

# Bestimmung und Verbesserung der LOPES-Winkelauflösung

Determination and Improvement  
of the LOPES Angular Resolution

Bachelorarbeit  
von

Johanna Lapp

Karlsruher Institut für Technologie - IEKP

Erstgutachter: Prof. Dr. Johannes Blümer  
Betreuender Mitarbeiter: Dr. Frank G. Schröder

März 2013



# Kurzbeschreibung

Die Messung hochenergetischer kosmischer Strahlung erfolgt über verschiedene Detektionsmethoden. Ab einer Primärteilchenenergie von ca.  $10^{14}$  eV liefert die direkte Messung keine ausreichende Statistik mehr. Die kosmische Strahlung wird daher indirekt über Kaskaden aus Sekundärteilchen, die sogenannten ausgedehnten Luftschauer, gemessen. Diese Luftschauer entstehen durch die Reaktion der Primärteilchen mit Teilchen der Erdatmosphäre. Eine recht neue Detektionsmethode solcher Luftschauer ist die Messung emittierter Radiostrahlung im MHz-Bereich. Diese Methode wird unter anderem im LOPES-Experiment am KIT Campus Nord angewendet und weiterentwickelt, wobei die Radio-signale direkt mit den Daten der Teilchendetektoren von KASCADE und KASCADE-Grande am gleichen Ort verglichen werden können.

Ein wichtiger Parameter ist die Ankunftsrichtung des Luftschauers, die in erster Näherung mit der Ankunftsrichtung des Primärteilchens übereinstimmt. Ziel dieser Arbeit ist es, die Rekonstruktion der mit LOPES gemessenen Ankunftsrichtung von Luftschauern zu verbessern und die Richtungsgenauigkeit zu bestimmen. Die Analyse von LOPES basiert auf digitaler Radiointerferometrie. Beim Beamforming wird ausgehend von der rekonstruierten Richtung von KASCADE bzw. Grande zunächst die Zeitverschiebung durch die räumliche Anordnung der Antennen mit Hilfe einer geometrischen Korrektur behoben. Anschließend wird die Kreuzkorrelation zwischen den einzelnen Antennen gebildet und die Ankunftsrichtung ermittelt, für die der Kreuzkorrelations-Beam maximal ist. Die Schwierigkeit besteht hier darin, das globale Maximum zu finden, da es viele Nebenmaxima gibt. Die Suche nach dem globalen Maximum der Kreuzkorrelation wurde im Rahmen dieser Arbeit durch die Entwicklung eines dreidimensionalen Gitter verbessert. Für ca. 500 gemessene Ereignisse wurde die von LOPES rekonstruierte Ankunftsrichtung mit der von KASCADE bzw. Grande rekonstruierten Richtung verglichen. Außerdem wurde untersucht, ob ein Bias auf die rekonstruierte LOPES-Richtung durch die Vorgabe der Startrichtung von KASCADE bzw. Grande vorliegt. Es konnte kein signifikanter Bias festgestellt werden. Des Weiteren wurde eine leichte Energieabhängigkeit der Winkelauflösung von LOPES gefunden, die für konisches Beamforming im Rahmen der Fehler allerdings nur sehr schwach bis nicht erkennbar ist. Eine Abhängigkeit der LOPES-Richtungsgenauigkeit von Höhe des Kreuzkorrelations-Beams, sowie Azimut- und Zenit-Winkel konnte nicht gefunden werden. Für die Ausbreitung der Radioemission aus Luftschauern wurde bisher eine sphärische Wellenfront angenommen. Neue Erkenntnisse deuten aber darauf hin, dass die Wellenfront näherungsweise konisch ist. Dies wurde im Rahmen dieser Arbeit untersucht und konnte bestätigt werden. Unter der Annahme einer sphärischen Wellenfront erhält man ein oberes Limit auf die LOPES-Richtungsgenauigkeit von  $(0,73 \pm 0,02)^\circ$ , während sich mit einer konischen Wellenfront ein Limit von  $(0,65 \pm 0,01)^\circ$  erreichen lässt. Die LOPES-Winkelauflösung konnte also gegenüber dem früheren Wert von ca.  $1^\circ$  signifikant verbessert werden. Die Richtungsgenauigkeit von LOPES ist somit ausreichend für die Untersuchung der kosmischen Strahlung, sodass sich zukünftige Arbeiten auf eine verbesserte Rekonstruktion der Energie und Masse der Primärteilchen konzentrieren können.



# Abstract

There are various detection methods for the measurement of high energy cosmic rays. Primary particles with energies above  $10^{14}$  eV do not yield sufficient statistics when using direct measurements. Therefore, cosmic rays are measured indirectly through cascades of secondary particles, so called extensive air showers. An air shower results from nuclear reactions of the primary particle with atmospheric air molecules. A rather new detection method of such air showers is the measurement of radio emission in the MHz frequency range. This radio method is used and developed in the LOPES experiment at KIT Campus North, where the radio signals can be compared directly to the data of the ground detector arrays of KASCADE and KASCADE-Grande at the same place.

An important parameter is the arrival direction of the air shower, which is in first approximation identical to the arrival direction of the primary particle. The objective of this thesis is to improve the reconstruction of the arrival direction of air showers measured by LOPES and to determine the accuracy of these digital radio-interferometric measurements. The reconstruction or beamforming process has to account for a time shift corresponding to the relative locations of the radio antennas based on the shower direction provided by KASCADE or Grande. Additionally, the cross-correlation beam between different antennas is constructed and the arrival direction for which the cross-correlation beam has a maximum is determined. The difficulty here is to find the global maximum, because there are also many sidelobes. In this thesis, the method of locating the global maximum of the cross-correlation beam has been improved by developing a three dimensional grid. For about 500 measured events the direction reconstructed by LOPES has been compared to the one reconstructed by KASCADE or Grande. Furthermore, the reconstructed shower direction of LOPES has been checked for a bias due to using the direction of KASCADE or Grande as initial value. No significant bias has been found. Moreover, a slight dependence of the accuracy of the LOPES direction on energy has been found. For conical beamforming the dependence is very small within the limits of the errors, so it may be negligible. A dependence on height of the cross-correlation beam, azimuth and zenith angle has not been found.

So far, radio emission from extensive air showers has been considered to expand as spherical wavefronts, whereas newer findings indicate those wavefronts to be approximately conical. This theory has been investigated during the course of this thesis and found to be appropriate. Assuming spherical wavefronts, an upper limit on the accuracy of the LOPES direction of  $(0.73 \pm 0.02)^\circ$  has been obtained, while it is  $(0.65 \pm 0.01)^\circ$  for conical wavefronts. Thus the angular resolution of LOPES was improved significantly in comparison to the earlier value of about  $1^\circ$ . The accuracy of the direction reconstructed by LOPES is therefore sufficient for the research on cosmic rays, so future theses can concentrate on improving the reconstruction of energy and mass of the primary particle.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Kosmische Strahlung</b>	<b>1</b>
1.1 Massenspektrum . . . . .	1
1.2 Energiespektrum . . . . .	3
1.3 Ausgedehnte Luftschauer . . . . .	3
1.4 Detektionsmethoden . . . . .	3
1.4.1 Cherenkov-Teleskope . . . . .	3
1.4.2 Teilchendetektoren . . . . .	4
1.4.3 Fluoreszenzteleskope . . . . .	4
1.4.4 Radioantennen . . . . .	4
<b>2 Radioemission aus Luftschauern</b>	<b>5</b>
2.1 Mechanismus . . . . .	5
2.2 Experimente . . . . .	5
2.2.1 LOPES und LOFAR . . . . .	6
2.2.2 AERA . . . . .	7
<b>3 Richtungsrekonstruktion von LOPES</b>	<b>9</b>
3.1 Beamforming . . . . .	9
3.2 Verbesserungen . . . . .	11
<b>4 Bestimmung der optimierten Winkelauflösung von LOPES</b>	<b>13</b>
4.1 Ereignisauswahl . . . . .	13
4.2 Bias durch Vorgabe der Startrichtung? . . . . .	13
4.3 Ergebnisse . . . . .	16
<b>5 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>19</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>21</b>

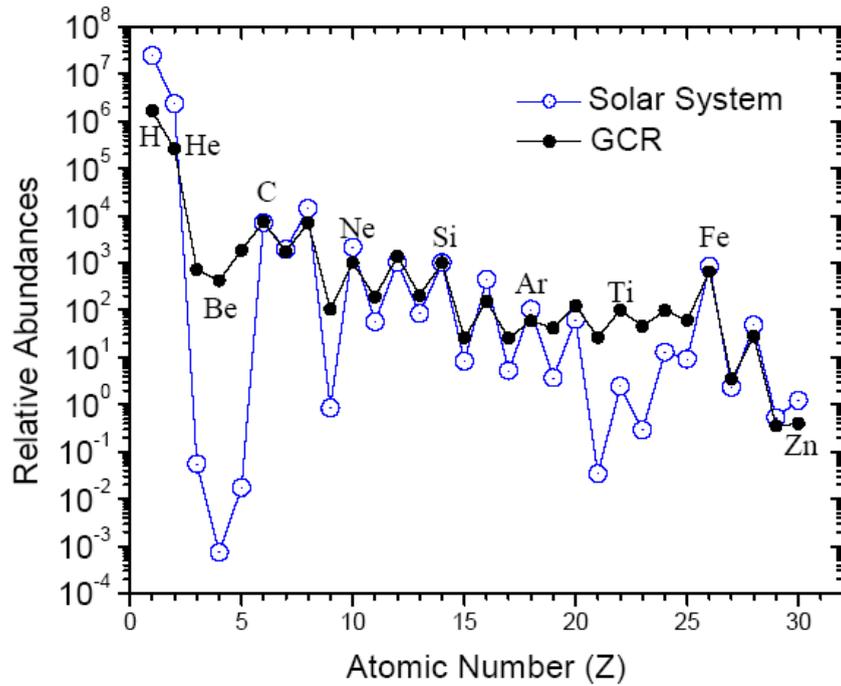


# 1. Kosmische Strahlung

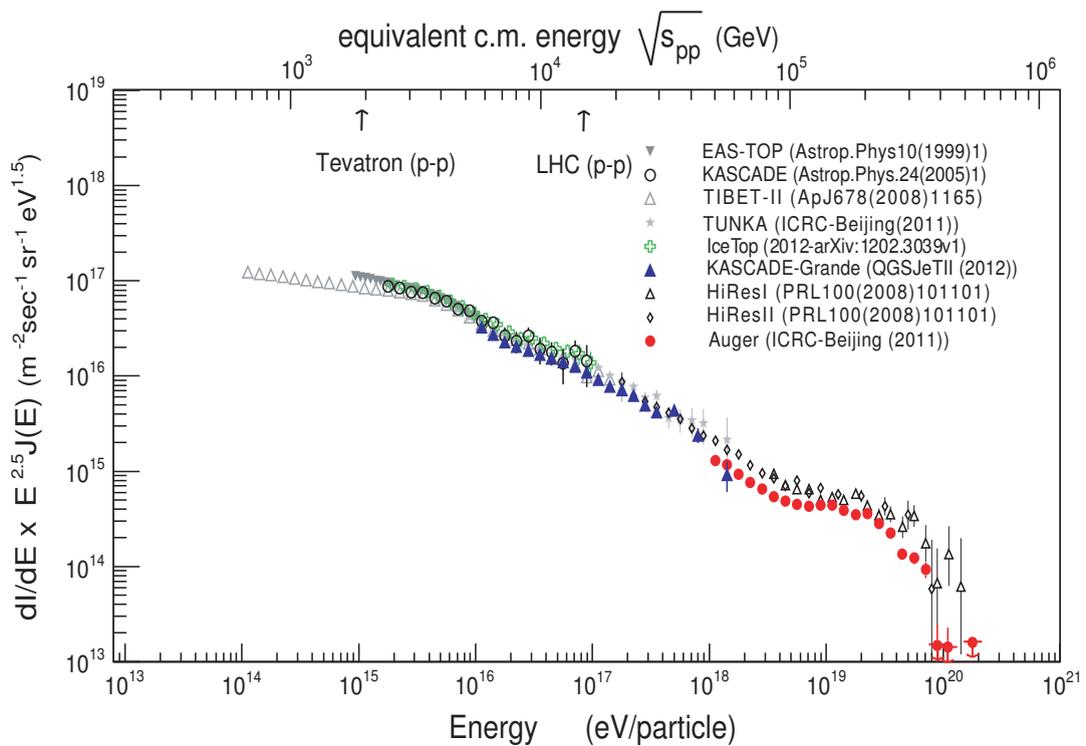
Die Entdeckung der kosmischen Strahlung erfolgte 1912 durch den österreichischen Physiker Victor F. Hess [Gru05]. Bei Ballonflügen bis zu einer Höhe von 5 km stellte er fest, dass der Ionisierungsgrad der Luft mit der Höhe zunächst ab- und dann zunimmt. Entgegen der bisherigen Vorstellung bedeutete dies, dass es auch außerhalb der Erdatmosphäre Quellen ionisierender Strahlung gibt. Damit war ein neues interessantes Forschungsgebiet geboren, das besonders für die Teilchenphysik bedeutsam wurde. Die Untersuchung der kosmischen Strahlung führte zur Entdeckung vieler neuer Elementarteilchen. Die Teilchen der kosmischen Strahlung decken ein Energiespektrum von etwa  $10^9$  eV bis über  $10^{20}$  eV ab. Damit erreichen sie weit höhere Energien als man mit Teilchenbeschleunigern erzeugen kann. Selbst der bislang beste Teilchenbeschleuniger, der LHC am CERN, erreicht bislang lediglich eine Schwerpunktsenergie von 7 TeV [CER]. Die Quellen neutraler Teilchen lassen sich noch relativ gut aufspüren, da diese nicht durch Magnetfelder abgelenkt werden. Für geladene Teilchen erweist sich dies jedoch als äußerst anspruchsvoll, da vor allem die niederenergetischen Teilchen auf recht chaotischen Bahnen zu unserer Erde kommen [Gru05]. Obwohl sich der Großteil des Spektrums der kosmischen Strahlung bereits gut erklären lässt, bedarf es noch weiterer Forschung, um die Quellen und Beschleunigungsmechanismen der höchstenergetischen kosmischen Strahlung vollkommen zu verstehen. Generell mögliche Quellen sind Supernovae und ihre Überreste, Pulsare, Neutronensterne und Aktive Galaktische Kerne, sowie Schwarze Löcher [Gru05].

## 1.1 Massenspektrum

Die kosmische Strahlung besteht zu 98 % aus Atomkernen und nur zu 2 % aus anderen Teilchen, überwiegend Elektronen. Dabei sind 87 % der Kerne Protonen, 12 %  $\alpha$ -Teilchen, sowie 1 % schwerere Elemente. Wie man in Bild 1.1 sieht, entspricht die Zusammensetzung damit weitgehend dem solaren Spektrum, der größte Unterschied liegt in der Überhäufigkeit der Elemente vor Kohlenstoff und Eisen. Diese Elemente sind Spallationsprodukte von C, N und Fe. Oberhalb weniger TeV ist die Elementzusammensetzung experimentell nicht mehr genau bestimmbar. Es lassen sich bei so hohen Energien nur Abschätzungen aus indirekten Experimenten anstellen. [KKZ97].



Abbildungung 1.1: Vergleich der solaren und kosmischen relativen Elementhäufigkeit. Auffallend ist die Überhäufigkeit der Elemente vor Kohlenstoff und Eisen. H und He sind dagegen unterhäufig [ACE].



Abbildungung 1.2: Energiespektrum der kosmischen Strahlung. Der Fluss ist skaliert mit  $E^{2.5}$ , damit die Struktur des Knies und des Knöchels besser sichtbar ist [Pal13].

## 1.2 Energiespektrum

Bild 1.2 zeigt das Energiespektrum der kosmischen Strahlung. Es erstreckt sich bis hin zu Energien von  $10^{20}$  eV, wobei der Fluss einem Potenzgesetz  $\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma}$  folgt und mit zunehmender Energie abnimmt. Der spektrale Index  $\gamma$  erhöht sich bei einer Energie von  $10^{15}$  eV von  $\gamma = 2.7$  auf  $\gamma = 3$ , der Fluss nimmt also stärker ab. Diesen Knick im Spektrum bezeichnet man als Knie. Eine mögliche Erklärung für diese Änderung des Flusses liegt darin, dass dort die maximale Energie erreicht wird, auf die ein Proton durch Supernova-Überreste beschleunigt werden kann. Für höhere Energien wird also ein anderer Beschleunigungsmechanismus oder andere Quellen benötigt, was zu einem steileren Spektrum führen könnte [Gru05]. Bei  $10^{19}$  eV befindet sich ein weiterer Knick, der sogenannte Knöchel. Im Bereich oberhalb von  $10^{20}$  eV findet schließlich eine Unterdrückung statt, das Spektrum bricht ab. Eine mögliche Erklärung hierfür ist der GZK-Effekt [Gre66, ZK66]. Die direkte Messung der Primärteilchen ist bis zu einer Energie von  $100 \text{ TeV} = 10^{14}$  eV möglich. Haben die Primärteilchen höhere Energien, so geschieht die Messung indirekt über Sekundärteilchen, die entstehen, wenn die Primärteilchen mit der Atmosphäre wechselwirken [KKZ97, Gru05].

## 1.3 Ausgedehnte Luftschauer

Trifft ein Primärteilchen auf die Erdatmosphäre, so löst es durch Wechselwirkungen mit den Luftteilchen eine Kaskade von Sekundärteilchen aus. Ein rein elektromagnetischer Schauer entsteht, wenn das Primärteilchen ein Elektron oder Photon ist. Er besteht aus Elektronen, Positronen und Photonen und seine wesentlichen Eigenschaften werden recht gut durch das Heitler-Modell beschrieben [Mat05]. Ist das Primärteilchen ein Kern, zum Beispiel ein Proton, so entstehen beim Stoß mit den Luftteilchen in erster Linie Pionen, aber auch Kaonen und andere Hadronen. Während die neutralen Pionen fast sofort wieder zerfallen, können die geladenen Pionen weiter wechselwirken, bevor sie ebenfalls zerfallen.

$$\begin{aligned}\pi^0 &\rightarrow 2\gamma \\ \pi^\pm &\rightarrow \mu^\pm + \bar{\nu}^{(-)}\end{aligned}$$

Es bildet sich dadurch eine Kaskade an Teilchen, die sich auf den Erdboden zubewegt. Der Schauer besteht aus einer elektromagnetischen, einer myonischen und einer hadronischen Komponente, wobei die elektromagnetische Komponente den Hauptteil bildet. Die Gesamtteilchenzahl nimmt immer weiter zu, bis schließlich die Absorptionsprozesse überwiegen und ein Teilchenzahlmaximum erreicht wird. Die atmosphärische Tiefe, bei der dieses Maximum erreicht wird, bezeichnet man als  $X_{\text{max}}$ . Dieses hängt logarithmisch von der Primärteilchenenergie ab und ändert sich auch mit dessen Masse. Je schwerer das Primärteilchen ist, desto früher findet die erste Wechselwirkung mit der Atmosphäre statt, da der Wirkungsquerschnitt proportional zur Masse zunimmt [Gru05]. Entsprechend ist das Teilchenzahlmaximum dann auch bei einer geringeren atmosphärischen Tiefe [Mat05]. Durch die Messung von  $X_{\text{max}}$  kann man also Rückschlüsse auf Energie und Masse des Primärteilchens ziehen.

## 1.4 Detektionsmethoden

Es gibt verschiedene Methoden, ausgedehnte Luftschauer zu messen. Im Folgenden sind die einzelnen Methoden kurz dargestellt.

### 1.4.1 Cherenkov-Teleskope

Bei Cherenkov-Teleskopen macht man sich den Cherenkov-Effekt zu Nutzen. Wenn sich ein Teilchen im Medium schneller bewegt, als die Lichtgeschwindigkeit im Medium, so wird

ein Lichtkegel emittiert. Dies trifft auf die Teilchen der elektromagnetischen Komponente eines Luftschauers zu. Der Öffnungswinkel des Kegels hängt von dem Brechungsindex  $n$  und dem Verhältnis von Geschwindigkeit zu Lichtgeschwindigkeit  $\beta = \frac{v}{c}$  in folgender Weise ab:

$$\theta_C = \arccos \frac{1}{n\beta}. \quad (1.1)$$

Man unterscheidet zwischen abbildenden und nichtabbildenden Cherenkov-Detektoren. Bei letzteren werden die Photonen direkt mit Photomultipliern am Boden gemessen. Dies geschieht zum Beispiel beim Tunka-Array in Sibirien [B<sup>+</sup>12a]. Bei den abbildenden Cherenkov-Detektoren, werden die Photonen mit Hilfe von Parabol-Spiegeln eingefangen und mit Photomultipliern detektiert. Ein Beispiel hierzu ist das MAGIC-Experiment [Ang13]. Diese Detektionsmethode eignet sich zum Messen der elektromagnetischen Komponente von Schauern, lässt sich aber nur nachts anwenden [Gru05].

### 1.4.2 Teilchendetektoren

Die klassische Methode ist die Messung der am Erdboden ankommenden Teilchen. Dies geschieht in der Regel über Szintillations- oder Wasser-Cherenkov-Detektoren. Letztere sind große Wassertanks, in denen sich Photomultiplier befinden, die das dort emittierte Cherenkov-Licht registrieren. Man findet solche Detektoren zum Beispiel am Pierre-Auger-Observatorium in Argentinien [Dan13]. Mit Szintillationsdetektoren kann man die geladenen Teilchen über Ionisationsprozesse in szintillierendem Material messen. Diese Methode wurde zum Beispiel am Karlsruher Institut für Technologie beim KASCADE-Grande-Experiment [B<sup>+</sup>12b] angewendet. Man kann so die Zahl der geladenen Teilchen bestimmen, sowie die Einfallrichtung des Schauers. Letzteres geschieht über die Ankunftszeit der Teilchen an den einzelnen Detektoren. Damit lassen sich Rückschlüsse auf Energie und Masse des Primärteilchens ziehen. Der Nachteil dieser Methode ist, dass die Bestimmung der Masse sehr ungenau und stark modellabhängig ist [Gru05, BEH09].

### 1.4.3 Fluoreszenzteleskope

Fluoreszenzteleskope bieten eine weitere interessante Methode zur Messung von Luftschauern bei einer Primärteilchenenergie von über  $10^{17}$  eV. Man kann damit direkt das longitudinale Profil des Luftschauers bestimmen. Dazu misst man das Fluoreszenzlicht, das entsteht, wenn die Stickstoffatome aus der Luft durch geladene Teilchen angeregt werden. Ein großer Nachteil bei dieser Technik ist allerdings, wie bei den Cherenkov-Teleskopen, dass man die Messung nur in klaren mondlosen Nächten durchführen kann, was einem Duty-Cycle von ca. 10 % entspricht. Auch diese Technik wird am Auger-Observatorium praktiziert, zusammen mit den Wasser-Cherenkov-Tanks werden dort Hybridmessungen durchgeführt [Dan13, BEH09].

### 1.4.4 Radioantennen

Eine alternative Methode der Luftschauerdetektion bildet die Radiomessung. Erstmals theoretisch vorhergesagt wurde die kohärente Emission von Radiostrahlung aus Luftschauern 1961 von Askaryan [Ask65]. Wegen mangelnder technischer Entwicklung und unzureichendem Verständnis der theoretischen Grundlagen, sowie anderen Techniken, die zu dem Zeitpunkt vielversprechender waren, flachte das Interesse an dieser Methode schon zum Ende der 1970er Jahre wieder ab. Erst in den letzten Jahren beschäftigt man sich wieder intensiver mit der Radiostrahlung aus Luftschauern [BEH09]. Man misst hierzu mit Antennen im Bereich einiger 10 MHz Radioemission, die von Luftschauern ausgesendet wird. Mit der Radiomessung erhält man einen Duty-Cycle von nahezu 100 % und es wird davon ausgegangen, dass eine hohe Genauigkeit bei der Bestimmung der Schauerparameter erreichbar ist. Der Hauptteil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Bestimmung eines der Schauerparameter, der Rekonstruktion der Ankunftsrichtung, und deren Genauigkeit.

## 2. Radioemission aus Luftschauern

Dieses Kapitel behandelt den Mechanismus der Radioemission aus Luftschauern, sowie einige entsprechende Experimente.

### 2.1 Mechanismus

Es gibt verschiedene Mechanismen der kohärenten Emission von Radiostrahlung in Luftschauern, die mehr oder weniger stark zum Radiosignal beitragen. Ein Effekt ist die Ladungsseparation durch das Erdmagnetfeld, was einen sich zeitlich ändernden transversalen Strom zur Folge hat [KL66]. Die geladenen Teilchen, primär Elektron-Positron-Paare, werden durch die Lorentz-Kraft in entgegengesetzte Richtungen abgelenkt. Die beschleunigt bewegten Ladungen erzeugen Radiostrahlung [Gri10]. Dieser geomagnetische Effekt wird als der dominante Mechanismus angesehen.

Ein weiterer Effekt ist der Askaryan-Effekt. Darunter versteht man die Entwicklung eines negativen Ladungsüberschusses im Schauer. Dieser Ladungsüberschuss entsteht durch Compton-Streuung und Annihilation von Positronen. Die Radioemission wird durch die zeitliche Änderung der Netto-Ladung erzeugt [Gri10]. Es gibt noch diverse Vorschläge für weitere Mechanismen, siehe dazu z.B. [Gri10], die aber teilweise noch nicht nachgewiesen wurden und einen eher kleinen Teil zur Gesamtemission beitragen.

Ein ebenfalls wichtiger Punkt ist der Brechungsindex der Atmosphäre. Er ändert sich mit der atmosphärischen Tiefe und beeinflusst die Kohärenzbedingungen für die Radioemission und dadurch alle Mechanismen. Der Brechungsindex ist besonders bei GHz-Frequenzen wichtig. Es ist noch nicht bis ins Detail bekannt, welche Rolle die einzelnen Mechanismen im Gesamtbild spielen, jedoch erhofft man sich durch verschiedene Experimente und Simulationen in naher Zukunft mehr Klarheit darüber zu erhalten. So wurde erst kürzlich beim CROME-Experiment am KIT Campus Nord die Radioemission im GHz-Bereich nachgewiesen [S<sup>+</sup>11].

### 2.2 Experimente

Es gibt derzeit verschiedene Experimente, die sich mit der Radiomessung von Luftschauern befassen. Zu nennen sind hier ANITA[Bes12], CODALEMA [Col12], Tunka-Rex [S<sup>+</sup>13b], LOPES [S<sup>+</sup>13a] und LOFAR [A<sup>+</sup>13], sowie AERA [Ben12]. Letztere werden nun etwas näher betrachtet.



Abbildung 2.1: LOPES-Antenne, wie sie für LOPES10, LOPES30 und LOPES30pol verwendet wurden.

### 2.2.1 LOPES und LOFAR

LOPES (=LOFAR Prototype Station) ist ein digitales Radiointerferometer am Karlsruhe Institut für Technologie, das ursprünglich als Prototyp-Experiment für LOFAR (=Low Frequency Array) gebaut wurde. Es ist seit 2003 in Betrieb und hat viele Daten gesammelt, an deren Auswertung weiterhin gearbeitet wird. Der Frequenzbereich von LOPES beträgt 40-80 MHz. Getriggert wird das Experiment über KASCADE bzw. KASCADE-Grande. In den ersten zwei Jahren bestand LOPES aus 10 Dipol-Antennen (LOPES10), die jeweils in Form eines umgedrehten Vs in Ost-West-Richtung im Cascade-Feld angebracht waren, siehe Bild 2.1. Dieser Aufbau wurde im Februar 2005 um weitere 20 Antennen zu LOPES30 erweitert. Im Dezember 2006 wurden 15 der bestehenden Antennen um  $90^\circ$  gedreht, sodass auch die Nord-Süd-Polarisation untersucht werden konnte. Im Februar 2010 wurde LOPES3D aufgebaut, das darauf abzielte den kompletten dreidimensionalen Feldvektor zu messen. Des Weiteren wurde 2006 ein neues Antennensystem, LOPES<sup>STAR</sup> aufgestellt, das aus 10 dual-polarisierten Antennen bestand, die im KASCADE-Grande-Feld verteilt waren. Hiermit wurde ein selbst-getriggertes System entwickelt [H<sup>+</sup>12, LOP]. Das Ziel von LOPES besteht darin, Methoden zu entwickeln, die von neueren Experimenten wie AERA oder Tunka-Rex verwendet werden können. Mit Hilfe von LOPES konnten bereits einige theoretische Vorhersagen bestätigt und die Technik der Radiodetektion weiterentwickelt werden. Für weitere Informationen und aktuelle Ergebnisse von LOPES siehe z.B. [S<sup>+</sup>13a].

Das digitale Radioteleskop LOFAR ist über einen weiten Teil von Europa verteilt. Es hat Stationen in den Niederlanden, Deutschland, Frankreich, Schweden und Großbritannien. Der Kern des Experiments befindet sich in den Niederlanden und besteht aus 24 Stationen innerhalb von  $4 \text{ km}^2$ , die jeweils aus 96 niederfrequenten und 48 hochfrequenten Antennen bestehen. Die niederfrequenten Antennen arbeiten in einem Bereich von 10 bis 90 MHz, die hochfrequenten in einem Bereich von 110 bis 250 MHz. Weitere Informationen über LOFAR finden sich z.B. in Referenz [A<sup>+</sup>13].

### 2.2.2 AERA

Am Pierre-Auger-Observatorium befinden sich seit Juli 2011 24 Radio-Messstationen auf einer Fläche von  $\approx 0,4 \text{ km}^2$ , das Auger Engineering Radio Array (AERA). Die Stationen bestehen aus dual-polarisierten logarithmisch-periodischen Dipol-Antennen, die im Bereich von 30 bis 80 MHz arbeiten. AERA ist sowohl selbstgetriggert als auch extern getriggert und wird zu Hybridmessungen mit den schon länger bestehenden Detektoren des Auger-Observatoriums eingesetzt. Näheres zu diesem Experiment findet man z.B. in Referenz [Ben12].



## 3. Richtungsrekonstruktion von LOPES

Im Folgenden soll zunächst die Rekonstruktion der Ankunftsrichtung des Luftschauers näher beschrieben werden. Die Analysesoftware von LOPES verwendet digitale Interferometrie, d.h. man arbeitet nicht einfach mit den Messwerten der einzelnen Antennen, sondern man kombiniert die Einzelmessungen, indem man die Kreuzkorrelation bildet. Damit kann eine höhere Genauigkeit erreicht werden. Standardmäßig wird im Analyseprogramm eine sphärische Wellenfront für das Radiosignal der Luftschauer angenommen. Neue Erkenntnisse deuten darauf hin, dass die Wellenfront näherungsweise konisch ist, daher wird das Verfahren des Beamformings allgemein für beide Theorien geschildert. Im zweiten Teil dieses Kapitels werden die Verbesserungen aufgeführt, die im Rahmen dieser Bachelorarbeit am bestehenden Analyseprogramm durchgeführt wurden.

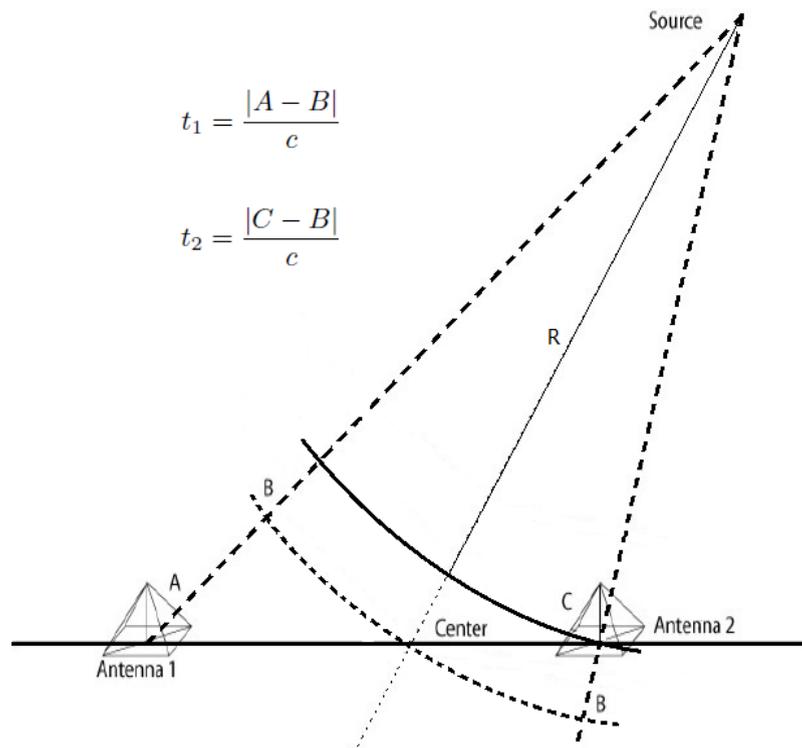
### 3.1 Beamforming

Das digitale Beamforming ist ein Teil der LOPES-Analysepipeline. Als Startwerte werden zunächst die Ankunftsrichtung und das Schauerzentrum von KASCADE(-Grande) verwendet. Ausgehend davon werden die Spuren der einzelnen Antennen gemäß ihrer Ankunftszeit verschoben. Es handelt sich hierbei um eine rein geometrische Korrektur nach der Ankunftsrichtung und Antennenposition, siehe auch Bild 3.1.

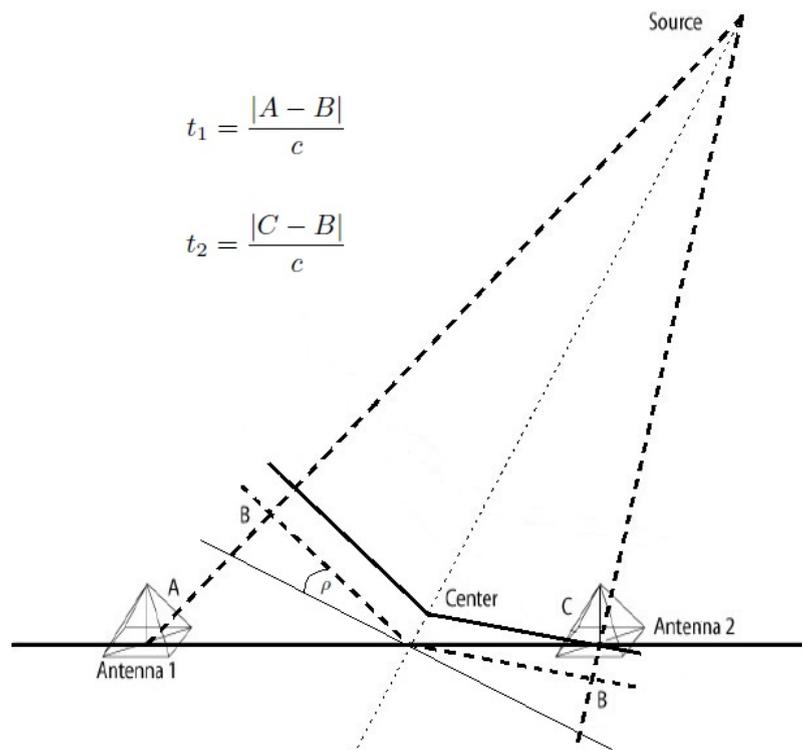
Als nächstes wird die Kreuzkorrelation (CC-Beam) ausgerechnet, anhand der Formel:

$$CC(t) = \pm \sqrt{\left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j>i}^N s_i(t) s_j(t) \right|} \quad (3.1)$$

Dabei stehen  $s_i$  bzw.  $s_j$  für einzelne Samples der Spuren der Antennen  $i$  und  $j$  und  $N$  ist die Gesamtzahl der Samples einer Spur. Es wird dann schrittweise nach dem höchsten Wert für den CC-Beam gesucht, indem die Ankunftsrichtung, sowie die Krümmung bzw. der Öffnungswinkel der Wellenfront variiert werden. Dies erweist sich als nicht ganz einfach, da es nicht nur ein Maximum gibt, sondern viele Nebenmaxima. Es ist also eine gut entwickelte Methode notwendig, um das globale Maximum aufzuspüren und nicht in einem der Nebenmaxima zu landen.



(a) Sphärisches Beamforming



(b) Konisches Beamforming

Abbildung 3.1: Geometrische Korrektur  $t$  in Abhängigkeit der Antennenposition für eine sphärische und eine konische Wellenfront.  $R$  ist der Krümmungsradius und  $\rho$  der Kegelwinkel, nach [Hor06, Fra11].

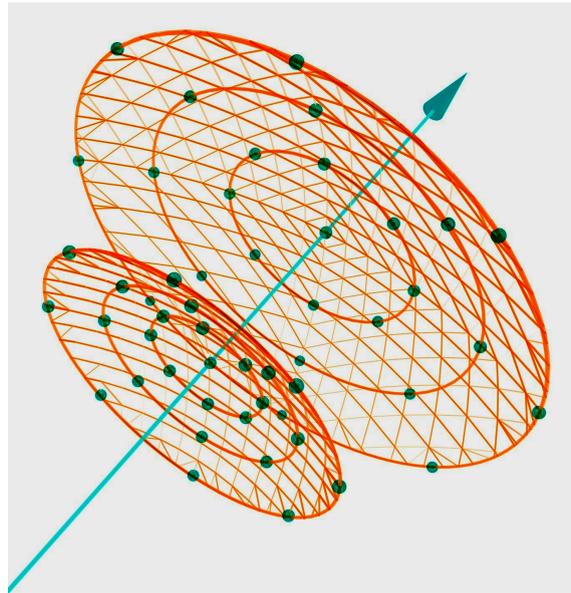


Abbildung 3.2: Verbessertes dreidimensionales Gitter zur Suche des besten CC-Beams.

Bisher geschah die Suche nach dem maximalen CC-Beam in folgenden Schritten:

- Suche nach dem besten Krümmungsradius bzw. Kegelwinkel
- Suche nach dem besten Azimut- und Zenitwinkel
- Wiederholung des ersten Punktes mit kleinerer Schrittweite
- Simplex-Fit um gefundenen Startwert zur Optimierung von Azimut- und Zenitwinkel, sowie Krümmungsradius bzw. Kegelwinkel

Dabei wurde im zweiten Schritt ein 2-dimensionales Gitter um die von KASCADE(-Grande) rekonstruierte Richtung abgesucht, wobei die Gitterpunkte nicht regelmäßig angeordnet waren. Dieses Vorgehen wurde im Rahmen dieser Arbeit wie folgt verbessert.

## 3.2 Verbesserungen

Zunächst wurden die ersten drei Schritte in einem Schritt zusammengefasst, es wurde also ein dreidimensionales Gitter entwickelt, wie man in Bild 3.2 sehen kann. Dies bedeutet, dass für verschiedene Krümmungsradien bzw. Kegelwinkel jeweils ein 2D-Gitter auf einer Kugeloberfläche abgesucht wird. Dabei werden Azimut- und Zenitwinkel so variiert, dass sich die einzelnen Gitterpunkte auf äquidistanten Kreisen um den Startwert befinden. Damit ist das Gitter um den Startwert herum dichter und nach außen hin immer weniger dicht. Der Abstand zwischen den einzelnen Kreisen wurde auf ein viertel Grad gesetzt, um möglichst sicher das globale Maximum zu treffen. Es ist hier zu beachten, dass man nicht beliebig viele Gitterpunkte nehmen kann, da es sehr schnell sehr rechenintensiv wird. Der maximale Abstand zum Startwert beträgt  $2,5^\circ$ . Es werden so pro Kugelschale 81 Gitterpunkte nach dem maximalen CC-Beam abgesucht. Der Gitterpunkt mit dem besten CC-Beam wird dann als Startwert für den Simplex-Fit verwendet, welcher unverändert blieb.



## 4. Bestimmung der optimierten Winkelauflösung von LOPES

A. Nigl hat bereits 2008 die Winkelauflösung von LOPES bestimmt [A. 08]. Er ist damals mit einer weniger weit entwickelten Analysesoftware, weniger Statistik und weniger strengen Auswahlkriterien für die LOPES Ereignisse auf eine Auflösung von etwa  $1^\circ$  für Luftschauer gekommen. Außerdem hat er festgestellt, dass die Winkelauflösung dadurch limitiert war, dass die Form der Wellenfront noch nicht hinreichend bekannt war [A. 08].

Zur erneuten Bestimmung der optimierten Winkelauflösung von LOPES wurde für eine Auswahl von etwa 500 Ereignissen die Differenz zwischen der rekonstruierten Ankunftsrichtung von LOPES und der von KASCADE bzw. Grande ermittelt. Die Winkelauflösung von KASCADE bzw. Grande sollte deutlich besser als die von LOPES sein, ist allerdings für die verwendete Auswahl an Ereignissen nicht bekannt. Insbesondere liegen diese jenseits des Standardenergiebereichs von KASCADE und teilweise außerhalb der Fiducial Area von Grande.

### 4.1 Ereignisauswahl

Es wurde eine Auswahl an Ereignissen aus allen LOPES-Daten von 2005 bis 2009 verwendet. Dabei wurden die üblichen Vorauswahlkriterien benutzt, um eine erfolgreiche Rekonstruktion von KASCADE bzw. Grande und von LOPES sicherzustellen, siehe [Sch10]. Dazu gehören eine Mindestenergie von  $10^{17}$  eV und ein Zenitwinkel von höchstens  $45^\circ$ . Bild 4.1 zeigt eine Karte aller Ereignisse aus der Vorauswahl. Weitere Qualitätscuts wurden ebenfalls wie üblich gesetzt [Sch10], dazu gehört unter anderem ein Mindestverhältnis zwischen Signal und Rauschen. Es wurde zusätzlich ein Zenitwinkel von mindestens  $4^\circ$  gewählt, da das Gitter in Zenitnähe teilweise nicht richtig berechnet wird und dies eventuell die Ergebnisse verfälschen kann. Dies betrifft allerdings lediglich 4 Ereignisse. Außerdem wurden jeweils nur die Daten der Antennen mit Ost-West-Polarisation berücksichtigt.

### 4.2 Bias durch Vorgabe der Startrichtung?

Die Winkelauflösung von LOPES wird über die mittlere Abweichung der von LOPES rekonstruierten Ankunftsrichtung des Luftschauers zu der von KASCADE bzw. Grande rekonstruierten bestimmt. Daher wurde zunächst untersucht, ob ein Bias durch die vorgegebene Startrichtung von KASCADE bzw. Grande vorliegt. Man könnte meinen, dass die

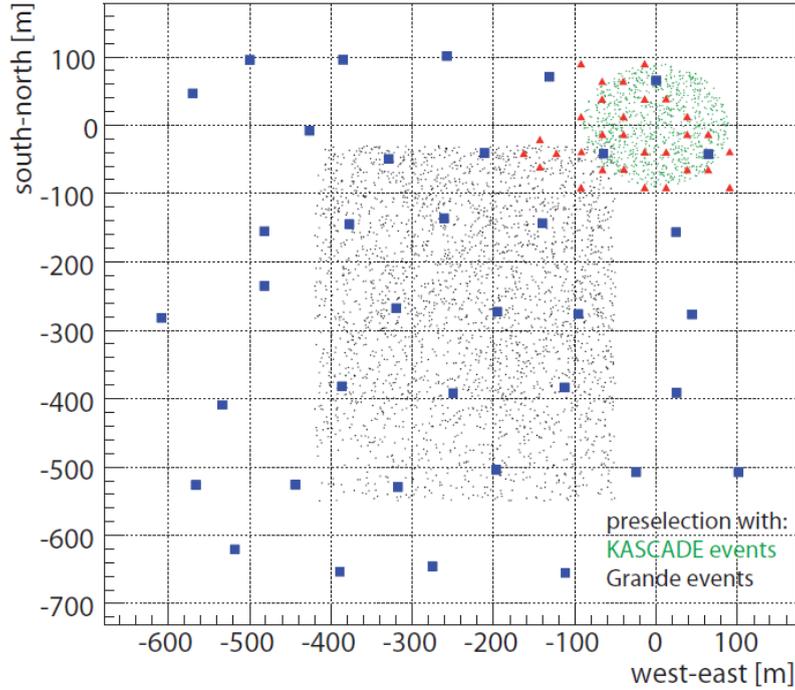


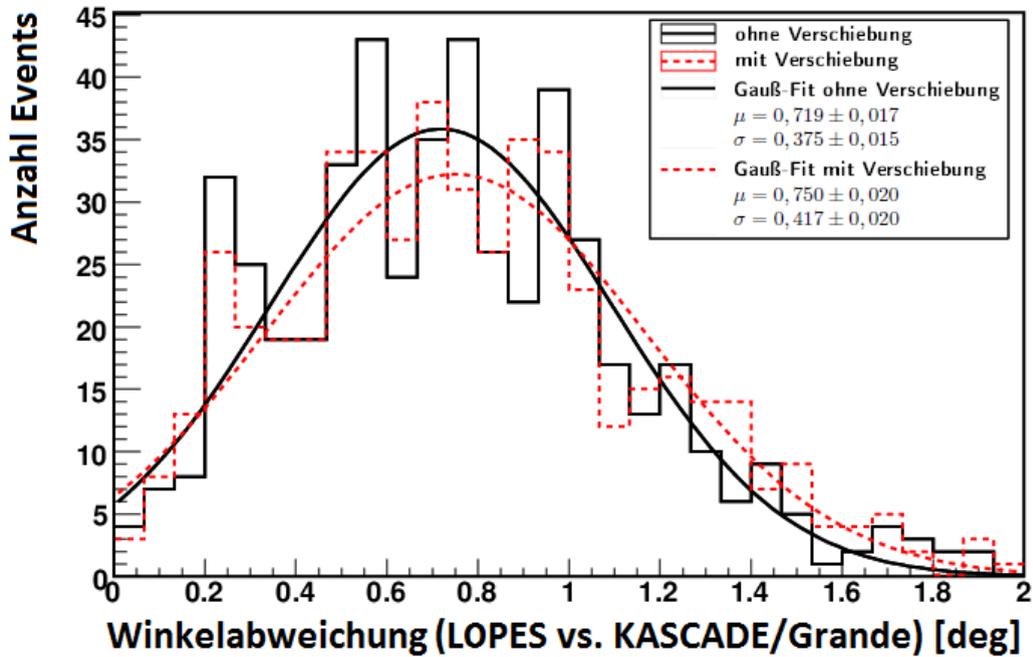
Abbildung 4.1: Karte aller Ereignisse aus der Vorauswahl. Abgebildet sind außerdem die Grande-Stationen (blaue Quadrate) und die LOPES-Antennen bis 2006 (rote Dreiecke) [Sch10].

Vorgabe der Startrichtung zu einem besseren Ergebnis führt, da man dadurch schon mit dem “richtigen” Wert anfängt. Um dies auszuschließen wäre es offensichtlich am besten, für jedes Ereignis den gesamten Himmel abzusuchen. Da die Rechenzeit dafür auf einem modernen Standard-PC für ein Gitter mit  $2,5^\circ$  Durchmesser ca. 5 Minuten pro Ereignis beträgt, wurde stattdessen einfach die Startrichtung um  $2^\circ$  in eine per Zufallszahl bestimmte Richtung verschoben. Die Verteilung der Winkelauflösung wurde dann mit der unverschobenen Verteilung verglichen. In Bild 4.2 sieht man die Verteilung der Abweichung der LOPES-Richtung von der KASCADE(-Grande)-Richtung für eine sphärische und eine konische Wellenfront. Die unterschiedliche Anzahl an Ereignissen kommt daher, dass je nach Wellenfront-Modell unterschiedliche Ereignisse die Qualitätscuts nicht erfüllen konnten. Es ist eine Gauß-Funktion der folgenden Form gefittet worden:

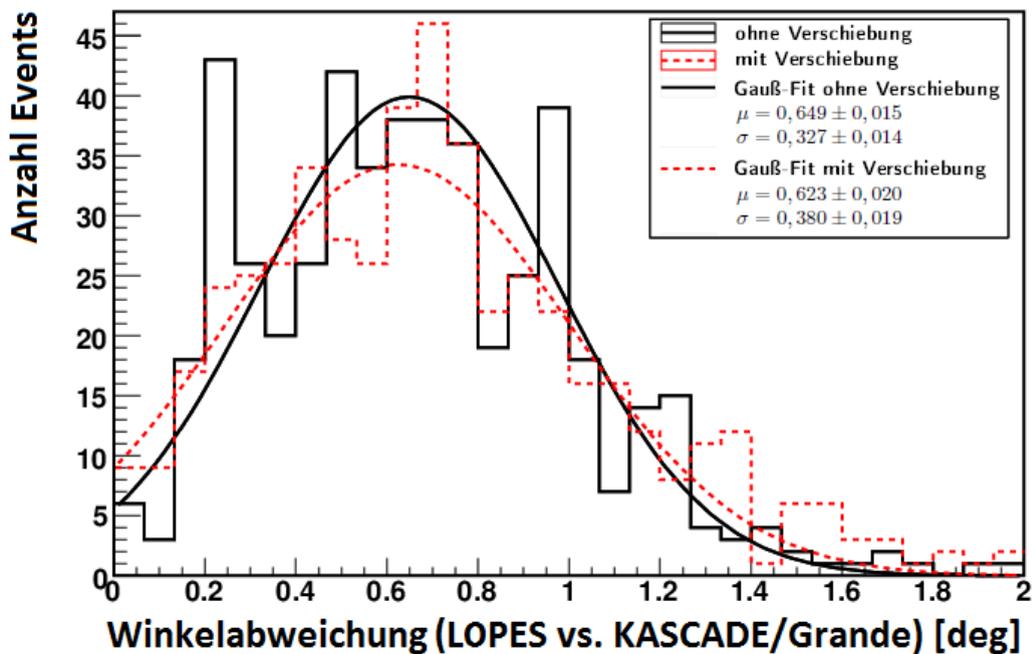
$$g(\alpha) = \frac{N}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (4.1)$$

mit  $N = \frac{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}{N_{\text{bins}} \cdot N_{\text{events}}}$

Dabei ist  $\alpha$  die Winkelabweichung,  $\mu$  der Mittelwert,  $\sigma$  die Standardabweichung und  $N$  ein Normierungsfaktor, der von der minimalen und maximalen Winkelabweichung, von der Anzahl verwendeter Bins und der Gesamtzahl an Events abhängt. Wie man anhand der Fitwerte sehen kann, lässt sich kein signifikanter Bias feststellen. Überraschenderweise zeigt das Ergebnis für das konische Beamforming sogar eine leichte Verbesserung der Winkelabweichung bei verschobener Startrichtung.



(a) Sphärisches Beamforming (506 Ereignisse)



(b) Konisches Beamforming (491 Ereignisse)

Abbildung 4.2: Verteilungen der Winkelabweichung der LOPES-Richtung gegenüber KASCADE bzw. Grande mit Vorgabe der echten Startrichtung von KASCADE bzw. Grande (schwarz, durchgezogen), sowie mit Vorgabe einer um  $2^\circ$  in eine zufällige Richtung verschobenen Startrichtung (rot, gestrichelt).

Tabelle 4.1: Ergebnisse des Gauß-Fits für die Verteilung der Winkelabweichung von LOPES zu KASCADE bzw. KASCADE-Grande mit jeweils 295 bzw. 215 Ereignissen, jeweils für sphärisches und konisches Beamforming.

	sphärisches Beamforming		konisches Beamforming	
	Mittelwert (°)	Standard- abweichung (°)	Mittelwert (°)	Standard- abweichung (°)
KASCADE Events	$0,693 \pm 0,028$	$0,409 \pm 0,025$	$0,649 \pm 0,019$	$0,329 \pm 0,018$
Grande Events	$0,713 \pm 0,025$	$0,352 \pm 0,026$	$0,680 \pm 0,024$	$0,324 \pm 0,019$
Alle Events	$0,728 \pm 0,018$	$0,387 \pm 0,017$	$0,648 \pm 0,015$	$0,331 \pm 0,014$

### 4.3 Ergebnisse

In Tabelle 4.1 sind die Ergebnisse der Gauß-Fits an die Verteilungen der Winkelabweichung von LOPES zu KASCADE bzw. KASCADE-Grande getrennt, sowie für alle Ereignisse zusammen dargestellt, wieder jeweils für sphärisches und konisches Beamforming. Es mag zunächst etwas seltsam erscheinen, dass der Mittelwert der Winkelabweichung für alle Ereignisse zusammen besser bzw. schlechter ist als die der getrennten KASCADE und Grande Ereignisse ist. Man würde erwarten, dass er dazwischen liegt. Dass dies hier nicht der Fall ist, liegt lediglich daran, dass einzelne Ereignisse sowohl von KASCADE, als auch von KASCADE Grande gemessen wurden. Diese Ereignisse gehen aber nur einfach in den Mittelwert der Winkelabweichung aller Ereignisse ein, da dort doppelte Ereignisse herausgefiltert werden.

Die KASCADE-Ereignisse weisen im Mittel eine etwas kleinere Abweichung gegenüber den Grande-Ereignissen. Der Unterschied ist allerdings nicht signifikant. An den Werten für alle Ereignisse sieht man hingegen recht deutlich, dass die Abweichung für das konische Beamforming mit einem Mittelwert von  $(0,648 \pm 0,015)^\circ$  signifikant kleiner ist als die für sphärisches Beamforming mit einem Mittelwert von  $(0,728 \pm 0,018)^\circ$ . Man erhält mit diesen Werten jeweils ein oberes Limit für die LOPES-Winkelauflösung. In Bild 4.3 sieht man die Verteilung der Richtungsabweichung für alle Ereignisse zusammen jeweils für sphärisches und konisches Beamforming. Es wurde wieder eine Gauß-Verteilung wie in Gleichung 4.1 gefittet.

Es wurde weiterhin eine Abhängigkeit der LOPES-Winkelauflösung von verschiedenen Schauerparametern untersucht. In den Bildern 4.5 ist die Winkelauflösung jeweils über Energie, Höhe des CC-Beams, Azimut- und Zenit-Winkel aufgetragen. Dabei sind die Daten für sphärisches Beamforming schwarz (durchgezogen) gekennzeichnet und die Daten für konisches Beamforming rot (gestrichelt). Es lässt sich keine klare Abhängigkeit der Winkelauflösung von der Höhe des CC-Beams, sowie Azimut- und Zenit-Winkel erkennen, allerdings sieht es so aus, als wäre vor allem bei den Daten des sphärischen Beamformings eine leichte Abhängigkeit von der Energie vorhanden. Es wurde daher sowohl für sphärisches als auch für konisches Beamforming eine Gerade an die Werte gefittet, siehe dazu Bild 4.4. Die Steigung beträgt  $0,416 \pm 0,201$  für sphärisches Beamforming und  $0,227 \pm 0,201$  für konisches Beamforming. Es liegt also für sphärisches Beamforming tatsächlich eine leichte Abhängigkeit von der Energie vor. Die Winkelauflösung wird mit steigender Energie etwas schlechter. Bei konischem Beamforming lässt sich eine Abhängigkeit noch nicht ganz ausschließen, ist aber auf jeden Fall geringer.

Die Winkelauflösung ist also näherungsweise unabhängig von der Richtung. Insbesondere scheint ein besseres Signal-zu-Rausch-Verhältnis nicht zu einer Verbesserung der Winkelauflösung zu führen.

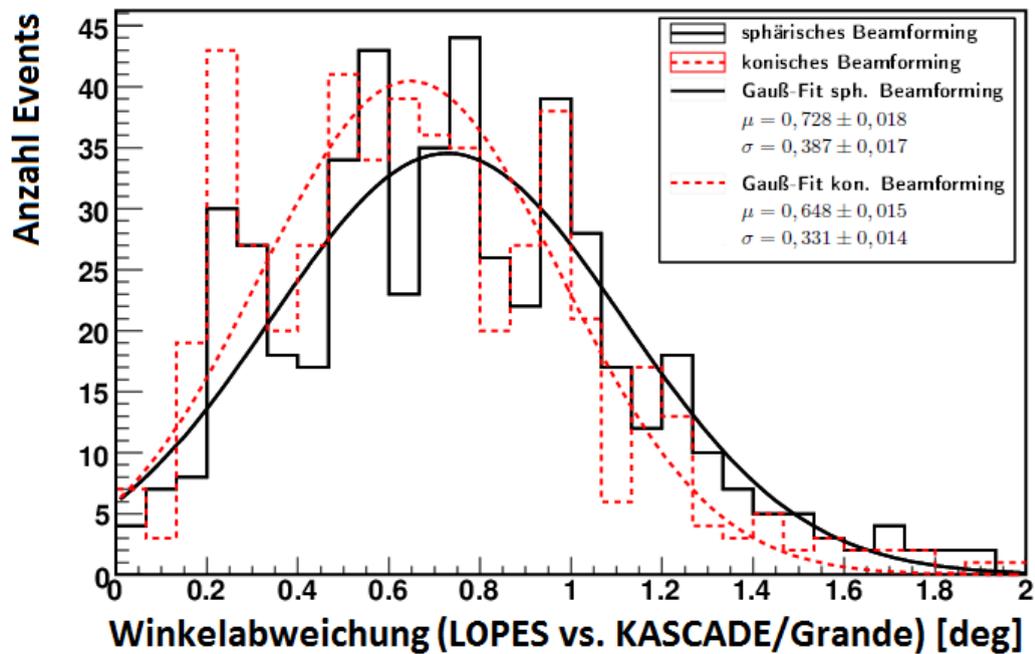


Abbildung 4.3: Verteilungen der Winkelabweichung der LOPES-Richtung gegenüber KASCADE bzw. Grande mit 503 Ereignissen.

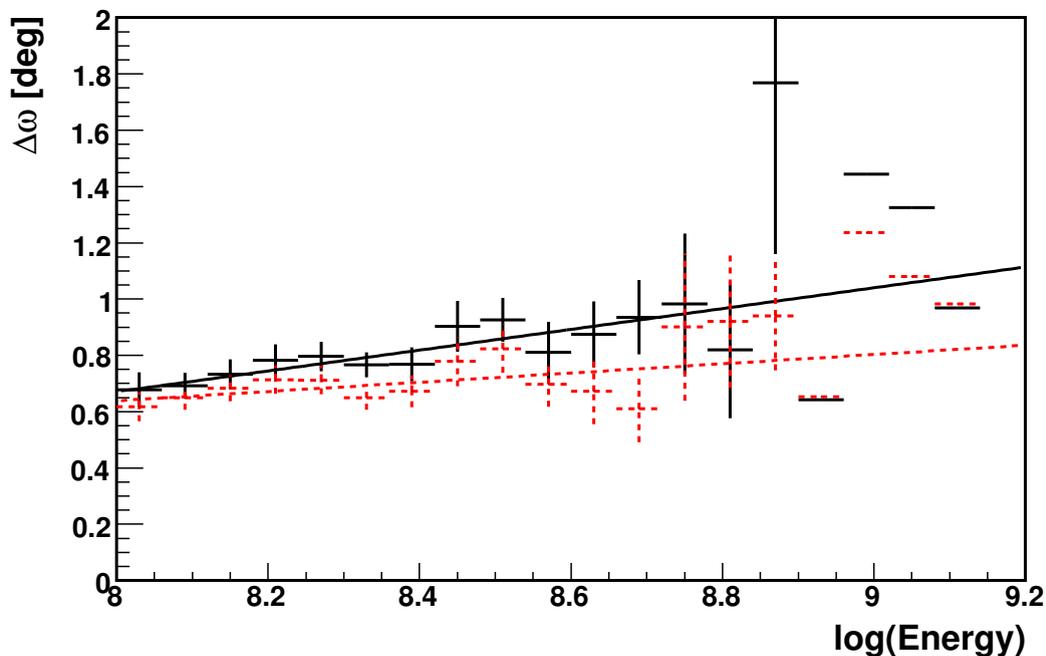


Abbildung 4.4: Abhängigkeit der Winkelabweichung von der Energie jeweils für sphärisches (schwarz, durchgezogen) und konisches (rot, gestrichelt) Beamforming mit gefitteten Geraden. Die horizontalen Balken geben die Winkelabweichung gemittelt über eine Binbreite von 0,6 wieder. Die Fehlerbalken in y-Richtung geben die Standardabweichung der Werte in dem Bin geteilt durch die Wurzel aus der Anzahl der Werte wieder.

#### 4 Bestimmung der optimierten Winkelauflösung von LOPES

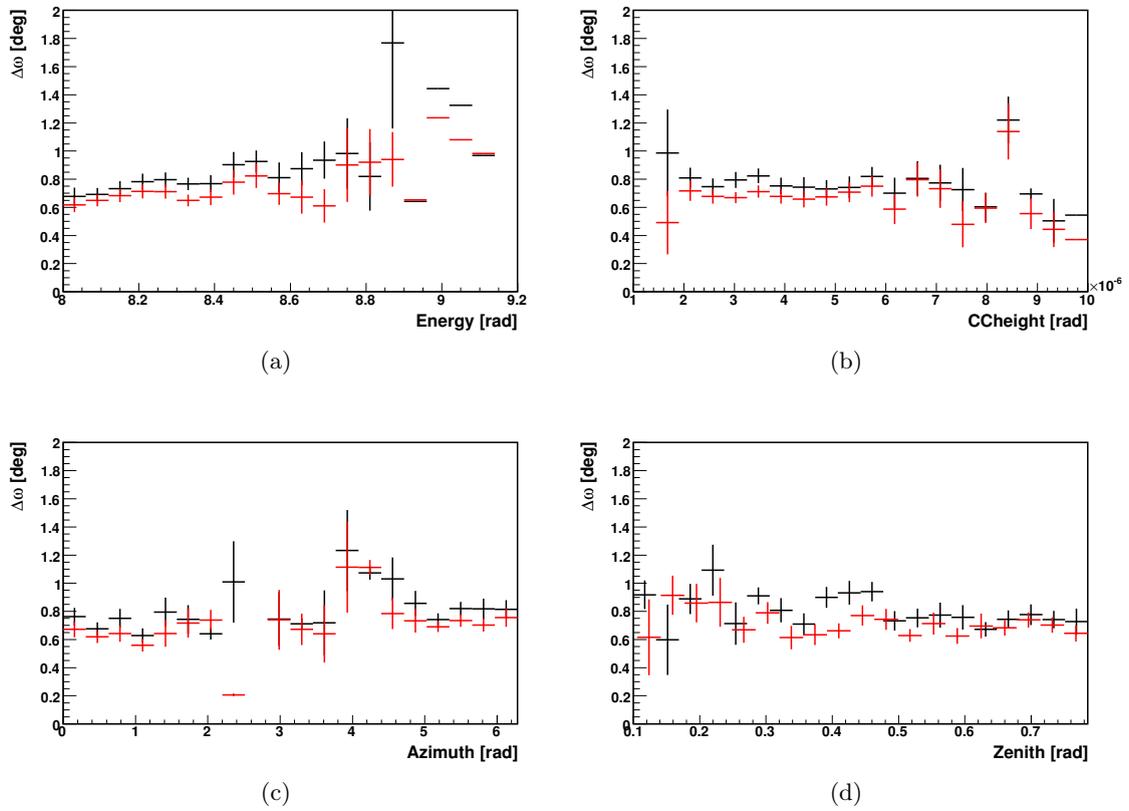


Abbildung 4.5: Abhängigkeit der Winkelabweichung von a) Energie, b) Höhe des CC-Beams, c) Azimut-Winkel und d) Zenit-Winkel, jeweils für sphärisches und konisches Beamforming. Die schwarzen (durchgezogenen) Markierungen zeigen das Profil der Daten des sphärischen Beamformings inklusive Fehlerbalken, die roten (gestrichelten) entsprechend das Profil der Daten des konischen Beamformings inklusive Fehlerbalken.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Für die Untersuchung der hochenergetischen kosmischen Strahlung bietet die Messung der Radioemission aus Luftschauern einige Vorteile gegenüber anderen Detektionsmethoden. Insbesondere kann sowohl bei Tag als auch bei Nacht gemessen werden und sie ist kaum durch Witterungsbedingungen (außer sehr nahe Gewitter) beeinträchtigt. Daher wird die Messung der Radioemission unter anderem im LOPES-Experiment stetig weiterentwickelt. Es konnte bereits gezeigt werden, dass die LOPES-Antennen prinzipiell für die Messung von Luftschauern geeignet sind.

In dieser Arbeit wurde die Richtungsrekonstruktion von Luftschauern durch die LOPES-Analysesoftware mittels Beamforming verbessert. Die Schwierigkeit beim Beamforming besteht hauptsächlich darin, das globale Maximum des Kreuzkorrelations-Beams zu finden. Es wurde daher das bestehende zweidimensionale Gitter zur Suche nach dem besten Wert für den Kreuzkorrelations-Beam in ein genaueres 3D-Gitter erweitert.

Für die Radioemission aus Luftschauern wurde bisher eine sphärische Wellenfront angenommen. Neuere Erkenntnisse deuten aber auf eine konische Wellenfront hin. Dies wurde ebenfalls in die Untersuchungen mit einbezogen. Unter Verwendung des verbesserten Gitters konnte ein oberes Limit für die Winkelauflösung ermittelt werden. Dieses beträgt  $(0,73 \pm 0,02)^\circ$  bei sphärischer Wellenausbreitung und  $(0,65 \pm 0,01)^\circ$  bei konischer Wellenausbreitung. Die Ergebnisse bestätigen also, dass die Ausbreitung der Radiowellen von Luftschauern über eine konische Wellenfront erfolgt.

Des Weiteren wurde gezeigt, dass die Vorgabe eines Startwertes von KASCADE(-Grande) für die Richtungsrekonstruktion keinen systematischen Fehler auf die Winkelauflösung von LOPES ergibt. Dazu wurde eine zufällige Verschiebung der Startrichtung um  $2^\circ$  in eine beliebige Richtung durchgeführt und die resultierende Winkelauflösung mit der unverschobenen verglichen.

Außerdem wurde die Winkelauflösung auf Abhängigkeit von verschiedenen Schauerparametern getestet. Dabei konnte für Höhe des Kreuzkorrelations-Beams, sowie Azimut- und Zenit-Winkel keine signifikante Abhängigkeit gefunden werden. Für sphärisches Beamforming wurde eine schwache Abhängigkeit der Winkelauflösung von der Energie gefunden. Die Rekonstruktion wird mit steigender Energie etwas schlechter. Auch für das konische Beamforming konnte eine Abhängigkeit von der Energie nicht ganz ausgeschlossen werden, wobei diese auf jeden Fall geringer ist.

In einer weiterführenden Arbeit könnte man eventuell die Abhängigkeit der Winkelauflösung von der Energie noch eingehender untersuchen. Eine weitere Verbesserung der Winkelauflösung ist dagegen eher schwierig, da diese in großem Maße durch die Rechenleistung limitiert ist. Das Thema kann daher mit dieser Arbeit zunächst als erfolgreich abgeschlossen

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

sen angesehen werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Winkelauflösung von LOPES so weit verbessert werden konnte, dass die Radiomessung durchaus mit anderen Techniken mithalten kann. Die Winkelauflösung ist im Vergleich zur erwarteten Ablenkung selbst höchstenergetischer kosmischer Strahlung in galaktischen Magnetfeldern gut genug. Richtungsanalysen werden also nicht durch die Winkelauflösung limitiert, sondern dadurch, dass die kosmische Strahlung auf ihrem Weg zur Erde abgelenkt wird.

# Literaturverzeichnis

- [A. 08] A. Nigl et al. - LOPES Collaboration: *Direction identification in radio images of cosmic-ray air showers detected with LOPES and KASCADE*. *Astronomy & Astrophysics*, 487(2):781–788, 2008.
- [A<sup>+</sup>13] Ashish Asgekar et al.: *LOFAR detections of low-frequency radio recombination lines towards Cassiopeia A*. *Astronomy & Astrophysics*, 551(L11), 2013.
- [ACE] <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ACENews/images/acenews83.gif>.
- [Ang13] A. De Angelis: *Status of MAGIC and recent results*. *Adv.Space Res.*, 51:280–285, 2013.
- [Ask65] G. A. Askaryan: *Coherent radio emission from cosmic showers in air and in dense media*. *Soviet Physics JETP*, 21:658, 1965.
- [B<sup>+</sup>12a] S.F. Berezhnev et al.: *The Tunka-133 EAS Cherenkov light array: status of 2011*. *Nucl.Instrum.Meth.*, A692:98–105, 2012.
- [B<sup>+</sup>12b] M. Bertaina et al.: *Results from KASCADE-Grande*. *Nucl.Instrum.Meth.*, A692:217–223, 2012.
- [BEH09] J. Bluemer, R. Engel und J.R. Hoerandel: *Cosmic Rays from the Knee to the Highest Energies*. *Prog.Part.Nucl.Phys.*, 63:293–338, 2009.
- [Ben12] Benjamin Fuchs - Pierre Auger Collaboration: *The Auger engineering radio array*. *Nucl.Instrum.Meth.*, A692:93–97, 2012.
- [Bes12] Dave Besson: *Status of radio wave neutrino detection*. *J.Phys.Conf.Ser.*, 404:012038, 2012.
- [CER] <http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/LHC-en.html>.
- [Col12] P. Lautridou CODALEMA Collaboration: *Toward the autonomous radio-detection of ultra high energy cosmic rays with CODALEMA*. *Nucl.Instrum.Meth.*, A692:65–71, 2012.
- [Dan13] Daniel Kruppke-Hansen - Pierre Auger Collaboration: *Extending the Pierre Auger Observatory to explore the ankle of the cosmic ray spectrum*. *Adv.Space Res.*, 51:286–289, 2013.
- [Fra11] Frank G. Schröder et al. - LOPES Collaboration: *Investigation of the Radio Wavefront of Air Showers with LOPES and REAS3*. *Proceedings of the 32nd ICRC*, 2011.
- [Gre66] K. Greisen: *End to the Cosmic-Ray Spectrum?* *Physical Review Letters*, 16:748–750, 1966.
- [Gri10] P.K.F. Grieder: *Extensive Air Showers*, Band 1. Springer-Verlag, 2010, ISBN 978-3-540-76940-8.

- [Gru05] C. Grupen: *Astroparticle physics*. Springer-Verlag, 2005, ISBN 3-540-25312-2.
- [H<sup>+</sup>12] T. Huege *et al.*: *The LOPES experiment - recent results, status and perspectives*. Nucl.Instrum.Meth., A662:S72–S79, 2012.
- [Hor06] Andreas Horneffer: *Measuring Radio Emission from Cosmic Ray Air Showers with a Digital Radio Telescope*. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2006.
- [KKZ97] H. V. Klapdor-Kleingrothaus und K. Zuber: *Teilchenastrophysik*. B. G. Teubner, 1997, ISBN 3-519-03094-2.
- [KL66] F. D. Kahn und I. Lerche: *Radiation from Cosmic Ray Air Showers*. Proc. Roy. Soc., 289:206–213, 1966.
- [LOP] <https://www.astro.ru.nl/lopes/>.
- [Mat05] J. Matthews: *A Heitler model of extensive air showers*. Astropart.Phys., 22:387–397, 2005.
- [Pal13] Nunzia Palmieri: *Determination of energy and mass of cosmic rays using air shower radio emission*. Dissertation, Karlsruhe Institut für Technologie, 2013.
- [S<sup>+</sup>11] R. Smida *et al.*: *First results of the CROME experiment*. Proceedings of the 32nd ICRC, 2011.
- [S<sup>+</sup>13a] F.G. Schröder *et al.*: *Cosmic Ray Measurements with LOPES: Status and Recent Results (ARENA 2012)*. 5th International Workshop on Acoustic and Radio EeV Neutrino Detection Activities: ARENA 2012, 2013.
- [S<sup>+</sup>13b] F.G. Schröder *et al.*: *Tunka-Rex: a Radio Antenna Array for the Tunka Experiment (ARENA 2012)*. 5th International Workshop on Acoustic and Radio EeV Neutrino Detection Activities: ARENA 2012, 2013.
- [Sch10] Frank G. Schröder: *Instruments and Methods for the Radio Detection of High Energy Cosmic Rays*. Dissertation, Karlsruhe Institut für Technologie, Dezember 2010.
- [ZK66] G. T. Zatsepin und V. A. Kuzmin: *Upper Limit of the Spectrum of Cosmic Rays*. Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters, 4:78–80, 1966.

# Danksagungen

Hiermit möchte ich mich bei allen bedanken, die zur erfolgreichen Fertigstellung meiner Arbeit beigetragen haben. Ich danke Herrn Prof. Blümer für die Übernahme des Referats. Andreas Haungs danke ich für seine Hilfe, Beratung und Anregungen. Mein besonderer Dank gilt Dr. Frank Schröder für die gute Betreuung. Er hat mir immer mit wertvollen Tipps und Anregungen zur Seite gestanden. Außerdem danke ich der gesamten Radiogruppe für ein lockeres und angenehmes Arbeitsklima, Hilfe bei Problemen, sowie immer unterhaltsame Kaffeepausen. Als letztes möchte ich noch meiner Familie danken für ihre Unterstützung während meines gesamten Studiums.



# 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, März 2013

.....

(Johanna Lapp)