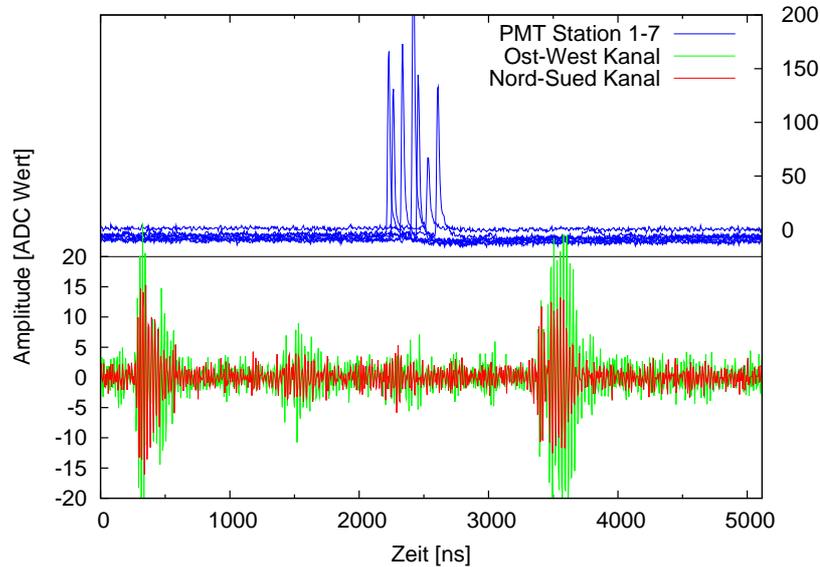


Abbildung 5.3: Ereignis 2154 vom 31. Oktober 2010: In der oberen Hälfte sind die PMT-Signale abgebildet. Zu sehen sind die Amplituden der Anoden der Photomultiplier im Cluster 7. Die Höhe der Peaks sind in ADC-Werten angegeben, wie im unteren Teil für die Radiodaten. Dort sind zwei größere und zwei kleinere Radiopulse zu sehen. Hierbei handelt es sich aber um Störsignale, die keinem Luftschauer zugeordnet werden konnten.

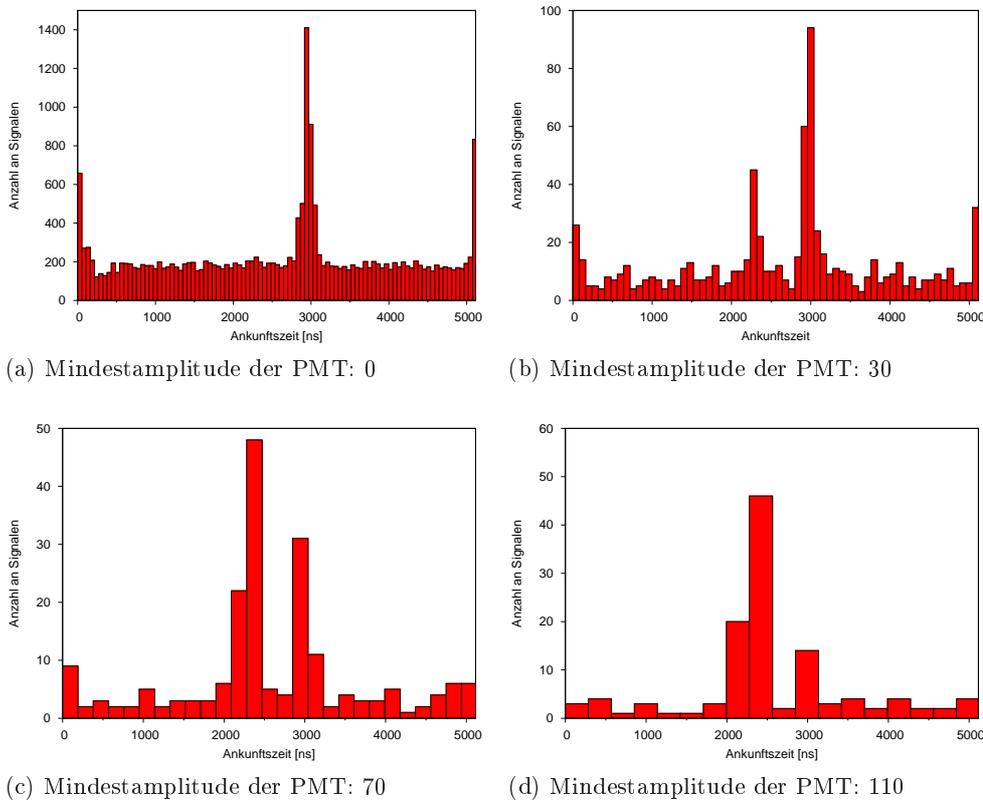


Abbildung 5.4: Histogramme der Ankunftszeiten der Radiosignale: Geht man zu höheren Mindestamplituden für mindestens fünf PMTs über (Abbildungen (a) bis (d)), lässt sich eine zweite Häufung der Ankunftszeiten für Radiosignale im Bereich um 2,3 μs erkennen. Die Häufungen um 3 μs ist auf Störsignale des Experiments zurückzuführen. Die erhöhten Zählraten am Rand kommen durch Signale zustande, welche ihr Maximum kurz vor bzw. nach der Spur haben. Deshalb ist das Maximum dieser Pulse immer im ersten bzw. letzten Bin.

5.1.2 Bestimmung der Ankunftszeiten der Radiosignale und deren Hinweise auf Luftschauer

Die Darstellung der Radiospuren mehrerer Ereignisse zeigt, dass Radiosignale detektiert wurden (siehe für ein Ereignis Abbildung 5.3). Die Pulse sind teilweise sowohl im Nord-Süd- als auch im Ost-West-Kanal zu sehen. Um möglichst alle Radiopulse zu erfassen, wurde das im vorherigen Abschnitt erklärte Verfahren angewendet. Es wurden Histogramme über die Ankunftszeiten der einzelnen Radiosignale erstellt. Dabei wurde die Mindestsignalstärke der PMTs zwischen Null (also alle Ereignisse wurden analysiert) und 110 ADC-Einheiten variiert. Als Ankunftszeit wurde die Zeit des maximalen Ausschlags des Radiosignals definiert.

¹Radio-Frequency Interference

5 Analyse der Radiodaten

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Histogramme mit Mindestamplituden für mindestens fünf PMTs im Bereich von 0 bis 110 ADC-Einheiten in 10er Schritten untersucht. Dabei sind 206.148 Datensätze verwendet worden aus dem Zeitraum Oktober 2009 bis März 2010. Das heißt, hier handelt es sich um Daten mit geringerem Radioundergrund. Dieser ist ab Oktober 2010 erhöht. Wie Abbildung 5.4 zeigt, wurden mehr als 20.000 Radiosignale gefunden. Das Histogramm (a) gibt die Analyse aller Radiodaten wieder. Zu erkennen sind viele Untergrundsignale von ungefähr 150 Ereignissen pro Bin. Im Bereich um $3 \mu\text{s}$ bildet sich eine starke Häufung an Radiopulsen aus. Anhand der weiteren Histogramme ist dieser Peak auf ein Störsignal des Tunka-Experiments zurückzuführen. Denn wird zu höheren Schauerenergien übergegangen (höhere Amplituden der PMTs) bildet sich eine weitere Häufung bei ca. $2,3 \mu\text{s}$ aus (siehe Histogramm (b), (c) und (d)). Bei höheren Energien ist zu erwarten, dass das Radiosignal des Luftschauers stärker wird. Durch die Ausbildung des zweiten Peaks (bei $2,3 \mu\text{s}$) bei höheren Energien, liegt es nahe, diesen Luftschauern zuzuordnen und den ersten Peak (bei $3 \mu\text{s}$) auf Effekte der Elektronik zurückzuführen.

Die Häufungen am Rand kommen dadurch zustande, dass Radiopulse (Breite von ca. 100 ns, siehe Abbildung 5.3), deren Maximum kurz vor bzw. nach der aufgezeichneten Spur ist, gemessen werden. Diese haben dann ein Maximum im ersten bzw. letzten Bin der Spur zur Folge und erzeugen damit die Häufung am Rand der Histogramme.

Anhand der Signale der PMTs wurde die Ankunftszeit des Luftschauersignals auf ca. $2,3 \mu\text{s}$ bestimmt. Somit sind die Radiosignale, die Luftschauern zugeordnet werden, früher detektiert als die Cherenkov-Signale. Die Erklärung dafür liegt in unterschiedlichen Kabellängen. Das Antennenkabel ist nur ca. 10 m lang, die Kabel der umliegenden PMTs ca. 85 m.

Ein weiterer Hinweis darauf, dass es einen Zusammenhang zwischen Radiosignalen und Luftschauern gibt, ist das Verhältnis an Ereignissen mit einem Signal in der PMT- und Radiospur zu den Ereignissen mit PMT-Signalen (siehe Abbildung 5.5). Wird das Verhältnis $\frac{\text{Signal in PMT- und Radiospur}}{\text{Signal in PMT-Spur}}$ bei unterschiedlichen Mindestamplituden der PMT-Signale gebildet, steigt dieses an. Werden Schauer mit niedrigerer Energie nicht aussortiert, werden in nur ca. 8% der Ereignissen, in denen die PMTs etwas gemessen haben, Radiosignale gefunden. Bei höheren Energien wird dieses Verhältnis größer und erreicht bei einer Mindestamplitude von 110 ADC-Einheiten fast 25%. Werden noch höhere Schwellen gesetzt, so steigt das Verhältnis bei z.B. 200 ADC-Einheiten auf 44% an (nicht mehr in Abbildung 5.5 zu sehen).

Das Ansteigen dieses Verhältnisses entspricht ebenfalls der Erwartung, dass Radiosignale bei höherenergetischen Luftschauern stärker sind und deshalb öfter gemessen werden können. Dies verträgt sich auch mit den Histogrammen und weist darauf hin, dass der Peak in den Histogrammen bei ca. $2,3 \mu\text{s}$ durch Luftschauer verursacht wird.

5.2 Ausschluss elektronischer Quellen der Signale

Wie im vorherigen Abschnitt dargelegt, sind Radiosignale mit einer Ankunftszeit um $2,3 \mu\text{s}$ Kandidaten für Signale von Luftschauern. Nun gilt es noch auszuschließen, dass die Signale durch andere Teile des Experiments, wie der Verstärker oder ein PMT, verursacht wurden. Zum einen könnten die PMTs bei der Detektion von Cherenkov-Strahlung

5.2 Ausschluss elektronischer Quellen der Signale

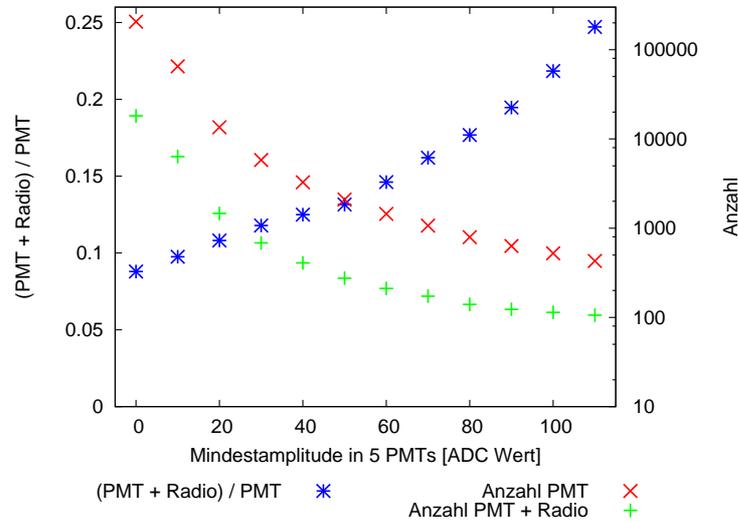


Abbildung 5.5: Auf der linken Achse ist das Verhältnis $\frac{\text{Signal in PMT- und Radiospur}}{\text{Signal in PMT-Spur}}$ über der Mindestamplitude der PMTs aufgetragen (blaue Punkte). Bei höheren Mindestamplituden steigt das Verhältnis. Auf der rechten Achse sind die Absolutzahlen von Ereignissen aufgetragen. Es lässt sich erkennen, dass mehr als 100.000 Ereignisse Signale der PMTs enthalten.

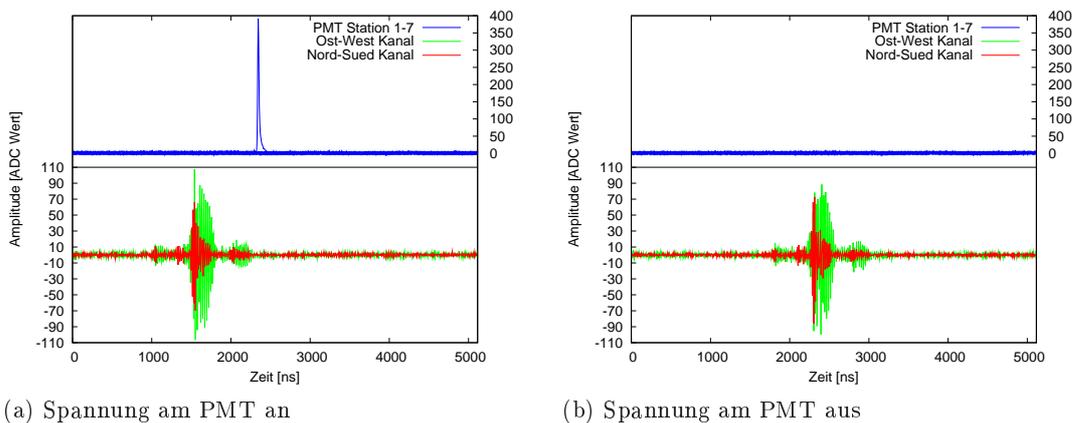


Abbildung 5.6: Spuren der Testmessungen mit der LED. Dabei ist interessant, dass in beiden Messungen ein Radiosignal zu sehen ist. Dies lässt darauf schließen, dass dieses Radiosignal durch die Ansteuerelektronik der LED zustande gekommen ist und der PMT selbst kein (messbares) Radiosignal verursacht.

Radiosignale aussenden, die durch die Antenne registriert werden. Zum anderen wäre es denkbar, dass Übersprechen in der Elektronik die Pulse verursacht. In den folgenden zwei Studien, werden diese Signalquellen ausgeschlossen.

5.2.1 Tests mit Kalibrations-LEDs

Um die PMTs als Signalquelle der Radiopulse auszuschließen, wurde auf die Datensätze der Testmessungen mit den LEDs zurückgegriffen. Die Testmessungen wurden durchgeführt, nachdem die Antenne und deren Elektronik vollständig installiert wurden. Somit lässt sich feststellen, ob die PMTs Radiosignale erzeugen.

Die Testmessungen wurden bei geschlossenem Deckel der PMT-Gehäuse durchgeführt, wodurch als einzige Lichtquelle nur die LED zur Verfügung stand. Dabei wurden unterschiedliche Parameter gewählt, unter anderen die LED-Spannung und die Spannung am PMT. Interessant sind die Messungen, bei denen die Spannung am PMT an- und ausgeschaltet und die LED-Spannung konstant war. Denn daraus lässt sich bestimmen, ob ein Störsignal erzeugt wird.

In Abbildung 5.6 sind die Spuren der PMT und des Radiosignals für diese Testmessungen abgebildet. In der Spur (a) ist die Spannung am PMT eingeschaltet. Dies ist im oberen Teil des Bildes zu sehen, in dem die Spuren der PMT aufgetragen sind. Ein PMT (derjenige, an dem die Testmessungen durchgeführt wurden) zeigt ein Signal. In der Radiospur ist ein vergleichsweise starkes Radiosignal mit einer Amplitude von ca. 100 ADC-Einheiten zu sehen. Die sonst üblichen Amplituden bewegen sich in einem Bereich bis ca. 20 ADC-Einheiten (vgl. auch Abbildung 5.3). Dieses deutliche Radiosignal ist auch in der Spur (b) zu sehen, allerdings um einige Nanosekunden nach hinten verschoben. Die Verschiebung kommt dadurch zustande, dass standardmäßig durch die PMTs getriggert wird. Da aber ohne Spannung am PMT kein Signal von dort registriert werden kann, wurde für diesen Fall auf das Radiosignal getriggert. In der Spur (b) ist kein PMT-Signal zu erkennen, weil die Spannung am PMT abgeschaltet wurde. Da in diesem Fall auch ein deutliches Radiosignal zu sehen ist, lässt sich daraus schließen, dass das Radiosignal durch die Ansteuerelektronik der LED verursacht wird. Bei normalem Messbetrieb ist diese nicht eingeschaltet. Desweiteren zeigen diese Messungen, dass die PMTs bei Tunka kein messbares Radiosignal verursachen. Dadurch können die PMT als Quelle von mit der SALLA detektierten Radiosignalen ausgeschlossen werden. Die Maximalamplituden der PMT von Luftschauern sind geringer als die Amplituden bei den LED-Testmessungen. Deshalb kann ausgeschlossen werden, dass durch sehr nahe bzw. energiereiche Schauer doch ein Radiosignal in den PMTs erzeugt worden ist.

5.2.2 Analyse des Datensatzes ohne angeschlossene Antenne

Im vorherigen Abschnitt wurde gezeigt, dass die PMTs nicht die Quelle der Radiosignale sind. Nun gilt es noch zu überprüfen, ob ein Übersprechen der Elektronik die Radiopulse erzeugt. Dazu wurde für eine Messperiode die Antenne vom Verstärker abgetrennt. Falls während dieser Zeit ebenso viele Radiosignale detektiert würden, wie mit angeschlossener Antenne, würde dies darauf hindeuten, dass die gemessenen Radiosignale durch die Elektronik verursacht wurden.

5.2 Ausschluss elektronischer Quellen der Signale

Untersucht wurden vier Messperioden, welche eine Dauer von ungefähr je zwei Wochen haben. Dies umfasst eine Messperiode vor der Abtrennung der Antenne, eine während die Antenne nicht angeschlossen war und zwei danach. Alle diese Messperioden sind aus dem Datensatz nach Oktober 2010. Ab diesen Zeitpunkt ist der Radiountergrund wesentlich höher, denn es werden in 50% bis 80% der PMT-Ereignisse Radiosignale gefunden. Davor waren es nur rund 8% (vgl. Abbildung 5.5 bei einer Mindestamplitude von 0 ADC-Einheiten). Der Grund für den erhöhten Radiountergrund wird noch untersucht.

In der Zeit zwischen 29. Dezember 2010 und 11. Januar 2011 war die Antenne nicht an den Verstärker angeschlossen. Um zu überprüfen, ob in dieser Zeit weniger Radiosignale detektiert wurden, wurde für eine Messperiode davor bis zwei Messperioden danach das Verhältnis

$$\frac{\text{Ereignisse mit Radiosignal}}{\text{Alle Ereignisse}}$$

gebildet. So befinden sich in den Messperioden vor und nach der Abtrennung der Antenne in mehr als 50% der Ereignisse Radiosignale. Während die Antenne nicht angeschlossen war, wurden nur in 0,03% der Ereignisse Radiosignale gefunden. Diese wenigen Ereignisse (10 von 33.074) wurden individuell angeschaut. Dabei zeigte sich, dass die detektierten Radiopulse sehr hohe Amplituden hatten, nämlich mehr als 260 ADC-Einheiten. Die Radiopulse, die auch als Luftschauerkandidaten in Frage kommen, haben Amplituden im Bereich von 10 bis 20 ADC-Einheiten. Desweiteren ist bei diesen Spuren der Gleichgewichtspunkt der Oszillation teilweise verschoben, weswegen diese Signale höchst wahrscheinlich durch Störungen und nicht durch Luftschauer verursacht wurden.

5.3 Zusammenhang mit Schauerparametern

Sind die gemessenen Radioereignisse direkt durch Luftschauer verursacht, so sollte auch ein Zusammenhang zum Schauerachsenabstand, zur Primärenergie und zum geomagnetischen Winkel erkennbar sein. Insbesondere sollte das Radiosignal stärker sein, je näher das Luftschauerzentrum an der Antenne ist. Der Schauerachsenabstand wurde als Abstand zwischen der Schauerachse und dem Zentrum von Cluster 7 bestimmt. Ebenso verhält es sich mit der Primärenergie: Hat das Primärteilchen eine größere Energie, erzeugt es einen Luftschauer mit mehr Sekundärteilchen. Dadurch entsteht wiederum eine stärkere Radioemission. Der geomagnetische Winkel beschreibt den Winkel zwischen der Schauerachse und dem Erdmagnetfeld beim Experiment. Je näher der Winkel an 90° ist, desto größer die Ablenkung der Elektronen und Positronen im Schauer durch die Lorentzkraft. Das bedingt wiederum eine stärkere Radioemission.

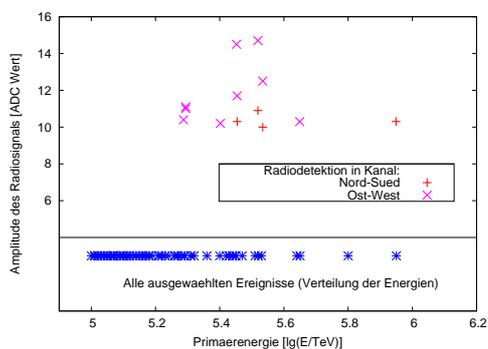
Deshalb wurden 78 Tunka-Ereignisse mit hochenergetischen Luftschauern mit mehr als 10^{17} eV, einem Schauerachsenabstand von weniger als 300 m und einem Zenitwinkel von weniger als 45 Grad ausgewählt. Aus diesem Datensatz wurden die Ereignisse selektiert, die Radiosignale mit einer Mindestamplitude von 10 ADC-Einheiten im erwarteten Zeitfenster zwischen 1,975 μs und 2,425 μs haben.

In Abbildung 5.7 ist die Amplitude des Radiosignals über Schauerparameter aufgetragen. Die Schaubilder (a) und (c) entsprechen den Erwartungen: Bei relativ kleinen Abständen und bei großen Energien wurden die Radiosignale detektiert. Da die Signalstärke exponentiell mit dem Abstand abnimmt [AAA⁺10], werden diese bei geringen Abständen zur Schauerachse erwartet. Ebenso ist ein deutliches Radiosignal nur bei hochenergetischen Luftschauern zu detektieren. Zum Vergleich ist die Verteilung aller 78 Ereignisse unterhalb der schwarzen Begrenzungslinie aufgetragen. Die meisten Ereignisse befinden sich bei mittleren und großen Schauerachsenabständen sowie bei kleineren Energien. Bei diesen wurde kein Radiosignal gemessen, das im Zeitfenster um 2,3 μs liegt.

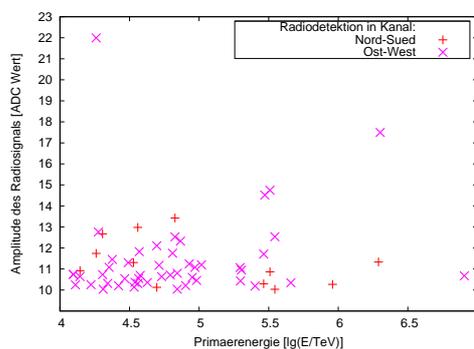
Im Schaubild (e) ist zu erwarten, dass hin zu größeren geomagnetischen Winkel stärkere bzw. mehr Radiosignale zu finden sind. Ein solcher Zusammenhang ist bisher nicht zu erkennen, was möglicherweise an der geringen Statistik liegt.

Die gleichen Abhängigkeiten wurden nochmals anhand eines neu ausgewählten Satzes an Ereignissen untersucht. Ausgewählt wurden diese Anhand zwei Kriterien aus den Daten von Oktober 2009 bis März 2010: Diese Ereignisse haben Radiosignale, in mindestens fünf PMTs eine Signalstärke von 110 ADC-Einheiten und das Radiosignal liegt im Zeitfenster zwischen 1,85 μs und 2,50 μs . Dabei handelt es sich um 47 Ereignisse. Unter diesen befinden sich auch alle aus der vorherigen Auswahl. Die ausgewählten Ereignisse wurden im Zusammenhang mit den verschiedenen Schauerparametern in (b), (d) und (f) abgebildet. In der Grafik (b) ist zu sehen, dass hier die meisten Ereignisse bei Energien kleiner als 10^{17} eV sind. Dies widerspricht nicht unbedingt den Erwartungen, da Ereignisse mit niedrigeren Energien häufiger vorkommen. In Plot (d) sind die Schauerachsenabstände gering, wie in (c). Hier werden ebenfalls die Erwartungen erfüllt. Aufgrund der geringen Statistik wurde eine korrelierte Betrachtung von Schauerachsenabstand und Primärenergie nicht durchgeführt. Für den geomagnetischen Winkel in der Grafik (f) ist auch in dieser Analyse keine Abhängigkeit zu erkennen.

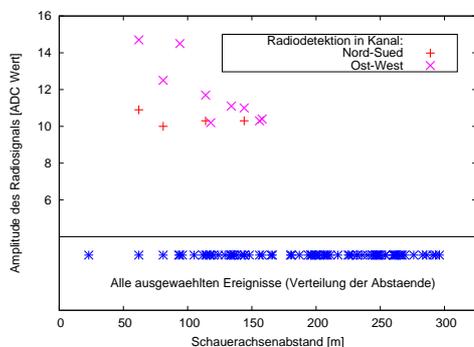
5.3 Zusammenhang mit Schauerparametern



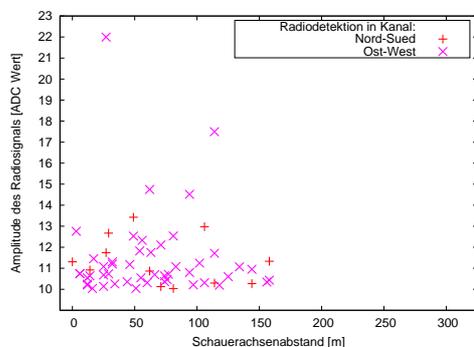
(a) Zusammenhang zwischen Radiosignal und Primärenergie



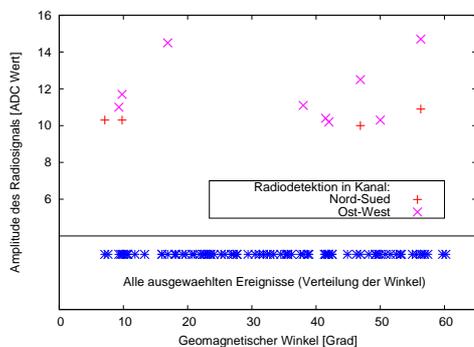
(b) Zusammenhang zwischen Radiosignal und Primärenergie



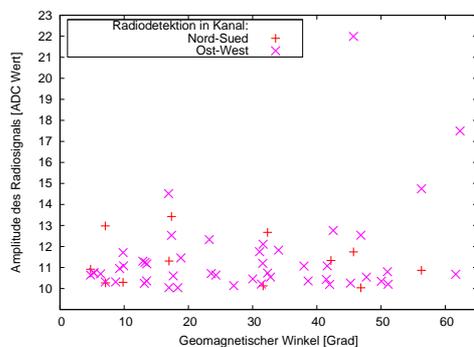
(c) Zusammenhang zwischen Radiosignal und Schauerachsenabstand



(d) Zusammenhang zwischen Radiosignal und Schauerachsenabstand



(e) Zusammenhang zwischen Radiosignal und dem geomagnetischen Winkel



(f) Zusammenhang zwischen Radiosignal und dem geomagnetischen Winkel

Abbildung 5.7: Zusammenhang zwischen Schauerparametern und gemessenen Radiopulsen: Die Bilder auf der linken Seite stellen Ereignisse dar, die u.a. zuerst über die Primärenergie ausgewählt wurden. Die Ereignisse auf der rechten Seite wurden allein durch die PMT-Schwelle und die Ankunftszeit der Radiosignale ausgewählt. Die Abhängigkeiten für die Primärenergie und für den Schauerachsenabstand entsprechen den Erwartungen. Allerdings ist bei dem geomagnetischen Winkel keine Abhängigkeit zu erkennen.

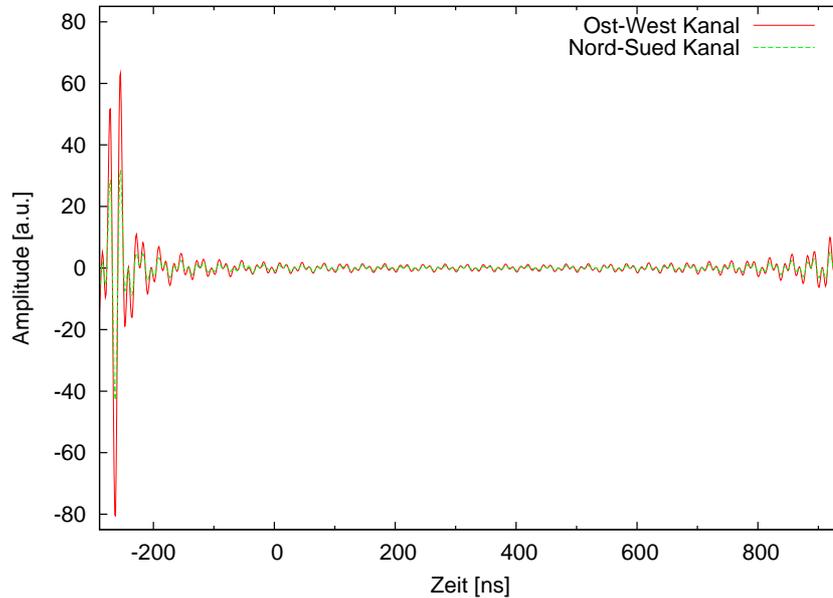


Abbildung 5.8: Spur eines simulierten Ereignisses mit REAS3. Der Anstieg der Amplitude zum Ende ist bedingt durch den Rechteckfilter.

5.4 Vergleich zwischen Simulation und Experiment

Zur weiteren Untersuchung wurden Simulationen mit REAS3² für einige Radioereignisse durchgeführt. Dabei wurde auch ein Rechteckfilter simuliert, um das Signal auf 30 bis 80 MHz zu begrenzen. REAS3 benutzt simulierte Luftschauer des Programms CORSIKA³ und berechnet daraus deren Radioemission [HKC⁺98, LH10].

Als Kandidaten wurden 28 Radioereignisse mit einer Ankunftszeit um zwischen 1,85 μs und 2,50 μs ausgewählt. Die Ereignisse stammen aus der Liste der 78 Luftschauer aus Abschnitt 5.3. Dabei hatten die Radiosignale, im Gegensatz zur Auswahl in Kapitel 5.3, eine Mindestamplitude von 6 ADC-Einheiten. Als Parameter gingen in die Simulation, neben den Daten der CORSIKA-Simulation, die Ankunftsrichtung, Primärenergie und Schauerachsenabstand ein. Diese Informationen wurden von der Tunka-Kollaboration aus den Rekonstruktionen der PMTs gewonnen. Desweiteren ist das Erdmagnetfeld⁴ und die Beobachtungshöhe⁵ bei Tunka ein Parameter für die REAS3-Simulation.

5.4.1 Vergleich der Verhältnisse der Amplituden

Der Vergleich zwischen Simulation (siehe Abbildung 5.8) und experimentellen Daten beschränkte sich darauf, die Verhältnisse der Amplituden der Radiosignale in beiden Polarisierungen zu betrachten, da noch keine Absolutkalibration der Antenne vorliegt. In

²Radio Emissions from Air Showers

³Cosmic Ray Simulation for KASCADE

⁴Die Magnetfeldstärke im Tunka-Tal beträgt laut [Geo11] 18,96 μT in Ostrichtung und 57,25 μT in Nordrichtung.

⁵Das Tunka-Experiment befindet sich nach Abbildung 4.1 ca. 675 m über dem Meeresspiegel.

5.4 Vergleich zwischen Simulation und Experiment

Abbildung 5.9 ist das Verhältnis

$$\frac{\text{Simulation} \frac{\text{Ost-West}}{\text{Nord-Süd}}}{\text{Experiment} \frac{\text{Ost-West}}{\text{Nord-Süd}}}$$

dargestellt. Je näher die Punkte dem Wert Eins sind, desto besser stimmen Simulation und Experiment überein. Eingeteilt sind die Verhältnisse in drei Kategorien:

Blau Hier konnten in den experimentellen Daten in beiden Kanälen die Amplitude gemessen werden.

Rot Die Punkte haben ein oberes Limit der Verhältnisse, weil aus den gemessenen Riodaten die Amplitude des Nord-Süd-Signals nicht bestimmt werden konnte. Dies liegt daran, dass die Amplitude kleiner oder gleich dem Rauschlevel war.

Grün Dieser Punkt hat ein unteres Limit des Verhältnisses, weil die Amplitude im Ost-West-Signal nicht bestimmt werden konnte (gleiche Begründung wie oben).

Die Fehler wurden nach [Sch10, S. 82] und Gaußscher Fehlerfortpflanzung berechnet.

Wie zu erkennen ist, liegen die Verhältnisse zwischen ca. 0,25 und 4. Es gibt eine Tendenz, dass die Verhältnisse eher zu klein sind. Das heißt, dass die Amplitude im Ost-West Kanal im Vergleich zur Amplitude im Nord-Süd Kanal in den Messdaten größer ist, als in den Simulationen. Der Grund dafür wurde noch nicht gefunden; es könnte aber sowohl an den Simulationen als auch an den Messungen liegen. Durch den Fehler von ca. 10% [Lud11] durch REAS3 (z.B. durch die Fehlende Implementation des Brechungsindex) und die relativ geringe Statistik liegen die Punkte noch in einem akzeptablen Bereich. Allerdings könnten weitere Simulationen genauere Ergebnisse liefern.

5.4.2 Vergleich der Lateralverteilung

In Abbildung 5.10 wurde der Abstand bestimmt, unter dem die Amplitude des Radiosignals um $\frac{1}{e}$ abfällt. Dabei wurde von dem Zusammenhang

$$A \propto E \cdot \sin \alpha \cdot e^{-R/R_0}$$

ausgegangen, wobei E die Primärenergie, α der geomagnetische Winkel, R der Schauerachsenabstand und R_0 der Abstand, unter dem die Signalstärke um $\frac{1}{e}$ abnimmt, ist. Aufgetragen wurden die Daten über R , wodurch sich aus der Steigung R_0 bestimmen lässt. Die Fehlerbalken wurden mittels Gaußscher Fehlerfortpflanzung berechnet. Dies ist ausreichend, um die Größenordnungen abzuschätzen. Für R_0 wurden folgende Werte über eine lineare Regression bestimmt, wobei der Fehler der statistische Fehler ist, der durch GNUPLOT bestimmt wurde:

$$R_0 = 102 \pm 27 \text{ m (Simulation)} \quad \text{und} \quad R_0 = 207 \pm 62 \text{ m (Experiment)}$$

Die Daten von Experiment und Simulation unterscheiden sich mit einer Signifikanz von $1,6\sigma$ und sind somit miteinander verträglich. Von der Größenordnung stimmt R_0 mit den Daten des LOPES-Experiments überein [Sch10].

5 Analyse der Radiodaten

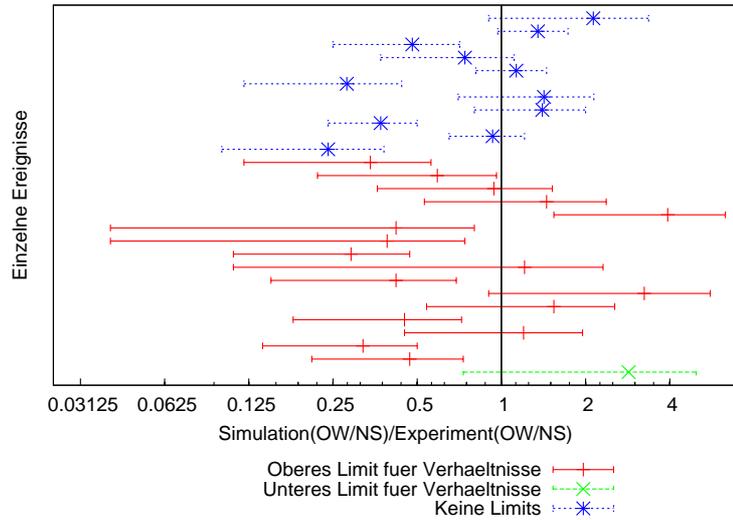


Abbildung 5.9: Vergleich der Verhältnisse der Polarisationen Nord-Süd und Ost-West zwischen Simulationen und experimentellen Daten. Je näher die Punkte an Eins sind, desto besser die Übereinstimmung. Die Limits haben ihren Grund darin, dass in manchen Kanälen die Amplitude des Radiosignals so klein war, dass es nicht mehr vom Rauschen unterschieden werden konnte. So haben die Datenpunkte mit einem oberen Limit eher eine Tendenz, ein kleineres Verhältnis zu haben.

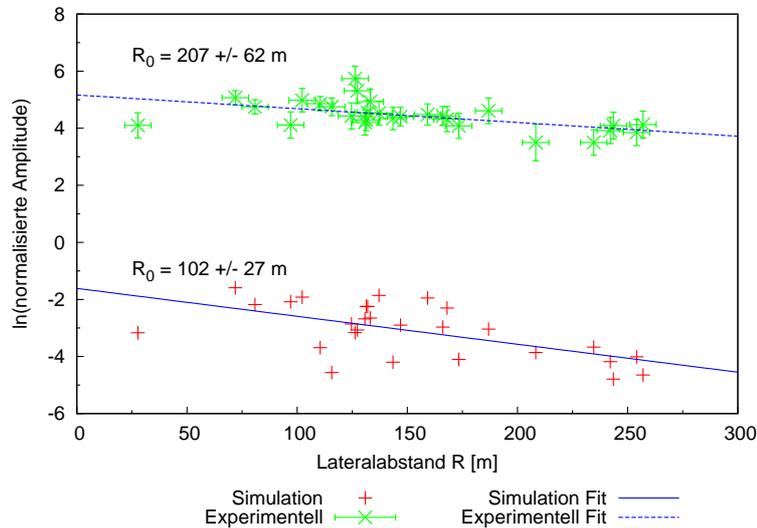


Abbildung 5.10: Lateralverteilung für Experiment und Simulation. Ein Punkt entspricht einem Ereignis. Dabei wurden nur Signale des Ost-West Kanals verwendet. Die normalisierte Amplitude ist die Amplitude A [ADC Wert] geteilt durch $E \cdot \sin \alpha$. Dabei ist E die Primärenergie und α der geomagnetische Winkel. Es ist zu beachten, dass die Antenne bei Tunka nicht kalibriert wurde.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Da die Messung der Radioemission von Luftschauern, die durch hochenergetische kosmische Strahlung erzeugt werden, im Vergleich zu anderen Detektionsmethoden kostengünstiger sein dürfte, Tag und Nacht möglich ist und kaum vom Wetter abhängt, wird diese stetig weiter entwickelt. Unter anderem wurde dazu eine Prototyp-Antenne beim Tunka-133-Experiment in Sibirien installiert, um den Standort für die Messung der Radioemission von Luftschauern zu untersuchen. Hier besteht die Möglichkeit, sowohl die Radio- als auch die Cherenkov-Licht-Emission des selben Luftschauers zu messen und zu vergleichen. Dies ist von besonderem Interesse, da beide Detektionsmethoden sensitiv auf die longitudinale Schauerentwicklung sind.

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass Radiosignale bei Tunka-133 gemessen wurden und dass diese Luftschauern zugeordnet werden können. Dazu wurden zuerst die Ankunftszeiten der Radiosignale analysiert. Neben sehr vielen gefundenen Untergrundsignalen stellte sich heraus, dass die Signale der Luftschauer in einem Zeitfenster um $2,3 \mu\text{s}$ in der Spur auftreten. Eine Häufung trat wie erwartet erst bei Luftschauern auf, die ein starkes Signal in den Photomultipliern erzeugten, was u.a. mit einer größeren Primärenergie einhergeht.

Um verschiedene denkbare Störsignale auszuschließen, wurden Testmessungen untersucht. Um die Photomultiplier als Quelle auszuschließen, wurden Messungen mit LEDs analysiert. Dabei stellte sich heraus, dass die Photomultiplier kein Radiosignal erzeugen, welches durch die Antenne gemessen wird. Ebenso musste überprüft werden, ob das Signal durch Übersprechen der Elektronik erzeugt wird. Deshalb wurde in einer Messperiode die Antenne von der Elektronik abgetrennt. In dieser Zeit wurden kaum Radiosignale detektiert, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass die Elektronik keine wesentlichen Störsignale erzeugt.

Mit ausgewählten Ereignissen wurden Abhängigkeiten der Radiosignale zu unterschiedlichen Schauerparametern untersucht. Dies umfasste den Schauerachsenabstand, die Primärenergie und den geomagnetischen Winkel. Der geomagnetische Winkel beschreibt den Winkel zwischen Schauerachse und Erdmagnetfeld. Der Zusammenhang zum Schauerachsenabstand ist wie erwartet so, dass Radiosignale nur bei Abständen $\lesssim 150 \text{ m}$ auftreten. Bei der Primärenergie wurden Radioereignisse zwischen 10^{17} eV und 10^{19} eV gefunden. Viele Ereignisse ohne Radiosignal hatten Energien bis ca. $1,6 \cdot 10^{17} \text{ eV}$. Ab dort traten nur wenige Ereignisse auf, zu welchen meistens auch Radiosignale gemessen wurden. Dies entspricht der Erwartung, dass bei größer werdender Primärenergie tendenziell mehr Radiosignale höher als der Untergrund sind. Eine Abhängigkeit zum geomagnetischen Winkel wurde bisher noch nicht gefunden.

Die letzte Analyse betraf den Vergleich zwischen Simulation und Experiment. Es zeigte sich dabei, dass die experimentellen und simulierten Daten näherungsweise übereinstimmen. Desweiteren wurden für die Simulation und das Experiment der Schauerachsenabstand bestimmt, bei dem das Radiosignal um $\frac{1}{e}$ abfällt. Diese unterscheiden sich mit

6 Zusammenfassung und Ausblick

einer $1,6\sigma$ -Signifikanz und sind daher miteinander verträglich. Beide Werte entsprechen den Größenordnungen der Ergebnisse des LOPES-Experimentes.

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass beim Tunka-133-Experiment Radiosignale ausgedehnter Luftschauer gemessen werden. Im Laufe dieses Jahres sollen drei weitere SALLA-Antennen aufgebaut werden. Dann wird es möglich sein, eine Richtungsrekonstruktion durchzuführen und diese mit der Photomultiplier-Richtungsrekonstruktion zu vergleichen. Desweiteren ist in Planung, noch weitere Antennen zu installieren. Dadurch wird es möglich sein, genauere Daten aus Radiomessungen zu erhalten und den Emissionsmechanismus der Radiostrahlung besser zu verstehen, indem Radio- mit Cherenkov-Messungen der gleichen Luftschauer verglichen werden.

Literaturverzeichnis

- [AAA⁺10] W. APEL, J. ARTEAGA, T. ASCH, A. BADEA ET AL. Lateral distribution of the radio signal in extensive air showers measured with LOPES. *Astroparticle Physics*, 32(6):294 – 303, 2010. doi:DOI: 10.1016/j.astropartphys.2009.09.007. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092765050900142X>.
- [AAB⁺03] T. ANTONI, W. D. APEL, F. BADEA, K. BEKK ET AL. The cosmic-ray experiment KASCADE. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 513(3):490 – 510, 2003. doi:DOI: 10.1016/S0168-9002(03)02076-X. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890020302076X>.
- [AAB⁺10] W. APEL, J. ARTEAGA, A. BADEA, K. BEKK ET AL. The KASCADE-Grande experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 620(2-3):202 – 216, 2010. doi:DOI: 10.1016/j.nima.2010.03.147. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900210007734>.
- [AAB⁺11] W. APEL, J. ARTEAGA, L. BÄHREN, K. BEKK ET AL. Thunderstorm observations by air-shower radio antenna arrays. *Advances in Space Research*, In Press, Accepted Manuscript, 2011. doi:DOI: 10.1016/j.asr.2011.06.003. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117711004297>.
- [ABC⁺06] D. ARDOUIN, A. BELLÉTOILE, D. CHARRIER, R. DALLIER ET AL. Radioelectric field features of extensive air showers observed with CODALEMA. *Astropart. Physics*, 26:341–350, 2006. doi:10.1016/j.astropartphys.2006.07.002.
- [AEM⁺39] P. AUGER, P. EHRENFEST, R. MAZE, J. DAUDIN ET AL. Extensive cosmic-ray showers. *Rev. Mod. Phys.*, 11(3-4):288–291, 1939. doi:10.1103/RevModPhys.11.288.
- [AER11] THE AERA GROUP. First detection of cosmic ray self-triggered Radio Pulses with AERA in coincidence with SD and FD, 2011. GAP Note 2011-057.
- [All71] H. R. ALLAN. Radio Emission From Extensive Air Showers. *Prog. in Element. part. and Cos. Ray Phys.*, Vol. 10:171–302, 1971.
- [Ask62a] G. A. ASKARYAN. *Soviet Phys. JETP*, 14:441, 1962.

Literaturverzeichnis

- [Ask62b] G. A. ASKARYAN. *J. Phys. Soc. Japan*, Vol. 17, Suppl. A-III:257, 1962.
- [Ask65] G. A. ASKARYAN. *Soviet Phys. JETP*, 21:658, 1965.
- [BBB⁺11] S. F. BEREZHNEV, D. BESSON, N. M. BUDNEV, A. CHIAVASSA ET AL. The Tunka-133 EAS Cherenkov light array: status of 2011. In *32nd International Cosmic Ray Conference*. 2011.
- [BBC⁺09] N. M. BUDNEV, D. BESSON, O. A. CHVALAEV, O. A. GRESS ET AL. The Tunka-133 EAS Cherenkov array - status, first results and plans. In *31st International Cosmic Ray Conference*. 2009.
- [BCG⁺07] N. M. BUDNEV, O. B. CHVALAEV, O. A. GRESS, N. N. KALMYKOV ET AL. Tunka-133 EAS Cherenkov Array: Status of 2007. In *30th International Cosmic Ray Conference*. 2007.
- [BCG⁺08] N. M. BUDNEV, O. B. CHVALAEV, O. A. GRESS, N. N. KALMYKOV ET AL. Data acquisition system for the Tunka-133 array, 2008. URL <http://arxiv.org/abs/0804.0856>.
- [BEH09] J. BLÜMER, R. ENGEL und J. R. HÖRANDEL. Cosmic rays from the knee to the highest energies. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 63:293–338, 2009. doi:10.1016/j.pnpnp.2009.05.002.
- [Col67] S. A. COLGATE. The Detection of High-Energy Cosmic-Ray Showers by the Combined Optical and Electromagnetic Pulse. *J. Geophys. Res.*, 72:4869, 1967.
- [DAA⁺07] B. R. DAWSON, J. ABRAHAM, M. AGLIETTA, I. C. AGUIRRE ET AL. Hybrid Performance of the Pierre Auger Observatory. In *Proc. of the 30th ICRC, Merida, Mexico*. 2007. URL <http://arxiv.org/abs/0706.1105>, astro-ph/0706.1105.
- [FAB⁺05] H. FALCKE, W. D. APEL, A. F. BADEA, L. BÄHREN ET AL. Detection and imaging of atmospheric radio flashes from cosmic ray air showers. *Nature*, 435:313–316, 2005. doi:10.1038/nature03614.
- [Fer49] E. FERMI. On the Origin of the Cosmic Radiation. *Physical Review*, 75(8):1169, 1949.
- [FG03] H. FALCKE und P. GORHAM. Detecting radio emission from cosmic ray air showers and neutrinos with a digital radio telescope. *Astroparticle Physics*, 19(4):477 – 494, 2003. doi:DOI: 10.1016/S0927-6505(02)00245-1. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927650502002451>.
- [Fli10] S. FLIESCHER. Radio detection of cosmic ray induced air showers at the Pierre Auger Observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, In Press, Corrected Proof, 2010. doi:DOI: 10.1016/j.nima.2010.11.045. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900210025088>.

- [FVHDB⁺06] H. FALCKE, M. P. VAN HAARLEM, A. G. DE BRUYN, R. BRAUN ET AL. A very brief description of LOFAR - the Low Frequency Array. Seite 2, 2006. URL <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0610652>.
- [Geo11] Geomagnetism, 2011. URL <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/>.
- [Gru05] C. GRUPEN. *Astroparticle Physics*. Springer Verlag, 1. Auflage, 2005.
- [HF03] T. HUEGE und H. FALCKE. Radio emission from cosmic ray air showers. *A&A*, 412(1):19–34, 2003. doi:10.1051/0004-6361:20031422. URL <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20031422>.
- [HKC⁺98] D. HECK, J. KNAPP, J. N. CAPDEVIELLE ET AL. CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers. FZKA Report 6019, Forschungszentrum Karlsruhe, 1998.
- [HRR03] A. HAUNGS, H. REBEL und M. ROTH. Energy spectrum and mass composition of high-energy cosmic rays. *Reports on Progress in Physics*, 66(7):1145, 2003. URL <http://stacks.iop.org/0034-4885/66/i=7/a=202>.
- [Hue10] T. HUEGE. Radio detection of cosmic rays in the pierre auger observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 617(1-3):484 – 487, 2010. doi:DOI: 10.1016/j.nima.2009.10.012. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900209019172>, 11th Pisa Meeting on Advanced Detectors - Proceedings of the 11th Pisa Meeting on Advanced Detectors.
- [JFP⁺65] J. JELLEY, J. FRUIN, N. PORTER, T. WEEKES ET AL. Radio pulses from extensive cosmic-ray air showers. *Nature*, 205:327–328, 1965. doi:doi:10.1038/205327a0.
- [KGA⁺09] O. KRÖMER, H. GEMMEKE, W. D. APEL, J. C. ARTEAGA ET AL. New Antenna for Radio Detection of UHECR. In *31st International Cosmic Ray Conference*. 2009.
- [KL66] F. D. KAHN und I. LERCHE. Radiation from cosmic ray air showers. In *Proc. Roy. Soc.*, Band A-289, Seite 206. 1966.
- [LAA⁺11] K. LINK, W. APEL, J. ARTEAGA, T. ASCH ET AL. The LOPES experiment. *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, 212-213:323 – 328, 2011. doi:DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2011.03.043. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920563211000764>, proceedings of the Cosmic Ray International Seminars (CRIS 2010) - 100 years of Cosmic Ray Physics: from pioneering experiments to physics in space.

Literaturverzeichnis

- [LH10] M. LUDWIG und T. HUEGE. REAS3: Monte Carlo simulations of radio emission from cosmic ray air showers using an „end-point“ formalism. *Astroparticle Physics*, 34:438–446, 2010.
- [Lud11] M. LUDWIG, 2011. Private communication.
- [OSH⁺11] J. OERTLIN, F. G. SCHRÖDER, A. HAUNGS, O. KRÖMER ET AL. Radiomessung hochenergetischer kosmischer Strahlung beim TUNKA-133-Experiment, 2011. Beitrag zur DPG-Frühjahrstagung in Karlsruhe.
- [PAC07] THE PIERRE AUGER COLLABORATION. Correlation of the highest-energy cosmic rays with nearby extragalactic objects. *Science*, 318(5852):938–943, 2007. doi:10.1126/science.1151124. URL <http://www.sciencemag.org/content/318/5852/938.abstract>.
- [PAC08] THE PIERRE AUGER COLLABORATION. Observation of the suppression of the flux of cosmic rays above 4×10^{19} eV. *arXiv:0806.4302v1 [astro-ph]*, 2008.
- [Rav10] O. RAVEL. The CODALEMA experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, In Press, Corrected Proof, 2010. doi:DOI: 10.1016/j.nima.2010.12.057. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900210027981>.
- [Sch10] F. G. SCHRÖDER. *Instruments and Methods for the Radio Detection of High Energy Cosmic Rays*. Dissertation, Fakultät für Physik, Karlsruher Institut für Technologie, 2010.
- [Sch11] F. SCHMIDT. CORSIKA Shower Images, 2011. URL <http://www.ast.leeds.ac.uk/~fs/showerimages.html>.
- [SWR08] O. SCHOLTEN, K. WERNER und F. RUSYDI. A macroscopic description of coherent geo-magnetic radiation from cosmic-ray air showers. *Astroparticle Physics*, 29:94–103, 2008.
- [Tun11] Tunka-25 EAS Cherenkov Light Array, 2011. URL <http://dbserv.sinp.msu.ru/tunka/>.
- [WS08] K. WERNER und O. SCHOLTEN. Macroscopic Treatment of Radio Emission from Cosmic Ray Air Showers based on Shower Simulations. *Astroparticle Physics*, 29:393–411, 2008.

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Besonderer Dank geht an:

- Herrn Prof. Dr. Johannes Blümer für die Übernahme des Referats.
- Andreas Haungs für die gute Betreuung, hilfreichen Gespräche, Beratung und die tolle Zeit.
- Frank Schröder ebenfalls für die gute Betreuung, Gespräche und Diskussionen, für Anregungen und Tipps.
- Maximilien Melissas für die Hilfe bei den REAS3-Simulationen.
- Die Tunka-Kollaboration, insbesondere Leonid A. Kuzmichev und Vasily V. Prosin für die zur Verfügungstellung der Daten und das Durchführen der Testmessungen.
- Büro 135 für das tolle Arbeitsklima, interessante und lehrreiche Diskussionen, viel Spaß und lustige Unterhaltungen und die vielen neuen Witze, die ich nun kenne. Vielen Dank an Daniel Huber, Katrin Link und Stefan Braun!
- Die ganze Radio-Arbeitsgruppe für viele Hilfen und nie langweilig werdende Kaffeepausen: Marianne Ludwig, Benjamin Fuchs, Tim Huege, Nunzia Palmieri, Paul Doll (KASCADE), Andreas Wickberg, Thomas Schäfer, Jonathan Lehr, Miriam Brosi, Matthias Blaicher und Barbara Streisand.

Und an meine Familie für die Unterstützung im Studium!

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass die vorliegende Bachelorarbeit - abgesehen von der Beratung durch meine wissenschaftlichen Betreuer - nach Inhalt und Form meine eigene Arbeit ist. Sie wurde weder ganz noch in Teilen an anderer Stelle im Rahmen eines Prüfungsverfahrens vorgelegt.

Karlsruhe, August 2011

.....
(Jan Oertlin)

