

# Messung des dreidimensionalen Polarisationsvektors der Radioemission aus Luftschauern



Diplomarbeit  
von

**Daniel Huber**

Karlsruher Institut für Technologie - IEKP

Erstgutachter:	Prof. Dr. J. Blümer
Zweitgutachter:	Prof. Dr. T. Müller
Betreuender Mitarbeiter:	Dr. Tim Huege

August 2010



# Kurzbeschreibung

Die Messung hoch energetischer kosmischer Strahlung mit Primärenergien von  $E > 10^{15}$  eV erfolgt mit erdgebundenen, großflächigen Detektorfeldern. Dem seit 2003 in Karlsruhe aufgebauten Experiment LOPES gelang als erstes der Nachweis, dass es möglich ist die von einem Luftschauer mit Primärenergien von  $E > 10^{16,5}$  eV emittierte Radiostrahlung zu messen und daraus Parameter des Primärteilchens wie Ankunftsrichtung, Energie und Masse zu bestimmen. In seiner anfänglichen Konfiguration zeichnete LOPES mit 10 Antennen die Ost-West-Polarisation der Radiostrahlung auf. In den Folgejahren wurde das Experiment in zwei Schritten erweitert, so dass es in seiner letzten Konfiguration mit je 15 Antennen die Nord-Süd- wie auch die Ost-West-Polarisation der Radiostrahlung detektierte. Im Rahmen dieser Arbeit wurde LOPES erneut rekonfiguriert und mit 10 Tripolantennen ausgestattet, die neben der Ost-West- und Nord-Süd- auch die vertikale Polarisationsrichtung messen. Weiterhin wurde LOPES-3D vollständig kalibriert und erste Ereignisse analysiert. Darüber hinaus wurde das Monitoring erweitert und der Beacon für das Senden eines Referenzsignals in allen drei Polarisationsrichtungen angepasst. Mit der neuen Konfiguration wurde untersucht, ob die vertikale Komponente gemessen werden kann, um damit die vollständige Information über den elektrischen Feldvektor zu erhalten. Dies führt zu einer Verbesserung der Richtungsrekonstruktion sowie höherer Sensitivität auf geneigte Luftschauer und ermöglicht bessere Vergleiche mit theoretisch vorhergesagten Emissionsmechanismen. Letzteres konnte auf Grund der geringen Statistik in der vorliegenden Arbeit nicht realisiert werden, allerdings konnten einzelne Ereignisse in allen drei Polarisationsrichtungen nachgewiesen und physikalisch interpretiert werden, und damit die volle Funktionsfähigkeit von LOPES-3D bestätigt werden.



# Measurement of the three-dimensional electric field vector of the radio emission from cosmic ray air showers

Cosmic rays with energies above  $10^{15}$  eV are measured indirectly with large scale detector arrays on ground. LOPES is an antenna array which measures the radio emission of extensive air showers. It is located in Karlsruhe at the site of KASCADE and started its measurements in 2003. It was the first radio detection experiment giving the proof-of-principle of that detection technique for energies above  $10^{16.5}$  eV. In addition, LOPES accomplished the principle potential to reconstruct by means of the radio information parameters of the primary particle such as energy, mass and arrival direction. The first configuration was made up of 10 antennas measuring the east-west-polarisation of the radio signal of extensive air showers. In the following years LOPES was expanded twice to the last setup consisting of 30 antennas. One half of the antennas was detecting the north-south-polarisation while the other half was measuring the east-west-polarisation of the radio emission. Within the scope of this thesis LOPES was reconfigured to LOPES-3D aiming the measurement of all three polarisation directions. Now it measures with 10 tripole antennas all three polarisation components at once to gain the full information about the electric field vector. Furthermore, LOPES-3D has been calibrated and first events have been analysed. Beyond that, the monitoring was improved and the functionality of the beacon to provide a reference signal in each individual event has been adapted. This work studies the possibility of detecting the vertical component which, for instance, increases the sensitivity to inclined showers and improves the capability to compare with simulation expectations. The latter hasn't been realised yet due to the low statistics. Although, in all three polarisation directions events could be detected. They are analyzed and compared with expectations. By that, the full functionality of LOPES-3D has been proven.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Kosmische Strahlung</b>	<b>3</b>
2.1	Historisch . . . . .	3
2.2	Ursprung der kosmischen Strahlung . . . . .	3
2.3	Energiespektrum der kosmischen Strahlung . . . . .	4
2.4	Massenspektrum der kosmischen Strahlung . . . . .	5
2.5	Ausgedehnte Luftschauer . . . . .	6
2.6	Detektion von Luftschauern . . . . .	8
2.6.1	Teilchendetektoren . . . . .	8
2.6.2	Cherenkov-Teleskope . . . . .	9
2.6.3	Fluoreszenzdetektoren . . . . .	9
2.6.4	Radiodetektion . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Radioemission aus Luftschauern</b>	<b>11</b>
3.1	Theorie der Radioemission . . . . .	12
3.1.1	Geosynchrotronansatz . . . . .	12
3.1.2	Ansatz der transversalen Ströme . . . . .	13
3.2	Experimente . . . . .	14
3.2.1	LOPES . . . . .	14
3.2.2	CODALEMA . . . . .	15
3.2.3	LOFAR . . . . .	15
3.2.4	AERA . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Experimenteller Aufbau</b>	<b>17</b>
4.1	KASCADE und KASCADE-Grande . . . . .	17
4.2	LOPES . . . . .	18
4.2.1	LOPES Trigger . . . . .	19
4.2.2	LOPES Aufbau und Elektronik . . . . .	20
4.2.3	LOPES Analyse . . . . .	23
<b>5</b>	<b>Vorbereitung der Rekonfiguration von LOPES</b>	<b>29</b>
5.1	Motivation . . . . .	29
5.2	Antennenbeschreibung . . . . .	30
5.2.1	SALLA . . . . .	31

5.2.2	Tripol . . . . .	31
5.3	Testmessungen . . . . .	33
5.3.1	Effizienz . . . . .	37
5.3.2	Signal-zu-Rausch-Verhältnis des Beacon Signals . . . . .	38
<b>6</b>	<b>Rekonfiguration von LOPES</b>	<b>41</b>
6.1	Umbau zu LOPES-3D . . . . .	41
6.2	Anpassung des Beacon . . . . .	43
6.3	Kalibrierung von LOPES-3D . . . . .	45
6.3.1	Zeitkalibrierung . . . . .	45
6.3.2	Richtcharakteristik . . . . .	49
6.3.3	Amplitudenkalibrierung . . . . .	51
6.4	Monitoring . . . . .	59
6.5	Test der neuen DAQ Software . . . . .	60
<b>7</b>	<b>Analyse erster LOPES-3D Daten</b>	<b>63</b>
7.1	Radioemission . . . . .	63
7.1.1	$\vec{v} \times \vec{B}$ -Modell . . . . .	63
7.2	Daten . . . . .	64
7.3	Erwartete Ereignisraten . . . . .	66
7.4	Erste Ereignisse . . . . .	67
7.5	CC-Beam Analyse . . . . .	69
7.5.1	Besonderes Ereignis . . . . .	74
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>77</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>i</b>
A.1	Positionen der LOPES-3D Antennen im LOPES Referenzsystem . . . . .	i
A.2	Gemessene Referenzphasen und die Verzögerung der Elektronik . . . . .	ii
A.3	Datenblatt der verwendeten Referenzquelle . . . . .	iii
A.4	Datenblatt der verwendeten Referenzantenne . . . . .	iv
A.5	Datenblatt des verwendeten Frequenzgenerators . . . . .	v
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>vii</b>
	<b>Danksagungen</b>	<b>xi</b>
	<b>Eidesstattliche Erklärung</b>	<b>xiii</b>

# 1 Einleitung

Die kosmische Strahlung ist ein schon lange bekanntes Phänomen, über dessen Ursprung und Propagation, trotz bald 100 jähriger Forschungstätigkeit, noch wenig bekannt ist. Das über viele Größenordnungen reichende Spektrum der kosmischen Strahlung ist für den hoch energetischen Teil intensiv vermessen worden. Jedoch sind einige Merkmale dieses Spektrums noch immer nicht komplett verstanden, da die Quellen der kosmischen Strahlung bis heute noch nicht ausreichend identifiziert werden konnten. Die Messung der kosmischen Strahlung bietet außerdem die Möglichkeit, Teilchenreaktionen bei Energien zu untersuchen, die mit erdgebundenen Beschleuniger-Experimenten nicht erreicht werden können.

Gelangt ein hoch energetisches Teilchen der kosmischen Strahlung in die Erdatmosphäre löst es dort einen so genannten ausgedehnten Luftschauer aus. Das Teilchen trifft auf einen Atomkern eines Moleküls der Erdatmosphäre und wechselwirkt mit diesem. Durch Wechselwirkungen entsteht so eine Teilchenkaskade, deren Hauptbestandteile Elektronen und Positronen darstellen. Da der Fluss dieser hoch energetischen Teilchen sehr gering ist, ist man bei der Beobachtung auf große und damit erdgebundene Detektoren und die Messung der Sekundärteilchen angewiesen. Hierfür gibt es mehrere Nachweismethoden: Die Detektion der geladenen Teilchen durch Teilchendetektoren, der Nachweis der vorwärts gerichteten Cherenkov-Strahlung mit Teleskopen, oder das Messen der Fluoreszenzemission der durch den Luftschauer angeregten Stickstoffmoleküle. Eine weitere interessante Technik zum Nachweis dieser Sekundärteilchen und damit des einfallenden Primärteilchens bietet die Detektion der Radiostrahlung, die die Elektronen und Positronen auf Grund ihrer Ablenkung im Erdmagnetfeld aussenden.

Vorteile dieser Messmethode sind der einfache Aufbau der Detektoren, so können simple Dipolantennen als Detektor verwendet werden, was die Kosten für große Detektorfelder gering hält. Des Weiteren wird ein Signal über den kompletten Schauerverlauf und nicht nur ein Fußabdruck, wie bei der Messung mit Teilchendetektoren, gemessen. Die Messzeit mit Radioantennen ist, im Gegensatz zu Fluoreszenz- oder Cherenkov Teleskopen, die nur in klaren mondfreien Nächten messen können, größtenteils unabhängig von Umwelteinflüssen. Lediglich starke elektrische Felder, wie sie bei Gewittern auftreten, beeinflussen die Messung.

LOPES, ursprünglich als LOFAR Prototype Station realisiert, hat sich mittlerweile von einem Prototyp, der den proof-of-principle der Detektionstechnik nachwies, zu einem eigenständigen Experiment weiterentwickelt.

Die Messung der Radioemission mit LOPES bietet eine einzigartige Möglichkeit

## 1 Einleitung

Luftschauer zu studieren und die mit dieser neuen Detektionsmethode aufgezeichneten Daten mit einer schon bekannten und gut verstandenen Detektionstechnik, den Teilchendetektoren von KASCADE-Grande, zu vergleichen. Es bietet sich die Chance mit einer Hybrid Messung Luftschauer zu untersuchen und so die Vorteile beider Detektionstechniken für sich zu nutzen. Bisherige Messungen mit LOPES nutzen in einem ersten Schritt 30 Dipolantennen, die in Ost-West-Polarisationsrichtung orientiert waren. Später wurde, um auch die Nord-Süd-Komponente der Radioemission aus Luftschauern zu messen, mit 15 in Ost-West-Richtung und 15 in Nord-Süd-Richtung orientierten Dipolantennen gemessen. Obwohl bereits durch LOPES (und andere Experimente) das Verständnis der Detektionstechnik große Fortschritte erfuhr, gibt es immer noch offene Fragen. Eine wesentlich ungeklärte Frage ist die nach der Kenntnis des Emissionsmechanismus oder der Emissionsmechanismen, die zur Radioemission in Luftschauern führen. Mit der Messung aller drei Polarisationsrichtungen und mit dem dadurch bekannten kompletten Vektor des elektrischen Feldes der Radioemission aus Luftschauern ist ein besserer Vergleich mit den verschiedenen Emissionsmodellen möglich. Nur die Messung aller drei Polarisationsrichtungen kann die verschiedenen Emissionsmodelle bestätigen oder widerlegen. Es ist daher notwendig alle drei Polarisationsrichtungen, also Ost-West-, Nord-Süd- und die vertikale zu messen, zu untersuchen und mit Simulationen zu vergleichen.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Rekonfiguration des LOPES Experimentes zur Messung aller drei Polarisationsrichtungen der Radioemission aus Luftschauern. Hierzu wird zunächst ein Überblick über die kosmische Strahlung und die einzelnen Nachweismethoden gegeben (Kapitel 2). Danach wird auf die Theorie der Radioemission eingegangen und zwei Modelle wie auch mehrere Experimente zur Radioemission vorgestellt (Kapitel 3). Der experimentelle Aufbau der beiden Experimente am KIT Campus Nord KASCADE-Grande und LOPES wird beschrieben (Kapitel 4). Die Ergebnisse der Voruntersuchungen zur Rekonfiguration werden gezeigt und die Entscheidung für einen Antennentyp wird begründet (Kapitel 5). Danach wird die Rekonfiguration des LOPES Experimentes zur zusätzlichen Detektion der vertikalen Polarisation und die anschließende Kalibrierung beschrieben (Kapitel 6). Die Ergebnisse der Analyse, der mit der neuen Konfiguration von LOPES aufgenommenen ersten Daten, werden präsentiert (Kapitel 7) und ein Ausblick für zukünftige Nutzungsmöglichkeiten von LOPES-3D in dem Kapazität, Sensitivität und Vorteile des Experiments skizziert werden, wird gegeben (Kapitel 8).

# 2 Kosmische Strahlung

## 2.1 Historisch

Entgegen der damaligen Annahme, dass mit zunehmender Höhe der Ionisationsgrad der Atmosphäre abnimmt, beobachtete Victor Hess bei einem Ballonflug 1912 ab einer von Höhe 1000 m einen Anstieg des Ionisationsgrades mit zunehmender Höhe [Hes12]. Er schloss daraus, dass der Ursprung der ionisierenden Strahlung nicht auf der Erde sondern außerhalb der Atmosphäre liegen muss. Weitere Experimente bestätigten seine Annahme. Vor der Zeit großer Teilchenbeschleuniger wie dem Tevatron oder dem LHC waren diese kosmischen Strahlen die einzige Möglichkeit hoch energetische Teilchen zu studieren. Heute ist die Beobachtung der kosmischen Strahlung immer noch von großem Interesse. Die kosmische Strahlung erreicht Energien von bis zu  $10^{20}$  eV und ist und bleibt somit die einzige Möglichkeit, Teilchen mit derart hohen Energien zu studieren. Solch hohe Energien können von erdgebundenen Beschleunigern nicht erreicht werden. Des Weiteren sind Neutrinos und Photonen, die unbeeinflusst von galaktischen und extragalaktischen Magnetfeldern die Erde erreichen, gute Boten für mögliche Quellen der kosmischen Strahlung. Auch hoch energetische ionisierende Teilchen werden nur in geringem Maße von den galaktischen Magnetfeldern beeinflusst und zeigen auf ihren Entstehungsort zurück.

## 2.2 Ursprung der kosmischen Strahlung

Die dominierende Quelle für nieder energetische kosmische Strahlung auf der Erde ist die Sonne. Ihr Sonnenwind besteht hauptsächlich aus Elektronen, Protonen und Heliumkernen mit Energien bis zu  $10^9$  eV [Sta04]. Durch Eruptionen der Sonne kann die Energie und der Fluß der Teilchen kurzfristig ansteigen. Die Sonne dient nicht nur als Quelle, sondern auch als Abschirmung vor kosmischer Strahlung, so müssen kosmische Teilchen bevor sie die Erde erreichen, die Heliosphäre, also den Einflussbereich des Sonnenwindes, durchdringen. In der Heliosphäre herrschen Magnetfelder mit Stärken von bis zu 10 nT, die mit der Sonnenaktivität korreliert sind. Dies führt zu einer Antikorrelation der nieder energetischen kosmischen Strahlung mit Energien bis ungefähr 1 GeV mit der Sonnenaktivität [Sta04]. Die Beschleunigung von höherenergetischer galaktischer kosmischer Strahlung bis ungefähr  $10^{16}$  eV findet höchstwahrscheinlich in Schockfronten von Supernovaeüberresten statt. Dieser Beschleunigungsmechanismus für geladene Teilchen

## 2 Kosmische Strahlung

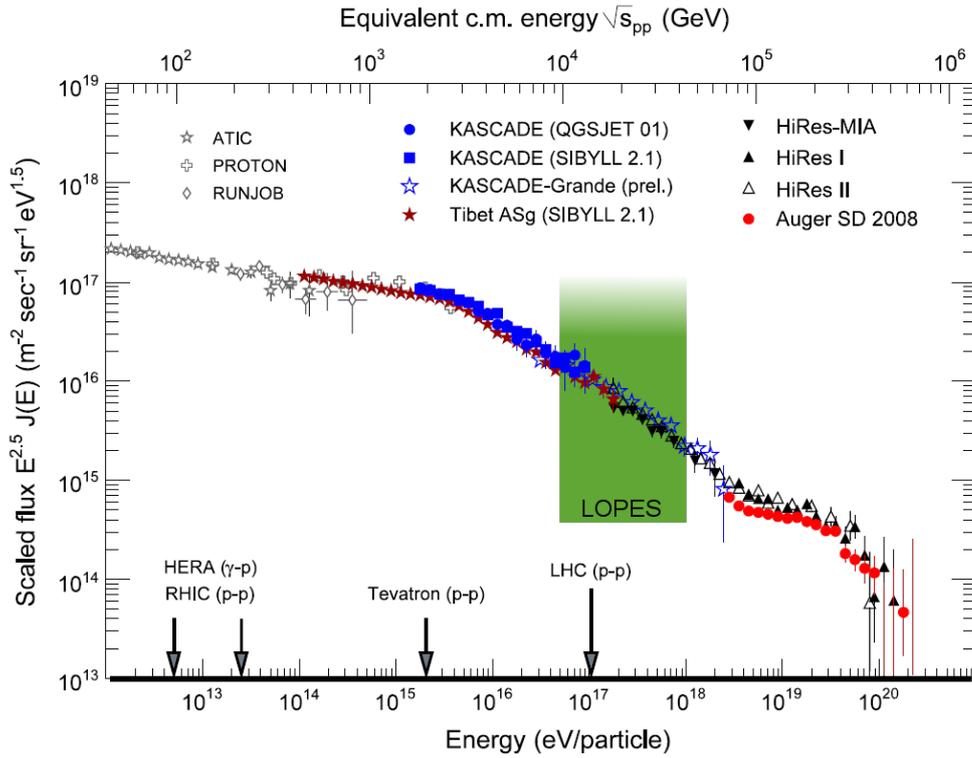


Abbildung 2.1: Energiespektrum der kosmischen Strahlung. Zur Verdeutlichung der Struktur ist das Spektrum mit  $E^{2.5}$  multipliziert.

an magnetisierten Plasmawolken wurde bereits 1949 von Enrico Fermi postuliert [Fer49]. Als Beschleuniger kommen Supernovaüberreste vom Typ II, Ib, oder Ic in Betracht. Bei noch höheren Energien, ab  $10^{18}$  eV, reicht das Magnetfeld der Milchstraße nicht mehr aus, um die Teilchen in unserer Galaxie zu halten. Da noch keine möglichen Quellen in unserer Galaxie gefunden wurden, kommen nur noch extragalaktische Quellen als Ursprung für Teilchen mit derart hohen Energien in Frage. Als Kandidaten gelten stellare schwarze Löcher, Gamma Ray Bursts (GRB) und aktive galaktische Kerne (AGN). Über den Beschleunigungsmechanismus von extragalaktischer kosmischer Strahlung ist noch wenig bekannt.

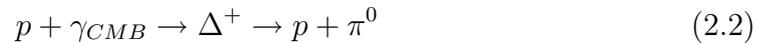
### 2.3 Energiespektrum der kosmischen Strahlung

Das Energiespektrum der kosmischen Strahlung, dargestellt in Abbildung 2.1, kann durch ein Potenzgesetz beschrieben werden. Das bedeutet, dass mit zunehmender Energie der Fluß der Teilchen gemäß

$$\frac{dN}{dE} \sim E^{-\gamma} \quad (2.1)$$

## 2.4 Massenspektrum der kosmischen Strahlung

abnimmt. Der Spektralindex  $\gamma$  bleibt über 10 Größenordnungen fast konstant. Bei Energien von  $10^{15}$  eV bis ungefähr  $5 \cdot 10^{15}$  eV geht der Spektralindex von  $\gamma \approx 2,7$  nach  $\gamma \approx 3$  über. Dieser Übergang wird als Knie bezeichnet [AAB<sup>+</sup>03]. Bei einer Energie von  $10^{18}$  eV ist ein als Knöchel bezeichnetes Abflachen des Spektrums zu beobachten. Als eine mögliche Erklärung für das Knie im Spektrum kommt in Betracht, dass ab dieser Energie die galaktischen Magnetfelder in der Milchstraße nicht ausreichen, um die Teilchen in unserer Galaxie zu halten. Eine weitere Möglichkeit ist das Ende des Energiespektrums des Protons, da der Beschleunigungsmechanismus mit der Ladung des Teilchens korreliert ist. Der Knöchel im Spektrum lässt sich durch den Übergang von galaktischer zu extragalaktischer kosmischer Strahlung mit anderem Spektralindex erklären. Diese Annahme wird dadurch gestützt, dass in der Milchstraße keine geeigneten Quellen für derart hohe Energien zu finden sind. Quellen mit solch hohen Energien wären leicht als Häufungspunkte der kosmischen Strahlung am Himmel zu erkennen. Bei noch höheren Energien ab  $5 \cdot 10^{19}$  eV fällt das Spektrum scharf ab. Dieser Effekt kann auf den GZK-cut-off zurückgeführt werden. Greisen, Zatsepin und Kuzmin hatten bereits 1966 postuliert, dass ab dieser Energie ein Proton  $p$  mit einem Photon  $\gamma_{CMB}$  der kosmischen Hintergrundstrahlung wechselwirken kann. Unter Erzeugung eines  $\pi^0$ -Mesons über die  $\Delta^+$ -Resonanz verliert das Proton Energie gemäß:



Die mittlere freie Weglänge eines Protons beträgt hierbei 50 Mpc. Das hat zur Folge, dass nur Protonen von Quellen, die sich innerhalb einer Kugel mit einem Radius von 50 Mpc befinden, beobachtet werden können.

## 2.4 Massenspektrum der kosmischen Strahlung

Das Massenspektrum der kosmischen Strahlung ist nur für den nieder energetischen Bereich exakt bekannt, da hier direkte Messungen durchgeführt werden können. In diesem Bereich besteht die kosmische Strahlung hauptsächlich aus Atomkernen, lediglich 2% sind Elektronen und Gammaquanten. Für Energien  $< 10^{15}$  eV entspricht die Elementhäufigkeit der kosmischen Strahlung fast der Elementhäufigkeit der Sonne, siehe Abbildung 2.2. Der Überschuss für Lithium, Beryllium und Bor lässt sich, wie die Überhäufigkeit unterhalb der Eisengruppe, durch Spallation während des Transports erklären. In Bezug auf die Elementzusammensetzung bei höheren Energien kann auf Grund des geringeren Flusses keine direkte Messung mehr durchgeführt werden. Hierfür werden Detektoren benötigt, die die Sekundärteilchen eines hoch energetischen kosmischen Teilchens, so genannte Luftschauer, siehe Kapitel 2.5, am Boden beobachten. Aus Luftschauerparametern wie der Höhe der ersten Wechselwirkung und des Krümmungsradius der Teilchenfront wird durch Vergleich mit Simulationsdaten die Masse des Primärteilchens abgeschätzt.

## 2 Kosmische Strahlung

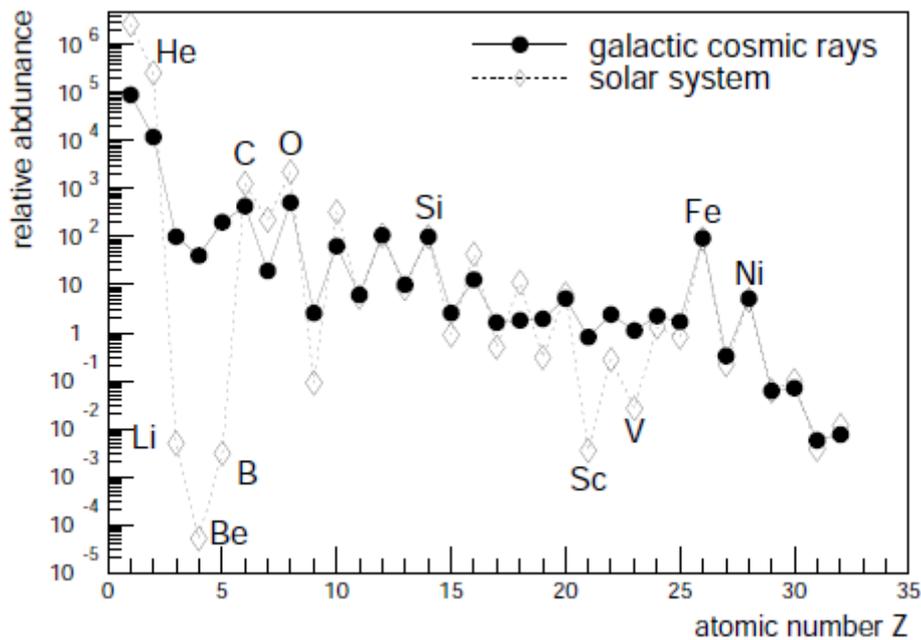


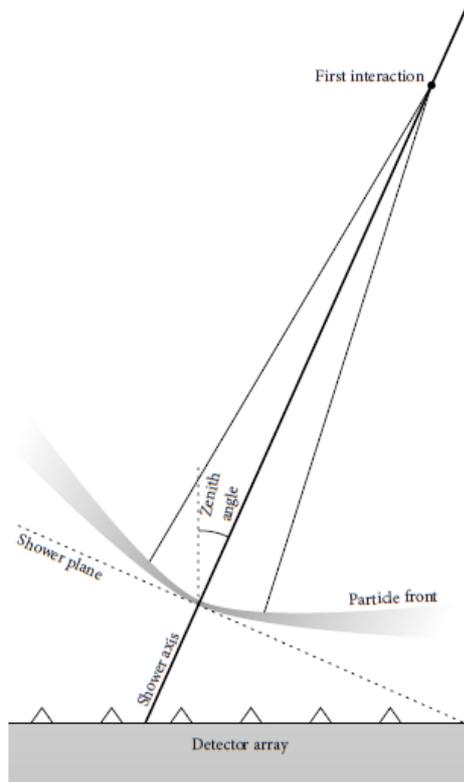
Abbildung 2.2: Massenspektrum der kosmischen Strahlung (schwarze Punkte) und des Sonnensystems (offene Rauten) [Wef91].

Die Ergebnisse der Simulationen hängen stark vom verwendeten Wechselwirkungsmechanismus ab, weshalb eine genaue Bestimmung des Primärteilchens fehlerbehaftet ist.

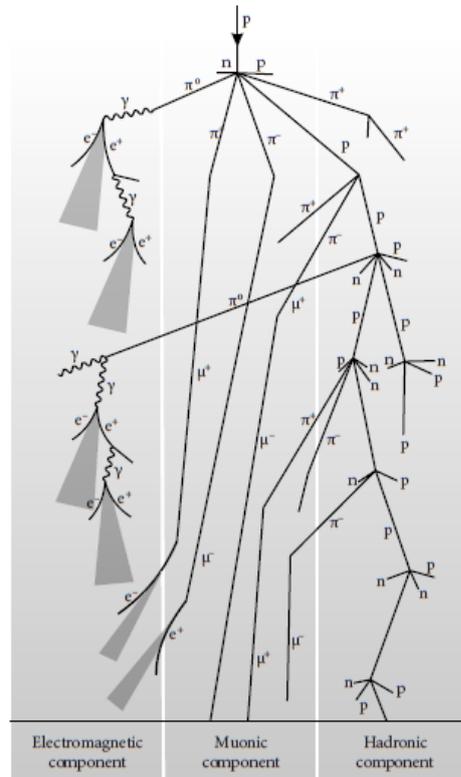
### 2.5 Ausgedehnte Luftschauer

Um die kosmische Strahlung ab Energien von ungefähr  $10^{15}$  eV, trotz ihres geringen Fluss untersuchen zu können, werden große Detektoren am Erdboden, welche die Teilchen messen, die in einem ausgedehnten Luftschauer entstehen, benötigt. Dieser kommt zustande, wenn ein hoch energetisches Teilchen der kosmischen Strahlung mit einem Molekül in der Erdatmosphäre wechselwirkt. Die ersten Wechselwirkungen sind hadronische Wechselwirkungen mit den Atomkernen der Luftmoleküle. Es entsteht eine Teilchenkaskade, die aus hauptsächlich Positronen und Elektronen besteht. Diese Positronen und Elektronen bilden zusammen mit Photonen die elektromagnetische Komponente des Schauers. Einen weiteren, aber viel geringeren Anteil der geladenen Teilchen im Schauer stellen die Myonen, die im Zerfall geladener Mesonen produziert werden, dar. Die myonische Komponente dringt auf Grund ihres geringeren Wechselwirkungsquerschnittes tiefer in die Atmosphäre ein als die elektromagnetische Komponente. Durch Vergleich der myonischen mit der

## 2.5 Ausgedehnte Luftschauer



(a) Schematische Darstellung der Schauerfront und des Detektorfeldes [Laf06].



(b) Schema zu Veranschaulichung der hadronischen, myonischen und elektromagnetischen Komponente. Im Schema der elektromagnetischen Komponente ist die Radioemission als Kegel angedeutet [Laf06].

elektromagnetischen Komponente lässt sich eine Aussage über das Entwicklungsstadium des Luftschauers machen. Einen weiteren, jedoch sehr geringen, Anteil im Luftschauer bilden die Hadronen. Sie kommen vor allem im frühen Entwicklungsstadium des Luftschauers vor und haben einen relativ hohen Impuls entlang der Schauerachse, weshalb sie sich vor allem in der Nähe des Schauerzentrums befinden. Diese Hadronen tragen zur Entwicklung des Luftschauers entscheidend bei, da sie einen Großteil der Energie des Schauers tragen und somit immer neue Teilchenreaktionen auslösen.

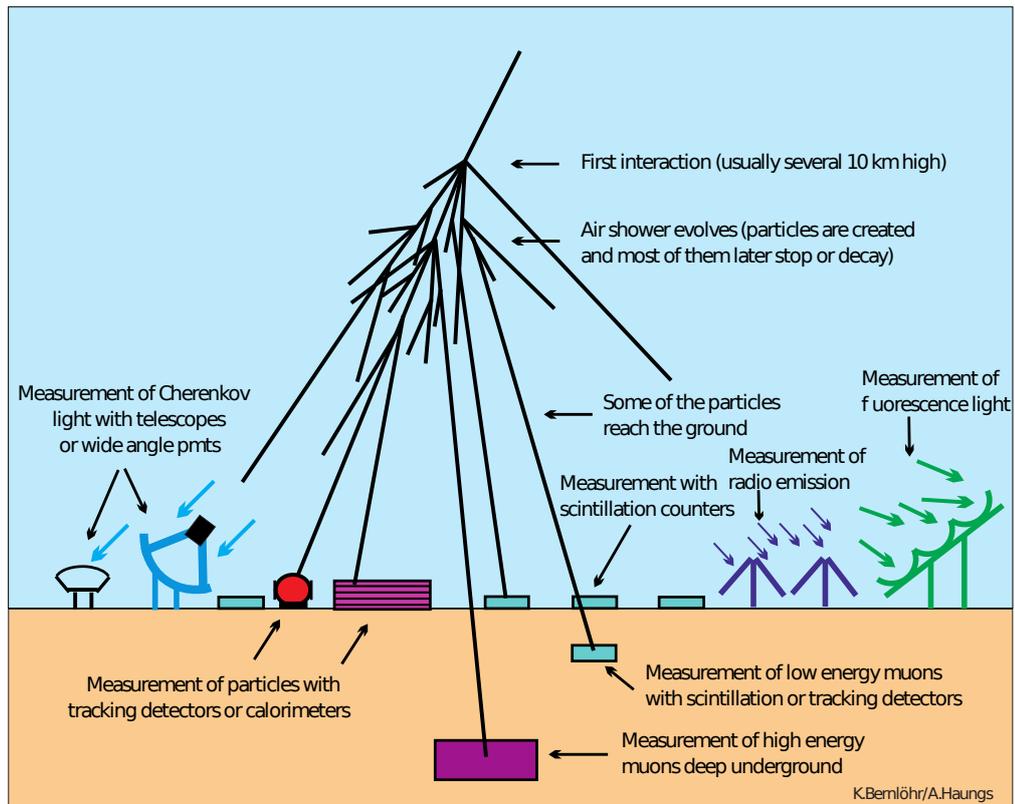


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der verschiedenen Detektionstechniken für ausgedehnte Luftschauer [HRR03].

## 2.6 Detektion von Luftschauern

Für die Detektion von Luftschauern am Boden steht eine Reihe von verschiedenen Detektionstechniken zur Verfügung. Die genauesten Aussagen über die Luftschauerparameter lassen sich durch Kombination mehrerer Techniken, wie im Falle des Pierre Auger Observatoriums, erreichen [Dt07]. Im Folgenden werden verschiedene Detektionstechniken und deren Vor- und Nachteile erläutert. Eine Übersicht ist in Abbildung 2.3 zu sehen.

### 2.6.1 Teilchendetektoren

Die Messung der geladenen Teilchen aus dem Luftschauer, den Elektronen, Positronen und Myonen, auf dem Erdboden ist die älteste Nachweismethode für Luftschauer [AEM<sup>+</sup>39]. Als Detektoren können Wasser-Cherenkov-Tanks, Szintillatoren oder Silizium-Teilchendetektoren verwendet werden. Mit einer großen Anzahl an bodengebundenen Detektoren kann eine Art Fußabdruck des Luftschauers gemessen werden. Durch Triangulation ist es möglich, die Ankunftsrichtung zu

bestimmen. Des Weiteren kann die Lateralverteilung der Sekundärteilchen und die Energie des Primärteilchens ermittelt werden. Die Auswertung dieser Detektionstechnik ist stark abhängig von Wechselwirkungsquerschnitten, die aus Beschleunigerdaten extrapoliert werden müssen.

### 2.6.2 Cherenkov-Teleskope

Eine weitere Möglichkeit Luftschauer zu beobachten, bieten so genannte Cherenkov-Teleskope. Diese Teleskope, bestehend aus großen sphärischen Spiegeln und Photomultiplikatorkameras, werden hauptsächlich dazu eingesetzt die von hoch energetischen Gammas in der Erdatmosphäre induzierten Luftschauer durch deren Cherenkovstrahlung zu detektieren. Allerdings müssen die Teleskope wegen der geringen Fläche, die der Cherenkovkegel am Boden bedeckt, in Richtung des Luftschauers ausgerichtet sein. Da Gammastrahlung nicht elektrisch geladen ist, wird sie auch nicht von galaktischen Magnetfeldern beeinflusst und zeigt auf ihre Quelle zurück. Cherenkov-Teleskope sind somit eine gute Möglichkeit, um nach Quellen der kosmischen Strahlung zu suchen. Sie können einzeln als Teleskop, oder zu mehreren als ganze Cherenkov-arrays eingesetzt werden. Die Energieschwelle für Cherenkov-Teleskope ist sehr niedrig und liegt bei etwa  $10^{10}$  eV. Die Messzeit ist allerdings auf klare, mondlose Nächte beschränkt.

### 2.6.3 Fluoreszenzdetektoren

Trifft ein relativistisches Teilchen eines Luftschauers auf ein Stickstoffmolekül der Atmosphäre wird dieses angeregt. Beim Übergang in den Grundzustand emittieren die angeregten Stickstoffmoleküle Licht im ultravioletten Spektralbereich. Dieses Fluoreszenzlicht wird mit großen optischen Teleskopen detektiert. Hierbei ist der Luftschauer als Spur zu erkennen. Durch die Messung der Fluoreszenzemission werden Informationen über den Verlauf des Luftschauers gewonnen. Wie die Cherenkov-Teleskope können auch die Fluoreszenz-Teleskope nur an mondfreien, klaren Nächten eingesetzt werden. Die Energieschwelle für Fluoreszenz-Teleskope liegt bei etwa  $10^{17}$  eV.

### 2.6.4 Radiodetektion

Eine weitere Möglichkeit Luftschauer am Boden zu beobachten bietet die Radiodetektion. Die Messung der Radiostrahlung hat mehrere Vorteile. Als Detektor dienen einfache Antennen, die leicht und günstig in großer Stückzahl produziert werden können. Mit dieser Detektionsmethode kann nahezu 100% der Zeit gemessen werden; lediglich von starken elektrischen Feldern in der Atmosphäre und Gewittern wird das Radiosignal aus Luftschauern beeinflusst. Ein Nachteil der Radiomessung ist der große Radioundergrund in stark industrialisierten Gegenden. Die Radiodetektion von Luftschauerereignissen stellt die neueste Nachweismethode

## 2 Kosmische Strahlung

dar. Es sind bisher wenige Rekonstruktionsverfahren entwickelt. Außerdem ist der Emissionsmechanismus der zu Radioemission aus Luftschauern führt nicht exakt bekannt und damit ist die Rekonstruktion der Schauerparameter mit Radiodaten immer noch stark fehlerbehaftet. Ein genaues Verständnis des Emissionsmechanismus ist Grundvoraussetzung um mit Radiodaten Astrophysik betreiben zu können, also Energie, Masse und Ankunftsrichtung des ankommenden Teilchens der kosmischen Strahlung zu rekonstruieren. Diese Analysen befinden sich noch in der Entwicklungsphase und werden durch ein genaueres Verständnis des Emissionsmechanismus weiter verbessert. Um die verschiedenen Emissionsmodelle zu verifizieren oder falsifizieren ist eine genaue Messung der Anteile in den einzelnen Polarisationsrichtungen notwendig. Alle Experimente haben bisher nur die Ost-West und Nord-Süd Polarisationsrichtung der Radioemission aus Luftschauern gemessen. Durch die zusätzliche Messung der vertikalen Polarisationsrichtung können einzelne Emissionsmodelle besser falsifiziert werden. Dadurch wird zum besseren Verständnis der Radioemission aus Luftschauerereignissen im Allgemeinen beigetragen. Mit Radiodaten können aus den Observablen die Ankunftsrichtung Masse und Energie des Primärteilchens rekonstruiert werden.

## 3 Radioemission aus Luftschauern

Bereits 1962 wurde von G. Askaryan, der Askaryan-Effekt als Emissionsmodell für Radioemission aus Luftschauern vorhergesagt. Der Askaryan-Effekt beruht auf dem Prinzip der Cherenkov-Emission [Ask62a], [Ask62b], [Ask65]. Bewegte Ladung, deren Geschwindigkeit größer ist als die Lichtgeschwindigkeit im Medium in dem sie sich befindet, emittiert elektromagnetische Strahlung. Die bewegte Ladung ist im Fall eines Luftschauers der negative Ladungsüberschuss der sich bewegenden Teilchenkaskade. Der negative Ladungsüberschuss kommt durch Annihilation der aus Paarbildung entstandenen Positronen mit der Atmosphäre zustande. Da sich die Teilchenkaskade und somit auch der negative Ladungsüberschuss mit annähernder Vakuumlichtgeschwindigkeit bewegen, sind sie schneller als die Lichtgeschwindigkeit im Medium und emittieren elektromagnetische Strahlung. Durch die geringe Dicke der Schauerfront von wenigen Metern ist die Emission der Radiostrahlung bis zu einer Wellenlänge von wenigen Metern, dies entspricht einem Frequenzbereich von etwa 100 MHz, kohärent.

Die ersten Experimente, unter anderem durchgeführt von J. V. Jelly [JFP<sup>+</sup>65] und H. R. Allan [All71], zeigten jedoch eine Abhängigkeit des Polarisationsvektors der Radioemission vom Winkel zwischen Schauerachse und Erdmagnetfeld. Nach dieser Erkenntnis wurde 1966 von F. D. Kahn und I. Lerche [KL66] und 1967 von S. A. Colgate [Col67] ein Emissionsmechanismus vorgeschlagen, der auf der Ladungstrennung innerhalb der Schauerentwicklung beruht. Bewegte Ladungen erfahren im Erdmagnetfeld, auf Grund der Lorentzkraft, gemäß  $\vec{v}_{Ladung} \times \vec{B}_{Erde}$  eine Ablenkung. Bei diesem Modell führen die transversalen Ströme zu einer kohärenten Emission von Radiostrahlung. Die genauere Untersuchung war zur damaligen Zeit auf Grund der unzureichenden analogen Elektronik nicht möglich. Dies führte dazu, dass andere Detektionstechniken Vorrang erhielten. Ein großes Problem der damaligen Messungen war die fehlende Möglichkeit Störsignale zuverlässig zu erkennen und herauszufiltern. Mit der Entwicklung und Weiterentwicklung der digitalen Elektronik ist die Radiodetektion heute wieder interessant geworden. Durch die Möglichkeit Signale digital aufzubereiten wurden die Messungen der Radioemission wieder aufgenommen; dies führte auch zu neuen theoretischen Untersuchungen. Derzeit werden zwei Emissionsmodellierungen favorisiert, die beide auf der Ladungstrennung durch das Erdmagnetfeld beruhen: der Geosynchrotronansatz und der Ansatz der transversalen Ströme.

## 3.1 Theorie der Radioemission

### 3.1.1 Geosynchrotronansatz

Der hauptsächlich von T. Huege und H. Falcke entwickelte Geosynchrotronansatz [HF03] beruht auf der Bewegung einzelner geladener Teilchen im Erdmagnetfeld. Jedes geladene, hoch relativistische Teilchen im Schauer bewegt sich auf einer helixförmigen Bahn und emittiert Synchrotronstrahlung. Der Strahlungskegel eines einzelnen Teilchens hat einen Öffnungswinkel, der umgekehrt proportional zu dessen Lorentzfaktor  $\gamma$  ist, siehe Abbildung 3.1a. Auf Grund der Abhängigkeit der Strahlungsemission vom Erdmagnetfeld wird diese Strahlung als Geosynchrotronstrahlung bezeichnet. Die Geosynchrotronstrahlung hat ihr Maximum bei einer Frequenz von etwa 1 GHz, jedoch ist durch die Ausdehnung der Schauerfront und der Überlagerung der einzelnen Strahlungsbeiträge die Emission erst unterhalb einer Frequenz von 100 MHz kohärent. Die Beschreibung dieses Modells in einer Monte-Carlo Simulation ist in REAS<sup>1</sup> realisiert. Nach Berechnungen zur Geosynchrotronemission einzelner Teilchen [HF03] von T. Huege und H. Falcke wurde der Schritt zu kompletten parametrisierten Schauern vollzogen. Dies erforderte C++ basierende Monte-Carlo Simulationen und wurde mit REAS1 [HF05b],[HF05a] verwirklicht. Durch das Parametrisieren der Luftschauer geht die Komplexität der Luftschauerentwicklung nicht in die Simulation mit ein. Die Betrachtung von nicht parametrisierten, sondern simulierten Schauern wurde mit REAS2 [HUE07] erreicht. Hierzu wurden zuerst Luftschauer mit CORSIKA<sup>2</sup> [HKC<sup>+</sup>98] berechnet und dann mit REAS2 weiter untersucht. Hierfür werden die von CORSIKA in Histogrammen abgespeicherten Teilchenverteilungen ausgelesen und die Bahnen der Teilchen berechnet. Entlang diesen Bahnen wird die Radioemission gemäss

$$\vec{E}(\vec{x}, t) = e \left[ \frac{\vec{n} - \vec{\beta}}{\gamma^2 (1 - \vec{\beta} \cdot \vec{n})^3 R^2} \right]_{\text{ret}} + \frac{e}{c} \left[ \frac{\vec{n} \times [(\vec{n} - \vec{\beta}) \times \dot{\vec{\beta}}]}{(1 - \vec{\beta} \cdot \vec{n})^3 R} \right]_{\text{ret}} \quad (3.1)$$

berechnet. Mit der Ladung der Teilchen  $e$ , der Teilchengeschwindigkeit  $\vec{\beta} = \vec{v}(t)/c$ , dem Vektor zwischen Beobachter und Teilchenposition  $R(t) = |\vec{R}(t)|$ , der Beobachtungsrichtung zwischen Teilchen und Beobachter  $\vec{n}(t) = \vec{R}(t)/R(t)$  und dem Lorentzfaktor der Teilchen  $\gamma$ . Der Index “ret” sagt aus, dass die Gleichung in der Eigenzeit der Teilchen ausgewertet wird. Die Strahlungsemission kommt hier ausschließlich aus der Beschleunigung der Ladungsträger im Erdmagnetfeld. Der Strahlungsbeitrag aus der Änderung der Anzahl der Ladungsträger im Schauer wird erst mit REAS3 berücksichtigt. Dieser Schritt führte dazu, dass in REAS3 die Radiopulse bipolar sind und sich mit den Vorhersagen einer komplett anderen Mo-

<sup>1</sup>Radio Emission from Air Showers

<sup>2</sup>COsmic Ray SIMulation for KASCADE, Monte-Carlo Programm zur komplexen Simulation von Luftschauern

dellierung, dem Ansatz der transversalen Ströme, decken. Da die Radioemission in der Ebene senkrecht zur Schauerachse polarisiert ist und diese Ebene einen immer größer werdenden vertikalen Anteil, mit zunehmend flacheren Schauergeometrien, bekommt, ist davon auszugehen stark geneigte Schauer in der vertikalen Polarisationsrichtung gut detektieren zu können. REAS3 ist der erste und momentan einzige in sich konsistente Ansatz zur Berechnung der Radioemission aus komplexen simulierten Luftschauern in der Zeitdomäne.

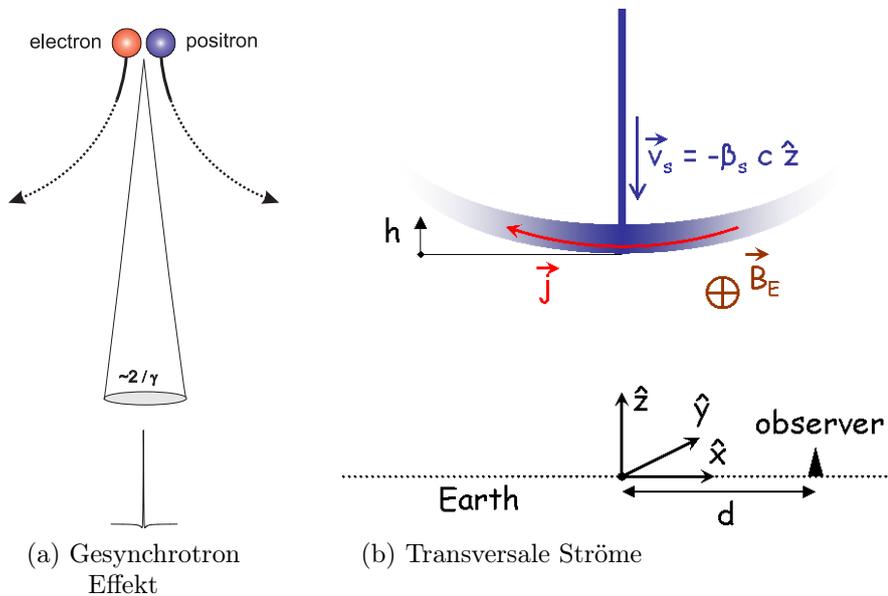


Abbildung 3.1: Die beiden verschiedenen Modelle zur Beschreibung der Radioemission aus Luftschauern, der Geosynchrotroneffekt und das Modell der transversalen Ströme, schematisch dargestellt.

### 3.1.2 Ansatz der transversalen Ströme

Der Ansatz der transversalen Ströme ist im Gegensatz zum Geosynchrotronansatz ein makroskopischer Ansatz. Diese Modellierung hatten schon F. D. Kahn, I. Lerche [KL66] und S. A. Colgate [Col67] als Emissionsmechanismus postuliert und sie wurde jetzt hauptsächlich von O. Scholten und K. Werner erneut zur Beschreibung der Radioemission aus Luftschauern aufgegriffen [SWR08]. Diesem Ansatz

### 3 Radioemission aus Luftschauern

liegt die Ladungstrennung der geladenen Schauerteilchen auf Grund der Lorentzkraft im Erdmagnetfeld, siehe Abbildung 3.1b, zu Grunde. Die Ladungstrennung kann durch eine mittlere Stromdichte  $\vec{j}$  angenähert werden. Diese Stromdichte ist proportional zur Anzahl der Ladungsträger in der Schauerfront. Aus der Kenntnis des zeitlichen Verlaufs der Stromdichte kann die Radioemission berechnet werden. Durch die Betrachtung einer Stromdichte gehen Informationen über einzelne Teilchen wie Lateralverteilung und Winkelverteilung nicht in die Berechnung mit ein. Es wird eine konstante Driftgeschwindigkeit der sich trennenden Ladungsträger angenommen. Eine Lorentztransformation der Stromdichte, die sich im Ruhesystem des Luftschauers mit annähernder Lichtgeschwindigkeit durch die Atmosphäre bewegt, in das Ruhesystem des Betrachters führt zu einer starken Bündelung der emittierten Strahlung, die in einem schmalen Kegel in Richtung der Schauerachse ausgesandt wird. Auch in diesem Ansatz ist durch geometrische Betrachtung der Geschwindigkeits- und der Laufzeitunterschiede die Emission unterhalb von 100 MHz kohärent. Die Driftgeschwindigkeit der Elektronen und Positronen in der Schauerfront hängt von den Wechselwirkungen der Sekundärteilchen der Schauerfront mit den Molekülen der Atmosphäre ab. Auch hier ist die Radioemission in der Ebene senkrecht zur Schauerachse polarisiert. In dieser Ebene ist die Polarisation wiederum senkrecht zum Erdmagnetfeld polarisiert, was bedeutet, dass bei zunehmend flachen Schauer mehr Emission in der vertikalen Komponente zu erwarten ist. Es bildet sich neben der Stromdichte auch eine bipolare Ladungsverteilung in der Atmosphäre hinter der Schauerfront aus. Durch die Bildung dieses Dipols kommt es zu einem weiteren Strahlungsbeitrag.

## 3.2 Experimente

Mit dem Fortschritt der digitalen Elektronik wurde die Detektion und die Theorie der Radioemission aus Luftschauern wieder von Interesse. Im Folgenden werden vier aktuelle Experimente zur Radiodetektion kurz vorgestellt [Hau09].

### 3.2.1 LOPES

LOPES wurde ursprünglich als **LOFAR Prototype Station** entwickelt und ist mittlerweile ein eigenständiges Experiment, das seit April 2003 innerhalb des KASCADE-Arrays am Campus Nord des KIT aufgebaut ist [Hor10]. LOPES misst in seiner letzten Ausbaustufe LOPES30-dual pol mit 30 abgeknickten Dipolantennen. 10 dieser Antennen sind in Ost-West-Richtung orientiert, 10 in Nord-Süd- und 5 Antennen messen sowohl die Nord-Süd- als auch die Ost-West-Polarisation. LOPES misst mit einer effektiven Bandbreite von 43 – 76 MHz und wird von KASCADE bzw. KASCADE-Grande, zwei Luftschauerexperimenten mit Teilchendetektoren, ebenfalls am Campus Nord des KIT, getriggert. Genauere Informationen zu den einzelnen Ausbaustufen von LOPES werden in Kapitel 4.2 beschrieben.

LOPES misst die Radioemission aus Luftschauern mit einer Primärteilchenenergie von  $10^{16}$  bis  $10^{18}$  eV.

### 3.2.2 CODALEMA

CODALEMA [ABC<sup>+</sup>05] steht für **CO**smic ray **D**etection **A**rray with **L**ogarithmic **E**lectro**M**agnetic **A**ntennas und befindet sich am Nançay radio observatory in Frankreich. In seiner ersten Konfiguration verwendete CODALEMA konisch logarithmische Antennen, um nachzuweisen, dass die Detektion von Radiosignalen aus Luftschauern in Koinzidenz mit Teilchendetektoren möglich ist. In der aktuellen Ausbaustufe besteht CODALEMA aus 24 Dipolantennen und 17 als Trigger dienenden Teilchendetektoren, die für das Pierre Auger Observatorium entworfen wurden. Das Antennenfeld misst die Radioemission ab einer Energie von  $10^{16}$  eV im Frequenzband von 24 – 82 MHz.

### 3.2.3 LOFAR

Das LOFAR-Experiment [RdF<sup>+</sup>03] ist ein digitales, hauptsächlich für astronomische Zwecke aufgebautes Radiointerferometer mit 350 km Durchmesser. Das **LO**w **F**requency **A**rray misst in einer Bandbreite von 30-240 MHz. Das Experiment besteht aus 77 Detektorstationen, die wiederum aus jeweils 200 Antennen bestehen. 100 dieser umgekehrt v-förmigen Dipolantennen messen in einem Frequenzband von 20 – 80 MHz die anderen 100 Antennen messen im Bereich von 110 – 240 MHz.

### 3.2.4 AERA

Das **A**uger **E**ngineering **R**adio **A**rray AERA ist ein sich im Aufbau befindendes Radio Antennenfeld innerhalb des Pierre Auger Observatoriums in Argentinien [Ht10]. AERA verwendet LPDAs, logarithmisch periodische Dipolantennen und soll 2010 in seiner ersten Ausbaustufe mit 24 solcher doppelt polarisierten Antennen ausgestattet werden. AERA misst in einem Frequenzband von 30 – 80 MHz ab einer Energie von  $10^{17,2}$  eV in der radiountergrundarmen argentinischen Pampa. In seiner endgültigen Konfiguration soll AERA mit 150 Antennen auf einer Fläche von  $20 \text{ km}^2$  messen.

Alle 4 Experimente arbeiten in Koinzidenz mit Teilchendetektoren, weil in der jetzigen Phase der Emissionsmechanismums noch nicht vollständig verstanden ist.

### *3 Radioemission aus Luftschauern*

## 4 Experimenteller Aufbau

Am KIT Campus Nord befinden sich mehrere Experimente zur Detektion von ausgedehnten Luftschauerereignissen. Im Folgenden werden KASCADE, ein Teilchendetektorfeld, dessen Erweiterung KASCADE-Grande und LOPES genauer vorgestellt.

### 4.1 KASCADE und KASCADE-Grande



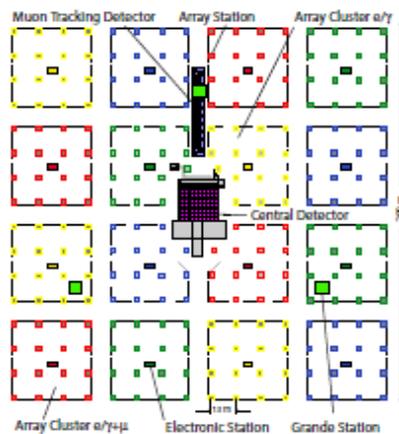
Abbildung 4.1: KASCADE Detektorstationen auf dem Gelände des KIT Campus Nord.

Der **KA**rlsruhe **S**hower **C**ore and **A**rray **D**etector KASCADE ist ein Teilchendetektorfeld, welches die elektromagnetische, die hadronische sowie die myonische Komponente des Luftschauers misst [AAB<sup>+</sup>03]. KASCADE ist sensitiv auf Luftschauer mit Primärteilchenenergien von  $10^{14}$  bis  $10^{17}$  eV. Das Detektorfeld besteht aus 252 Szintillatordetektorstationen, die in einem Abstand von 13 m zueinander in einem regelmäßigen Gitter, wie in Abbildung 4.2a zu sehen, angeordnet sind. Insgesamt wird eine Fläche von  $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$  abgedeckt. Die Detektorstationen sind in Cluster zu je  $4 \times 4$  Stationen zusammengefasst.

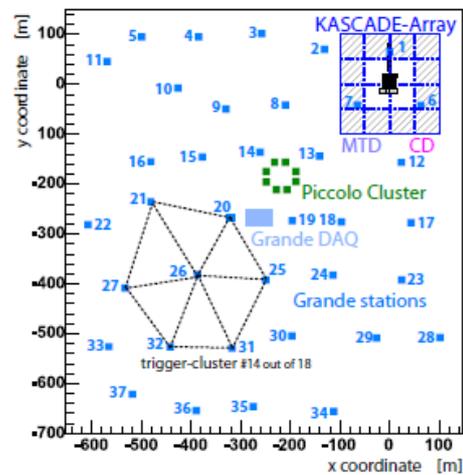
Außerdem gibt es noch einen Zentraldetektor zum Nachweis aller drei Schauerkomponenten. Er befindet sich mittig im KASCADE-Feld und besteht aus einem Hadronenkalorimeter, das Hadronen oberhalb einer Energieschwelle von  $5 \cdot 10^{10}$  eV

## 4 Experimenteller Aufbau

nachweist, einer Toplage zur Messung kleinerer Luftschauer, einem Topcluster und mehreren Vieldraht-Proportionalkammern zur Spurbestimmung einzelner Myonen oberhalb einer Energie von  $2,4 \cdot 10^6$  eV. Zur Erhöhung der Sensitivität auf Luftschauer mit Energien bis zu  $10^{18}$  eV, wurde KASCADE um 37 Detektorstationen erweitert. Diese Erweiterung wird als KASCADE-Grande bezeichnet [NAA<sup>+</sup>04]. Die Stationen haben einen mittleren Abstand von 130m auf einer Fläche von  $0,5 \text{ km}^2$  und sind in einem hexagonalen Gitter, wie in Abbildung 4.2b zu sehen, angeordnet. Die KASCADE-Grande Detektoren messen die geladene Teilchen eines Luftschauers, wie Elektronen, Positronen und Myonen.



(a) KASCADE Detektor Feld mit farbigen Clustern.



(b) KASCADE-Grande Stationen mit einem eingezeichneten Triggerhexagon.

Abbildung 4.2: KASCADE und KASCADE-Grande auf dem Gelände des KIT Campus Nord.

## 4.2 LOPES

LOPES hat sich schnell von einer Teststation zu einem eigenständigen Experiment entwickelt, mit dem innovative und neue Ideen erprobt werden. In seiner ersten Konfiguration LOPES-10 bestand LOPES aus 10 umgekehrt v-förmigen Dipolantennen, die in Ost-West-Richtung ausgerichtet waren und im Frequenzbereich von 40-80 MHz die Radioemission aus Luftschauern gemessen haben [AAB<sup>+</sup>06]. Mit LOPES-10 gelang, dank der Möglichkeit die gemessenen Daten mit Daten von KASCADE zu vergleichen, der Nachweis, dass Radiodetektion von Luftschauerereignissen möglich ist. Später wurde LOPES auf 30 Antennen erweitert [INAE06], die zunächst ebenfalls in Ost-West-Richtung ausgerichtet waren. Diese Konfigura-

tion wird als LOPES-30 bezeichnet. In der letzten Konfiguration bestand LOPES aus 15 Nord-Süd-polarisierten und 15 Ost-West-polarisierten Antennen [IAA<sup>+</sup>07]. LOPES<sup>STAR</sup> [Kro08] ist ein Teil des LOPES Experiments, mit dem ein Radio-selbsttrigger entwickelt und weiterentwickelt wird. STAR steht hierbei für **S**elf **T**riggerted **A**rray of **R**adio detectors. LOPES<sup>STAR</sup> ist mit 10 logarithmisch periodischen Dipolantennen ausgestattet. Jede Antenne ist sowohl in Ost-West- als auch in Nord-Süd-Richtung polarisiert. LOPES<sup>STAR</sup> misst wie LOPES im Frequenzbereich von 40 – 80 MHz.

### 4.2.1 LOPES Trigger

Mit LOPES sollte untersucht werden, ob die Radioemission aus Luftschauern gemessen werden kann. Dieses Experiment war als extern getriggertes Antennenfeld geplant. LOPES erhält daher von den beiden bestehenden Luftschauerexperimenten KASCADE und KASCADE-Grande einen externen Trigger und hat somit die Möglichkeit, die gemessenen Radiodaten mit gemessenen Daten einer schon bestehenden und ausgereiften Technik zu vergleichen. Erhält LOPES einen Trigger, wird eine Spur mit  $2^{16}$  Messpunkten aufgezeichnet mit jeweils gleich vielen Messpunkten vor und nach dem Trigger-Zeitpunkt. Bei einer Samplingrate von 80 MHz und  $2^{16}$  Messpunkten entspricht die Dauer der aufgezeichneten Spur  $0,8192 \mu\text{s}$ .

### KASCADE Trigger

Luftschauerereignisse sind für LOPES erst ab einer Energie von  $10^{16,5}$  eV interessant. Wenn 10 der 16 Cluster getriggert haben, erhält LOPES das Signal zum Auslesen seiner Ringpuffer. Dieses Kriterium stellt sicher, dass LOPES alle Schauer ab  $10^{16}$  eV aufzeichnet. Etwa die Hälfte aller aufgezeichneten Luftschauer liegen unterhalb dieser Energie. Bei diesem Trigger beträgt die Rate etwa zwei Ereignisse pro Minute.

### KASCADE-Grande Trigger

Die KASCADE-Grande Detektorstationen sind in Trigger-Hexagone zusammengefasst, wobei jedes dieser Hexagone aus einer zentralen Station und den 6 umliegenden Stationen besteht, siehe Abbildung 4.2b. Haben alle sieben Stationen einen koinzidenten Trigger, generieren sie ein gemeinsames Triggersignal. Haben die zentralen Hexagone 9, 10 und 13 gemeinsam einen Trigger, bekommt LOPES das Signal zum Abspeichern eines Ereignisses. Die so beobachteten Luftschauer sind hoch energetisch und auch weit genug von den LOPES-Antennen entfernt, so dass die Lateralverteilung besonders gut, ohne Störsignale aus den Teilchendetektoren von KASCADE, untersucht werden kann.

## 4 Experimenteller Aufbau

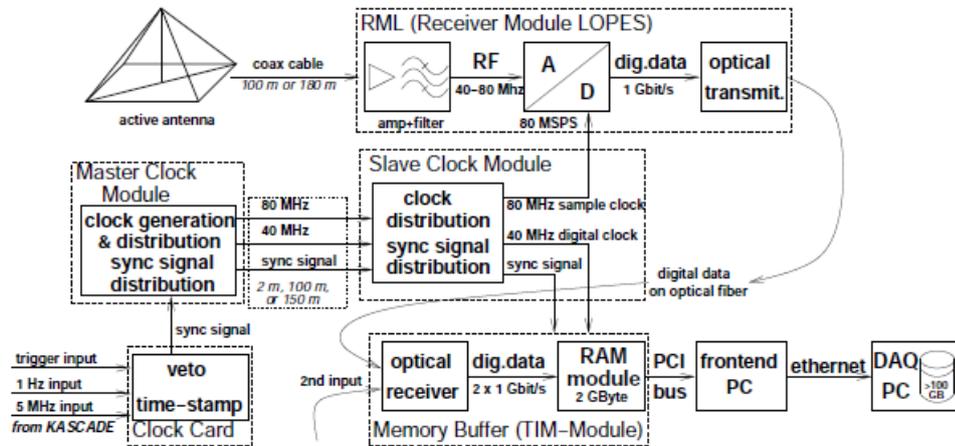


Abbildung 4.3: Schema der LOPES Elektronik, die einzelnen Komponenten sind in Kapitel 4.2.2 genauer beschrieben [Hor06].

### 4.2.2 LOPES Aufbau und Elektronik

Das Frequenzband von 40-80 MHz wurde für LOPES gewählt, da in diesem Frequenzbereich wenig vom Menschen verursachten Störsignale, wie Radiosender oder ähnliches, erwartet wurden. Oberhalb 80 MHz beginnt das FM Band. Unterhalb 40 MHz ist das atmosphärische Rauschen zu groß. Außerdem befindet sich das Kurzwellenband unterhalb 40 MHz. Die Theorie sagt voraus, dass bei Frequenzen größer als 100 MHz die Kohärenz verloren geht. Lediglich ein Fernsehsender hat in dem für LOPES interessanten Frequenzbereich bei 62,25 MHz gesendet, ist aber mittlerweile nicht mehr in Betrieb. Außerdem sind die Radiopulse aus Luftschauern in diesem Frequenzbereich stärker als das galaktische Rauschen. LOPES ist in drei Cluster mit jeweils 10 Antennen gegliedert. Jede dieser Antennen ist per Kabel mit einer KASCADE Auslesestation verbunden, die die Ausleseelektronik und drei PCs zur Datenverarbeitung enthält. Ein Schema der im Folgenden beschriebenen Komponenten ist in Abbildung 4.2.2 gezeigt.

#### Antenne

Die Antennenarme der umgekehrt v-förmigen Dipolantennen sind zwei ein Meter lange Kupferkabel, die sich in zwei gegenüberliegenden Armen der Pyramidenkonstruktion befinden. Ein Bild der Antenne ist in Abbildung 4.4a zu sehen. In der LOPES-3D Konfiguration wurden die umgekehrt v-förmigen Dipolantennen durch 10 Tripole ersetzt.

#### LNA

Der Low Noise Amplifier ist ein spezieller und besonders rauscharmer Vorverstär-

ker, welcher sich zwischen Antenne und dem Koaxialkabel zum Receiver-Modul LOPES (RML) befindet. Das Signal muss vorverstärkt werden, weil es sonst im Koaxialkabel zu stark abgeschwächt wird und am RML nicht mehr aufgezeichnet werden kann.

### **Receiver-Modul LOPES**

Nachdem das Radiosignal vorverstärkt wurde, wird es durch 100 und 150 m lange Kabel zum Receiver-Modul-LOPES gesendet. Dort wird das Signal durch einen Bandfilter gefiltert und erneut verstärkt. Im Anschluss daran wird es in 12 bit Analog Digital Convertern (ADC) digitalisiert. Die ADCs erhalten, von einem Master-Clock genannten Taktgeber, ihre Taktung und tasten mit einer Frequenz von 80 MHz ab. Durch das Abtasten mit einer Frequenz, die doppelt so groß ist wie die Bandbreite des zu untersuchenden Signals gehen laut Nyquist Theorem keine Informationen über das ursprüngliche Signal verloren.

### **Bandfilter**

Die Filter von LOPES sollen das aufgezeichnete Signal auf die Bandbreite von LOPES (40 bis 80 MHz) beschränken und das Signal zwischen diesen beiden Werten möglichst unverändert lassen. In der Praxis ist das jedoch leider nicht möglich, so beschränken die verwendeten Filter die effektive Bandbreite von LOPES auf 43 bis 76 MHz. Des Weiteren hat die Filterung auch eine frequenzabhängige Abschwächung des Signals zur Folge, weshalb eine Absolutkalibration der einzelnen Kanäle von LOPES notwendig ist.

### **Analog-Digital Wandler (ADC)**

Der Analog Digital Wandler (engl. analogue digital converter, ADC) wandelt das anliegende analoge Signal, die Spannung in digitale Zählseinheiten, sogenannte Counts um. Die maximale Eingangsspannung der bei LOPES verwendeten ADCs liegt bei 1 V. Die Auflösung der ADCs beträgt 12 bit. Die Abtastfrequenz erhalten die ADCs vom sogenannten Master-Clock-Module.

### **Übertragung**

Die Übertragung der digitalisierten Daten zum Memory Buffer erfolgt über optische Glasfaserkabel.

### **Memory Buffer (Twin input Module – TIM)**

Die Memory Buffer Karte ist über den Standard PCI-slot mit dem Front-End-PC verbunden und dient zum Zwischenspeichern der digitalisierten Daten. Sie hat eine Kapazität von 2 GB, was bei gleichzeitigem Einlesen beider Eingänge einer Länge von 6,25 s entspricht. Bis zu diesem Schritt wurde das komplette von LOPES aufgezeichnete Signal verarbeitet und wird hier zwischengespeichert. Jetzt werden die Memory Buffer erst ausgelesen wenn LOPES einen Trigger bekommt.

## 4 Experimenteller Aufbau

### DAQ-PC

Im DAQ-PC laufen die Daten aller Front-End-PCs, also den PCs die die TIM Module enthalten, zusammen, werden dann mit einem Zeitstempel versehen und zu einem Ereignis kombiniert. Es werden nur  $0,4 \mu\text{s}$  der Spur vor und nach dem Trigger-Signal gespeichert. Bei einer Auslese von allen 30 Kanälen ist ein Ereignis  $3,8 \text{ MB}$  groß.

### Clock-Boards

Es gibt insgesamt drei Clock-Boards die zum verarbeiten des Triggersignals von KASCADE oder KASCADE-Grande und dem Generieren der Abtastfrequenz vorgesehen sind.

#### Clock-Card

Empfängt den Trigger von KASCADE oder KASCADE-Grande, generiert einen Zeitstempel und gibt diesen zusammen mit dem Trigger an das Master-Clock-Modul weiter.

#### Master-Clock-Module

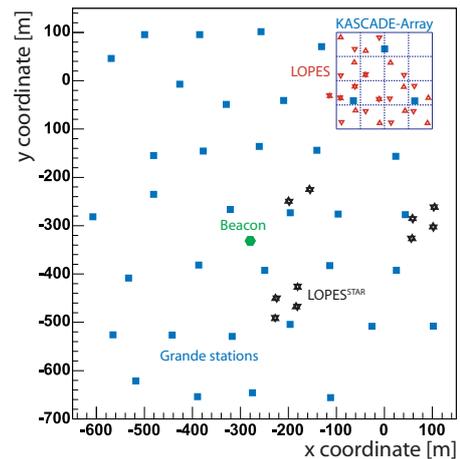
Generiert die Abtastfrequenz für alle ADCs und gibt das Triggersignal an die Slave-Clock-Module weiter.

#### Slave-Clock-Module

Geben die Abtastfrequenz an die RML weiter und verteilen das Synchronisationssignal an die Memory-Buffer von jeweils 10 Kanälen.



(a) Umgekehrt v-förmige Dipol Antenne von LOPES. Im Hintergrund zu sehen die einzelnen Detektorhütten von KASCADE.



(b) Position der LOPES-POL Antennen innerhalb des KASCADE-Grande Detektorfeldes.

## Beacon

Der Beacon ist eine Referenzantenne, die konstant auf drei Frequenzen ein Sinus-signal sendet. Durch die Phasenlage des Signals in verschiedenen Antennen kann das Timing von LOPES überwacht und Fehler korrigiert werden [Kon10]. Das genaue Verfahren wird in Kapitel 6.3.1 beschrieben. Der Beacon besteht aus einem Frequenzgenerator, der mit drei temperaturstabilen Quarzoszillatoren die Beaconfrequenzen von 53,1 MHz, 63,5 MHz und 68,1 MHz generiert. Danach werden die Signale der einzelnen Quarzoszillatoren in einem Kombinierring vereint. Nach einem Dämpfungsglied werden die Signale schließlich verstärkt und zur Sendeantenne einer SALLA mit 75 cm Durchmesser, vergleiche Kapitel 5.2.1, weitergeleitet. Der Aufbau des Beacons ist schematisch in Abbildung 4.4 dargestellt.

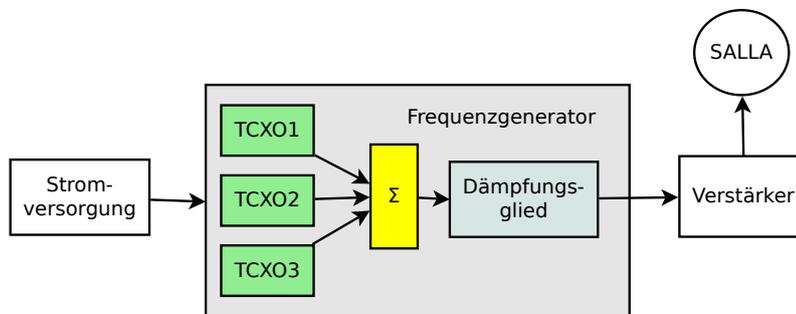


Abbildung 4.4: Beaconelektronik bestehend aus drei temperaturstabilen Quarz-Oszillatoren (TCXO), einem Kombinierring ( $\Sigma$ ), einem Verstärker, einer Stromversorgung und einer Sendeantenne (SALLA).

### 4.2.3 LOPES Analyse

LOPES tastet mit einer Frequenz von 80 MHz ein Signal mit der Bandbreite 40-80 MHz ab, das heißt, die Datenaufnahme erfolgt in der zweiten Nyquist-Zone und es bleibt die volle Information erhalten. Um die ursprüngliche Spur der aufgenommenen Daten zu erhalten, muss das Signal hochgetastet (upsampled) [Nyq28], also die fehlenden Datenpunkte berechnet werden. Dies wird durch folgendes Verfahren erreicht: eine Fouriertransformation liefert ein Spektrum mit Frequenzwerten zwischen 40 MHz und 80 MHz. Dieses wird gespiegelt und der Bereich von 0-40 MHz mit Nullen aufgefüllt. Durch anhängen von Nullen oberhalb der 80 MHz wird die Auflösung des Hochtastens bestimmt. Die Anzahl der eingefügten Nullen muss einem ganzzahligen Vielfachen der Bandbreite entsprechen. Durch eine Fourierrücktransformation erhält man dann die hochgetastete Spur, siehe Abbildungen 4.5a und 4.5b. In der Analyse werden mehrere Korrekturschritte standardmäßig durchgeführt, bevor die eigentliche Auswertung, das Beamforming, beginnt.

## 4 Experimenteller Aufbau

Zunächst werden schmalbandige Störsignale unterdrückt. Da Radiopulse aus Luftschauern breitbandig sind, können die Störquellen leicht identifiziert und unterdrückt werden ohne das ursprüngliche Radiosignal des Luftschauers zu verändern. Danach wird die Verzögerung des Signals durch verschiedene Laufzeiten in den Kabeln und der Elektronik korrigiert. Weiter folgt die Korrektur der Dispersion im Filter und zum Schluss wird die richtungs- und frequenzabhängige Verstärkung der Antenne berücksichtigt. Um eine sehr genaue Zeitauflösung zu erreichen wird eine Phasenkalibrierung durchgeführt. Hierbei wird wie folgt vorgegangen: Eine Referenzquelle (Beacon) sendet konstant auf drei Frequenzen ein Sinussignal. Die Phasenlage dieses Signals ist konstant, somit lässt sich die Zeitauflösung signifikant verbessern [SAB<sup>+</sup>10]. Das genaue Verfahren der Verbesserung der Zeitauflösung wird in Kapitel 6.3.1 beschrieben. Nach diesen Korrekturen liegt das Signal so vor, wie es an den Antennen aufgezeichnet wurde, und ein Richtstrahl (Beamforming) kann berechnet werden. Die von von KASCADE oder KASCADE-Grande rekonstruierte Richtung bildet hierbei den Ausgangspunkt der Richtungsrekonstruktion von LOPES. Zunächst wird die Spur jeder Antenne so verschoben, dass der Radiopuls an der gleichen Stelle zu sehen ist, siehe Abbildung 4.6. Mit den so verschobenen Spuren können verschiedene Richtstrahle berechnet werden. Eine schematische Darstellung der Analysepipeline ist in Abbildung 4.8 zu sehen.

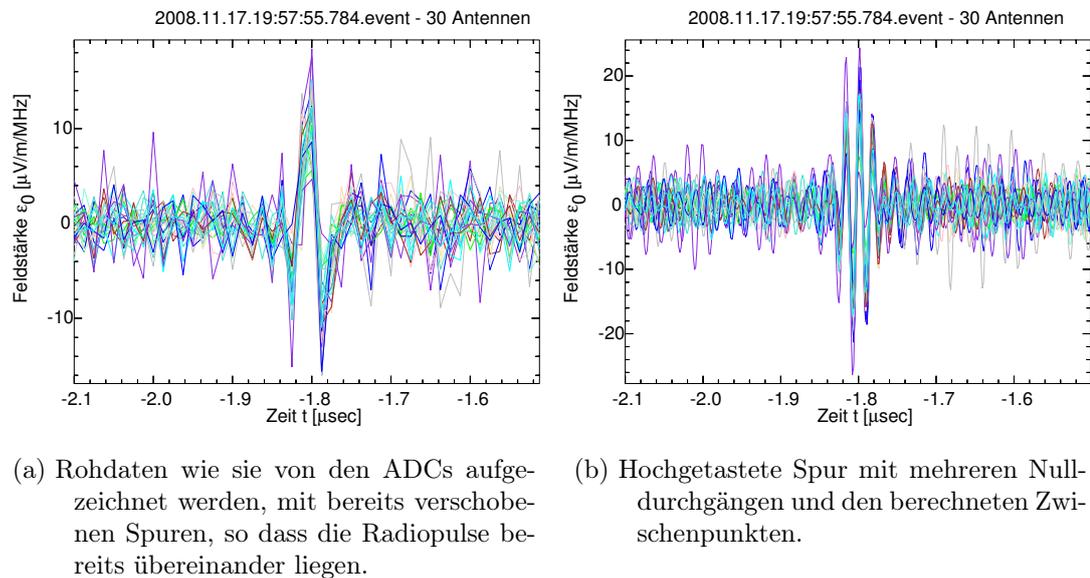
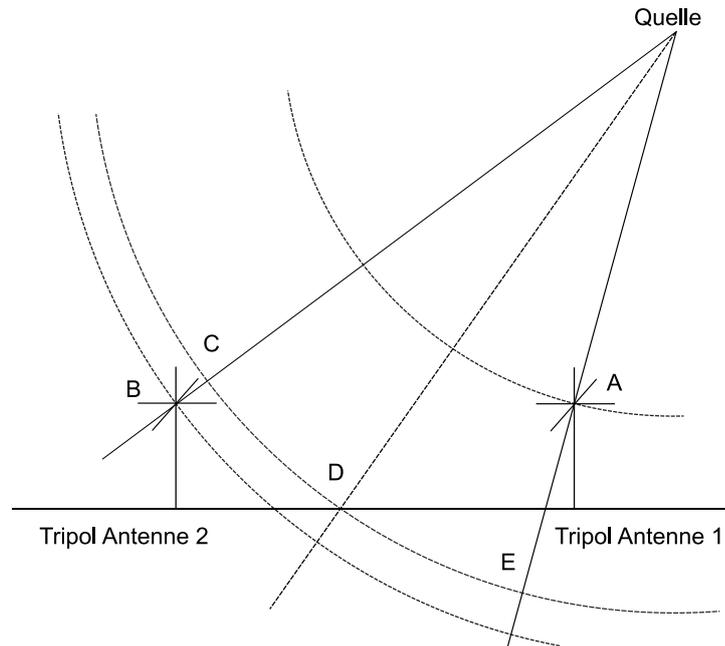


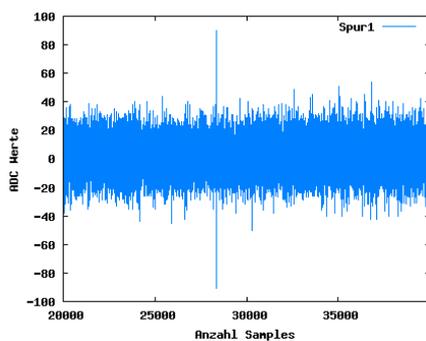
Abbildung 4.5: Beispiereignis und Beamforming

### Block averaging

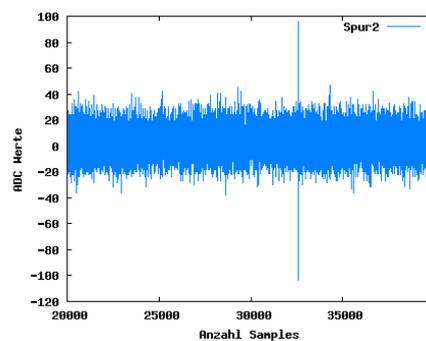
Da die Antialiasing Filter der Signalverarbeitungskette im aufgezeichneten Puls eine Feinstruktur erzeugen die nicht dem Originalpuls entspricht, muss die Pulsstruktur geglättet werden. Dies geschieht durch das Mitteln über drei Werte.



- (a) Schema zu Veranschaulichung der geometrischen Korrektur: durch Verschieben der einzelnen Spuren wird der Laufzeitunterschied ausgeglichen. Beide Spuren haben so das Signal an der gleichen Stelle, obwohl es von den Antennen zu unterschiedlichen Zeiten aufgezeichnet wurde. Dabei werden die Spuren so verschoben als würden die Antennen auf einer Kugeloberfläche liegen. Der Radius dieser Kugel entspricht dem Abstand von der Quelle zum Auftreffpunkt des Primärteilchens.



(b) Spur von Antenne 1, mit dem Radiopuls bei ca. Sample 28000.



(c) Spur von Antenne 2, mit dem Radiopuls bei ca. Sample 325000.

Abbildung 4.6: Laufzeitunterschiede der einzelnen Antennen schematisch dargestellt. Um die Zeitunterschiede in Abbildungen 4.6b und 4.6c besser zu veranschaulichen sind die Teilabschnitte vergrößert dargestellt.

## 4 Experimenteller Aufbau

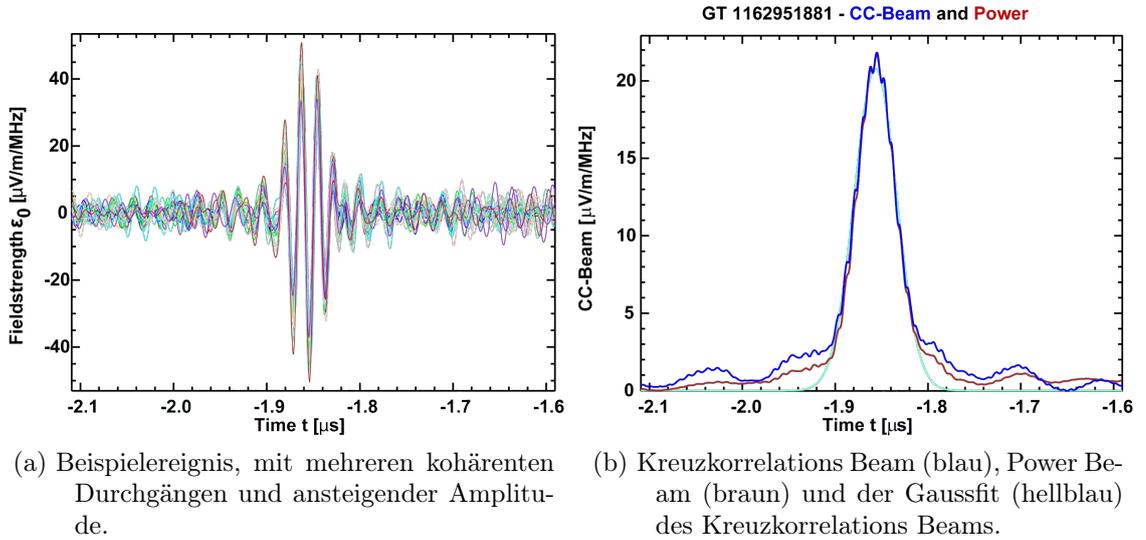


Abbildung 4.7: Beispiereignis und Beamforming

### Der F-Beam

Der fieldstrength beam stellt die Betriebsart eines sogenannten phased arrays dar. Es wird die über alle Antennen gemittelte Feldstärke berechnet. Daher kann das Signal eines kohärenten Pulses sowohl negativ als auch positiv sein, je nach Polarisationsrichtung der Radioemission. Ein als phased array messendes Antennenfeld kann durch unterschiedliches Auslesen der einzelnen Antennen seine Richtcharakteristik elektronisch schwenken und so gezielt in einer Richtung Radiowellen messen. Der F-Beam berechnet sich wie folgt:

$$f_F(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i[t]$$

### Der P-Beam

Der power beam berechnet sich aus der Wurzel der gemittelten Leistung jeder Antenne. Er ist daher immer positiv. Mit dem power beam kann keine Aussage darüber gemacht werden, ob ein Signal kohärent ist oder nicht. Er gibt lediglich die mittlere Leistung an, die von allen Antennen gemessen wurde und berechnet sich wie folgt:

$$f_P(t) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i^2[t]}$$

### Der CC-Beam

Der Kreuzkorrelationsbeam stellt die interferometrische Analyse dar. Bei der Kreuzkorrelation wird das Signal einer Antenne mit dem Signal aller übrigen Antennen multipliziert. Anschließend werden diese Werte gemittelt. Die Wurzel des Betrags der Mittelung ist dann der Wert des cross-correlation beams. Das Vorzeichen der Mittelung wird als Vorzeichen des cross-correlation beams übernommen. Der CC-Beam ist ein Maß für die Kohärenz des Signals. Ein positives Vorzeichen bedeutet, dass das Signal kohärent ist, ein negatives, dass es sich um ein gegenphasiges Signal handelt und ein CC-Beam nahe Null lässt, da sich die Beiträge mit unterschiedlichen Vorzeichen herausmitteln, auf Rauschen schließen. Der CC-Beam berechnet sich wie folgt:

$$f_{CC}(t) = \pm \sqrt{\left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{i>j}^N f_i[t] \cdot f_j[t] \right|}$$

### Der X-Beam

Der excess beam ist ein Maß für den kohärenten Anteil der Leistung eines Signals. Er wird vor allem verwendet um ein Signal zu vermeiden, das durch starkes Hintergrundrauschen in nur wenigen Antennen verursacht wird. Je mehr der excess dem CC-Beam gleicht umso rauscharmer ist das Ereignis. Er berechnet sich wie folgt:

$$f_X(t) = f_{CC}(t) \cdot \left| \frac{\langle f_{CC}(t) \rangle}{\langle f_P(t) \rangle} \right|$$

mit  $\langle \dots \rangle$  als Mittelung der ursprünglichen Daten über drei Samples (block averaging).

Zur Analyse der LOPES Daten wird normalerweise der CC-Beam verwendet. Dies hat den Vorteil, dass kohärente Signale identisch mit der Höhe des P-Beams sind, inkohärente Signale jedoch stark unterdrückt werden. Wie in Abbildung 4.7b zu sehen, hebt sich das Signal deutlich vom Rauschen ab. Zur Rekonstruktion des Krümmungsradius und der Ankunftsrichtung wird entlang der von KASCADE oder KASCADE-Grande rekonstruierten Schauerachse der CC-Beam berechnet. Hat dieser CC-Beam bei einem Abstand R in einer bestimmten Richtung ein globales Maximum ist dieses R der Abstand der Punktquelle zum Antennenfeld. Die Richtung bei der der CC-Beam maximal ist, ist die von LOPES rekonstruierte Schauerachse.

#### 4 Experimenteller Aufbau

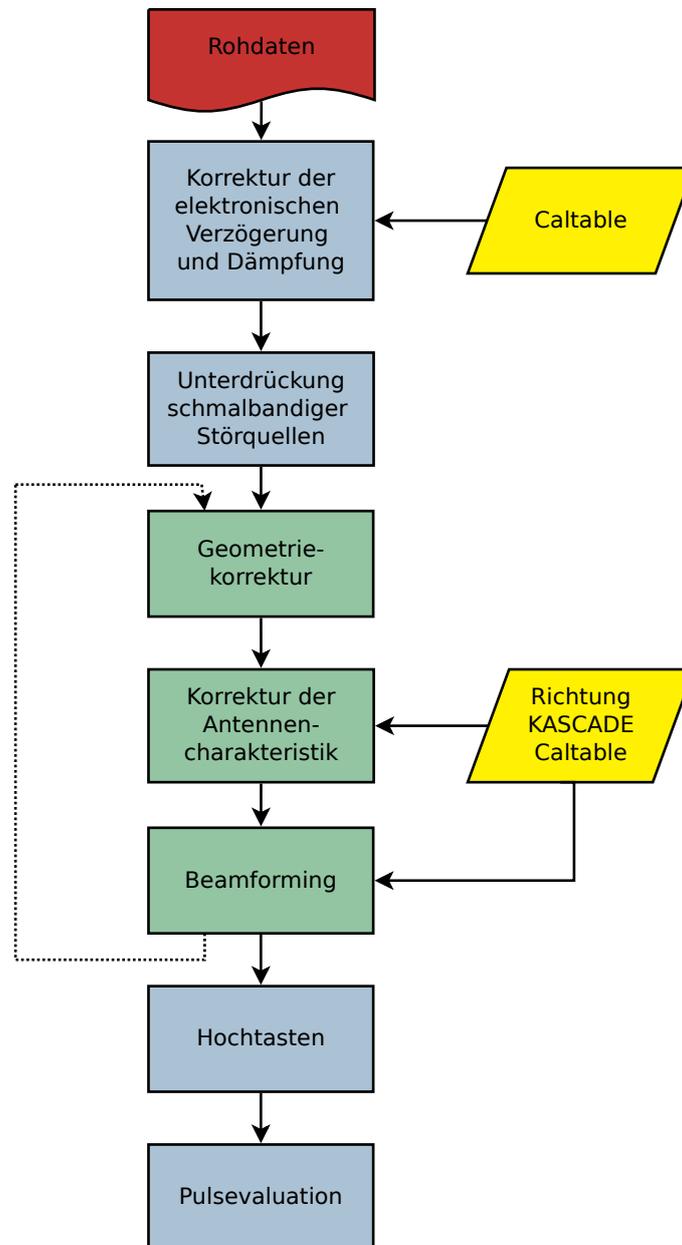


Abbildung 4.8: Flowchart der LOPES Analysepipeline, beginnend mit der aufgezeichneten Spur. Es folgen mehrere Korrekturschritte bevor die Spur hochgetastet wird. Zunächst wird die Signallaufzeit und die Abschwächung des Signals in den Kabeln korrigiert, danach werden schmalbandige Störquellen unterdrückt. Dann wird die Geometriekorrektur durchgeführt (Abbildung 4.6) die Richtcharakteristik wird berücksichtigt und schließlich der CC-Beam berechnet. In einem iterativen Verfahren wird der CC-Beam maximiert (grüne Vierecke). Nach dem Berechnen und Optimieren des CC-Beams wird die Spur hochgetastet.

# 5 Vorbereitung der Rekonfiguration von LOPES

Dieses Kapitel beinhaltet die beiden für die Rekonfiguration von LOPES zur Verfügung stehenden Antennentypen und die durchgeführten Testmessungen. Am Ende dieses Kapitels wird die Entscheidung welcher Antennentyp gewählt wurde kurz begründet.

## 5.1 Motivation

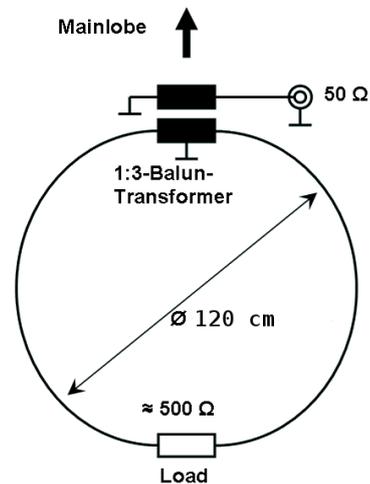
Ziel dieser Arbeit ist die Messung und Rekonstruktion des kompletten E-Feld Vektors. Hierbei soll LOPES neben der Nord-Süd- und Ost-West- auch die vertikale Polarisationsrichtung messen. Die zusätzliche Messung der vertikalen Komponente bietet mehrere Vorteile. Die Radioemission aus Luftschauern ist eine vektorielle dreidimensionale Größe. Bisherige Experimente haben nur eine zweidimensionale Projektion gemessen und somit nicht die komplett vorhandene Information. LOPES misst als erstes und einziges Experiment den kompletten Vektor des E-Feldes und nicht nur eine Projektion, dadurch geht keine Information bei der Messung verloren. Ein Vergleich mit Simulationen und dadurch die Überprüfung eines oder mehrerer Emissionsmodelle ist nur mit Kenntnis des kompletten Vektors der Radioemission aus Luftschauern möglich. Die Frage nach dem Emissionsmechanismus, der zur Radioemission führt ist noch immer nicht vollständig geklärt, die Messung aller drei Komponenten des E-Feld Vektors trägt entscheidend dazu bei, den Emissionsmechanismus besser zu verstehen und ermöglicht so einen noch besseren Zugang zu der vielversprechenden Detektionstechnik.

Ein Emissionsmechanismus der auf der Ladungstrennung im Erdmagnetfeld beruht kann nur mit Kenntnis des kompletten E-Feld Vektors der Radioemission aus Luftschauern, überprüft werden. So ist bei einem rein geomagnetischen Ursprung der Radioemission kein Signal entlang der Erdmagnetfeldachse zu erwarten. Nur das Messen aller drei Polarisationsrichtungen erlaubt eine solche Überprüfung. Durch die Messung der vertikalen Polarisationsrichtung erhöht sich die Sensitivität des Antennenfeldes auch auf stark geneigte Schauer, da hier der Großteil der Polarisation vertikal erwartet wird. So kann mit einer gleichen Sensitivität für alle Schauergeometrien gemessen werden und hoch energetische kosmische Teilchen mit deren Ankunftsrichtung korreliert werden. Zudem kann mit Kenntnis des kompletten E-Feld Vektors der Radioemission aus Luftschauern der rekonstruierte

## 5 Vorbereitung der Rekonfiguration von LOPES



(a) Bild einer SALLA plus vertikalem Dipol im KASCADE-Feld



(b) LC Anpassung und Balun einer SALLA

Abbildung 5.1: SALLA

Richtung des Schauers schon auf Basis der Daten aus einer Antenne verifiziert werden. Daher ist es von größtem wissenschaftlichen Interesse die Radioemission aus Luftschauern in allen drei Polarisationsrichtungen zu untersuchen. Wenn sich die Technik etabliert hat und der komplette Emissionsmechanismus verstanden ist, kann je nach Experiment wieder auf die vertikale Polarisationsrichtung verzichtet werden.

## 5.2 Antennenbeschreibung

Für die Rekonfiguration von LOPES zu LOPES-3D standen zwei mögliche Antennentypen zur Auswahl, eine Schleifenantenne die auf die magnetischen Komponente der Elektro-magnetischen Welle sensitiv ist und eine Dipolantenne die auf die elektrische Komponente sensitiv ist.

### 5.2.1 SALLA

SALLA steht für **S**hort **A**periodic **L**oaded **L**oop **A**ntenna. Die SALLA, eine Entwicklung des IPE<sup>1</sup>, ist eine Schleifenantenne. Das heißt, sie ist sensitiv auf die magnetische Komponente der Radioemission. In der Konfiguration für LOPES-3D bestand eine 3D Antenne aus zwei SALLAs, welche die Nord-Süd- und Ost-West-Komponente bildeten. Die vertikale Komponente war eine Dipolantenne, siehe Abbildung 5.1. Durch ihr Design hat die SALLA den Vorteil, dass ihre Richtcharakteristik kaum sensitiv auf unterschiedliche Bodenbeschaffenheiten ist. Da ein Dipol im Gegensatz zur SALLA in alle Richtungen gleich sensitiv ist, wurde als vertikale Komponente ein Dipol gewählt. Die SALLA ist eine mechanisch sehr robuste Antenne, die ursprünglich für den Einsatz in der argentinischen Pampa bei AERA geplant war. Bei Testmessungen hat sich herausgestellt, dass die SALLA die Spezifikationen für AERA, das galaktische Rauschen zu sehen, nicht erfüllt. Die SALLA gibt es in Durchmessern von 60 cm bis 140 cm. Für LOPES-3D wurde eine Antenne mit 120 cm Durchmesser getestet. Die SALLA ist eine  $\frac{\lambda}{4}$  Breitbandantenne die unterhalb ihrer Resonanz betrieben wird. Durch den größer werdenden Durchmesser verschiebt sich die Resonanzfrequenz immer weiter zum Frequenzband hin, in dem die SALLA betrieben wird. Das hat zur Folge, dass die Verstärkung der Antenne insgesamt, aber besonders bei niedrigen Frequenzen, größer wird. Die SALLA wurde dahingehend optimiert auch das galaktische Rauschen, das bei tiefen Frequenzen stärker ausgeprägt ist, besser zu sehen.

### 5.2.2 Tripol

Der in Zusammenarbeit mit dem IPE entwickelte Tripol besteht aus drei gekreuzten senkrecht zueinander stehenden Dipolen, siehe Abbildung 5.2. Die Länge der Dipole, 1,3 m, wurde so gewählt, dass sie einem Viertel der Wellenlänge der mittleren Frequenz der Bandbreite von LOPES entspricht. Die Kopplung eines Dipols auf das Koaxialkabel erfolgt über einen Balun und eine LC-Anpassung gemäß Abbildung 5.2b. Ein Balun ist ein Symmetrierglied, das sich zwischen symmetrischer Dipolantenne und unsymmetrischen Koaxialkabel befindet. Die Begriffe Symmetrie und Unsymmetrie sind auf die Erdung bezogen. Bei einem Koaxialkabel ist nur der Mantel geerdet. Der Balun wird benötigt um zu verhindern, dass eine symmetrischen Antenne (Dipol) von einem unsymmetrischen Koaxialkabel unsymmetrisch belastet wird. Dies hätte zur Folge, dass Ausgleichsströme im Mantel der Koaxialkables auftreten, was zu Folge hat, dass sich die Richtcharakteristik der Antenne verformt. Beim symmetrischen Betrieb sorgt der Balun dafür, dass bei den Zuleitern zu den Antennenarmen des Dipols die Spannung gleichgroß jedoch gegenphasig ist. Durch diese Betriebsart wird ein symmetrischer Betrieb erreicht. Die Symmetriebedingungen sind:

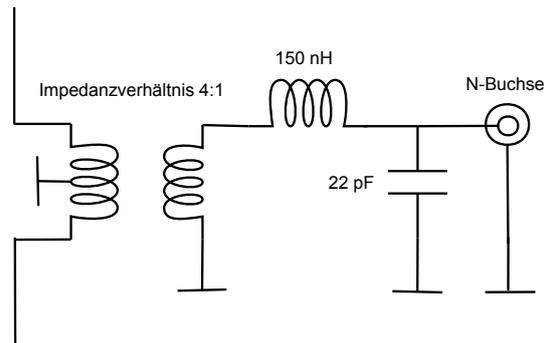
---

<sup>1</sup>Institut für Prozessdatenverarbeitung und Elektronik, KIT

## 5 Vorbereitung der Rekonfiguration von LOPES



(a) Bild eines Tripols im KASCADE-Feld, gut zu erkennen die LNA-Box.



(b) LC Anpassung und Balun eines Dipols.

Abbildung 5.2: Tripol

- Die Impedanzen gegen die Erde müssen gleich groß sein.
- Die Spannungen müssen gleich groß und gegenphasig sein.
- Die Ströme müssen gleich groß und gegenphasig sein.
- Es darf kein Mantelstrom vorhanden sein.

Das Impedanzverhältnis (4 : 1) wurde gewählt, um möglichst nahe an der Nennimpedanz  $200\ \Omega$  zu sein. Hier sind die Verluste am geringsten. Das verwendete Symmetrierglied ist ein so genannter Resonanz-Balun [Kar95]. Ein Resonanz-Balun besteht aus einem LC-Schwingkreis, bei dem der Mantel des Koaxialkabels mit der Mitte der Spule verbunden ist. Auf diese Weise wird die gewünschte Phasendifferenz von  $180^\circ$  erreicht, was dazu führt, dass Blindströme unterdrückt werden und der gewünschte symmetrische Betrieb gewährleistet ist.

Da die gemessenen Radiopulse sehr klein sind und in den 100 bis 150 m langen Kabeln die zur Datenaufzeichnung führen, zusätzlich gedämpft werden und eventuell nicht mehr aufgezeichnet werden könnten, wird ein Vorverstärker (LNA = Low Noise Amplifier, rauscharmer Vorverstärker, Abbildung 5.3) benötigt. Diese Vorverstärker befinden sich in der Metallbox am unteren Ende des Befestigungsmasts und sind über 1,5 m lange Koaxialkabel mit den Dipolantennen verbunden.

Ihre Versorgungsspannung beträgt 7 bis 24 V. Sie werden über das Koaxialkabel das zur Datenaufnahme führt gespeist (Phantomspeisung). Die Antennenvorverstärker sind zweikanalig ausgeführt, das heißt in einem LNA-Gehäuse sind zwei Kanäle untergebracht. Für jeden Kanal sind separate Fernspeiseweichen (BIAS-T-Koppler) integriert. Eingangsseitig ist sowohl Überspannschutz als auch ein Hochpassfilter enthalten. Dieser Vorselektionsfilter von nur 2. Ordnung dient dazu ein Übersteuern des Vorverstärkers zu verhindern [Kro08]. Das Signal wird in der Datenaufnahme für die Analyse erneut mit Filtern höherer Ordnung bandbegrenzt. In jeder LNA-Box befinden sich 2 LNA-Gehäuse, also insgesamt 4 Kanäle. Da aber pro Antenne nur drei Kanäle besetzt werden, hat man einen Ersatzkanal, der bei Bedarf vor Ort einfach einzusetzen ist. Die bei LOPES verwendeten Vorverstärker sind besonders rauscharm, um das schon hohe Hintergrundrauschen nicht zusätzlich durch das Rauschen der Elektronik zu verstärken.

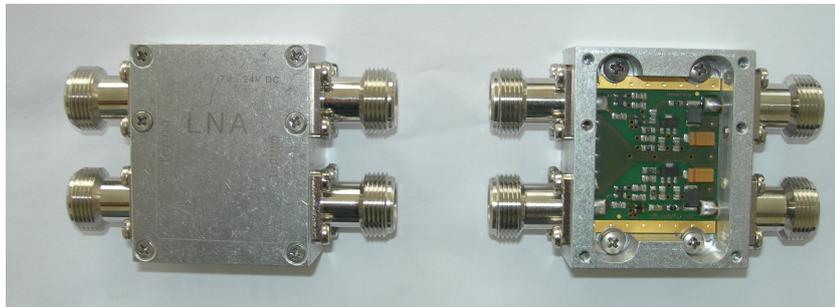


Abbildung 5.3: Die rauscharmen Vorverstärker in zweikanaliger Ausführung wie sie beim Tripol und bei der SALLA verwendet werden.

## 5.3 Testmessungen

Um zu entscheiden, welcher der beiden Antennentypen verwendet werden soll, wurden Testmessungen durchgeführt. Hierzu wurden drei Kanäle von LOPES mit der zu testenden Antenne verbunden. LOPES konnte während dieser Zeit mit 27 Antennen weiter Daten nehmen und auswerten. Die drei Kanäle, mit denen die Testantenne verbunden war, wurden als nicht aktiv markiert und gingen somit nicht in die Standardanalyse mit ein. Die Testmessungen fanden nicht an einer Antennenposition von LOPES statt, daher musste die Koaxialkabel die zur Datenaufnahme führten oberirdisch verlegt werden. Für die später durchgeführte Rekonfiguration von LOPES zu LOPES-3D wurden die Kabel zu den Antennen wieder unterirdisch verlegt. Zwei wesentliche Aspekte der Antennen wurden untersucht; um den Anforderungen an das neue Experiment zu genügen:

1. Wie viele der von LOPES gemessenen Ereignisse konnten mit der Testantenne gesehen werden; Kapitel 5.3.1

## 5 Vorbereitung der Rekonfiguration von LOPES

### 2. Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis SNR des Beacon Signals; Kapitel 5.3.2

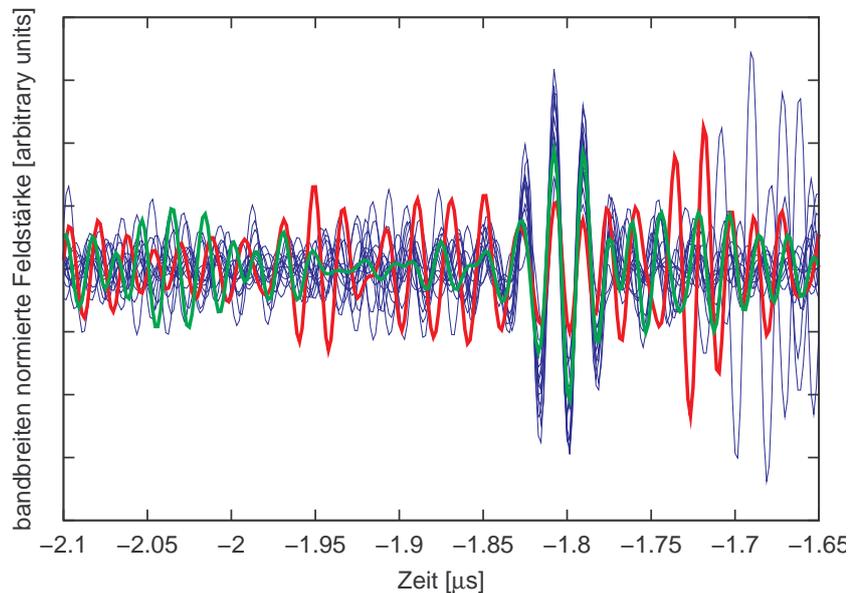


Abbildung 5.4: Beispielergebnis, dargestellt sind die bandbreiten normierte Feldstärke in Ost-West-Polarisationsrichtung, der LOPES Antennen in blau, des vertikalen Dipols der Tripolantenne in rot und des Dipols der Tripolantenne in Ost-West-Polarisationsrichtung in grün.

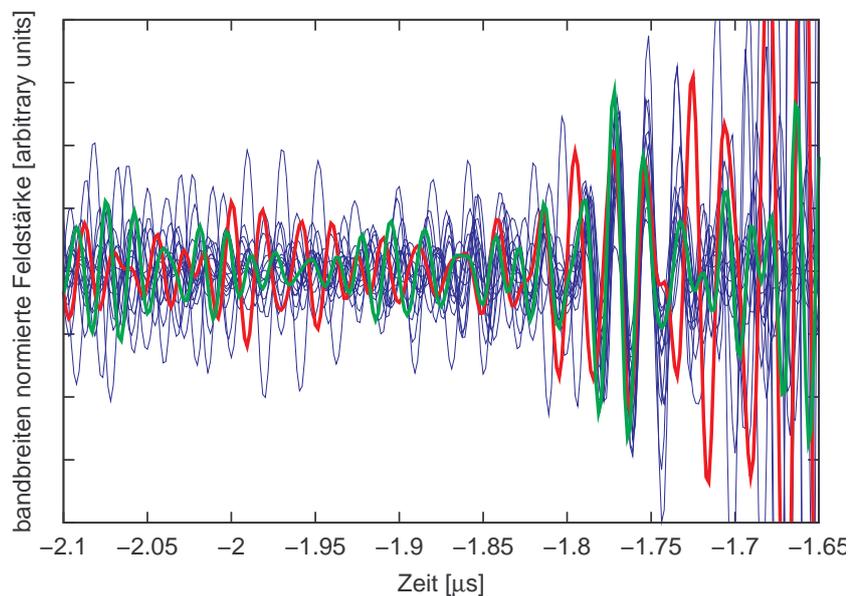


Abbildung 5.5: Beispielergebnis, dargestellt sind die bandbreiten normierte Feldstärke in Nord-Süd-Polarisationsrichtung der LOPES Antennen in blau, des vertikalen Dipols der Tripolantenne in rot und des Dipols der Tripolantenne in Nord-Süd-Polarisationsrichtung in grün.

## 5 Vorbereitung der Rekonfiguration von LOPES

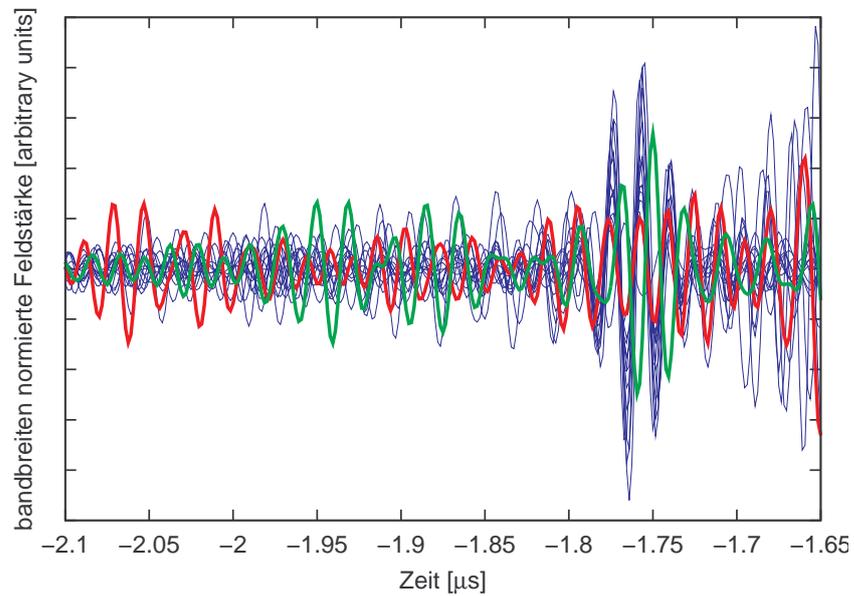


Abbildung 5.6: Beispiereignis, dargestellt sind die bandbreiten normierte Feldstärke in Ost-West-Polarisationsrichtung, der LOPES Antennen in blau, des vertikalen Dipols der SALLA plus Dipol Antenne in rot und der SALLA in Ost-West-Polarisationsrichtung in grün.

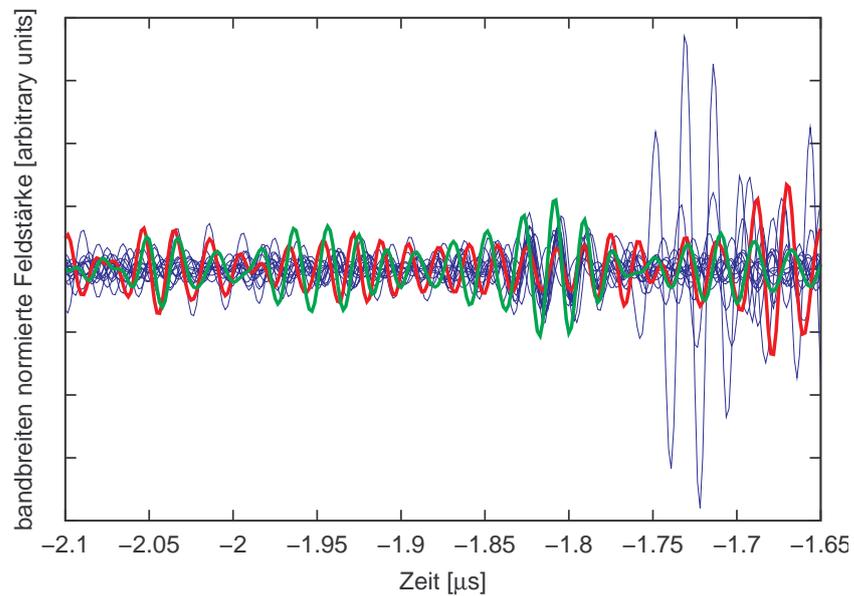


Abbildung 5.7: Beispiereignis, dargestellt sind die bandbreiten normierte Feldstärke in Nord-Süd-Polarisationsrichtung der LOPES Antennen in blau, des vertikalen Dipols der SALLA plus Dipol Antenne in rot und der SALLA Nord-Süd-Polarisationsrichtung in grün.

Die mechanische Robustheit, oder das Verhalten bei besonders tiefen oder hohen Temperaturen mussten nicht untersucht werden, da auf Campus Nord des KIT keine zu extremen Witterungsverhältnisse herrschen. Zudem ist die Elektronik, insbesondere die Vorverstärker, der temperaturanfälligste Teil und beschränkt die Leistung des Experimentes schon bevor eventuelle Temperatureffekte der Antenne zu tragen kommen. Auch die Produktionskosten sind bei beiden Antennentypen in der gleichen Größenordnung, so dass nur die Testmessungen zur Entscheidung beigetragen haben, welcher Antennentyp schließlich verwendet wird.

Ereignisse	KASCADE	EW	NS	grande	EW	NS
gesehen von LOPES	11	8	3	6	4	2
gesehen von Tripol	11	8	3	6	4	2
Effizienz %	100	100	100	100	100	100

Tabelle 5.1: Effizienz Tripol.

Ereignisse	KASCADE	EW	NS	grande	EW	NS
gesehen von LOPES	16	8	8	15	9	6
gesehen von SALLA	10	2	8	8	2	6
Effizienz %	62.5	25	100	53.33	22.22	100

Tabelle 5.2: Effizienz SALLA.

### 5.3.1 Effizienz

Zur Bestimmung der Effizienz wurde überprüft, ob mit den zu testenden Antennen (SALLA/Tripol) ein Signal, welches kohärent mit den Signalen der restlichen LOPES Antennen ist, gemessen werden kann. Hierzu wurde zuerst eine Rekonstruktion mit den verbleibenden 27 LOPES Antennen durchgeführt. Danach wurde die Analyse, mit den Werten aus dieser Rekonstruktion, für alle 30 Antennen durchgeführt. Die Effizienz für die zu testende Antenne wurde wie in Formel 5.1 beschrieben berechnet. Für diese Testmessungen war es notwendig, die drei Kanäle der zu testenden Antenne teilweise neu zu kalibrieren. Es wurde die Position der Antenne mit einem GPS System wie in Kapitel 6.3.1 beschrieben, bestimmt. Die elektronische Verzögerung wurde, gemäß Kapitel 6.3.1, gemessen und die Referenzphasen wurden, nach Kapitel 6.3.1, bestimmt. Die Position, die Referenzphasen und die elektronische Verzögerung wurden in die Kalibrationstabelle eingetragen und gingen in die Analyse mit ein. Es war notwendig die Verzögerung der Kanäle, deren Referenzphasen und die genauen Positionen der Antennen zu bestimmen, da bei dieser Testmessung das Messen von kohärenten Signalen überprüft wurde und diese Werte einen Einfluss darauf haben ob ein kohärentes Signal

## 5 Vorbereitung der Rekonfiguration von LOPES

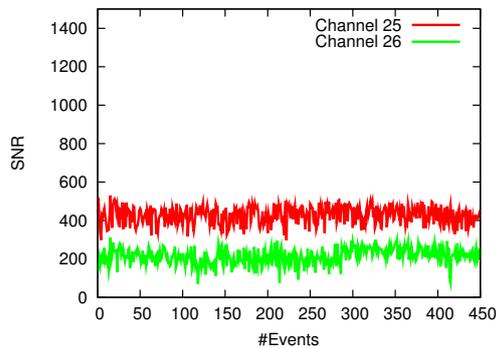
gemessen werden kann. Eine Amplitudenkalibrierung war für diese Art der Testmessung nicht notwendig.

$$E = \frac{\Sigma_{\text{kohärente Ereignisse LOPES+zu testende Antenne}}}{\Sigma_{\text{kohärente Ereignisse LOPES}}} \quad (5.1)$$

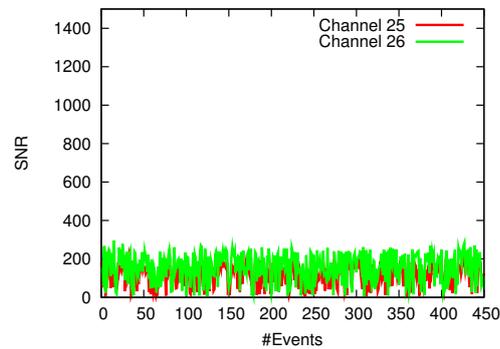
In Abbildung 5.4 bis 5.7 sind einige Ereignisse dargestellt, die die Grundlage für die Tabellen 5.1 und 5.2 bilden. Es ist deutlich zu erkennen, dass auch mit dem vertikalen Dipol ein kohärentes oder antikohärentes Signal aufgezeichnet wurde. Aus den Tabellen ist zu entnehmen, dass mit dem Tripol alle von LOPES gemessenen Ereignisse auch gemessen wurden, mit der SALLA jedoch in Ost/West Polarisation nur sehr wenige. Die wahrscheinlichste Erklärung hierfür ist ein technischer Defekt in diesem Kanal. Ein technischer Defekt der SALLA oder eine nicht ausreichend hohe Sensitivität der SALLA ist auszuschließen, da der Nord-Süd-Kanal der SALLA korrekt funktionierte. Es muss daher ein Defekt im Signalkabel von der SALLA vorgelegen haben. Die später angeschlossene LOPES Antenne hat wieder korrekt gemessen. Deshalb konnte bezüglich der Effizienz kein Unterschied zwischen SALLA und Tripol nachgewiesen werden.

### 5.3.2 Signal-zu-Rausch-Verhältnis des Beacon Signals

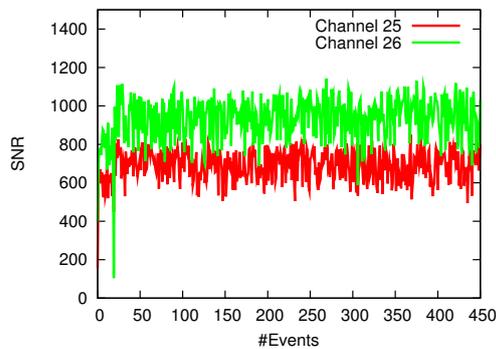
Zur Bestimmung des Signal-zu-Rausch-Verhältniss wurde folgendes Verfahren entwickelt. Zuerst wird das empfangene Signal (unkalibrierte ADC Werte, siehe Abbildung 5.9a) einer Fourier-Transformation unterzogen (Abbildung 5.9b). Danach wird im Spektrum das quadratisch mittlere Rauschen 0,6 MHz vor und nach der zu untersuchenden Beacon-Frequenz berechnet. Jetzt wird die maximale Amplitude der Beaconfrequenz innerhalb eines Fensters von 0,1 MHz gesucht und durch das quadratisch mittlere Rauschen dividiert. Es ist zu beachten, dass das Beacon SNR auf Empfindlichkeit zum Horizont basiert und somit nicht die Tauglichkeit für Luftschauermessungen widerspiegeln muss. In den Abbildungen 5.8 ist das Signal-zu-Rausch-Verhältnis der SALLA und des Tripols dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das SNR stark schwankt. Da der Beacon mit konstanter Leistung sendet, ist das Schwanken des SNR auf das unterschiedlich starke Hintergrundrauschen zurückzuführen. Die aufgezeichnete Spurlänge beträgt 0,8192  $\mu\text{s}$ . In dieser kurzen Zeit mittelt sich das sonst konstante Level des Hintergrundrauschens nicht. Daher können einzelne Werte des SNR stark schwanken. Es ist aber im Mittel zu erkennen, dass der Tripol den Beacon besser sieht. Als diese Testmessungen getätigt wurden, hatte der Beacon nur 2 Frequenzen, erst später wurde die dritte Frequenz hinzugefügt. Es wurden nur die beiden horizontalen Polarisationsrichtungen der Antennen untersucht da bei beiden Antennen die vertikale Polarisationsrichtung mit einem baugleichen Dipol gemessen wurde und der Beacon noch nicht für die vertikale Polarisationsrichtung ausgelegt war.



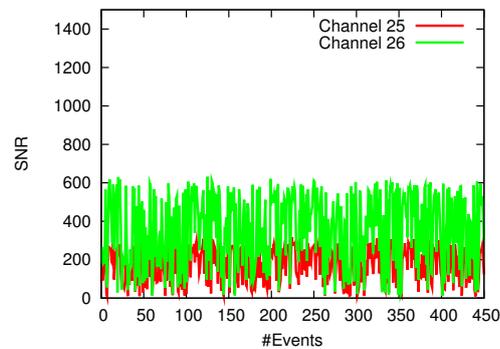
(a) SNR der SALLA bei der Beaconfrequenz 63,5 MHz. Es sind der Ost-West- (grün) und Nord-Süd- (rot) Kanal dargestellt.



(b) SNR der SALLA bei der Beaconfrequenz 68,1 MHz. Es sind der Ost-West- (grün) und Nord-Süd- (rot) Kanal dargestellt.



(c) SNR des Tripols bei der Beaconfrequenz 63,5 MHz. Es sind der Ost-West- (grün) und Nord-Süd- (rot) Kanal dargestellt.



(d) SNR des Tripols bei der Beaconfrequenz 68,1 MHz. Es sind der Ost-West- (grün) und Nord-Süd- (rot) Kanal dargestellt.

Abbildung 5.8: Signal-zu-Rausch-Verhältnis SNR, oben SALLA, unten Tripol, unterschiedliche Zeiträume.

## Entscheidung

Nach diesen Untersuchungen wurde sich dafür entschieden den Tripol als Antennentyp für die erste 3D Konfiguration von LOPES zu verwenden. Der Austausch der Antennentypen ist jedoch mit wenig Aufwand leicht durchzuführen, so dass später, falls gewünscht, ein Aufbau mit SALLAs leicht zu realisieren ist. Für den Tripol sprechen seine eine höhere Empfindlichkeit, außerdem konnte er das Beaconsignal besser empfangen. Das bessere Empfangen des Beaconsignals gibt keine Auskunft über eine Tauglichkeit zur Messung der Radioemission aus Luftschauern, jedoch muss der Beacon zur Überwachung des Timings gut empfangen werden, daher stellt das SNR des Beacon ein Kriterium zu Verwendung als neuen

## 5 Vorbereitung der Rekonfiguration von LOPES

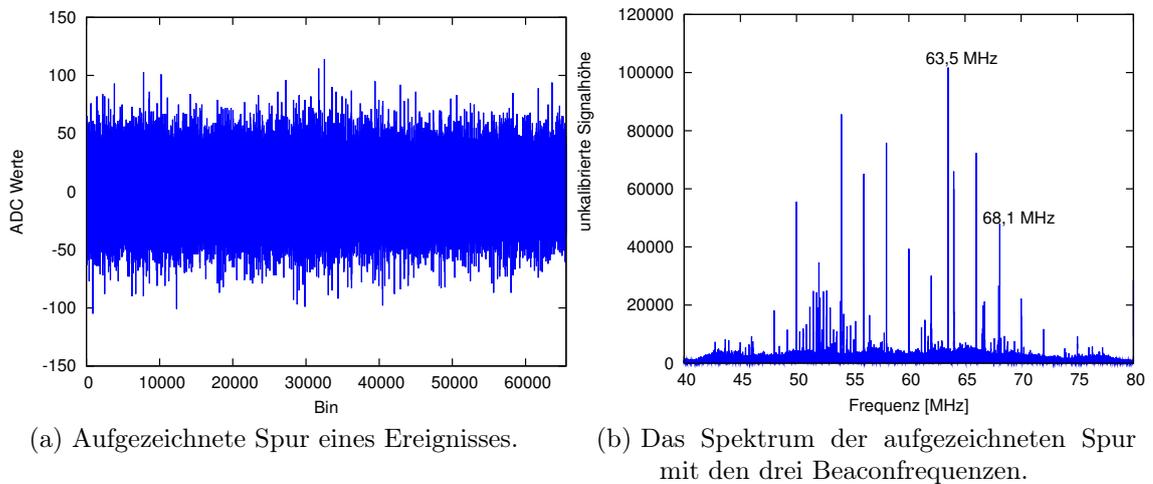


Abbildung 5.9: Spur und Spektrum wie bei der SNR Berechnung

Antennentyp bei LOPES dar. Das Hauptargument, das für den Tripol spricht, ist der homogenere Aufbau (für jeden Kanal wird der gleiche Antennentyp verwendet). Ein homogener Aufbau minimiert das Risiko eines systematischen Fehlers. Zu dem wird bei der Analysesoftware die Dispersion der Antenne nicht berücksichtigt. Das bedeutet dass bei einem inhomogenen Aufbau die Pulsformen der Radiopulse unterschiedlich beeinflusst werden und so eine gleichzeitige Analyse der Pulse in allen drei Polarisationsrichtungen quasi unmöglich ist. Die Dispersion der Antenne kann den Puls sowohl in Form als auch in der Zeit beeinflussen, weshalb es äußerst wichtig ist, so lange keine Dispersionskorrektur in der Analyse gemacht wird, die gleichen Antennentypen zu verwenden.

# 6 Rekonfiguration von LOPES

Für die Rekonfiguration von LOPES waren mehrere Schritte notwendig, um wieder ein vollständig kalibriertes Antennenfeld zur Messung der Radioemission aus Luftschauern zu erhalten. Ein Überblick über die einzelnen Schritte des Umbaus und der Kalibrierung ist in Tabelle 6.1 zu sehen. Die genaue Vorgehensweise ist in den einzelnen Unterkapiteln beschrieben. Alle in der Kalibration ermittelten Werte werden, um von der Analyse später verwendet werden zu können, in einer Datenbank abgelegt, der so genannten Kalibrationstabelle (Caltable).

Stichwort	Kurze Beschreibung	Kapitel
Umbau	Festlegung der Antennenpositionen, neu verlegen der Kabel, Anschließen der Tripole	6.1
Beacon	Anpassung des Beacon	6.2
Messung der Antennenpositionen	Vermessen der Antennenpositionen mit einem GPS System	6.3.1
Referenzphasen	Bestimmung der Referenzphasen der drei Beacon Frequenzen zur Überwachung und Korrektur der Zeitauflösung	6.3.1
Verzögerung der Elektronik und Kabel	Messen der unterschiedlich langen Signallaufzeiten in der Elektronik	6.3.1
Richtcharakteristik	Simulation der Richtcharakteristik der drei Dipole einer Tripolantenne	6.3.2
Amplitudenkalibrierung	Messen der Verstärkung in der kompletten Signalverarbeitungskette mit einer Referenzquelle	6.3.3

Tabelle 6.1: Übersicht aller Umbau- und Kalibrierungsmaßnahmen.

## 6.1 Umbau zu LOPES-3D

Der Umbau von LOPES zu LOPES-3D beschränkt sich auf den Austausch der Antennentypen, der LNAs und das dadurch notwendige Verlegen einiger Kabel in den vorhandenen Kableschächten des KASCADE-Grande Experiments. Die DAQ und die Elektronik konnten beibehalten und wieder verwendet werden. Trotzdem war

## 6 Rekonfiguration von LOPES



(a) Ausrichten der neuen 3D Antennen mit einem Fernglas mit integriertem Kompass



(b) Anbringen des Tripols

Abbildung 6.1: Bilder zum Umbau von LOPES

eine komplette Neukalibrierung und eine Anpassung des Beacon für die vertikale Polarisation notwendig. Durch den Umbau wurde LOPES von 25 Antennenpositionen wieder auf 10 reduziert. Da jede dieser 10 Antennenpositionen drei Kanäle von LOPES belegt (für jede Raumrichtung einen), war ein Aufbau mit mehr Anten-

nen nicht möglich. Die 10 Antennenpositionen wurden so gewählt, dass sie sich an Positionen befinden, an denen zuvor schon eine LOPES Antenne stand, da so der Aufwand beim Ziehen der Kabel und neu Verlegen gering blieb. Ein Wechsel der Antennenpositionen hätte zudem keinen ersichtlichen Vorteil gebracht. Der neue Aufbau von LOPES ist in Abbildung 6.2 zu sehen. Wichtig bei der Auswahl der Antennenpositionen war es eine möglichst große Fläche gleichmäßig abzudecken. Da LOPES eine interferometrische Analyse durchführt, darf bei den Antennenpositionen keine Regelmäßigkeit eingehalten werden. Dies würde dazu führen, dass zu ausgeprägte Nebenmaxima rekonstruiert würden [Woo01]. Zudem muss genügend Abstand zum Zentraldetektor eingehalten werden, da dieser Störsignale aussendet. Mit den Antennen sollte möglichst nahe am KASCADE-Grande Mittelpunkt gemessen werden, um auch die von KASCADE-Grande getriggerten Ereignisse gut sehen zu können. Der für die Rekonfiguration verwendete Tripol muss, im Gegensatz zu den alten LOPES Antennen die keine weitere Befestigung benötigen, an einem Mast befestigt werden. Die Masten bestehen aus Stabilitätgründen aus Metall. Trotz der Möglichen Reflektionen an diesem Metallmast beeinflusst er die Richtcharakteristik der Antennen nur in geringem Mase, siehe Kapitel 6.3.2. Die Verankerung der Masten im Erdboden erfolgte über ein mit Sand gefülltes, in den Boden getriebenes Rohr. Diese Art der Verankerung musste gewählt werden, um später ein möglichst leichtes Abbauen zu garantieren. Der Nachteil dieser Methode war, dass die Masten sich leicht drehen ließen und somit die Ausrichtung der Tripole verloren ging. Aus diesem Grund musste der Mast nachträglich fixiert und gegen Rotation geschützt werden. Ein Keil mit einer U-Schraube war die einfachste, schnellste, kostengünstigste und effektivste Methode.

## 6.2 Anpassung des Beacon

Im Rahmen der Rekonfiguration von LOPES musste auch der Beacon modifiziert werden, um in der vertikalen Polarisation ausreichend gut gesehen werden zu können. Um dies zu erreichen, wurde die Sendeantenne des Beacon um  $45^\circ$  gedreht. Die Sendeantenne wurde ausgetauscht und durch eine SALLA ersetzt, da sich der zuvor verwendete Dipol auf Grund seiner Befestigung nicht drehen ließ, siehe Abbildung 6.3. Zudem wurde eine Frequenz hinzugefügt, da das Verwenden einer zusätzlichen Frequenz die Korrektur von clock jumps über mehrere Perioden ermöglicht. Außerdem kann so bei Ausfall einer Frequenz auf Grund eines technischen Defektes weiter gemessen und ausgewertet werden. Die Signale, die der Beacon sendet, erhöhen nicht das Hintergrundrauschen, da sie schmalbandig sind und in der Standard Analyse digital unterdrückt werden. Zudem musste, da das Beaconsignal in einigen vertikal polarisierten Antennen trotz des Drehens der Sendeantenne nicht ausreichend gut gesehen wurde, die Sendeleistung des Beacon erhöht werden.

## 6 Rekonfiguration von LOPES

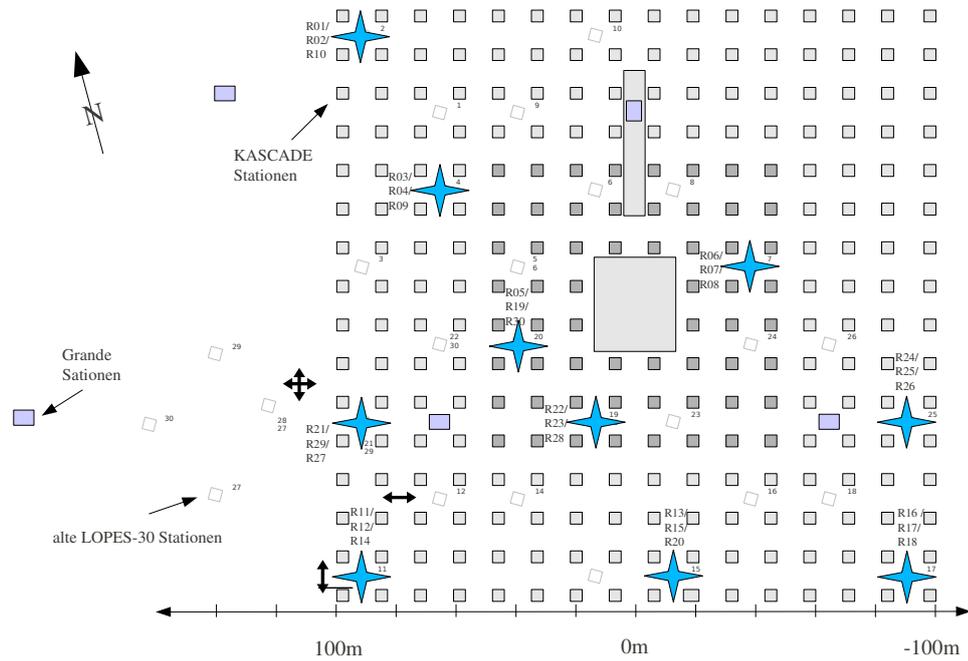


Abbildung 6.2: Neue Anordnung der 10 LOPES-3D Antennen. Die verlassenen Antennenpositionen früherer LOPES Konfigurationen sind als graue Quadrate eingezeichnet.



(a) Alte Sendeantenne des Beacon.



(b) Neue, gedrehte Sendeantenne des Beacon (SALLA).

Abbildung 6.3: Alte und neue Sendeantenne des Beacon.

## 6.3 Kalibrierung von LOPES-3D

Durch den Umbau von LOPES mussten alle Werte in der Kalibrationstabelle, wie die Antennenpositionen, die Referenzphasen und die elektronische Verzögerung neu berechnet, vermessen und die vertikale Polarisation in die Analysesoftware implementiert werden. Das genaue Vorgehen ist in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

### 6.3.1 Zeitkalibrierung

Wird LOPES als ein digitales Radiointerferometer verwendet, zum Beispiel indem der Kreuz-Korrelations-Beam berechnet wird, sind genaue Kenntnisse über die Antennenpositionen und die Ankunftszeit des Radiopulses aus Luftschauern in jeder Antenne erforderlich. Die für digitale Interferometrie erforderliche Zeitauflösung hängt von der Höchsthfrequenz des Radiointerferometers ab und beträgt im Falle von LOPES 1 ns [SAB<sup>+</sup>10]. Dies entspricht einer Unsicherheit in der Position von 30 cm, da Radiowellen mit Lichtgeschwindigkeit propagieren. Damit kann die Positionsgenauigkeit der Antennen als Genauigkeit in der Zeitauflösung betrachtet werden. Eine relative Genauigkeit von unter 30 cm wird durch eine differentielle GPS (Global Positioning System) Messung erzielt. Für die Zeitkalibrierung werden folgende drei Schritte angewandt: Die Messungen der relativen Verzögerung der Elektronik, die Korrektur der Dispersion der Bandpassfilter und ein permanentes Überwachen der relativen Zeitauflösung mit einem Beacon. Durch die Messung der Verzögerung der Elektronik mit Hilfe von Testpulsen, siehe Kapitel 6.3.1, erreicht man eine grobe Korrektur der Zeitauflösung, die dann mit Hilfe des Beacons, wie in Kapitel 6.3.1 beschrieben, verbessert wird.

### Messung der Antennen Positionen

Die Positionen der LOPES Antennen wurden mit einem differentiellen GPS bestimmt, in einem Koordinatensystem, das in Richtung des geographischen Norden orientiert ist, siehe Anhang A.1. Der geographische Norden weicht vom magnetischen Nordpol um ca. 1° ab. (siehe zum Beispiel, [http://www-app1.gfz-potsdam.de/cgi-bin/igrf\\_koord.pl](http://www-app1.gfz-potsdam.de/cgi-bin/igrf_koord.pl), 04. März 2010). Die magnetische Deklination hat sich über die Laufzeit von LOPES leicht verändert, dies wird jedoch in der Analyse und Kalibrierung nicht beachtet, da dieser Effekt sehr klein im Vergleich zu den übrigen systematischen Unsicherheiten ist. So wird beispielsweise die Ausrichtung der LOPES Antennen mit einem Fernglas mit integriertem Kompass überprüft. Die erzielte Genauigkeit liegt bei  $\pm 2, 1^\circ$  (Durchschnitt der Abweichung aller 30 LOPES Antennen, gemessen am 07. Mai 2009).

Die Antennenpositionen von LOPES-3D wurden mit einem Promark 3<sup>TM</sup> GPS System bestimmt. Es wird eine Genauigkeit von 1 cm für die x und y Position und ca.

## 6 Rekonfiguration von LOPES

Basis des GPS Systems	WGS 84
Geographische Breite	49°05'59.10793" N
Geographische Länge	8°26'10.71090" E
Nördliche Deklination NN	36.11 m
Östliche Deklination NN	-84.535 m
Nullhöhe	KASCADE Nullniveau
Orientierung der x-Koordinate	nach Norden
Orientierung der y-Koordinate	nach Osten
Orientierung der z-Koordinate	in den Zenit

Tabelle 6.2: LOPES Koordinatensystem [SAB<sup>+</sup>10].

Winkel zwischen dem KASCADE und LOPES Koordinatensystem	
GPS Messung	(15.25 ± 0.04)°
Berechnung für den Grundriss des KIT Campus Nord	15.23°
Auswertung von Google Earth™	(15.18 ± 0.08)°
Geschätzte Abweichung der Mittelpunkte der Koordinatensysteme	
Abweichung der x-Koordinate	≈ 0.2 m
Abweichung der y-Koordinate	≈ 0.2 m
Abweichung der z-Koordinate (height)	≲ 0.05 m

Tabelle 6.3: Messung der Unterschiede zwischen dem LOPES und KASCADE Koordinatensystem [SAB<sup>+</sup>10].

1,5 cm für die z Position (durschnittliche Abweichung zwischen zwei GPS Messungen der gleichen LOPES 30 Antennen an verschiedenen Tagen) erzielt, siehe Tabelle 6.2. Zusätzlich ist noch ein systematischer Fehler von ca. 5 cm zu addieren, da die GPS Antenne nicht exakt im Phasenzentrum aller Dipol Antennen eines Tripols montiert werden kann. Die erreichte Genauigkeit ist jedoch deutlich unter den benötigten < 30 cm. Die Mittelpunkte des LOPES-Koordinatensystems und des KASCADE-Koordinatensystems stimmme überein. Jedoch zeigt das LOPES-Koordinatensystem zum geographischen Norden, wohingegen das KASCADE Koordinatensystem am Grundriss des KIT Campus Nord ausgerichtet ist. Die Rekonstruktion des Schauermitelpunktes von KASCADE-Grande wird verwendet , um die Abstände für die Rekonstruktion der Lateralverteilung des Radiosignals von LOPES zu bestimmen. Daher sollten die Abweichungen, die von der Transformation ins LOPES Koordinatensystem herrühren, kleiner sein als die Genauigkeit, mit der der Schauermitelpunkt bestimmt werden kann (typischerweise 4 – 7 m im für LOPES interessanten Energiebereich). Der Winkel zwischen dem LOPES-Koordinatensystem und dem Koordinatensystem von KASCADE wurde mit verschiedenen Methoden mit ausreichender Genauigkeit vermessen. Es wurden zuerst Koordinaten der Mittelpunkte angeglichen und dann die Antennenpositionen be-

stimmt. Das wurde sowohl mit GPS (das bei einer nicht differenziellen Messung nur eine Genauigkeit von wenigen Metern hat) als auch durch Berechnung der Antennenpositionen im KASCADE-Koordinatensystem durchgeführt (siehe Tabelle 6.3). Mit einer Ungenauigkeit der Mittelpunkte der KASCADE- und LOPES-Koordinatensysteme von ca. 0,3 m und einer relativen Ungenauigkeit der Antennenpositionen von ca. 6 cm, was einer Zeitungenauigkeit von 0,1 ns und 0,2 ns entspricht, ist die Anforderung einer Zeitgenauigkeit von ca. 1 ns für digitale Interferometrie erfüllt.

### Referenzphasen

Wie schon in Kapitel 4.2.2 erwähnt, sendet der Beacon ein sinusförmiges Signal auf drei Frequenzen aus. Die Phasendifferenzen dieses Sinussignals in zwei Antennen sind konstant. Diese Eigenschaft wird zum Überwachen und bei Bedarf zur Korrektur von Fehlern im Timing verwendet. So kann zum Beispiel ein nicht gegebener Samplingtakt (clock jump) erkannt und korrigiert werden. Bei einer Samplefrequenz von 80 MHz entspricht ein solcher clock jump einer Zeit von 12,5 ns. Diese Zeitdifferenz kann in eine frequenzabhängige Phasendifferenz umgerechnet werden.

$$\begin{aligned}\Delta t &= n \cdot 12,5 \text{ ns} & \Delta \text{Phase} &= f \cdot \Delta t \cdot 360^\circ \\ \Delta \text{Phase}(63,5 \text{ MHz}) &= n \cdot 285,75^\circ \\ \Delta \text{Phase}(68,1 \text{ MHz}) &= n \cdot 306,45^\circ \\ \Delta \text{Phase}(53,1 \text{ MHz}) &= n \cdot 238,95^\circ\end{aligned}\tag{6.1}$$

Um diese Korrektur verlässlich anzuwenden, bedarf es einer genauen Kenntnis der erwarteten Phasendifferenzen und ihrer ständigen Überwachung. Zur Messung der Referenzphasen, werden die Ereignisdaten vor und nach der Messung der elektronischen Verzögerung verwendet. Zunächst werden mit dem getPhases Programm der Cosmic Ray tools<sup>1</sup> die Phasen der Beaconsignale bei den Frequenzen 53,1 MHz, 63,5 MHz und 68,1 MHz bestimmt. Danach werden mit einem ROOT<sup>2</sup>-Skript die Phasendifferenzen zu der Referenzantenne (Antenne 1) bestimmt und Histogramme erstellt. Die so erhaltenen Referenzphasen werden in die Kalibrationstabelle geschrieben, siehe AnhangA.2.

### Referenzphasen Korrekturverfahren

Der Beacon dient zur Verbesserung der Zeitaufösung. Hierfür wird zunächst eine grobe Korrektur der gemessenen elektronischen Verzögerung vorgenommen, diese wird dann mit Hilfe der relativen Phasenlage, der Beaconsignale präzisiert. Die relativen Phasen zweier Antennen zueinander sind konstant. Liegt nun ein gemessenes Ereignis vor, bei dem die Phase zwischen zwei Antennen nicht der in der

<sup>1</sup>Die Cosmic Ray tools sind die bei LOPES verwendete Standard Analysesoftware.

<sup>2</sup>ROOT eine an CERN entwickelte freie Analysesoftware.

## 6 Rekonfiguration von LOPES

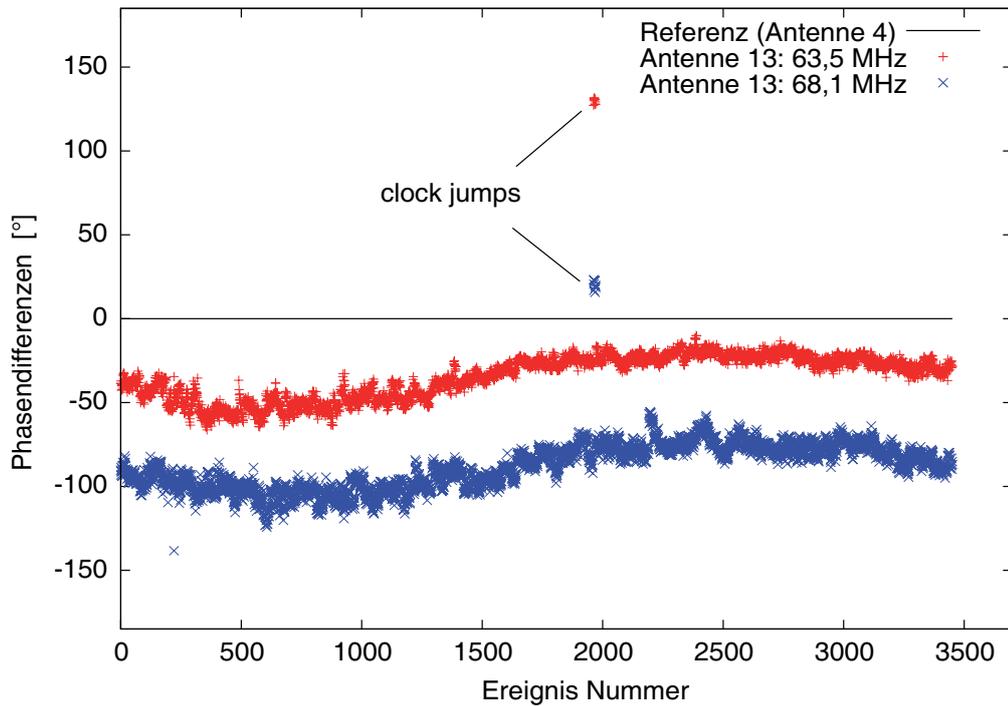


Abbildung 6.4: Referenzphasen der Antenne 13 gemittelt über ein Jahr. Zu sehen ist der Phasendrift und ein nicht gegebener Sampling Takt, ein so genannter Clock Jump (mit LOPES-30 bestimmt).

Kalibrationstabelle stehenden Referenzphase entspricht, kann man davon ausgehen, dass entweder

1. dieses Ereignis auf Grund von technischen Problemen in der Datenaufnahme fehlerhaft aufgezeichnet wurde.
2. das Timing des Experiments nicht mehr richtig ist.
3. zu Hohes Rauschen den Beacon und damit die Referenz überstrahlt hat.

Ist das Ereignis fehlerhaft aufgezeichnet, kann im Falle eines nicht gegebenen Samplingtaktes dieser gemäß Formel 6.1 in eine Phase umgerechnet werden und die aufgezeichnete Spur verschoben werden bis die Phase zwischen den beiden Antennen wieder der Referenzphase in der Kalibrationstabelle entspricht. Auf diese Weise lassen sich die so genannten clock jumps erkennen und korrigieren.

Wenn das Timing des Experimentes nicht mehr stimmt, zum Beispiel auf Grund von Erwärmung einzelner Komponenten, oder sich die Signallaufzeit in den Kabeln verändert, ist dies als so genannter Phasendrift (siehe Abbildung 6.4) zu sehen. Hierbei verändert sich die relative Phase zwischen zwei Antennen nur ein wenig und kann leicht durch entsprechendes Verschieben der Spuren wieder korrigiert

werden.

Ist das Ereignis so sehr verrauscht, dass der Beacon überstrahlt wurde, ist auch kein Radiopuls mehr erkennbar und das Ereignis kann in diesem Kanal nicht mehr ausgewertet werden.

### Verzögerung der Elektronik und Kabel

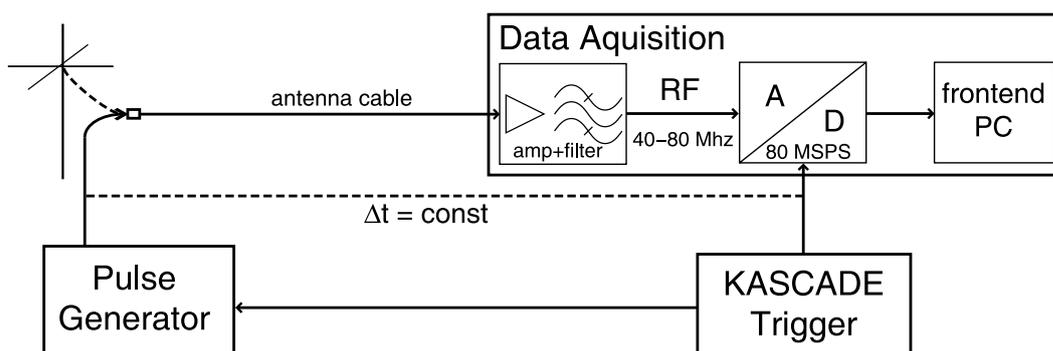


Abbildung 6.5: Versuchsanordnung zur Messung der elektronischen Verzögerung: das Koaxialkabel der LOPES Antenne wird mit einem Pulsgenerator verbunden, der gleichzeitig mit der DAQ ausgelöst wird.

Die Signallaufzeit in der Messelektronik und den Kabeln kann zwischen den verschiedenen Kanälen unterschiedlich lang sein. Diese Laufzeitunterschiede der einzelnen Kanäle müssen, um ein kohärentes Signal sehen zu können, in der Analyse herausgerechnet werden. Zur Messung der Laufzeitunterschiede wird ein Pulsgenerator anstatt der Antenne an das Koaxialkabel angeschlossen. Dieser Pulsgenerator wird dann zusammen mit der DAQ von KASCADE getriggert und sendet einen Puls aus. Die Laufzeit des Triggersignals zum Pulsgenerator ist konstant. Da für die Analyse nur das relative Timing der Antennen zueinander von Interesse ist, fällt der konstante Zeitwert  $\Delta t$ , den das Triggersignal zum Erreichen des Pulsgenerators benötigt, bei der Berechnung der relativen Verzögerungen heraus und muss deshalb nicht bekannt sein. Der Messaufbau ist in Abbildung 6.5 dargestellt.

### 6.3.2 Richtcharakteristik

Die Richtcharakteristik der LOPES-3D Tripol Antennen wurde mit NEC2 simuliert. NEC2 ist eine Weiterentwicklung des um 1970 entstandenen Antenna Modelling Programs (AMP), mit dessen Hilfe die elektromagnetischen Eigenschaften von Antennen und anderen Metallstrukturen simuliert werden können. Die Abkürzung NEC bedeutet **N**umerischer **E**lektromagnetischer **C**ode. NEC2 stellt die neueste frei zugängliche Version des Codes dar. Sie basiert auf der numerischen

## 6 Rekonfiguration von LOPES

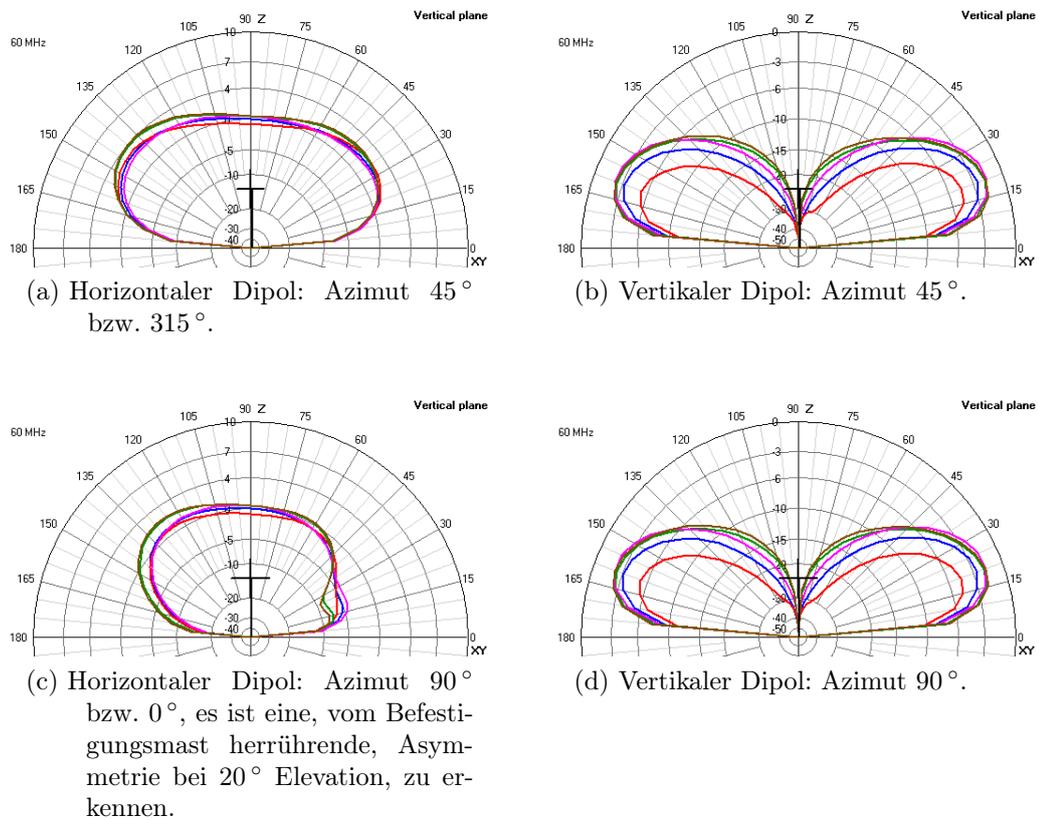


Abbildung 6.6: Absolute Richtcharakteristik in dBi (Antennengewinn bezogen auf einen isotrop-/Kugelstrahler), simuliert für verschiedene Böden bei einer Frequenz von 60 MHz. Blau: mittel-fruchtbarer Boden, rot: fruchtbarer Boden, grün: Ackerboden, pink: Stadt, braun: durchschnittlicher Boden. Die horizontalen Richtcharakteristiken sind für die Ost-West- und Nord-Süd- Polarisation gleich, jedoch um  $90^\circ$  gedreht. In der Mitte ist die Antennenstruktur schematisch dargestellt. Bei den horizontalen Dipolen der Antenne ist eine, durch den metallenen Befestigungsmast hervorgerufene, Asymmetrie zu erkennen, die aber bekannt ist und bei der Analyse berücksichtigt wird.

Lösung der Maxwell Gleichungen. Eine Antenne wird durch einen Draht beschrieben, NEC2 zerlegt diesen in einzelne Segmente. Die Einspeisung erfolgt als Quelle in einem dieser Segmente. Der Boden wird mit Hilfe der Sommerfeld-Integrale modelliert [Voo05]. Es wurden mehrere Bodenverhältnisse simuliert. In Abbildung 6.6 sind die erhaltenen Richtcharakteristiken dargestellt. Für einen idealen Dipol ohne Boden ist ein Strahlungsdiagramm zu erwarten dessen Form einer acht gleicht. Durch die Abschirmung des Bodens wird die untere Hälfte der acht abgeschnitten und durch Reflektionen am Boden wird eine elliptische Form hervorgerufen, wie in

## 6.3 Kalibrierung von LOPES-3D

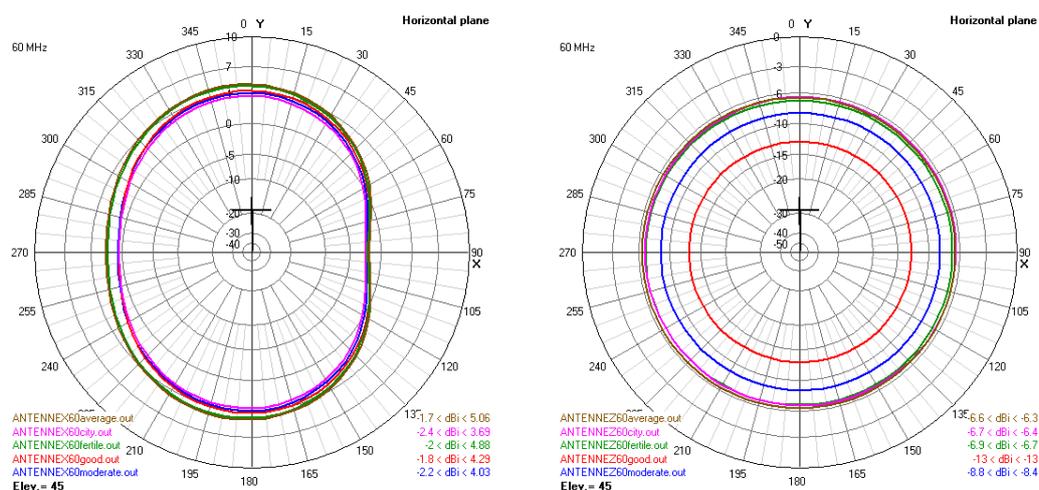


Abbildung 6.7: Absolute Richtcharakteristik simuliert für verschiedene Böden, Draufsicht, gleiche Simulationsbedingungen wie bei Abbildung 6.6.

Abbildungen 6.6a und 6.6c zu sehen. Dieser Effekt beeinflusst auch die Richtcharakteristik des Vertikalen Dipols, Abbildungen 6.6b und 6.6d, allerdings liegt hier als Ausgangspunkt für einen idealen Dipol eine liegende acht vor. Die verschiedenen Böden, zu erkennen als unterschiedliche Farben, wurden in Anbetracht der am LOPES Experiment herrschenden Bodenbeschaffenheiten simuliert, wobei eine Mischung aus Stadt und Ackerland den Boden am besten beschreibt. Da dieser mit den anderen Böden übereinstimmt, fiel die Wahl auf den Durchschnittsboden. Für den Vergleich der Böden wurde die mittlere Frequenz des Beobachtungsfensters von LOPES, 60 MHz, gewählt.

### 6.3.3 Amplitudenkalibrierung

Um die komplette elektronische Signalverarbeitungskette, so wie sie zusammengebaut am Experiment vorliegt, zu kalibrieren, wird eine externe Referenzquelle verwendet. Die Sendeleistung der Referenzquelle ist bekannt. Mit der Kenntnis des theoretisch erwarteten Werts der Empfangsleistung und des tatsächlich gemessenen, kann die Abschwächung des Signals in der Elektronik bestimmt und korrigiert werden [NHA<sup>+</sup>07]. Diese Methode hat mehrere Vorteile: zum einen kann bei mehrfachem Wiederholen die Abhängigkeit von Umwelteinflüssen untersucht werden, zum anderen kann man alle analogen Bauteile wie LNA, Kabel, Filter und Verstärker im Zusammenspiel untersuchen.

## 6 Rekonfiguration von LOPES



Abbildung 6.8: Amplitudenkalibrierung einer LOPES-3D Antenne mit einer Referenzquelle.

### Allgemeines Vorgehen

Zur Bestimmung der korrekten gemessenen Feldstärke wird das komplette elektronische Messsystem amplitudenkalibriert. Dazu wird eine Referenzquelle mit bekannter Sendeleistung in genügend großem Abstand über der zu kalibrierenden Antenne angebracht. Der Abstand muss ausreichend groß sein, um die Fernfeldnäherung anwenden zu können und beträgt im Fall von LOPES 10 m. Die erwartete Amplitude kann, bei Geltung der Fernfeldnäherung, mit der Formel von Friis berechnet werden.

$$\frac{P_r}{P_t} = G_r G_t \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (6.2)$$

In einer Dipol-Antenne mit einem Winkel  $\beta$  zur Polarisation des empfangenen Signals ist der Verlust der Empfangsleistung proportional zu  $\cos^2\beta$ . Damit lässt sich Formel 6.2 umschreiben zu:

$$\frac{P_M(\nu)}{P_t(\nu)} = G_r(\nu) G_t(\nu) \left( \frac{c}{4\pi r \nu} \right)^2 \cos^2\beta \quad (6.3)$$

Hiermit lässt sich der frequenzabhängige Verstärkungsfaktor  $V(\nu)$  bestimmen.

$$V(\nu) = \frac{P_M(\nu)}{P_R(\nu)} = \frac{P_M(\nu)}{G_r(\nu) G_t(\nu) P_t(\nu) \cos^2\beta} \left( \frac{4\pi r \nu}{c} \right)^2 \quad (6.4)$$

mit:

$P_M$  Die von LOPES gemessene Leistung.

$P_R$  Die errechnete, Leistung an der zu kalibrierenden LOPES-Antenne.

$\nu$  Die Frequenz des emittierten/gemessenen Signals.

$G_r$  Die simulierte Richtcharakteristik der LOPES Antenne.

$G_t(\nu)P_t(\nu)$  Produkt aus der Richtcharakteristik der Referenzantenne und deren Leistung. Bekannt aus dem Datenblatt der Referenzantenne als elektrische Feldstärke in  $r = 10$  m Abstand.

$\beta$  Winkel zwischen der LOPES Antenne und der Polarisation der Referenzantenne.

## Referenzquelle



Abbildung 6.9: Referenzquelle zur Amplitudenkalibrierung, mit Sendeantenne, Frequenzgenerator und GPS System mit Antenne.

## 6 Rekonfiguration von LOPES

Die Referenzquelle, zu sehen in Abbildung 6.9 ist eine kommerzielle Radioquelle der Firma Schaffner, bestehend aus einer Radioquelle VSQ1000 mit einem Frequenzgenerator und einer bikonischen Sendeantenne [NHA<sup>+</sup>07]. Diese Quelle ist batteriebetrieben und eignet sich durch ihre kleine leichte Bauweise sehr gut für Messungen auf dem Feld. Das Spektrum des Frequenzgenerators ist kein kontinuierliches Spektrum sondern besteht aus einem Frequenzkamm mit 1 MHz Abstand, das heißt, einzelnen Leistungsspitzen, die konstant über den kompletten Frequenzbereich von LOPES verteilt sind. Trotz ihrer Mobilität und der autonomen Energieversorgung hat die Radioquelle ausreichend Sendeleistung, so dass die Leistungsspitzen in ca. 130 m Entfernung noch das Rauschen übersteigen. Die Antenne der Referenzquelle ist linear polarisiert, weshalb sehr genau auf die exakte Ausrichtung der Antenne zur LOPES Antenne geachtet werden muss. Die Feldstärke der Radioquelle wurde in einem Abstand von 10 m mit  $210 \mu\text{Vm}^{-1}\text{MHz}^{-1}$  bei 40 MHz bis  $2100 \mu\text{Vm}^{-1}\text{MHz}^{-1}$  bei 80 MHz berechnet.

### Messung

Zur Kalibrierung der LOPES-Antennen mit der Referenzantenne wird diese an einer Halterung zusammen mit einem ProMark3<sup>TM</sup> GPS System angebracht. Ein weiteres ProMark3<sup>TM</sup> GPS System wird für die differenzielle Messung der Abstände zwischen Kalibrations- und LOPES-Antenne an einer LOPES Antenne befestigt. Die Halterung mit Referenzantenne und GPS-System wird mit einem Kran ca. 10,5 m über der zu kalibrierenden Antenne positioniert. Der Kranausleger besitzt als Verlängerung einen Holzbalken, da ein Metallausleger die Radiostrahlung reflektieren und die Kalibration verfälschen würde. Es wird 2 Minuten gemessen. Danach wird die Referenzantenne um 90° gedreht und wiederum 2 Minuten der zweite horizontale Kanal gemessen. Der vertikale Kanal kann mit diesem Verfahren nicht kalibriert werden, da Reflektionen am Boden das Ergebnis zu sehr verfälschen würden. Daher wird zur Kalibrierung des vertikalen Kanals einer der beiden horizontalen Dipole mit diesem Kanal verbunden und damit die Messung durchgeführt. Da die Dipole baugleich sind, ist die Ungenauigkeit, die durch das Verwenden eines horizontalen Dipols mit in die Kalibrierung eingeht, viel geringer als die durch Reflektionen am Boden hervorgerufene Ungenauigkeit. Tatsächliche Unterschiede der Verstärkung durch die Positionierung und Orientierung relativ zum Boden bleiben so allerdings unberücksichtigt.

### Polarisationsmessung

An den Kanälen 25 und 26 wurde eine zusätzliche Messung durchgeführt, um die Sensitivität der einzelnen Kanäle auf linear polarisierte Signale zu untersuchen, die nicht exakt in Richtung einer der Antennen polarisiert sind. Hierbei wurde die Referenzantenne um jeweils 22,5° gedreht. Das wurde insgesamt sieben mal wiederholt bis jede Polarisation der beiden horizontalen Kanäle der Antenne einmal

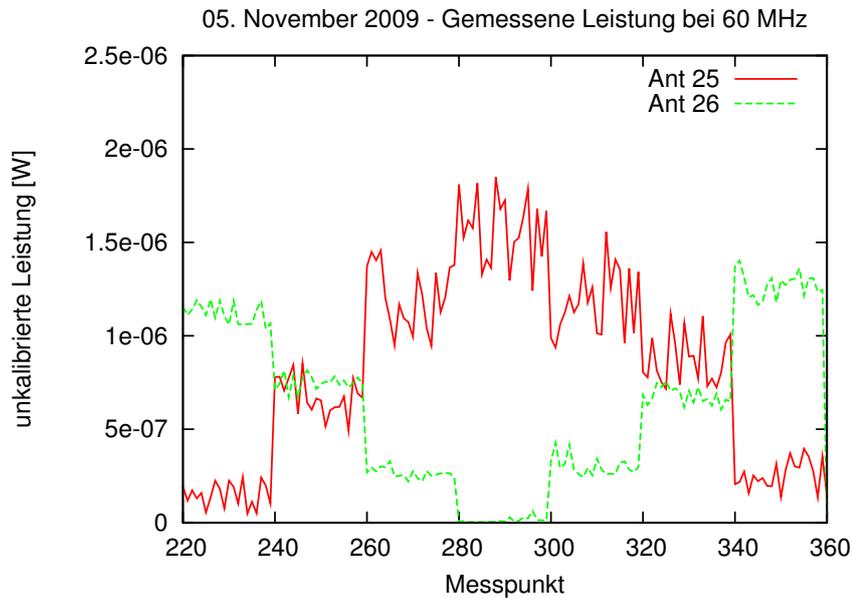


Abbildung 6.10: Polarisationsmessung mit zwei Kanälen am Ende der Amplitudenkalibrierung

erreicht wurde. Das Ergebnis dieser Messung ist in Abbildung 6.10 zu sehen. Durch diese Messung konnte bestätigt werden, dass die Kanäle auf die unterschiedlichen Polarisationsrichtungen die erwartete Sensitivität besitzen. Des Weiteren konnte mit dieser Messung das Übersprechen zwischen zwei Kanälen überprüft und für ausreichend gering befunden werden. In Abbildung 6.10 ist beispielhaft für die mittlere Frequenz des Beobachtungsfensters von LOPES, 60 MHz, das Verhalten dargestellt. Es wurde kein Mittelwert gebildet, um das Verhalten für jeden Messpunkt sehen zu können. An den unterschiedlich hohen Leistungswerten ist gut zu erkennen, dass trotz der leistungsstarken Referenzquelle das hohe Rauschen am KIT Campus Nord einen Einfluss auf die Messung hat.

### Verstärkungsfaktor

In Abbildung 6.11 sind die Verstärkungsfaktoren abgebildet, die für die Amplitudenkalibrierung berechnet worden sind. Mit den Verstärkungsfaktoren lässt sich die Feldstärke errechnen, die zu den entsprechenden ADC Werten eines Kanals gehört. An den beiden Rändern, ist ein starkes Abfallen der Verstärkungsfaktoren, die so genannten Filterflanken, zu sehen. Dieser Effekt kommt durch die verwendeten analogen Bandbreiten-Filter zustande und beschränkt die analysierbare effektive Bandbreite von LOPES auf ca. 43-74 MHz. Durch die Kalibration wurde erkannt, dass 3 der Kanäle von LOPES nur eingeschränkt funktionstüchtig sind. Diese Kanäle sind aus der Analyse genommen und werden weiter untersucht. Zu erkennen ist ein leichtes Einfallen der Verstärkungsfaktoren bei einer Frequenz von

## 6 Rekonfiguration von LOPES

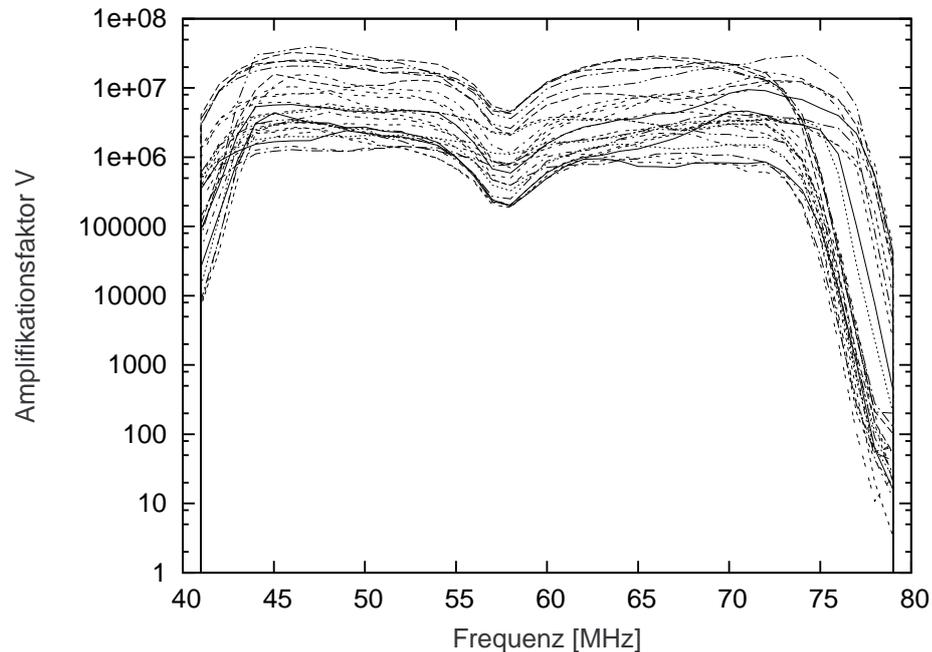


Abbildung 6.11: Die Verstärkungsfaktoren von 27 Kanälen der LOPES-3D Konfiguration

ca. 56 MHz. Das kommt durch ein Überbewerten der Resonanz aus der Simulation zustande. Ein Dipol mit einer Gesamtlänge von 1,3 m hat eine Resonanz bei 57,69 MHz. Diese wurde in der Simulation stärker bewertet als sie sich bei der Messung herausgestellt hat.

### Simulation der Richtcharakteristik für die Amplitudenkalibration

Da die Kalibrationsauswertung mit mehreren Glish- und ROOT-Skripten durchgeführt wird und nicht in die Standard-Analyse-Software implementiert ist, kann sie auch nicht auf das Antennenmodell der Kalibrationstabelle zurückgreifen. Aus diesem Grund musste die Richtcharakteristik erneut in einer feineren Frequenzauflösung simuliert und in einer binären ROOT Datei hinterlegt werden. Zur Simulation der Richtcharakteristik wurde wieder NEC2 verwendet. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde die komplette Kalibrationsauswertung auf die neue Konfiguration von LOPES umgestellt und für mehrere Kalibrationsperioden vorbereitet. Es ist wichtig, die Möglichkeit zu haben, die Kalibration mehrfach durchzuführen, um so die Einflüsse der Umgebung (verschiedene Wetterverhältnisse, unterschiedlicher Bodenbewuchs und verschiedener Feuchtigkeitsgehalt des Bodens) auf die Verstärkungsfaktoren studieren zu können.

### Fehlerbetrachtung

Im Folgenden werden die systematischen Fehler der Amplitudenkalibration betrachtet und abgeschätzt. Die Amplitudenkalibration konnte im Rahmen dieser Arbeit nur einmal durchgeführt werden, weshalb keine statistische Fehler Auswertung betrachtet werden kann.

### Umwelteinflüsse

Das LOPES-Experiment befindet sich im KASCADE-Feld und ist somit jeder Wettersituation ausgesetzt. Daher sind Umwelteinflüsse wie Regen, Pflanzenwachstum und Schneefall, die die Reflektionseigenschaften des Bodens verändern können mögliche Fehlerquellen. Da mit dem LOPES-3D-Setup keine weiteren Messungen möglich waren wird ein Fehler von 20% angenommen. Die LOPES-3D Dipole besitzen, anders als die LOPES-30 Dipole keine Abschirmung zum Boden, und hängen deshalb stärker von den Bodeneigenschaften ab. Mit der LOPES-30-Konfiguration konnten mehrere Messungen der Verstärkungsfaktoren durchgeführt werden und es wurden dabei eine mittlere Abweichung der Verstärkungsfaktoren, im für LOPES interessanten Frequenzband von 43 bis 74 MHz, zu 13% bestimmt.

### Temperatur

Jede Elektronik arbeitet verschieden gut bei unterschiedlicher Temperatur. Der Großteil des LOPES-Experiments ist temperaturstabil untergebracht. So sind die Kabel unterirdisch verlegt und die DAQ befindet sich in klimatisierten Hütten. Die Antennen, die LNAs und die Enden der Kabel zur DAQ sind jedoch starken Temperaturschwankungen ausgesetzt. Der sensitivste Teil dieser drei Komponenten ist der LNA. Um die LNAs möglichst gut von Temperaturschwankungen und anderen Einflüssen abzuschirmen, wurden diese in Metallboxen an den Befestigungsmasten der Antennen untergebracht. Die Metallbox hat den Vorteil, dass sie die Sonnenstrahlen reflektiert und sich im Gegensatz zu den LOPES-30 LNA-Gehäusen weniger stark aufheizt. (Bei LOPES-30 waren die LNAs in schwarzen und grünen Plastikboxen oberhalb der Antenne angebracht). Für den Temperaturbereich von ca.  $-20^{\circ}$  bis  $+45^{\circ}$  in den LNA Boxen wird ein Fehler von 15% angenommen.

### Messung

Bei der Messung der Verstärkungsfaktoren selbst gibt es mehrere Fehlerquellen:

- Der Abstand der Referenzquelle zur LOPES-3D Antenne:  
Die Position der Referenzquelle wird mit zwei (siehe Kapitel 6.3.1) ProMark™ 3 GPS bestimmt und in der Auswertung korrigiert. Der Fehler hierbei wird mit  $\sigma_r = 30$  cm angenommen, da es sich um eine dynamische differenzielle Messung handelt, die nicht die hohe Genauigkeit der Stop-and-Go-Messung, wie sie bei der Messung der Antennenpositionen angewandt wurde,

## 6 Rekonfiguration von LOPES

erreicht.

- Die Abweichung der Frequenz einer Leistungsspitze der Referenzquelle wurde zu  $\sigma_\nu = 600$  Hz bestimmt und ist somit verschwindend gering, so dass sie bei der Gesamtfehlerabschätzung nicht berücksichtigt wird.
- Die Unsicherheit der Sendeleistung der Referenzquelle lässt sich mit dem Datenblatt nur aus dem Produkt von Richtcharakteristik und Ausgangsleistung bestimmen. Die Abweichung der Sendeleistung mit der Temperatur bewegt sich in der Größenordnung von  $\frac{\sigma_{G_t P_t}}{G_t P_t} = 12\%$ . Dazu kommt noch die Kalibrationsunsicherheit der Radioquelle selbst die mit 2,5dB für das elektrische Feld angegeben ist, was einer Unsicherheit von  $\approx 67\%$  in der abgestrahlten Leistung entspricht.
- Die simulierte Richtcharakteristik der LOPES-3D Antennen ist ein großer Unsicherheitsfaktor in der Kalibrierung, da die Erfahrung fehlt wie sich die Temperatur, die Bodenverhältnissen und Witterung auf die Richtcharakteristik auswirken. Die Unsicherheit wird mit  $\frac{\sigma_{G_r}}{G_r} \approx 15\%^3$  angenommen.
- Die Unsicherheit der gemessenen Leistung ist von der Elektronik der Datenaufnahme abhängig und wurde zu  $\frac{\sigma_{P_M}}{P_m} \approx 5\%^3$  bestimmt.
- Die Abweichung der Ausrichtung der Referenzantenne zur jeweiligen LOPES-3D Antenne wurde mit  $7^\circ$  abgeschätzt, was einer Minderung der abgestrahlten Leistung von  $2\%^3$  entspricht.

Die Daten werden mit diesen berechneten Verstärkungsfaktoren analysiert. Weitere Amplitudenkalibrationen sind jedoch obligatorisch und werden die Unsicherheit in den Verstärkungsfaktoren reduzieren. Es ergibt sich also als Gesamtfehlerabschätzung für diese Messung:

$$\begin{aligned} \Sigma_{Gesamt} &= \sqrt{(3\%)^2 + (15\%)^2 + (5\%)^2 + (2\%)^2} \% + 67\% \\ \Sigma_{Gesamt} &= 16\% + 67\% \end{aligned} \quad (6.5)$$

Um zu überprüfen, ob die gemessenen Verstärkungsfaktoren korrekt sind, wurden mehrere Überprüfungen der Konsistenz durchgeführt. Zunächst wurde eine Referenz gesucht die beide Konfigurationen von LOPES gemessen haben. Da der Beacon modifiziert wurde scheidet diese Referenz aus. Als Referenz wurde das Hintergrundrauschen gewählt um so einen Eindruck zu bekommen ob die Größenordnung stimmt. Ein weiteres Merkmal das bei den neuen Verstärkungsfaktoren zu sehen ist, sind die etwas abweichenden Filterflanken der Kanäle 1-10. Diese

<sup>3</sup>Alle Fehlerangaben beziehen sich auf die Leistung und nicht auf die Feldstärke. Die relativen Fehler auf die Feldstärke sind etwa  $\frac{1}{2}$  so groß

kommen zustande da diese Kanäle noch aus der LOPES Konfiguration mit 10 Antennen stammen und bei der Erweiterung von LOPES zu LOPES-30 in den zusätzlichen 20 Kanälen ein anderer Filtertyp verwendet wurde.

## 6.4 Monitoring

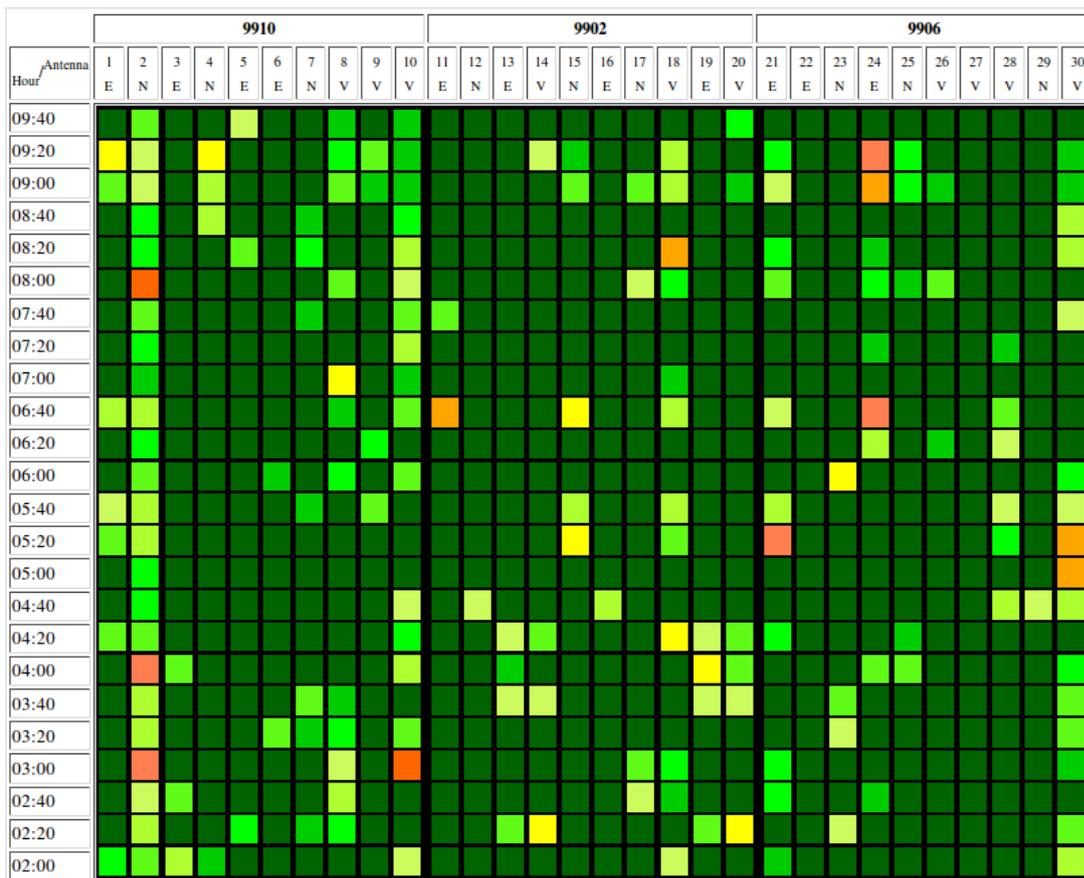


Abbildung 6.12: Farbige Darstellung der Höhe des Beaconsignals im Monitoring: oben zu sehen die KASCADE-Cluster-Nummer, die Kanal-Nummer und die Polarisation; links die Zeit, in der die Berechnung durchgeführt wurde.

Im Verlauf der Rekonfiguration von LOPES fiel auf, dass das Monitoring des Experimentes einiger Erweiterungen bedurfte. So wurde lediglich das durchschnittliche Rauschen der einzelnen Kanäle sowie das atmosphärische E-Feld [Neh08] überwacht. Als Folge wurde ein Bild angezeigt, dass dem einer perfekten Messung glich, obwohl keine Antenne angeschlossen war. Um Missverständnisse zu vermeiden und überwachen zu können, ob die angeschlossenen Antennen zuverlässig

## 6 Rekonfiguration von LOPES

sig messen, wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit das Monitoring erweitert. Alle 20 Minuten werden an einem Ereignis folgende Analysen durchgeführt.

1. Ein unkalibriertes Spektrum wird erstellt; Abbildung 6.13a
2. Die Stärke des Beaconsignals bei 63,5 MHz wird bestimmt; Abbildung 6.12
3. Die integrierte Rauschleistung wird angezeigt; Abbildung 6.13b
4. Die Referenzphasen aller Kanäle werden berechnet und grafisch dargestellt; Abbildung 6.13c

Um den Rechenaufwand möglichst gering zu halten und ein schnelles Monitoring zu gewährleisten, werden die ADC counts unkalibriert verarbeitet. Zunächst wird ein Spektrum mit dem fast-Fourier-transform-Algorithmus (fft) erstellt und grafisch dargestellt. Danach wird in diesem Spektrum die Höhe des Peaks bei 63,5 MHz bestimmt. Dieser Höhe wird dann ein farbiger Pixel zugeordnet, wobei die Farbskala von rot nach grün reicht. Je grüner ein Pixel, desto höher ist der Peak des Beacons im angeschlossenen Kanal. Diese Darstellung lässt auch Personen, die nicht direkt am Experiment arbeiten, intuitiv erkennen, ob das Experiment korrekt misst. Um Umwelteinflüsse auf den Radiountergrund zu überwachen, wird das aufintegrierte Rauschen über den Zeitraum der letzten 450 Stunden angezeigt. Zur Kontrolle werden jeweils die Referenzphasen von drei Kanälen in einem Schaubild angezeigt. Diese Referenzphasen werden mit dem getPhases-Programm der Cosmic Ray tools<sup>4</sup> berechnet. Das Monitoring soll dem mit dem Experiment unvertrauten Benutzer ermöglichen schnell zu erkennen, ob ein Fehler vorliegt und dem vertrauteren Benutzer gleichzeitig wichtige Informationen über den Zustand des Experiments und die Qualität der Messung liefern. Es ist geplant die beiden weiteren Beaconfrequenzen 53,1 und 68,1 MHz auch in das Monitoring mit einzubeziehen, um so einen noch besseren Eindruck von der Güte der Messung des Experimentes zu bekommen.

### 6.5 Test der neuen DAQ Software

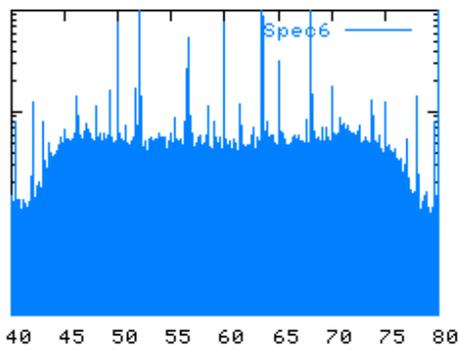
Im Rahmen der Rekonfiguration von LOPES wurde nicht nur das Monitoring entscheidend verbessert und erweitert, die Zeit des Umbaus wurde auch genutzt um eine neue DAQ-Software zu testen. Die neue, von A. Weindl geschriebene, Software ist in C++ geschrieben und soll die veraltete auf Glish<sup>5</sup> basierende Software ablösen, um auf dem Stand der Technik zu sein und gegebenenfalls Änderungen leichter einarbeiten zu können [Wei10]. Der Test der Software verlief zunächst wie erwartet, die von LOPES genommenen Daten wurden, wie der erste Eindruck vermittelte, korrekt aufgezeichnet. Das Dateiformat war korrekt und sie konnten auch

---

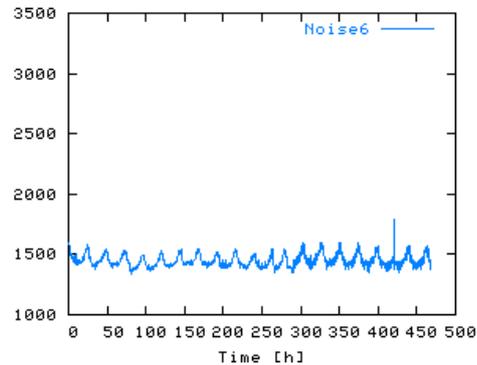
<sup>4</sup>Die Cosmic Ray tools sind die bei LOPES verwendete Standard Analysesoftware

<sup>5</sup>Skriptsprache

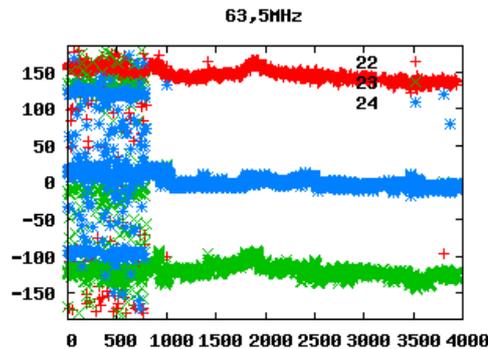
## 6.5 Test der neuen DAQ Software



(a) Unkalibriertes Spektrum aus dem LOPES Monitoring.



(b) Aufintegriertes Rauschen mit erkennbarem Tag Nacht Zyklus aus dem LOPES Monitoring.



(c) Referenzphasen von drei Antennen aus dem LOPES Monitoring. Gut zu sehen ist der Unterschied zwischen der fehlerhaften DAQ (bis ca. Ereignis 750) und der korrekt arbeitenden DAQ.

Abbildung 6.13: Monitoring

ausgelesen und analysiert werden. Allerdings wurde bei der neuen DAQ-Software höchstwahrscheinlich ein TIM Model falsch initialisiert, siehe Abbildung 6.13c, was zur Folge hatte, dass die Daten mit einem zufälligen Zeitversatz aus dem Ringpuffer gelesen wurden und nicht der von LOPES für die Analyse benötigte Teil. Dies zeigte mit aller Deutlichkeit, wie wichtig ein ausreichend gutes Monitoring des Experimentes ist. Ohne das Errechnen und graphische Darstellen der Referenzphasen wäre dieser Fehler womöglich länger unerkannt geblieben, was zu Folge hätte, dass mehr Ereignisse falsch aufgezeichnet nicht untersucht werden könnten. Die graphische Darstellung der Referenzphasen ist als Einziges sensitiv auf derartige Fehler, da die Spektren, das Rauschen und die Höhe des Beaconsignals in jedem Teil der

## 6 Rekonfiguration von LOPES

Spur gleich sind, so lange die aufgezeichnete Spurlänge korrekt ist. Die Phasenlage der Referenzphase ist nur dann konstant, wenn jeweils das gleiche Zeitintervall aller Kanäle ausgelesen wurde. Nachdem dieser Fehler erkannt wurde, wurde bis auf weiteres und für die ersten Tests der Datennahme wieder auf die alte DAQ Software umgestellt.

# 7 Analyse erster LOPES-3D Daten

## 7.1 Radioemission

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Radioemission aus Luftschauerereignissen in allen drei Dimensionen untersucht. Alle bisherigen Messungen lassen auf einen dominant geomagnetischen Emissionsmechanismus schließen, daher wurden die ersten mit LOPES-3D gemessenen und rekonstruierten Ereignisse mit dem einfachsten Modell zur Beschreibung der Radioemission auf Basis der Lorentzkraft, dem  $\vec{v} \times \vec{B}$ -Modell, auf Konsistenz überprüft.

### 7.1.1 $\vec{v} \times \vec{B}$ -Modell

Das  $\vec{v} \times \vec{B}$ -Modell ist ein einfacher Ansatz zur Beschreibung der Radioemission aus Luftschauerereignissen. Hierbei wird angenommen, dass alle geladenen Teilchen entlang der Schauerachse propagieren und die Radioemission von den im Erdmagnetfeld abgelenkten Elektronen und Positronen ausgesendet wird. Das Modell hat in der Vergangenheit grobe Voraussagen ermöglicht und stimmt mit den gemessenen Ergebnissen weitestgehend überein. Die Emission in den einzelnen Komponenten ergibt sich aus dem Kreuzprodukt des Vektors, der in Richtung der Schauerachse zeigt, und des Vektors, der in Richtung des Magnetfelds der Erde zeigt. Für Karlsruhe ergeben sich die Komponenten zu:  $\vec{E} = \vec{R}_{Schauerachse} \times \vec{B}_{Karlsruhe}$ . Mit einem Azimut von  $180^\circ$  und einem Zenit von  $25^\circ$  für das Erdmagnetfeld in Karlsruhe folgt für eine beliebige Schauerachse, mit Azimut =  $Az_S$  und Zenit =  $Ze_S$  für die Komponenten des E-Feldvektors  $E_{EW}$ ,  $E_{NS}$  und  $E_{VE}$ :

$$\begin{aligned}
 E_{EW} \cdot |\vec{E}| &= ((\sin(Ze_S) \cdot \cos(Az_S) \cdot \cos(25^\circ)) \\
 &\quad - (\cos(Ze_S) \cdot \sin(25^\circ) \cdot \cos(180^\circ))) \\
 E_{NS} \cdot |\vec{E}| &= ((\sin(Ze_S) \cdot \sin(Az_S) \cdot \cos(25^\circ)) \\
 &\quad - (\cos(Ze_S) \cdot \sin(25^\circ) \cdot \sin(180^\circ))) \\
 E_{VE} \cdot |\vec{E}| &= ((\sin(Ze_S) \cdot \cos(Az_S) \cdot \sin(25^\circ) \cdot \sin(180^\circ)) \\
 &\quad - (\sin(Ze_S) \cdot \sin(25^\circ) \cdot \cos(180^\circ)))
 \end{aligned} \tag{7.1}$$

Eine grafische Darstellung der einzelnen Komponenten ist in Abbildung 7.1 zu sehen. Dargestellt ist der Emissionsbeitrag normiert auf die Gesamtlänge des E-Feldvektors. Wie aus den Abbildungen 7.1c und 7.1d ersichtlich, wird laut diesem Modell nur dann eine Emission in der vertikalen Komponente erwartet, wenn auch in der Nord-Süd Komponente eine Emission stattfindet. Mit  $\sin(180^\circ) = 0$  und  $\cos(180^\circ) = 1$  ergibt sich aus Gleichung 7.1:

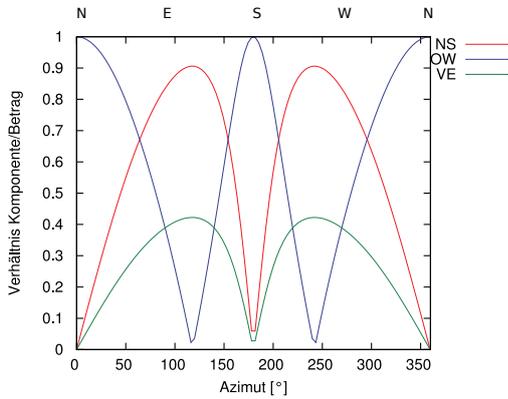
$$\frac{E_{NS}}{E_{VE}} = \frac{(\sin(Ze_S) \cdot \sin(Az_S) \cdot \cos(25^\circ))}{-(\sin(Ze_S) \cdot \sin(25^\circ))} = \frac{-\sin(Az_S)}{\tan(25^\circ)} \quad (7.2)$$

Dieser Spezialfall ist nur für den  $\vec{v} \times \vec{B}$ -Ansatz gültig. Wie in Kapitel 3 erwähnt, gibt es auch andere Emissionsmechanismen, die einen zusätzlichen Beitrag in der vertikalen Polarisationsrichtung erwarten lassen. Der Anteil in der vertikalen Polarisationsrichtung wird mit steigendem Zenitwinkel größer, daher sinkt die Detektionswahrscheinlichkeit flacher Luftschauer, wenn diese Komponente nicht gemessen wird.

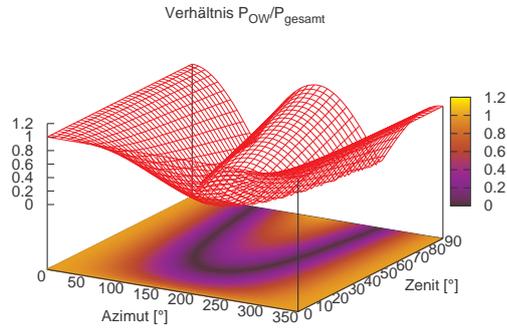
## 7.2 Daten

Der für die Analyse zur Verfügung stehende Datensatz beinhaltet die Daten von 7 Wochen. Für eine signifikante Aussage, also zum Testen und eventuell Falsifizieren einzelner Emissionsmodelle reicht die Statistik nicht aus. Allerdings kann mit diesem Datensatz gezeigt werden, dass LOPES-3D funktionstüchtig ist und Luftschauer in allen drei Polarisationsrichtungen misst. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Messung des gesamten E-Feldvektors die Analyse der Radioemission einfacher macht, da sie die Analyse von systematischen Unsicherheiten durch den unbekanntem, fehlenden Teil des Vektors befreit. Gründe für die geringe Statistik waren neben dem verspäteten Start von LOPES-3D (auf Grund von Lieferverzögerungen bei den Antennenkabeln und LNAs) unter anderem: Wartungsarbeiten an den KASCADE-Grande Detektoren, Kalibrationsmessungen am LOPES Experiment, sowie das Testen einer neuen DAQ Software. Außerdem mussten die ersten genommenen Daten, bei denen sich die Befestigungsmasten der Antennen noch bewegen ließen, verworfen werden.

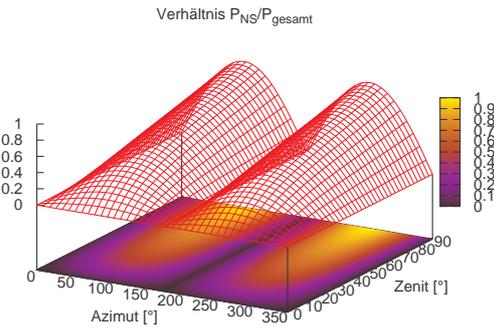
Die Selektion der hier ausgewerteten Ereignisse konnte nicht automatisiert durchgeführt werden, sondern musste manuell vollzogen werden, da die Gefahr sonst zu groß gewesen wäre bei dem noch unbekanntem Messverhalten des Detektors gute Ereignisse zu verwerfen. Außerdem fehlt die Erfahrung zum Erstellen von sinnvollen Qualitätsmerkmalen für 3D-Ereignisse. Lediglich eine grobe Vorauswahl der möglichen Ereignisse konnte automatisiert durchgeführt werden. So wurden nur Ereignisse mit Energien  $> 10^{16,5}$  eV untersucht, die von KASCADE oder KASCADE-Grande rekonstruiert wurden und deren Schauerzentrum innerhalb des KASCADE Feldes, oder nahe am Mittelpunkt des KASCADE-Grande Feldes liegt. Diese Kri-



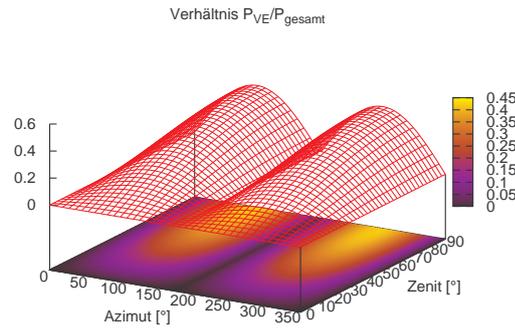
(a) Einzelne Beiträge der Polarisationen bei einem Zenitwinkel von  $45^\circ$ , normiert auf den E-Feldvektor mit der bei LOPES verwendeten Konvention der Himmelsrichtungen (Azimut  $0^\circ$  entspricht Norden, Azimut  $90^\circ$  entspricht Osten).



(b) Beitrag der Ost-West Komponente zum gesamten E-Feld. Bei Schauern aus Norden oder Süden ist der Vektor komplett in Ost-West Richtung polarisiert.



(c) Beitrag der Nord-Süd Komponente zum gesamten E-Feld.



(d) Beitrag der vertikalen Komponente zum gesamten E-Feld.

Abbildung 7.1: Vektorbeträge der einzelnen Polarisationen des  $\vec{v} \times \vec{B}$ -Modells.

terien stellen sicher, dass auch nur Ereignisse genauer untersucht werden, bei denen Radioemission erwartet wird und gemessen werden kann. Das Hauptkriterium bei der manuellen Auswahl lag auf einem möglichst hohen CC-Beam über dem Rauschen, so wurden auch Ereignisse mit schwacher Emission untersucht, wenn sie zu einer rauscharmen Zeit aufgezeichnet wurden.

## 7.3 Erwartete Ereignisraten

Für die Abschätzung der Ereignisraten wurden zwei Herangehensweisen angewandt. Trotz gleicher Anzahl der Antennenpositionen ist ein direkter Vergleich mit LOPES-10 nicht möglich, da hier andere Kriterien angewandt wurden, um ein Ereignis als detektiert zu werten [Hor06].

### Abschätzung nach Detektionseffizienz des CC-Beams

Die Detektionsschwelle eines interferometrisch arbeitenden Antennenfeldes ist proportional zum Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis bei der Berechnung des CC-Beams ist proportional zur Anzahl der Antennen, die in die Berechnung mit eingehen [HF03]. Da für LOPES-3D im Vergleich zu LOPES-30 nur  $\frac{1}{3}$  der Antennen pro Polarisationsrichtung zur Verfügung stehen, sinkt das Signal-zu-Rausch-Verhältnis, bei separater interferometrischer Analyse der drei Polarisierungen um  $\frac{1}{3}$ . Der CC-Beam muss für jede Polarisationsrichtung einzeln berechnet werden, da abhängig von der Geometrie nicht bei jedem Luftschauer eine Emission in allen drei Polarisationsrichtungen stattfindet. Die Antennen in der Polarisationsrichtung, in der keine Emission stattfindet, würden die Berechnung des CC-Beams verhindern und das Ereignis könnte nicht detektiert werden. Die abgeschätzte Detektionsschwelle von LOPES-3D ist ca. drei mal so hoch wie die von LOPES-30. Demnach muss ein Signal drei mal höher sein, um von LOPES-3D detektiert werden zu können. Die Amplitude ist direkt proportional zur Energie des Primärteilchens. Dadurch lässt sich der erwartete Fluss bestimmen. Mit dem Index  $-2$  des integrierten Spektrums der kosmischen Strahlung ergibt sich ein Fluss, der oberhalb der drei mal höheren Schwelle, neun mal geringer ist. Mit der bekannten für LOPES-30 bestimmten Ereignisrate von  $\approx 1 \frac{\text{Ereignis}}{\text{Tag}}$  [Neh08] lässt sich die von LOPES-3D nach 7 Wochen Datennahme erwartete Ereignisanzahl in der Ost-West Polarisationsrichtung zu 5 bis 6 bestimmen. Da LOPES alle drei Polarisationsrichtungen misst können auch Ereignisse detektiert werden, die die maximale Emission nicht in Ost-West-Polarisationsrichtung haben. Somit stellt die abgeschätzte Ereignisrate sicherlich eine untere Grenze dar.

### Abschätzung der Detektionseffizienz nach Lateralverteilung

Anders als beim CC-Beam beruht die Abschätzung nach der Lateralverteilung auf der Annahme, dass einzelne Antennen über der Nachweisschwelle sind. Hierbei ist die Detektionseffizienz proportional zur Wurzel der Anzahl der Antennen. LOPES-3D hat im Vergleich zu LOPES-30 nur  $\frac{1}{3}$  der Antennen pro Polarisationsrichtung, daher ist die Nachweisschwelle um  $\sqrt{3}$  höher als bei LOPES-30. Das bedeutet, dass nur Ereignisse mit einer  $\sqrt{3}$ -fach höheren Energie detektiert werden, was unter der Annahme, dass die Amplitude proportional zur Energie des Primärteilchens ist, bedeutet, dass der Fluss nur  $\frac{1}{3}$  so hoch ist. Damit werden auch nur  $\frac{1}{3}$  der für LOPES-30 bestimmten Ereignisrate von  $\frac{110}{56} \frac{\text{Ereignis}}{\text{Woche}}$  erwartet, was 4 bis 5 Ereignis-

sen entspricht.

Dies sind grobe Abschätzungen, bei denen zum Beispiel die Anordnung der Antennen nicht in Betracht gezogen wurde. Daher sind die erwarteten Ereigniszahlen grobe Richtwerte und stellen nur eine erste Orientierung dar. Bei einer kombinierten Analyse ist eine potentiell höhere Ereignisrate zu erwarten.

Ereignisse Azimut, Zenit, Energie	Ost-West	Nord-Süd	vertikal
162, 4 °; 17, 5 °; $8, 2 \cdot 10^{16}$ eV	+	-	-
42, 8 °; 39, 1 °; $1, 2 \cdot 10^{17}$ eV	+	-	+
282, 7 °; 39, 1 °; $5, 5 \cdot 10^{16}$ eV	+	+	+
128, 1 °; 39, 4 °; $4, 3 \cdot 10^{17}$ eV	-	+	-
1, 3 °; 24, 8 °; $3, 7 \cdot 10^{17}$ eV	+	-	-

Tabelle 7.1: Detektierte erste Ereignisse von LOPES-3D.

## 7.4 Erste Ereignisse

Nach der Rekonfiguration und der Kalibrierung von LOPES zu LOPES-3D konnten erste Ereignisse gesehen werden. Jedoch sind mehrere Wiederholungen der Kalibration notwendig, um die Umwelteinflüsse auf das neu konfigurierte Experiment zu kennen. Außerdem wird mehr Statistik benötigt, um sicher zu gehen das Experiment in seiner Funktionsweise verstanden zu haben. In Tabelle 7.1 sind die ersten analysierten Ereignisse zusammengefasst. In Abbildung 7.2 sind unabhängige Ereignisse, die jeweils in der Ost-West-, Nord-Süd- und vertikalen Polarisationsrichtung detektiert worden sind, dargestellt. In der Ost-West-Polarisationsrichtung (siehe Abbildungen 7.2a und 7.2b) ist die Radioemission eines Luftschauers zu sehen, der das Detektorfeld mit einem Azimut von  $2, 6^\circ$  und einem Zenit von  $40, 2^\circ$  erreicht hat. Das Primärteilchen hatte eine Energie von  $3, 0 \cdot 10^{17}$  eV. Es ist eine deutliche Detektion in der Amplitude zu erkennen. An and der Nord-Süd- und der vertikalen Polarisationsrichtung (Abbildungen 7.2c bis 7.2f) ist gut zu erkennen, warum der CC-Beam zur Analyse verwendet wird: hier ist der Radiopuls kohärent, reicht in den einzelnen Antennen jedoch nicht über das Rauschen hinaus. Der berechnete CC-Beam ist allerdings gut über dem Rauschen zu erkennen, siehe Abbildung 7.2d und 7.2f. Der Luftschauer, dessen Radioemission in Abbildungen 7.2c und 7.2d gezeigt ist, erreichte das Detektorfeld mit einem Azimut von  $282, 7^\circ$  und einem Zenit von  $39, 1^\circ$ . Die Energie des Primärteilchens betrug  $5, 5 \cdot 10^{16}$  eV. Die Radioemission aus Abbildungen 7.2e und 7.2f stammt von einem Luftschauer, der das Detektorfeld mit einem Azimut von  $42, 8^\circ$  und einem Zenit von  $39, 1^\circ$  erreicht hat, mit einer Primärteilchenenergie von  $1, 2 \cdot 10^{17}$  eV.

## 7 Analyse erster LOPES-3D Daten

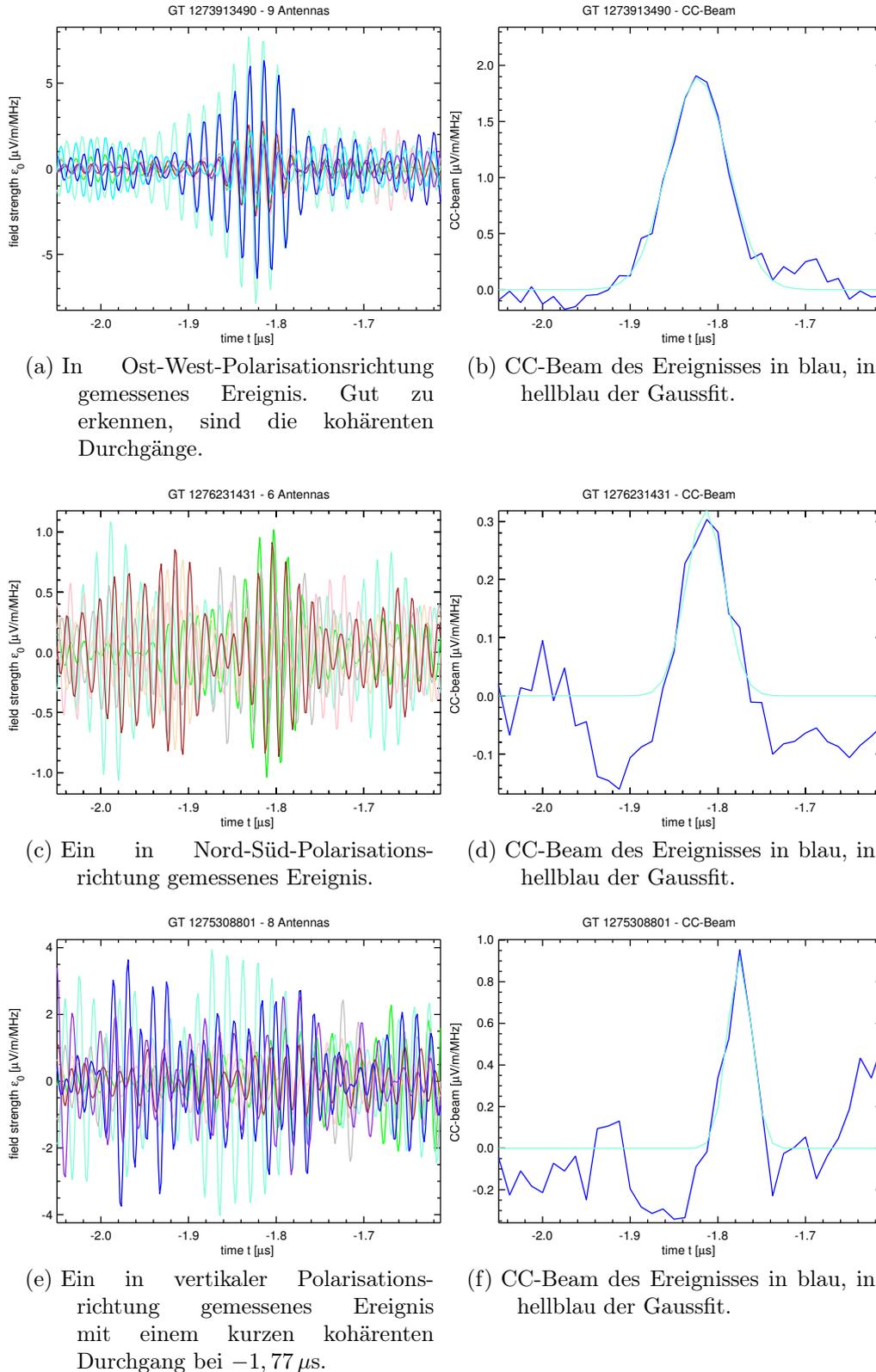


Abbildung 7.2: Verschiedene Beispielergebnisse, die wegen des starken Rauschens teilweise erst mit Hilfe des CC-Beams zu erkennen sind. Für den Vergleich der einzelnen Abbildungen ist die unterschiedliche Skalierung der y-Achse zu beachten.

## 7.5 CC-Beam Analyse

Der CC-Beam wird berechnet, um auch Signale zu sehen, die sich nur wenig vom Hintergrundrauschen abheben, vergleiche Abbildung 7.2e und 7.2f. Er stellt eine Art interferometrische Analyse dar. Bei der Berechnung des CC-Beams werden kohärente Signale verstärkt und das Rauschen unterdrückt. Es kann somit das Signal-zu-Rausch-Verhältnis sehr effizient erhöht werden. Allerdings sind bei der CC-Beam-Analyse nur Aussagen über das Antennenfeld als Ganzes, oder kleinere Subsets von Antennen möglich, jedoch nicht über einzelne Antennen. Die Pulshöhe des CC-Beams kann als gemittelte Feldstärke der detektierten Radiopulse angesehen werden. Sie wird durch anfitzen einer Gauss Funktion bestimmt. Mit den für jede Polarisationsrichtung berechneten Werten kann in einer ersten Näherung dann der E-Feldvektor für das komplette Antennenfeld berechnet werden. Beim Berechnen des CC-Beams wird eine gekrümmte Wellenfront angenommen, da die Radioemission typischerweise in Höhen von weniger als 10000 m stattfindet. Es wird in erster Näherung eine Punktquelle für die Radioemission angenommen. Eine ebene Welle kann nur bei Radioquellen in unendlicher Entfernung angenommen werden. Bei der Radioemission aus Luftschauern ist der Krümmungsradius ein Faktor, der die Rekonstruktion entscheidend beeinflusst.

Ein wichtiges Kriterium für die Analyse der Radioemission in mehr als einer Polarisationsrichtung ist die Gleichzeitigkeit der berechneten CC-Beams. Erst nach der Selektion wurden die Ereignisse mit dem  $\vec{v} \times \vec{B}$ -Modell auf Konsistenz überprüft.

In Abbildung 7.3 ist ein Ereignis zu sehen, das mit einem Azimut vom  $162,4^\circ$  und einem Zenit von  $39,1^\circ$  das Detektorfeld erreicht hat. Das Primärteilchen hatte eine Energie von  $8,2 \cdot 10^{16}$  eV. Laut dem  $\vec{v} \times \vec{B}$ -Modell ist bei dieser Schauergeometrie ein Maximum der Emission in Ost-West-Polarisationsrichtung zu erwarten. Wie in Abbildung 7.3a im Vergleich zu Abbildungen 7.3b und 7.3c zu sehen, wurde tatsächlich in der Ost-West-Polarisationsrichtung auch der größte Teil der Emission gemessen. In der Nord-Süd-Polarisationsrichtung (siehe Abbildung 7.3b) ist zwar ein konvergierter CC-Beam bei der erwarteten Zeit von  $-1,8 \mu\text{s}$  zu sehen, dieser ist jedoch zu wenig ausgeprägt und nicht weit genug über dem Rauschen, um das Ereignis auch als in Nord-Süd-Polarisationsrichtung detektiert zu werten. In der vertikalen Polarisationsrichtung, vergleiche Abbildung 7.3c, wurde der CC-Beam auf das Detektorrauschen der KASCADE-Detektoren optimiert. Dieses Ereignis kann somit nicht als in vertikaler Polarisationsrichtung detektiert gewertet werden.

In Abbildung 7.4 ist ein Ereignis zu sehen, das sich nur sehr schwach vom Hintergrundrauschen abhebt. Dennoch konnte es detektiert werden. Der Luftschauer erreichte das Antennenfeld mit einem Azimut von  $42,8^\circ$  und einem Zenit von  $39,1^\circ$ . Die Energie des Primärteilchens betrug  $1,2 \cdot 10^{17}$  eV. Auch für diese Schauergeometrie ist, laut dem  $\vec{v} \times \vec{B}$ -Modell, ein Großteil der Emission in Ost-West-Polarisationsrichtung zu erwarten. Aus Abbildungen 7.4a und 7.4c ist zu erkennen,

## 7 Analyse erster LOPES-3D Daten

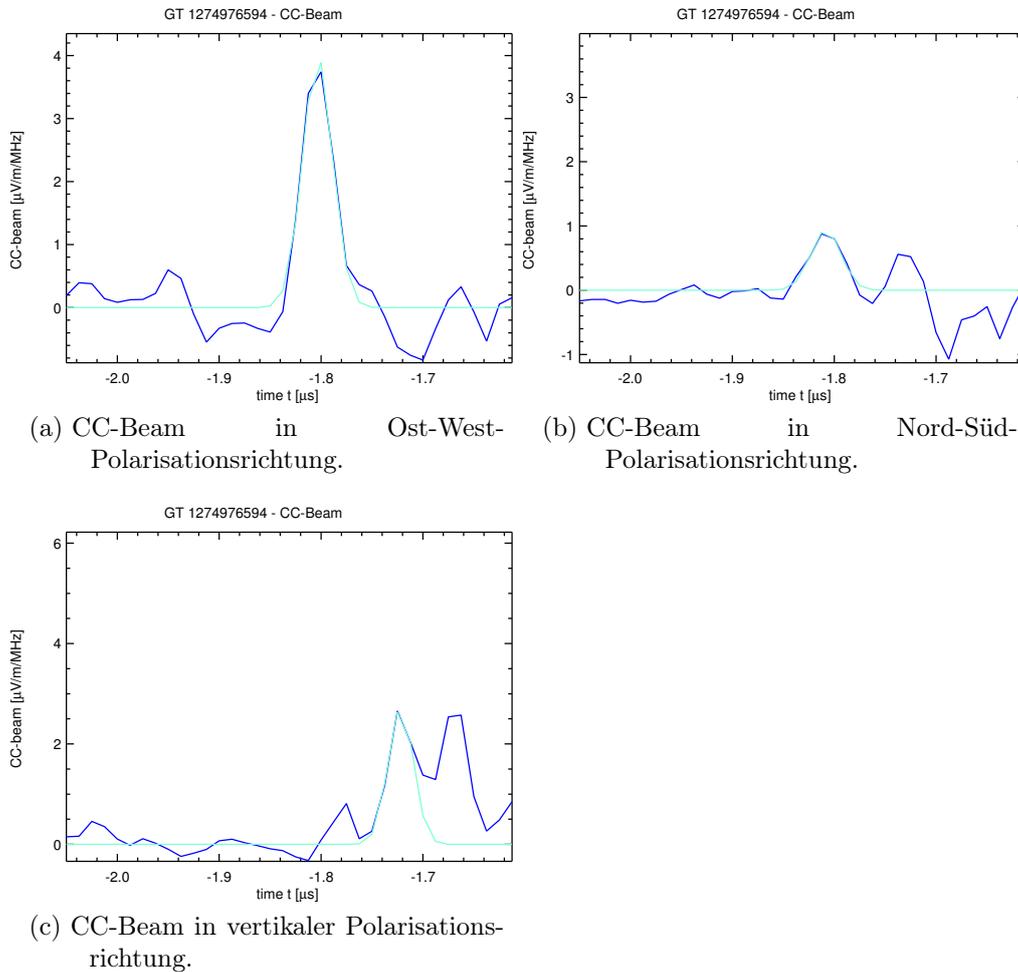


Abbildung 7.3: Ereignis mit Azimut  $162,4^\circ$  und Zenit  $17,5^\circ$ . Für den Vergleich der einzelnen Abbildungen ist die unterschiedliche Skalierung der y-Achse zu beachten.

dass in der Ost-West- und der vertikalen Polarisationsrichtung das Ereignis klar detektiert wurde. Hier wird der Vorteil einer dreidimensionalen Messung deutlich. Dieses Ereignis hätte alleine in der Nord-Süd-Polarisationsrichtung nicht detektiert werden können. Durch die Detektion in der Ost-West-Polarisationsrichtung kann in den beiden anderen Polarisationsrichtungen in einem kleineren Zeitfenster der CC-Beam berechnet und somit der Informationsgehalt der Messung deutlich erhöht werden. In der vertikalen Polarisationsrichtung ist laut dem  $\vec{v} \times \vec{B}$ -Modell am wenigstens Signal zu erwarten. In der Nord-Süd-Polarisationsrichtung ist das Hintergrundrauschen zu hoch, siehe Abbildung 7.4b, der CC-Beam konnte nicht berechnet, also das Ereignis in dieser Polarisationsrichtung nicht detektiert werden.

In Abbildung 7.5 ist ein Ereignis zu sehen, das sowohl in der Ost-West- als auch

## 7.5 CC-Beam Analyse

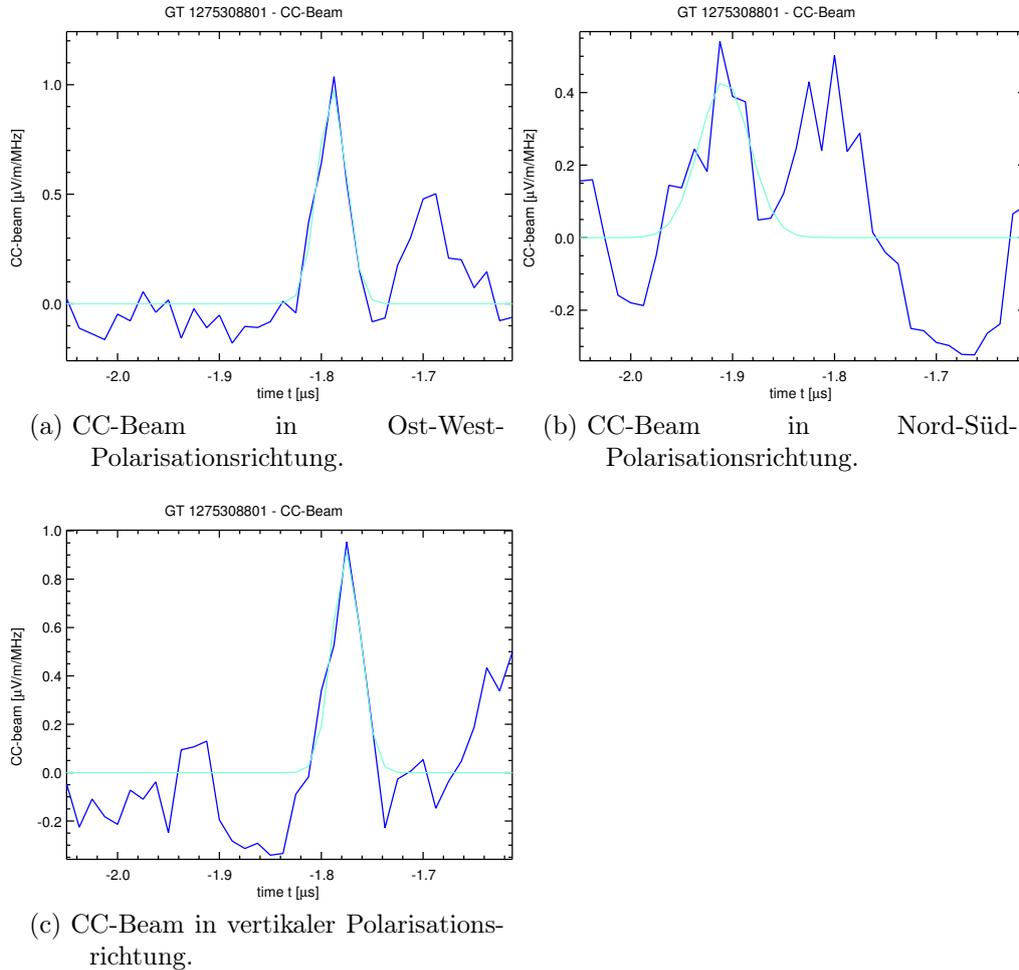


Abbildung 7.4: Ereignis mit Azimut  $42,8^\circ$  und Zenit  $39,1^\circ$ . Für den Vergleich der einzelnen Abbildungen ist die unterschiedliche Skalierung der y-Achse zu beachten.

in der Nord-Süd-Polarisationsrichtung detektiert werden konnte, siehe Abbildung 7.5a und 7.5c. Würde nur in der vertikalen Polarisationsrichtung gemessen werden, könnte dieses Ereignis in dieser nicht detektiert werden. Durch die Messung aller drei Polarisationsrichtungen ergibt sich jedoch die Möglichkeit Ereignisse vollständig zu rekonstruieren, selbst wenn nicht alle Polarisationsrichtungen ein gutes Signal zeigen. Wie in Abbildung 7.5c zu sehen, hebt sich der CC-Beam nur schwach aus dem Rauschen hervor. Dennoch konnte dank der kombinierten Analyse aller drei Polarisationsrichtungen das Ereignis auch in der vertikalen Polarisationsrichtung detektiert werden. Der Luftschauer mit einer Primärteilchenenergie von  $5,5 \cdot 10^{16}$  eV erreichte das Detektorfeld mit einem Azimut von  $282,7^\circ$  und einem Zenit von  $39,1^\circ$ . Laut dem  $\vec{v} \times \vec{B}$ -Modell ist bei dieser Schauergeometrie die Emission der Radiostrahlung in allen drei Polarisationsrichtungen zu erwarten,

## 7 Analyse erster LOPES-3D Daten

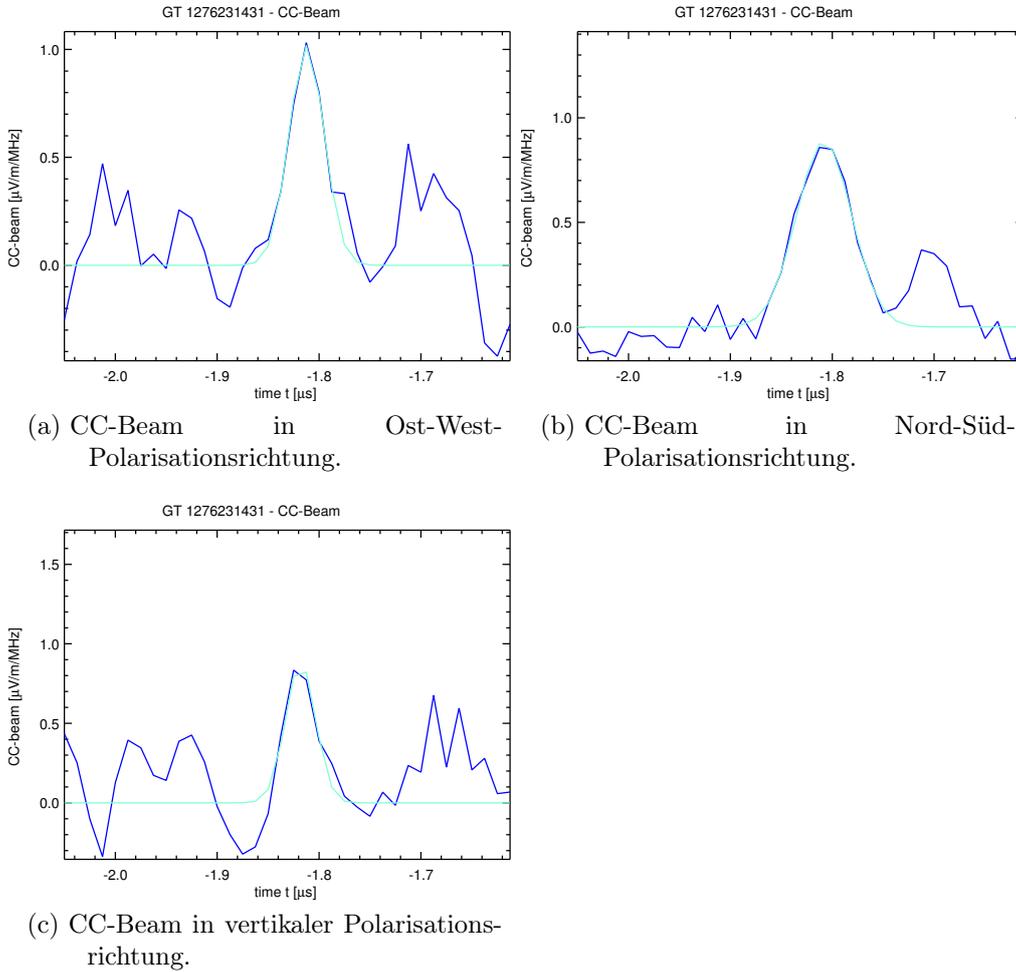


Abbildung 7.5: Ereignis mit Azimut  $282,7^\circ$  und Zenit  $39,1^\circ$ . Für den Vergleich der einzelnen Abbildungen ist die unterschiedliche Skalierung der y-Achse zu beachten.

was auch in diesem Fall mit Hilfe der kombinierten Analyse detektiert wurde.

In Abbildung 7.6 ist ein Ereignis zu sehen, bei dem laut dem  $\vec{v} \times \vec{B}$ -Modell der größte Teil der Radioemission in Nord-Süd- und der zweitgrößte Teil in vertikaler Polarisationsrichtung zu erwarten ist. Der Luftschauer erreichte das Antennenfeld mit einem Azimut von  $128,1^\circ$ , einem Zenit von  $39,4^\circ$  und einer Energie des Primärteilchens von  $4,3 \cdot 10^{17}$  eV. In der Ost-West-Polarisationsrichtung ist laut dem  $\vec{v} \times \vec{B}$ -Modell fast gar keine Emission zu erwarten. Wie in Abbildung 7.6b zu sehen, konnte das Ereignis in der Nord-Süd-Polarisationsrichtung detektiert werden. In der Ost-West-Polarisationsrichtung wurde das Ereignis wie erwartet nicht detektiert. In der vertikalen Polarisationsrichtung wurde durch die Optimierung des CC-Beams auf das Detektorrauschen der KASCADE Detektoren ein Signal zur falschen Zeit rekonstruiert. Hier wird wiederum das Potential einer dreidi-

## 7.5 CC-Beam Analyse

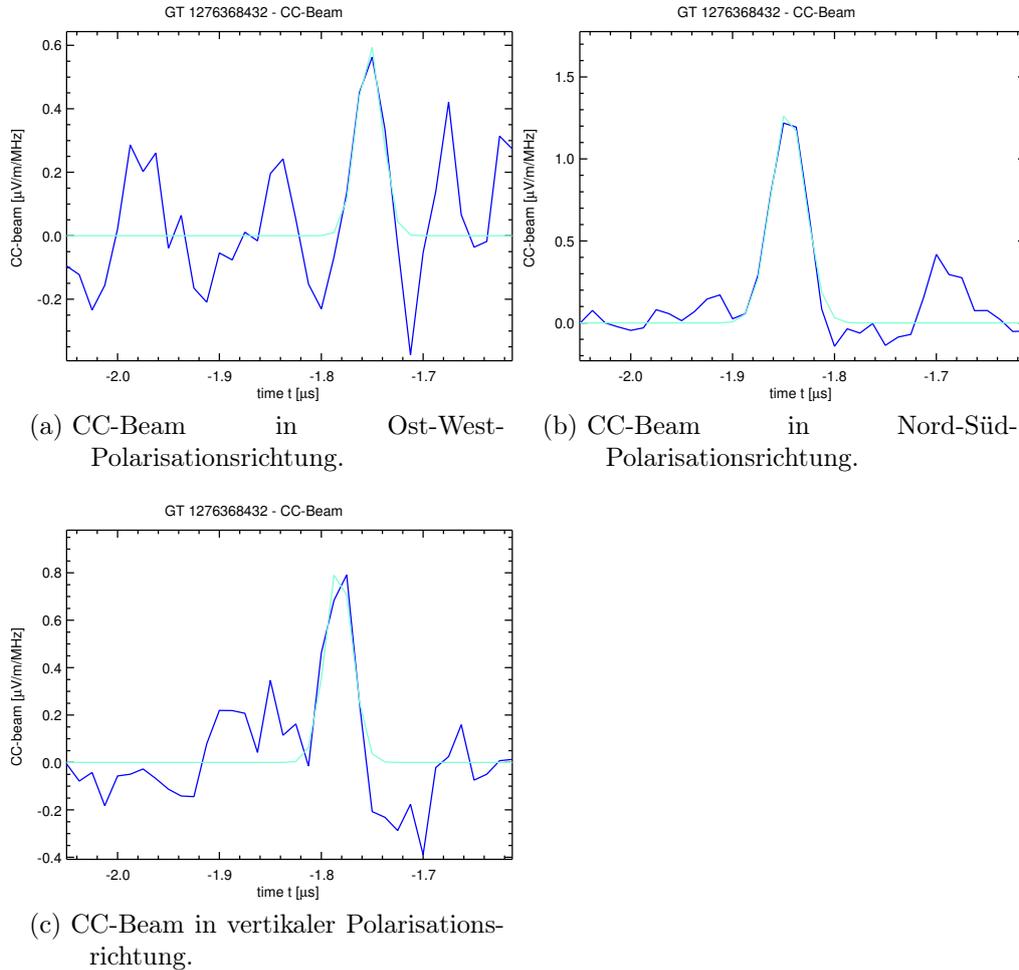


Abbildung 7.6: Ereignis mit Azimut  $128,1^\circ$  und Zenit  $39,4^\circ$ . Für den Vergleich der einzelnen Abbildungen ist die unterschiedliche Skalierung der y-Achse zu beachten.

mensionalen Messung deutlich. Durch die Rekonstruktion des stärksten Signals ist der Zeitpunkt des Radiopulses bekannt. Für Polarisationsrichtungen, in denen das Signal schwächer ausgeprägt ist, kann aus der Kenntnis der exakten Zeit in einem kleineren Zeitintervall der CC-Beam korrekt berechnet werden. Allerdings muss die Analyse hierfür noch angepasst werden.

In Abbildung 7.7 ist die Radioemission eines Luftschauers zu sehen, der das Detektorfeld aus nördlicher Richtung erreicht hat. Mit einem Azimut von  $1,3^\circ$  und einem Zenit von  $24,8^\circ$  wird fast die gesamte Radioemission in Ost-West-Polarisationsrichtung erwartet. Die Energie des Primärteilchens betrug  $3,7 \cdot 10^{17}$  eV. Der CC-Beam in Ost-West-Polarisationsrichtung hebt sich deutlich vom Hintergrundrauschen ab, siehe Abbildung 7.7a. Wie aus dem  $\vec{v} \times \vec{B}$ -Modell erwartet, konnte für die Nord-Süd- und vertikale Polarisationsrichtung, siehe Abbildung 7.7b

## 7 Analyse erster LOPES-3D Daten

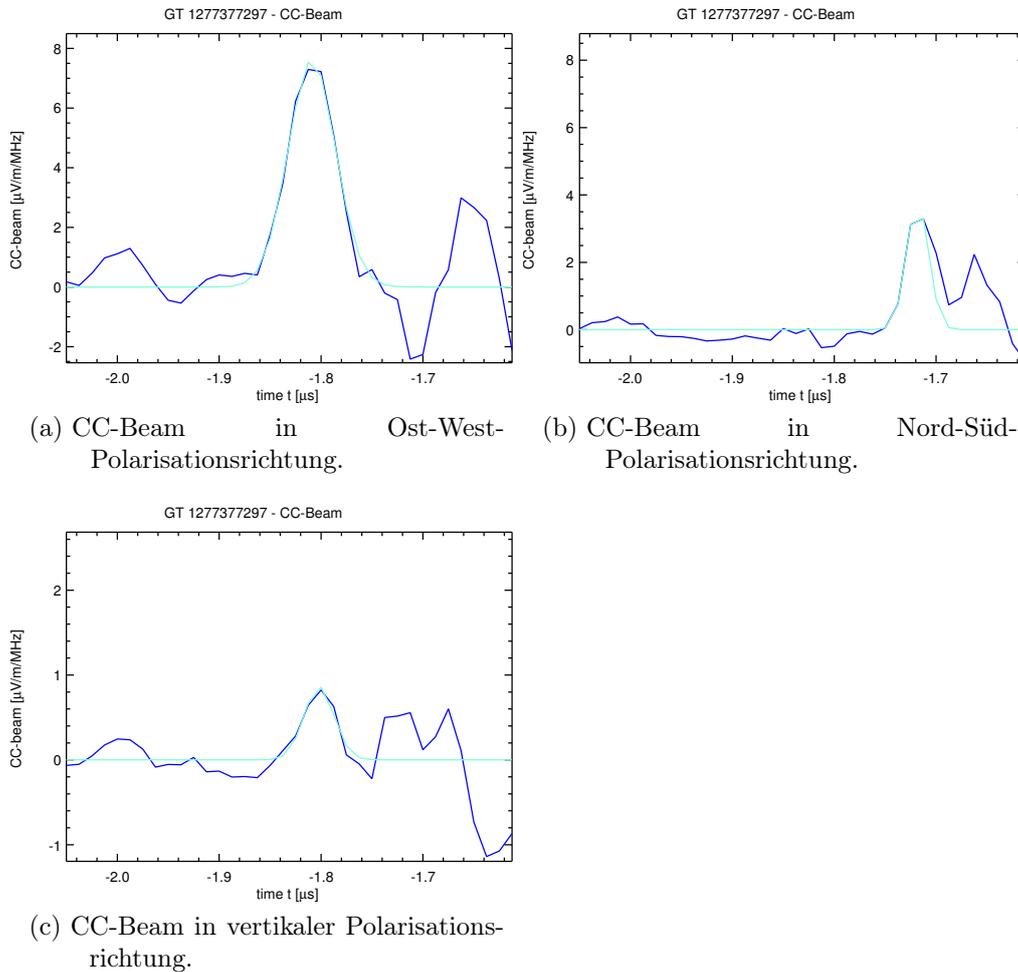


Abbildung 7.7: Ereignis mit Azimut  $1,3^\circ$  und Zenit  $24,8^\circ$ . Für den Vergleich der einzelnen Abbildungen ist die unterschiedliche Skalierung der y-Achse zu beachten.

und 7.7c, keine Radioemission gemessen werden.

### 7.5.1 Besonderes Ereignis

Bei dem in Abbildung 7.8 gezeigten Ereignis ist ein Doppelpuls in Ost-West-Polarisationsrichtung zu erkennen, siehe Abbildung 7.8a. Es gibt zwei kohärente Bereiche. Auch der CC-Beam zeigt das daraus erwartete Verhalten, es sind zwei Spitzen zu erkennen, siehe Abbildung 7.8b. Dieses Verhalten wird für trapezförmige Pulse erwartet. Ein trapezförmiger Puls wird durch die Filter verzerrt und in der Mitte stark gedämpft. Ein Grund für die Pulsform könnte sein, dass der Radiopuls in Ost-West-Polarisationsrichtung zu hoch für die bei LOPES verwendeten ADCs war und diese in Sättigung gingen. Dieses Szenario würde einen

## 7.5 CC-Beam Analyse

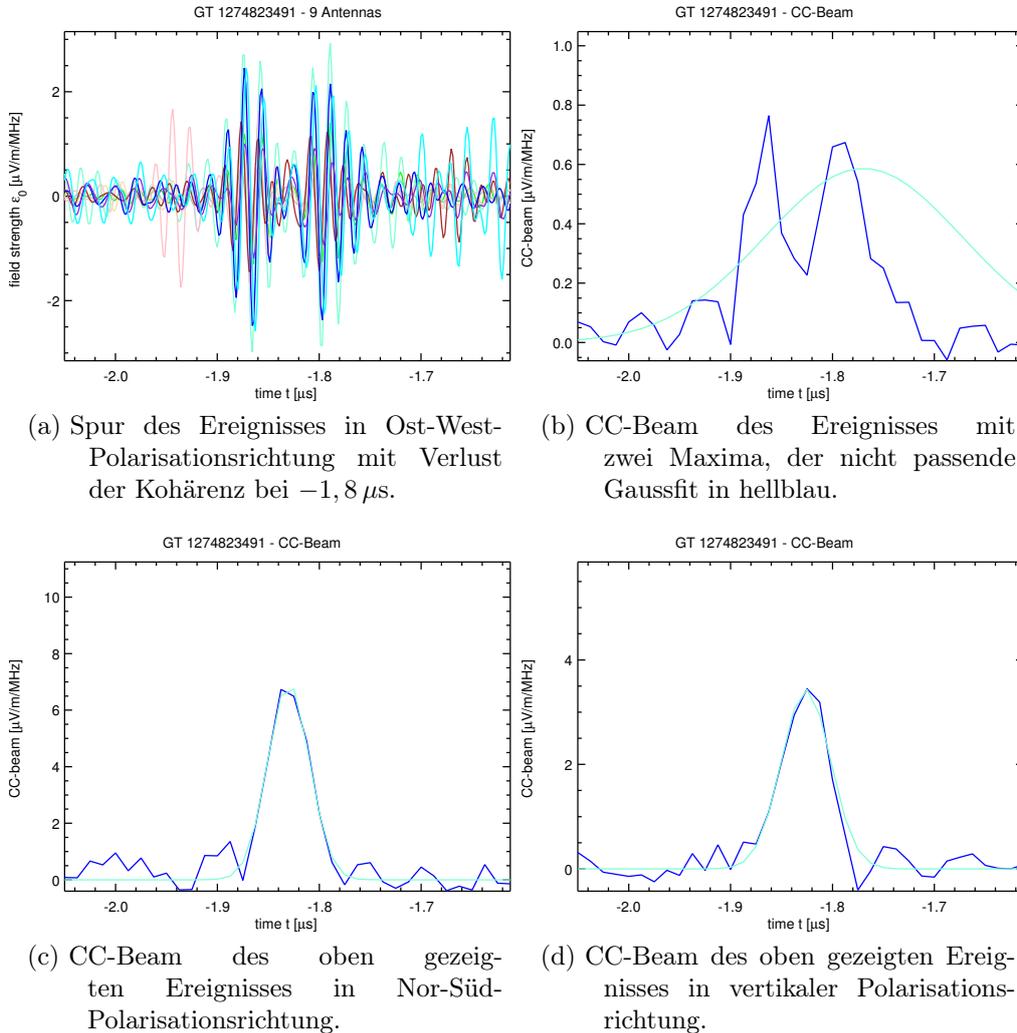


Abbildung 7.8: Spur in Ost-West-Polarisationsrichtung und die CC-Beams aller drei Polarisationsrichtungen eines Ereignisses, das nicht analysiert werden konnte. Für den Vergleich der einzelnen Abbildungen ist die unterschiedliche Skalierung der y-Achse zu beachten.

trapezförmig aufgezeichneten Radiopuls erzeugen. Dafür spricht auch, dass die Radioemission in den beiden anderen Polarisationsrichtungen stark ausgeprägt ist, siehe Abbildung 7.8c und 7.8d. Gegen dieses Szenario spricht die geringe Feldstärke von nur  $2 \mu\text{V m}^{-1} \text{MHz}^{-1}$ . Obwohl das Ereignis in allen drei Polarisationsrichtungen detektiert worden ist, kann es wegen der Verzerrung in der Ost-West-Polarisationsrichtung nicht weiter analysiert werden. Der Luftschauer, der zu dieser Radioemission führte, erreichte das Detektorfeld mit einem Azimut von  $333,2^\circ$  und einem Zenit von  $37,1^\circ$ . Er wurde von KASCADE getriggert und hatte einen Lateralabstand von  $76,84 \text{ m}$  und eine Primärteilchen Energie von  $2,5 \cdot 10^{17} \text{ eV}$ . Aus

## 7 Analyse erster LOPES-3D Daten

der Geometrie können also keinerlei Rückschlüsse für das sonderbare Verhalten getroffen werden. Nach dem  $\vec{v} \times \vec{B}$ -Modell ist in der Ost-West-Polarisationsrichtung ein ca. drei mal so große Amplitude zu erwarten, was zu einem CC-Beam von  $18 \mu\text{V m}^{-1} \text{MHz}^{-1}$  führen würde. Jedoch ist diese Signalstärke in keiner Einzelantenne zu sehen.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde gezeigt, dass die Messung aller drei Polarisationsrichtungen der Radioemission aus ausgedehnten Luftschauern möglich und von großem Interesse für die Untersuchung von hoch energetischen kosmischen Teilchen ist. Hierfür musste das sich am KIT Campus Nord befindende LOPES Experiment rekonfiguriert werden, da es in seinem letzten Aufbau nur die Ost-West- und Nord-Süd-Polarisationsrichtung maß. Für den Umbau zu LOPES-3D standen prinzipiell zwei Antennentypen zur Verfügung, die in Testmessungen auf ihre Eignung untersucht wurden. Eine der beiden Antennen, der sogenannte Tripol, besteht aus drei zueinander senkrecht stehenden Dipolen. Auf Grund seines homogenen Aufbaus und des besseren Signal-zu-Rausch-Verhältnis im Vergleich zur zweiten Testantenne, einer Short Aperiodic Loaded Loop Antenna (SALLA), wurde der Tripol für den Umbau von LOPES zu LOPES-3D gewählt.

Die nach dem Wechsel des Antennentyps notwendige Kalibrierung und alle erforderlichen Schritte zur Auswertung der von LOPES-3D genommenen Daten, wie beispielsweise das Implementieren der vertikalen Polarisationsrichtung in die Analysesoftware, sind im Rahmen dieser Diplomarbeit erfolgt. Auf Grund technischer Defekte konnten drei der insgesamt 30 Kanäle im Zuge der Amplitudenkalibration nicht korrekt geeicht werden und wurden deshalb von der ersten Analyse ausgeschlossen. Die bei der Amplitudenkalibration berechneten Verstärkungsfaktoren aller Kanäle von LOPES-3D hängen zudem in unbekanntem Ausmaß von Temperaturschwankungen und sich ändernden Umweltbedingungen ab. Da die Tripole im Gegensatz zu den bei LOPES-30 verwendeten Antennen über keine Abschirmung durch eine Metallplatte zum Boden verfügen, kann nur wenig von den mit LOPES-30 gesammelten Erfahrungen profitiert werden. Um ein vollständig kalibriertes Experiment zu erhalten, ist es deshalb zwingend erforderlich mindestens eine weitere Amplitudenkalibration durchzuführen. Empfehlenswert sind mehrere Kalibrierungsperioden über ein Jahr verteilt.

Die Rekonfiguration von LOPES zeigte außerdem auf, dass das Monitoring einer Erweiterung bedarf, die im Rahmen dieser Diplomarbeit bewerkstelligt wurde. Neben dem Rauschen der einzelnen Kanäle und dem atmosphärischen E-Feld wird mit dem neuen Monitoring nun auch die Messqualität des Experimentes überwacht. Es wird für jeden Kanal ein Frequenzspektrum erstellt, die integrierte Rauschleistung wird angezeigt, die Referenzphasen aller drei Beaconfrequenzen werden dargestellt

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

und die Höhe des Beaconsignals wird grafisch umgesetzt und ausgegeben.

In einer ersten Analyse der von LOPES-3D genommenen Daten zeigte sich, dass die Messung aller drei und hier insbesondere der vertikalen Polarisationsrichtungen möglich ist. Es wurden mehrere Ereignisse beobachtet, die in Übereinstimmung mit den Vorhersagen eines geomagnetischen Emissionsmodells sind. Auf Grund der geringen Statistik konnte im Rahmen dieser Arbeit keine ausführliche Analyse durchgeführt werden. Die Analyse der wenigen Ereignisse zeigte jedoch bereits das Potential der Messung aller drei Polarisationsrichtungen. So können auch Signale, die sich nur wenig vom Rauschen abheben, detektiert werden, sofern in mindestens einer Komponente ein ausreichend gutes Signal über dem Rauschen gemessen wurde. In einem iterativen Verfahren könnte dann mit Hilfe dieses Signals das Zeitfenster, in dem das Radiosignal zu erwarten ist, verkleinert werden, was zu einer besseren Bestimmung des Radiopuls in den übrigen Polarisationsrichtungen führt. Diese Vorgehensweise ist noch kein Bestandteil der aktuellen Analysesoftware, soll jedoch in naher Zukunft implementiert werden. Um eine automatisierte Auswahl von Ereignissen zu treffen, müssen weiterhin die Selektionskriterien von LOPES-3D angepasst werden.

Weitere Messzeit wird den Vergleich von Daten und komplexen Emissionsmodellen ermöglichen. Die zusätzliche Messung der vertikalen Polarisationsrichtung kann den entscheidenden Hinweis liefern, welches Emissionsmodell die genauesten Vorhersagen trifft und zum Verständnis der Radioemission aus Luftschauern erheblich beitragen. Des Weiteren kann mit einer vektoriellen Analyse der von LOPES-3D aufgezeichneten Daten die Ausbreitungsrichtung der Radiowellen mit dem rekonstruierten E-Feldvektor aus nur einer Antenne ermittelt werden.

Die vertikale Komponente bietet darüber hinaus eine interessante Möglichkeit zur Neutrinodetektion, da die Neutrino-Identifikation nur bei horizontalen Luftschauern möglich ist und somit einen Großteil der Radioemission in der vertikalen Polarisationsrichtung gemessen werden kann.

# A Anhang

## A.1 Positionen der LOPES-3D Antennen im LOPES Referenzsystem

Antenne	Kanäle	Norden [m]	Osten [m]	Höhe über KASCADE-level [m]
1	1, 2, 10	112,661	-64,153	0,893
2	3, 4, 9	55,804	-52,726	0,900
3	6, 7, 8	3,451	41,535	0,805
4	5, 19, 30	-1,161	40,853	0,876
5	21, 27, 29	-13,081	-97,787	0,912
6	22, 23, 28	-33,250	-22,987	0,874
7	24, 25, 26	-60,805	78,402	1,277
8	11, 12, 14	-62,454	-111,186	1,235
9	13, 15, 20	-89,797	-10,449	1,117
10	16, 17, 18	-110,688	64,425	1,342

Tabelle A.1: Positionen der LOPES-Antennen im LOPES-Koordinatensystem.

## A.2 Gemessene Referenzphasen und die Verzögerung der Elektronik

Kanal	Verzögerung zu Kanal 1 [ns]	Referenzphase 53,1 MHz [°]	Referenzphase 63,5 MHz [°]	Referenzphase 68,1 MHz [°]
1	0	0	0	0
2	-1,41	176,3	-169,7	158,2
3	416,035	35,47	-82,97	91,72
4	413,455	-146,2	72,12	142,2
5	455,12	24,37	152,4	-149,5
6	455,965	74,343	-133	-58,96
7	415,49	22,26	-118,4	-120,1
8	415,115	-148,6	-164,6	-159,8
9	426,695	23,3	-8,74	-144,4
10	12,925	-54,71	93,55	138,3
11	1231,365	-126,2	63,77	108,3
12	1230,48	81,33	-90,02	-80,87
13	1224,45	45,19	137,6	161,7
14	1229,805	-26,97	140,5	-36,3
15	1233,38	157	147	-34,5
16	817,47	81,96	88,64	-169,8
17	814,62	178	170,5	-61,27
18	815,02	42,09	-32,03	-129,4
19	1229,035	-118	-33,42	-163,3
20	1232,65	-19,47	141,1	156,7
21	955,955	-34,84	1,88	43,48
22	953,84	-28,57	137,9	4,59
23	962,015	-41,59	-121,7	71,69
24	563,81	-31,05	-5,08	-74,54
25	530,945	-70,83	-167,5	69,06
26	542,31	-42,97	10,39	128
27	965,925	22,94	98,85	175,9
28	953,46	78,22	-27,21	-175,9
29	542,19	140,5	102,6	-137,2
30	959,16	84,77	-120,8	81,88

Tabelle A.2: Referenzphasen der einzelnen LOPES-Kanäle (Referenzkanal 1).

# A.3 Datenblatt der verwendeten Referenzquelle

**SCHAFFNER**

## Vergleichsstrahlungsquelle 30 MHz - 1 GHz

VSQ 1000

- **Komplette Lösung für Vergleichstests bei Störaussendungen**
- **Frequenzbereich 30 MHz – 1000 MHz**

Stabile HF-Strahlungsquelle mit definierten Eigenschaften für die Übertragung von Störfeldstärkewerten speziell für:

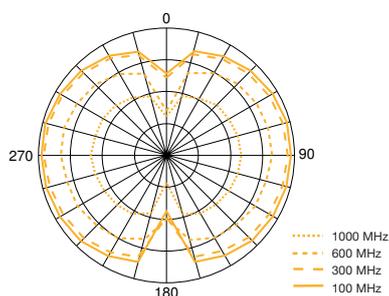
Vergleichstests von Freifeldern und ähnlichen Testumgebungen zum Zwecke des Qualitätsnachweises oder der Bestimmung von Korrekturfaktoren.

Qualitäts Management gem. ISO 900x und EN45001 in (akkreditierten) Testlabors, durch Vergleiche und Tests in verschiedenen Labors.

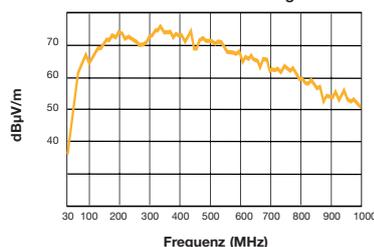
Schirmdämpfungsmessungen in großen Kabinen.



Richtdiagramm der VSQ 1000



Typisches Diagramm für Feldstärken (Freifeld) Für 10 m Entfernung



**Optionen**

VSQ 1000CS	Calibration standard
VSQ 1000CO	Calibration OATS
VSQ 1000CG	Calibration GTEM

Technische Spezifikationen	RSQ 1000
Frequenzabstand:	1, 5, 10 MHz
Frequenzbereich:	1 MHz – 1 GHz
Frequenzfehler:	<1 x 10 <sup>-5</sup>
Signalstabilität:	< ±0,2 dB (20°C)
Temperaturbereich:	< ±0,5 dB (+10°-30°C)
Betriebszeit (mit geladener Batterie):	max. 12 h (Batterien können ausgetauscht werden)
Schutzsystem:	P XO
Abmessungen:	60 x 60 x 175 mm
Breitbanddipolantenne DP 4000	
Frequenzbereich:	(30) 200 MHz – 1000 MHz Zubehör für Batterieladung, Befestigung und Transport zusätzliche Messwerte von Referenzfreifeldern sind erhältlich

## A.4 Datenblatt der verwendeten Referenzantenne

### Compact Biconical Antenna 300MHz - 1GHz

DPA 4000

#### Biconical UHF Broadband Test Antenna

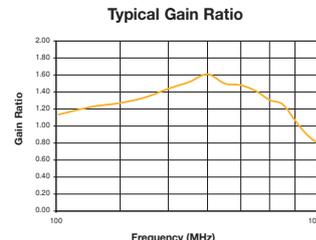
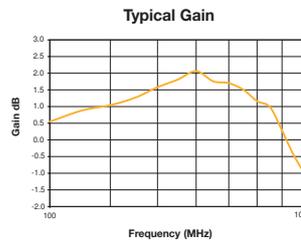
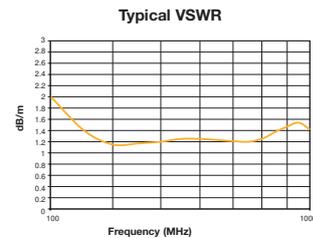
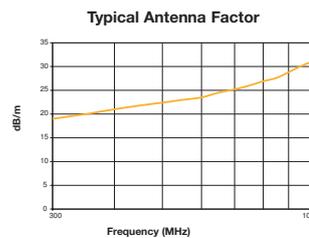
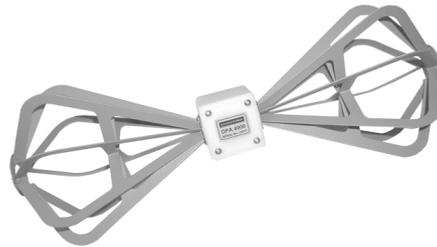
The dipole antenna DPA 4000 operates as a field strength measuring antenna in the frequency range 300MHz - 1GHz. Due to the broadband characteristics of the DPA 4000, mechanical adjustments are not required as with half-wave dipoles. The DPA 4000 is, therefore, suitable for automatic and day-to-day EMI/EMC measurements. Despite the broadband characteristics, it reaches virtually the same gain, directivity and antenna factor of tuned half-wave dipoles.

The DPA 4000 is constructed so that it can be converted easily to a Reference Radiation Source in combination with the Reference Spectrum Generator RSG 1000.

The DPA 4000 complies with the requirements for EMI measuring antennas as under CISPR 16 and derived standards.

#### Options

Calibration of antenna factor according to ANSI C63.5



Technical Specifications	DPA 4000
Antenna type	Broadband Biconical Dipole
Frequency Range	300MHz - 1GHz
Output impedance	50Ω Nominal
Connector	N Female
VSWR	≤ 2.5 300 - 350MHz ≤ 2.0 350 - 1000MHz
Antenna Factor	19 - 32dB/m typ.
Dimensions (mm)	405 x 150 x 150
Weight (kg)	0.52

## A.5 Datenblatt des verwendeten Frequenzgenerators



### Reference Spectrum Generator

RSG 1000

- Battery operated
- Suitable for laboratory compare measurements and calibrations
- Frequency range 1MHz - 1GHz

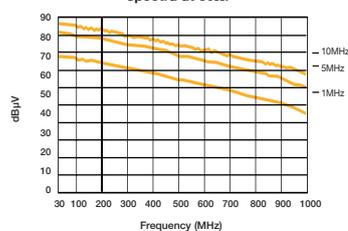


The Reference Spectrum Generator is an independent, RF signal source with a wide range of metrological applications. It can be used, in combination with an antenna, as a separate, stable radiation source to determine:

- the characteristics of test sites (VDE 0877 T2; EN50147-2, CISPR, ANSI 63.4) and correction factors
- antenna features (CISPR 16, ANSI 63.5)
- the screening attenuation of large cabinets (IEC917-, IEC297-)

It can be used, in combination with receivers, to test transmission factors, cable and insertion losses, eg. during the calibration of current probes and absorbing clamps (CISPR 16).

Typical Output Levels of the 1-, 5-, and 10MHz spectra at 50Ω.



Technical Specifications	RSG 1000	RSG 2000
Frequency range	1MHz - 1GHz	1GHz - 18GHz
Frequency spacing	1, 5, 10MHz	100MHz
Frequency error	$< 1 \times 10^{-5}$	$< 1 \times 10^{-5}$
Output level	$> 93$ to $> 65$ dBµV (10MHz)	$> 97$ to $> 62$ dBµV
Signal stability	$< 0.2$ dB (const 20°C) / $< 0.5$ dB (10° - 30°C)	$< 0.2$ dB (const 20°C) / $< 1$ dB (10° - 30°C)
Temperature range	+5°C - +40°C	+5°C - +40°C
Output Impedance	50Ω	50Ω
Output connector	N Female	SMA Female
Operating time (battery charged)	max. 12h	approx. 6h
Dimensions (mm)	60 x 60 x 175	100 x 80 x 120

*A Anhang*

# Literaturverzeichnis

- [AAB<sup>+</sup>03] T. Antoni, W. D. Apel, F. Badea, K. Bekk, K. Bernlöhr, H. Blümer, E. Bollmann, H. Bozdog, I. M. Brancus, A. Chilingarian, K. Daumiller, P. Doll, J. Engler, F. Fessler, H. J. Gils, R. Glasstetter, R. Haeusler, W. Hafemann, A. Haungs, D. Heck, T. Holst, J. R. Hörandel, K.-H. Kampert, J. Kempa, H. O. Klages, J. Knapp, D. Martello, H. J. Mathes, H. J. Mayer, J. Milke, D. Mühlenberg, J. Oehlschläger, M. Petcu, H. Rebel, M. Risse, M. Roth, G. Schatz, F. K. Schmidt, T. Thouw, H. Ulrich, A. Vardanyan, B. Vulpesu, J. H. Weber, J. Wentz, T. Wiegert, J. Wochele, and J. Zabierowski. The Cosmic-Ray Experiment KASCADE. *Nucl. Instr. Meth.*, 513(3):490–510, 2003.
- [AAB<sup>+</sup>06] W. D. Apel, T. Asch, A. F. Badea, L. Bähren, K. Bekk, A. Bercuci, and et al. Progress in air shower radio measurements: Detection of distant events. *Astropart. Physics*, 26:332–340, 2006.
- [ABC<sup>+</sup>05] D. Ardouin, A. Bellétoile, D. Charrier, R. Dallier, L. Denis, P. Eschstruth, T. Gousset, F. Haddad, J. Lamblin, P. Lautridou, A. Lecacheux, D. Monnier-Ragaigne, A. Rahmani, and O. Ravel. Radio-detection signature of high-energy cosmic rays by the CODALEMA experiment. *Nucl. Instr. Meth. A*, 555:148–163, 2005.
- [AEM<sup>+</sup>39] Pierre Auger, P. Ehrenfest, R. Maze, J. Daudin, and Robley A. Fréon. Extensive cosmic-ray showers. *Rev. Mod. Phys.*, 11(3-4):288–291, Jul 1939.
- [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.
- [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.
- [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.

Literaturverzeichnis

- [Dt07] B. R. Dawson and the Pierre Auger Collaboration. Hybrid Performance of the Pierre Auger Observatory. In *Proc. of the 30th ICRC, Merida, Mexico*, 2007. astro-ph/0706.1105.
- [Fer49] E. Fermi. On the Origin of Cosmic Radiation. *Physical Review*, 75(8):1169, 1949.
- [Hau09] A. Haungs. Radio detection of particles from the cosmos. *NIM A*, 604:S236–S243, 2009.
- [Hes12] V. F. Hess. *Z. Phys.*, 13:1084, 1912.
- [HF03] T. Huege and H. Falcke. Radio emission from cosmic ray air showers. Coherent geosynchrotron radiation. *Astronomy & Astrophysics*, 412:19–34, December 2003.
- [HF05a] T. Huege and H. Falcke. Radio emission from cosmic ray air showers. Monte Carlo simulations. *Astronomy & Astrophysics*, 430:779–798, 2005.
- [HF05b] T. Huege and H. Falcke. Radio emission from cosmic ray air showers: Simulation results and parametrization. *Astropart. Phys.*, 24:116, 2005.
- [HKC<sup>+</sup>98] D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle, G. Schatz, and T. Thouw. CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers. FZKA Report 6019, Forschungszentrum Karlsruhe, 1998.
- [Hor06] A. Horneffer. *Measuring Radio Emission from Cosmic Ray Air Showers with a Digital Radio Telescope*. PhD thesis, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Germany, 2006. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:hbz:5N-07819>.
- [Hor10] A. Horneffer. LOPES description paper, submitted. *Astronomy & Astrophysics*, 2010.
- [HRR03] A. Haungs, H. Rebel, and M. Roth. Energy spectrum and mass composition of high-energy cosmic rays. *Rep. Prog. Phys.*, 66:1145–1206, 2003.
- [Ht10] T. Huege and the Pierre Auger Collaboration. Radio detection of cosmic rays in the Pierre Auger Observatory. *NIM A*, 617:484–487, 2010.
- [HUE07] T. Huege, R. Ulrich, and R. Engel. Monte Carlo simulations of geosynchrotron radio emission from CORSIKA-simulated air showers. *Astropart. Physics*, 27:392–405, 2007.
- [IAA<sup>+</sup>07] P. G. Isar, W. D. Apel, J. C. Arteaga, T. Asch, and et al. Operation of LOPES-30 for Polarization Measurements of the Radio Emission of Cosmic Ray Air Showers. In *Proceedings of the 30th ICRC, Merida, Mexico*, 2007.

- [IN Ae06] P. G. Isar, S. Nehls, W. D. Apel, and et al. Radio Emission in Atmospheric Air Showers: First Measurements with LOPEs-30. In *Proc. of the ARENA2006 conference, Newcastle, England, 2006*.
- [JFP<sup>+</sup>65] J. V. Jelley, J. H. Fruin, N. A. Porter, T. C. Weekes, F. G. Smith, and R. A. Porter. Radio pulses from extensive cosmic-ray air showers. *Nature*, 205:327–328, 1965.
- [Kar95] Rothammel Karl. *Rothammels Antennenbuch*. Franckh-Kosmos, 11 edition, 1995.
- [KL66] F. D. Kahn and I. Lerche. Radiation from cosmic ray air showers. In *Proc. Roy. Soc.*, volume A-289, page 206, 1966.
- [Kon10] M. Konzack. Entwicklung eines Beacons zur externen Zeitkalibration für das Auger Engineering Radio Array. Diplomarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2010.
- [Kro08] O. Kroemer. Empfangssystem zur Radioobservation hochenergetischer kosmischer Schauer und sein Verhalten bei Selbsttriggerung. FZKA Report 7396, Forschungszentrum Karlsruhe, 2008.
- [Laf06] S. Lafebre. *from cosmic particle to radiopulse*. PhD thesis, Radboud University, Netherlands, 2006.
- [NAA<sup>+</sup>04] G. Navarra, T. Antoni, W. D. Apel, F. Badea, and et al. KASCADE-Grande: a large acceptance, high-resolution cosmic-ray detector up to  $10^{18}$  eV. *Nucl. Instr. Meth. A*, 518:207–209, 2004.
- [Neh08] S. Nehls. Calibrated Measurements of the Radio Emission of Cosmic Ray Air Showers. FZKA Report 7440, Forschungszentrum Karlsruhe, 2008.
- [NHA<sup>+</sup>07] S. Nehls, A. Hakenjos, M. J. Arts, J. Blümer, H. Bozdog, W. van Cappellen, H. Falcke, A. Haungs, A. Horneffer, T. Huege, P. G. Isar, and O. Krömer. Amplitude calibration of a digital radio antenna array for measuring cosmic ray air showers. *Astronomy & Astrophysics*, 2007. submitted.
- [Nyq28] H. Nyquist. Certain topics in telegraph transmission theory. *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the*, 47(2):617–644, April 1928.
- [RdF<sup>+</sup>03] H. Röttgering, A. G. de Bruyn, R. P. Fender, J. Kuijpers, M. P. van Haarlem, M. Johnston-Hollitt, and G. K. Miley. LOFAR: a new radio telescope for low frequency radio observations: science and project status.

*Literaturverzeichnis*

In *Texas in Tuscany. XXI Symposium on Relativistic Astrophysics*, pages 69–76, 2003.

- [SAB<sup>+</sup>10] F.G. Schröder, T. Asch, L. Bähren, J. Blümer, H. Bozdog, H. Falcke, A. Haungs, A. Horneffer, T. Huege, P.G. Isar, O. Krömer, and S. Nehls. New method for the time calibration of an interferometric radio antenna array. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 615(3):277 – 284, 2010.
- [Sta04] Todor Stanev. *High Energy Cosmic Rays*. Springer Verlag, 2. edition, 2004.
- [SWR08] O. Scholten, K. Werner, and F. Ruydi. A macroscopic description of coherent geo-magnetic radiation from cosmic-ray air showers. *Astroparticle Physics*, 29:94–103, 2008. astro-ph/0709.2872.
- [Voo05] A. Voors, 2005. Handbuch zu 4NEC2.
- [Wef91] J. P. Wefel. Cosmic Rays, Supernovae and the interstellar Medium. *NATO ASIC Proc.*, 337:29, 1991.
- [Wei10] A. Weindl, 2010. Private Kommunikation.
- [Woo01] D. Woody. Radio interferometer array point spread functions, 2001. ALMA Memo 390.

# Danksagungen

Abschließend möchte ich allen Leuten danken, die mich bei der Anfertigung dieser Diplomarbeit unterstützt und die viel zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, insbesondere:

Prof. Dr. J. Blümer für die Übernahme des Referats.

Prof Dr. T. Müller für die Übernahme des Korreferats.

Dr. Tim Huege für die erstklassige Betreuung und die vielen anregenden Gespräche.

Dr. Andreas Haungs für die Unterstützung in so manch bürokratischen Angelegenheiten, für die vielen interessanten Diskussionen, für seine Beratung und die nette Zeit.

Horia Bozdog für die Unterstützung beim Umbau und der Kalibration des Experimentes.

Dem IPE, Oliver Krömer und Lars Petzold für die Bereitstellung der Antennen, Kabel und LNAs.

Der gesamten LOPES-Kollaboration, vor allem Frank, Katrin und Marianne, die mir stets mit viel Rat und Tat zu Seite gestanden haben.

Ich möchte mich noch bei meiner Familie bedanken, die mich während des gesamten Studiums unterstützt, meine diversen Launen ertragen und Höhen und Tiefen eines Studiums mit mir durchlitten hat.



# Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass die vorliegende Diplomarbeit - 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 2010

.....  
(Daniel Huber)

