



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 7219

Kalibration eines astronomischen Radioantennenfeldes durch eine externe Quelle

A. Hakenjos
Institut für Kernphysik

Mai 2006

Forschungszentrum Karlsruhe

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7219

Kalibration eines astronomischen
Radioantennenfeldes durch eine externe Quelle

A. Hakenjos

Institut für Kernphysik

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2006

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)

ISSN 0947-8620

urn:nbn:de:0005-072194

Zusammenfassung

Kalibration eines astronomischen Radioantennenfeldes durch eine externe Quelle

Die Zielsetzung von LOPES ist es, die Radiokomponente der durch die kosmische Strahlung induzierten Luftschaer zu messen. Das Experiment besteht aus 30 Radioantennen, die auf dem KASCADE-Grande Detektorfeld im Forschungszentrum Karlsruhe aufgebaut sind. Durch die Kopplung an dieses bereits bestehende Luftschaerexperiment konnte die Korrelation zwischen Luftschaern und der Radiokomponente nachgewiesen werden. Um die Abhängigkeiten zwischen der Energie der Primärteilchen der kosmischen Strahlung und der Radiopulshöhe pro MHz Bandbreite zu bestimmen, ist eine Phasen- und eine absolute Kalibration notwendig. Im Rahmen dieser Arbeit wurde für die absolute Kalibration ein System entwickelt und aufgebaut. Dabei wurden Korrekturwerte bezüglich der Geometrie der Antennen mittels einer Simulation berechnet. Für die Elektronik wurden diese Korrekturen über eine bekannte Radioquelle gemessen. Für diese Messung wurde eine kommerzielle Radioquelle mittels eines Kranauslegers 11m über den Antennen angebracht. Mit den simulierten Antennendaten war es möglich, die Eingangsleistung in die Elektronik zu berechnen und diese mit den von LOPES gemessenen Werten zu vergleichen. Damit wurden die auf die Leistung des elektromagnetischen Signals bezogenen Korrekturfaktoren mit einer systematischen Ungenauigkeit von $\approx 32\%$ bestimmt. Diese Ungenauigkeiten kamen auch durch Schwankungen der gemessenen Leistung bei wechselnden Umweltbedingungen zustande. Die Korrekturwerte werden nun für die Bestimmung der absoluten Radio-Feldstärke aus den LOPES-Meßwerten benutzt.

Abstract

Calibration of an astronomical antenna array with an external source

The goal for LOPES is to measure the radio component of cosmic ray air showers. The LOPES-experiment consists of 30 antennas which are situated in the KASCADE-Grande array at the Forschungszentrum Karlsruhe. We have developed and set up a system for the absolute calibration. While we used a simulation for the geometry-dependent correction factor describing the antennas, we had to use a different approach for the correction factor of the electronic components. A commercial radio source was attached to a crane arm which placed it 11 m above the LOPES-antennas. Using the simulated data for the antennas, we calculated the power input to the electronics and compare it to the power measured by LOPES. From this comparison we calculated the frequency dependent correction factor for the signal power. We had a systematical error of $\approx 32\%$. This error includes variations of the measured power due to changes in the humidity of the air and in particular the ground. The correction factors will be used to calculate the absolute radio field strength from the LOPES data.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Die kosmische Strahlung und deren Messung	3
2.1	Grundlagen	3
2.1.1	Zusammensetzung	3
2.1.2	Energiespektrum	4
2.2	Indirekte Messung	6
2.2.1	Teilchenschauer	6
2.2.2	Radioemission	8
2.3	KASCADE-Grande	10
2.3.1	Das KASCADE-Array	11
2.3.2	Das Grande-Feld und weitere Komponenten	13
3	LOPES	15
3.1	Geschichte und Motivation	15
3.2	LOFAR	16
3.3	LOPES - Aufbau	17
3.4	LOPES - Elektronik	17
3.5	Status und Ausblick von LOPES	21
4	Kalibration von Radioantennen	25
4.1	Grundlagen	25
4.1.1	Antennenzonen	25
4.1.2	Richtfaktor und Antennengewinn	26
4.1.3	Transmissionsgleichung von Friis	28
4.2	Antennenformen	29
4.2.1	Inverted V Dipol	30
4.2.2	Bikonische Antenne	30
4.2.3	Logarithmisch Periodische Dipolantenne	30
4.3	Kalibrierung	31
4.3.1	Zwei Antennen Kalibration	32
4.3.2	Drei Antennen Kalibration	33
4.3.3	Bekannte Vergleichsquelle	33

5	Absolute Kalibration der LOPES-Antennen	35
5.1	Vorgehen	35
5.2	Richtfeld der Antennen	36
5.2.1	Simulation oder Messung?	36
5.2.2	Bedingungen für die Simulation	37
5.2.3	Ergebnisse der Simulation	37
5.3	Gesamtverstärkung der Elektronik	41
5.3.1	Kalibration mittels eines vorhandenen Signals	42
5.3.2	Verwendeter Ansatz	45
5.3.3	Technischer Aufbau	46
5.3.4	Messungen	48
5.3.5	Verlauf der Messung	51
5.3.6	Ergebnisse der Messung	52
5.3.7	Messungenauigkeiten	55
6	Ausblick	59
6.1	Analysesoftware	59
6.2	Überprüfung der Richtdiagramme und Simulation in 1 MHz Schritten	59
6.3	Untersuchung der Umwelteinflüsse	60
6.4	Wiederholung der absoluten Kalibration	61
6.5	Phasenkalibration	61
6.6	Vergleich der theoretischen Vorhersagen mit den gemessenen Daten . .	62
7	Zusammenfassung	63
A	Verstärkungsfaktoren für Antennen 1-30	67
B	Datenblatt der verwendeten Radioquelle	73
	Literaturverzeichnis	75

1 Einleitung

Die hier vorliegende wissenschaftliche Arbeit behandelt die Kalibration eines Radioantennenfeldes für das LOPES-Experiment. LOPES misst die kosmische Strahlung über die Beobachtung von elektromagnetischen Wellen von Luftschauern im Radiofrequenzbereich. Bei der kosmischen Strahlung handelt es sich um eine hochenergetische Teilchenstrahlung aus dem Weltall. Diese Teilchenstrahlung besteht aus vollständig ionisierten Atomkernen. Beim Eintritt in die Erdatmosphäre reagieren sie mit Luftmolekülen und lösen eine Reihe von Wechselwirkungen aus. Es entsteht ein Teilchenschauer welcher am Erdboden gemessen werden kann. Seit den 60er Jahren ist bekannt, dass bei der Entstehung des Teilchenschauers auch Radiostrahlung emittiert wird.

LOPES will zur Messung dieser so genannten Radiokomponente ein astronomisches Radioantennenfeld verwenden. Dabei soll LOPES zwar hauptsächlich die Machbarkeit einer solchen Messung aufzeigen, allerdings auch schon erste Ergebnisse, vor allem in Bezug auf den Emissionsmechanismus der Radiokomponente, liefern. Um jedoch die Messdaten vollständig nutzen zu können, muss bekannt sein, wie der Messaufbau ein ankommendes Radiosignal verändert. Auf der einen Seite kann es zu einer frequenzabhängigen Phasenverschiebung, einer Dispersion kommen. Das bedeutet, dass unterschiedliche Frequenzen unterschiedlich verzögert werden und sich somit das Gesamtbild des gemessenen Signals verändert. Die Bestimmung der Faktoren zur Rückrechnung einer solchen Veränderung wird Phasenkalibration genannt.

Auf der anderen Seite wird das Signal verstärkt oder abgeschwächt werden. Diese Veränderung ist ebenfalls frequenzabhängig. Da der Empfang einer Antenne abhängig ist von der Richtung des einfallenden Signals, wird diese Veränderung richtungssensitiv sein. Die Bestimmung der Korrekturwerte dieser Veränderung nennt man absolute Kalibration. Die Erstellung eines Messverfahrens zur absoluten Kalibration von LOPES ist Ziel dieser Arbeit.

Für die absolute Kalibration wurde unterschieden zwischen zwei Teilen des Messaufbaus von LOPES. Auf der einen Seite die Antenne, auf der anderen Seite die Elektronik und die zur Auswertung der Messungen verwendete Analyse-Software. Die Kalibration der Antennen wurde über eine Simulation durchgeführt, da dies bei unserer Antennenform sehr gute Ergebnisse liefert. Die Verstärkung der Elektronik wurde über eine externe Radioquelle, d.h. einem Signalgenerator mit montierter Radioantenne gemessen. Um das bei LOPES ankommende Signal berechnen zu können, wurde die Radioquelle bereits kalibriert erworben. Sie wurde in der Messung mittels eines Kranauslegers über die zu kalibrierende LOPES-Antenne gebracht und dieses Signal von LOPES aufgenommen.

Da wir unsere Radioquelle und, durch die Simulation, die empfangende LOPES-

1 Einleitung

Antenne kennen, können wir das eingegangene Signal berechnen. Durch den Vergleich dieses berechneten mit dem von der Anaylsoftware ausgegebenen Signal, konnten die frequenzabhängigen Verstärkungsfaktoren der Elektronik gewonnen werden.

Im Folgenden sind, nach einer Einführung in das Gebiet der kosmischen Strahlung und des LOPES-Experiments, die vorgenommene absolute Kalibration beschrieben und erste Ergebnisse präsentiert. Dann folgt ein Ausblick auf weiterführende Aktivitäten, die mit dem entwickelten System möglich sind, um die Kalibration weiter zu verbessern. Dadurch soll es ermöglicht werden, die Messung der Radiostrahlung aus Luftschauern mit höherer Präzision durchzuführen.

2 Die kosmische Strahlung und deren Messung

Als Viktor Franz Hess im frühen 20. Jahrhundert die kosmische Strahlung entdeckte (siehe Hess (1912)), begann eine bis heute andauernde Forschung nach den Ursprüngen und Hintergründen dieses physikalischen Phänomens. Mit ihr verspricht man sich mehr über die Strukturen im Universum und großflächige physikalische Vorgänge zu erfahren. Allerdings ist die kosmische Strahlung, mit einem Energiebereich von über 10 und einer Flussverteilung von über 30 Größenordnungen, ein komplexer Teilbereich der experimentellen und theoretischen Physik. So ist es leider bis heute nicht gelungen, die Fragen nach den Quellen, der Beschleunigung und dem Transport vollständig zu klären (siehe auch Nagano and Watson (2000)). Im folgenden wird ein kurzer Abriss über die kosmische Strahlung gegeben (eine ausführlichere Einführung kann in Grieder (2001) gefunden werden) und dabei wird insbesondere das KASCADE-Grande Experiment, als ein Beispiel für die Messung der kosmischen Strahlung, näher beschrieben. Als Grundlage für dieses Kapitel diene Ulrich (2003) und Haungs et al. (2005).

2.1 Grundlagen

2.1.1 Zusammensetzung

Bei der kosmischen Strahlung handelt es sich fast ausschließlich um geladene relativistische Teilchen, wobei Protonen und ionisierte Kerne den Hauptbestandteil ausmachen. Elektronen und Gammastrahlung tragen nur einen geringen Anteil bei. Leider ist die Elementhäufigkeit nur durch direkte Messungen in Ballonen und Satelliten gut messbar. Diese Messungen sind aber nur bis zu einem Energiebereich von 10^{14} eV möglich. Wie in Abbildung 2.1 dargestellt, ist die Elementhäufigkeit der kosmischen Strahlung sehr ähnlich zu der solaren.

Dies deutet auf einen ähnlichen Entstehungsprozess wie in Sternen hin. Allerdings sind die Elemente Li, Be, B, Sc bis Mn überhäufig in der kosmischen Strahlung vertreten. Dies kann auf Spallationsprozesse von C, N, O und Fe-Kernen aus der kosmischen Strahlung während des Transports zurückgeführt werden. Wasserstoff ist unterhäufig in der kosmischen Strahlung vertreten, was vermutlich darauf zurückzuführen ist, dass er nur schwer ionisierbar ist und damit nur schlecht beschleunigt werden kann.

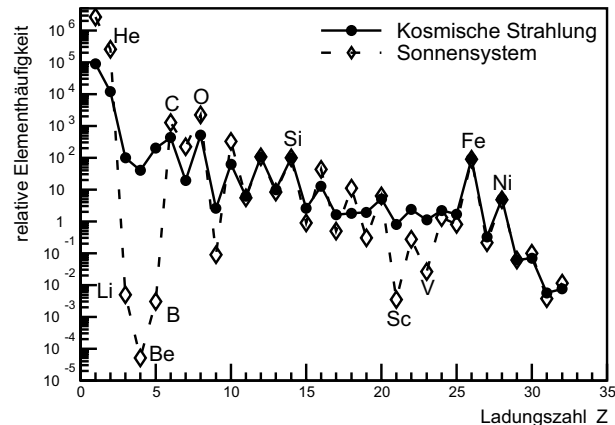


Abbildung 2.1: Elementverteilung der kosmischen Strahlung nach Longair (1981). Die Elementhäufigkeit ist für Si auf 100 normalisiert.

2.1.2 Energiespektrum

Das Energiespektrum, also der Teilchenfluss pro Energieeinheit, reicht von 10^9 eV bis zu über 10^{20} eV. Die Teilchen unter 10^9 eV, d.h. im MeV-Bereich, sind solaren Ursprungs, da der Sonnenwind das Vordringen von Strahlen kosmischen Ursprungs zur Erde verhindert. Allerdings wird auch die niederenergetische kosmische Strahlung bis 3×10^{10} GeV stark vom Sonnenwind moduliert. Erst oberhalb dieser Energiegrenze kann die kosmische Strahlung betrachtet werden. Das in Abbildung 2.2 dargestellte Spektrum ausgewählter Experimente wurde zuvor mit einem Faktor $E^{2.5}$ multipliziert, um bestimmte Strukturen (siehe im weiteren Verlauf dieses Abschnitts) deutlich zu machen. Es wird deutlich, dass das Energiespektrum weitestgehend einem einfachen Potenzgesetz entspricht:

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

mit $\gamma \approx 2.75$. γ wird auch der spektrale Index genannt. Bei einer genaueren Betrachtung zeigen sich allerdings innerhalb des Spektrums deutliche Abweichungen von diesem Gesetz.

Im Bereich von 2×10^{15} eV bis 4×10^{15} eV ist eine Zunahme des spektralen Indizes auf $\gamma \approx 3.05$ zu beobachten. Nach diesem sogenannten *Knie* der kosmischen Strahlung bleibt der Index wieder konstant bis sich bei einer Energie von ungefähr 3×10^{17} eV eine weitere Änderung andeutet (das *zweite Knie*). Bei einer Energie zwischen 5×10^{18} eV bis 1×10^{19} eV erfolgt schließlich noch eine Abnahme des Indizes auf $\gamma \approx 2.75$, der sogenannte *Knöchel*.

Während das erste Knie und der Knöchel inzwischen als etabliert gelten können, ist das zweite Knie noch Gegenstand von Diskussionen. Dies ist darin begründet, dass einzelne Experimente (z.B. das Akeno-Experiment Nagano et al. (1992)) diese Struktur nicht sehen konnten. Neben diesem Problem ist die Frage nach Energien oberhalb von 5×10^{19} eV bisher ungeklärt. Wie in Abbildung 2.2 gesehen werden kann, ist die

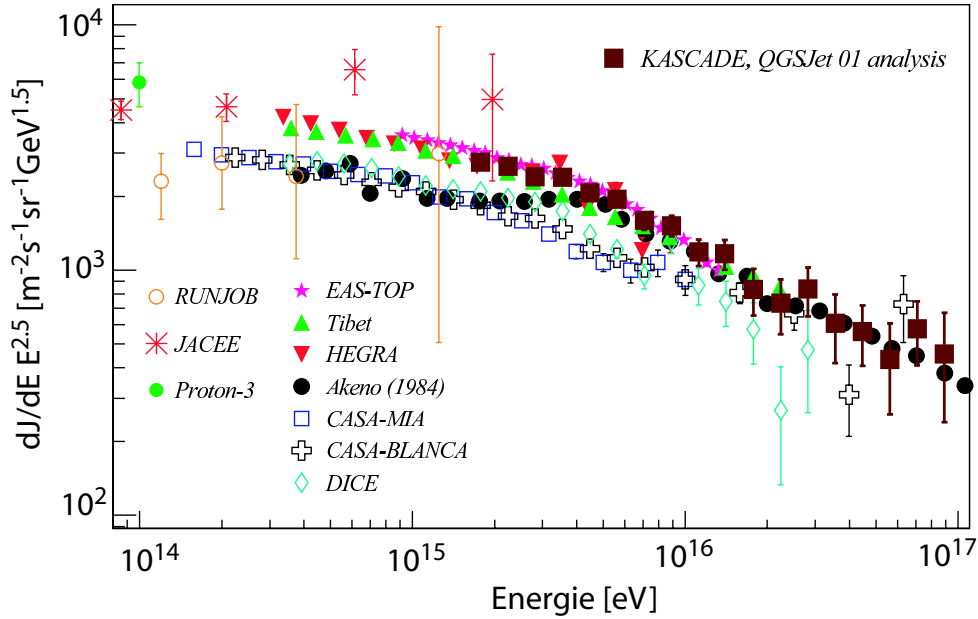


Abbildung 2.2: Energiespektrum der kosmischen Strahlung. Der Fluss wurde mit $E^{2.5}$ skaliert. Bei den Experimenten RUNJOB (Apanasenko et al. (2001)), JACEE (Takahashi (1998)) und Proton-3 (Grigorov et al. (1970)) handelt es sich um direkte Messungen. KASCADE (Antoni et al. (2003)), EAS-TOP (Aglietta et al. (1999)), Tibet (Amenomori et al. (1996)), HEGRA (Arqueros et al. (2000)), Akeno (Nagano et al. (1984) - Nagano et al. (1992)), CASA-MIA (Glasmacher et al. (1999)), CASA-BLANCA (Fowler et al. (2001)) und DICE (Swordy and Kieda (2000)) sind indirekte Messungen.

Anzahl der Messungen in diesem Bereich noch sehr begrenzt. Bei einer Energie von 5×10^{19} eV wird eine inelastische Pionproduktion in Wechselwirkung mit der kosmischen Hintergrundstrahlung möglich, da die Photonen der 3K-Hintergrundstrahlung, im Ruhesystem eines Protons, eine Energie von $\approx 2 \times 10^8$ eV besitzen. Bei schweren Teilchen wie z.B. den ionisierten Atomkernen der kosmischen Strahlung reicht die Photonenergie im Ruhesystem aus, um Resonanzen anzuregen und damit ein Auseinanderbrechen der Kerne zu induzieren. Da dieser Prozess die Ausbreitung der kosmischen Strahlung verhindern würde, wurde von Greisen, Zatsepin und Kuz'min der nach ihnen benannte GZK-Cutoff vorhergesagt (siehe Greisen (1966) und Zatsepin and Kuz'min (1966)). Dieser besagt, dass die kosmische Strahlung von weit entfernten Quellen die Erde nicht erreichen würden. Nur die Teilchen aus nahe gelegenen Quellen hätten noch die Möglichkeit im Energiespektrum gesehen zu werden. Da es bei den höchsten Energien keine astrophysikalischen Kandidaten für eine solche Quelle existieren, ist ein Abbrechen des Spektrums zu erwarten.

Bisherige Experimente widersprechen sich in der Messung des GZK-Cutoffs. So konnte das AGASA Experiment (siehe Takeda et al. (2003)) diesen nicht feststellen, wohingegen HIRES (siehe Abu-Zayyad et al. (2001), in Übereinstimmung mit den Fly's Eye-Daten, Hinweise auf diesen fand. Das AUGER-Experiment (Abraham et al. (2004)) wird versuchen diese Unstimmigkeiten zu klären.

2.2 Indirekte Messung

Die direkte Messung der kosmischen Strahlung, wie sie z.B. mittels Ballon- oder Satellitenexperimenten durchgeführt werden kann, ist leider nur bis zu einer Energie von 10^{14} eV möglich. Ab dieser Energie ist der Fluss so gering, dass diese Experimente zu kleine Detektorflächen aufweisen.

Die notwendige größere Detektorfläche ist nur noch am Boden zu erreichen. Dies hat allerdings die Konsequenz, dass die kosmische Strahlung durch die Atmosphäre dringen muss bevor sie das Experiment erreichen kann. Leider wird ein in die Atmosphäre eindringendes Teilchen mit einem der Luftmoleküle zusammenstoßen und wechselwirken. Da die Produkte dieser Wechselwirkung wiederum mit Luftmolekülen zusammenstoßen, entsteht ein Teilchenschauer. Dies hat zur Folge, dass am Boden nicht mehr das *Primärteilchen* gemessen werden kann, sondern dieses über eine Schauerrekonstruktion berechnet werden muss. Man spricht von einer indirekten Messung der kosmischen Strahlung.

2.2.1 Teilchenschauer

Nach welcher Distanz in der Atmosphäre das Primärteilchen beginnt einen Teilchenschauer auszulösen, ist abhängig von der durchflogenen Materie und der Wechselwirkungslänge des Teilchens. Diese wiederum ist abhängig von der Art des Teilchens und seiner Energie. Typische Werte sind z.B. für ein Proton mit einer Energie von 10^{15} eV etwa 65 g/cm^2 , für Eisenkerne mit der gleichen Energie etwa 16 g/cm^2 . Bei der Wechselwirkung mit einem Teil der Nukleonen des Luftmoleküls entstehen sogenannte *Sekundärteilchen*. Diese setzen sich zum Großteil aus Pionen, Kaonen und geringen Anteilen aus weiteren Teilchen zusammen. Ihre Anzahl steigt logarithmisch mit der Energie des Primärteilchens, schwankt allerdings je nach genauem Ablauf der Wechselwirkungen.

Die Sekundärteilchen bleiben, im Bezugssystem des Bodens, in einem engen Bündel und wechselwirken im weiteren Verlauf wiederholt mit den Teilchen der Atmosphäre. Durch diese Kettenreaktion entsteht der Teilchenschauer wie er in Abbildung 2.3 dargestellt ist. Außerdem zerfallen viele der Sekundärteilchen in Elektronen, Myonen oder Gammateilchen.

Die Teilchenzahl im Schauer erreicht dabei ein Maximum, wenn die Energie der Wechselwirkungsprodukte sich so verteilt hat, dass keine weitere Teilchenproduktion möglich ist. Nach Erreichen dieses Maximums nimmt die Teilchenzahl durch die Absorption in der Atmosphäre wieder ab. Den Boden erreicht eine nur wenige Meter

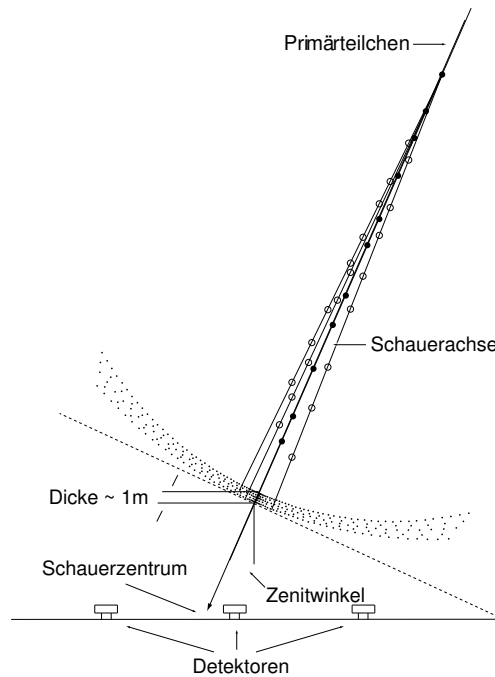


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung eines Luftschauers der kosmischen Strahlung, Alkhofer (1975).

dicke Teilchenfront, ein sogenannter ausgedehnter Luftschauer. Die Ausdehnung des Schauers wird durch die Entstehungshöhe der Sekundärteilchen bestimmt. Er kann je nach Energie von 10 bis zu mehreren 1000 m betragen.

Bei der Beschreibung der Luftschauer unterscheidet man häufig zwischen einer hadronischen Komponente (insgesamt ca. 1% der Schauerteilchen), einer myonischen Komponente (ca. 5%), Elektronen, Positronen und Gammateilchen (zusammen ca. 90%). Kernstück des Schauers stellt dabei die hadronische Komponente mit überwiegend Pionen, Kaonen, Protonen, Neutronen und Kernfragmenten dar. Sie bleibt in der Schauerentwicklung nahe an der Schauerachse, d.h. der verlängerten Richtung des Primärteilchens. Da sie für einen Großteil des Energietransports verantwortlich ist, ist ihre Fluktuation besonders entscheidend für die Entstehung der andern Schauerkomponenten.

Die myonische Komponente, also die im Schauer enthaltenen Myonen, entsteht hauptsächlich durch den Zerfall von Pionen und Kaonen. Da diese in den höheren Atmosphärenschichten eine größere Zerfallswahrscheinlichkeit besitzen und Myonen nur in geringem Maß gestreut oder abgebremst werden, kann durch ihre Messung die frühe Entwicklungsphase des Schauers beobachtet werden. Da die Myonen fast ausschließlich von der Energie und nicht von der Art des Primärteilchens abhängig sind, eignen sie sich gut zur Abschätzung der Energie des Primärteilchens.

Mit ca. 90% der Schauerteilchen stellen Elektronen, Positronen und Gammaquanten die größte Komponente dar. Sie wird die elektromagnetische Komponente genannt und hauptsächlich aus dem Zerfall von neutralen Pionen gebildet. Bei diesem werden zwei Photonen gebildet. Mit der Ausnahme von sehr schräg einfallenden Schauern tragen Elektronen/Positronen aus den Myon- bzw. Kaonzerfällen in wesentlich geringem Maße bei. Die aus den Zerfällen gebildeten Elektronen und Photonen lösen durch Bremsstrahlung und Paarbildung eigene kleine Teilchenschauer aus. Diese Subschauer haben nur eine sehr kurze Lebensdauer, in welcher sie allerdings eine sehr hohe Teilchenmultiplikation besitzen. Diese elektromagnetischen Schauer wurden theoretisch von Kamata and Nishimura (1958) untersucht und berechnet. Die Ergebnisse ihrer Arbeit wurden näherungsweise auch analytisch von Greisen reproduziert (siehe Greisen (1956)).

2.2.2 Radioemission

Die Entstehung der Radiostrahlung in einem Teilchenschauer der kosmischen Strahlung wurde erstmals 1962 vorhergesagt (siehe Askaryan (1962) und Askaryan (1965)) und konnte von Jelley et al. (1965) gemessen werden. Ihre Entstehung im Schauer ist dabei bis heute noch nicht endgültig geklärt. Es gibt zwei mögliche Prozesse, die zu elektromagnetischer Strahlung im Radiofrequenzbereich führen können und nach bisheriger Einschätzung in der Lage wären in größerem Maße zu dieser beizutragen:

Čerenkovstrahlung

Wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, entstehen in der Schauerentwicklung eine große Anzahl von Elektronen und Positronen. Ein Teil der Positronen zerstrahlt in der Atmosphäre und Elektronen aus den Atomen und Molekülen der Atmosphäre werden vom Teilchenschauer abgespalten und mittransportiert. Durch diese Vorgänge entsteht ein negativer Ladungsüberschuß im Schauer. Da sich diese Ladung durch die Atmosphäre mit einer größeren Geschwindigkeit als die Lichtgeschwindigkeit in diesem Medium bewegt, emittiert sie eine elektromagnetische Welle (für weitere Informationen bezüglich des Čerenkoeffekts siehe Jelley (1958)). Dieser Prozess bei der Schauerentwicklung trägt den Namen „Askaryaneffekt“ nach dem Wissenschaftler welcher ihn vorhersagte (siehe Askaryan (1962), Askaryan (1965)). In dichten Medien dominiert dieser Prozess die Entstehung der Radiokomponente.

Kohärente Geosynchrotron Strahlung

Auch für die Theorie der Kohärenten Geosynchrotron Strahlung werden die Elektronen und Positronen aus dem Teilchenschauer als Quelle der Radioemission identifiziert. Diese entstehen im Schauer in Paaren und bewegen sich mit annähernd Lichtgeschwindigkeit weg vom Ort ihrer Entstehung. Bedingt durch das Magnetfeld der Erde werden diese (als negative und positive Ladung) in entgegengesetzte Richtungen abgelenkt. Durch den Synchrotroneffekt wird hierbei von den beiden hochrelativistischen Teilchen eine elektromagnetische Welle emittiert. Wird, unter Berücksichtigung der Überlagerungen der unterschiedlichen Pulse und der Eigenschaften des Schauers, über die Einzelpulse der Vielzahl von kurzzeitig entstehenden Elektron-Positron Paaren summiert, so ergibt sich ein resultierender Radiopuls. Weitere Informationen finden

sich in Falcke and Gorham (2003) bzw. Huege and Falcke (2003).

Die Messung der Radiokomponente ist und war Ziel einer Vielzahl von Experimenten. Nach der ersten Messung 1965 entstanden in den folgenden Jahren eine Vielzahl von darauf aufbauenden Untersuchungen. Diese konnten mittels Polarisationsmessungen (siehe Allan et al. (1969)) Hinweise auf die Dominanz eines vom geomagnetischen Winkel abhängigen Entstehungsprozesses bei Luftschauern finden. Allerdings wurden die meisten Experimente in den 70er Jahren aufgegeben. Dies war durch technische Schwierigkeiten und den Erfolg der Teilchendetektoren bei der Messung der kosmischen Strahlung begründet.

In jüngster Zeit wurden mehrere neue Experimente in diesem Teilbereich der Astroteilchenphysik gestartet. Neben dem im Nançay Radio Observatory aufgebauten CODALEMA-Experiment (siehe Bellétoile et al. (2004)), ist hier insbesondere LOPES (siehe Kapitel 3) zu nennen, in dessen Rahmen diese Arbeit angefertigt wurde. Mit einem Frequenzbereich von 40 MHz bis 80 MHz kann LOPES, nach den Simula-

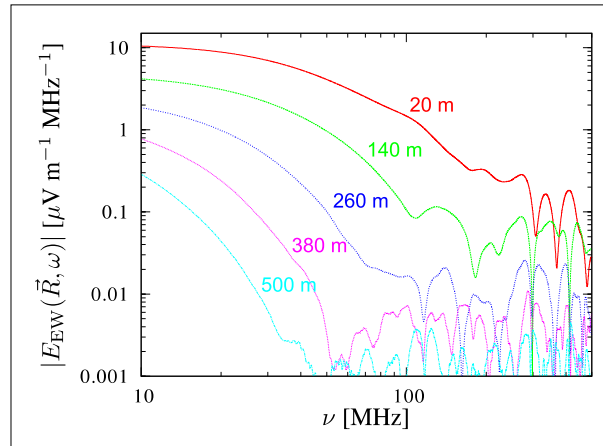


Abbildung 2.4: Emissionsspektrum von einem vertikalen 10^{17} eV bei unterschiedlichen Distanzen zur Schauerzentrum. Aus Huege and Falcke (2005b).

tionen von Huege and Falcke (2005b), eine gute Messung der kohärenten Geosynchrotronstrahlung vornehmen. Abbildung 2.4 zeigt ein Ergebnis der Simulation für einen vertikalen Teilchenschauer mit einer Energie von 10^{17} eV. Es ist zu erkennen, dass, für Schauer innerhalb der Dimensionen des KASCADE-Arrays, bis zu einer Frequenz von 80 MHz gute Messergebnisse zu erwarten sind. Zu beachten ist bei dieser Abbildung, dass den Werten, ab dem Erreichen des ersten Minimums, nicht mehr vertraut werden kann.

Zusätzlich zu diesen Experimenten wird auch die Messung der Radioemission von durch Neutrinos induzierten Teilchenschauer in dichten Medien untersucht (zum Beispiel mit dem RICE Experiment (Kravchenko et al. (2003))). Allerdings überwiegt in diesen Medien die Čerenkovstrahlung bei der Entstehung der Radiokomponente.

2.3 KASCADE-Grande

KASCADE (**K**arlsruhe **S**hower **C**ore and **A**rray **D**etector) ist ein Experiment zur indirekten Messung von kosmischer Strahlung. Es befindet sich auf dem Gelände des Forschungszentrums Karlsruhe. Das ursprüngliche KASCADE Experiment wurde inzwischen zum heutigen KASCADE-Grande erweitert. Mit der Betrachtung der kosmischen Strahlung im Energiebereich von 10^{14} eV bis 10^{18} eV untersucht KASCADE-Grande das bereits erwähnte Knie. Insbesondere ist man an der chemischen Zusammensetzung der kosmischen Strahlung interessiert.

Das Experiment besteht aus mehreren Komponenten mit jeweils unterschiedlichen Detektoren. Dies hat den Vorteil, dass die Konsistenz der Einzelmessungen überprüft werden kann und die Redundanz der Messung erhöht. Außerdem lassen sich durch diesen Ansatz auch unterschiedliche Hochenergiewechselwirkungsmodelle überprüfen, die zur Interpretation der sekundären Schauerteilchen unablässig sind. Die Komponenten sind das Detektorfeld, der Myonenspurdetektor, der Zentraldetektor und das Grande-Feld. In Abbildung 2.5 ist eine Übersicht der gemischten Anordnung gegeben. Eine detailliertere Darstellung von KASCADE-Grande findet sich in Antoni et al. (2003) und Navarra et al. (2004).

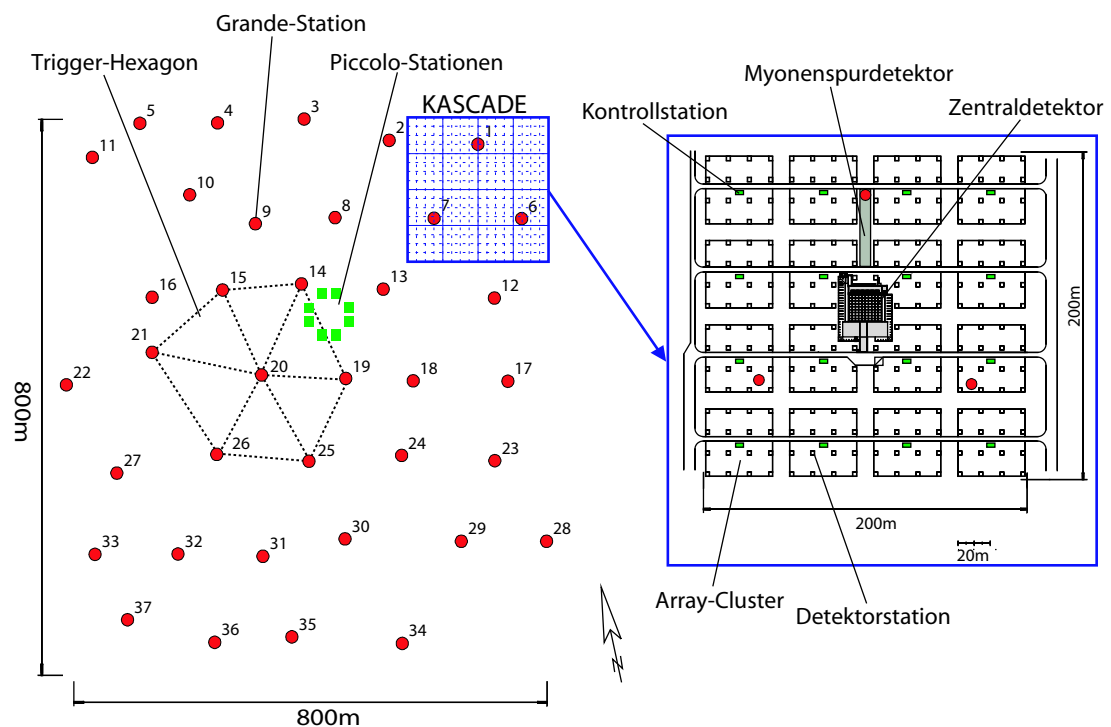


Abbildung 2.5: Layout KASCADE-Grande. Im rechten Bildabschnitt wurde das Detektorfeld vergrößert dargestellt.

2.3.1 Das KASCADE-Array

Beim Detektorfeld handelt es sich um ein $200 \times 200 \text{ m}^2$ großes Array mit 252 gleichmäßig verteilten Detektorstationen (Hütten). Diese sind in auf einem rechtwinkligen Gitter mit einem Abstand von 13 m angeordnet (siehe Abbildung 2.5). Immer 16 der Hütten sind zu einem Cluster zusammengefasst (bzw. 15 Hütten bei einem der inneren Cluster um den Zentraldetektor). Jeder dieser Cluster sendet seine Signale zu einer der 16 Kontrollstationen. Dort werden die Daten gesammelt und digitalisiert. Hier können sie von der zentralen Datenerfassung im Zentralgebäude abgerufen werden.

In den Hütten kommen als Detektor zwei unterschiedliche Szintillationszähler zum Einsatz. Es handelt sich dabei um e/γ -Detektoren zum Nachweis der elektromagnetischen Komponente und mit Eisen abgeschirmte Zähler, die als Myondetektoren fungieren.

e/γ -Detektoren

In dem in Abbildung 2.6 dargestellten Detektor, befindet sich am Boden eine etwa 5

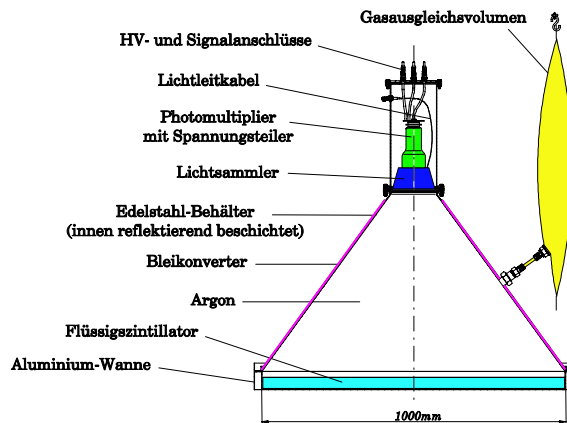


Abbildung 2.6: Querschnitt durch einen e/γ Detektor.

cm hohe Flüssigszintillatorschicht. Um eine Oxidation des Szintillators zu vermeiden ist das Kegelvolumen mit Argon gefüllt.

Myondetektoren

Im Unterschied zum e/γ -Detektor handelt es sich hierbei um einen Plastiksintillator (siehe Abbildung 2.7). Er besteht aus vier $90 \times 90 \text{ cm}^2$ großen Szintillatorplatten. An jeder Plattenseite befinden sich Wellenlängenschieberstäbe, welche das Licht auskoppeln und zu den Photomultipliern leiten. Jeder der Photomultiplier liest dabei die Signale von zwei Detektorplatten aus.

Nur die 192 äußeren Hütten sind mit beiden Detektortypen ausgestattet. Wie in Abbildung 2.8 dargestellt, befinden sich hier die Myondetektoren am Boden der Hütte. Über ihnen befinden sich zwei Absorberschichten aus Blei bzw. Eisen. Zusammen ergeben sie eine Abschirmung von 20 elektromagnetischen Strahlungslängen. Dies

2 Die kosmische Strahlung und deren Messung

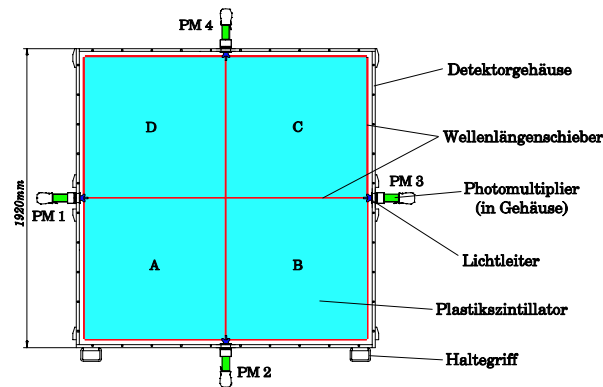


Abbildung 2.7: Aufsicht auf einen Myondetektor.

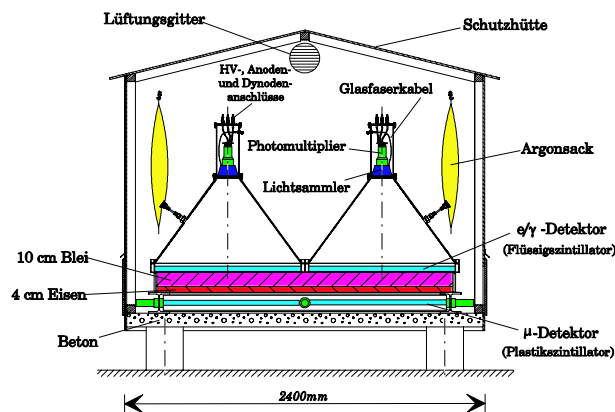


Abbildung 2.8: Querschnitt durch eine der äußeren Detektorstationen.

soll das Eindringen von Gammateilchen, Elektronen und Positronen weitgehend verhindern. Darüber befinden sich je zwei der e/γ -Detektoren. Den 60 inneren Hütten fehlen die Myondetektoren, dafür verfügen sie über vier e/γ -Detektoren.

Die Daten der Einzeldetektoren müssen aufgrund ihrer hohen Rate vorselektiert werden. Man spricht hierbei von einem sogenannten Trigger, also einer Bedingung unter welcher, die gemessenen Daten innerhalb eines definierten Zeitfensters gespeichert werden. Im Detektorfeld wird hierfür ein Clustertrigger verwendet. Im Detail bedeutet dies, dass in einem ersten Schritt für jeden Einzeldetektor eine Diskriminatorschwelle definiert wurde. Erreicht eine Mindestanzahl an Detektoren eines Clusters diese Schwelle, so gibt diese ein Triggersignal an die zentrale Datenerfassung, welche dann alle Cluster und die restlichen Komponenten von KASCADE-Grande ausliest. Für eine ausführlichere Darstellung der Datenerfassung und Elektronik des Detektorfeldes wird auf Schieler (1996) und Antoni et al. (2003) verwiesen.

2.3.2 Das Grande-Feld und weitere Komponenten

Um eine Messung von Energien bis zu 10^{18} eV zu ermöglichen, musste die ursprüngliche Fläche von KASCADE um das Grande-Feld erweitert werden (siehe auch Haungs et al. (2005)). Dieses besteht aus 37 Stationen, welche über das Gelände des Forschungszentrums Karlsruhe verteilt sind. Sie stehen in einem Abstand von ungefähr 130 m zueinander auf einer Gesamtfläche von $\approx 0.5 \text{ km}^2$.

Innerhalb des Grande-Feldes wurde noch zusätzlich das Piccolo-Feld installiert (siehe Abbildung 2.5).

Der, in der Mitte des KASCADE-Detektorfeldes gelegene, Zentraldetektor, besteht aus einem mehrlagigen Messsystem, welches insbesondere der Detektion des hadronischen Schauerkerne dient (siehe auch Bozdog et al. (2001)). Innerhalb des KASCADE-Arrays befindet sich der Myonenspurdetektor, bestehend aus 3 Lagen Limited-Streamer-Tube-Detektoren. Durch die Messung der Myonenspuren ist es möglich, unter Berücksichtigung der Schauerachse, die Produktionshöhe der Myonen zu bestimmen (siehe auch Doll et al. (2002)).

KASCADE-Grande ist eines der weltweit führenden Experimente zur Messung kosmischer Strahlung im Energiebereich bis 10^{18} eV. Durch langjährige Messungen konnte ein großer Erfahrungsschatz aufgebaut und eine sehr hohe Genauigkeit erzielt werden.

Diese Erfahrungen boten KASCADE-Grande auch zur Erprobung von neuen Messmethoden an. Hier ist insbesondere die Messung der Radiokomponente von Teilchenschauer zu nennen, da mit LOPES bereits ein Experiment zu deren Messung angebunden wurde. Dies war möglich da die Radiokomponente bisher ab einer Primärteilchenenergie von $10^{16.5}$ eV nachgewiesen werden konnte. Im kommenden Kapitel wird die Anbindung von LOPES an KASCADE-Grande näher eingegangen werden.

2 Die kosmische Strahlung und deren Messung

3 LOPES



3.1 Geschichte und Motivation

In den späten 70er Jahren waren die meisten Experimente zur Messung der Radio-komponente in Teilchenschauern aufgegeben worden. Dies war vor allem durch den starken Radiohintergrund und Unsicherheiten über die physikalische Interpretation der Ergebnisse begründet. Außerdem waren andere Methoden zur Messung der kosmischen Strahlung erfolgsversprechender.

Im Jahr 2003 griffen Falcke and Gorham (2003) das Thema der Radioemission wieder auf und stellten die These, dass es mit Hilfe eines modernen Radioteleskop-Arrays möglich sei, kosmische Strahlung zu messen. Sie wollten dabei auf ein Experiment aus dem Bereich der Radioastronomie, das in der Planung befindliche LOFAR (“Low-Frequency Array”), zurückgreifen.

Allerdings sollte, noch bevor LOFAR als Detektor für kosmische Strahlung eingesetzt oder ein selbständiges Experiment aufgebaut werden konnte, eine Teststation an ein bereits existierendes Teilchendetektorarray angeschlossen werden. Diese Herangehensweise hat mehrere Vorteile:

Da die Datenmenge eines “frei” laufenden Radioantennenarrays zu groß und zu unübersichtlich wäre, um sie 24 Stunden am Tag aufzunehmen, muss bereits während der Messung eine Vorselektierung vorgenommen werden. Zu diesem Zweck wird eine Bedingung definiert damit die Daten gespeichert werden. Dieser Auslöser (im Folgen-

den wird das gebräuchliche englische Wort Trigger verwendet) würde dazu führen, dass beide Experimente über Messdaten vom gleichen Teilchenschauer verfügen. Dies ermöglicht die Daten miteinander zu vergleichen und somit bei der Radiomessung auf die bereits bekannten und verstandenen Ergebnisse der Teilchendetektoren zurückzugreifen. Daraus ergibt sich direkt, dass Korrelationen für das Radiosignal mit dem Teilchenschauer untersucht werden können. Ferner würde es eine solche Konstellation ermöglichen einen eigenständigen Radiotrigger zu entwickeln und zu testen.

Der zentrale Vorteil ist aber, dass es durch diese Kombination möglich ist, die Korrelation zwischen Radiopulsen und Teilchenschauern zu zeigen. Hier können auch Modelle zur Entstehung der Radiopulse überprüft werden und die Korrelation zwischen dem Radiopuls und der Primärenergie, der Schauerachse und der Masse des Primärteilchens rekonstruiert werden. Mit diesen Begründungen wurde beim KASCADE-Grande Experiment in Karlsruhe LOPES (**LO**FAR **P**rototype **S**tation) installiert. Es bestand zu Beginn aus 8 Antennen, wurde in den folgenden Jahren zuerst auf 10, dann auf 30 Antennen erweitert. An LOPES arbeite eine internationale Kollaboration, deren aktuelle Mitglieder im Literaturverzeichnis bei Falcke et al. (2005) aufgeführt werden.

3.2 LOFAR

Da LOPES als Prototyp Station für LOFAR gestartet ist, wird hier dieses Experiment kurz beschrieben: LOFAR (**L**ow **F**requency **A**rray) ist ein Experiment zur Messung von extraterrestrischen Radioquellen und in den Bereich der Astronomie anzusiedeln.

Das Experiment wird breitbandig bei niedrigen Radiofrequenzen von 10 MHz bis 240 MHz messen. Dabei besteht das Array aus zwei Antennensystemen. Das erste für 10-90 MHz, das zweite für 110-240 MHz. Bei den Antennen handelt es sich um Inverted-V Dipole wie sie in Abschnitt 4.2.1 beschrieben sind. Sie werden in Antennenfeldern, sogenannten Stationen, mit einem effektiven Radius von 50 m bis 150 m installiert. Jede Station besitzt einen Zentralrechner, der eine erste Bearbeitung, der von den Antennen gelieferten Datenmengen, vornimmt. Man spricht dabei von einem sogenannten Beamforming. Praktisch handelt es sich dabei um die Betrachtung eines bestimmten Abschnitts des Himmels. Es wird möglich sein bis zu 8 solcher Himmelsabschnitte gleichzeitig zu betrachten.

Die so bearbeiteten Daten werden dann über Glasfaserkabel zum Zentralrechner gesendet. Insgesamt sind ungefähr 100 solcher Antennenstationen geplant, welche über eine Fläche mit 400 km Durchmesser (siehe Abbildung 3.1) verteilt sein werden.

Als wissenschaftliche Ziele hat sich LOFAR unter anderem die Suche nach den Quellen und der Epoche der kosmologischen Reionisation gesetzt. Gleichbedeutend sind auch Fragen nach der Bildung und Entwicklung von Galaxien und Aktiver Galaktischer Kerne. Hinzu kommt die Suche nach transienten Quellen und hochenergetischen kosmischen Objekten. Außerdem war die Forschung nach dem Ursprung von hochenergetischer kosmischer Strahlung geplant. Für eine ausführlichere Darstellung von LOFAR wird auf Röttgering (2003) und Röttgering et al. (2003) verwiesen.



Abbildung 3.1: Vorläufiger Übersichtsplan LOFAR in den Niederlanden: Die Sterne repräsentieren die Stationen, die sie verbindenden Linien die optischen Kabel. Die roten Quadrate entsprechen Ansiedlungen und Städten. Bild entnommen aus Röttgering (2003).

3.3 LOPES - Aufbau

LOPES besteht aus 30 Antennen, die über das KASCADE-Array aufgebaut sind (siehe Abbildung 3.2). Je zehn dieser Antennen sind mit einer der Elektronik-Kontrollstationen des KASCADE-Arrays verbunden. In diesen befindet sich auch die Elektronik und PCs zur weiteren Datenverarbeitung von LOPES. Schließlich werden die Daten an die zentrale DAQ (**D**ata **A**cquisition = Datenerfassung) weitergegeben.

Es wurden vier Antennen (Nr. 27 bis Nr. 30) außerhalb des KASCADE-Arrays platziert, da die Messstationen des Arrays leider einen nicht unerheblichen Störeinfluss auf die Radiomessung haben. Bis zu einem Abstand von ca. 10 m wurde insbesondere die Elektronik der Hütten als Störquelle identifiziert. Mit Hilfe der vier außerhalb liegenden Antennen ist hier eine störungsfreiere Messung möglich. In Zukunft sollen allerdings die Störeinflüsse der Hüttenelektronik minimiert werden.

3.4 LOPES - Elektronik

Die folgende Beschreibung der von LOPES verwendeten Elektronik orientiert sich an Horneffer et al. (2004). Der Frequenzbereich von LOPES wurde auf 40 MHz bis 80 MHz festgesetzt. Es gibt in diesem Frequenzband nur wenige menschlich verursachte Radioquellen, da es sich zwischen dem Kurzwellenband (3 MHz bis 30 MHz) und

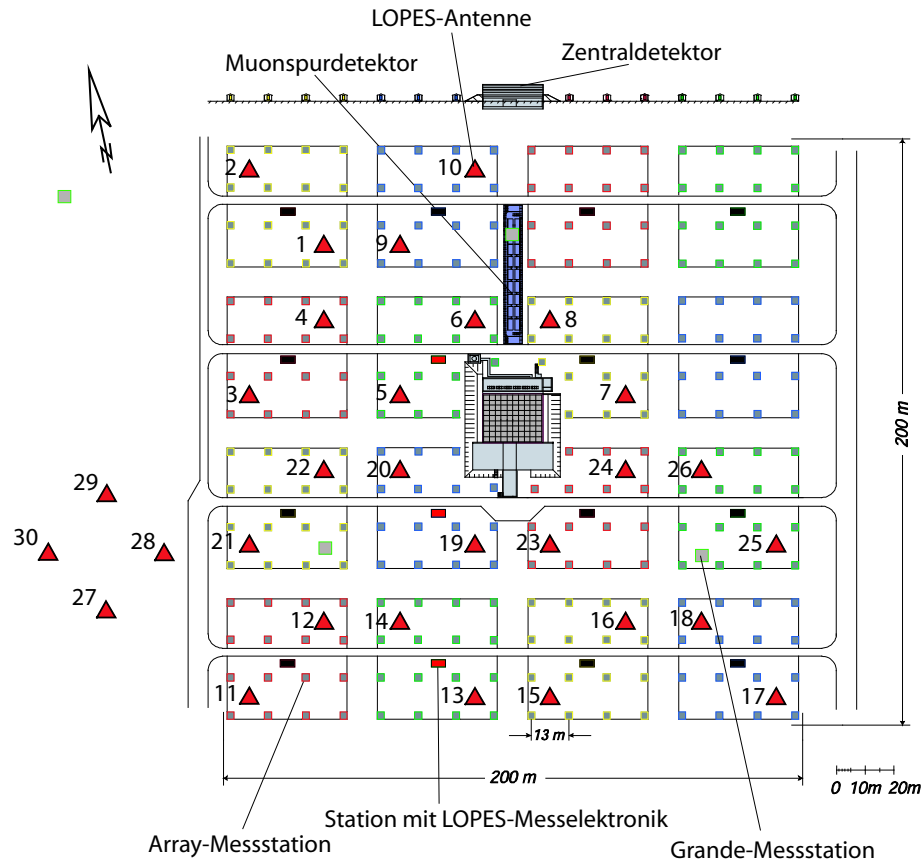


Abbildung 3.2: Übersichtsplan LOPES: Die roten Dreiecke repräsentieren die Antennen. Die zentralen LOPES-Rechner befinden sich in den rot markierten Rechtecken.

dem VHF2-Band (87,5 MHz bis 108,0 MHz) befindet. Da außerdem in diesem Bereich die Ionosphäre transparent ist und kaum noch Bodenwellen entstehen, sind hier nur nahe terrestrische Störungen zu finden. Im Allgemeinen sollten nur Störsender bis zum Horizont gesehen werden. Dies entspricht zwar nur zum Teil den tatsächlichen Gegebenheiten (es findet sich ein weit entfernter TV-Sender bei 62,25 MHz), aber bis auf wenige Ausnahmen zeigen sich keine großen Störquellen. Vorhanden sind im Frequenzband kleinere Störungen durch das technische Umfeld. Insbesondere die Störung vom KASCADE-Detektorfeld muss hier genannt werden, die zeitgleich mit der Datennahme eines Radiosignals emittiert wird. Zusätzlich gibt es die natürlichen Störquellen wie z.B. Synchrotronstrahlung von Teilchen im Erdmagnetfeld, Radiostrahlung aus der Galaxis oder die 3K Hintergrundstrahlung. Eine Skizze der Elektronik kann in Abbildung 3.3 gesehen werden. Die einzelnen Teile der Elektronik sind:

Antenne Bei den LOPES-Antennen handelt es sich um sogenannte Inverted-V Di-

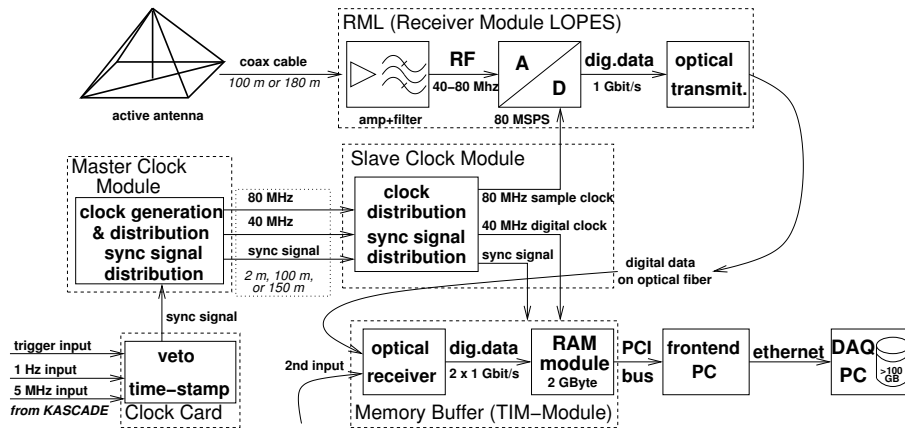


Abbildung 3.3: Hardwareschema LOPES

polantennen (siehe auch 4.2.1). Die beiden Dipolarme sind Kupferkabel mit einer Länge von 1 m. Sie befinden sich in einer Halterung in Form einer Pyramide aus 4 PVC-Rohren (Abbildung zu Beginn dieses Kapitels). Die Antennen sind in Ost-West Richtung polarisiert. Ihre relative Position wurde mittels eines differentiell arbeitenden GPS ermittelt. Zum Schutz der Antennen steht die Halterung auf einem Metallgestell aus Aluminium. Da das Gestell zudem das Radiosignal auch bei unterschiedlichen Wetterverhältnissen gleich reflektiert, verhindert es auch größere Einflüsse des darunter liegenden Erdbodens. Dieser besitzt, je nach Feuchte, unterschiedliche Reflektions- und Absorptionsfaktoren.

LNA Die beiden Dipolarme der Antenne werden direkt in einen Vorverstärker geführt. Dieser sogenannte LNA (Low Noise Amplifier) ist so konstruiert, dass er möglichst wenig Rauschen erzeugt.

Receiver Module LOPES(RML) Das Receiver Module LOPES übernimmt die elektronische Vorverarbeitung des Signals und dessen Analog-Digital-Wandlung. Dabei wird das Signal zuerst verstärkt und dann an einen Frequenzfilter gegeben.

Frequenzfilter Dieser Filter soll alle Frequenzen unterhalb von 40 MHz und oberhalb von 80 MHz entfernen und dabei das Signal zwischen diesen Werten unverändert lassen. In der Praxis ist dies leider nicht möglich und die Leistung im Messbereich von LOPES wird frequenzabhängig abgeschwächt. Diese Veränderung des Eingangssignals durch den Frequenzfilter ist eine der stärksten innerhalb der Elektronik und muss, zusammen mit anderen Veränderungen, mit Hilfe der Ergebnisse der absoluten Kalibration wieder entfernt werden. (Für weitere Informationen zum Verhalten von Frequenzfiltern siehe Meinke and Gundlach (1992, S. L59).)

Analog-Digital Wandler (ADC) Der ADC wandelt das eingehende Signal in ein digitales um. Das bedeutet er übersetzt die an ihn angelegte Spannung in Zählereinheiten (Counts). Jeder Count steht dabei für eine bestimmte Spannung in einer festen Zeiteinheit. Wichtig ist an dieser Stelle, dass die sogenannte Abtastfrequenz, d.h. die Länge der Zeiteinheiten, zentral vom sogenannten Master-Clock-Module an alle ADCs gegeben wird.

Optischer Transmitter Das digitalisierte Signal wird in ein optisches Signal umgewandelt. Es kann dann über Glasfaserkabel transportiert werden.

Optische Übertragung Von den RML wird das Signal über ein optisches Kabel zu den Twin Input Modulen übertragen.

Memory Buffer (Twin Input Module - TIM) Nach der optischen Übertragung werden die digitalen Daten von zwei RML in einer Memory Buffer Karte gespeichert. Diese dient zum Zwischenspeichern der Daten und kann bis zu 2 GByte enthalten. Dies ist ausreichend um etwa 6.25 Sekunden LOPES-Daten zu sichern. Ein bis zwei dieser Karten sind über einen Standardanschluß (PCI) mit einem LOPES-PC verbunden. Bis zu diesem Memory Buffer wurde immer der gesamte Datenstrom von LOPES verarbeitet. Dieser Datenstrom wird hier für eine kurze Zeit gespeichert und wieder gelöscht, wenn er von den LOPES-PCs nicht ausgelesen wird.

LOPES-PC Wenn von KASCADE-Grande ein Trigger gesendet wird, lesen die LOPES-PCs die Daten aus dem Memory Buffer und speichern sie so lange im Speicher bis sie vom zentralen DAQ-PC abgeholt werden. Ausgelesen werden jeweils 0,41 Millisekunden vor und nach der Ankunft des Triggersignals. Damit werden insgesamt 0,82 Millisekunden pro Triggersignal abgespeichert.

DAQ-PC Die DAQ (**D**ata **a**cquisition = Datenerfassung) ist ein weiterer PC, welcher die Daten der einzelnen LOPES-PCs sammelt und zu einem Ereignis kombiniert. Ein solches Ereignis ist eine Datei mit den Messdaten und einer Angabe über den Zeitpunkt an welchem es aufgenommen wurde. Es hat eine Größe von 3.8 MByte für 30 Antennen.

Clock-Boards Die Clock-Card, das Master-Clock-Module und die Slave-Clock-Modules dienen zum generieren der Taktsignale, zum Empfang und zur Weiterverteilung des KASCADE-Triggers. Ihre Reihenfolge ist wie folgt:

Clock-Card Empfängt den Trigger und die Synchronisationssignale von KASCADE-Grande. Sie generiert einen Zeitstempel und gibt diesen zusammen mit dem Trigger an das Master-Clock-Module.

Master-Clock-Module Neben der Weiterleitung des Triggers an die Slave-Clock-Modules, generiert dieses Modul außerdem die Abtastfrequenz für alle ADCs.

Slave-Clock-Module Diese verteilen das Synchronisationssignal an die Memory Buffer von je 10 Antennen und geben die Abtastfrequenz an die RML.

Zusammenfassung des Signalwegs einer ankommenden Radiowelle:

1. Empfang der elektromagnetischen Welle in der Antenne und Vorverstärkung der entstandenen Spannung im LNA direkt nach der Antenne.
2. Transport des Signals durch 100 m bzw. 180 m Koaxialkabel (je nach Antenne) in das Receiver Module (RML).
3. Im RML werden die Signale elektronisch vorbearbeitet (Verstärkung + Frequenzfilter).
4. Das digitalisierte Signal wird über ein Glasfaserkabel an die TIM-Module weitergegeben. Dort werden sie für bis zu 6.25 Sekunden zwischengespeichert.
5. Kommt nun ein Trigger vom KASCADE-Array in der Clock-Card an, so wird er über das Master-Clock-Module und das Slave-Clock-Module an die einzelnen TIM-Module weitergegeben.
6. Daraufhin werden die Daten von 0,82 Millisekunden um die Ankunftszeit des Triggers im Speicher der LOPES-PCs gespeichert.
7. Die DAQ auf dem Hauptrechner sammelt die Daten von den LOPES-PCs und speichert sie in einer Event-Datei ab. Diese Dateien werden jede Nacht von der DAQ auf zwei Datenspeicher zur permanenten Sicherung kopiert.

3.5 Status und Ausblick von LOPES

Durch die Datennahme von LOPES 10, d.h. den Aufbau mit nur 10 der heutigen 30 Antennen, ist es bereits möglich erste wichtige Untersuchungen durchzuführen. Dabei war für diese Daten eine Kalibration der Signallaufzeiten, aber keine absolute Kalibration vorhanden. Im Folgenden wird auf die Artikel von Falcke et al. (2005) und Horneffer et al. (2004) Bezug genommen.

Für erste Untersuchungen wurden aus der Datennahme des ersten halben Jahres 15 Events ausgewählt. Diese, auf den ersten Eindruck geringe Zahl, kommt durch eine Vielzahl von Kriterien zustande, welche gewählt wurden um die Qualität der Ergebnisse sicher zu stellen. Es wurden dabei nur Kriterien auf die vom KASCADE-Array rekonstruierten Teilchenschauerparameter angewendet. Dabei wurde gefordert, dass der Zenitwinkel kleiner als 44° ist, das Schauerzentrum maximal 75 m vom Zentrum von LOPES entfernt die Erde erreichte und die Energie des Primärteilchens größer als ca. 10^{17} eV ist.

Es war, aufgrund der zu diesem Zeitpunkt noch fehlenden Kalibrierung, nicht möglich einen direkten Vergleich der gemessenen zu den simulierten Messwerten (siehe Huege and Falcke (2003), Huege and Falcke (2005a) und in Huege and Falcke (2005b)) herzustellen. Allerdings liess sich, über die Auswertung der Daten in Richtung der von KASCADE-Grande rekonstruierten Schauerdaten, eine Korrelation zwischen den Messungen herstellen.

3 LOPES

Hierfür wurde für die LOPES-Daten ein sogenanntes Beamforming durchgeführt. Dies bedeutet, dass in einem ersten Schritt die Richtung des Radiopulses als bekannt vorausgesetzt wurde. Diese erste Abschätzung wurde mittels der KASCADE-Grande Daten durchgeführt. Unter dieser Annahme ist es möglich, den Zeitpunkt, zu welchem LOPES einen Radiopuls aus dieser Richtung empfangen hat, zu berechnen und die Messdaten um diese unterschiedlichen Laufzeiten zu verschieben. Es sollte sich dann ein kohärenter Radiopuls zu dem Zeitpunkt zeigen zu welchem KASCADE-Grande den Teilenschauer gemessen hatte. Sollte dies nicht der Fall sein oder der Puls nur sehr schlecht sichtbar sein, so kann die Ankunftsrichtung minimal verändert werden bis der Radiopuls deutlich zu erkennen ist. In Abbildung 3.4 ist die Durchführung einer solchen Analyse dargestellt.

Dabei lagen die Abweichungen zwischen den beiden Experimenten in der Bestim-

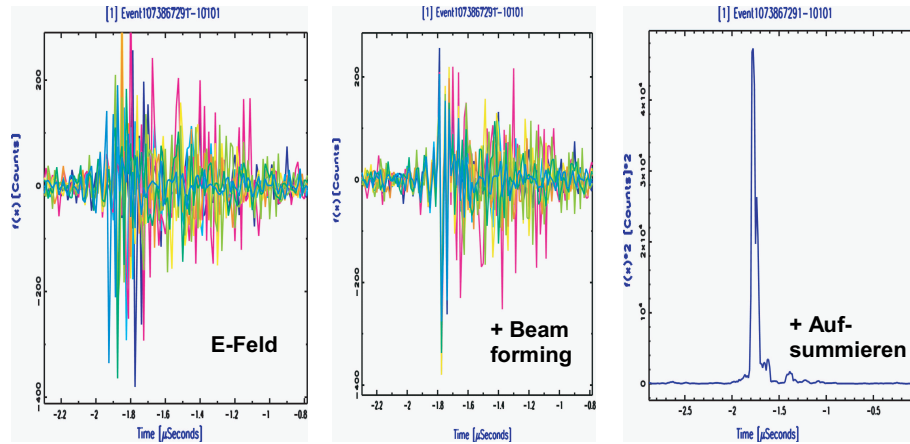


Abbildung 3.4: LOPES-Analyse. Rechts: Überlagerte Rohdaten von 8 Antennen im Zeitraum (Counts der ADC über Zeit), Mitte: Nach Korrektur um die berechneten Laufzeiten, Rechts: Aufsummiertes und dann quadriertes Signal aller 8 Antennen.

mung der Schauerrichtung bei $0.8^\circ \pm 0.4^\circ$. Zu jedem der 15 ausgewählten Events konnte ein deutlicher Radiopuls gefunden werden.

Bei der Untersuchung der Daten zeigte sich außerdem, dass eine Korrelation zwischen der Höhe des Radiopulses und der Anzahl der vom KASCADE-Array gemessenen Myonen und eine weitere zwischen der Höhe des Radiopulses und dem geomagnetischen Winkel festgestellt werden konnte. Um diese Korrelationen zu trennen, wurde die Abhängigkeit vom geomagnetischen Winkel aus den Daten entfernt. Dadurch ergab sich eine signifikante Verbesserung der ersten Korrelation. Dies stimmt mit den theoretischen Vorhersagen von Falcke and Gorham (2003) überein, welche vorausagten, dass die elektrische Feldstärke linear von der Energie des Primärteilchens abhängig sein sollte. Abbildung 3.5 zeigt den deutlichen Effekt der Korrektur. Die in der Abbildung aufgetragene Anzahl der vom KASCADE-Array gemessenen Myonen

ist fast linear abhängig von der Primärteilchenenergie.

Diese sehr deutliche Abhängigkeit zeigt, dass die Messung von kosmischer Strahlung

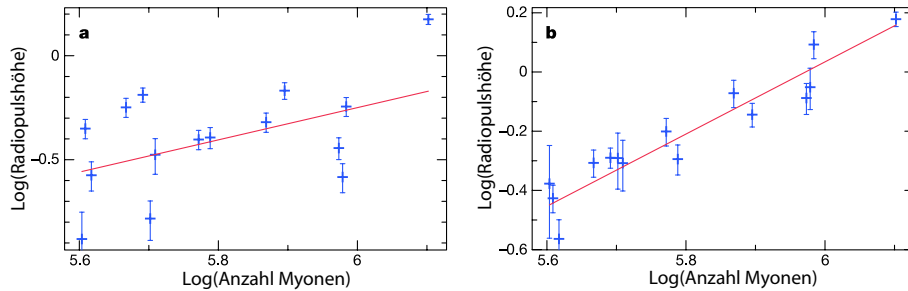


Abbildung 3.5: Korrelation zwischen Elektrischer Feldstärke und der Anzahl der gemessenen Myonen. Links: Unkorrigierte Darstellung. Rechts: Korrektur durch Entfernen der Korrelation zwischen geomagnetischen Winkel und der Feldstärke.

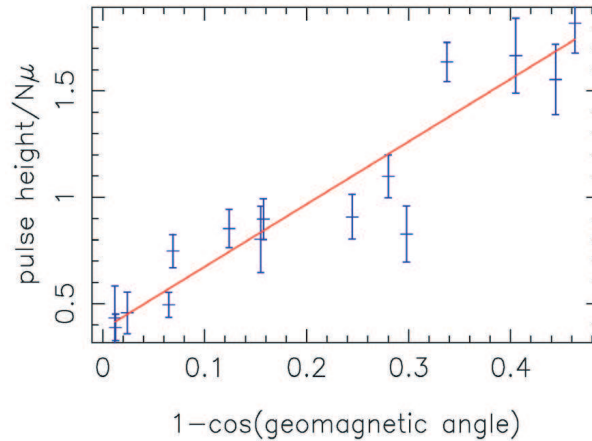


Abbildung 3.6: Korrelation zwischen Elektrischer Feldstärke und dem geomagnetischen Winkel.

mittels der verwendeten Hardware tatsächlich möglich ist und beantwortet die Frage nach der prinzipiellen Anwendbarkeit dieser Methode.

Die zweite Korrelation (siehe Abbildung 3.6) zum geomagnetischen Feld wurde in den Simulationen bereits als Effekt der nur linear polarisierten LOPES-Antennen vermutet. Sie zeigt, dass die Entstehung der Radiokomponenten in Teilchenschauern durch die Wechselwirkung mit dem Erdmagnetfeld zusammenhängt.

In Kürze werden im Rahmen eines weiteren Projekts weitere Radioantennen mit einer eigenen Ausleseelektronik installiert (siehe auch Gemmeke et.al (2005)). Da dieses Projekt über logarithmisch periodische Dipolantennen verfügt, werden Untersuchungen nach der Eignung der unterschiedlichen Antennentypen möglich werden.

Zusätzlich wird es möglich sein, durch den Vergleich der gemessenen Daten, systematische Unterschiede der beiden Elektroniksysteme zu untersuchen.

Die Messung der Radiokomponente der kosmischen Strahlung verspricht in Zukunft weitere interessante Ausblicke. So können Radioantennen zu bestehenden Detektorsystemen hinzugefügt werden, um deren Ortsgenauigkeit zu erhöhen und die Studie der Schauerkomposition zu verbessern. Die Anzahl der Elektronen eines Schauers ist mit einem Teilchendetektor nur schwer zu messen, da diese den Erdboden nur selten erreichen. Allerdings sind sie direkt von der Energie des Primärteilchen abhängig und könnten weitere Informationen über diese liefern. Da anscheinend ein direkter Zusammenhang zwischen der Anzahl der Elektronen und Positronen im Teilchenschauer und der Radiokomponente existiert, sollte es möglich sein aus der Radiomessung deren Anzahl zu bestimmen. Mit dem Verhältnis zwischen den von den Teilchendetektoren gemessenen Myonen und der dann von den Radioantennen ermittelten Anzahl von Elektronen/Positronen kann die Bestimmungsgenauigkeit der Teilchenart verbessert werden. Bei konstanter Energie wäre die Myonenzahl eines Eisenschauers deutlich höher im Vergleich zu einem Protonschauer, während die Anzahl der Elektronen fast konstant bliebe.

4 Kalibration von Radioantennen

4.1 Grundlagen

Im folgenden Kapitel wird auf die für diese Arbeit grundlegenden physikalischen und technischen Begriffe einer Antennenkalibration eingegangen. Allgemeine Grundbegriffe können z.B. bei Jackson (1999) nachgelesen werden.

4.1.1 Antennenzonen

Ein wichtiger Begriff in der Antennentechnik ist der Begriff des Nah- oder Fernfeldes. Leider gibt es hierfür keine einheitliche Definition. Im Folgenden wird die Notation von Nolting (1997) verwendet.

Die *Fernfeldbedingung* beschreibt die minimale Entfernung die ein Betrachter zur Quelle einer elektromagnetischen Welle haben muss, um diese nicht mehr als Kugelwelle, sondern als ebene Welle zu sehen. Ebene Welle bedeutet, dass die Wellenfronten, dh. die Maximas des E- oder B-Feldes der elektromagnetischen Welle, parallele Geraden sind. Bei einer ebenen Welle kann die Position der Quelle nicht mehr rekonstruiert werden.

Ab welcher Entfernung r man von Fernfeld reden kann, ist nur schwer festzulegen. Auch bei großen Distanzen zum Betrachter kann, bei ausreichend genauen Messungen, der Kugelcharakter der Welle zum Bestimmen der Quellenposition verwendet werden. Diese Arbeit wird sich an dieser Stelle an Meinke and Gundlach (1992) orientieren, wo die Grenze für Antennen mit der größten geometrischen Abmessung D_0 mit näherungsweise

$$r = 2\frac{D_0^2}{\lambda}, D_0 > \lambda$$

angegeben ist. Kann die Bedingung $D_0 > \lambda$ nicht erfüllt werden, so muss $r \approx \frac{\lambda}{2\pi}$ verwendet werden. Für eine Antenne die $D_0 > \lambda$ nicht erfüllt wird ein Mindestabstand von einer Wellenlänge angenommen.

Zwischen dem Fernfeld und dem Nahfeld einer Antenne liegt die *intermediäre Zone*. Die elektromagnetische Welle kann hier nicht mehr als ebene Welle angenommen werden, kann jedoch noch als Kugelwelle approximiert werden. Dies bedeutet, dass die Welle scheinbar von einem einzelnen Punkt ausgeht und damit die Geometrie der Antenne nicht mehr aus der Wellenform rekonstruiert werden kann. Der scheinbare Ursprung einer solchen Kugelwelle liegt im Schnittpunkt der verlängerten Poyntingvektoren, im so genannten Phasenzentrum. Er liegt in den meisten Fällen innerhalb der realen Antenne. Beim Beispiel eines Dipols liegt er direkt am Schnittpunkt der beiden Arme.

4 Kalibration von Radioantennen

Die Grenze zur intermediären Zone beginnt ungefähr bei einem Abstand zur Quelle von

$$r = 0.62 \sqrt{\frac{D_0^3}{\lambda}}, D_0 > \lambda$$

Sie „endet“ mit dem Beginn des Fernfeldes.

Direkt an der Antenne liegt das sogenannte Nahfeld einer Antenne. Hier werden die einzelnen Teile der Antenne noch als separate Emissionsquellen wahrgenommen. Beim Beispiel eines einfachen Dipols empfängt ein sich im Nahfeld befindlicher Betrachter unterschiedliche Signale von den beiden Dipolarmen. Da in dieser Zone die Geometrie der Antenne eine sehr große Rolle spielt, werden nur selten Messungen in diesem Bereich vorgenommen. Auch bei den in dieser Arbeit vorgestellten Messungen wurde die Messung im Nahfeld vermieden.

In Abbildung 4.1 sind die drei Antennenzonen des elektromagnetischen Feld eines einfachen Dipols dargestellt. Eingezeichnet sind exemplarisch jeweils drei Wellenfronten.

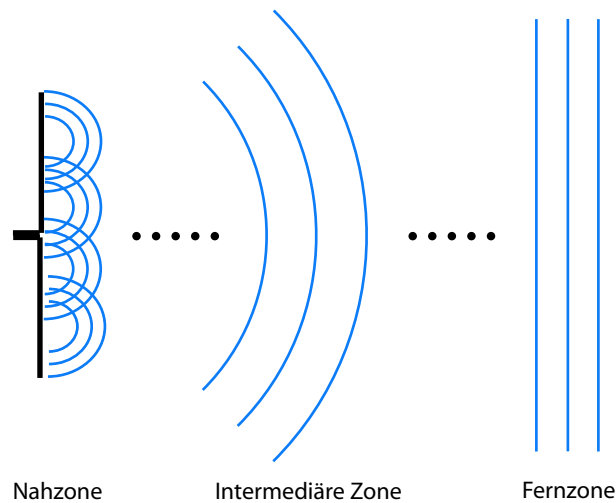


Abbildung 4.1: Antennenzonen am Beispiel eines Dipols

4.1.2 Richtfaktor und Antennengewinn

Bei der folgenden Behandlung von Antennen werden wir uns an den Definitionen aus Rothammel (1995) und Meinke and Gundlach (1992) orientieren. Diese technisch orientierten Bücher geben einen guten Überblick über die in der Antennentechnik verwendeten Begriffe, Elektronik und grundlegenden Antennenformen. Die wohl einfachste Antenne in der Physik ist der Kugelstrahler oder isotroper Strahler. Dieser strahlt und empfängt eine elektromagnetische Welle in alle Raumrichtungen mit der gleichen Intensität bzw. Empfindlichkeit und Polarisation. Diese Antenne wird sehr gerne in der Theorie verwendet, da sie es, durch ihre sehr einfachen Eigenschaften,

erleichtert Berechnungen durchzuführen. So gibt die Antenne z.B. jede ihr zugeführte Leistung auf den gesamten sie umgebenden Raum gleichmäßig ab. Es ist also nicht notwendig, ihre „Orientierung“ zu betrachten. Leider ist es nicht möglich eine solche Antenne real zu konstruieren.

Ihre Berechtigung in der Praxis erhält diese Antenne allerdings durch ihre Verwendung als theoretische Referenzantenne. Reale Antennen haben den Nachteil, dass sie die ihnen zugeführte Leistung in bestimmte Raumrichtungen bevorzugt abstrahlen. Dies hängt mit der geometrischen Beschaffenheit der Antenne oder ihrer Umgebung zusammen. Um nun diese Abstrahlcharakteristik festzuhalten, wird die der realen Antenne zugeführte Leistung P_t im Verhältnis zu der Leistung P_{ti} gesetzt, die einem isotropen Strahler zugeführt werden müsste, um in den jeweiligen Raumwinkel die gleiche Leistung zu strahlen. Das Verhältnis aus der Leistung des isotropen zur tatsächlich der Antenne zugeführten Leistung nennt man Antennengain oder einfach nur Gain G_t . t steht in diesem Fall stets für die als Strahler arbeitende Antenne. Es ergibt sich die Gleichung:

$$P_{ti} = G_t P_t$$

Selbstverständlich ist dies nicht die einzige Möglichkeit um die Abstrahlcharakteristik einer Antenne zu beschreiben. Neben dem isotropen Strahler können auch andere, einfache Antennenformen verwendet werden. Üblich ist zumeist allerdings nur noch der Hertzsche oder der $\frac{\lambda}{2}$ -Dipol. Außerdem kann statt der in die Antenne eingehende Leistung P_t auch die Leistung P_{t0} verwendet werden welche die Antenne verlässt. Man spricht in diesem Fall nicht von Antennengain G , sondern vom Richtfaktor D (vom Englischen Directivity):

$$P_{ti} = D_t P_{t0}$$

Da jedoch der Antennengain bezogen auf den isotropen Strahler der in der Literatur am häufigsten auftretende Fall ist, wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit nur mit diesem gearbeitet.

Die Abstrahlcharakteristik wird zumeist in einem Richtdiagramm festgehalten. Dabei handelt es sich um die Darstellung des Antennengains in sphärischen Koordinaten (θ, φ, l) . θ und φ geben die jeweilige Raumrichtung an. l wird mit dem Antennengain gleichgesetzt und es ergibt sich eine Koordinate mit (θ, φ, G) . Der Gain wird dabei häufig in der logarithmischen Einheit Dezibel dargestellt. Die Umrechnung eines Gains $G[1]$ zu dem entsprechenden Wert $G[\text{dB}]$ erfolgt über die Umrechnung:

$$G[\text{dB}] = 10 \log_{10}(G[1])$$

Leider ist die dreidimensionale Darstellung sehr unübersichtlich und führt häufig zu Fehlinterpretationen. Aus diesem Grund werden Schnitte durchgeführt welche die Abstrahlcharakteristik in einer gewählten Ebene darstellen. In Abbildung 4.2 ist ein horizontaler Schnitt für einen $\frac{\lambda}{2}$ Dipol dargestellt. Die Auftragung ist in diesem Diagramm normiert. Das bedeutet, dass die Gain-Werte in Relation zum Wert bei 0° dargestellt sind. 0° bezeichnet in der Abbildung die Richtung der Antenne in welche die größte Abstrahlung erfolgt. Man nennt dies auch Hauptabstrahlrichtung oder

4 Kalibration von Radioantennen

Hauptrichtung der Antenne.

In Abbildung 4.2 ist außerdem der Halbwertswinkel dargestellt. Dabei handelt es sich

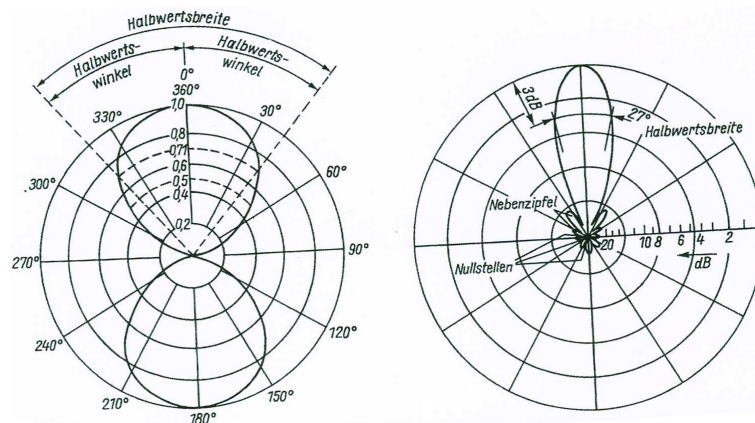


Abbildung 4.2: Normiertes Horizontaldiagramm eines $\frac{\lambda}{2}$ Dipols (links) und einer Yagi-Antenne (rechts) aus Rothammel (1995, S. 59)

um den Winkel ab dem der Antennengain auf die Hälfte des Gains in Hauptrichtung abgefallen ist. Bei einem sehr kleinen Halbwertswinkel spricht man von einer Richtantenne (z.B. eine sogenannte Yagi-Antenne in Abbildung 4.2, rechte Seite). Solche Antennen eignen sich sehr gut zur Informationsübermittlung über große Distanzen. Im Gegensatz dazu spricht man bei einem großen Halbwertswinkel von einem Rundstrahler, also einer Antenne die in sehr viele Richtungen strahlt. Die Halbwertsbreite ist der doppelte Halbwertswinkel und wird alternativ verwendet.

4.1.3 Transmissionsgleichung von Friis

Bei optimaler Orientierung und Polarisation einer Antenne nimmt diese eine bestimmte Empfangsleistung P_r einer elektromagnetischen Welle mit der Leistungstrahldichte S auf. Der Proportionalitätsfaktor zwischen S und P ist abhängig vom Gain der Antenne und hat die Dimension einer Fläche:

$$A_r = \frac{\lambda^2}{4\pi} G, [A_r] = \text{m}^2$$

Dabei ist G wieder der Gain der Antenne. Diese sogenannte effektive Antennenfläche A_e ist, je nach Antennenform, unabhängig von der realen Fläche der Antenne. Es handelt sich dabei um den maximalen Wert den eine Antenne mit einem Gain G bei einer Wellenlänge erreichen kann. Je nach Orientierung oder Polarisation der Antenne kann dieser Wert allerdings geringer ausfallen. Im folgenden bezeichnet ein tiefgestelltes r die zu einer empfangenden Antenne gehörenden physikalischen Größen und ein tiefgestelltes t die zu einer sendenden Antenne gehörenden Größen.

Wenn wir durch die Messung der durch die Antenne aufgenommenen Leistung den

Antennengain berechnen wollen, so kommt uns zugute, dass wir diesen relativ zum isotropen Strahler benötigen (siehe Definition des Gains). Wie bereits erwähnt berechnet sich die empfangene Leistung einer Antenne mittels der Summe der Leistungsflußdichte über die Antennenfläche.

$$P_r = \int S dA$$

Da wir einen isotropen Strahler betrachten ist die Leistungsflußdichte (der Betrag des Poyntingvektors) über die Antennenfläche konstant mit $|S| = \frac{P_{ti}}{4r^2\pi}$. Setzt man dies ein, so ergibt sich die Gleichung:

$$P_r = \frac{P_{ti}}{4r^2\pi} \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r$$

Die Leistung des isotropen Strahlers P_{ti} kann durch $P_{ti} = G_t P_t$ ersetzt werden. Es folgt die Formel:

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

Diese Gleichung ist die Transmissionsgleichung von Friis (siehe Friis (1946)). Sie berücksichtigt nicht die Abschwächung des Signals innerhalb der Atmosphäre. Da diese allerdings im Frequenzbereich von LOPES fast transparent ist, ist diese Formel ausreichend genau.

An dieser Stelle gilt es noch die Verluste durch Polarisation zu beachten. Stehen zwei Achsen von linear polarisierten Antennen nicht parallel, so nennt man den Winkel zwischen ihnen Polarisationswinkel β . Da beide Antennen nur eine Polarisationsrichtung senden bzw. empfangen können, entstehen nun zusätzliche Verluste.

Die Feldstärke, die hierbei gemessen wird, verändert sich dabei mit $\cos(\beta)$. Die Leistung mit $\cos^2(\beta)$. Daraus folgt, dass wir die Leistung der Sendeantenne mit $\cos^2(\beta)$ modifizieren müssen, da für die Empfangsantenne nur dieser Teil der gesendeten Leistung existiert. Die Transmissionsgleichung verändert sich zu:

$$P_r = \left(\frac{\lambda}{4r\pi} \right)^2 G_r G_t P_t \cos^2(\beta) \quad (4.1)$$

4.2 Antennenformen

In der Praxis gibt es eine Vielzahl von Antennenformen für unterschiedliche Anwendungen. So hat jeder Frequenzbereich eigene Antennenformen. Daneben gibt es Unterschiede je nach Anwendung. So verlangt z.B. ein Punkt zu Punkt Transfer eines Signals nach einer Antenne mit einem möglichst hohen Gain in Hauptrichtung. An dieser Stelle werden nur die im weiteren Verlauf verwendeten Formen beschrieben. Für einen vollständigeren Überblick wird auf Rothammel (1995) verwiesen.

4.2.1 Inverted V Dipol

Bei Inverted V Dipolen handelt es sich um einfache Dipole welche in einem Winkel α zum Boden geknickt sind. Diese Antennenform hat nach Rothammel (1995)

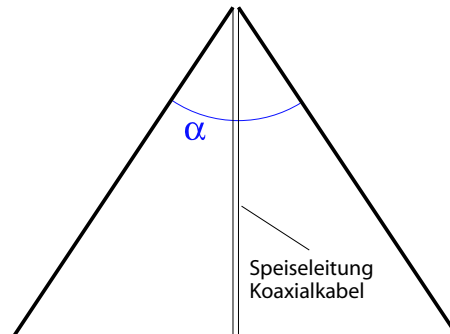


Abbildung 4.3: Inverted-V Dipol

gegenüber dem gestreckten Dipol den Vorteil einer ausgeprägteren Rundstrahlcharakteristik. Die Minima in Richtung der Dipolachse verschwinden mit abnehmendem α . Es kann kein rein kreisförmiges Richtdiagramm erreicht werden, aber schon bei einem Winkel von $\alpha = 90^\circ$ kann ein in der Praxis ausreichend rundes Ergebnis erzielt werden (siehe Abbildung 4.4). Während allerdings die Sensitivität zu den Seiten steigt, sinkt diese in Hauptrichtung der Antenne ab. Es muss also ein Kompromiss zwischen hohem Gain in Hauptrichtung und hohe Sensitivität zu den Seiten gefunden werden. Es handelt sich um eine linear polarisierte Antenne

Dank ihrer einfachen Form kann diese Antenne sehr günstig hergestellt werden. Die Länge des Dipols ist dabei normalerweise $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ oder 1λ . Diese Antennenform wird auch bei LOPES verwendet. Hier beträgt $\alpha = 87.2^\circ$. Bei 75 MHz handelt es sich um einen $\frac{\lambda}{4}$ Dipol.

4.2.2 Bikonische Antenne

Bei einer bikonischen Antenne, wie sie in Abbildung 4.5 dargestellt ist, handelt es sich um eine linear polarisierte Antenne. Die Form des Richtdiagramms ist ähnlich eines normalen $\frac{\lambda}{2}$ Dipols. Allerdings verfügt sie über einen sehr großen Halbwertswinkel und ist in der Lage in einem sehr breiten Frequenzband zu arbeiten. Ein Beispiel für eine bikonische Antenne ist die für die Kalibration verwendete Radioquelle (siehe Kapitel 5).

4.2.3 Logarithmisch Periodische Dipolantenne

Diese, in Abbildung 4.6 gezeigte, Antennenform besteht aus mehreren übereinander angeordneten Dipolen. Sie hat den Vorteil auf einem breiten Frequenzband nahezu

gleiche elektrische Eigenschaften aufzuweisen. Im Gegensatz zu anderen Antennenformen verändert sich ihr Richtdiagramm in diesem Band kaum. Dabei ist die Breite des Frequenzbandes nur durch die Länge des größten Dipols und kleinsten Dipols bzw. der Art der Antennenzuleitungen begrenzt. Die Abstände, in welchen die Dipole angeordnet sind, sind abhängig vom gewählten Öffnungswinkel α . Dieser entspricht nicht dem Halbwertswinkel der Antenne, sondern ist ein rein geometrischer Faktor. Bei der Konstruktion muss beachtet werden, dass mit abnehmendem α zwar der Gain der Antenne zunimmt, aber gleichzeitig eine höhere Anzahl Dipolelemente notwendig werden.

Die logarithmisch periodische Dipolantenne kann für sehr viele Anwendungen genutzt werden. In Abschnitt 3.5 wird mit dem STAR-Projekt ein Experiment zur Messung der kosmischen Strahlung angesprochen, welches diesen Antennentyp verwendet.

4.3 Kalibrierung

Da Antennen je nach Form, Größe und Impedanz über unterschiedliche Gains verfügen, muss für eine Bestimmung der Feldstärke am Ort der Antenne eine Kalibrierung vorgenommen werden. Dabei wird der Absolutgain der Antenne ermittelt, d.h. die Verstärkung bzw. Abschwächung mit der die von der elektromagnetischen Welle getragene Leistung an den Empfänger abgegeben wird. Zu diesem Zweck existieren in der Technik unterschiedliche Ansätze. Im Folgenden werden die drei häufigsten erläutert.

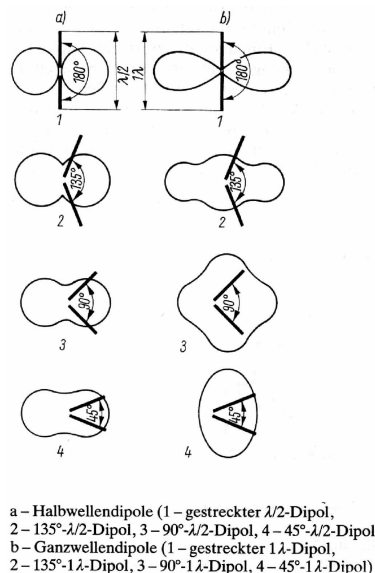


Abbildung 4.4: Horizontaldiagramme Winkeldipole aus Rothammel (1995, S.195)



Abbildung 4.5: Bikonische Antenne von A.H.Systems, Inc.

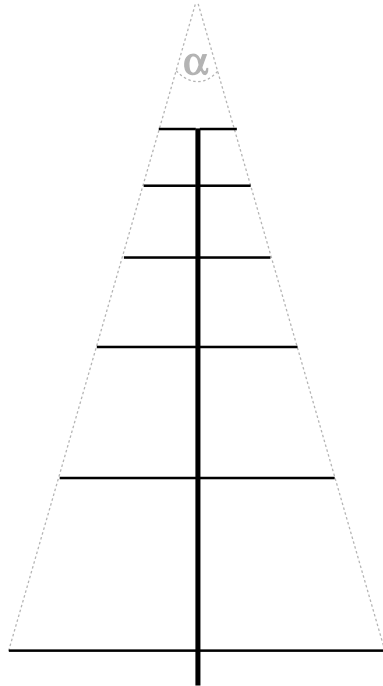


Abbildung 4.6: Skizze einer logarithmisch periodische Dipolantenne. Graue Linien dienen nur zur Verdeutlichung der Konstruktion.

4.3.1 Zwei Antennen Kalibration

Sollten zwei baugleiche Antennen vorhanden sein und können diese als Sender und Empfänger eingesetzt werden, so kann die Zwei Antennen Methode verwendet werden. Bei dieser werden die beiden Antennen aufeinander ausgerichtet. Der Abstand zwischen beiden muss der Fernfeldbedingung entsprechen. Nun wird ein Sender mit einer bekannten Leistung P_t an eine der Antennen angeschlossen. Das von ihr ausgehende Signal wird von der zweiten Antenne empfangen und dort durch einen Empfänger gemessen.

Da $G_t = G_r$, können wir die Transmissionsgleichung von Friis umformen zu:

$$G = \frac{4r\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{P_r}{P_t}}$$

4.3.2 Drei Antennen Kalibration

Leider ist es nicht immer möglich von der zu messenden Antenne zwei Exemplare vorliegen zu haben. Eine Lösung für dieses Problem stellt die “Drei Antennen Kalibration” dar. Hier werden drei unbekannte Antennen verwendet. Nun werden drei Messungen durchgeführt bei der jeweils eine der Antennen als Sender, eine andere als Empfänger dient. Dabei ist es unerheblich welche die jeweilige Funktion übernimmt. Aus den drei Messungen ergibt sich zusammen mit der Transmissionsgleichung ein Gleichungssystem welches nach den drei Antennengains aufgelöst werden kann.

4.3.3 Bekannte Vergleichsquelle

Sollte eine bereits kalibrierte Antenne vorhanden sein, gestaltet sich die Messung grundsätzlich am einfachsten. Die Transmissionsgleichung von Friis kann einfach, je nachdem ob die bekannte Antenne als Sender oder Empfänger eingesetzt wird, nach G_r oder G_t aufgelöst werden. Für einen bekannten Sender erhält man:

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

4 *Kalibration von Radioantennen*

5 Absolute Kalibration der LOPES-Antennen

5.1 Vorgehen

Das Ziel dieser Arbeit ist es ein System zur absoluten Kalibrierung der LOPES Antennen zu definieren. Dieses muss dabei eine möglichst hohe Genauigkeit besitzen, unter geringem zeitlichen und finanziellen Aufwand wiederholbar und in der Lage sein auch bei individuellen Änderungen der Hardware, wie z.B. der Einbindung einer zweiten Polarisation, noch nutzbar sein.

Generell ist das Ziel einer absoluten Kalibration die gemessene Leistung mit der am Ort der Antenne ankommenden Leistung einer elektromagnetischen Welle zu vergleichen. Die Verstärkung des Signals von der Antenne, der Elektronik und der Software kann dann berechnet werden. Mit diesem Ergebnis wird es später möglich sein die gleiche Rechnung "rückwärts" durchzuführen und damit aus einem gemessenen Wert den tatsächlich Vorliegenden zu berechnen.

Es ist allerdings wichtig sich zu überlegen von welchen physikalischen Größen dieser Verstärkungs- oder Abschwächungsfaktor abhängig ist. Wie wir bereits gesehen haben ist der Richtfaktor der Antenne abhängig von der Frequenz und vom Azimut- und Zenitwinkel. Der Verstärkungsfaktor der Elektronik ist "nur" abhängig von der Frequenz. Da wir uns im Arbeitsbereich der Elektronik befinden ist die Abhängigkeit von der Leistung für diese Messung vernachlässigbar. Dies bedeutet, dass in einem gewissen Leistungsbereich die Elektronik konstant bleibt. Die Software sollte keine variablen Faktoren beitragen. Möglich sind hier nur konstante Korrekturwerte, wie sie z.B. bei der schnellen Fouriertransformation auftreten.

Die Messung wurde in zwei Teilen durchgeführt. Auf der einen Seite wurde das Richtfeld der Antenne bei den jeweiligen Frequenzen simuliert. Diese Simulationen wurden durch einzelne Messreihen überprüft. Auf der anderen Seite wurden die restlichen, frequenzabhängigen Verstärkungen oder Abschwächungen gemessen. Hauptsächlich handelt es sich dabei um die Messelektronik. Diese Aufteilung bedeutet eine erhebliche Vereinfachung des Messaufwandes, da auf diesem Weg die Richtungsabhängigkeit nicht bei der Messung der Korrekturwerte der Elektronik berücksichtigt werden muss.

5.2 Richtfeld der Antennen

5.2.1 Simulation oder Messung?

Eine wichtige Überlegung ist, ob für die Bestimmung des Richtfeldes eine Messung durchgeführt werden soll oder Daten aus einer Simulation verwendet werden. Antennensimulationen sind, da sie die tatsächliche Antenne ja nur nachbilden, stets mit einer Ungenauigkeit behaftet. Dies kommt durch kleine Unterschiede in der geometrischen Form, in der Umgebung der Antenne oder auch in der Impedanz zustande. Je einfacher eine Antenne konstruiert ist, desto geringer sind die Fehler einer Simulation. Durch eine geringe Anzahl von verwendeten Komponenten (dh. einer Reduktion der Impedanzfehler) und einer möglichst einfachen Form (dh. geringen Ungenauigkeiten bei der Nachbildung) können sehr gute Ergebnisse erzielt werden.

Eine reale Messung ist häufig mit großen Ungenauigkeiten behaftet. Wenn eine solche reale Kalibration durchgeführt wird, kommen Fehler im Winkel, der Sendeleistung der Sendeantenne und der Polarisation der einfallenden Radiowelle zustande, die nur schwer zu verhindern sind. Bei LOPES wird dies noch zusätzlich erschwert, da die Antennen zum Zenit, dh. in den Himmel zeigen. Eine umfangreiche Messung des Richtdiagramms würde schon durch die Notwendigkeit, einen Überstreichung der kompletten Raumwinkel zu erreichen, sich schwierig gestalten. Hinzu kommt, dass dies nur mit einer hohen Ungenauigkeiten zu realisieren ist.

Bei der Entscheidung zwischen Simulation und Messung war es sehr vorteilhaft, dass den verwendeten Antennen großes Interesse durch das LOFAR Projekt zukommt. So wurden bei ASTRON schon mehrere Untersuchungen zur Kalibrierung der Antennen vorgenommen. Diese Untersuchungen von M.J. Arts (Arts (2003) und Arts (2004)) zeigten eine gute Übereinstimmung der Simulationen mit den Messdaten.

Die LOFAR-Gruppe kam so zu dem Entschluss die Richtcharakteristik ihrer Antennen mittels Simulationen zu bestimmen. Eine absolute Kalibration der restlichen Elektronik wird zum jetzigen Zeitpunkt mittels des so genannten Sky-noise, des kosmischen Radiohintergrunds, durchgeführt. Dieser Ansatz konnte gewählt werden da der Radiohintergrund, durch die großen Erfahrungen auf dem Gebiet der Radioastronomie, ausreichend bekannt ist und als konstant gilt. Ein weiterer Gedanke war auch eine bekannte Radioquelle wie z.B. Cassiopeia A zu verwenden. Die Leistung dieses Supernova-Überrests ist über viele Jahre hinweg untersucht worden und die von ihm abgestrahlte Leistung kann als bekannt vorausgesetzt werden. Anzumerken wäre an dieser Stelle, dass beide Ansätze von LOPES leider nicht verwendet werden können, da innerhalb des Forschungszentrums die Störungen zu stark sind und dadurch Quellen wie z.B. Cassiopeia A im Rauschen verschwinden.

Auf der Basis der Kenntnisse über den Vergleich von Simulation und Messung des Richtdiagramms wurde für LOPES entschieden eine Simulation als Hauptinformationsquelle zu nutzen. Diese Simulation wurde von M.J. Arts (ASTRON) durchgeführt. Sie werden im folgenden Unterkapitel dargelegt.

5.2.2 Bedingungen für die Simulation

Für die Simulation wurde die Antenne als geknickter Dipol auf einem 35 cm hohen Metallgestell über einem realem Boden verwendet. “Realer Boden” bedeutet dabei, dass sich unterhalb unserer Antenne eine unendliche Fläche mit realen Reflektions- und Absorptionskoeffizienten befindet. Für beide Größen wurden durchschnittliche Werte verwendet.

Die Spezifikationen der Bodenplatten wurden dabei exakt in die Software eingegeben. Zusätzlich zu unseren Antennen mit Bodenplatte, wurde ebenfalls die Antenne ohne diese, also direkt auf einem realen Boden simuliert. Dies hat den Vorteil, dass es möglich ist, den Einfluss der Bodenplatte zu untersuchen (siehe Kapitel 5.2.3).

Es wurde das Programm IE3D der Firma Zeland¹ verwendet. IE3D nutzt dabei die Multipolentwicklung (siehe zum Beispiel Nolting (1997)) um die elektromagnetischen Eigenschaften eines Feldes von dreidimensionalen Antennen zu simulieren. Es ist weltweit eines der meist genutzten Programme zu diesem Zweck. Wir führten die Simulationen nicht selbst durch, da es sich um ein kommerzielles Programm handelt. Außerdem verfügt ASTRON über die notwendigen Kenntnisse in der Benutzung und konnte die Arbeiten innerhalb kürzester Zeit durchführen.

5.2.3 Ergebnisse der Simulation

Durch die Simulation ergibt sich ein frequenzabhängiges, dreidimensionales Richtdiagramm, auch “Antennen-Beam” genannt. Bei einer Frequenz von 50 MHz ergibt sich das Richtdiagramm aus Abbildung 5.1. Hierbei befindet sich die Antenne entlang der gestrichelten Linie.

Aus der dreidimensionalen Darstellung lässt sich nur schwer Information gewinnen, aus diesem Grund wird im Folgenden das Richtdiagramm genauer erläutert. Es wird zuerst auf die allgemeinen Eigenschaften der Simulationsdaten eingegangen. Dann folgt die Besprechung eines vertikalen und eines horizontalen Richtdiagramms bei einer festen Frequenz von $f = 50$ MHz. Statt den 50 MHz hätte auch jede andere Frequenz innerhalb der 40 MHz bis 80 MHz gewählt werden können. Dies sind beides Querschnitte durch das in Abbildung 5.1 dargestellte Diagramm. Schließlich wird die Änderung des Richtdiagramms bei unterschiedlichen Frequenzen dargelegt.

Das Ergebnis der Simulation ist eine Tabelle mit vier Parametern:

- Zenitwinkel θ
- Azimutwinkel ϕ
- Frequenz f
- Gain G

¹siehe auch www.zeland.com

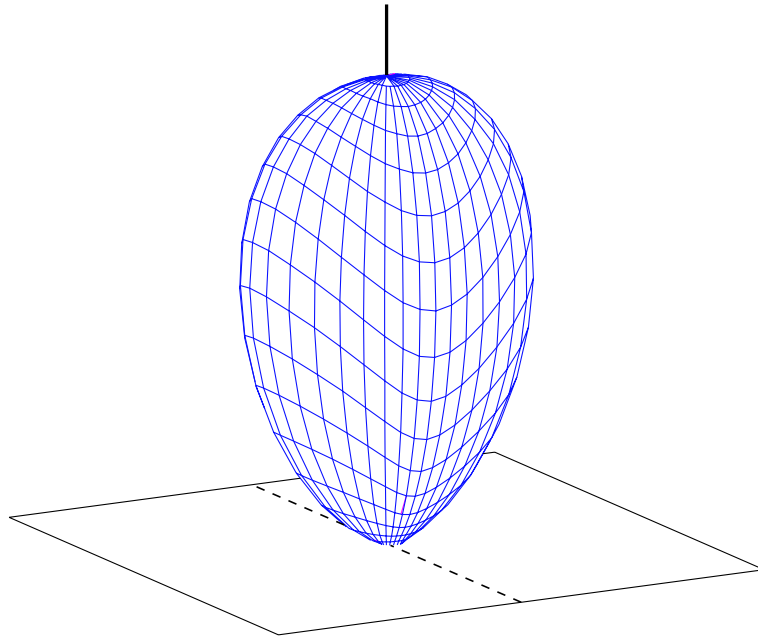


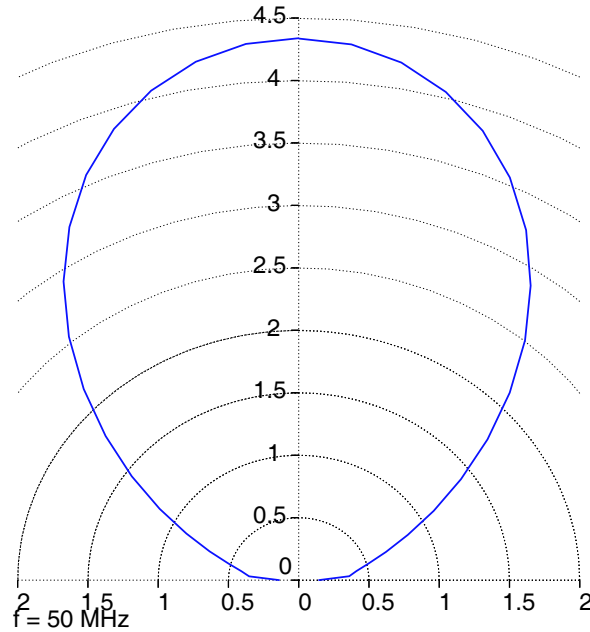
Abbildung 5.1: Richtdiagramm LOPES-Antennen (mit Bodenplatte)

Beim Zenitwinkel wurden 5° Schritte, beim Azimutwinkel 10° und bei der Frequenz wurden 10 MHz Schritte gewählt.

Die Schritte des Zenitwinkels sind kleiner als die des Azimutwinkels, da hier die Antennen eine höhere Empfindlichkeit gegen Winkeländerungen zeigen. Dies kann besonders anschaulich bei der Darstellung der vertikalen Richtcharakteristik in Abbildung 5.2 gesehen werden. Kleinere Schritte wären eventuell bei den Frequenzen wünschenswert, da wir im Folgenden noch sehen werden, dass eine starke Frequenzabhängigkeit existiert. Allerdings kann im ersten Schritt von der Analyse-Software zwischen den Simulationsdaten interpoliert werden.

Bei Abbildung 5.2 handelt es sich dabei um einen vertikalen Schnitt bei einem Azimutwinkel von $\phi = 0$, also in Ost-West Richtung. In diese Richtung sind die Antennen ausgerichtet, dh. die Dipole befinden sich in der Darstellungsebene. Anschaulich ist es also das Diagramm welches ein Betrachter sieht wenn er von Norden auf die Antenne blickt.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Antennen bei Zenitwinkeln nahe an 90° nicht mehr sensitiv sind. Dies ist ein erwünschter Effekt, da in Richtung des Horizonts, also in Richtung der meisten menschlichen Störquellen, Unempfindlichkeit herrschen sollte. Trotzdem haben die Antennen eine hohe Sensitivität gegen einen breiten Himmelsbereich. Dies kann z.B. an dem hohen Halbwertswinkel von 50° bei 40 MHz bis 65° bei 80 MHz gesehen werden. Der Halbwertswinkel, zeigt an, ab welchem Winkel von der Hauptrichtung (also bei LOPES $\theta = 0$) der Antennengain auf die Hälfte des Gains in der Hauptrichtung abgefallen ist. Zum Vergleich ist der Öffnungswinkel bei

Abbildung 5.2: Vertikales Richtdiagramm (bei $\phi = 0^\circ$ mit Bodenplatte)

einem Halbwellendipol etwa bei 40° . Wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben ist dieser um so größer, je näher sich die Wellenlänge der Länge der Antenne nähert. Daher ist der größere Winkel bei 80 MHz.

Es stellt sich die Frage, ab welchem Winkel die Antenne praktisch nicht mehr ausreichend sensitiv ist, um noch vertrauenswürdige Daten zu liefern. Rein von der Auswertung der Simulationsdaten würde man dazu tendieren dies ab einem Winkel von vielleicht $80^\circ - 85^\circ$ zu erwarten. Erfahrungen von LOFAR haben allerdings gezeigt, dass wir nur bis zu $\theta = 75^\circ$ den Messdaten vertrauen können, da ab diesem Winkel schon kleine Lageänderungen des Koaxialkabels oder Reflektionen des umgebenden Bodens einen zu großen Einfluss haben.

Neben dem vertikalen Richtdiagramm stellt sich auch die Frage nach dem horizontalen Diagramm. Als Beispiel wurde in Abbildung 5.3 der Gain bei einem Zenitwinkel von $\theta = 20^\circ$ aufgetragen.

Wie erwartet sind die Antennen praktisch nicht sensibel auf den Azimutwinkel. Man kann also erkennen, dass die grobe Skalierung dieser Winkel in der Simulation gerechtfertigt ist.

Als dritter Punkt muss die Frequenzabhängigkeit der Antennen untersucht werden. Die Betrachtung des Gains in die Hauptrichtung der Antenne (dh. $\theta = 0^\circ$) ist in Abbildung 5.4 dargestellt. In der Abbildung werden auch Frequenzen von 10 bis 100 MHz, also außerhalb unseres Messbereichs gezeigt.

Es zeigt sich, wie erwartet, eine Frequenzabhängigkeit. Ungewöhnlich für eine Inverted-V Antenne ist allerdings die Gainspitze bei 60 MHz. Um dies genauer zu untersuchen

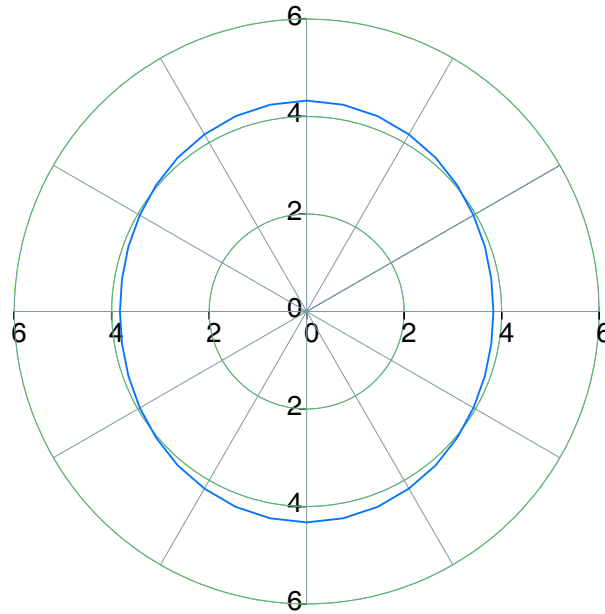


Abbildung 5.3: Horizontales Richtdiagramm (bei $\theta = 20^\circ$ mit Bodenplatte)

wurde eine Simulation der Antennen ohne die darunter liegende Metallplatte durchgeführt (Grüne Linie in Abbildung 5.4).

Wie man sehen kann, zeigen die Antennen bedingt durch Resonanzen der Bodenplatte, einen unterschiedlichen Gain als Antennen welche direkt auf dem Boden stehen würden. Interessant ist auch, ob sich diese Unterschiede auch in der Form des Richtdiagramms zeigen. In Abbildung 5.5 sind die vertikalen Richtdiagramme dargestellt.

Beim Richtdiagramm mit Bodenplatte zeigt sich wieder das ungewöhnliche Verhalten bei 60 MHz. Hier ist die Form des Richtdiagramms stark unterschiedlich zu den anderen Frequenzen. Ursache dürfte hierfür sein, dass bei 60MHz $\frac{\lambda}{2} \approx 2,5$ m beträgt. Mit einer Kantenlänge von 2,1 m und einer Diagonale von 3 m ist sehr wahrscheinlich, dass Teile der Bodenplatten in dieser Länge liegen.

Wie bereits erwähnt wurde, dürften die Bodenplatten allerdings den Vorteil haben, dass sie die Antennen unempfindlicher gegen die Bodenbeschaffenheit machen, dh. ihre Sensitivität auch bei stark unterschiedlicher Bodenfeuchte nur geringfügig schwankt.

Auch wenn bereits hierbei von ASTRON eine ausreichende Übereinstimmung zwischen simulierten und experimentellen Werten festgestellt worden ist, sollte auch vor Ort eine Überprüfung der Richtdiagramme durchgeführt werden. Im Ausblick (Kapitel 6) wird auf diese näher eingegangen werden.

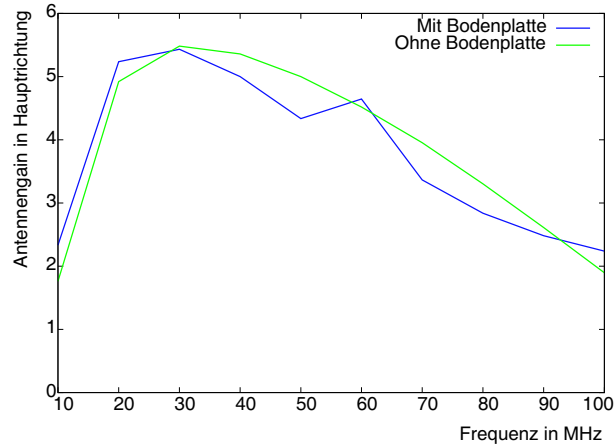


Abbildung 5.4: Frequenzabhängiger Antennengain in Hauptrichtung ($\theta = 0^\circ$ und $\phi = 0^\circ$)

5.3 Gesamtverstärkung der Elektronik

Nachdem nun die Antenne als bekannt angenommen werden kann, müssen noch die weiteren Bestandteile von LOPES kalibriert werden. Dabei handelt es sich um die Messelektronik und Software. Jede der Antennen verfügt zwar über eine in den meisten Bereichen baugleiche Elektronik, aber da auch dann Unterschiede möglich sind, wurde beschlossen die Elektronik jeder Antenne separat zu messen. Im Folgenden wird also jede Messelektronik der 30 Antennen einzeln betrachtet.

Ein Grundgedanke bei der Messung der durch die Elektronik verursachten Veränderungsfaktoren war es, die gesamte Kette von LOPES in einer Messung zu kalibrieren. Dies würde bedeuten, dass ein bekanntes Signal in die komplette Elektronikette gegeben wird, und dieses mit der Ausgabe verglichen wird. Damit wird auch die Analysesoftware berücksichtigt, da mit dieser die Messwerte ausgelesen werden. Dieser Ansatz hat mehrere Vorteile:

- Es ermöglicht eine schnelle Messung, da es nicht notwendig ist die Elektronik aus dem bestehenden Aufbau zu lösen.
- Wirklich alle Einzelteile der Messung werden berücksichtigt, also auch Impedanzunterschiede zwischen einzelnen Komponenten.
- Die Elektronik wird auch tatsächlich an ihrem Einsatzort gemessen. So werden auch Umgebungseinflüsse berücksichtigt.

Leider gestaltet sich die Umsetzung dieses Ansatzes schwieriger als es erscheint. Dies ist vor allem bedingt durch die LOPES-Hardware. Wie bereits dargelegt wurde, sind die Vorverstärker direkt an die Antennen angeschlossen. Dadurch ist es leider nicht

5 Absolute Kalibration der LOPES-Antennen

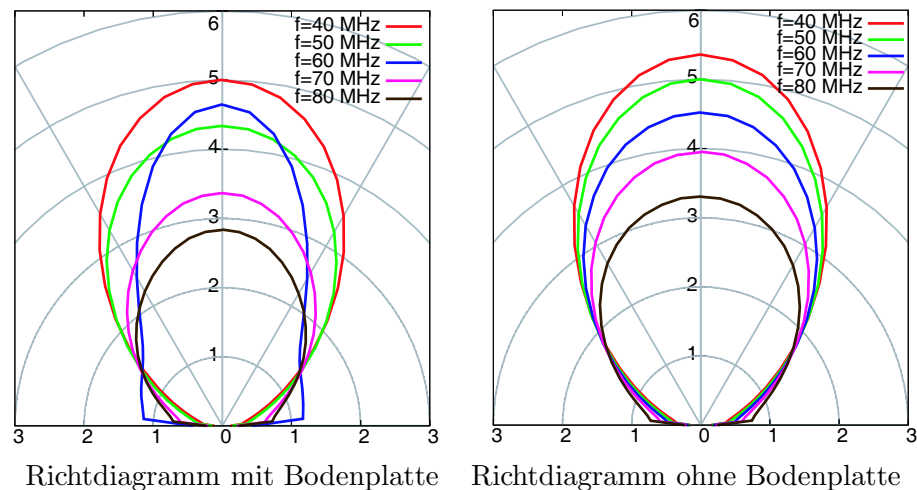


Abbildung 5.5: Antennengain bei unterschiedlichen Frequenzen

mehr möglich einen einfachen Signalgenerator an die Antenne anzuschließen. Es ist also notwendig eine Radioquelle als bekanntes Eingangssignal zu verwenden. Dies könnte über ein bereits vorhandenes Signal oder über ein von uns generiertes Signal geschehen. Da grundsätzlich eine vorhandene Quelle einfacher wäre, wurde in einem ersten Versuch ein, im Frequenzbereich von LOPES liegender, TV-Sender verwendet. Dies erwies sich allerdings durch mehrere Gründe als unpraktikabel (siehe 5.3.1) und wir waren gezwungen auf eine eigene, kalibrierte Radioquelle auszuweichen. Der letztlich verwendete Ansatz verwendete eine solche Quelle, die in einer Höhe von 11m über jede LOPES-Antenne gebracht wurde. Das von ihr ausgestrahlte Signal wurde dann von LOPES gemessen und mit dem in der Elektronik verglichen. So konnte der Verstärkungsfaktor berechnet werden (siehe 5.3.2). Im Folgenden wird zuerst der Ansatz mit dem TV-Sender beschrieben und dann auf die Messung mit der eigenen Quelle eingegangen.

5.3.1 Kalibration mittels eines vorhandenen Signals

Der hier angesprochene TV-Sender ist ein Signal ausgestrahlt von den Sendestationen des SWR:

Sender Raichberg

Ort Albstadt (Onstmettingen) in der Schwäbischen Alb

Entfernung \approx 120 km

Inhalt ARD

Kanal E04

Frequenz Videosignal 62,25 MHz

Frequenz 1.Tonsignal 67,75 MHz

Sendeleistung 100 kW

Zur Messung sollte das Tonsignal auf 67,75 MHz verwendet werden, da es im Unterschied zum Videosignal leistungsstabil ausgesendet wird. Der Sender präsentiert sich im Frequenzraum der LOPES-Daten wie in Abbildung 5.6 dargestellt. Der Tonträger befindet sich genau in der Mitte des vergrößerten Ausschnitts. Die Signalleistung liegt mindestens 3 Größenordnungen (also um Faktor 1000) über dem Rauschen. Dies ist ausreichend um das Signal fast störungsfrei messen zu können.

Um die Eignung des Senders zur Kalibrierung zu testen wurde nun die Leistung

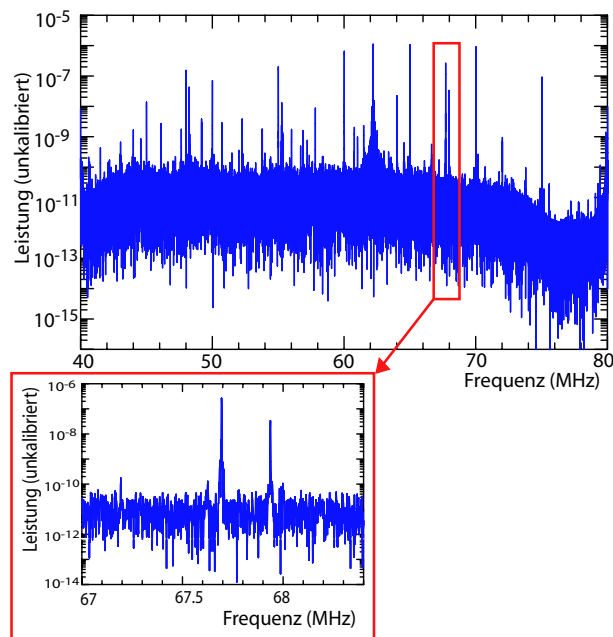


Abbildung 5.6: Typisches (unkalibriertes) Spektrum von LOPES

des Tonträgers über einen Tag hinweg gemessen. Zu diesem Zweck wurden aus den Ereignissen, die LOPES an diesem Tag gemessen hatte, die Leistung des Tonträgers ausgelesen. Diese Ereignisse wurden normal von KASCADE getriggert und waren daher nicht in perfekt regelmäßigen Zeitabständen über den Tag verteilt. Dies konnte allerdings vernachlässigt werden, da lediglich auf eine Abdeckung des gesamten Tages geachtet werden musste. Diese war gegeben, da mindestens alle 4 Minuten ein Ereignis ausgelöst wurde.

Das Ergebnis dieser Messung für eine Antenne (Nummer 21) ist in Abbildung 5.7 dargestellt. Es wäre eine konstante Leistung zu erwarten gewesen, da das Ausgangssignal konstant ist. Dies trifft leider nicht auf die Messung zu.

5 Absolute Kalibration der LOPES-Antennen

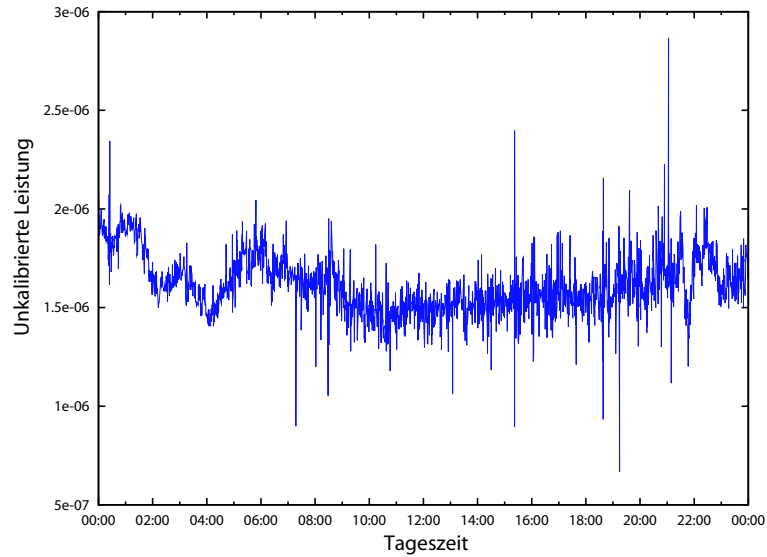


Abbildung 5.7: Signalleistung (unkalibriert) bei 67,75 MHz am 10. April 05 an Antenne 21.

Schon aus der Entfernung Raichbergs zum Forschungszentrum kann man sehen, dass es für LOPES nicht möglich ist den Sender in einer direkten Luftlinie zu sehen. Das Signal muss über „Umwege“ an die Antenne gelangen (siehe auch Kapitel 4). Eine direkte Möglichkeit wäre die Reflexion an der Ionosphäre. Allerdings ist diese im Frequenzbereich von 40 bis 80 MHz transparent. Die Frequenz ist aber zu hoch um bereits über eine Bodenwelle transportiert zu werden. Hauptsächlich dürfte das Signal also über die schwache Streuung an der Atmosphäre zu uns gelangen. Dies erklärt auch die starken Schwankungen in der Leistung da die Atmosphäre über den Tag hinweg großen Änderungen unterworfen ist.

Dies hat mehrere Folgen: Auf der einen Seite können wir nicht mehr den Ankunfts-winkel der Radiowelle sicher bestimmen. Auf der anderen Seite ist es durch die stark schwankende Ankunftsleistung unmöglich geworden die in die Elektronik eingehende Leistung zu berechnen. Dadurch ist es leider unmöglich eine Kalibration auf der Basis des TV-Senders durchzuführen.

Allerdings wird es eventuell möglich sein den TV-Sender zur Phasenkalibration zu nutzen. Dies wird in Kapitel 6 näher erläutert werden.

Leider existiert kein vorhandenes Signal welches als Kalibrationsquelle genutzt werden könnte. Bei den meisten vorhandenen fehlt die Information über den Sender oder über die Sendeleistung. Die zeitintensive Suche nach diesen fehlenden Informationen ist auch deswegen wenig sinnvoll, da terrestrische Quellen den Nachteil eines sehr hohen Zenitwinkels haben. Bei der Simulation des Richtdiagramms wurde bereits festgestellt, dass die Antennen in einem Bereich über 75° keine guten Messdaten mehr liefern.

5.3.2 Verwendeter Ansatz

Die absolute Kalibrierung wurde schließlich mittels einer eigenen externen Radioquelle vorgenommen. Diese kommerzielle Quelle wurde in kalibriertem Zustand erworben um sicherzustellen, dass die Sendeleistung als bekannt vorausgesetzt werden kann. Durch die Antennensimulation ist es möglich den Gain der LOPES-Antennen als bekannt vorrauszusetzen und damit über die Transmissionsgleichung von Friis die Leistung (siehe 4.1.3) zu berechnen welche die Antenne in die LOPES-Elektronik leitet. Wenn nun die von LOPES gemessene Leistung durch die über die Transmissionsgleichung berechnete geteilt wird, so ergibt sich der Faktor V_P um welchen die Leistung von LOPES verstärkt wird:

$$V_P = \frac{P_M}{P_r} = \left(\frac{4r\pi f}{c} \right)^2 \frac{P_M}{G_r G_t P_t \cos^2(\beta)} \quad (5.1)$$

Dabei gehen folgende Faktoren in die Rechnung ein:

P_M Die von LOPES gemessene Leistung.

P_r Die (berechnete) in die LOPES-Elektronik eingehende Leistung.

λ Entspricht der Wellenlänge der jeweils betrachteten Frequenz. Dh. es wurde die Verstärkung jeweils für diskrete Frequenzen innerhalb unseres Frequenzbandes bestimmt. Bedingt durch die Vorgabe der externen Quelle verwendeten wir die ganzzahligen MHz (dh. 41 MHz, 42 MHz, ..., 79 MHz).

r Abstand zwischen der externen Radioquelle und der betrachteten LOPES-Antenne.

G_r Gain der LOPES-Antenne. Dieser wurde durch die Simulation der Antennen bestimmt (siehe 5.2.3).

$G_t P_t$ Der Gain der Sendeantenne G_t bzw. die ihr zugeführte Leistung P_t ist nicht exakt bekannt. Allerdings wurde uns die Antenne mit den Daten über die abgestrahlte Leistung, also das Produkt beider Größen geliefert.

β Polarisationswinkel zwischen der externen Radioquelle und der betrachteten LOPES-Antenne. Zwar wurde er für die Berechnung der Verstärkungsfaktoren auf 0° gesetzt, aber in der Fehlerrechnung wieder berücksichtigt.

In der Praxis existieren Faktoren, welche die Messung beeinflussen können. So könnte bei hoher Luftfeuchtigkeit die Transmission in der Atmosphäre geringer und damit das Signal zur Kalibrierung abgeschwächt werden. Außerdem wurde bei der Simulation der Antenne ein so genannter „realer“ Boden angenommen. Dabei handelt es sich um einen Boden mit durchschnittlichem Absorptions- und Reflexionskoeffizienten. Bei hoher oder sehr geringer Bodenfeuchte können diese Werte von den Durchschnittswerten abweichen. Allerdings ist zu erwarten, dass durch die abschirmende Wirkung der Bodenplatte dieser Effekt sich nur geringfügig auswirken wird. Diese Umweltbedingungen könnten die in die Elektronik eingehende Leistung

verändern und damit von der, über die Transmissionsgleichung, berechneten Leistung abweichen. Zur Untersuchung dieser Umwelteinflüsse wurde bei einer der Antennen die Messprozedur bei unterschiedlichen Wetterverhältnissen durchgeführt.

5.3.3 Technischer Aufbau

Radioquelle

Die Messung wurde mit einem kalibrierten Sendesystem der Firma Schaffner durchgeführt. Es handelt sich dabei die um Referenzradioquelle VSQ1000 (siehe Abbildung 5.8), einen Signalgenerator mit einer montierten bikonischen Antenne.

Der Signalgenerator benötigt keine externe Spannungsquelle und ist durch seine



Abbildung 5.8: VSQ1000 von Schaffner

tragbare Ausführung für Feldmessungen geeignet. Er liefert mehrere überlagerte Sinussignale mit unterschiedlichen Frequenzen. Dabei haben diese Frequenzen, je nach Einstellung, Abstände von 1, 5 oder 10 MHz. Der Frequenzbereich geht von 1 MHz bis 1 GHz. Zum Beispiel für die 1 MHz Abstände liefert er im Frequenzraum immer bei 1, 2, 3, ..., 1000 MHz eine Leistungspitze.

Das Signal ist dabei sehr frequenz- und leistungsstabil (s. Datenblatt im Anhang).

Die bikonische Antenne hat eine Länge von 40,5 cm. Wie man am Richtdiagramm in Abbildung 5.9 gut erkennen kann, hat die Antenne einen guten Rundstrahlcharakter und zeigt in Hauptrichtung bei geringen Winkelabweichungen keine größeren Abschwächungen.

Die Antenne ist linear polarisiert. Dies hat zur Folge, dass bei der späteren Messung der Polarisationswinkel zwischen der Sendeantenne und den LOPES-Antennen möglichst klein gehalten werden muss. Sonst könnten Polarisationsverluste entstehen.

Durch ihre hohe Mobilität ist die Referenzquelle für unsere Zwecke gut geeignet.

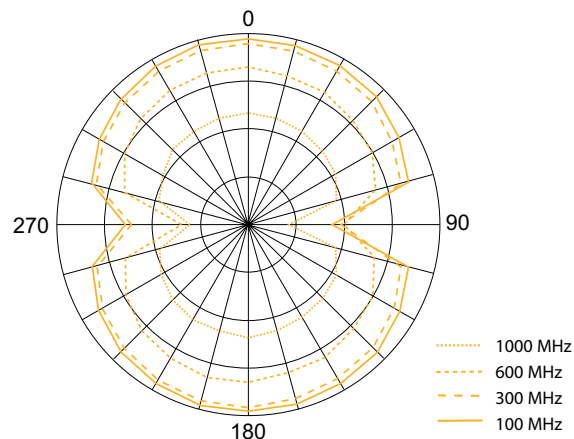


Abbildung 5.9: Richtdiagramm VSQ1000 - Antennenkeulen befinden sich in der Bildebene auf der horizontalen Achse.

Außerdem ist die Sendeleistung ausreichend, um auch bei größeren Distanzen noch messbar zu sein. Testmessungen zeigten, dass auch bei einer Entfernung von ca. 130m von den LOPES-Antennen die Leistungsspitzen im Frequenzraum noch über dem Rauschen gut sichtbar waren.

Positionsbestimmung

Wie wir schon in der Formel von Friis gesehen haben, ist die Entfernung von Sender zu Empfänger ein wichtiger Faktor bei der Bestimmung der Leistung. Aus diesem Grund musste die Position der Sendeantenne möglichst genau bestimmt werden. Dies wurde mittels eines differentiell arbeitenden GPS² erreicht. Es handelt sich um das ProMark2 System der Firma Thales Navigation³.

Durch das GPS sollten Genauigkeiten im Bereich von 20cm erreicht werden. Allerdings war dies speziell bei der Höhenangabe nicht der Fall. In Abschnitt 5.3.5 wird näher darauf eingegangen.

Aufhängung

Um die Radioquelle und das GPS für die geplanten Messungen stabil zu befestigen, wurde eine einfache Aufhängung aus einem Glasfaserverbundstoff konstruiert. Es war dabei wichtig, dass kein Metall verwendet wurde, da dieses zu unerwünschten Reflektionen geführt hätte. Außerdem war es notwendig ein möglichst kleines Gewicht zu erhalten um das Gesamtgewicht der Messapparatur zu optimieren. An der Aufhängung wurden Bohrungen für die Anbringung von Halte- und Stabilisierungseilen gemacht.

Die gesamte Messapparatur ist in Abbildung 5.10 dargestellt.

²Für weitere Informationen in Bezug auf das Global Positioning System siehe Kaplan (1996)

³siehe auch <http://products.thalesnavigation.com>



Abbildung 5.10: Aufhängung mit Radioquelle und GPS

5.3.4 Messungen

Um nun die Gesamtverstärkung der Elektronik zu ermitteln, musste unsere Radioquelle an eine Position nahe der zu messenden LOPES-Antenne gebracht werden und die Eingangsleistung der Elektronik berechnet werden. Wie ist diese Position am geeignetsten zu wählen?

Vom Standpunkt der Radioquelle war die Voraussetzung, dass es während der Messung möglich sein musste, ihre Haupttrichtung auf die LOPES-Antenne auszurichten. Dies liegt darin begründet, dass die vom Hersteller gelieferten Kalibrierdaten sich auf diese Richtung bezogen. Es ist zwar möglich die Sendeleistung in andere Richtungen zu berechnen, allerdings steigt dann die Ungenauigkeit mit der diese bestimmt werden kann. Die LOPES-Antennen stellten lediglich die Voraussetzung, dass ab einem Zenitwinkel von 75° die Messdaten zu ungenau werden.

Aufgrund dieser Voraussetzungen wurde beschlossen die Radioquelle direkt über die jeweilige LOPES-Antenne zu bringen (dh. sie sieht die Quelle bei einem Zenitwinkel von 0°). Wenn die Quelle frei hängend angebracht wird, richtet sie sich, durch die Schwerkraft, von selbst direkt in Richtung der unter ihr liegenden Antenne aus. Außerdem hat LOPES in diese Richtung die höchste Sensitivität, was einen guten Empfang ermöglicht. Da wir uns nicht im Nahfeld der Sende- und Empfangsantennen befinden durften, musste außerdem eine Mindesthöhe erreicht werden. Diese Höhe wurde auf 7m über den Antennen gewählt.

Diese Position zu erreichen gestaltete sich jedoch relativ schwierig. Die Hauptursache liegt darin, dass sich für bzw. während der Kalibration keine größeren Metallobjekte

in der Nähe der Antennen befinden dürfen. Erste Ansätze zum „metallfreien“ Erreichen dieser Höhe waren ein Ballon und ein Holzgestell. Der Ballon hätte speziell den Vorteil gehabt, dass mit ihm ohne Schwierigkeiten eine Höhe hätte erreicht werden können, von der die Radioquelle von allen Antennen gleichzeitig gesehen werden würde. Damit wäre es möglich nicht nur die Gesamtverstärkung der sich direkt unter dem Ballon befindlichen Antenne zu messen, sondern gleichzeitig auch ungenauere Messungen in allen anderen Antennen durchzuführen, um deren Richtdiagramm zu überprüfen. Leider stellte sich der von uns verwendete Wetterballon als für unsere Zwecke zu instabil heraus. Es wäre erforderlich einen stabileren Fesselballon zu benutzen. Da dies allerdings mit hohen Kosten verbunden wäre, entschieden wir uns gegen diesen Ansatz.

Ein zweiter Ansatz war die Verwendung eines Holzgestells mit ausreichender Höhe. Der Vorteil einer solchen Konstruktion wäre eine hohe Stabilität während der Messung. Allerdings erwies sich der Bau des Gestells als extrem schwierig und musste aufgrund dessen aufgegeben werden.

Verwendet wurde schließlich ein mobiler Kranausleger der in der Lage war die erforderliche Höhe zu erreichen. Der Kranausleger ist auf einem Unimog montiert (siehe Abbildung 5.11). Um zu gewährleisten, dass sich kein Metall in direkter Umgebung der Messung befand, wurde an das Ende des Auslegers eine Verlängerung aus Holz montiert. Diese hat eine Länge von 9m und ist damit länger als eine Wellenlänge bei jeder gemessenen Frequenz (maximal $\approx 7\text{m}$ bei 40 MHz). Die Gesamtlänge des Auslegers beträgt mit Verlängerung 25 m. Dadurch war es möglich den Unimog mehr als 20 m von der zu messenden LOPES-Antenne entfernt aufzustellen und die Messapparatur 11 m über die Antenne zu bringen. Da es außerdem möglich ist den Motor während der Messung abzuschalten, kann davon ausgegangen werden, dass der Unimog die Messung nicht stört. Trotzdem wurden zusätzliche Messungen durchgeführt um den Einfluss des Messaufbaus mit Kranausleger und Fahrzeug zu überprüfen. So wurden bei einer Antenne mehrere Messungen mit unterschiedlicher Position des Unimogs durchgeführt. Diese zeigten keine Einflüsse von dessen Position.

Der Unimog musste die Wege auf dem KASCADE-Detektorfeld nicht verlassen, da es möglich war von diesen jede Antenne zu erreichen. Dadurch konnte eine Gefährdung der unter dem Array verlaufenden Kabelschächte vermieden werden. Bei der Messung wurde dann die Messapparatur von dem Kranausleger 11 m über eine LOPES-Antenne gebracht (siehe Abbildung 5.12). Eine Höhe von 11 m wurde gewählt da diese durch die Position des Unimogs leicht zu erreichen ist und die Höhe die geforderten 7 m überschreitet.

Ein möglichst kleiner Polarisationswinkel zwischen der Radioquelle und der LOPES-Antenne wurde über die Stabilisierung der Messapparatur durch zwei am Boden fixierte Seile gewährleistet. Leider können hier durch Wind oder Abweichungen bei der Fixierung Polarisationsverluste entstehen. In Abschnitt 5.3.7 wird darauf näher eingegangen.

Damit der Kranlenker die Radioquelle möglichst genau platzieren konnte, wurde ein Lot an den Holzausleger angebracht. Es hat eine Länge von 11m. Um die normale LOPES-Messkette zu verwenden, wurden keine speziellen Messverfahren angewen-



Abbildung 5.11: Unimog mit Kranausleger und montierter Holzverlängerung

Abbildung 5.12: Messung ohne GPS

det, sondern mit den normalen LOPES-Ereignissen gearbeitet. Allerdings wurde der, im normalen Betrieb von KASCADE-Grande kommende Trigger durch einen eigenen Trigger ersetzt. Zu diesem Zweck wurde ein Signalgenerator an die Clock-Card (siehe Abbildung 3.3) angeschlossen. Dieser löste alle 10s ein Ereignis aus, welches dann von der DAQ gespeichert wurde. Der Abstand von 10s wurde gewählt da sich gezeigt hatte, dass dieser einen stabilen Verlauf der Messung gewährleistete. Dies ist in den technischen Eigenschaften des verwendeten Signalgenerators begründet.

Zusammengefasst verlief eine Messung also wie folgt:

1. Bewegen des Unimogs an eine geeignete Position (ca. 20m von der LOPES-Antenne entfernt auf einer der Array-Straßen).
2. Ausfahren des Kranauslegers und Anbringung der Messapparatur (die Holzverlängerung konnte in den meisten Fällen montiert bleiben).
3. Radioquelle mit Hilfe des Lots 11m über die Antenne bringen.
4. Ausschalten des Unimogs und Fixierung der Radioquelle durch die an der Halterung befestigten Seile.
5. Fixierte Quelle für mindestens 3 Minuten in Position halten

6. Abspeichern der letzten 12 von LOPES gemessenen Ereignisse (dh. 12×0.8 ms)
7. Einfahren des Kranauslegers

5.3.5 Verlauf der Messung

Auf- und Abbau

Der Aufbau der Messung ist mit keinen Schwierigkeiten verbunden. Durchgeführt werden müssen die folgenden Schritte:

- Kalibration des GPS
- Montage der Holzverlängerung am Kranausleger
- Stopp der DAQ und Neustart mit eigenem Trigger
- Auswertung der gemessenen Daten mit der LOPES-Analysesoftware

Insgesamt dauert dies ca. $\frac{1}{2}$ Stunde. Beim Abbau muss dann der ursprüngliche Zustand von LOPES wiederhergestellt werden. Auch dies dauert ungefähr eine $\frac{1}{2}$ Stunde.

GPS

Das GPS verliert während der Messung häufiger seine Initialisierung. Die Ursache dafür ist, dass beide Handgeräte mindestens 5 Satelliten ohne Unterbrechung empfangen müssen. Leider verlieren die Geräte, insbesondere das zur Messung verwendete mobile Gerät, für kurze Zeit einzelne Satelliten. Da dies aber nur kurzfristige Verluste waren, waren die Positionsdaten dennoch mit einer maximalen Ungenauigkeit von 20 cm in Nord bzw. Südrichtung behaftet.

Problematisch gestaltet sich allerdings die Höhenmessung mit Hilfe des GPS. Es stellte sich bei Betrachtung der Daten heraus, dass Ungenauigkeiten im Bereich von bis zu 4 m entstanden. Zur Ursache hatte dies allerdings weniger den Verlust der Initialisierung als die systematische Ungenauigkeit von GPS in Bezug auf die Höhe. Dies ist leider für unsere Messung inakzeptabel. Aus diesem Grund wurden die Höhe der Radioquelle mit Hilfe des Lots bestimmt. Durch die exakte Arbeit des Kranführers war die Höhe bei allen Messungen fast konstant. Es kam zu einer Abweichung von maximal ca. 20cm.

Dauer einer Messung

Wenn der Aufbau bereits durchgeführt wurde, war die Messung einer Antenne innerhalb von ca. 10 Minuten abgeschlossen. Allerdings war es bei einem Wechsel der Array-Straße, also wenn der Unimog abbiegen musste, leider notwendig die Holzverlängerung ab zu montieren. Trotzdem war es möglich innerhalb eines Zeitraums von drei Tagen alle 30 Antennen zu kalibrieren.

Stabilität der Messwerte Zur Überprüfung wie stabil die Messwerte über die drei Tage waren, wurde an jedem Tag dieselbe LOPES-Antenne gemessen. Dies wurde an Antenne 21 durchgeführt da diese mit dem Unimog sehr gut zu erreichen ist.

5.3.6 Ergebnisse der Messung

Nachdem die Messung durchgeführt wurde, werden die von LOPES aufgezeichneten Ereignisdaten in die Analysesoftware eingelesen. Dort wurde nur die Antenne betrachtet über welcher die Messung durchgeführt wurde. Im Frequenzraum präsentierte sich das Signal der Antenne wie in Abbildung 5.13 am Beispiel von Antenne 15 dargestellt. Bei der auf der y-Achse aufgetragenen Leistung handelt es um unka-

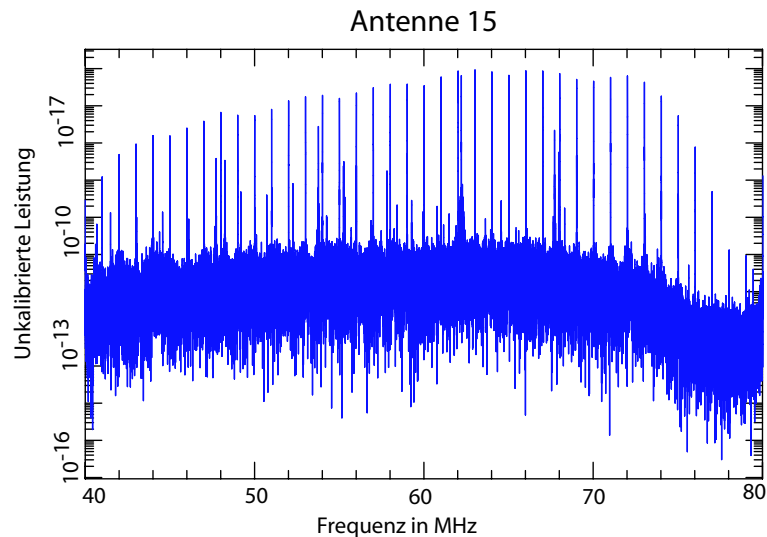


Abbildung 5.13: Gemessene Leistung eines Ereignisses in der Ausgabe der Analysesoftware von LOPES (Leistungsspitzen in 1 MHz Abständen).

librierte Werte. Es handelt sich um eines der im vorherigen Abschnitt erwähnten 12 Ereignisse, welche pro Messung aufgenommen wurden. Die Radioquelle befand sich 11m überhalb der LOPES-Antenne.

Gut zu erkennen sind die Spitzen bei ganzzahligen MHz. Diese befinden sich wie gefordert mindestens 2 Größenordnungen über dem Rauschen. Neben den von der Radioquelle erzeugten Leistungsspitzen kann auch der TV-Sender und andere bekannte Störquellen identifiziert werden. Durch die gute Identifizierbarkeit der bekannten Störquellen können diese beim Auslesen der Leistung ausgeblendet werden. Im nächsten Schritt wurde aus der Analysesoftware die unkalibrierte Leistung ausgelesen und separat abgespeichert. Mit der unkalibrierten Leistung bei 41 bis 79 MHz ergeben sich somit aus den 12 Ereignisdateien 12 mal 39 Wertepaare bestehend aus der Frequenz und der dazugehörigen unkalibrierten Leistung.

Die Frequenzen 40 und 80 MHz wurden nicht ausgelesen, da sich hier in der Elektronik Störungen ergeben welche die Leistungsspitzen der Kalibration überdecken würden. Dies ist ein bekannter Effekt der keinen Einfluss auf das Finden von Spannungsspitzen im Zeitraum hat, da hierbei einzelne Werte aus dem Frequenzraum nur sehr gering beitragen. Außerdem zeigte es sich, dass an den Rändern des Frequenzbe-

reichs von LOPES die Abschwächung durch die Frequenzfilter zu stark ist um noch physikalisch glaubwürdige Ergebnisse zu ergeben.

Da nun aus jedem der 12 Messereignisse ein Wert bei jeder Frequenz vorliegt, wurden aus diesen der Mittelwert gebildet. Zusätzlich wurde die Abweichungen von diesen Mittelwerten gebildet um die Stabilität innerhalb der zwei Minuten, in welchen die zwölf Ereignisse aufgenommen wurden, zu überprüfen. Es zeigte sich, dass bei den meisten Frequenzen nur minimale Abweichungen auftraten, also die gemessenen Leistung stabil blieb. Lediglich bei 40, 50, 60 und 70 MHz zeigten sich stärkere Schwankungen. Dies deutet auf einen Störsender in diesem Bereich hin. Die für diese Frequenzen ermittelten Verstärkungswerte werden wahrscheinlich nicht verwendbar sein und müssen durch eine Interpolation der Verstärkungswerte der umgebenden Frequenzen ersetzt werden (siehe Abschnitt 5.3.7).

Für Abbildung 5.14 wurde, wieder für Antenne 15, die gemessene Leistung in Formel 5.1 eingesetzt. Das Ergebnis ist der Verstärkungsfaktor der Elektronik und damit die Veränderung welche diese auf die absoluten Werte der Messung hat.

Im Vergleich (siehe Abbildung 5.15) mehrerer Antennen zeigt sich, dass die Verstärk-

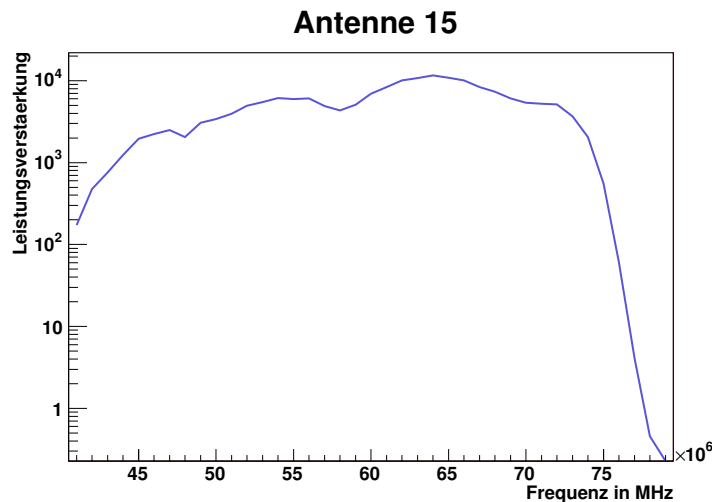


Abbildung 5.14: Verstärkung der Elektronik

ungsfaktoren sich nur geringfügig unterscheiden. Dies war zu erwarten da die meisten der 30 Antennen die gleiche Elektronik besitzen. Lediglich die Elektronik der Antennen 1 bis 10 weisen Unterschiede auf. Es handelt sich hierbei um Bauteile welche bereits bei LOPES 10, also dem ursprünglichen Aufbau, verwendet wurden. Bei der Vergrößerung der Antennenmenge auf 30 musste für die neuen Antennen nicht baugleiche Elektronik eingebaut werden. Auch wenn diese gleich konzipiert wurde, waren Änderungen zu erwarten.

Auffällig ist außerdem das veränderte Verhalten von Antenne 15 bei 50 MHz. Hierbei handelt es sich um eine kurzfristige Störung wie sie in den LOPES-Messungen gele-

gentlich zu finden ist. Dabei handelt es sich um zumeist nur kurzfristig vorhandene Radiosender von Amateurfunkern, die diese Frequenz (das so genannte 6 m Band) nutzen. Der gleiche Effekt konnte auch in den Messungen von anderen Antennen festgestellt werden. Auch bei 70 MHz (dem 2 m Band) finden sich ähnliche Störungen. Bei diesen Frequenzen wurde festgestellt, dass die gemessene Leistung über die zwei Minuten der Messung nicht konstant bleiben, die Werte also nicht für die Berechnung der Verstärkung verwendet werden können. Später wird man an diesen Stellen die Verstärkungswerte der umgebenden Frequenzen interpolieren müssen. Die Mes-

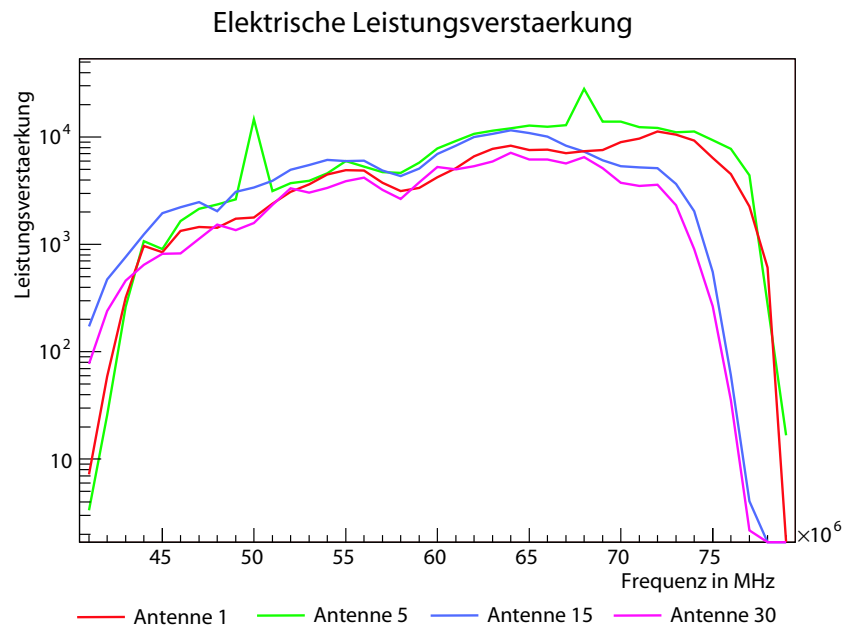


Abbildung 5.15: Verstärkung von vier Antennen im Vergleich

sungen an Antenne 21 wurden über alle drei Messtage hinweg wiederholt um den Einfluss des Wetters bzw. der Bodenfeuchte untersuchen zu können. In Abbildung 5.16 wurde der gemessene Verstärkungsfaktor dargestellt. Dabei handelte es sich bei den drei Messtagen um grundsätzlich unterschiedliche Wetterverhältnisse. Bei der ersten Messung (in Abbildung 5.16 die blaue Linie) hatte es bis zu Beginn der Messung über eine Stunde schwach Niederschlag gegeben. Der Boden dürfte damit eine mittlere Feuchte besessen haben. Die Luftfeuchtigkeit war hoch. Am Tag der zweiten Messung (in Abbildung 5.16 die grüne Linie) herrschten vor Messbeginn sehr schlechte Wetterverhältnisse. Der Boden war stark durchnässt, die Luftfeuchtigkeit war allerdings wie an Tag 2. Am dritten Messtag (in Abbildung 5.16 die rote Linie) war der Boden noch sehr feucht und es herrschte eine hohe Luftfeuchtigkeit.

Von den Daten die von Antenne 21 an diesen drei Tagen gemessen wurden, können Vermutungen auf die Einflüsse dieser Umweltfaktoren gegeben werden. Allerdings ist die Datenmenge noch nicht ausreichend um sichere Aussagen treffen zu können. Im

Ausblick wird versucht auf diesen Punkt weiter einzugehen.

Hier zeigt sich, dass tatsächlich nicht nur von der Verstärkung der Elektronik gesprochen werden kann, sondern auch Wettereffekte eine Rolle spielen. Die Unterschiede zeigen sich vor allem im Frequenzbereich über 60 MHz, wo der Einfluss der Bodenplatte immer geringer wird (siehe auch in Abschnitt 5.2.3). Grundsätzlich lässt sich

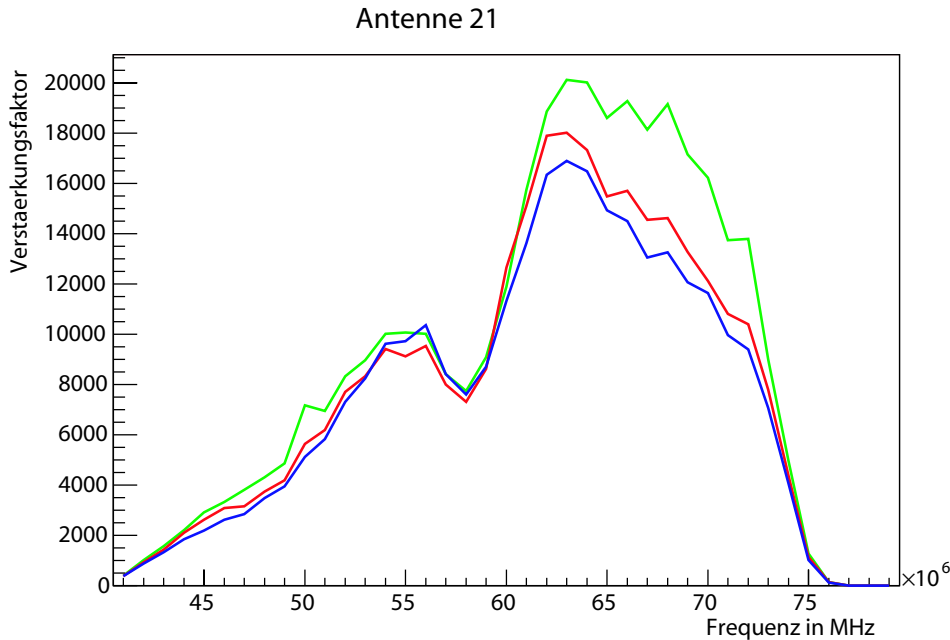


Abbildung 5.16: Verstärkung Antenne 21 über 3 Tage hinweg. Blau entspricht der Messung an Tag 1, Grün Tag 2 und Rot Tag 3 (Nicht logarithmische Darstellung)

festhalten, dass wir von Ungenauigkeiten mit einer Standardabweichung von bis zu 20%, durch die wechselnde Umgebung, rechnen müssen. Diese muss in der Bestimmung der Genauigkeit der Messwerte berücksichtigt werden.

5.3.7 Messungenauigkeiten

Auf der Basis der verwendeten Formel 5.1 wurde eine Fehlerfortpflanzung nach Gauß durchgeführt. Dabei ergab sich die folgende Formel für die Messungenauigkeiten:

$$\sigma_{V_P} = V_P \times \left(\left(\frac{2\sigma_r}{r} \right)^2 + \left(\frac{2\sigma_f}{f} \right)^2 + \left(\frac{2\sigma_{P_M}}{P_M} \right)^2 + \left(\frac{2\sigma_{G_r}}{G_r} \right)^2 + \left(\frac{2\sigma_{G_t P_t}}{G_t P_t} \right)^2 + (-2 \tan(\beta) \sigma_\beta)^2 \right)^{0.5} \quad (5.2)$$

5 Absolute Kalibration der LOPES-Antennen

σ steht dabei jeweils für die Standardabweichung. Die einzelnen σ wurden dabei wie folgt abgeschätzt:

r Die Ungenauigkeit im Abstand von Sendequelle zu der jeweiligen LOPES Antenne wurde mit $\sigma_r = 0.5\text{m}$ abgeschätzt.

f Die Frequenzabweichung wird vom Hersteller der Radioquelle mit $< 10^{-6}$ angegeben. Dieser Fehler trägt allerdings nicht nennenswert zu unserer Messung bei, da bei der Leistungsaufnahme über einen geringen Frequenzbereich summiert wurde und durch die Einzelüberprüfung der Daten sicher gestellt werden konnte, das nur die Leistungsspitzen der Radioquelle verwendet wurden.

$G_t P_t$ Für die von Schaffner gelieferte Radioquelle liegen Kalibrierdaten und Genauigkeitsangaben vor. Allerdings wird nicht zwischen dem Gain der Antenne und der ihr zugeführten Leistung unterschieden, sondern nur eine Ungenauigkeit für die abgesendete Leistung angegeben. Die Genauigkeit der von der Antenne gelieferten Feldstärke wurde mit $\pm 2,5\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ angegeben. Dieser Wert musste für die Auswertung zuerst in die Sendeleistung umgerechnet werden. Die Abweichung der Sendeleistung wurde auf maximal $3 \cdot 10^{-13}\text{W}$ berechnet. In der Fehlerrechnung wurden die Faktoren $G_t P_t$ aus diesem Grund zusammengefasst.

P_M Die Ungenauigkeit der gemessenen Leistung fasst jene Ungenauigkeiten zusammen, die innerhalb der Messelektronik entstehen. So könnten Faktoren wie Temperatur die Aufnahmecharakteristik der Elektronik beeinflussen. Diese Ungenauigkeiten wurden auf $\sigma_{P_M} = 5\%$ abgeschätzt.

G_r Da der simulierte Antennengain für die Berechnung der Verstärkung verwendet wurde, musste auch hier die Übereinstimmung mit der tatsächlichen Antenne abgeschätzt werden. Da die LOPES-Antennen den Boden als Reflektor nutzen, könnten vor allem Umgebungseinflüsse wie Bodenfeuchte oder Wasser auf dem Boden den Antennengain verändern. Eine erste Abschätzung wurde auf eine Ungenauigkeit von 20% getroffen. Bei der Abschätzung dieser Ungenauigkeit wurden die unterschiedlichen Messergebnisse an Antenne 21 berücksichtigt. Eine detaillierte Messung der systematischen Umwelteinflüsse und des Richtdiagramms könnte diese Ungenauigkeit noch verringern.

β Bei der Messung wurde versucht die Radioquelle und die LOPES-Antennen in die gleiche Polarisation auszurichten. Trotzdem muss die Abweichung von diesen 0° Polarisationswinkel auf maximal $\sigma_\beta = 10^\circ$ abgeschätzt werden. Dadurch kann es zu einem Verlust von bis zu 12% der ausgesendeten Feldstärke kommen.

Auf der Basis dieser Abschätzungen wurden die Messungenauigkeiten berechnet. In Abbildung 5.3.7 sind die Verstärkungsfaktoren von Antenne 15 mit der berechneten Ungenauigkeit dargestellt. Der hier abgeschätzte systematische Messfehler liegt im Frequenzbereich von 41 bis 77 MHz bei durchschnittlich 32%. Allerdings können

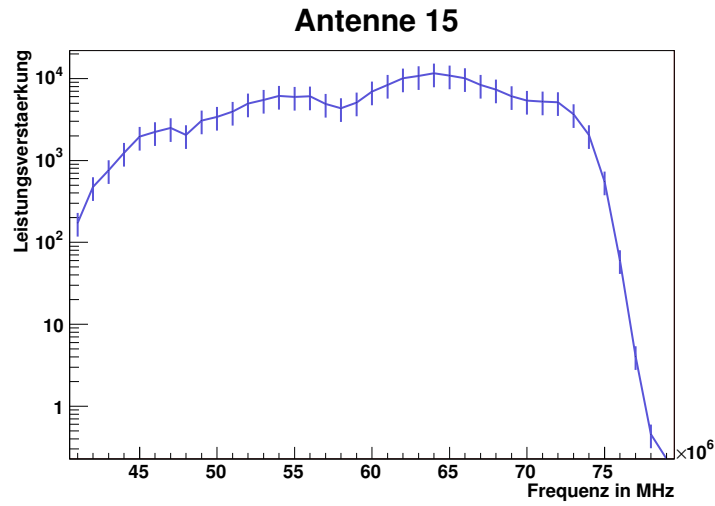


Abbildung 5.17: Verstärkungsfaktor Antenne 15 mit systematischen Fehlern.

weitere Messungen unter Berücksichtigung der Bodenfeuchte oder dem auf dem Boden vorhandenen Wasser helfen diese Ungenauigkeiten wesentlich zu reduzieren. Im Kapitel 6 wird auf diesen Punkt nochmals eingegangen.

5 Absolute Kalibration der LOPES-Antennen

6 Ausblick

Nachdem nun das Vorgehen bei einer absoluten Kalibration definiert und das System vollständig aufgebaut ist, müssen nun noch weitere Schritte folgen um dieses vollständig nutzen zu können:

6.1 Analysesoftware

Die Daten aus Antennensimulation und Verstärkung müssen, unter Berücksichtigung der momentanen Genauigkeit, in die Software eingepflegt werden. Das bedeutet, dass beide Informationen in ein von der Software lesbares Format umgewandelt werden müssen. Im nächsten Schritt ist es dann erforderlich die entsprechenden Funktionen neu zu programmieren und in die Analyse der Daten einzubinden.

6.2 Überprüfung der Richtdiagramme und Simulation in 1 MHz Schritten

Wie bereits in Abschnitt 5.2.3 erwähnt, sollte eine Überprüfung der simulierten Richtdiagramme durchgeführt werden. Ein erster Ansatz war es die Ereignisdateien aus der Messung der Gesamtverstärkung der Elektronik zu diesem Zweck zu verwenden. Während einer Messung wurde das ausgesendete Radiosignal von allen LOPES-Antennen empfangen. Dies ermöglicht es das gleiche Signal aus unterschiedlichen Richtungen zu messen. Wird die gemessene Leistung einer Antenne $P_r[1]$ durch die gemessene Leistung der Antenne direkt unterhalb des Senders $P_r[2]$ dividiert, so erhält man mittels der Transmissionsgleichung (bei einer festen Frequenz):

$$\frac{P_r[1]}{P_r[2]} = \frac{r[2]}{r[1]} \times \frac{G_e[1]}{G_e[2]} \times \frac{G_t[1]}{G_t[2]} \times \frac{\cos^2(\beta[1])}{\cos^2(\beta[2])} \quad (6.1)$$

Da r , G_t und β für beide Antennen bestimmt werden können, ist es möglich, das Verhältnis der gemessenen Leistungen direkt mit dem Verhältnis des simulierten Antennengains zu vergleichen. In der Praxis erwies sich dieser Ansatz als problematisch, da nur Zenitwinkel über 70° möglich wären. Dies ergibt sich durch den Mindestabstand von 26 m zwischen zwei LOPES-Antennen und der geringen Höhe der Radioquelle. Hinzu kommen noch die starken Änderungen der Sendeleistung der Radioquelle (siehe Abbildung 5.9) bei einer kleinen Veränderung des Abstrahlwinkel im Bereich von 75° bis 90° von der Hauptrichtung.

Es ist also notwendig eine separate Messung durchzuführen. Hierzu könnte die Radioquelle an mehrere Positionen über den LOPES-Antennen gebracht werden. Der

Verlauf der Messung würde der in Abschnitt 5.3 beschriebenen Messung entsprechen. Es würde lediglich bei der Positionsbestimmung der Radioquelle auch die Richtung gemessen werden, unter welcher die Quelle von der jeweiligen LOPES-Antenne gesehen wird. Um zu verhindern, dass der Abstrahlwinkel der Quelle zu hoch ist, sollte die Quelle mittels einer Leine ausgerichtet werden. Bei der Auswertung könnte Gleichung 6.1 verwendet werden, wobei die gemessene Leistung bzw. der Gain einer beliebigen Richtung mit den Werten in Hauptrichtung verglichen werden können.

Um die Richtdiagramme weiter zu verfeinern, könnte außerdem der Einfluss der Bodenplatten genauer untersucht werden. Hier wäre auch eine Vergleichsmessung einer Antenne ohne Bodenplatte denkbar. Dadurch würden, wie in den simulierten Richtdiagrammen, die Werte für beide Varianten vorliegen.

Wichtig wäre allerdings, dass die Simulation der Antennen nochmals mit einer kleineren Frequenzauflösung durchgeführt würde. Speziell im Bereich um 60 MHz sind die Frequenzabstände mit 10MHz für eine solche Untersuchung zu groß gewählt.

6.3 Untersuchung der Umwelteinflüsse

Wie bereits in Abschnitt 5.3.6 festgestellt wurde, müssen die Einflüsse von Luft- und Bodenfeuchte genauer untersucht werden um die Stabilität der Messdaten zu erhöhen. Dazu wäre es möglich die gleiche Antenne über mehrere Tage hinweg zu messen und die gewonnenen Werte mit den Wetterdaten zu vergleichen. Sollte sich eine gesicherte Korrelation zwischen der Bodenfeuchte und der Verstärkung der Antennen ergeben, muss diese in die Kalibration aufgenommen werden. Zu diesem Zweck wäre es wünschenswert aktuelle Messdaten über die Bodenfeuchte oder Radioreflexion des Bodens zu erhalten.

In diesem Kontext ist es auch interessant die Veränderung des Richtdiagramms der LOPES-Antennen bei unterschiedlichen Bodenbedingungen zu untersuchen. Bei größer werdenden Zenitwinkel kann erwartet werden, dass die Antennen immer sensibler auf die Bodenbeschaffenheit werden.

Sollten die Ergebnisse auf einen großen Einfluss des Bodens hinweisen, so muss eine Online-Kalibration in Betracht gezogen werden. Dabei handelt es sich um eine automatisch durchgeführte Kalibration. Zum Beispiel wäre es möglich eine unkalibrierte Radioquelle in regelmäßigen Abständen neu zu messen. Die Quelle dürfte unkalibriert vorliegen, da nur Veränderungen relativ zur bereits vorhandenen, absoluten Kalibration untersucht werden müssten.

Auch der Einfluss der Luftfeuchtigkeit könnte überprüft werden. Grundsätzlich sollte es sich hierbei um keine schwierige Aufgabe handeln, da Wetterdaten im Forschungszentrum Karlsruhe regelmäßig ganztägig aufgenommen werden. Allerdings wäre es trotzdem notwendig hier erneute Messungen durchzuführen um diese exakt mit den Luftfeuchtigkeitswerten zu vergleichen und gleichzeitig die Effekte des Bodens weitgehend auszuschließen. Da bei der absoluten Kalibration außerdem keine großen Übertragungsdistanzen vorhanden waren, wäre hier kein signifikanter Effekt zu erwarten.

6.4 Wiederholung der absoluten Kalibration

Die nun vorliegenden Messwerte sollten, auch unabhängig von den bereits vorgeschlagenen Untersuchungen, wiederholt werden um ihre Stabilität zu gewährleisten. So sollten grobe systematische Fehler ausgeschlossen und die in der bisherigen Messung entstandenen Fehler, durch kurzzeitig aufgetretene Störsender, entfernt werden. Die Gefahr großer systematischer Messfehler ist speziell durch den kritischen Polarisationswinkel gegeben. Durch eine zusätzliche Fixierung der Sendeantenne könnte hier ein geringerer Verlust gewährleistet werden. Denkbar wären auch zusätzliche Messungen am Ort der Antenne durchzuführen um diesen Winkel zu bestimmen. Mittels einer unkalibrierten Antenne, welche in der Lage ist beide Polarisierungen zu messen, wäre es möglich den Winkel über das Leistungs-Verhältnis der beiden Richtungen zu berechnen. Eine solche Antenne könnte ebenfalls ohne größere Schwierigkeiten konstruiert und an einen einfach Frequenzspektrometer angeschlossen werden.

Da sich Antenne 24 zur Zeit nicht auf dem Antennenfeld befindet, konnten hier keine weiteren Messungen vorgenommen werden. Diese Messung muss nach der Reinstallation der Antenne durchgeführt werden. Im Anhang finden sich die Messwerte einer älteren Messung bei welcher 5 MHz Schritte verwendet wurden.

6.5 Phasenkalibration

Neben der Verfeinerung der absoluten Kalibration muss LOPES nun auch noch phasenkalibriert werden. In einem ersten Ansatz können zuerst größere Zeitverschiebungseffekte berücksichtigt werden. Durch unterschiedliche Kabel und Elektronikbauteile haben die Antennen stark unterschiedliche Signallaufzeiten. Diese "groben" Verzögerungen können über ein, in allen Antennen deutlich sichtbares, Teilchenschauerereignis bestimmt werden. Bei einem solchen Ereignis werden die, von KASCADE berechneten, Positionsdaten des Schauerzentrums zu einer ersten Bestimmung der Laufzeiten verwendet. Da diese allerdings nicht über die notwendige Genauigkeit verfügen, müsste dann eine exakte Korrektur über das Signal des TV-Sender erfolgen. Da diese Messung nicht an der absoluten Signalstärke des TV-Sender interessiert ist, wäre dies durchführbar. Der Nachteil dieser Methode ist allerdings, dass solche Teilchenschauerereignisse im Moment noch manuell ausfindig gemacht werden müssen und der TV-Sender nur eine Frequenz besitzt, also keine Information über die frequenzabhängigen Phasenverschiebungen gewonnen werden können.

Diese "echte" Phasenkalibration muss noch folgen. Eine Möglichkeit wäre auch hier die Verwendung einer eigenen Radioquelle. Diese müsste in diesem Fall allerdings kein Sinussignal, dh. ein Signal mit konstanter Frequenz, senden, sondern einen Radiopuls, also ein kurzzeitiges Ansteigen der Feldstärke. Diese Radiopulsquelle müsste allerdings an eine Position gebracht werden von der aus sie von allen Antennen gut gesehen werden kann. Dies wäre über die Verwendung eines Wetterballons möglich. Dieser Ansatz könnte, im Gegensatz zur absoluten Kalibration, erfolgreich sein, da der Ballon hier wesentlich geringeren Belastungen ausgesetzt werden würde. Die Ursache

dafür liegt darin, dass die Sendeleistung der Pulsquelle nicht bekannt sein müsste. Bei der Verwendung einer nicht linear polarisierten Antenne dürfte sich der Messaufbau frei drehen. Die Belastung durch die Halterungen bei der absoluten Kalibration könnten also entfallen und der Ballon nur an einem Seil gesichert aufsteigen.

6.6 Vergleich der theoretischen Vorhersagen mit den gemessenen Daten

Nach Abschluss der Phasenkalibration können dann, zusammen mit der absoluten Kalibration, die Messwerte von LOPES mit den theoretischen Vorhersagen verglichen werden (siehe Huege and Falcke (2003), Huege and Falcke (2005a)). Ohne die Phasenkalibration wäre es unter Umständen möglich, einen Vergleich des Radiosignals im Frequenzraum einer einzelnen Antenne durchzuführen.

Grundsätzlich ist die Bestätigung der simulierten Entstehungsprozesse wesentlich für die Nutzung von Radioantennen zur Messung der kosmischen Strahlung. Nur wenn diese Prozesse bekannt sind, ist es überhaupt möglich einem gemessenen Radiopuls seine Primärenergie und das Ursprungsteilchen zuzuordnen.

7 Zusammenfassung

Für LOPES liegen nun eine Methode und erste Werte für eine absolute Kalibration vor. Dabei handelt es sich um Korrekturfaktoren für die Leistung im Frequenzraum. Dieser Korrekturfaktor ist durch den Messaufbau von LOPES abhängig von zwei Faktoren: Richtung und Frequenz der ankommenden Signale. Außerdem wurde durch die Messung festgestellt, dass zusätzlich noch die Umweltbedingungen bis zu 20 % beitragen können.

Da nur die Antennen und nicht die Elektronik die Richtungsabhängigkeit besitzen, wurden diese getrennt betrachtet. Dies hatte den Vorteil, dass die Anzahl von zeitaufwendigen Messungen minimiert werden konnte, da nun bei der absoluten Kalibration der Elektronik nur eine Richtung betrachtet werden musste.

Das Richtdiagramm der Antennen wurden mittels einer Simulation ermittelt. Diese wurde bei ASTRON in den Niederlanden durchgeführt. Es zeigten sich hierbei zwar deutliche Einflüsse der von LOPES verwendeten Bodenplatten, aber durch die Simulationen konnte kein negativer Einfluss auf die Messungen festgestellt werden. Im Gegenteil zeigte sich bisher, dass die Bodenplatten die Umwelteinflüsse des darunter liegenden Bodens bei bestimmten Frequenzen verkleinern.

Die Korrekturfaktoren der Elektronik werden über die Verwendung einer externen Quelle ermittelt. Bei dieser handelt es sich um eine kommerzielle Radioquelle für welche die Sendeleistung gegeben war. Die Antenne wurde mittels eines Kranauslegers über eine LOPES-Antenne gebracht. Das von ihr emittierte Signal wurde von LOPES gemessen und seine Leistung ausgelesen. Das simulierte Richtdiagramm der LOPES-Antenne und die Sendeleistung der Radioquelle wird in die Transmissionsgleichung von Friis eingesetzt um die in die Elektronik eingehende Leistung zu berechnen. Durch die Division der gemessenen Leistung durch diese berechnete Eingangsleistung ergibt sich ein Korrekturfaktor welcher die Veränderungen der Elektronik an dem eingegangenen Signal darstellt. Beide Kalibrierdaten müssen separat in die Analyse-Software eingearbeitet werden.

Bei der Messung des Verstärkungsfaktors ließen sich drei Ungenauigkeiten getrennt voneinander feststellen. Zum Ersten ergaben sich systematische Fehler durch Ungenauigkeiten bei der Positionsbestimmung der Radioquelle oder des Polarisationswinkel zwischen ihr und der LOPES-Antenne. Außerdem konnte die Sendeanenne während der Messung nur begrenzt stabil gehalten werden. Dadurch ergaben sich weitere stochastische Fehler in den Leistungsmessungen von LOPES. Diese Ungenauigkeiten hatten eine Unsicherheit von $\approx 32\%$ zur Folge.

Als zweite Ungenauigkeit müssen weitere, kurzzeitig auftretende Störsender genannt werden. Diese hatten die massive Qualitätsverschlechterung der Messdaten bei einzelnen Frequenzen bzw. Messungen zur Folge. Mögliche Störquellen sind z.B. die beiden

7 Zusammenfassung

Frequenzbänder für den Amateurfunk bei 50 und 70 MHz. Insbesondere das 50MHz Band wird häufig genutzt. Diese Fehler können allerdings durch eine ausgewählte Wiederholung der Messungen vermieden werden.

Als dritte und massivste Ungenauigkeit müssen die Einflüsse der Umweltbedingung gewertet werden. Durch die wiederholte Messung einer Antenne bei unterschiedlichen Wetterbedingungen konnte festgestellt werden, dass nur durch die Schwankungen in Luftfeuchtigkeit und Bodenfeuchte eine Veränderung der eingehenden Leistung um bis zu $\approx 20\%$ auftreten können.

Danksagung

Herrn Prof. Dr. J. Blümer danke ich für die Übernahme des Referats und die Ermöglichung dieser Staatsexamensarbeit am Institut für Kernphysik im Forschungszentrum Karlsruhe.

Mein Dank gilt Herrn Dr. A. Haungs für die freundliche Aufnahme, seine Bereitschaft Fragen zu klären und für seine wertvollen Anregungen. Durch seine gute Betreuung waren mir die besten Voraussetzungen gegeben.

Den Mitgliedern der LOPES Kollaboration gilt mein Dank für ihre Unterstützung. Insbesondere möchte ich Herrn Dipl. Phys. S. Nehls für seine Mitarbeit, Geduld und Diskussionsbereitschaft und Herrn Dipl. Ing. H. Bozdog für seine Hilfe bei den Arbeiten an der Elektronik hervorheben. Herrn M. Arts (ASTRON) möchte ich für die Simulation der Antennen und Herrn W. v. Cappellen (ASTRON) für seine freundliche Unterstützung danken. Mit ihrer Hilfe haben sie einen wesentlichen Bestandteil dieser Arbeit ermöglicht.

Herrn H. Weingardt möchte ich für die Hilfe bei Planung und Aufbau danken. Durch seinen ausdauernden und kreativen Einsatz wurde Vieles überhaupt erst möglich.

Herrn N. Bechtold, Frau V. Hermann, Herrn E. Fuessler und Herrn W. Paulus danke ich für die tatkräftige Hilfe bei den Messungen auf dem KASCADE-Detektorfeld. Mit ihrem unerschütterlichen Humor ist es ihnen gelungen trotz widrigster Wetterbedingungen eine angenehme Atmosphäre zu schaffen.

Herrn Dr. T. Huege möchte ich dafür danken, dass er diese Arbeit Korrektur gelesen und mir bei der Klärung von technischen und physikalischen Fragen geholfen hat.

Herr Dipl. Ing. O. Kroemer bin ich dankbar, dass er mir immer wieder bei Fragen in Bezug auf Antennenformen oder Elektronik geholfen hat. Dankbar bin ich auch Herrn M. Hammer, der durch seine Diskussionsbereitschaft mir das Öfteren half meine Konzentration wiederzufinden.

Ein herzliches Dankeschön auch an meine Familie, die mir in dieser Zeit den Rücken gestärkt hat und ohne die mein gesamtes Studium nicht möglich gewesen wäre.

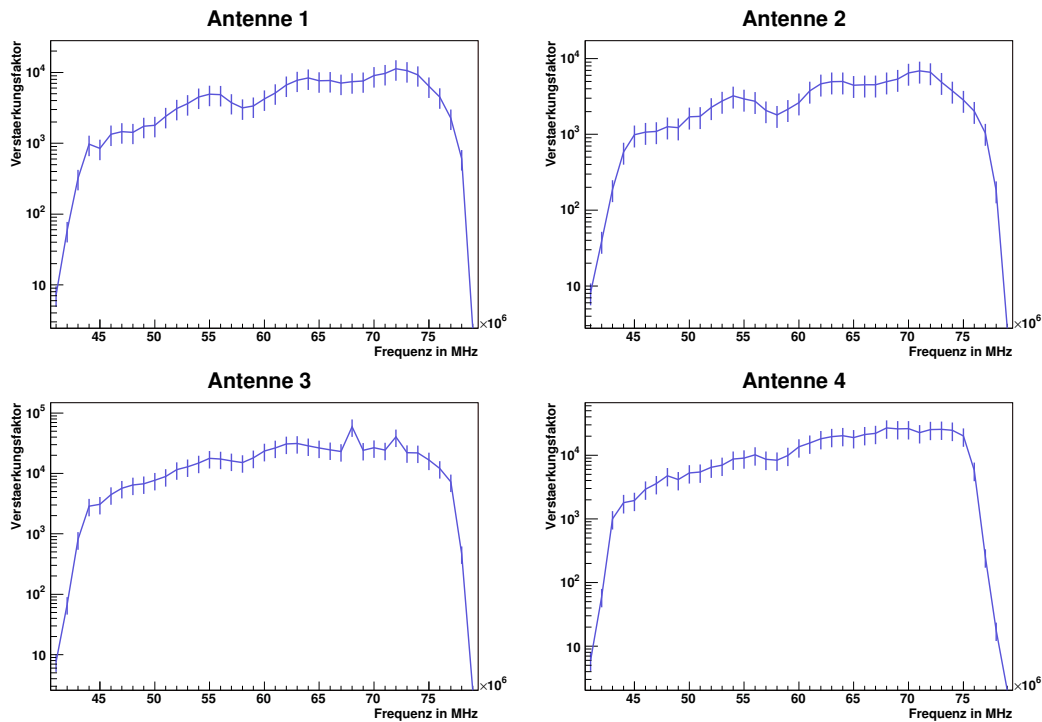
Für die Korrektur dieser Arbeit, ihre unendliche Geduld und ihr Verständnis möchte ich meiner Verlobten Sonja danken. Sie begleitete mich bei allen Höhen und Tiefen des vergangenen halben Jahres und war für mich eine unersetzliche Kraftquelle.

7 Zusammenfassung

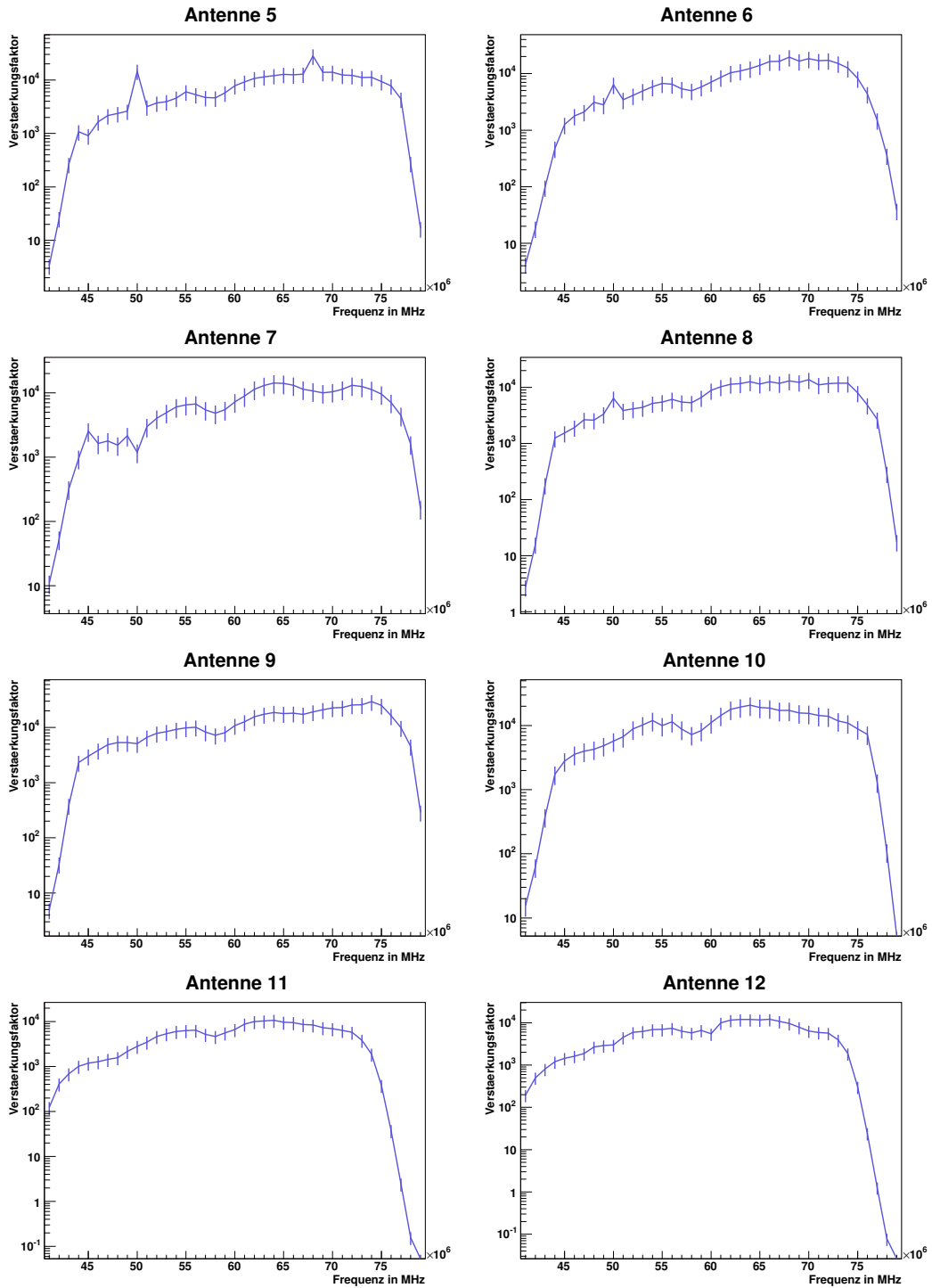
A Verstärkungsfaktoren für Antennen

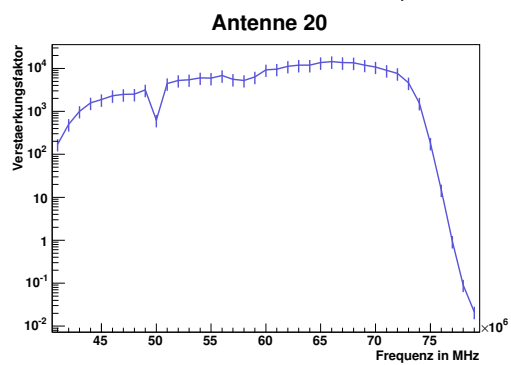
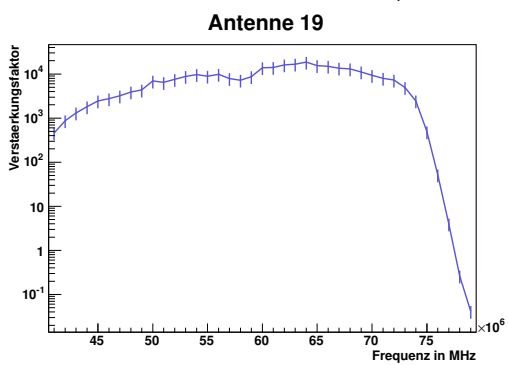
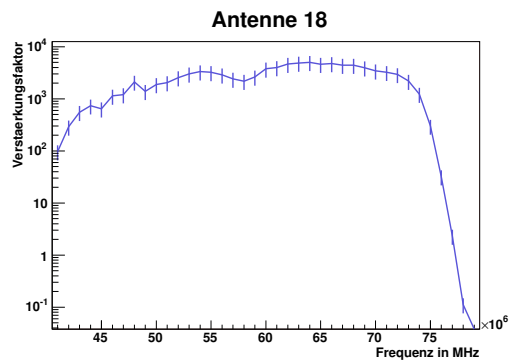
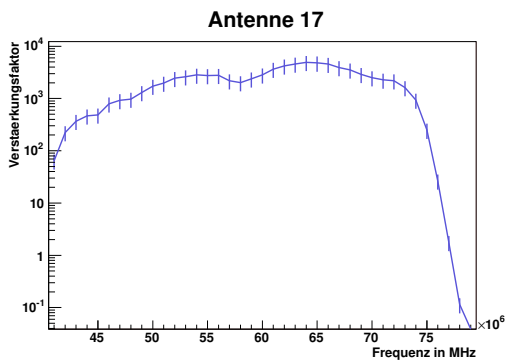
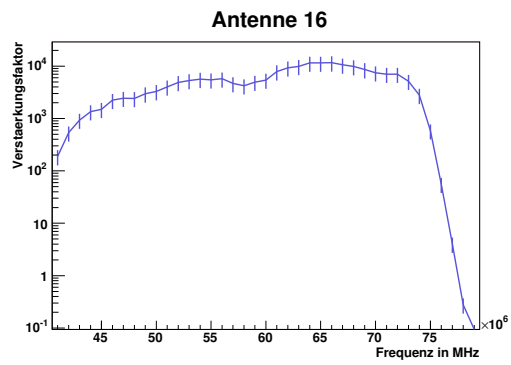
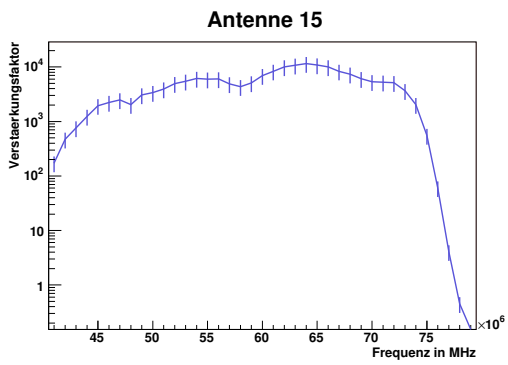
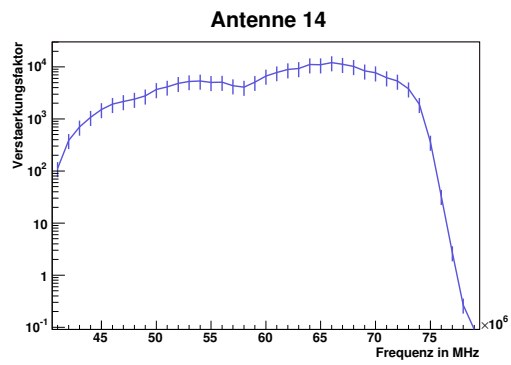
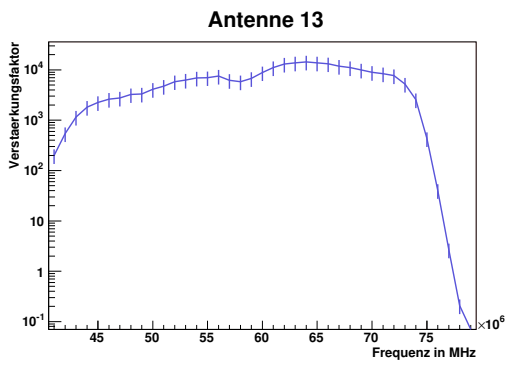
1-30

Im Folgenden werden die Veränderungsfaktoren der Elektronik für alle 30 LOPES-Antennen dargestellt. Die Fehlerbalken repräsentieren dabei die systematischen Ungenauigkeiten. Den hier gezeigten Messdaten bei 50, 60 und 70 MHz ist, aufgrund einer hohen Störrate bei diesen Frequenzen, nicht zu trauen. Bei Antenne Nummer 24 wurde nur ein Frequenzabstand von 5 MHz an der Radioquelle eingestellt. Dadurch entstanden bei dieser Antenne nur 7 Datenpunkte in unserem Frequenzbereich. Die hier abgebildeten Diagramme wurden

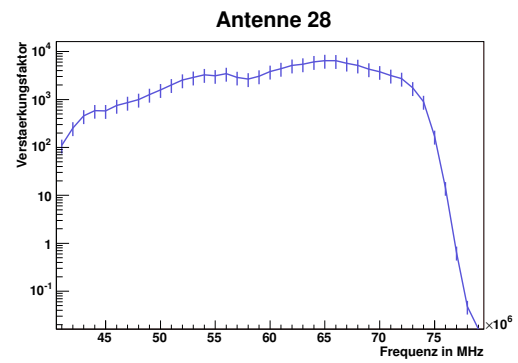
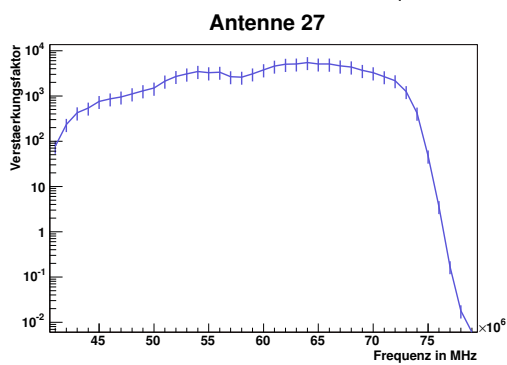
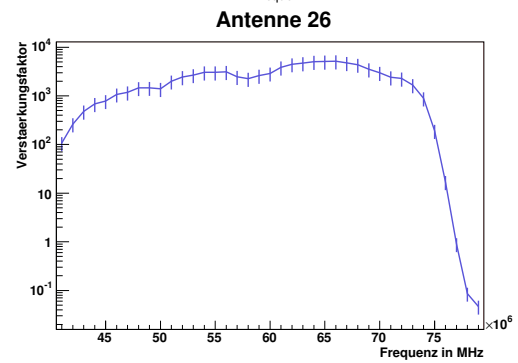
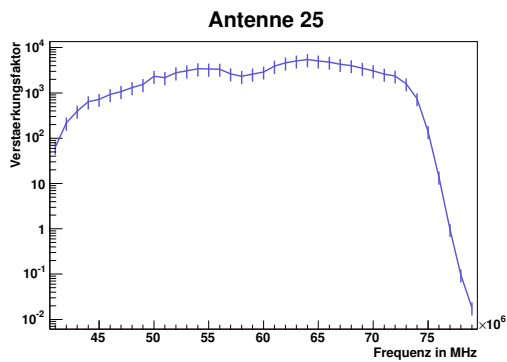
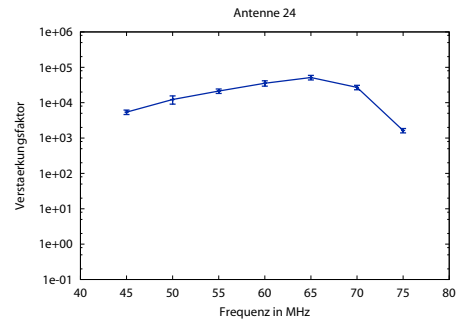
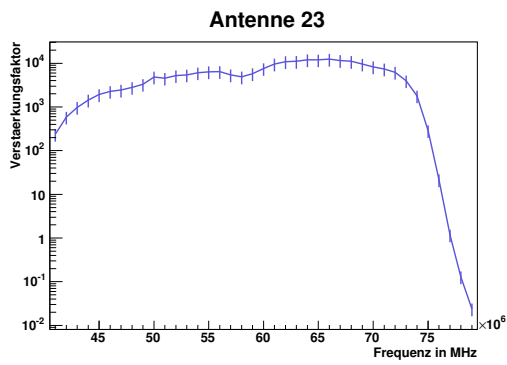
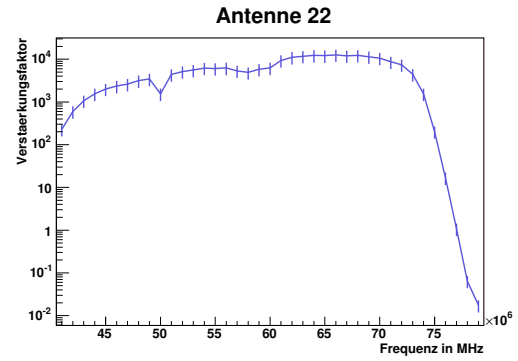
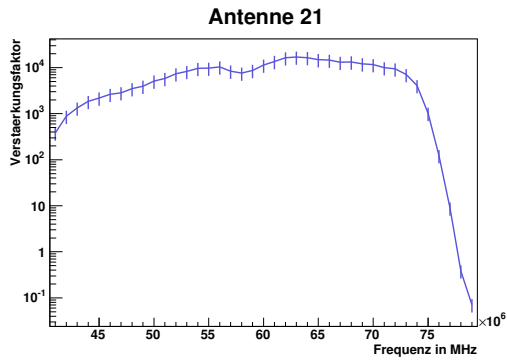


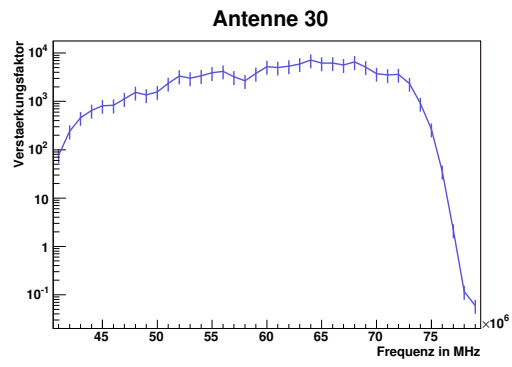
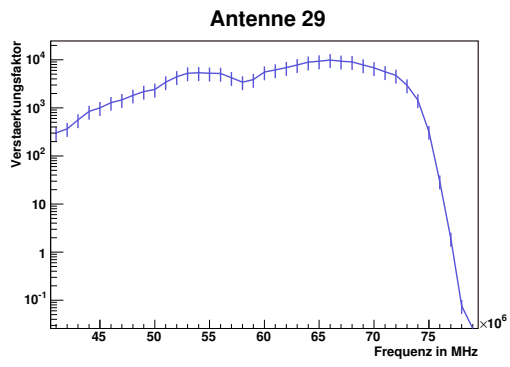
A Verstärkungsfaktoren für Antennen 1-30





A Verstärkungsfaktoren für Antennen 1-30





A Verstärkungsfaktoren für Antennen 1-30

B Datenblatt der verwendeten Radioquelle



Vergleichsstrahlungsquelle 30 MHz - 1 GHz

VSQ 1000

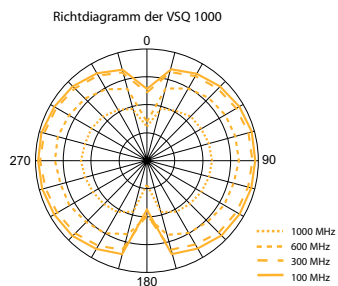
- Komplettelösung für Vergleichstests bei Störaussendungen
- Frequenzbereich 30 MHz – 1000 MHz

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

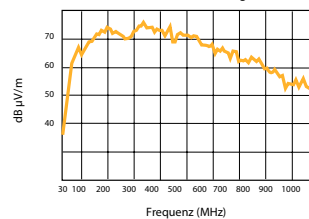
Vergleichstests von Freifeldern und ähnlichen Testumgebungen zum Zwecke des Qualitätsnachweises oder der Bestimmung von Korrekturfaktoren.

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

Schirmdämpfungsmessungen in großen Kabinen.



Typisches Diagramm für Feldstärke (Freifeld) für 10 m Entfernung



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

Technische Spezifikationen	RSG 1000
Frequenzabstand:	1, 5, 10 MHz
Frequenzbereich:	1 MHz – 1 GHz
Frequenzfehler:	<1 x 10 ⁻⁶
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

B Datenblatt der verwendeten Radioquelle

Literaturverzeichnis

- J. Abraham et al. *Nucl. Instrum. Methods A*, 523:50, 2004.
- T. Abu-Zayyad et al. *Ap. J.*, 557:686, 2001.
- M. Aglietta et al. *Astropart. Phys.*, 10:1, 1999.
- O. C. Alkhofer. *Introduction to cosmic radiation*. Verlag Carl Thiemig München, 1975.
- H. R. Allan et al. *Nature*, 222:635, 1969.
- M. Amenomori et al. *Ap. J.*, 461:408, 1996.
- T. Antoni et al. *Nucl. Instrum. Methods A*, 513:490, 2003.
- A.V. Apanasenko et al. *Astropart. Phys.*, 16:13, 2001.
- F. Arqueros et al. *Astron. Astrophys.*, 359:682, 2000.
- M.J. Arts. Evaluation of the LBL an LBH antenna. *LOFAR - Project Documentation (internal papers)*, 2003.
- M.J. Arts. LOFAR LBA antenna pattern measurements with and without a metal ground plane. *LOFAR - Project documentation (internal papers)*, 2004.
- G. A. Askaryan. *Soviet Phys. JETP*, 14:441, 1962.
- G. A. Askaryan. *Soviet Phys. JETP*, 21:658, 1965.
- A. Bellétoile et al. In *SF2A-2004: Semaine de l'Astrophysique Francaise*, 2004.
- H. Bozdog et al. *Nucl. Instrum. Methods A*, 465:455, 2001.
- P. Doll et al. *Nucl. Instrum. Methods A*, 488:517, 2002.
- H. Falcke and P. Gorham. *Astropart. Phys.*, 19:477, 2003.
- H. Falcke, W. D. Apel, A. F. Badea, L. Bähren, K. Bekk, A. Bercuci, M. Bertaina, P. L. Biermann, J. Blümer, H. Bozdog, I. M. Brancus, S. Buitink, M. Brüggemann, P. Buchholz, H. Butcher, A. Chiavassa, K. Daumiller, A. G. de Bruyn, C. M. de Vos, F. di Pierro, P. Doll, R. Engel, H. Gemmeke, P. L. Ghia, R. Glass-tetter, C. Grupen, A. Haungs, D. Heck, J. R. Hörandel, A. Horneffer, T. Huege,

Literaturverzeichnis

- K.-H. Kampert, G. W. Kant, U. Klein, Y. Kolotaev, Y. Koopman, O. Krömer, J. Kuijpers, S. Lafebre, G. Maier, H. J. Mathes, H. J. Mayer, J. Milke, B. Mitrica, C. Morello, G. Navarra, S. Nehls, A. Nigl, R. Obenland, J. Oehlschläger, S. Ostapchenko, S. Over, H. J. Pepping, M. Petcu, J. Petrovic, S. Plewnia, H. Rebel, A. Risse, M. Roth, H. Schieler, G. Schoonderbeek, O. Sima, M. Stümpert, G. Toma, G. C. Trincherro, H. Ulrich, S. Valchierotti, J. van Buren, W. van Cappellen, W. Walkowiak, A. Weindl, S. Wijnholds, J. Wochele, J. Zabierowski, J. A. Zensus, and D. Zimmermann. *Nature*, 435:313, 2005.
- J. W. Fowler et al. *Astropart. Phys.*, 15:49, 2001.
- H. T. Friis. *Proc. IRE*, page 254, 1946.
- H. Gemmeke et.al. In *International ARENA Workshop 2005*, 2005.
- M. A. K. Glasmacher et al. *Astropart. Phys.*, 10:291, 1999.
- K. Greisen. *Phys. Ref. Lett.*, 16:748, 1966.
- K. Greisen. *Prog. Cosmic Ray Phys.*, 3,1, 1956.
- P.K.F. Grieder. *Cosmic Rays at Earth*. Elsevier Science, 1 edition, 2001.
- N. L. Grigorov et al. *Sov. J. Nucl. Phys.*, 11,No.5:588, 1970.
- A. Haungs et al. *J. of Phys. Conf. Ser. (Im Druck), Preprint astro-ph 0508286*, 2005.
- V. K. Hess. *Z. Phys.*, 13:1084, 1912.
- A. Horneffer et al. In *Optical Fabrication, Metrology, and Material Advancements for Telescopes. Edited by Atad-Ettdedgui, Eli; Dierickx, Philippe. Proceedings of the SPIE, Volume 5500, pp. 129-138 (2004).*, page 129, 2004.
- T. Huege and H. Falcke. *Astron. Astrophys.*, 412:19, 2003.
- T. Huege and H. Falcke. *Astron. Astrophys.*, 430:779, 2005a.
- T. Huege and H. Falcke. *Astron. Astrophys.*, 24:116, 2005b.
- J. D. Jackson. *Classical electrodynamics*. New York: Wiley, 1999, 3rd ed., 1999.
- J. V. Jelley. *Cerenkov Radiation and its applications*. Pergamon Press, London, 1958.
- J. V. Jelley et al. *Nature*, 205:327, 1965.
- K. Kamata and J. Nishimura. *Prog. Theoret. Phys. Suppl.*, 6,93, 1958.
- E. D. Kaplan, editor. *Understanding GPS: Principles and Applications*. Artech House Telecommunications Library, 1996.
- I. Kravchenko et al. *Astropart. Phys.*, 19:15, 2003.

- M. S. Longair. *High Energy Astrophysics*. Cambridge University Press, 1981.
- H. Meinke and F. W. Gundlach. *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik*. Springer Verlag, 5 edition, 1992.
- M. Nagano and A. A. Watson. *Rev. Mod. Phys.*, 72:689, 2000.
- M. Nagano et al. *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys*, 10:1295, 1984.
- M. Nagano et al. *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys*, 18:423, 1992.
- G. Navarra et al. *Nucl. Instrum. Methods A*, 518:207, 2004.
- W. Nolting. *Grundkurs Theoretische Physik 3 Elektrodynamik*, volume 3 Elektrodynamik. Vieweg & Sohn, 1997.
- H. Röttgering. *New Astron. Rev.*, 47:405, 2003.
- H. Röttgering et al. In *Texas in Tuscany. XXI Symposium on Relativistic Astrophysics*, page 69, 2003.
- K. Rothammel. *Rothammels Antennenbuch*. Franckh-Losmos Verlags-GmbH & Co., Stuttgart, 11 edition, 1995.
- H. Schieler. PhD thesis, Universität Karlsruhe (TH), 1996.
- S. P. Swordy and D. B. Kieda. *Astropart. Phys.*, 13:137, 2000.
- J. Takahashi. *Nucl. Phys B (Proc. Suppl.)*, 60B:83, 1998.
- M. Takeda et al. *Astropart. Phys.*, 19:447, 2003.
- H. Ulrich. *FZKA report*, 6952, 2003.
- G. T. Zatsepin and V. A. Kuz'min. *JETP Lett.*, 4:78, 1966.