

Reduktion von elektromagnetischen Störungen durch Szintillationsdetektoren bei der gleichzeitigen Messung ausgedehnter Luftschauer mit Radio-Antennen

Diplomarbeit
von
Martin Andreas Deutsch

Referent: Prof. Dr. J. Blümer
Korreferent: Prof. Dr. H. Gemmeke

21. Juli 2006

Universität Karlsruhe
Institut für Experimentelle
Kernphysik



Universität Karlsruhe (TH)
Forschungsuniversität • gegründet 1825

Forschungszentrum Karlsruhe
Institut für Kernphysik



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Zusammenfassung

Das LOPES-Experiment zur Messung der Radiokomponente ausgedehnter Luftschauer am Forschungszentrum Karlsruhe besteht aus 30 Dipolantennen. Es misst in Koinzidenz mit dem KASCADE-Grande Luftschauerexperiment. Die Antennen befinden sich zwischen den Detektorstationen des KASCADE-Array, das die Auslese der Antennensignale durch einen speziellen Trigger initiiert und bei der Datenanalyse Startwerte für deren Luftschauerrekonstruktion liefert. Die Szintillationsdetektoren des KASCADE-Array sind andererseits aber auch Radiosender und damit elektromagnetische Störquellen für die Antennen. In dieser Arbeit werden kostengünstige und praktikable Möglichkeiten zur Reduktion dieses inkohärenten Untergrundes durch Modifikationen an den Szintillationsdetektoren vorgestellt. Dafür haben sich vor allem Ferritkerne und eine Repositionierung der Signal- und HV-Kabel auf der Szintillationsdetektoroberfläche als geeignet herausgestellt, deren Wirkung zur Reduktion dieses inkohärenten Untergrundes zuerst an einem Versuchsaufbau und anschließend am KASCADE-Experiment überprüft wurde. Zudem wurde ein Feldversuch im Rahmen einer LOPES-Messung durchgeführt. Auch hier konnte eine Reduktion mit den genannten Maßnahmen erkannt werden.

Abstract

The LOPES-experiment is measuring the radio component of extended air showers at the Forschungszentrum Karlsruhe. It is composed up on 30 dipole antennas and is measuring in coincidence with the KASCADE-Grande air shower experiment. The antennas are located in between the detector stations of the KASCADE-Array which initiates the readout of the antennas with a special trigger. This array provides also start values for the shower reconstruction of the LOPES-experiment. On the other hand, the scintillator detectors of the KASCADE-Array are radio emitters, i. e. they are sources of an electromagnetic interference for the antennas. In this thesis methods are presented to reduce this incoherent noise which have to be cost-efficient and also practicable for the use in the KASCADE-experiment. An installation of ferrits and the repositioning of the signal and high voltage cables on the detector surface has turned out to be applicable. Their properties were first tested at a setup and afterwards at the KASCADE-experiment. In addition a test run within a LOPES measurement was performed. In this measurements a reduction of this incoherent noise with the mentioned methods could be recognized.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Kosmische Strahlung und Radioemission in ausgedehnten Luftschauern	3
2.1	Energiespektrum und Herkunft der kosmischen Strahlung	3
2.2	Ausgedehnte Luftschauer	5
2.3	Komponenten eines Luftschauers	6
2.4	Radioemission in ausgedehnten Luftschauern	7
2.4.1	Emissionsmechanismen	7
2.4.2	Experimenteller Nachweis der Radioemission in Luftschauern . .	7
2.5	KASCADE-Grande	8
2.6	LOPES	10
2.6.1	LOFAR	10
2.6.2	LOPES - Überblick	11
2.6.3	LOPES - Hardware	12
2.6.4	LOPES-Event-Analyse und erste Ergebnisse	14
3	Elektromagnetische Störungen und das LOPES-Experiment	17
3.1	Antennen und ihre Eigenschaften	17
3.1.1	Grundbegriffe der Antennentechnik	17
3.1.2	Die LOPES-Antenne	20
3.2	Elektromagnetische Verträglichkeit	21
3.3	Störquellen im LOPES-Experiment	23
3.3.1	Elektromagnetische Störungen der e/γ -Detektoren	23
3.3.2	Abschirmung der Detektorstationen	24
3.3.3	Labormessungen	24
3.3.4	Weitere Möglichkeiten der Reduktion	26
4	Messung der elektromagnetischen Störung	27
4.1	Ansatz zur Messung der elektromagnetischen Störung	27
4.2	Messinstrumente des Versuchsaufbaus	27
4.2.1	Die e/γ -Detektoren des KASCADE-Experiments	28
4.2.2	Der Stickstofflaser und die Glasfaseroptik	29
4.2.3	Der Photomultiplier	29
4.2.4	Digitales Oszilloskop	30
4.2.5	Ferritkerne	31
4.2.6	Auslesesoftware und Auswertetools	31
4.3	Der Versuchsaufbau	32
5	Messungen und Ergebnisse am Versuchsaufbau	37
5.1	Messung der Störung durch den e/γ -Detektor	37
5.2	Auswertung der Messungen	41
5.2.1	Vorauswertung der Messungen	41

5.2.2	Nachbereitung und Analyse der Messungen	42
5.2.3	Fehlerbetrachtung	45
5.3	Einflüsse auf die Messergebnisse	47
5.4	Messergebnisse	51
5.4.1	Ferritmessungen	51
5.4.2	Erdung mit Kupferband	56
5.4.3	Erdung mit Kabeln	57
5.4.4	Anordnung der Kabel zur weiteren Reduktion der Störung	58
5.4.5	Reduktion durch Installation eines neuen Detektordeckels	60
5.4.6	Abschirmung möglicher Emissionsstellen mit Kupferband	61
5.5	Diskussion der Ergebnisse und Anwendbarkeit bei KASCADE	62
6	Messungen und Ergebnisse am KASCADE-Experiment	65
6.1	Messung der elektromagnetischen Störung am KASCADE-Experiment	65
6.1.1	Versuchsaufbau	65
6.1.2	Messung	65
6.2	Einflüsse auf die Messergebnisse	67
6.3	Messergebnisse Detektor 1	68
6.3.1	Ferritmessungen	68
6.3.2	Reduktion mit neuer Kabelkonfiguration	70
6.4	Messergebnisse für Detektor 2	71
6.4.1	Ferritmessungen	72
6.4.2	Reduktion mit neuer Kabelkonfiguration	72
6.4.3	Reduktion mit neuer Kabelkonfiguration und Ferriten	73
6.5	Diskussion der Ergebnisse	74
7	Reduktion der Störung in Luftschauermessungen	77
7.1	Die Messumgebung	77
7.2	Ergebnisse der Messungen	77
7.3	Diskussion der Ergebnisse	78
8	Zusammenfassung und Ausblick	85
8.1	Zusammenfassung	85
8.2	Ausblick	85
8.2.1	Untersuchung von weiteren elektromagnetischen Störquellen	85
8.2.2	Ausblick für zukünftige Experimente	86
A	Die schnelle Fouriertransformation (FFT)	91
B	Reflexionen am Kran	93
C	Elektromagnetische Kopplung im Erdreich von KASCADE	94
D	Anordnung der Kabel	98
E	Weitere Ergebnisse der Messungen am Versuchsaufbau	100
	Abbildungsverzeichnis	102
	Tabellenverzeichnis	104

Literaturverzeichnis	106
Glossar	109

1 Einleitung

Die Erde wird ununterbrochen von hochenergetischen Teilchen getroffen, die von der Sonne und aus den Tiefen des Universums stammen. Diese Teilchen werden kosmische Strahlung genannt. Zur Messung der Art, Energie und Herkunft der kosmischen Strahlung werden immer größere Detektorfelder gebaut. Dies ist notwendig, da die Anzahl der Teilchen, die die Erde pro Zeiteinheit erreichen, mit steigender Energie schnell abnimmt. Allerdings reagieren diese Primärteilchen mit einem Atomkern der Luft und erzeugen dabei eine ganze Kaskade von neuen Teilchen, sogenannte Sekundärteilchen, diese erzeugen wiederum neue usw. Neben herkömmlichen Teilchendetektoren zum Nachweis dieser sogenannten Luftschauer wird seit ein paar Jahren auf die Digitaltechnik zurückgegriffen, um diese Teilchen auf eine neue Art zu messen. Die Teilchen in einem ausgedehnten Luftschauer werden vom Erdmagnetfeld abgelenkt und erzeugen dabei eine elektromagnetische Strahlung, die sogenannte Geosynchrotronstrahlung im Radiofrequenzbereich. Diese Strahlung kann mit Antennen gemessen werden.

Das LOPES-Experiment ist ein Vorreiter zur Messung dieser Geosynchrotronstrahlung. Zusammen mit dem KASCADE-Experiment, das mit herkömmlichen Teilchendetektoren misst, kann der Zusammenhang zwischen der Energie des Primärteilchens und Geosynchrotronstrahlung ermittelt werden. Während der ersten Messungen hat sich herausgestellt, dass die Teilchendetektoren des KASCADE-Experiments eine elektromagnetische Störung emittiert, im Volksmund „Elektrosmog“ genannt, der neben dem eigentlichen Signal der Geosynchrotronstrahlung in den Antennen sichtbar ist und die Analyse der Daten erschwert.

Um diese elektromagnetische Störung zu reduzieren, wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit Studien durchgeführt. Es wird versucht, mit Ferriten, Erdungs- und elektromagnetischen Kopplungsmechanismen, diese Störung zu reduzieren.

Kapitel 2 gibt einen kurzen Überblick über die Herkunft der kosmischen Strahlung. Außerdem wird eine Einführung zu den ausgedehnten Luftschauern und deren Nachweis mit bereits existierenden Experimenten, im Besonderen zur Messung der Geosynchrotronstrahlung, gegeben.

In **Kapitel 3** folgt eine Einführung in die Antennentechnik, die zum Verständnis und zur Messung der elektromagnetischen Störung wichtig ist. Außerdem wird ein Überblick über die Wissenschaft zur Messung elektromagnetischer Störungen, Elektromagnetische Verträglichkeit genannt, gegeben.

Für die Messung der elektromagnetischen Störung der Detektoren des KASCADE-Arrays wurde ein Versuchsaufbau errichtet, der in **Kapitel 4** mit den dazu benötigten Messinstrumenten vorgestellt wird.

In **Kapitel 5** wird eine Zusammenfassung der Ergebnisse zur Reduktion der oben erwähnten Störung gegeben, die an einem eigens für diese Messungen errichteten Versuchsaufbau durchgeführt wurden.

Um die in Kapitel 5 ermittelten Ergebnisse zu verifizieren, wurden sie am KASCADE-Experiment überprüft. Die Resultate werden in **Kapitel 6** vorgestellt.

Damit eine Aussage über die tatsächliche Reduktion der elektromagnetischen Störungen der Detektoren gemacht werden kann, wurden die in Kapitel 6 ermittelten

1 Einleitung

Ergebnisse in einem Feldversuch am KASCADE-Experiment installiert. Die Reduktion der Störung, die sich in tatsächlichen Luftschauermessungen ergibt, wird in **Kapitel 7** vorgestellt.

2 Kosmische Strahlung und Radioemission in ausgedehnten Luftschauern

Um unser Universum zu verstehen, müssen Informationen interpretiert werden, die die Erde erreichen. Dazu gehören alle Formen der elektromagnetischen Strahlung wie Licht, Röntgenstrahlung und die kosmische Hintergrundstrahlung, aber auch massebehaftete Teilchen.

Die elektromagnetische Strahlung wird hauptsächlich mit Teleskopen oder großen Interferometern gemessen. Massive Teilchen, deren Ursprungsort außerhalb der Erde liegen, wurden zuerst 1912 von Victor Hess bei Ballonflügen in 5 km Höhe bei Messungen der Ionisation der Atmosphäre entdeckt. Sie werden kosmische Strahlung genannt. Diese nimmt mit zunehmender Höhe zu, woraufhin Hess diesem Effekt einem nicht irdischen Ursprung zuschrieb [Hes11], [Hes12]. Heutzutage ist bekannt, dass diese Strahlung hauptsächlich von ionisierten Atomkernen stammt, die einen weiten Energiebereich überspannen. Es wurden bereits Teilchen mit Energien von bis zu $10^{20} eV$ detektiert. Dies entspricht ungefähr der Leistung, die benötigt wird, um eine 20 Watt-Glühlampe für 1 s zum Leuchten zu bringen.

2.1 Energiespektrum und Herkunft der kosmischen Strahlung

Die kosmische Strahlung besteht zu 98 % aus ionisierten Atomkernen und zu 2 % aus Elektronen und Positronen, wobei der Anteil der Elektronen um einen Faktor 10 höher ist als der der Positronen. Die Teilchen können ab ungefähr 1 GeV von der Erde aus beobachtet werden, allerdings ist eine ungestörte Beobachtung erst ab ca. 30 GeV möglich, da ihre Bahnen bis zu dieser Energie durch den Sonnenwind und das Erdmagnetfeld beeinflusst werden.

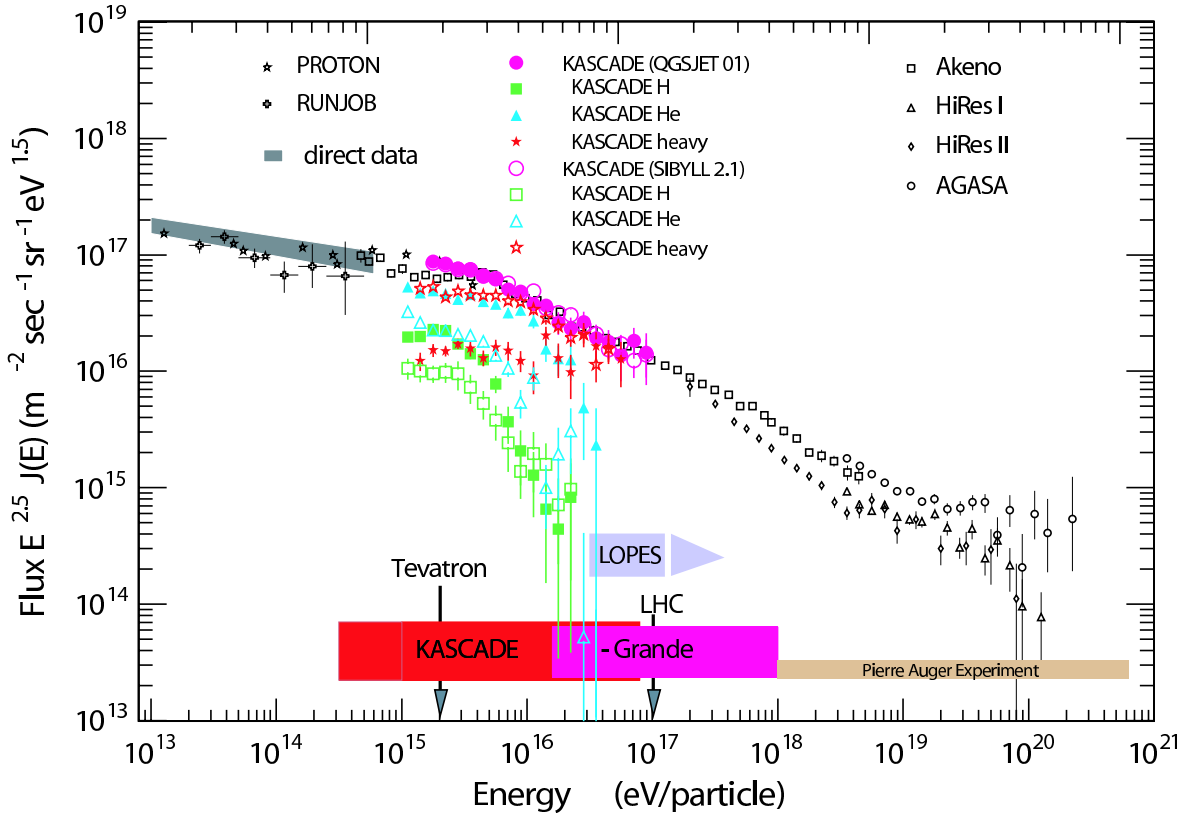
Ihr Fluss¹ gehorcht über einen weiten Bereich einem simplen Potenzgesetz

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

mit der Teilchenzahl N , der Energie E und dem sogenannten spektralen Index γ . Erreicht bei $10^{11} eV$ ca. 1 Teilchen pro m^2 und Sekunde die Erde, so sind es bei $10^{16} eV$ nur noch 1 Teilchen pro m^2 und Jahr. Bei $10^{20} eV$ sind es dann 1 Teilchen pro km^2 alle 200 Jahre. Abbildung 2.1 zeigt, dass γ bis $5 \cdot 10^{15} eV$ ungefähr 2,75 ist. In diesem Energiebereich ändert sich γ auf $\gamma \approx 3,05$. Dies wird als Knie der kosmischen Strahlung bezeichnet. Eine vollständige Theorie dafür gibt es bislang noch nicht. Es wird angenommen, dass diese Struktur durch unterschiedliche Beschleunigungsmechanismen der Teilchen erzeugt wird. Allerdings sind auch Effekte beim Transport durch das interstellare Medium möglich. Auch gibt es Theorien, dass das Knie durch eine neue Art von Wechselwirkung in der Atmosphäre entsteht.

Oberhalb von $E \approx 10^{19} eV$ nimmt γ wieder auf $\approx 2,75$ ab, was als Knöchel im Spektrum bezeichnet wird. Protonen oberhalb einer Energie von $5 \cdot 10^{19} eV$ reagieren

¹Anzahl der Teilchen pro Zeit und Fläche


 Abbildung 2.1: Energiespektrum der kosmischen Strahlung [HR⁺05]

mit der kosmischen Hintergrundstrahlung über

$$\gamma + p \rightarrow \Delta^+ \rightarrow p + \pi^0 \quad (2.2)$$

oder

$$\gamma + p \rightarrow \Delta^+ \rightarrow n + \pi^+. \quad (2.3)$$

Dies wird als GZK-Cutoff bezeichnet ([Gre66], [ZK66]). Dadurch verlieren die Protonen einen Großteil ihrer Energie, was für die Anhäufung der Teilchen vor dem GZK-Cutoff verantwortlich ist.

Der Ursprung der kosmischen Strahlung findet sich bis zu einer Energie von einigen GeV teilweise auf der Sonnenoberfläche. Außerdem wird der Fluß in diesem Bereich durch den Sonnenwind und das Magnetfeld der Erde beeinflusst. Oberhalb dieser Energie ist die Herkunft weitgehend unbekannt, da die Teilchen bis zu einer Energie von ca. 10^{18} eV durch die Magnetfelder unserer Galaxie abgelenkt werden, so dass ihre ursprüngliche Bahn verwischt wird. Es wird angenommen, dass sie in Supernovae, Aktiven galaktischen Kernen (AGN), Explosionen von Supernovae in andere Supernovae oder dem Zerfall schwerer Elemente aus der Anfangszeit unseres Universums stammen.

Der Nachweis der Teilchen erfolgt einerseits über direkte Messungen mit Ballons oder Satelliten. Da der Fluß aber ab einer Energie von ca. 10^{15} eV so gering wird, kann er mit den in dieser Höhe installierbaren Detektorflächen nicht mehr gemessen werden. Dort müssen indirekte Messungen auf dem Erdboden zu Rate gezogen werden. Zu diesen indirekten „Messinstrumenten“ gehören das KASCADE-Grande Experiment am Forschungszentrum Karlsruhe (Abschnitt 2.5) und das Auger-Observatorium in Argentinien [aug06].

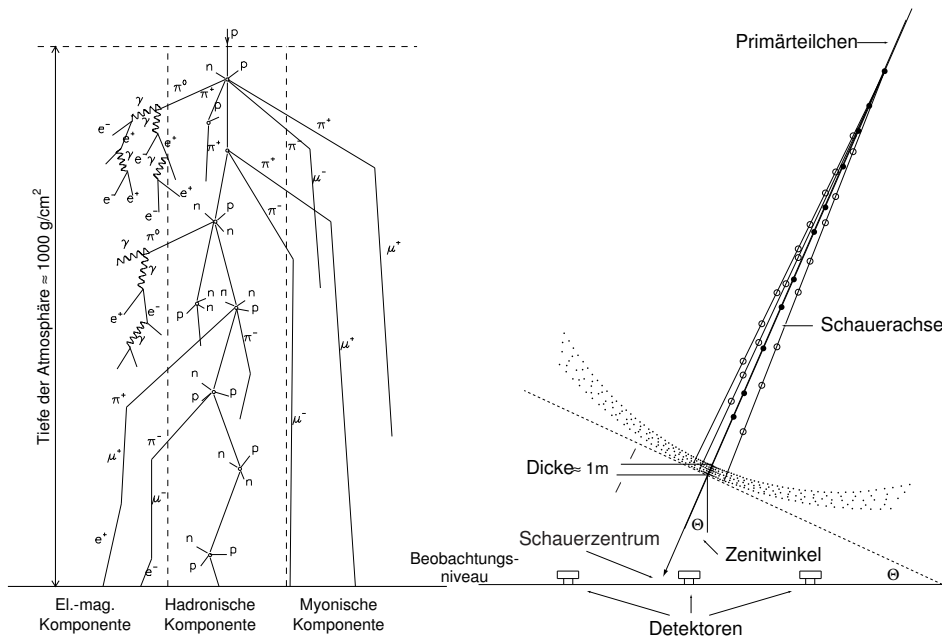


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung eines ausgedehnten Luftschauers. Links: Aufteilung der einzelnen Komponenten, Rechts: Entwicklung eines Luftschauers in der Atmosphäre.

2.2 Ausgedehnte Luftschauer

Tritt ein hochenergetisches kosmisches Teilchen, das sogenannte Primärteilchen, in die Atmosphäre ein, so erfolgt in einer Höhe von 15-20 km eine erste hadronische Wechselwirkung mit einem Atomkern der Luft, hauptsächlich mit einem Stickstoffkern. Diese Reaktion erzeugt eine ganze Reihe von sogenannten Sekundärteilchen, die wiederum mit anderen Kernen der Atmosphäre wechselwirken können. Hinzu kommen noch die elektromagnetische Wechselwirkung und der Zerfall instabiler Teilchen, was eine ganze Kaskade neuer Teilchen erzeugt. Ist die Energie des Primärteilchens groß genug, so dass Sekundärteilchen die Erdoberfläche erreichen, spricht man von einem ausgedehnten Luftschauer (EAS²). Die Sekundärteilchen formen eine Scheibe mit einer Dicke von ein paar Metern, die mit zunehmendem Abstand vom Schauerzentrum dicker wird (Abbildung 2.2). Die laterale³ Ausdehnung eines solchen Luftschauers beträgt mehrere hundert Meter. Bei der longitudinalen Entwicklung steigt die Zahl der Sekundärteilchen aufgrund der Wechselwirkung an, daher vergrößert sich auch ihre Gesamtzahl. Nachdem die mittlere Energie der Teilchen jedoch unter die Schwelle zur Neuproduktion von Teilchen gesunken ist, dominiert die Absorption in der Atmosphäre und die Anzahl fällt exponentiell mit der atmosphärischen Tiefe⁴ ab.

²engl.: extensive air shower

³lat.: seitlich bzw. „weg von der Körpermitte“

⁴Dichte der Atmosphäre vom Weltraum (0 g/cm^2) bis zur Erdoberfläche (ca. 1000 g/cm^2)

2.3 Komponenten eines Luftschauers

Die in einem Luftschauer entstehenden Teilchen werden in drei Sekundärteilchen-Komponenten (Abbildung 2.2) eingeteilt. Hinzu kommen noch Neutrinos, die jedoch im Zusammenhang mit ausgedehnten Luftschauern nicht beobachtet werden, da sie nur äußerst schwach wechselwirken und für den Nachweis große Detektorvolumen benötigt werden.

Die hadronische Komponente

Diese entsteht bei der Reaktion des Primärteilchen mit einem Atomkern der Luft. Sie setzt sich aus stark wechselwirkenden Teilchen wie Protonen und schweren Kernen, wie Pionen, Kaonen und weiteren Mesonen, zusammen. Der Transversalimpuls ist sehr klein, so dass sie hauptsächlich eng um die Schauerachse verteilt sind und einen typischen Abstand von bis zu 20-30 m vom Schauerzentrum erreichen.

Die elektromagnetische Komponente

Auch ein hadronisch ausgelöster Luftschauer setzt sich fast hauptsächlich aus der elektromagnetischen Komponente zusammen, die ca. 90 % der Teilchenzahl ausmacht. Sie besteht aus e^+ , e^- und γ 's. Im Gegensatz zur hadronischen Komponente beginnt diese nicht mit der Reaktion des Primärteilchens, sondern durch den Zerfall der ungeladenen Pionen, die eine sehr kurze Lebensdauer von $0,83 \cdot 10^{-16} s$ haben. Diese Teilchen erzeugen meist Subkaskaden über Paarproduktion und Bremsstrahlung. Anfangs herrscht ein Ladungsgleichgewicht, welches sich allerdings im Laufe der Zeit durch den Compton-Effekt und e^+e^- -Annihilation zu einem negativen Ladungsüberschuss entwickelt. Erreicht die Energie der Teilchen den kritischen Wert von $E = 84,2 \text{ MeV}$, so verlieren sie mehr Energie durch Bremsstrahlung und Ionisation als neue Teilchen erzeugt werden können und die elektromagnetische Komponente stirbt aus.

Einen zusätzlichen Beitrag liefern der Čerenkov-Effekt und die Anregung der Luftmoleküle, Fluoreszenz genannt. Seit kürzester Zeit konnte eine sogenannte Radiokomponente nachgewiesen werden (Kapitel 2.4). Sie wird durch die Ablenkung der geladenen Teilchen im Erdmagnetfeld erzeugt, was auch als Geosynchrotroneffekt bezeichnet wird [F+05].

Die myonische Komponente

Diese Komponente macht ungefähr 5% aller Schauerteilchen aus. Myonen entstehen durch den Zerfall von kurzlebigen Pionen und Kaonen und zerfallen wiederum in Elektronen, Positronen und Neutrinos. Da jedoch der Wirkungsquerschnitt für Bremsstrahlung und Vielfachstreuung umgekehrt proportional mit der Masse abnimmt, ist dieser Prozess gegenüber Elektronen um den Faktor $m_e^2/m_\mu^2 \approx 1/4300$ unterdrückt. Zusätzlich ist die Lebensdauer der Myonen durch die relativistische Zeitdilatation länger und sie erreichen deshalb meist die Erdoberfläche. Dort sind sie über eine große Fläche verteilt und bei einem Luftschauer mit einer Energie von $10^{15} eV$ selbst in einer Entfernung von 1 km vom Schauerkern noch zu finden; bei Schauern mit höherer Primärenergie entsprechend weiter weg.

2.4 Radioemission in ausgedehnten Luftschauern

2.4.1 Emissionsmechanismen

Die Entstehung der Radioemission im ausgedehnten Luftschauer ist bis heute noch nicht vollständig geklärt. Es gibt zwei mögliche Prozesse, die dazu führen können, dass elektromagnetische Strahlung im Radiofrequenzbereich⁵ entsteht.

Čerenkov-Strahlung

Da sich die relativistischen Teilchen eines Luftschauers nahe der Vakuumlichtgeschwindigkeit bewegen, ist die Teilchengeschwindigkeit etwas größer als die Lichtgeschwindigkeit in Luft. Diese Bewegung erzeugt eine Polarisation der Atome, welche die Luftschauerteilchen umgeben. Die Atome emittieren daraufhin eine elektromagnetische Welle. Dieser Prozess ist für elektromagnetische Schauer zuerst von Askaryan [Ask62],[Ask65], insbesondere in dichten Medien wie Wasser, Eis oder Gestein, vorhergesagt worden. Da die Lichtgeschwindigkeit in der Atmosphäre jedoch nahe der des Vakuums ist, trägt dieser sogenannte Askaryan-Effekt bei der Radioemission in Luftschauern nur einen geringen Anteil bei.

Kohärente Geosynchrotronstrahlung

Die positiv und negativ geladenen Teilchen werden im Erdmagnetfeld senkrecht zu ihrer Bewegungsrichtung abgelenkt. Dabei emittieren sie senkrecht zu ihrer Ablenkungsrichtung eine Synchrotronstrahlung, was in diesem Fall die Vorwärtsrichtung des Schauers ist. Dieser Effekt wird als Geosynchrotroneffekt bezeichnet. In jüngster Zeit wurden dazu neue und detaillierte Berechnungen durchgeführt [HF03],[HF05]. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sagen ein kohärentes elektromagnetisches Signal voraus, das im Bereich von ca. 100 MHz und darunter anzusiedeln ist (Abbildung 2.3).

2.4.2 Experimenteller Nachweis der Radioemission in Luftschauern

Erste Messungen zum Nachweis der Radioemission wurden bereits in den 1960er und 1970er Jahren durchgeführt [J⁺65], [All71]. Damals bereiteten diese Messungen jedoch erhebliche Schwierigkeiten, da mit Analogtechnik gearbeitet wurde und die Bilder von den Oszilloskopen abphotographiert werden mussten. Aufgrund dieser Schwierigkeiten und dem Erfolg anderer Messmethoden, wie Teilchendetektoren und Fluoreszenzteleskopen, wurden die Messungen bald wieder eingestellt.

Seit einiger Zeit jedoch werden neue Experimente gestartet, die dieses Forschungsgebiet wieder aufgreifen. Dies ist der heute verfügbaren Digitaltechnik zu verdanken, die eine Aufzeichnung von großen Datenmengen ermöglicht. Der erste Ansatz wurde mit dem Antennenarray in Utah für das CASA/MIA-Experiment gestartet [B⁺94], das jedoch durch sein begrenztes Ausmaß und starke elektromagnetische Störungen (siehe auch Kapitel 3) nicht in der Lage war, Radioemissionen von Luftschauern zu messen.

Des Weiteren ist das CODALEMA-Experiment in Nançay, Frankreich, zu nennen, das ein astronomisches Radioantennenfeld benutzt und seit 2002 Daten nimmt [A⁺05]. Zudem ist es keinen starken elektromagnetischen Störungen von außen ausgesetzt. Es wird in Koinzidenz mit einigen Szintillationsdetektoren gemessen, was eine Unterscheidung zwischen einem zufälligen Auftreten von elektromagnetischen Störungen und ei-

⁵Dies entspricht ungefähr dem Frequenzbereich elektromagnetischer Wellen von 75 kHz bis 10 GHz

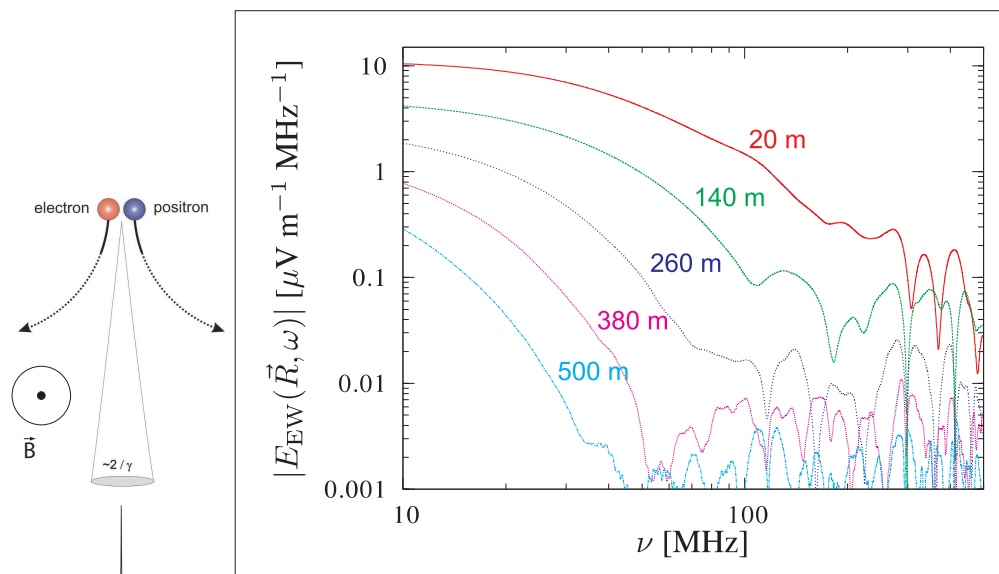


Abbildung 2.3: Links: Emissionsmechanismus der Radiostrahlung. Rechts: Erwartetes Frequenzspektrum der Radioemission eines Luftschauers mit einer Primärteilchenenergie von $10^{17} eV$ bei unterschiedlichen Entfernungen vom Schauerkern. [HF05]

gentlichen Luftschauern zulässt. Allerdings hat man dort keinen Zugang zu einem kalibrierten Luftschauexperiment, welches die Information über Art und Energie des Primärteilchens liefert.

Am Forschungszentrum Karlsruhe wurde das LOPES-Experiment (siehe Kapitel 2.6) errichtet, das auf Daten des KASCADE-Grande-Experiments (Abschnitt 2.5) Zugriff hat [F⁺05]. Damit kann ein Zusammenhang zwischen der Primärenergie, sowie Ankunftsrichtung eines Luftschauers und der dabei emittierten Radiostrahlung hergestellt werden. Der Nachteil an diesem Experiment ist, dass man auf dem Gelände des Forschungszentrums Karlsruhe mit starken elektromagnetischen Störungen zu kämpfen hat, die vor allem durch die Szintillationsdetektoren des KASCADE-Arrays, welches Teil von KASCADE-Grande ist, verursacht wird. Die Reduktion dieser signifikanten elektromagnetischen Störungen ist Thema dieser Arbeit.

Für einen möglichen Einsatz dieser Technik am Pierre Auger Observatorium in Argentinien wird derzeit am Forschungszentrum im Rahmen von LOPES das LOPES^{STAR}-Experiment errichtet. Dieses verwendet einen Selbsttrigger, der die Messung von Radioemissionen ohne Teilchendetektoren ermöglichen soll.

2.5 KASCADE-Grande

Das KASCADE-Grande-Experiment ist die Erweiterung des KASCADE-Experimentes (**K**ARlsruhe **S**hower **C**ore and **A**rray **D**etector) am Forschungszentrum Karlsruhe, das bereits seit 1996 Daten nimmt. Es misst die kosmische Strahlung im Energiebereich von ungefähr $10^{14} - 10^{18} eV$. Zur Messung der unterschiedlichen Schauerkomponenten wurden mehrere Arten von Detektoren installiert (Abbildung 2.4):

- Das KASCADE-Array, ein Feld von 252, auf einer Größe von 200 m x 200 m verteilten Detektorstationen zur Messung der elektromagnetischen und myonischen

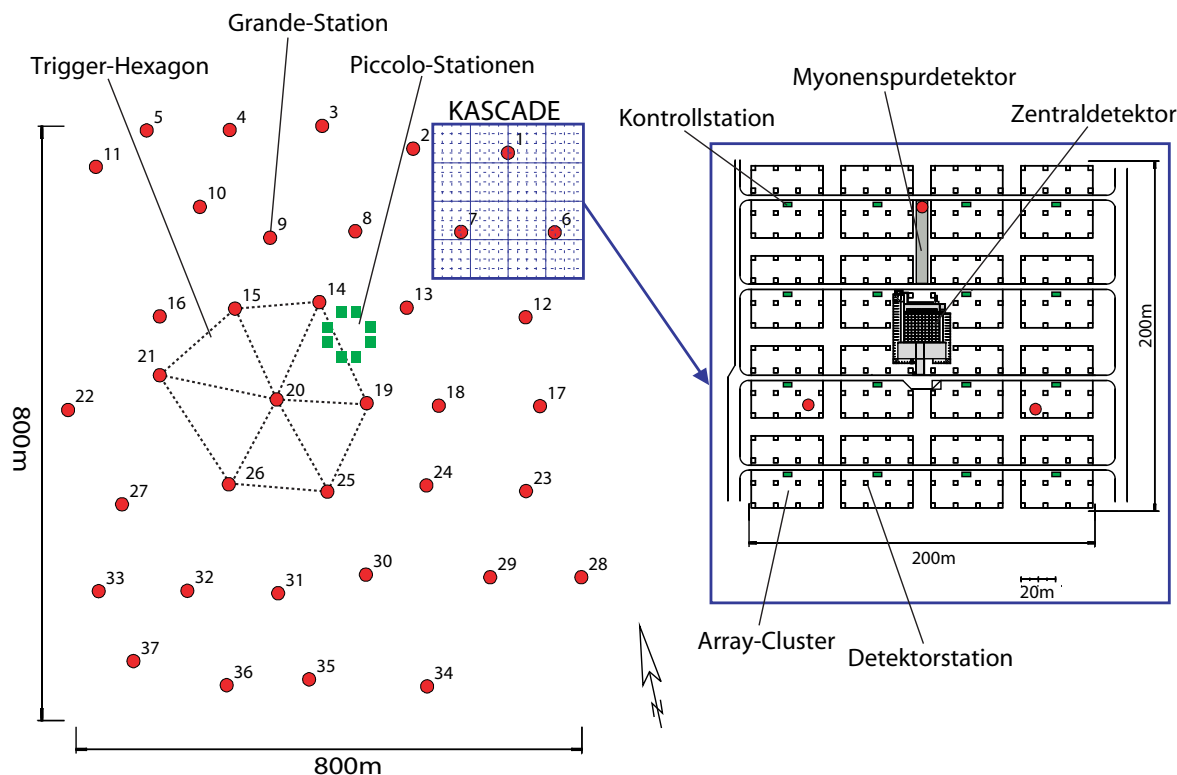


Abbildung 2.4: Links: Layout von KASCADE-Grande. Rechts: Vergrößerung des KASCADE-Arrays

Komponente.

- Der Zentraldetektor zur Messung des Schauerkerns. Er besteht aus einem 16 m x 20 m großen Hadronkalorimeter mit 9 Lagen von Ionisationskammern und dazwischenliegendem Eisenabsorber. Darunter befinden sich Vieldraht-Proportionalkammern für weiteren Myonnachweis.
- Der Myonenspurdetektor besteht aus 3 Lagen Streamer-Tubes zur Spurmessung der Myonen.
- Das Grande-Array wurde als Erweiterung des KASCADE-Arrays errichtet und umfasst 37 Szintillationsdetektoren auf einer Fläche von $0,5 \text{ km}^2$.
- Das Piccolo Trigger Array ist ein kleines Feld von Detektoren, das einen schnellen Trigger für die gemeinsame Messung aller Komponenten von KASCADE-Grande liefert.

Da für diese Arbeit das KASCADE-Array von großem Interesse ist, wird es im Folgenden näher beschrieben.

KASCADE-Array

Das Detektorarray hat eine Ausdehnung von 200 m x 200 m mit 252 gleichmäßig auf einem quadratischen Gitter verteilten Detektorstationen. Diese Stationen sind in Hütten untergebracht, die in einem Abstand von 13 m angeordnet und zu Clustern von 16

Stück zusammengefasst sind. Bei den Detektoren im Zentrum um den Zentraldetektor umfasst ein Cluster nur 15 Stationen (Abbildung 2.4). Als Detektoren wurden sowohl Flüssigkeits-Szintillatoren, zum Nachweis der elektromagnetischen Komponente eines Luftschauers, als auch Plastik-Szintillatoren zum Nachweis von Myonen installiert, die durch einen Blei-/Eisenabsorber weitgehend von der elektromagnetischen Komponente abgeschirmt sind (ca. 20 Strahlungslängen). Die äußeren Cluster sind mit beiden Detektortypen ausgestattet, wobei dort jeweils zwei e/γ -Detektoren mit einer Nachweisfläche von je $0,78 \text{ m}^2$ und vier Myondetektoren mit einer Nachweisfläche von je $0,81 \text{ m}^2$ installiert sind. Um den Zentraldetektor herum wurde auf die Myondetektoren vollständig verzichtet und nur e/γ -Detektoren eingebaut, die in Kapitel 4.2.1 näher beschrieben werden. Da ein Detektor anschlägt, sobald ein Teilchen den Szintillationswerkstoff durchquert und das dabei erzeugte Licht in den Photomultiplier eindringt, müssen die Daten vorselektiert werden. Dazu wird eine Mindestzahl von anschlagenden Detektoren in einem definierten Zeitfenster benötigt, um der zentralen Datenerfassung einen Ausleseauftrag der restlichen Komponenten von KASCADE zu geben. Eine ausführliche Darstellung des KASCADE-Arrays kann in [Sch96a] nachgelesen werden.

2.6 LOPES

Im Jahr 2003 griffen Falcke und Gorham [FG03] das Thema Radioemission in ausgedehnten Luftschauern wieder auf. In ihrer Veröffentlichung zogen sie in Betracht, dass die Messung der Radioemission aus Luftschauern mit einem modernen Radioteleskop möglich sei. Sie wollten dabei auf das in den Niederlanden in Planung befindliche LOFAR-Experiment (**LO**w-**F**requency **AR**ray) zurückgreifen. Darauf wird im nächsten Abschnitt näher eingegangen. Um allerdings einen Zusammenhang der Radioemission mit der Art und Energie des Primärteilchens zu erhalten, wurde eine Teststation mit einem kalibrierten Teilchendetektorarray benötigt. Dafür bot sich das KASCADE-Array am Forschungszentrum an, wo schließlich das LOPES-Experiment (**LOFAR P**rototyp**E** Station), das mit der LOFAR-Technologie arbeitet, errichtet wurde.

2.6.1 LOFAR

Das LOFAR-Experiment [lof06], welches derzeit in den Niederlanden errichtet wird, soll im Niederfrequenzbereich von 10 - 240 MHz nach extraterrestrischen Quellen suchen. In konventionellen Radiointerferometern wurde bisher mit einer kleinen Anzahl von großen Antennen gearbeitet, welche eine stark ausgeprägte Richtcharakteristik besitzen (siehe Abschnitt 3.1.1). LOFAR dagegen benutzt eine große Zahl von omnidirektionalen Antennen, d. h. Antennen mit kugelförmiger Richtcharakteristik. Deren Daten werden digitalisiert und über Glasfaserkabel an Supercomputer zur Berechnung geschickt.

Damit die übertragenen Datenmenge nicht so groß ist, werden die Antennen zu einzelnen Stationen gruppiert, deren Daten dann ein Beamforming durchlaufen. Beamforming ist ein Prozess, mit dem die Signale eines Antennenarrays so analysiert werden, dass daraus geschlossen werden kann, aus welcher Richtung einzelne Signalanteile stammen. Praktisch bedeutet dies, dass einzelne Himmelsbereiche betrachtet werden können. Auf diese Weise können mehrere solcher Himmelsabschnitte gleichzeitig beobachtet werden. Nach dem Beamforming werden die Daten an den Zentralrechner geschickt, wo sie mit den Daten der anderen Stationen korreliert werden. Eine solche Station besteht aus 200 Antennen, von denen 100 im Frequenzbereich von 30 - 80 MHz arbeiten werden



Abbildung 2.5: Künstlerische Darstellung des LOFAR-Experimentes [lof06]. Die hellen Punkte stellen die einzelnen Stationen dar.

und die anderen 100 von 110 - 240 MHz. Damit werden die Störungen der Radiosender vermieden, die im Bereich von 87,5 - 108,0 MHz ihr Rundfunkprogramm ausstrahlen. Nach dem vollständigen Aufbau wird LOFAR einen Durchmesser von 350 km haben und fast die ganzen Niederlande und einen Teil von Deutschland abdecken (Abbildung 2.5).

2.6.2 LOPES - Überblick

Anfangs bestand das LOPES-Experiment aus acht Antennen. Später wurde es auf 10 und vor kurzem auf 30 Antennen erweitert. Mit mehreren Antennen gleichzeitig zu messen ermöglicht es, zwischen zufälligen elektromagnetischen Störungen und Radiopulsen, die in Luftschauern erzeugt werden, zu unterscheiden. Diese Antennen sind wie in Abbildung 2.6 gezeigt, über das Gelände des KASCADE-Experimentes verteilt. Von diesen laufen immer zehn Signalkabel in einer DAQ-Station⁶ eines Clusters zusammen, in der sich die Elektronik und jeweils drei Rechner zur Bearbeitung der Daten befinden. Da durch die e/γ -Detektoren des KASCADE-Arrays eine elektromagnetische Störstrahlung emittiert wird, mit deren Reduktion sich diese Arbeit beschäftigt, wurden 4 der 30 Antennen außerhalb des Arrays platziert. Damit ergibt sich eine maximale „baseline“ von ca. 270 m, was dem maximal möglichen Abstand zwischen zwei Antennen entspricht.

LOPES arbeitet im Frequenzbereich von 40 - 80 MHz, welcher zwischen dem Kurzwellenband (3 - 30 MHz) und dem UKW Band (87,5 - 108,0 MHz) liegt. Die Stärke der Radioemission von Luftschauern übersteigt die galaktische Hintergrundstrahlung. Zudem sollten die menschlichen Störquellen in diesem Bereich relativ gering sein, was nur

⁶ engl.: DAQ = data acquisition bedeutet Datenaufnahme

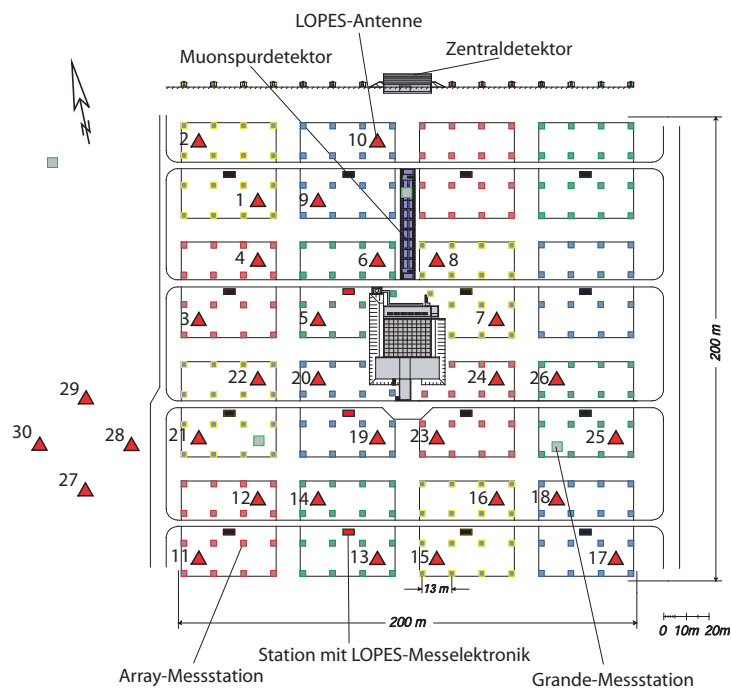


Abbildung 2.6: Layout des LOPES-Experiments im KASCADE-Array. Dreiecke repräsentieren die Antennen. Die LOPES-DAQ ist in den rot markierten Rechtecken platziert.

zum Teil der Fall ist. So befindet sich bei 62,25 MHz ein TV-Sender der ARD, der auf dem Raichberg stationiert ist. Allerdings können diese Störungen durch digitale Filterung so reduziert werden, dass sie kaum noch im Signal zu sehen sind. Auf eine genaue Behandlung dieses Themas und der Reduktion der elektromagnetischen Störungen der Teilchendetektoren des KASCADE-Experimentes wird in Kapitel 3 näher eingegangen.

2.6.3 LOPES - Hardware

Einen Überblick über die verwendete Hardware gibt Abbildung 2.7. Mit dieser gelangen die Daten von der Antenne bis zur Datenverarbeitung. Die zugleich als Prototypen für LOFAR produzierten Komponenten werden im Folgenden beschrieben.

Antenne

Die bei LOPES verwendeten Antennen sind sogenannte Inverted-V Dipolantennen (siehe Kapitel 3.1.2). Der Dipol besteht aus zwei Kupferkabel von je 1 m Länge. Diese liegen in gegenüberliegenden PVC-Rohren, welche für den verwendeten Frequenzbereich durchlässig sind und mit zwei weiteren Rohren eine pyramidenförmige Struktur bilden (Abbildung 2.8). Diese steht auf einem Aluminiumpodest, das mit einer Metallplatte ausgestattet ist, welche auch bei unterschiedlichen Wiedereinflüssen die einfallenden Radiosignale gleich reflektiert. Die Antennen wurden mit einem GPS positioniert und so aufgestellt, dass sie in Ost-West-Richtung polarisiert sind.

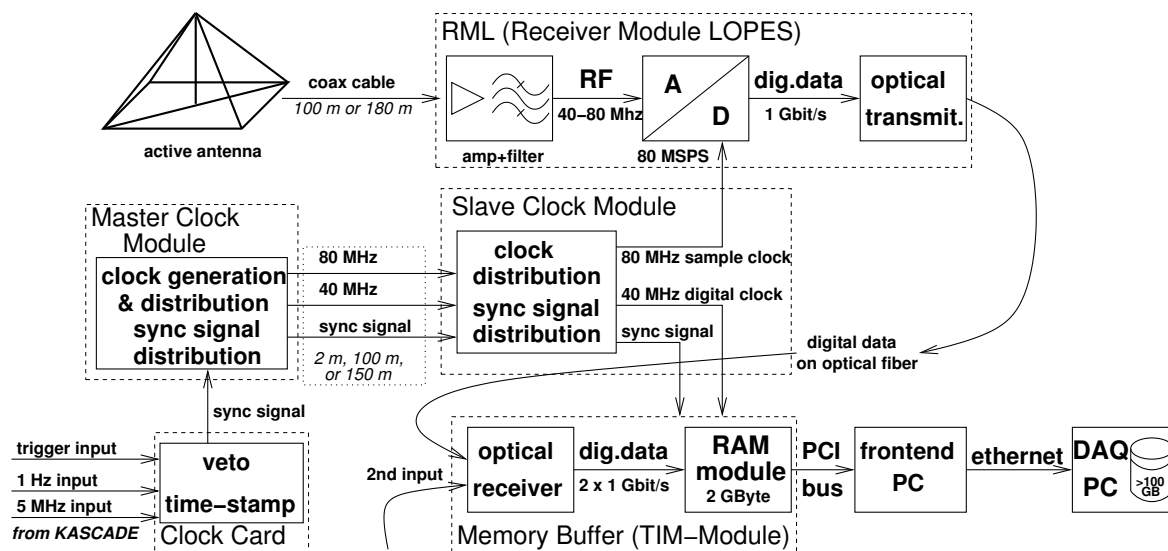


Abbildung 2.7: Schema der LOPES-Hardware

LNA und RML

Direkt am Antennendipol befindet sich ein Vorverstärker, auch LNA (**L**ow **N**oise **A**mplifier) genannt. Er verstärkt zum einen das Radiosignal und transformiert gleichzeitig den Antennenwiderstand auf den $50\ \Omega$ -Widerstand des Kabels, welches eine Länge von 100 oder 180 m hat. Danach erreicht das Signal das Receiver Module (RML), in welchem das Signal verstärkt wird und einen Bandpassfilter durchläuft, der Frequenzen unterhalb von 40 MHz und oberhalb von 80 MHz unterdrückt. Daraufhin werden die Daten mit einem Analog-Digital-Wandler (ADC) digitalisiert, d. h. die analogen Signalwerte werden in diskrete Werte umgewandelt. Die Abtastfrequenz stammt vom Master Clock Module, welche 80 MHz beträgt. Anschließend wird das Signal per Glasfaser an die Datenaufnahme-PCs geschickt.

DAQ

Die Daten werden daraufhin in Memory Buffer (Twin Input Module) gespeichert. Ein Speicher hat eine Kapazität von 2 Gigabyte und speichert jeweils die Daten von zwei Antennen. Der Speicherplatz reicht aus, um 6,25 s LOPES-Daten zwischen zu speichern. Er hat eine Schnittstelle zu dem sogenannten LOPES-PC, der die Daten ausliest, sobald er einen Trigger von KASCADE erhält. Dies ist der Fall, wenn mindestens zehn der 16 Cluster einen Luftschauer registrieren. Es werden jeweils 0,41 Millisekunden vor und nach der Ankunft des Triggersignals, d. h. insgesamt 0,82 Millisekunden, ausgelesen und auf der Festplatte gespeichert. Zum Auslesen der Daten aus allen LOPES-PCs dient der DAQ-PC, der diese zu einem Ereignis zusammenfügt und mit einem Zeitstempel mit 200 ns Genauigkeit versieht.

Clock-Module

Diese Module dienen der Zeitverwaltung für LOPES. Das Clock-Board empfängt das Triggersignal und die Zeitsynchronisation von KASCADE. Der Trigger bekommt einen Zeitstempel und übergibt ihn an das Master-Clock-Module. Dieses generiert das Abtastsignal für die ADCs und ein Zeitsignal für die Memory Buffer. Trigger und Zeit-



Abbildung 2.8: LOPES-Antennen im KASCADE-Experiment.

stempel werden von den Slave-Clock-Modulen an die Memory-Buffer übergeben. Die Abtastfrequenz wird ebenfalls von den Slave-Clock-Modulen an die RMLs verteilt.

2.6.4 LOPES-Event-Analyse und erste Ergebnisse

Da die Daten nach einem Radioevent⁷ noch sehr verrauscht sind und deshalb der Radiopeak mit bloßem Auge nicht zu erkennen ist (siehe Abbildung 2.9, links), müssen sie digital nachbearbeitet werden. Zuerst wird eine Korrelation zwischen KASCADE-Events erstellt, d. h. der Ort des Schauerzentrums und die Richtung der Schauerachse wird mit Hilfe von KASCADE-Daten berechnet. Danach wird eine Vorselektion für interessante Events vorgenommen. Zur Unterdrückung von schmalbandigen Signalen, wie dem bereits genannten Fernsehsender, werden die Daten mit Hilfe der schnellen Fouriertransformation (siehe Anhang A) in den Frequenzraum transformiert. Daraufhin wird in den Zeitraum zurücktransformiert und ein sogenanntes Beamforming vorgenommen. Dabei werden die Daten mit Hilfe der KASCADE-Daten, die die Information über die Ankunftsrichtung enthalten, so zeitverschoben, dass die Radiosignale eines Luftschauers übereinander liegen (Abbildung 2.9, Mitte). Liegen die Signale dann noch nicht ganz übereinander, wird die Ankunftsrichtung und der Radius der ankommenden Wellenfront minimal verändert, bis ein eindeutiger Radiopuls sichtbar ist. Allerdings ist direkt nach dem Ereignis ein inkohärentes Rauschen zu erkennen, das selbst durch Aufsummieren und Quadrieren nicht vollständig entfernt werden kann. Die Reduzierung dieses Störsignals ist Thema dieser Arbeit.

Erste Analysen wurden auf der Basis einer sehr eingeschränkten Zahl von Events

⁷im Folgenden wird für den Begriff „Messung der Radioemission eines ausgedehnten Luftschauers“ nur „Radioevent“ bzw. „Event“ verwendet.

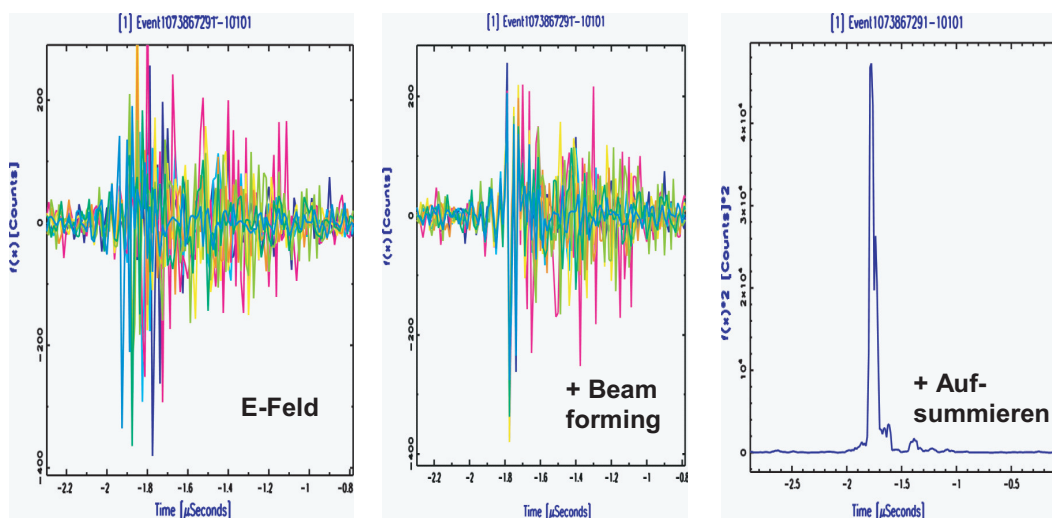


Abbildung 2.9: LOPES-Datenanalyse. Links: Überlagerte Rohdaten, in denen schmalbandige Signale bereits entfernt wurden. Mitte: Verschobene Daten nach dem Beamforming. Rechts: Aufsummiertes und danach quadriertes Signal aller Antennen.

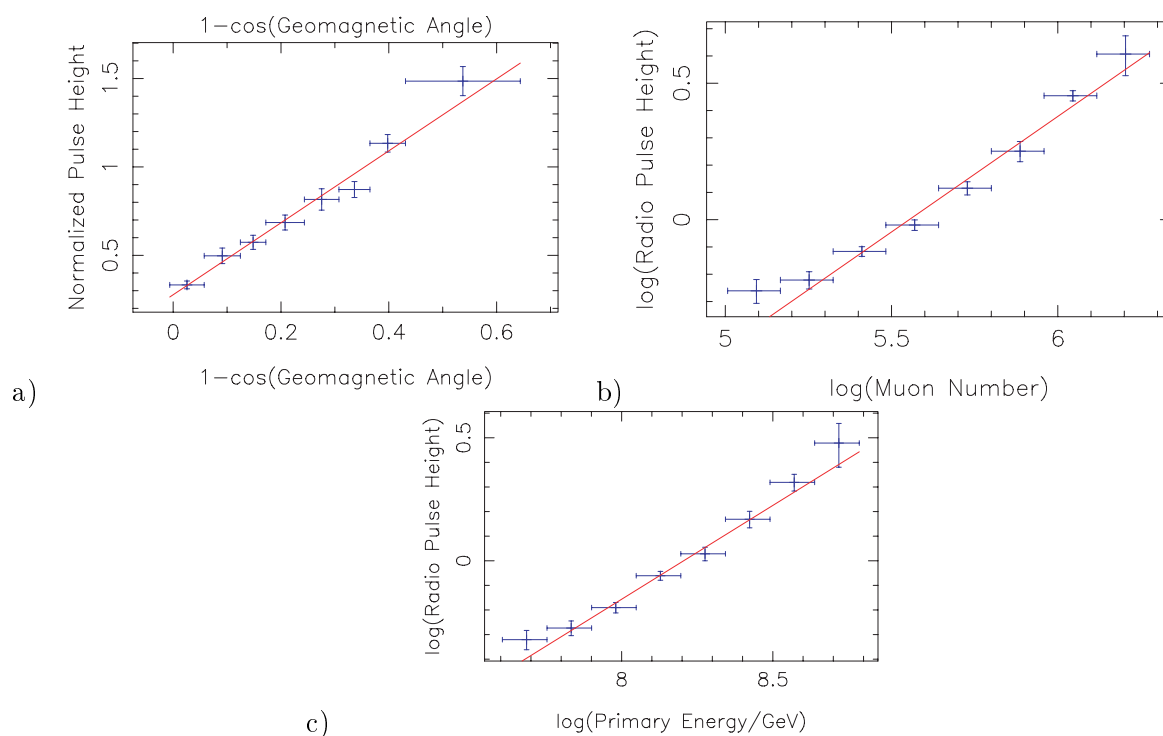


Abbildung 2.10: erste LOPES-Ergebnisse: mittlere Radiopulshöhe aller 412 selektierten Events aufgetragen über a) $(1 - \cos(\alpha_g))$, b) Anzahl der Myonen und c) Primärteilchenenergie [Hor06]. α_g bezeichnet den geomagnetischen Winkel, also den Winkel zwischen Schauerachse und Richtung des Erdmagnetfeldes.

durchgeführt [Hor06]. Dazu wurden nur Ereignisse zugelassen, deren Schauerzentrum maximal 91 m vom Zentrum von KASCADE entfernt war. Außerdem wurde eine Mindestzahl 5×10^6 Elektronen und 2×10^5 truncated⁸ Myonen vorausgesetzt. Damit konnten 412 Events ausgesucht werden. Diese wurden nach „guten“ Events durchsucht, d. h. Events, die einen eindeutigen Radiopeak aufweisen. Diese weitere Unterscheidung reduzierte die Zahl auf 228, die mit historischen Daten und theoretischen Vorhersagen verglichen wurden. Danach ergab sich ein Zusammenhang zwischen der Höhe des Radiopulses und Elektron- und Myonzahl im Luftschauer, sowie der Primärenergie (Abbildung 2.10). Dies steht mit den historischen Daten und theoretischen Vorhersagen voll im Einklang. Allerdings ist auch eine $\epsilon_{est} \propto 1 - \cos \alpha_g$ Abhängigkeit zu sehen. Dabei ist α_g der geomagnetische Winkel und ϵ_{est} die Höhe des Radiopulses. Dagegen zeigen historische Daten eine $\epsilon_{est} \propto \sin \alpha_g$ -Abhängigkeit und Monte Carlo Simulationen sagen eine komplexe Abhängigkeit z. B. von der Polarisierung oder dem Azimutwinkel voraus. Diese Unterschiede lassen sich wahrscheinlich dadurch erklären, dass LOPES derzeit nur in einer Polarisationsrichtung misst. Um diese Frage zu klären, sind Messungen in beiden Polarisationsrichtungen geplant. Jedoch belegen diese ersten Ergebnisse, dass die Radiokomponente hauptsächlich durch Wechselwirkung mit dem Erdmagnetfeld erzeugt wird.

⁸engl.: abgeschnitten, in diesem Fall wird die Myonzahl bezeichnet, die im Abstand von 40 - 200 m Entfernung vom Schauerzentrum zu finden ist.

3 Elektromagnetische Störungen und das LOPES-Experiment

In diesem Kapitel werden die Grundzüge von elektromagnetischen Störungen und deren Zusammenhang mit dem LOPES-Experiment erläutert. Zum besseren Verständnis der einzelnen Störmechanismen wird ein kurzer Überblick über Antennen und ihre Eigenschaften gegeben. Danach folgt eine kurze Einführung zur elektromagnetischen Verträglichkeit. Am Ende werden einige Möglichkeiten zur Reduktion der elektromagnetischen Störungen durch die e/γ -Detektoren des KASCADE-Experiments vorgestellt. Diese beinhalten bereits getestete Maßnahmen.

3.1 Antennen und ihre Eigenschaften

Mit Antennen ist es möglich, von der leitungsgebundenen Ausbreitung elektromagnetischer Wellen zur Wellenausbreitung im freien Raum überzugehen. Eine Sendeantenne formt eine Leitungswelle in eine elektromagnetische Welle im freien Raum um, umgekehrt transformiert eine Empfangsantenne diese wieder in eine Leitungswelle zurück. Grundsätzlich kann jede Antenne sowohl als Empfangs- als auch als Sendeantenne verwendet werden. Die Anwendung hängt jedoch vom entsprechenden Antennentyp ab, von denen es eine ganze Reihe gibt. Dazu gehören z. B. einfache Dipolstrahler, in welchen ein Wechselstrom ein elektrisches Feld erzeugt, Hohlleiterantennen, in denen das Feld im Innern eines Hohlleiters gefangen ist und an der Öffnung abgestrahlt wird, Schleifenantennen, bei denen ein Wechselstrom ein Magnetfeld erzeugt, usw. Hier wird jedoch nur auf den Dipolstrahler eingegangen, da das LOPES-Experiment eine Abwandlung dieser Antennenart verwendet.

3.1.1 Grundbegriffe der Antennentechnik

Die in den folgenden Abschnitten verwendeten Begriffe orientieren sich an [Kar04], [Wie05] und [Rot95]. Dort können auch die Herleitungen der Gleichungen nachgelesen werden.

Der Dipolstrahler

Fließt ein sinusförmiger Strom durch ein Leiterstück, so wird in dessen Umgebung ein elektromagnetisches Feld erzeugt. In der Antennentechnik wird dieses Leiterstück Dipol genannt. Das erzeugte Feld hat eine vollständige azimutale Symmetrie, jedoch keine sphärische. In der Achse des Dipols verschwindet das Feld und es wird keine Leistung abgestrahlt.

Strahlungswiderstand

Die zugeführte Leistung P_A einer Antenne teilt sich in Verlustleistung P_V und Strahlungsleistung P_S . Für die zugehörigen Widerstände gilt

$$R_A = R_V + R_S \quad (3.1)$$

Dabei ist R_V der Verlustwiderstand und R_S der sogenannte Strahlungswiderstand. Für gute Antennen gilt $R_V \ll R_S$. Der Hertz'sche Dipol hat einen Strahlungswiderstand von [Wie05]

$$R_S = 790\Omega \left(\frac{\Delta z}{\lambda_0}\right)^2 \quad \text{für} \quad \frac{\Delta z}{\lambda_0} \ll \frac{1}{2\pi}. \quad (3.2)$$

In dieser Gleichung ist Δz die Länge des Dipols und λ_0 die Wellenlänge. Wird die Länge des Strahlers zu klein, so ist die Beziehung $R_V \ll R_S$ nicht mehr erfüllt, woraufhin sich der Wirkungsgrad der Antenne verringert.

Richtcharakteristik

Unterschiedliche Arten von Antennen strahlen die ihnen zugeführte Leistung in bestimmte Raumrichtungen bevorzugt ab, was von ihrer geometrischen Beschaffenheit abhängt. Um ein Maß für die abgestrahlte Leistung zu erhalten, wird der Antennengewinn definiert. Dies ist das Verhältnis von der in einen bestimmten Raumwinkel abgestrahlten Leistung $S(\theta, \phi)$ zu der Leistung S_0 , die einem isotropen Strahler zugeführt werden müsste. Ein isotroper Strahler sendet in alle Raumrichtungen mit gleicher Intensität. Er ist ein theoretisches Konstrukt, da er in der Realität nicht existiert. Dies ist aus topologischen Gründen nicht möglich, wie z. B. eine Kugeloberfläche nicht mit einem gleichmäßigen Netz aus Quadraten überzogen werden kann. Der Antennengewinn gilt ebenso für die empfangene Leistung, Reziprozität genannt, wird hier der Anschaulichkeit halber aber für die Sendeantenne behandelt. Die Reziprozität ist allerdings nur für passive und lineare Antennen erfüllt. Unter Einbeziehung der Raumwinkel (θ, ϕ, r) erhält man

$$G(\theta, \phi) = \frac{S(\theta, \phi)}{S_0}. \quad (3.3)$$

Der Antennengewinn $G(\theta, \phi)$ wird in Einheiten von Dezibel (dB) angegeben, das durch

$$G[\text{dB}] := 10 \cdot \log_{10}(G(\theta, \phi)) \quad (3.4)$$

definiert ist. Die Darstellung erfolgt in einem Richtdiagramm, das sich oft auf ein Horizontaldiagramm in Richtung der stärksten Abstrahlung beschränkt. In Abbildung 3.1 ist eines für einen $\lambda/2$ -Dipol dargestellt, wobei λ die Wellenlänge bezeichnet.

Die Empfangseigenschaften werden sehr anschaulich durch die Antennenwirkfläche A_W beschrieben. Sei S die Strahlungsdichte von einer Strahlungsquelle. Für den isotropen Strahler gilt im Abstand r

$$|S| = \frac{P}{4\pi r^2}, \quad (3.5)$$

wobei dieser mit der Leistung P gespeist wird. Die Empfangsantenne entnimmt dem Strahlungsfeld mit der Strahlungsdichte S die Leistung

$$P_E = S \cdot A_W \quad , \quad (3.6)$$

woraus direkt auf die Senderleistung geschlossen werden kann, im Fall von LOPES auf die Leistung des Luftschauers. Die Antenne nimmt somit alle Leistung auf, die

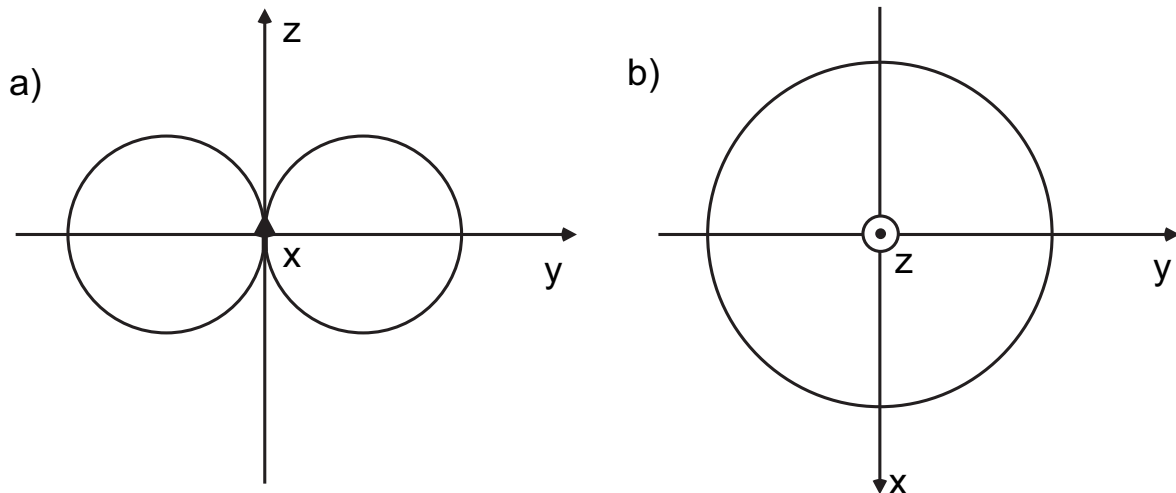


Abbildung 3.1: Links: Horizontales, rechts: vertikales Richtdiagramm eines Dipols [Wie05]

durch die effektive Fläche A_W hindurchdringt. Für den Hertz'schen Dipol kann gezeigt werden, dass

$$A_W = \frac{\lambda_0^2}{4\pi} G \quad (3.7)$$

ist und mit Hilfe der Reziprozität, dass diese Beziehung für alle Antennenformen allgemein gültig ist [Kar04]. Zusammen mit dem Strahlungswiderstand lässt sich die Richtcharakteristik berechnen.

Polarisation

Eine Dipolantenne kann maximal eine Polarisationsrichtung beobachten. Das bedeutet z. B. für eine zirkular polarisierte Welle, dass nur die Hälfte der eintreffenden Leistung aufgenommen wird.

Antennenzonen

In der Antennentechnik wird zwischen Nah- und Fernfeld unterschieden. Tritt eine elektromagnetische Welle aus einer Quelle, z. B. ein Antennendipol, aus, so ist die Fernfeldbedingung erreicht, wenn sich eine ebene Welle gebildet hat. Dies bedeutet, wenn ein Beobachter nicht mehr zwischen einzelnen Kugelwellen, die von unterschiedlichen Enden des Antennendipols abgestrahlt werden, unterscheiden kann. Das Übergangsgebiet zwischen Fernfeld und Nahfeld wird intermediäre Zone genannt. Dort kann die Welle noch als Überlagerung von Kugelwellen von unterschiedlichen Enden des Dipols approximiert werden, allerdings bildet sich schon langsam eine ebene Welle aus. Je nachdem, in welchem Bereich gemessen wird, ergeben sich unterschiedliche Richtcharakteristiken für die abstrahlende Quelle (siehe Abbildung 3.2). In der Literatur wird in den meisten Fällen das Fernfeld ab dem Abstand r zur Sendeantenne mit

$$r = \frac{2D_0^2}{\lambda_0} \quad \text{mit} \quad D_0 > \lambda \quad (3.8)$$

angegeben. D_0 bezeichnet hier die geometrische Abmessung der Antenne, im Fall des Dipolstrahlers die Länge des Dipols, λ wieder die Wellenlänge. Ist $D_0 > \lambda$ nicht erfüllt, so wird $r \geq 2\lambda$ verwendet. Für den Beginn der intermediären Zone gilt

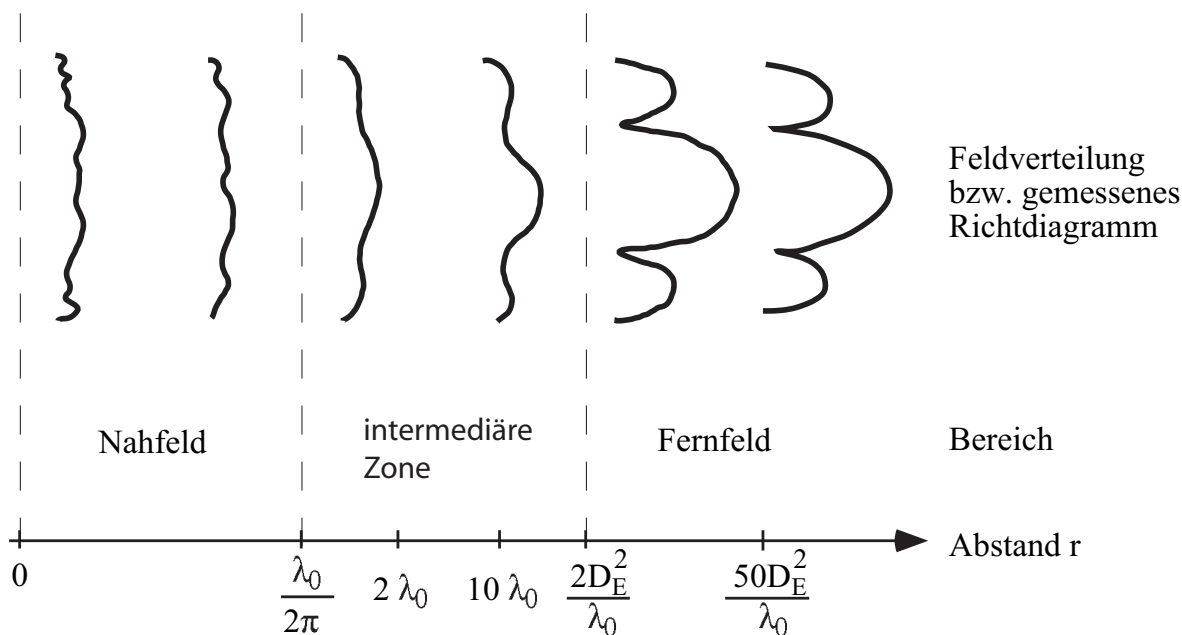


Abbildung 3.2: Gemessenes Richtdiagramm einer Antenne beim Übergang vom Nah- ins Fernfeld einer Antenne [Wie05]

$$r > 0,62\sqrt{\frac{D_0^3}{\lambda}} \quad \text{mit} \quad D_0 > \lambda. \quad (3.9)$$

In der Literatur sind für $D_0 < \lambda$ nur sehr unzureichende Werte zu finden. Für Messungen des Richtdiagramms werden meistens nur Fernfeldmessungen durchgeführt, da im Nahfeld die geometrischen Abmessungen der Antenne eine große Rolle spielen.

3.1.2 Die LOPES-Antenne

In den zahlreichen Anwendungen von Antennen werden unterschiedliche Typen mit ihrer spezifischen Richtcharakteristik verwendet. Für LOFAR fiel die Entscheidung auf eine Inverted V Dipol-Antenne, die eine annähernd kugelförmige Richtcharakteristik besitzt (Abbildung 3.3b). Bei diesen Antennen handelt es sich um einfache Dipole, deren Arme einen Winkel α zum Boden hin einschließen (Abbildung 3.3a). Damit kann im Gegensatz zum einfachen Dipol eine hohe Sensitivität zu den Seiten erreicht werden. Aus einer geeigneter Kombination zwischen Strahlungs- und Verlustwiderstand der Antenne, so dass die Bedingung $R_V \ll R_S$ erfüllt ist, ergibt sich für die Länge der Dipole zu $\frac{\lambda}{4}$, $\frac{\lambda}{2}$ oder λ . Bei LOPES handelt es sich für 75 MHz um einen $\frac{\lambda}{4}$ -Dipol. Der Winkel α beträgt $87,2^\circ$. Zur Bestimmung der Richtcharakteristik der LOPES-Antennen wurden Simulationen durchgeführt, die im Allgemeinen bessere Ergebnisse liefern als reale Messungen, da diese mit großen Ungenauigkeiten durch Positionsbestimmung und Wettereinflüsse behaftet sind. In Abbildung 3.4 sind die Ergebnisse dieser Simulationen dargestellt.

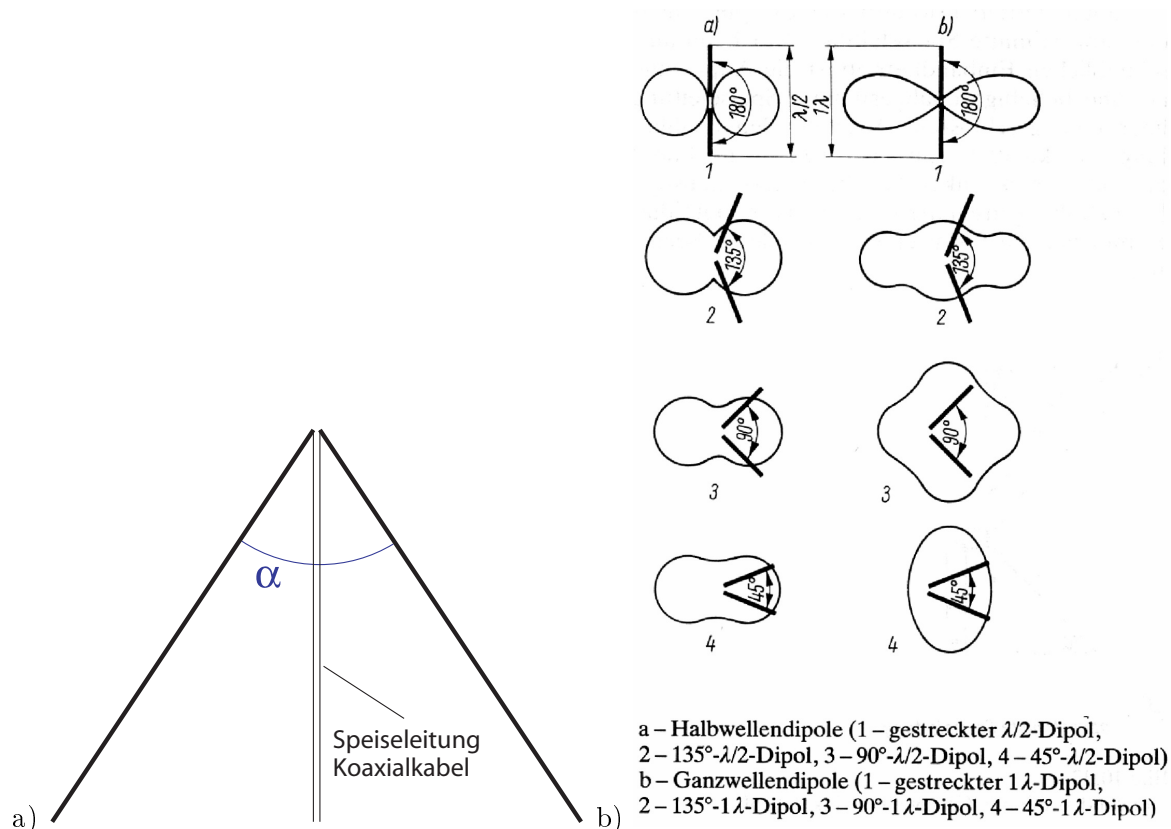


Abbildung 3.3: a) Inverted-Dipol-Antenne [Hak05]. b) Richtcharakteristik von Inverted-Dipol-Antennen bei unterschiedlichen Winkeln α [Rot95].

3.2 Elektromagnetische Verträglichkeit

Der Begriff elektromagnetische Störung gehört in den Bereich der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV). Dazu zählen Funkstörungen, Netzrückwirkungen, Überspannungen, Erdschleifen usw. [Sch96b]. Da es eine große Anzahl von in Frage kommenden elektrischen Systemen gibt, wurden für den Störsender und Empfänger die Begriffe „Störquelle“ und „Störsenke“ geschaffen. Daraus erhält man ein sogenanntes Beeinflussungsmodell, welches in Abbildung 3.5 dargestellt ist.

Sowohl Störquellen als auch Störsenken lassen sich vergleichsweise einfach durch Messung ihrer Emission bzw. Störschwelle charakterisieren. Die Kopplungsmechanismen lassen sich je nach Ausbreitungsmedium in vier verschiedene Arten einteilen. Dies sind Galvanische Kopplungen, Elektrische Kopplungen, Magnetische Kopplungen und Strahlungskopplungen:

Galvanische Kopplung: Diese Kopplung, auch leitungsgebundene Kopplung genannt, tritt immer dann auf, wenn zwei Stromkreise eine gemeinsame Impedanz, z. B. einen Widerstand besitzen. Die Ströme der einzelnen Stromkreise erzeugen jeweils einen Spannungsabfall, der sich störend auswirken kann.

Elektrische Kopplung: Die elektrische oder auch kapazitive Kopplung tritt aufgrund der kapazitiven Wirkung zwischen zwei Stromkreisen auf, wenn diese auf unterschiedlichen Potentialen liegen.

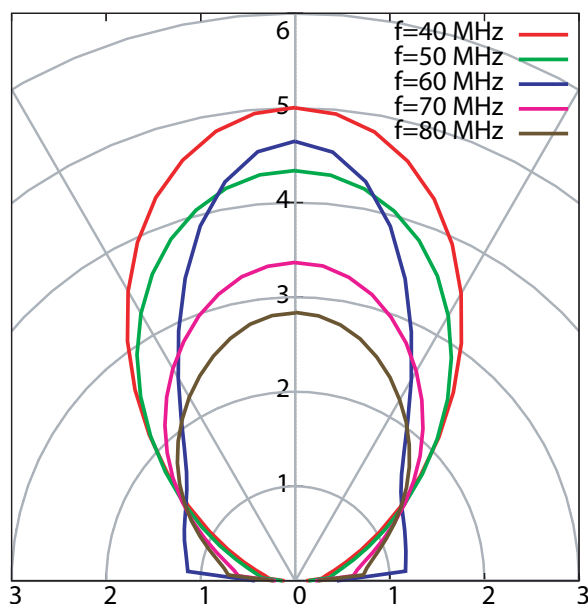


Abbildung 3.4: Richtcharakteristik der LOPES-Antenne bei unterschiedlichen Frequenzen [Hak05]. In radialer Richtung ist der Antennengewinn $G(\Theta, \phi)$ in Abhängigkeit des Winkels Θ aufgetragen. Daraus ergibt sich für die LOPES-Antennen eine deutlich höhere Sensitivität in Richtung Zenith als zu den Seiten.

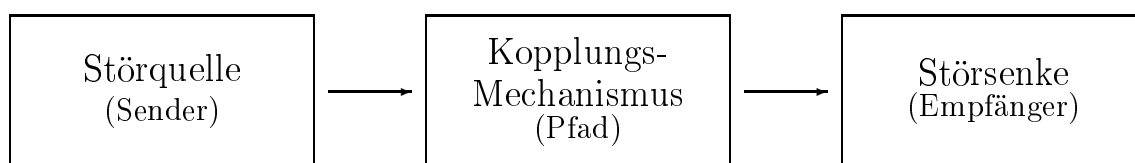


Abbildung 3.5: Beeinflussungsmodell [Sch96b].

Magnetische Kopplung: Die magnetische oder auch induktive Kopplung kommt durch ein gemeinsames Magnetfeld von zwei Stromkreisen zustande. Dies kann gewollt, wie z. B. beim Transformator, oder auch parasitär sein.

Strahlungskopplung: Dies ist die Kopplung im nichtleitenden Raum an den Stellen, an welchen elektrisches und magnetisches Feld gleichzeitig auftreten, d. h. im Fernfeld des vom Störer erzeugten Strahlungsfeldes. Elektrische und magnetische Kopplung gehören zwar auch zur Strahlungskopplung, allerdings beschreiben sie den quasistatischen Bereich, in welchem sie noch voneinander unabhängig sind, d. h. im Nahfeld.

Im LOPES-Experiment ist die Strahlungskopplung der Hauptmechanismus, der für Störungen in den LOPES-Antennen verantwortlich ist. Im Folgenden wird gezeigt, dass die galvanische, kapazitive und induktive Kopplung zur teilweisen Reduktion von Störungen beitragen können.

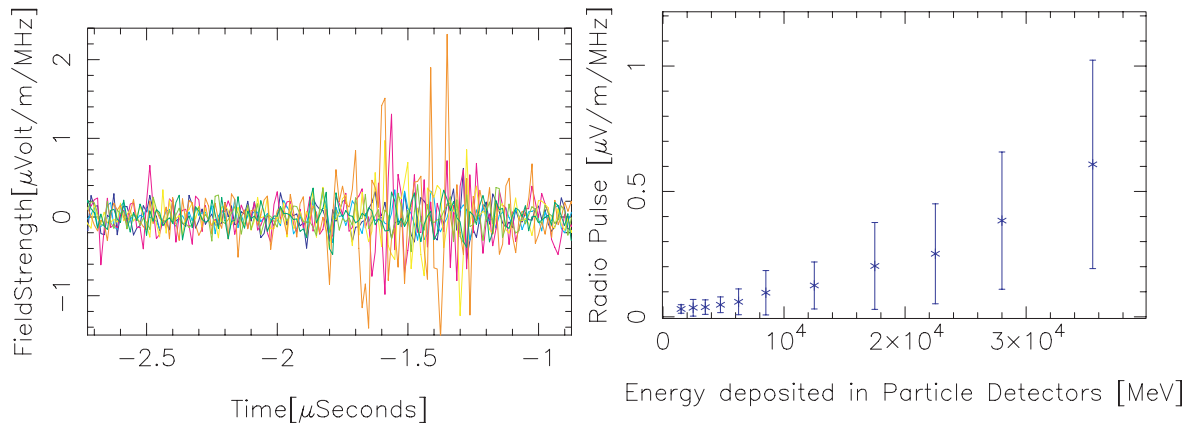


Abbildung 3.6: Links: Gefilterte und beamformte Daten für ein LOPES-Event, bei $-1,8 \mu\text{s}$ ist ein Radiopuls zu erkennen. Zwischen $-1,7 \mu\text{s}$ und $-1,2 \mu\text{s}$ sind die Störungen durch die e/γ -Detektoren zu sehen.

Rechts: Darstellung der Abhängigkeit der Radiopulshöhe, die von den e/γ -Detektoren erzeugt wird, über der Energie, die in den vier Detektorstationen deponiert wird, die um die nächstgelegene Radioantenne positioniert sind [Hor06].

3.3 Störquellen im LOPES-Experiment

Das Radiosignal eines Luftschauers ist in den Rohdaten nur sehr schwer zu finden. Es ist hauptsächlich von schmalbandigen Signalen, wie dem TV-Sender, überlagert. Diese können aber mit Hilfe der Fouriertransformation herausgefiltert werden. Ein Verfahren dazu liefert [Hor06]. Nach dieser Filterung sind in den Daten nur noch transiente Störungen und die galaktische Hintergrundstrahlung zu finden. Transiente Störer sind kurzzeitige Störsignale, beispielsweise durch Blitze oder elektronische Geräte erzeugte elektromagnetische Störungen. Diese transienten Störungen lassen sich in zwei Klassen einteilen. Zum Einen handelt es sich um mit einem Luftschauer unkorrelierte Störungen, die z. B. vom Funkenschlagen von Elektromotoren oder anderen elektronischen Geräten stammen. Sie werden durch den Prozess des Beamformings ([Hor06]) unterdrückt. Zum Anderen gibt es mit den Radioevents korrelierte Störungen, welche mit Hilfe des Beamformings nicht vollständig unterdrückt werden können. Diese werden z. B. von den e/γ -Detektoren¹ des KASCADE-Experimentes emittiert.

3.3.1 Elektromagnetische Störungen der e/γ -Detektoren

Erste Untersuchungen dazu wurden bereits beim Aufbau des LOPES-Experimentes durchgeführt. Der Vollständigkeit halber werden die Ergebnisse auf den folgenden Seiten noch einmal wieder gegeben [Hor06].

Abbildung 3.6 zeigt ein typisches Radioevent. Direkt hinter dem kohärenten Radiopuls bei $-1,8 \mu\text{s}$, d. h. dass alle Antennen überlagert wurden, ist von $-1,7 \mu\text{s}$ bis $-1,2 \mu\text{s}$ eine inkohärente Störung zu erkennen. Um deren Quelle zu finden, wurde die Hochspannung der Teilchendetektoren des KASCADE-Experimentes in einem Cluster

¹Im Folgenden wird der Begriff elektromagnetische Störung ausschließlich für die elektromagnetische Störung verwendet, die durch die e/γ -Detektoren des KASCADE-Experimentes verursacht wird. Sollte der Begriff anderweitig gebraucht werden, so wird explizit darauf hingewiesen.

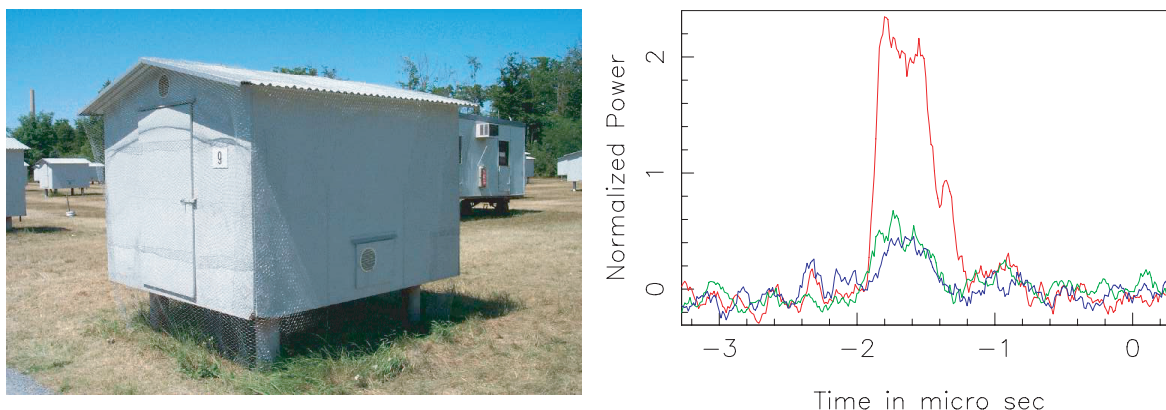


Abbildung 3.7: Links: Detektorhütte des KASCADE-Experiments in Maschendraht gehüllt. Rechts: Vergleich der Radiopulse, die durch die e/γ -Detektoren emittiert werden. Ungeschirmte Hütten (rot), mit Maschendraht umwickelte Hütten (grün), mit Maschendraht umwickelte Hütten, wobei der Maschendraht geerdet ist (blau) [Hor06].

abgeschaltet. Es zeigte sich, dass diese Signale nicht zu sehen sind, wenn die Teilchendetektoren außer Betrieb sind. Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass die Pulshöhe der Störung direkt mit der Summe der Energie korreliert ist, die in den e/γ -Detektoren deponiert wurde, welche der entsprechenden LOPES-Antenne in ca. 9 m Abstand am Nächsten sind (Abbildung 3.6).

3.3.2 Abschirmung der Detektorstationen

Eine erste Maßnahme zur Reduktion der Störung war die Abschirmung der Detektorhütten mit einem Maschendraht, die eine Verringerung um einen Faktor 5 bis 6 zeigte. Auf diese Weise wurden acht Detektoren abgeschirmt, was einer Umhüllung von 4 Detektorstationen entsprach. In Abbildung 3.7 ist eine dieser Detektorhütten gezeigt. Eine weitere Maßnahme war die zusätzlich Erdung mit einer Eisenstange, die etwa 50 cm in den Boden gesteckt wurde. Sie brachte allerdings nicht den gewünschten Erfolg. Die Ausstattung einer Detektorstation mit Maschendraht reduzierte zwar die elektromagnetische Störung, sie behielt jedoch ihre Struktur bei und die Störung ist immer noch ein Hauptbestandteil in den Daten. Der Maschendraht behinderte zusätzlich den Zugang zu den Hütten, welche zu Wartungszwecken in unregelmäßigen Abständen betreten werden.

3.3.3 Labormessungen

Um nähere Informationen über die Art und Herkunft der Störungen zu erhalten, wurden im Rahmen der in 3.3.1 erwähnten Arbeit Messungen in einem Hochfrequenzlabor in den Niederlanden durchgeführt. Der Versuchsaufbau und die Ergebnisse sind in Abbildung 3.8 gezeigt. Die Elektronik, die Hochspannungsversorgung für den Photomultiplier des Detektors und ein Laser wurden außerhalb des Labors installiert. Dies stellte sicher, dass nur Störungen des Detektors aufgenommen werden konnten und nicht von den oben genannten Komponenten der Elektronik. Eine Reduktion der elektromagnetischen Störstrahlung konnte durch Ferritkerne, die um die Signal- und

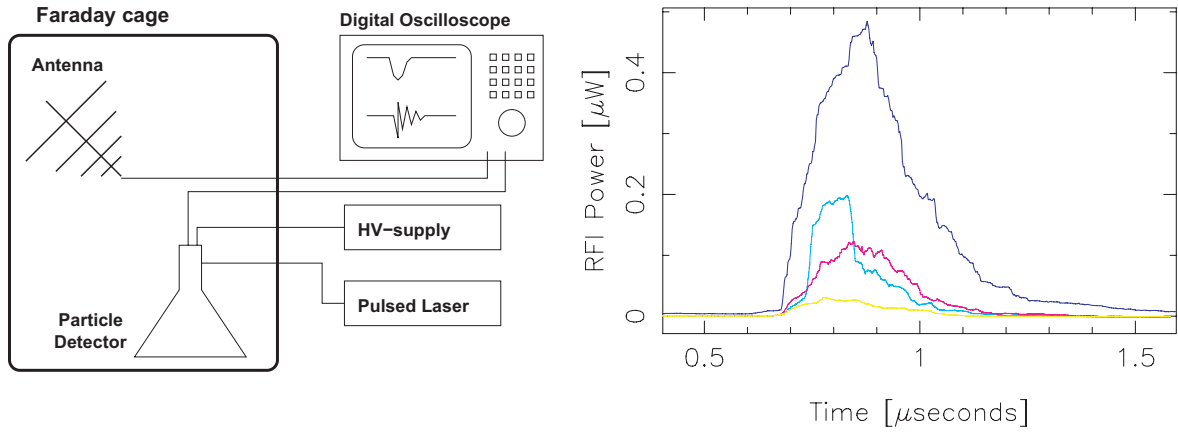


Abbildung 3.8: Links: Versuchsaufbau der Messungen der elektromagnetischen Störungen. Der Detektor wurde mit einem Laser getriggert und das Störsignal wurde von einer Antenne aufgenommen und auf einem digitalen Oszilloskop angezeigt. Rechts: Stärke der Störungen ohne Ferrite (dunkelblau), mit Ferritkernen um die Signalkabel (hellblau), die Kabelschirme mit Kupferband auf Detektor-masse geerdet (pink) und mit beiden Modifikationen (gelb) [Hor06].

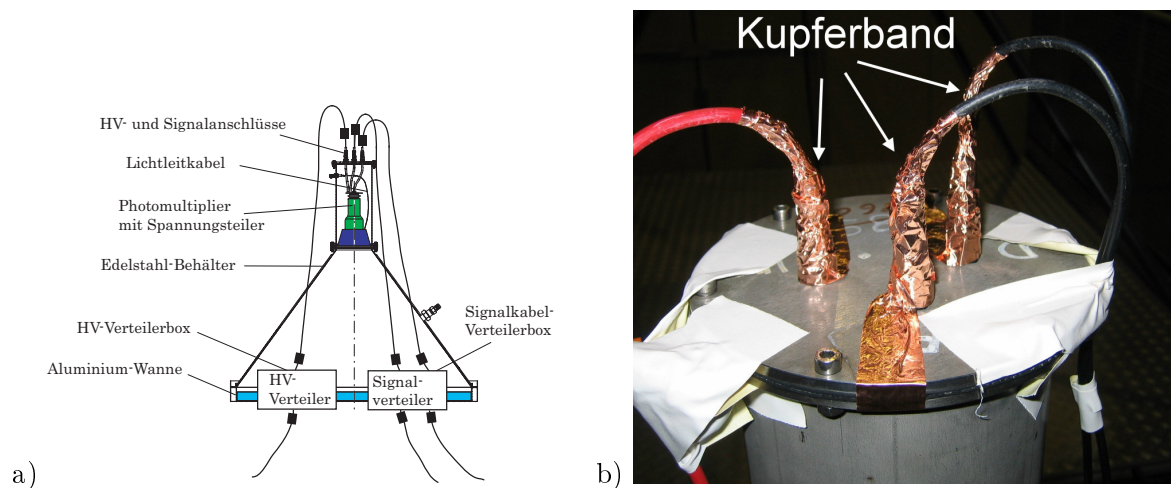


Abbildung 3.9: a) Detektor, wie er in den Niederlanden mit Ferriten (schwarze Rechtecke) bestückt wurde. b) Kabelschirme mit Kupferband am Detektordeckel geerdet.

Hochspannungskabel am Deckel des Detektors², vor und hinter den Verteilerboxen und am Hochspannungsversorgungsgerät angebracht wurden. Abbildung 3.9 a zeigt eine Prinzipskizze des e/γ -Detektors zur Illustration der Ferritkerninstallation. Des Weiteren wurden die Signal- und Hochspannungsversorgungskabel am Deckel des Detektors abisoliert. Danach wurde Kupferband so um diese Kabel gewickelt (Abbildung 3.9 b), dass die Kabelschirme mit der Detektormasse geerdet waren. Beide Methoden ergaben eine Reduktion der Störung um einen Faktor 15.

Nach der erfolgreichen Reduktion der elektromagnetischen Störung im Labor wurde die Version mit den Ferritkernen am KASCADE-Experiment für zwei Antennen installiert, d. h. jeweils alle Detektoren um eine Antenne wurden mit den Ferriten, wie sie in Abbildung 3.9 gezeigt sind, ausgerüstet. Unverständlicherweise brachte diese Maßnahme überhaupt keine Verbesserung der elektromagnetischen Störungen in den LOPES-Daten. Selbst durch eine zusätzliche Erdung der Detektormasse konnte keine Reduktion der elektromagnetischen Störungen erreicht werden. Der Grund dafür ist bis heute noch ungeklärt und ist Grundlage für viele Spekulationen. Diese Arbeit soll der Aufklärung dienlich sein.

3.3.4 Weitere Möglichkeiten der Reduktion

Die oben vorgestellten Ansätze erfordern die Suche nach anderen Lösungen zur Reduktion der elektromagnetischen Störungen. Die Anzahl der Möglichkeiten hierfür sind allerdings relativ klein. Zu diesen gehört zum Beispiel der Verschluss von „Löchern“ am Detektor. Darunter sind Stellen zu verstehen, an denen das Gehäuse des Detektors aus nicht metallischem Material besteht. Des weiteren könnte noch eine andere Art der Erdung der Kabelschirme der Signal- und Hochspannungskabel eine Reduktion bringen. Diese und die bereits in den Niederlanden getesteten Ansätze wurden im Rahmen dieser Arbeit untersucht. Eine Erdung des Detektorgehäuses wurde nicht durchgeführt, da dies nachweislich keine Reduktion brachte. Auch soll eine gleichmäßige Störung untersucht werden, d. h. eine Störung durch die Detektoren, die unabhängig von Luftschauern immer präsent ist.

²Eine genaue Beschreibung des e/γ -Detektors befindet sich in Kapitel 4.2.1

4 Messung der elektromagnetischen Störung

4.1 Ansatz zur Messung der elektromagnetischen Störung

Da sich die Messungen auf das LOPES-Experiment beziehen, wird ein Versuchsaufbau benötigt, der den äußeren Gegebenheiten, sowohl beim LOPES-Experiment als auch am KASCADE-Experiment, relativ nahe kommt. Ein Aufbau direkt am Experiment kommt nicht in Frage, da dadurch die eigentliche Luftschauer-Messung beeinträchtigt wird. Die Messung von elektromagnetischen Störungen aller Art sollte in einem geeigneten Messgelände und einer dem Frequenzbereich angepassten Messeinrichtung durchgeführt werden. Als Messgelände kommt zum Einen das Freifeld (Abbildung 4.1) in Frage. Das Gelände sollte gut leitfähig sein und innerhalb der abgebildeten Ellipse sollten keine reflektierenden Gegenstände wie Messgeräte, Zäune oder Gebäude vorhanden sein.

Da die Messungen hauptsächlich im Winter durchgeführt wurden und der Messaufbau ständig verändert werden musste, kamen Messungen im Freifeld nicht in Betracht. Zudem gibt es am Forschungszentrum Karlsruhe kein Gelände mit einem leitfähigen Untergrund, der die für die Messungen benötigten Größenordnungen besitzt.

Eine weitere Möglichkeit wären extra für solche Zwecke eingerichtete Absorberkammern. Dies sind Räume, die gegen von außen kommende Hochfrequenz-Störungen abgeschirmt sind. Sie sind, zur Vermeidung von Reflexionen, an der Innenseite mit Pyramid-Absorbermatten ausgekleidet (Abbildung 4.2). Am Forschungszentrum Karlsruhe existiert keine solche Einrichtung. Deshalb kommt diese Möglichkeit für diese Arbeit nicht in Betracht und es wurde ein Messplatz in einer Halle des Forschungszentrums Karlsruhe eingerichtet. Allerdings sind dort Beeinflussungen der Messergebnisse durch Reflexion der elektromagnetischen Wellen an Wänden und anderen metallischen Gegenständen nicht zu vermeiden. Dadurch kommt es zu Laufzeitunterschieden der Wellen, die konstruktiv und destruktiv interferieren. Damit ergibt sich eine stark inhomogene Feldverteilung. Dies „macht die Ergebnisse von Störfeldstärkemessungen in oft nicht überschaubarer Weise von der räumlichen Anordnung der Prüfobjekte und Antennen abhängig“ [Sch96b]. Daraus ergibt sich, dass keine absoluten Feldstärken für gemessene elektromagnetische Störungen bestimmt werden können. Daher werden nur relative Angaben von Störungen des Detektors zu dessen reduzierter Störung gemacht.

4.2 Messinstrumente des Versuchsaufbaus

Die Messung erfolgte mit einem handelsüblichen digitalen Oszilloskop. Als Antenne wird eine original LOPES-Antenne verwendet, wie sie bereits in Abschnitt 3.1.2 beschrieben wurde. Der Photomultiplier des e/γ -Detektors wird zur Erzeugung des Störsignals in Sättigung gefahren. Zur Reduktion der elektromagnetischen Störung werden Ferritkerne und Kupferband benötigt. Für die Datenaufnahme und -speicherung wurde eine entsprechend angepasste Software geschrieben. Die einzelnen Komponenten dieses

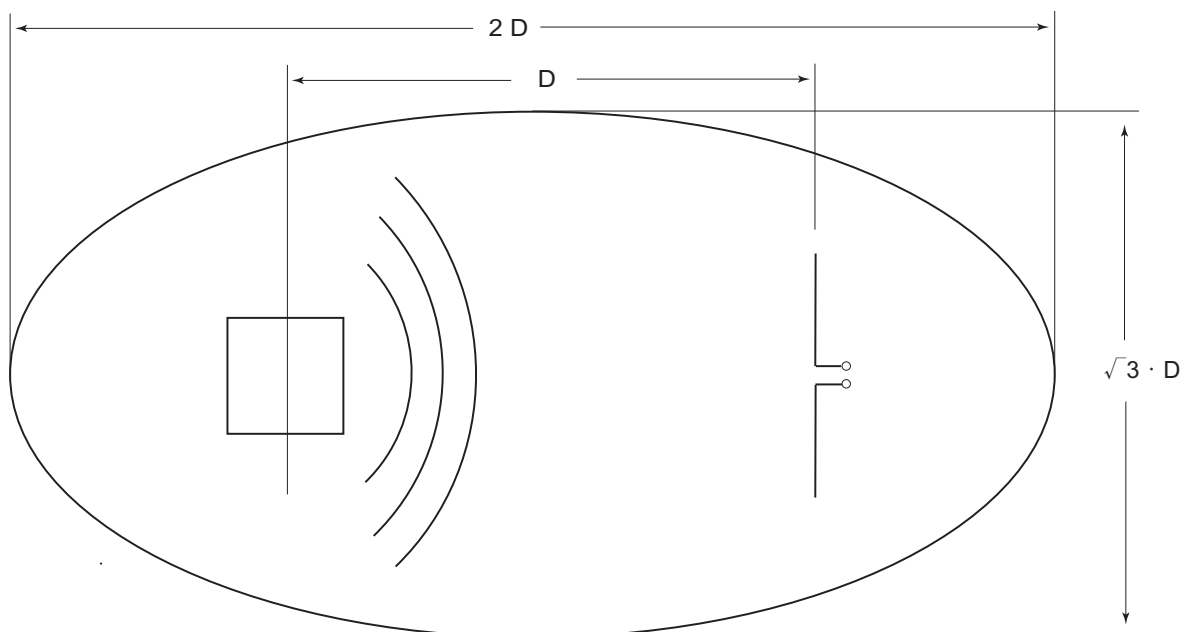


Abbildung 4.1: Mindestabstände für Freifeldmessungen [Sch96b] mit Abstand D zwischen Antenne und Prüfobjekt.

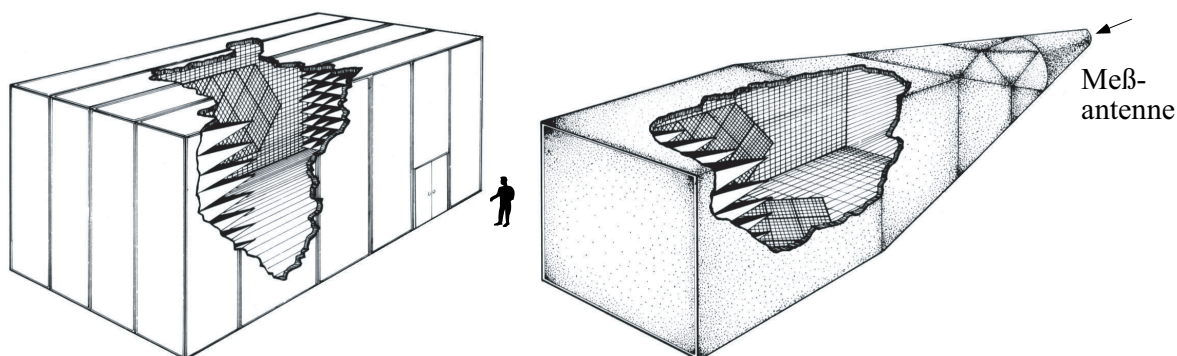
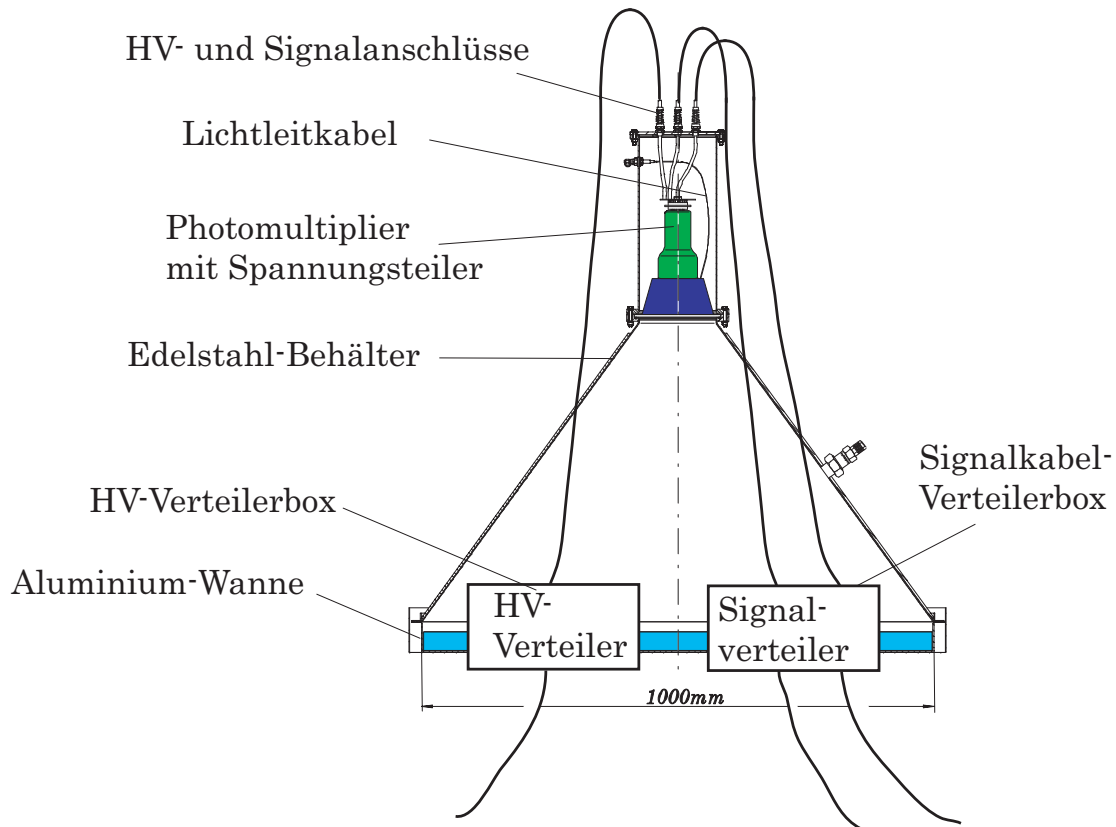


Abbildung 4.2: Absorberräume. Links: Rechteckige Kammer, rechts: getaperte Kammer.

Messaufbaus werden im Nachfolgenden beschrieben.

4.2.1 Die e/γ -Detektoren des KASCADE-Experiments

In Abbildung 4.3 ist ein e/γ -Detektor des KASCADE-Experimentes dargestellt. An den Edelstahlbehälter ist unten eine zylindrische Wanne angeschweißt, die mit 5 cm Füllhöhe Flüssig-Szintillator gefüllt ist. Ionisierende Teilchen erzeugen darin Szintillationslicht. Dieses wird, falls es nicht direkt durch den Lichtsammelkonus tritt, vorher an den reflektierenden Wänden zurückgeworfen. Danach erreicht es einen 3"-Photomultiplier, der über eine Silikonschicht mit dem Lichtsammler gekoppelt ist. Das verstärkte Signal kann dann an der Anode oder der drittletzten Dynode abgegriffen werden. Um Vergiftungen des Szintillators mit Luftsauerstoff zu vermeiden, ist der Behälter mit Argongas gefüllt. Ein Plastiksack dient als Ausgleichsvolumen im Falle von Druck- und Temperaturschwankungen. Zur Zeiteichung werden Laserpulse durch das Lichtleiter-

Abbildung 4.3: Prinzipskizze des e/γ -Detektors des KASCADE-Experiments

kabel geschickt, welches in den Lichtsammelkonus eingeklebt ist. Um eine Verbindung mit der Datenaufnahme und den Hochspannungsversorgungen in einem Cluster herzustellen, befinden sich in jeder Hütte des KASCADE-Experimentes Verteilerboxen.

4.2.2 Der Stickstofflaser und die Glasfaseroptik

Damit der Photomultiplier des e/γ -Detektors in Sättigung gefahren werden kann wird ein gepulster Stickstofflaser verwendet. Zur Verringerung der Pulsintensität befindet sich vor dem Laser ein Schmelzkoppler, der den Laserstrahl in acht Lichtsignale verteilt. Für unseren Nutzen ist es nicht nötig, dass die Signale gleichmäßig verteilt sind. Es reicht eine Strahlintensität aus, die den Photomultiplier in Sättigung fährt. Eine Aufstellung der technischen Daten des Stickstofflasers befindet sich in Tabelle 4.1. Physikalische Einzelheiten zum kompletten System finden sich in [Stü03]. Zusätzlich kann der Laser durch ein externes Signal getriggert werden.

4.2.3 Der Photomultiplier

Photomultiplier sind Elektronenröhren, die schwache Lichtsignale verstärken und in ein elektrisches Signal umwandeln. Er setzt sich aus einer Photokathode mit nachgeschaltetem Sekundärelektronenvervielfacher zusammen (Abbildung 4.4). Die Photonen treffen auf die Photokathode, wo durch den Photoeffekt Elektronen aus der Oberfläche freigesetzt werden, welche durch ein elektrisches Feld beschleunigt werden und auf eine Elektrode (Dynode) treffen. Dort schlägt das auftreffende Elektron weitere Sekundärelektronen heraus ($n = 3 \dots 10$). Diese Dynoden werden kaskadenartig hintereinander

Eigenschaft	Wert
Wellenlänge	$(337,1 \pm 0,1)$ nm
Pulsrate	1 . . . 20 Hz
Pulsbreite (FWHM)	3 ns
Pulsenergie	120 μ J
Leistung pro Puls	40 kW
Strahlquerschnitt	3×8 mm
Strahldivergenz	5×8 mrad
Externer Trigger	TTL-Signal

Tabelle 4.1: Eigenschaften des Stickstofflasers [Stü03]

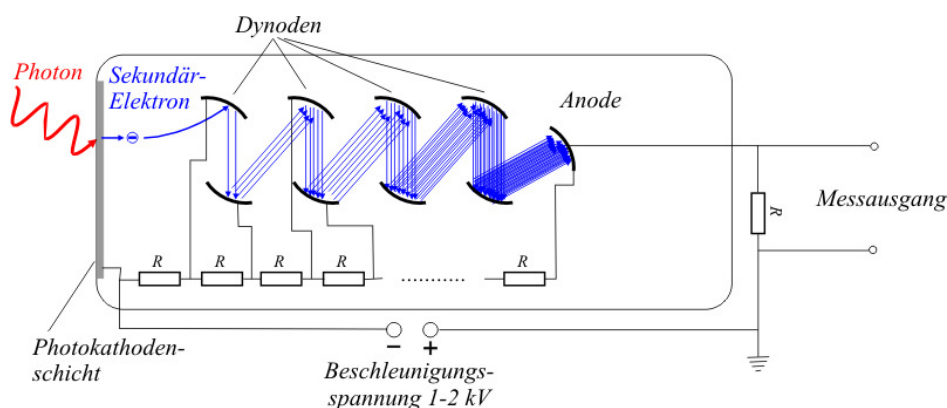


Abbildung 4.4: schematischer Aufbau eines Photomultipliers [wik06]

geschaltet, so dass die Anzahl der Elektronen exponentiell vervielfacht wird. Um dies zu gewährleisten, liegen die Dynoden von der Photokathode aus auf zunehmend positivem Potential. Dies wird durch eine Spannungsteilerkette realisiert, die die ursprüngliche Hochspannung herunterteilt. Am Ende der Kaskade treffen die Elektronen auf die Anode und erzeugen einen Spannungsabfall über den eingezeichneten Widerstand, der z.B. mit einem Oszilloskop abgegriffen werden kann.

4.2.4 Digitales Oszilloskop

Um temporäre Signale zu messen wurde ein digitales Oszilloskop verwendet. In diesem Fall handelt es sich um das Störsignal des e/γ -Detektors, das mit der LOPES-Antenne aufgenommen wird. Es wird mit der Photomultiplierantwort getriggert. Mit diesem Gerät wird ein analoges Signal am Eingang mit einem Analog-Digital-Wandler (A/D-Wandler) in ein digitales Signal umgesetzt. Die Auflösung der einzelnen Werte hängt von der Abtastrate ab. Das in diesem Versuchsaufbau benutzte Oszilloskop ist das TDS 3054 von der Firma Tektronix. Es hat eine Abtastrate von 5 GS/s (Gigasample pro Sekunde). Dies entspricht einer Zeitauflösung von 0,2 ns. Die wichtigsten Eigenschaften sind in Tabelle 4.2 dargestellt. Zur Speicherung der Daten besitzt das Oszilloskop ein Diskettenlaufwerk und mehrere Schnittstellen zur Kommunikation mit externen Geräten. Zusätzlich zur Standardausführung besitzt dieses TDS3054 ein Modul, mit welchem die Fouriertransformierte eines Kanals dargestellt werden kann.

Eigenschaft	Wert
Kanäle	4
Abtastbereich	100 S/s bis 5 GS/s
Skalierungsbereich	1 mV/div bis 10 V/div bei 50 Ω Eingangswiderstand
Messgenauigkeit einer Einzelmessung	$\pm[0,02 \times \text{Ablesung} - (\text{Offset-Position}) + \text{Offset-Genauigkeit} + 0,15 \text{ div} + 0,6 \text{ mV}]$
Offsetgenauigkeit	$\pm(0,005 \times \text{Offset-Position} + 0,1 \text{ div})$
max. Auflösung	10 000 Punkte
Differentialverzögerung	100 ps zwischen zwei beliebigen Kanälen

Tabelle 4.2: Eigenschaften des digitalen Oszilloskops Tektronix TDS3054

4.2.5 Ferritkerne

Fließt ein Strom durch einen Leiter, so erzeugt er ein Magnetfeld. Ändert sich der Strom, so bildet sich eine elektromagnetische Welle. Diese Welle kann umliegende elektrische Geräte beeinflussen. Zur Unterdrückung von solchen elektromagnetischen Wellen werden Ferritkerne eingesetzt, durch welche der entsprechende Leiter geführt wird. Sie wirken wie eine Drossel mit einer niedrigen Windungszahl. Drosseln nutzen die Induktivität zur Unterdrückung von Wechselstromanteilen in Gleichstrom. Die Induktivität wirkt wie ein Blindwiderstand hohen Frequenzen entgegen. Das Magnetfeld, das im Ferritkern erzeugt wird, wandelt sich in Wärmeenergie um. Somit können Störimpulse auf elektrischen Leitungen entfernt werden. Allerdings wird immer nur ein Teil des elektromagnetischen Feldes aufgenommen. Mit mehreren Ferriten lässt sich ein Störimpuls oder -signal weiter unterdrücken. Je nach Material der Ferrite lassen sich unterschiedliche Frequenzbereiche unterdrücken.

4.2.6 Auslesesoftware und Auswertetools

Das digitale Oszilloskop verfügt über ein Diskettenlaufwerk. Da in der Messumgebung allerdings ein sehr hoher Rauschpegel herrscht, dessen Amplitude im Bereich des Störsignals des e/γ -Detektors liegt, muss über viele Messungen gemittelt werden. Da damit eine große Datenmenge entsteht, ist eine Speicherung der Daten auf Disketten sehr umständlich. Das Oszilloskop verfügt jedoch über eine GPIB-Schnittstelle, mit der die Daten an externe Geräte übertragen werden können. Diese Schnittstelle wurde genutzt, um die Daten an einen Computer zu übertragen und dort zu bearbeiten. Die Auslese erfolgte mit der Software Labview. Für das Oszilloskop existieren bereits grundlegende Auslesefunktionen für die GPIB-Schnittstelle. Durch Erweiterung der Funktionen, konnte im Rahmen dieser Arbeit auf diesen eine komplette Auslese- und Bearbeitungssoftware aufgebaut werden. Außerdem wurden noch Programme zur Auswertung der Daten entwickelt, die hier ebenfalls vorgestellt werden.

Auslesesoftware für das digitale Oszilloskop

Zum Auslesen des Oszilloskops über die GPIB-Schnittstelle standen bereits einige Funktionen zur Verfügung [lab06]. Dazu gehören der Abruf von Kanal 1 und Kanal 2 des Oszilloskops, sowie einige Befehle, die an das Gerät gesendet werden, um dessen Einstellungen zu verändern. Mit dem „Programmer Manual“ [Tekb] konnten noch weitere Funktionen implementiert werden. Das fertige Programm sendet Befehle an das Oszilloskop, um Einstellungen zu ändern oder die Spektren ausgewählter Kanäle

abzurufen. Dabei bekommt das Oszilloskop ein Signal zum Start einer Messung. Es wartet dann auf den nächsten Trigger (extern oder intern) und sendet die Spektren der ausgewählten Kanäle an den Rechner. Der Übertragungsvorgang dauert je nach Anzahl der ausgewählten Kanäle 5-6 s. Die übertragenen Spektren können danach auf Wunsch gespeichert werden. In Abbildung 4.5 ist die Benutzeroberfläche dargestellt.

Für viele Messungen mit gleichen Einstellungen wurde eine Automatikfunktion implementiert, mit welcher mehrere Messungen hintereinander durchgeführt werden können. Die ausgelesenen Spektren werden in einem vorher definierten Dateinamen und Verzeichnis gespeichert. Bei jeder neuen Aufnahme eines Spektrums wird eine fortlaufende Nummer an den Dateinamen angehängt, so dass nicht jedesmal ein neuer Dateiname eingegeben werden muss. Gleichzeitig wird auf einem separaten Diagramm der Mittelwert der aktuellen Messungen angezeigt (Abbildung 4.6). Dabei können einzelne Kanäle ein- und ausgeschaltet werden. Für den Vergleich mit bereits durchgeführten Messreihen kann im Hintergrund (in der Abbildung schwach rot dargestellt) ein Referenzwert angezeigt werden.

Eine ausführliche Dokumentation der einzelnen Programmteile findet sich in der interaktiven Hilfe der Auslesesoftware.

Programm zur vorläufigen Auswertung der Daten

Zur Vorauswertung der Daten wurde im Rahmen dieser Arbeit mit Labview ein Programm geschrieben, mit der die Daten nach der Aufzeichnung betrachtet und verglichen werden können. Damit ist es möglich, die Daten von mehreren Messungen gleichzeitig zu betrachten.

4.3 Der Versuchsaufbau

Um die elektromagnetische Störung der e/γ -Detektoren zu reduzieren, wurde der in Abbildung 4.7 gezeigte Messaufbau in Bau 601 des Forschungszentrums Karlsruhe (Abbildung 4.8) eingerichtet.

Zur Aufnahme des Störsignals des e/γ -Detektors wird eine original LOPES-Antenne verwendet. Der Detektor ist auf einem fahrbaren Untersatz aufgestellt, dessen Abstand zur Antenne von 2-8 m variiert werden kann. Das Antennensignal wird zuerst über den Vorverstärker am Antennendipol verstärkt und läuft danach über 100 m Koaxialkabel vom Typ RG 213 in die Elektronik. Diese besteht aus der Spannungsversorgung für den Vorverstärker in der Antenne, einem zusätzlichen Verstärker und einem Frequenzfilter, der Signale außerhalb von 40-80 MHz reduziert. Daraufhin läuft das Signal in das digitale Oszilloskop, das durch die Detektorantwort getriggert wird. Das aufgenommene Antennensignal wird mittels einer schnellen Fouriertransformation (FFT) (siehe auch Anhang A) in den Frequenzraum transformiert. Zur Speicherung werden Detektorantwort, Antennensignal und FFT des Antennensignals mit Hilfe der Labview-Software von einem Rechner ausgelesen (Abschnitt 4.2.6). Die Ein- und Ausgangswiderstände von allen Komponenten außer der Antenne und deren Vorverstärker sind auf 50Ω normiert.

In unmittelbarer Nähe der Antenne befinden sich Wände aus Metall. Sie wirken nach außen hin wie eine faradayscher Käfig, so dass die im LOPES-Experiment sichtbaren Sender etwas reduziert sind. Nach innen jedoch reflektieren sie alle Arten von möglicher Strahlung, zu denen auch die der e/γ -Detektoren gehörten. Auf der gegenüberliegenden

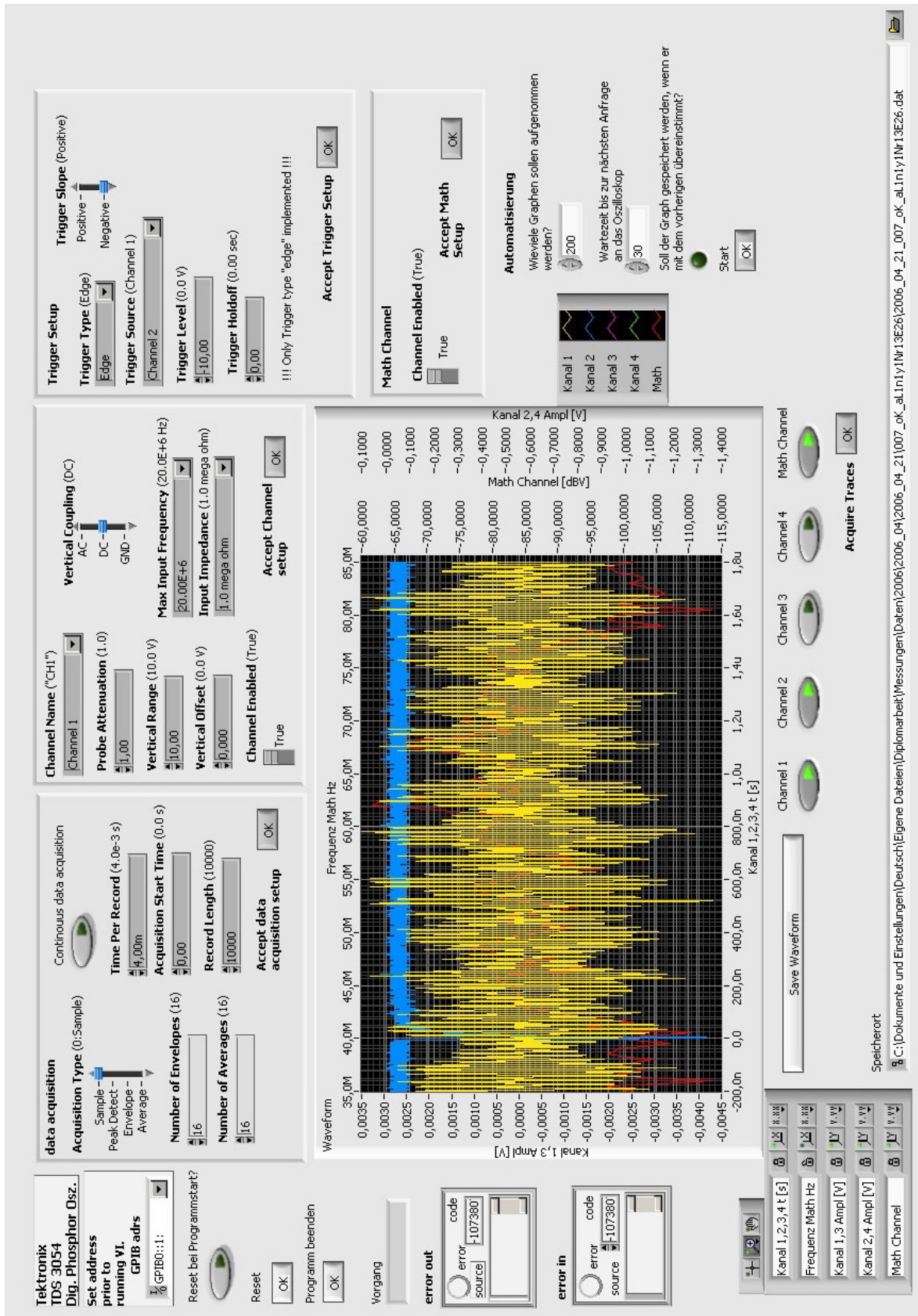


Abbildung 4.5: Beispiel der Benutzeroberfläche des zur Datenaufnahme benutzten digitalen Oszilloskops.

4 Messung der elektromagnetischen Störung

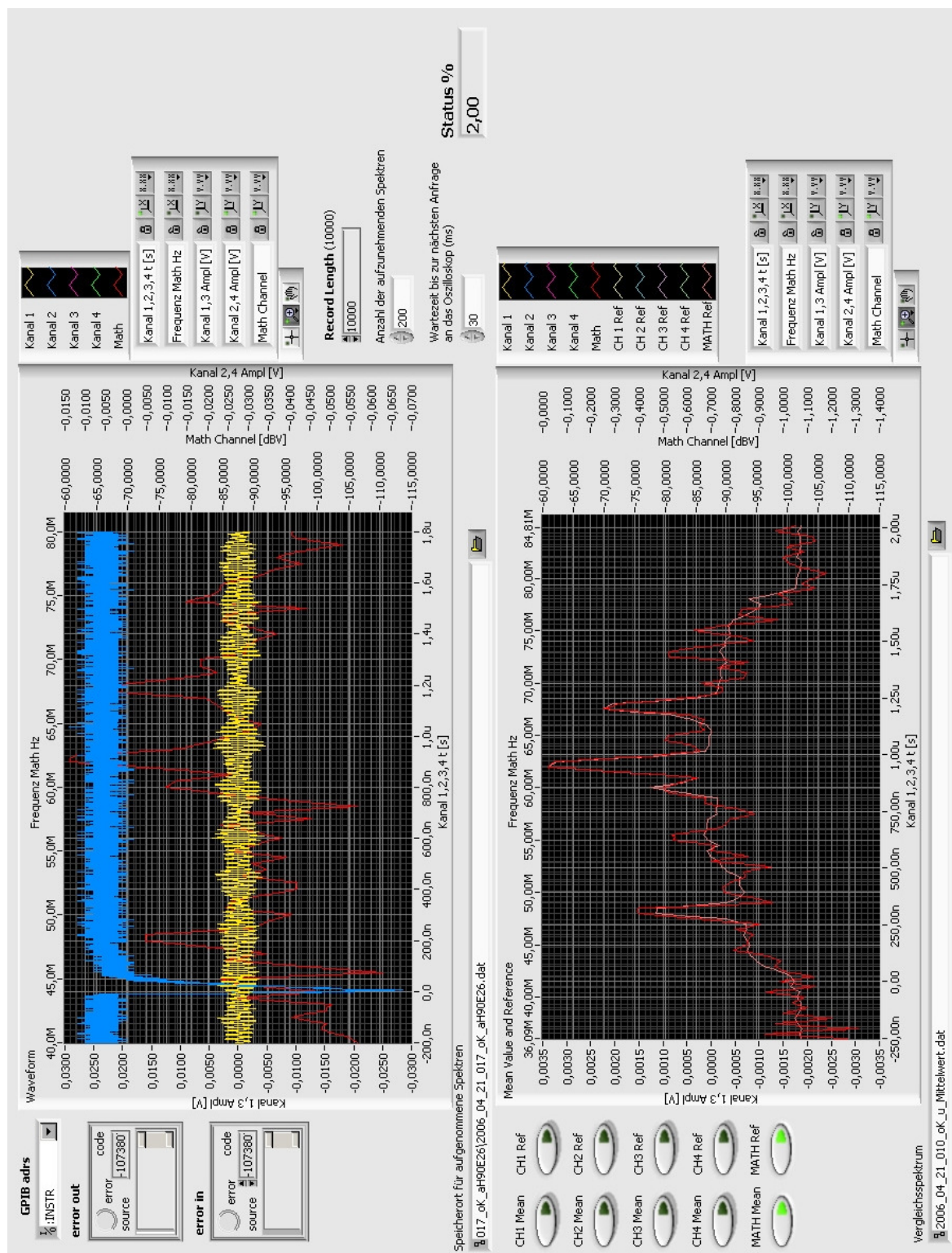


Abbildung 4.6: Beispiel einer Messungs-Darstellung mit Hilfe des digitalen Oszilloskops.

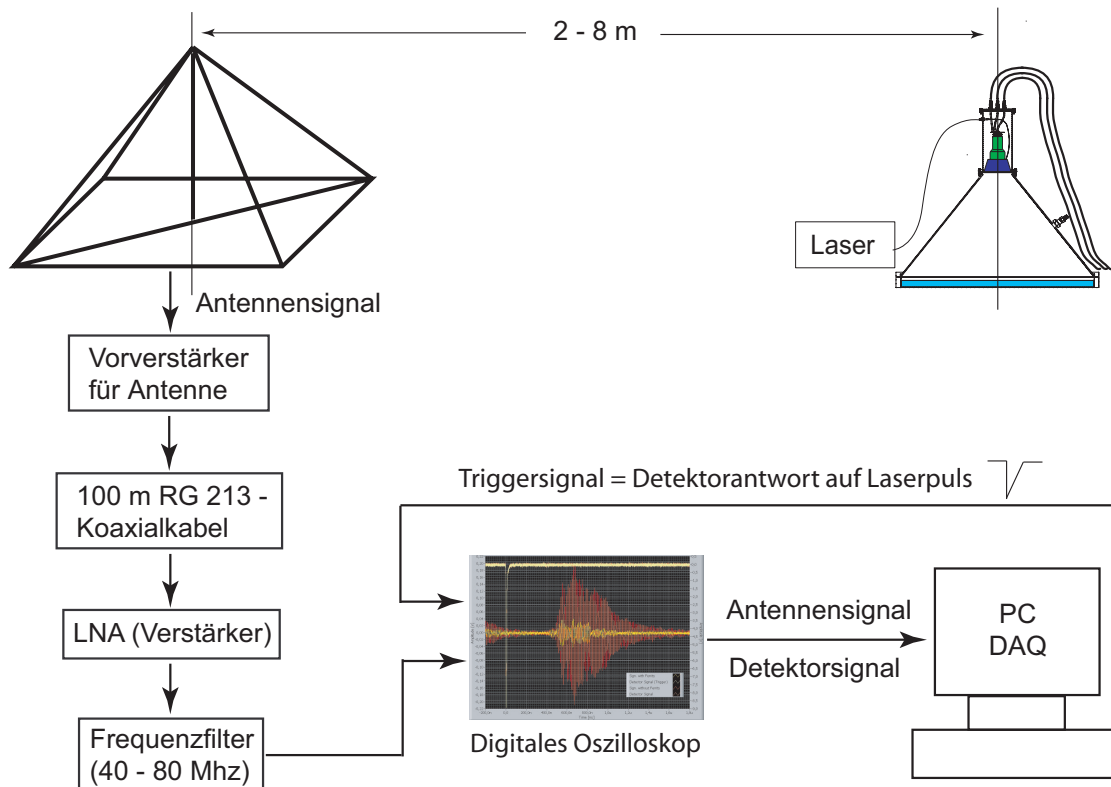


Abbildung 4.7: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

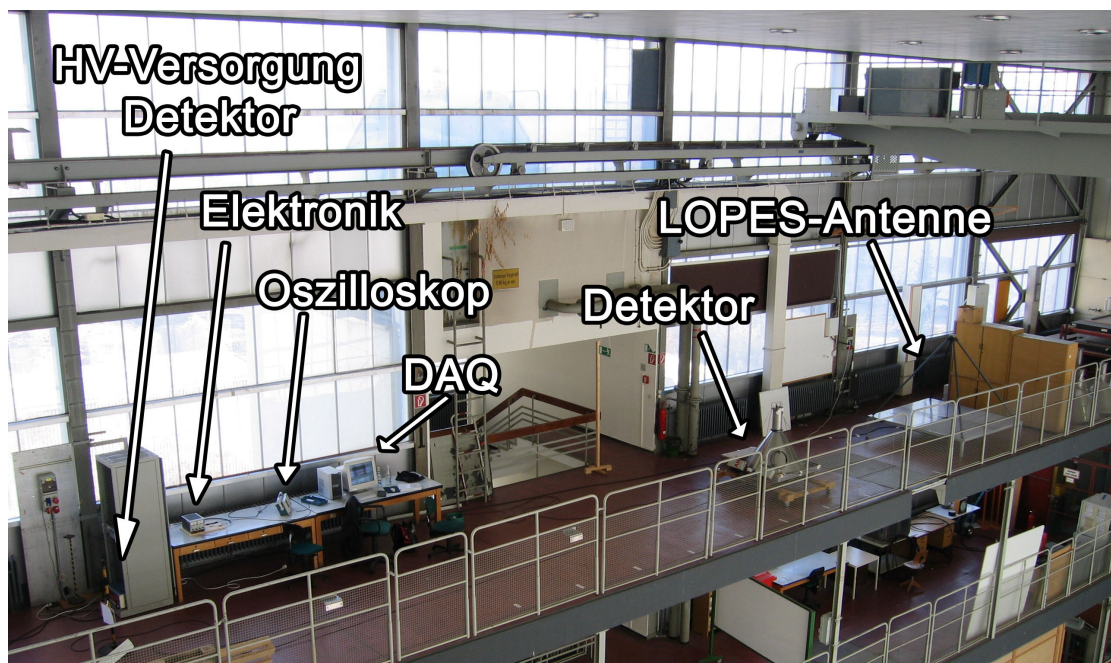


Abbildung 4.8: Photo des Messaufbaus

4 Messung der elektromagnetischen Störung

Seite sind Metallzäune zu sehen, die ebenfalls elektromagnetische Strahlung reflektieren. Damit ist die gemessene Störung etwas größer als ohne Reflektionen. Hinzu kommt ein fahrbarer Kran, der über der Antenne teilweise sichtbar ist. Auf den Einfluss dieser Gegenstände wird im Abschnitt 5.3 näher eingegangen.

5 Messungen und Ergebnisse am Versuchsaufbau

Nach einer kurzen Einführung in die Messtechnik und die Auswertung der Daten werden die Ergebnisse zur Reduktion der Störung durch den in diesem Versuchsaufbau verwendeten Detektor vorgestellt und diskutiert. Dabei wurde besonders darauf geachtet, dass die Reduktionsmaßnahme praktikabel und möglichst wirtschaftlich auf das gesamte KASCADE-Experiment umgesetzt werden kann.

5.1 Messung der Störung durch den e/γ -Detektor

Bei den Störungen durch den Detektor muss zwischen gleichmäßigen und temporären Störungen unterschieden werden. Mit gleichmäßigen Störungen des e/γ -Detektors werden elektromagnetische Störungen bezeichnet, die zu allen Zeiten beobachtbar sind, wenn der Detektor in Betrieb ist. Temporäre Störungen sind nur zeitweise beobachtbar. In dem hier behandelten Fall ist die temporäre Störung mit einem Energiedeposit, in diesem Versuchsaufbau ein Laserpuls, korreliert.

Zur Messung einer temporären Störung des e/γ -Detektors, die mit Luftschauern korreliert ist, wurde der Versuchsaufbau aus Abbildung 4.7 verwendet. Das Oszilloskop wurde durch die Antwort des Photomultipliers des Detektors, auch Detektorantwort genannt, getriggert. Diese Antwort besteht aus einem kurzzeitigen Spannungsabfall mit einer Dauer von einigen Nanosekunden (ns). Parallel dazu wird das Antennensignal ausgelesen, um eine Störung des Signals durch den Detektor zu beobachten. Dieses Antennensignal wurde mit einem im Oszilloskop integrierten Modul fouriertransformiert, womit das Signal im Frequenzraum betrachtet werden kann. Als Beobachtungszeitfenster haben sich, mit der Auflösung des Oszilloskops von 10 000 Punkten, Samples genannt, und der Zeitauflösung von 0.2 ns, 2 Mikrosekunden (μs) als geeignet herausgestellt. Die Anzeige erfolgt in Volt (V), wobei im Folgenden zur Darstellung Millivolt (mV) verwendet werden. Damit besteht eine typische Messung aus den Werten $U(t_k)$ mit diskreten Zeitmarken, die von $k = 1$ bis 10 000 laufen, mit $t_k - t_{k-1} = 0,2$ ns.

Mit diesem Versuchsaufbau werden nur Abstände zwischen 2 m und 8 m zwischen Antenne und Detektor gemessen, da sich die Detektoren am KASCADE-Experiment in einer Entfernung von ca. 9 m von der Antenne befinden. Abbildung 5.1 zeigt exemplarisch eine Messung bei 2 m Abstand. Bei 0 ns ist das Triggersignal des Detektors zu erkennen. Das Antennensignal enthält das Störsignal des Detektors. Es beginnt bei ca. 500 ns. Diese Verzögerung ist dadurch zu erklären, dass das Antennensignal eine Strecke von 100 m im Koaxialkabel zurücklegen muss, während das Signalkabel des Detektors nur eine Länge von ca. 20 m besitzt. In Abbildung 5.2 ist die Fouriertransformierte des Antennensignals dargestellt, in welcher die Unterdrückung durch den LOPES-Frequenzfilter des Signals außerhalb von 40-80 MHz sehr gut zu erkennen ist. Im Folgenden wird nur der Bereich zwischen 40 und 80 MHz untersucht, da die Beiträge außerhalb nur einige $10 \mu V$ betragen. Um das mit der Detektorantwort unkorrelierte Rauschen, wie es vor der 500 ns-Marke in Abbildung 5.1 zu erkennen

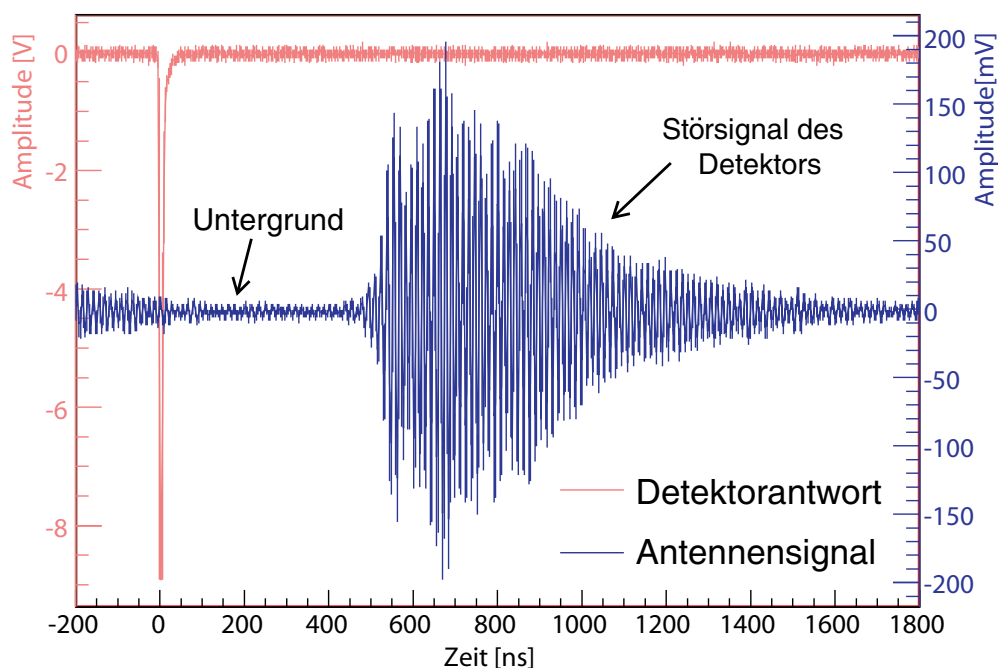


Abbildung 5.1: Einzelmessung der Detektorstörung mit der Detektorantwort auf einen Laserpuls als Triggersignal (rot) und dem zugehörigen Antennensignal (blau).

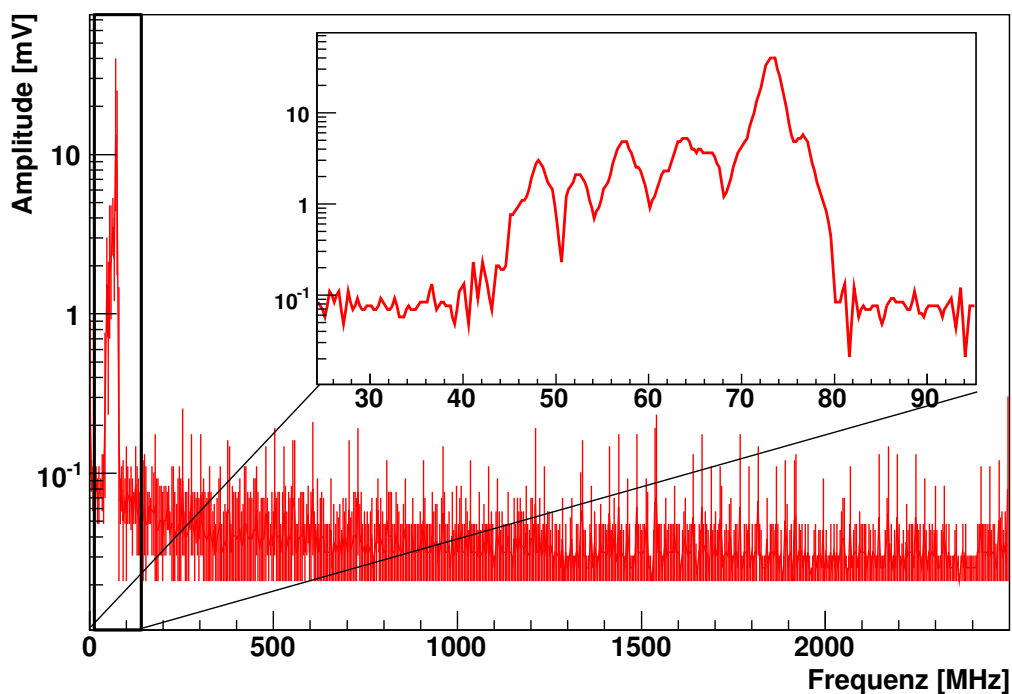


Abbildung 5.2: Fouriertransformierte (FFT) der Einzelmessung aus Abbildung 5.1 in logarithmischer Darstellung. Wird der Bereich zwischen 25 und 95 MHz vergrößert, so ist sehr gut die Abschwächungscharakteristik des Filters zu sehen.

ist, zu minimieren, wird über viele solcher Messungen gemittelt. Die aufgenommene Datenmenge ist sehr groß, da drei Kanäle des Oszilloskops ausgelesen werden. Dies sind das Detektorsignal, das Antennensignal, sowie die Fouriertransformierte (FFT) des Antennensignals. Bei Testmessungen wurde bestimmt, dass eine Mittelung über 200 Messungen ausreicht, um den statistischen Fehler zu reduzieren. Dabei wird ein Mittelwert $\bar{U}(t_k)$ für jeden der 10 000 Samples t_k gebildet. Dieser Mittelwert

$$\bar{U}(t_k) = \frac{1}{200} \sum_{t_k=1}^{200} U_i(t_k) \quad \text{für} \quad k = 1 \dots 10\,000 \quad (5.1)$$

wird im Folgenden als Messwert bezeichnet. Ebenso wie das hier beschriebene Zeitsignal im Zeitraum, wird im Frequenzraum $F(f_k)$ gemittelt. Dabei ist zu beachten, dass der Mittelwert der Zeitsignale nicht dem der Fouriertransformierten entspricht, da im Frequenzraum immer noch der Untergrund enthalten ist. Der Untergrund, auch Rauschen genannt, wird durch die natürlichen elektromagnetischen Störungen von elektrischen Geräten definiert. Dazu gehört auch eine gleichmäßige Störung, die von der Hochspannungsversorgung (HV-Versorgung) des Detektors erzeugt wird. Eine Messung der gleichmäßigen Störung wurde mit einem Spektrumanalysator durchgeführt. Dabei wurde das digitale Oszilloskop in Abbildung 4.7 durch den Spektrumanalysator ersetzt. Im Versuchsaufbau hat sich eine Störung gezeigt, die jedoch, wie im nächsten Absatz beschrieben, viel geringer als die temporäre Störung ist. Die zu untersuchende Störung durch den Detektor, die nur bei hochenergetischen Luftschauern auftritt, wird mittels eines Laserpulses erzeugt, mit welchem der Photomultiplier des Detektors in Sättigung gefahren wird. Um ein Maß für den Untergrund zu erhalten, wird das Oszilloskop mit der Detektorantwort von niederenergetischer Strahlung getriggert (d. h. kein hoher Energiedeposit, zudem Einzelteilchen).

Die Abbildungen 5.3 und 5.4 zeigen Mittelwerte des Untergrundes und der temporären Störung des Detektors in 2m Abstand des Detektors von der Antenne¹. Es ist sehr gut zu erkennen, dass bei kleinen Detektorantworten, was niederenergetischen Luftschauern entspricht, kein Störsignal existiert. Im Frequenzraum überwiegt die Fouriertransformierte des Störsignals die des Untergrundes, zu welchem auch die temporäre Störung gehört, bei Weitem. Das bedeutet, dass das Rauschen durch elektrische Geräte und die gleichmäßige Störung eher unbedeutend gegen die temporäre Störung des Detektors sind. Hierbei ist zu beachten, dass im Rahmen dieser Arbeit sowohl die von der Störung geleistete Energie, d. h. die Fläche unter der Kurve, als auch die Amplitude der Störung von Interesse ist.

Es hat sich gezeigt, dass sich das temporäre Störsignal des Detektors stark verändert, wenn die Signal- und HV-Kabel auf der Oberfläche des Detektors neu angeordnet werden. Um eine unbeabsichtigte Verschiebung der Kabel zu vermeiden, wurden diese mit Klebeband fixiert. Da sich das Störsignal trotz dieser Maßnahme bei kleinsten Verschiebungen der Kabel ändert, wurden die Messungen in der folgenden Reihenfolge durchgeführt.

1. Untergrund 1
2. reines Störsignal, ohne Reduktionsmaßnahmen
3. Reduziertes Störsignal (z. B. mit Ferriten)

¹Im Folgenden wird der Übersichtlichkeit halber mit „Abstand“ immer der „Abstand zwischen Detektor und Antenne“ gemeint.

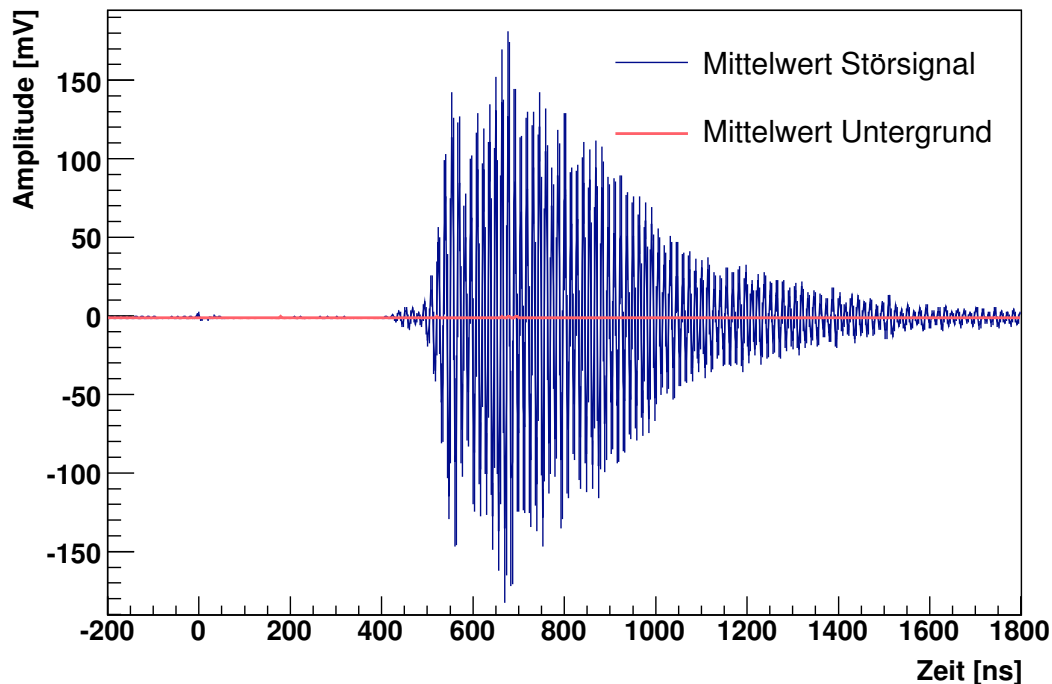


Abbildung 5.3: Beispiele für Mittelwerte des Antennensignals für die Störung des Detektors (blau) und des Untergrundes (rot).

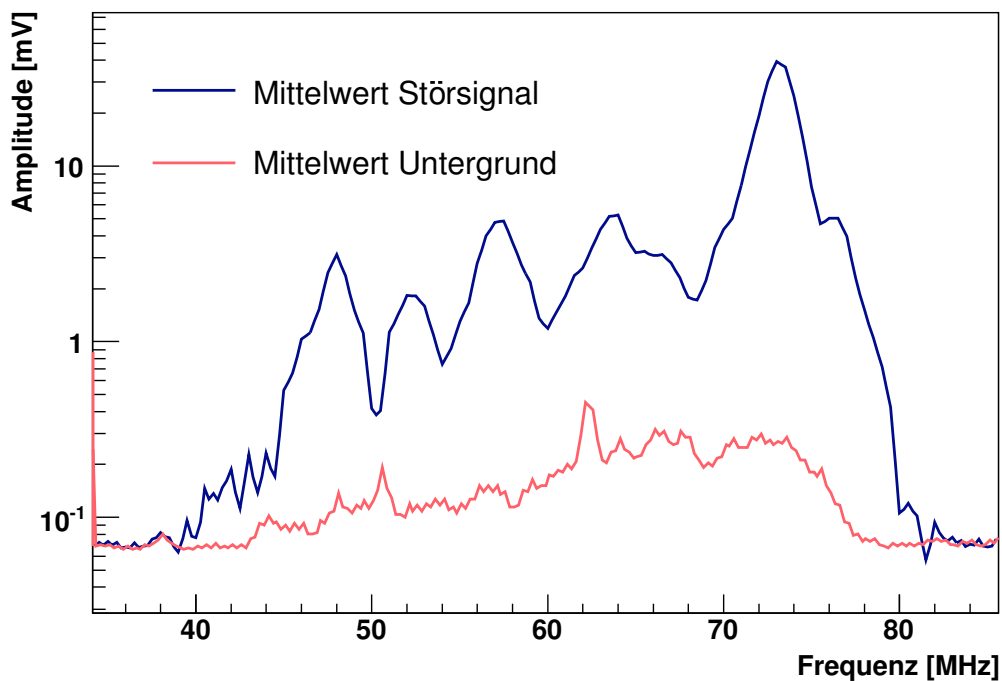


Abbildung 5.4: Mittelwerte der Fouriertransformierten Störsignals und des Untergrundes aus Abbildung 5.3 in logarithmischer Darstellung.

4. reines Störsignal, ohne Reduktionsmaßnahmen
5. Untergrund 2

Da sich der Untergrund im Laufe des Tages ändert, wurde er vor und nach jeder Messung ermittelt. Im weiteren Verlauf der Messungen hat sich jedoch herausgestellt, dass die Schwankungen des Untergrundes so gering sind, so dass dieser nur alle 5-7 Messwerte bestimmt wurde. Der zweite Messwert für das Störsignal ohne Reduktionsmaßnahmen dient zur Überprüfung, ob sich bei der Installation oder Deinstallation der Reduktionsmaßnahme an den äußeren Bedingungen, wie z.B. der Anordnung der Kabel, etwas verändert hat.

5.2 Auswertung der Messungen

Bei der Auswertung der Messwerte für die Reduktion der Störung wurden zwei Verfahren angewandt. Direkt am Experimentaufbau wurden die Daten über ein einfaches Verfahren vorausgewertet, da die Rechenkapazität des zur Verfügung stehenden Rechners mit der Aufnahme der Messdaten voll ausgelastet war. Für eine korrekte Analyse ist jedoch ein umfangreicheres Verfahren notwendig, welches im darauffolgenden Abschnitt beschrieben wird. Im letzten Abschnitt wird schließlich noch auf den Fehler bei den Messungen eingegangen.

5.2.1 Vorauswertung der Messungen

Die Vorauswertung beschränkte sich ausschließlich auf die aufgenommenen Messwerte, bei denen statistische Fehler und Messfehler nicht berücksichtigt wurden. Zur Überprüfung, ob eine Reduktionsmaßnahme das Störsignal erfolgreich reduziert, wurde sowohl die Fouriertransformierte, als auch das Zeitsignal eines Messwertes herangezogen. In der Fouriertransformierten wird die Energie des Störsignals mit der des eventuell reduzierten Störsignals verglichen.

Dazu wurde der Mittelwert der Fouriertransformierten $\bar{U}_{UntMW}(f_k)$ der beiden Mittelwerte der Untergründe, mit der Frequenz f_k bei Sample k ,

$$\bar{F}_{UntMW}(f_k) := \frac{\bar{F}_{Unt1}(f_k) + \bar{F}_{Unt2}(f_k)}{2}, \quad k = 1 \dots 10\,000. \quad (5.2)$$

gebildet. Dieser wurde vom Mittelwert von den beiden Mittelwerten der reinen Störsignale subtrahiert, auch spektrale Subtraktion genannt [Köh05].

$$\bar{F}_{StMW-UntMW}(f_k) := \frac{\bar{F}_{St1}(f_k) + \bar{F}_{St2}(f_k)}{2} - \bar{F}_{UntMW}(f_k), \quad k = 1 \dots 10\,000. \quad (5.3)$$

Gleichzeitig wurde auch der Untergrund vom reduzierten Störsignal subtrahiert,

$$\bar{F}_{Reduziert-UntMW}(f_k) := \bar{F}_{Reduziert} - \bar{F}_{UntMW}(f_k), \quad k = 1 \dots 10\,000. \quad (5.4)$$

Anschließend wurde über die resultierenden Werte integriert bzw. in diesem Falle summiert und die beiden Werte ins Verhältnis gesetzt,

$$\bar{V}_{Reduziert} := \frac{\sum_{k=1}^{10\,000} \bar{F}_{StMW-UntMW}(f_k)}{\sum_{k=1}^{10\,000} \bar{F}_{Reduziert-UntMW}(f_k)}. \quad (5.5)$$

Dieses Verhältnis lieferte dann einen Faktor für die Reduktion der Störung durch den Detektor.

Da bei diesem Verfahren im Frequenzraum nur die Summe der Amplituden bei den einzelnen Frequenzen betrachtet wird, muss das Störsignal mit dem reduzierten Signal auch im Zeitraum verglichen werden. Es ist möglich, dass die Energie sehr gut reduziert wird. Jedoch kann das Verhältnis von

$$V_{Ampl,Red} := \frac{\max_{1 \leq k \leq 10\,000} |\bar{U}_{StMW}(t_k)|}{\max_{1 \leq k \leq 10\,000} |\bar{U}_{Red}(t_k)|} = \frac{|U_{max,StMW}|}{|U_{max,Red}|} \quad (5.6)$$

sehr klein sein. Dazu wurde ein visueller Vergleich der Graphen durchgeführt und im Messtagebuch vermerkt. Anhand dieser Auswertung wurde bewertet, ob eine Reduktionsmaßnahme erfolgreich war oder nicht. Hat die Maßnahme einen Erfolg gehabt, so wurde, darauf aufbauend, eine neue Maßnahme getestet. Im Experiment sieht das wie folgt aus: hat z.B. ein Ferrit auf dem Anodensignalkabel am Ausgang des Photomultipliers eine Reduktion gezeigt, so wurde ein zusätzlicher installiert usw. Dies wurde so lange fortgeführt, bis keine weitere Reduktion mehr zu erkennen war.

5.2.2 Nachbereitung und Analyse der Messungen

In der Vorauswertung wurde die Fouriertransformierte des Antennensignals zu Hilfe genommen. Da das aufgenommene Zeitsignal begrenzt ist, muss das Signal vor der Fouriertransformation mit einer sogenannten Fensterfunktion gewichtet werden (siehe auch Anhang A). Dadurch wird auch ein Teil des Störsignals reduziert, womit es im Frequenzraum nicht korrekt dargestellt wird. Deshalb wurde die Auswertung der Störungen durch den Detektor nur im Zeitraum durchgeführt, was bedeutet, dass die Messungen die Fouriertransformierte im Folgenden nicht mehr beachtet werden. Weiterhin wurde bei der Vorauswertung eine Zeitverschiebung der einzelnen Messungen zueinander nicht beachtet. Diese kommt durch das Triggerlevel der Detektorantwort zustande. Da der Laserpuls eine Amplitudenschwankung von $\pm 20\%$ besitzt, befindet sich das Maximum der Detektorantwort auf den Laserpuls bei fest eingestelltem Triggerlevel bis zu ein oder zwei Nanosekunden vor oder hinter dem Maximum des Mittelwerts, wie in Abbildung 5.5 dargestellt. Dadurch wird auch das Störsignal um denselben Zeitraum verschoben. Dies führt natürlich zu einem größeren Fehler in der Amplitude des Mittelwerts des Störsignals. Zur Bereinigung wurden die Signale nachträglich gegeneinander versetzt, um den Fehler zu minimieren. Dazu wurde folgendes Verfahren angewendet. Zuerst wurde ein Mittelwert des Antennensignals über die 200 Messwerte gebildet. Danach wurde die Kreuzkorrelation zwischen jedem der 200 Messwerte und dem Mittelwert berechnet. Sind die Signale $U_i(t_k)$ und $\bar{U}(t_k)$, $k = 1 \dots 10\,000$, um die Zeit τ verschoben, so wird die Kreuzkorrelationsfunktion bei τ maximal. Für diskrete Werte ist sie definiert durch

$$R_{U_i\bar{U}}(\tau) = \frac{1}{t_n - t_1} \sum_{t_k=t_1}^{t_n} U_i(t_k) \cdot \bar{U}(t_k + \tau) \quad (5.7)$$

mit dem betrachteten Zeitintervall von t_1 bis t_n [Hän97]. In diesem Fall werden nicht alle Samples verwendet, um zufällige Korrelationen mit dem Untergrund zu minimieren. Ist die maximale Korrelation bei der Verschiebung τ gefunden, so wird die Messung um τ verschoben und ein neuer Mittelwert über die 200 gegeneinander verschobenen

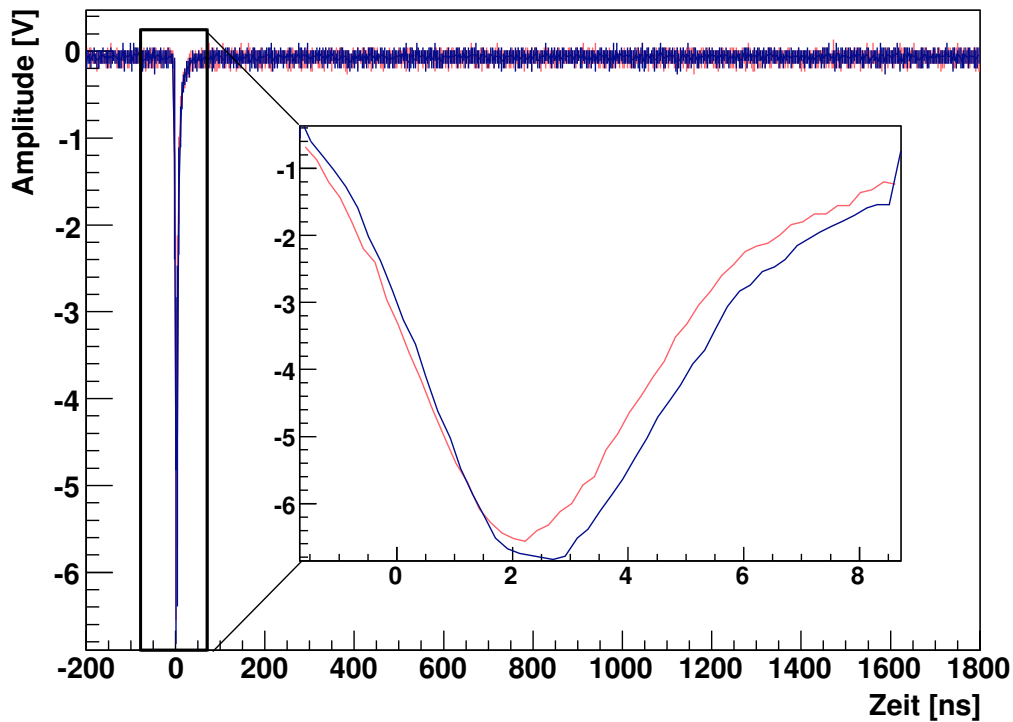


Abbildung 5.5: Verschiebung zweier Detektorantworten gegeneinander (rot und blau). In der Vergrößerung ist eine minimale Verschiebung zu erkennen.

Messungen gebildet. Um ein Maß für die Verschiebung zu erhalten, wurden Messwerte untersucht, die ein Signal- zu Untergrundverhältnis von 10:1 oder größer besitzen. Diese ergaben eine Verschiebung der Messungen zum Mittelwert von maximal $\pm 1,6$ ns vom Mittelwert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.6 dargestellt. Die Kreuzkorrelation wurde auch für Signale mit einem niedrigen Signal- zu Untergrundverhältnis angewendet. Dabei stellt sich allerdings heraus, dass die dargestellte Kurve zerfließt (Abbildung 5.6), was darauf schließen lässt, dass Signale im Untergrund eine zufällige Korrelation erzeugen, die eine größere Verschiebung zufolge haben. Deshalb wird im Folgenden wie zu Beginn der einfache Mittelwert von den 200 Messungen verwendet (Gleichung 5.1). Dadurch erhöht sich zwar der statistische Fehler in der Amplitude, jedoch können damit Fehler durch zufällige Korrelationen im Untergrund ausgeschlossen werden.

Um einen aussagekräftigen Wert für die Reduktion der Störung zu erhalten, wird die momentane Energie der Signale über

$$\bar{P}(t_k) = \frac{(\bar{U}(t_k))^2}{R} \quad \text{für} \quad k = 1 \dots 10\,000 \quad (5.8)$$

berechnet. Der Widerstandswert R beträgt 50Ω und ist der Eingangswiderstand des Oszilloskop, an welchem das Signal abgegriffen wird. Die Gesamtenergie im betrachteten Störsignal erhält man, indem über $\bar{P}(t_k)$ summiert, $\bar{P}(t_k)$ vorher aber mit dem Zeitintervall von $t_{step} := t_k - t_{k-1} = 0,2$ ns multipliziert wird. Dies ergibt

$$\bar{E}_{ges} = \sum_{k=1}^{10\,000} \bar{P}(t_k) \cdot t_{step} = T_{ges} \cdot \sum_{k=1}^{10\,000} \bar{P}(t_k) \quad (5.9)$$

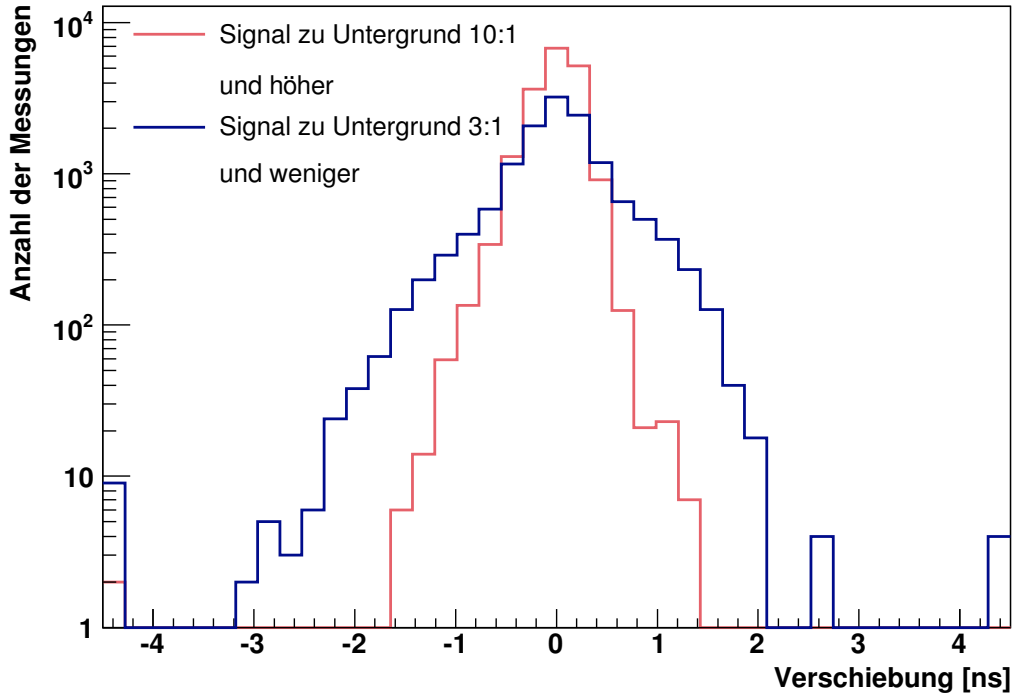


Abbildung 5.6: Anzahl der verschobenen Antennensignale im Vergleich zum Mittelwert in logarithmischer Darstellung für ein Signal-zu-Untergrund-Verhältnis von 10:1 und 3:1

mit $T_{ges} = 2 \mu s$. Um ein Maß für die Reduktion der Störung zu erhalten, werden der Mittelwert der Energie der Störung \bar{E}_{St1} und \bar{E}_{St2} , die vor und nach dem reduzierten Störsignal \bar{E}_{Red} , gemessen wurden (siehe Abschnitt 5.1) mit diesem über

$$V_{Energie,Red} := \frac{\bar{E}_{StMW}}{\bar{E}_{Red}} \quad \text{mit} \quad \bar{E}_{StMW} := \frac{\bar{E}_{St1} + \bar{E}_{St2}}{2} \quad (5.10)$$

ins Verhältnis gesetzt. Da dieser Wert, insbesondere für große V nicht sehr aussagekräftig ist, wird er über

$$V_{Energie,Red,Proz} := 1 - \frac{1}{V_{Energie,Red}} \quad (5.11)$$

in Prozentwerte umgerechnet.

Zusätzlich werden die Amplituden von $\bar{U}_{StMW}(t_k)$ und $\bar{U}_{Red}(t_k)$ visuell miteinander verglichen, da für eine mathematische Beschreibung ein komplexer Algorithmus notwendig ist. Dies ergibt sich dadurch, dass Gleichung 5.6 einen Wert liefert, für den

$$\bar{U}_{Red}(t_{max,Red}) := |U_{max,Red}| \quad (5.12)$$

gilt und für

$$\bar{U}_{StMW}(t_{max,StMW}) := |U_{max,StMW}| \quad (5.13)$$

bei dem $t_{max,Red} \neq t_{max,StMW}$ ist. Bei den Messungen hat sich herausgestellt, dass zum Großteil $t_{max,Red} \ll t_{max,StMW}$ ist. Ein Beispiel dazu wird später diskutiert (Abbildung 5.12). Um einen Vergleich zwischen $|\bar{U}_{StMW}(t_{max,Red})|$ und $|\bar{U}_{Red}(t_{max,Red})|$ zu erhalten, wurde deshalb auf eine visuelle Betrachtung zurückgegriffen.

5.2.3 Fehlerbetrachtung

Da bei den experimentellen Untersuchungen der Rauschpegel sehr hoch war, liefert der zufällige Fehler einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag. Er kann jedoch über die $N = 200$ gemessenen Werte reduziert werden. Der Fehler des Mittelwerts $\bar{U}(t_k)$ errechnet sich über

$$\sigma_{\bar{U}}(t_k) = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (U_i(t_k) - \bar{U}(t_k))^2}. \quad (5.14)$$

Dabei werden Korrelationen zwischen benachbarten Punkten nicht beachtet. Zusätzlich muss noch der Messfehler des Oszilloskops beachtet und zu $\sigma_{\bar{U}(t_k)}$ hinzuaddiert werden. Vom Hersteller werden dafür zwei unterschiedliche Werte angegeben, einer für Einzelmessungen und ein zweiter für Mittelwertbildung. Der Fehler bei der Mittelwertbildung wird mit

$$\Delta U_{Osz} = \pm[0,03 \cdot |\text{Ablesung}| + \text{Offset-Fehler} + 0,1 \text{ div}] \quad (5.15)$$

angegeben [Tekla]. Darin bezeichnet „Ablesung“ den abgelesenen Wert. Die vertikale Kalibrierung der Darstellung wird durch den Schalter Volts/div (V/Skaleneinheit („Division“)) bestimmt. „div“ bezeichnet diese eingestellte Skaleneinheit, z.B. 50 mV/div. Der „Offset-Fehler“ ist durch 0,1 div definiert. Werden aber nur Signale betrachtet, die mit den selben Einstellungen unter den gleichen Bedingungen aufgezeichnet werden, so wird im Benutzerhandbuch ein dritter Wert mit

$$\Delta U_{Osz} = \pm T_{ges} \cdot [0,03 \cdot |\text{Ablesung}| + 0,05 \text{ div}], \quad (5.16)$$

angegeben, was eine deutliche Reduktion des Fehlers bedeutet. In der vorliegenden Berechnung wird letzterer Fehler verwendet, weil Signale miteinander verglichen werden (Abschnitt 5.2.2), die mit den selben Einstellungen unter den gleichen Bedingungen aufgezeichnet wurden. Der Wert 0,03 bezieht sich auf die Abweichung des internen Verstärkers des Oszilloskops, die vom Hersteller mit 2 % (0,02) angegeben wird, welche allerdings mit der Temperatur um $\pm 0,14 \text{ \%}/\text{C}^\circ$ für Temperaturen außerhalb $18 \text{ C}^\circ - 28 \text{ C}^\circ$ schwankt. In der Halle des Versuchsaufbaus (Abbildung 4.8) sank die Temperatur teilweise bis 12 C° ab, weshalb standardmäßig mit einem Wert von 3 % Abweichung gerechnet wurde. Dieser Wert geht linear in die Fehlerfortpflanzung ein und wird im Folgenden mit ΔU_{sys} bezeichnet. Der Wert von 0,05 div ist der Fehler, der durch die Diskretisierung des Analog-Digital-Wandlers (ADC) des Oszilloskops entsteht. Er wird in der Fehlerfortpflanzung der Summation quadratisch behandelt, da sich die Diskretisierungsfehler bei der betrachteten Anzahl der Werte gegenseitig aufheben können. Er wird im folgenden mit ΔU_{diskr} bezeichnet. Damit ergibt sich ein Fehler von

$$u_{\bar{U}}(t_k) = \sigma_{\bar{U}}(t_k) + \Delta U_{sys}(t_k) + \Delta U_{diskr}(t_k) \quad (5.17)$$

für jeden Messwert eines Signals. Abbildung 5.7 zeigt das Antennensignal, in welches die Fehler eingetragen wurden. Dort wurden $\Delta U_{sys}(t_k)$ und $\Delta U_{diskr}(t_k)$ gemeinsam als systematischer Fehler eingetragen.

Um unnötige zusätzliche Abweichungen zu vermeiden, wurde das Oszilloskop an jedem Messtag vor Beginn der Messungen neu kalibriert. Nachträglich wurden die Signale auf einen Offset-Wert überprüft, welcher anschließend zu Null gesetzt wird, damit keine Abweichungen in der Energieberechnung entstehen. Dies ist dadurch zu begründen, da

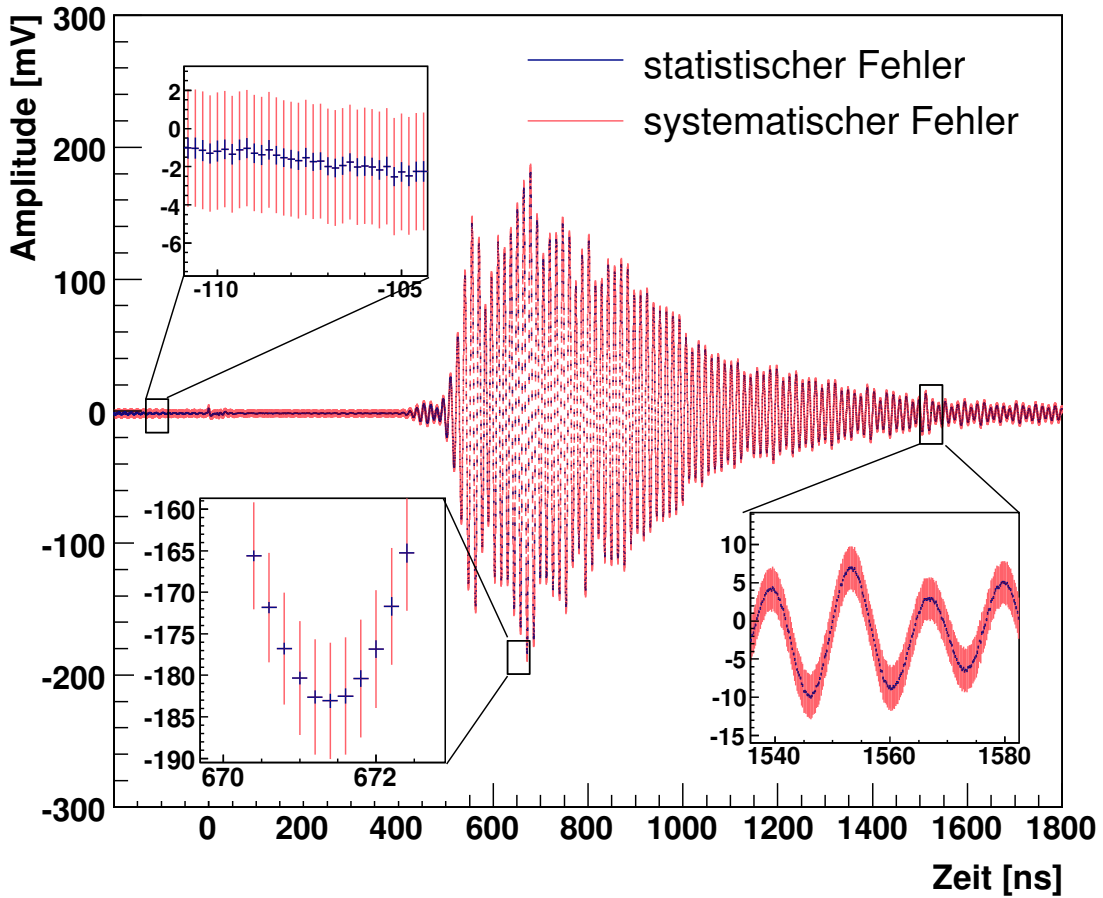


Abbildung 5.7: Messfehler für den Messwert einer Störung. Zur besseren Übersicht sind verschiedene Stellen vergrößert dargestellt.

nur Wechselspannungen betrachtet werden. Für alle weiteren Rechnungen wurde der statistische Fehler einer Gaußschen Fehlerfortpflanzung unterzogen, was sich auf die Berechnung der Energie wie folgt auswirkt:

$$\Delta E_{ges,stat} = T_{ges} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^{10000} \left[\left(\frac{2\bar{U}(t_k)}{R} \right)^2 (\sigma_{\bar{U}}(t_k))^2 \right]}, \quad (5.18)$$

Der Fehler des Verhältnisses der Energien² errechnet sich dann über

$$\Delta V_{Leist,Red,stat} = \frac{1}{\bar{E}_{Red}} \sqrt{(\Delta \bar{E}_{StMW,stat})^2 + \frac{\bar{E}_{StMW,stat}^2}{\bar{E}_{Red,stat}^2} (\Delta \bar{E}_{Red,stat})^2} \quad (5.19)$$

Wird $\sigma_{\bar{U}}(t_k)$ in Gleichung 5.18 durch ΔU_{diskr} ersetzt, so erhält man den Diskretisierungsfehler.

Da sich die systematischen Fehler gegenseitig aufaddieren können, werden diese linear addiert. Damit ergibt sich

²Der Index „ges“ ist im Folgenden für den Mittelwert der Störsignale mit Index „StMW“ und für das reduzierte Störsignal mit Index „Red“ zu ersetzen.

$$\Delta E_{ges,sys} = T_{ges} \cdot \sum_{k=1}^{10000} \frac{|2\bar{U}(t_k)|}{R} \Delta U_{sys}(t_k) \quad (5.20)$$

Die Unsicherheit des Widerstandes ist laut Herstellerangabe vernachlässigbar klein. Zur Berechnung des Fehlers des Verhältnisses ergibt sich

$$\Delta V_{Red,sys} = \frac{1}{\bar{E}_{ges,Red}} \Delta E_{sys,StMW} + \frac{\bar{E}_{ges,StMW}}{\bar{E}_{ges,Red}^2} \Delta E_{sys,Red} \quad . \quad (5.21)$$

Der Fehler der Reduktion des Prozentwertes ist

$$\Delta V_{Red,Proz,sys} = \frac{1}{V_{Energie,Red}^2} \cdot \Delta V_{Red,Proz,sys} \quad , \quad (5.22)$$

wobei diese Gleichung auch für den statistischen Fehler $\Delta V_{Red,Proz,stat}$ und den Diskretisierungsfehler $\Delta V_{Red,Proz,diskr}$ gilt.

Weitere Fehler, die durch Reflexionen der elektromagnetischen Strahlung an den Wänden verursacht werden können, werden in den nächsten Abschnitten behandelt. Zusätzlich sind temperaturabhängige Schwankungen der Signalstärke durch die Elektronikkomponenten zu beachten. Diese können jedoch vernachlässigt werden, da die Messung des reduzierten Störsignals immer zwischen den Messungen des reinen Störsignals ohne Reduktionsmaßnahmen erfolgte. Deshalb kann für die Dauer dieser Messungen die Temperaturschwankung der Elektronik vernachlässigt werden.

5.3 Einflüsse auf die Messergebnisse

Um eine klare Aussage über die Reduktion des Störsignals machen zu können, müssen mögliche Einflüsse, wie beispielsweise Reflexionen an Metall, ausgeschlossen werden. Dazu gehören:

- elektromagnetische Störungen durch den Elektromotor des Krans aus Abbildung 4.8
- Reflexionen an metallischen Gegenständen in der Halle
- Phasenverschiebungen im gemessenen Signal durch das Messsystem
- Polarisation des Störsignals durch den Detektor
- Einfluss der geometrischen Anordnung der Signal-, HV- und Netzkabel auf dem Boden in der Halle
- eine elektromagnetische Störung durch den Laser
- Einfluss der geometrischen Anordnung der Signal- und HV-Kabel auf der Detektoroberfläche

Sie sind in den nächsten Abschnitten beschrieben.

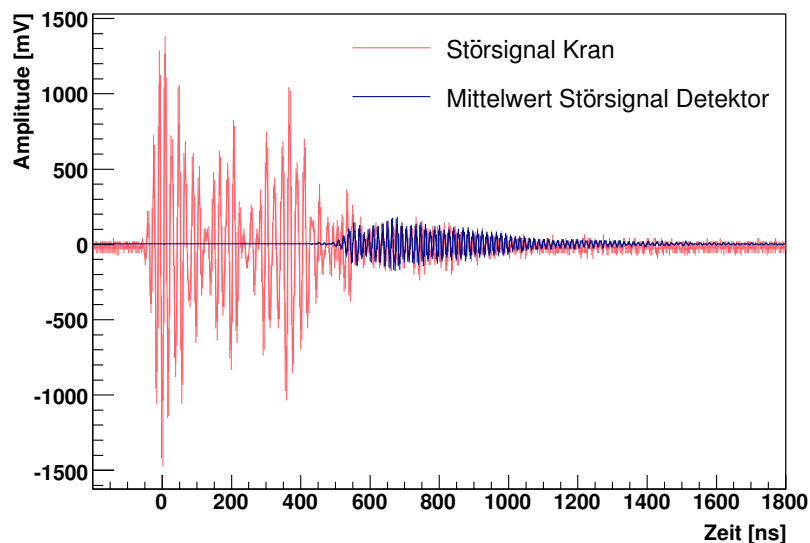


Abbildung 5.8: Vergleich der elektromagnetischen Störung des Krans mit der des Detektors. Das Signal des Krans beginnt früher, weil in diesem Fall auf das Signal des Krans getriggert wurde.

Elektromotor des Krans

Der Elektromotor des Krans, welcher in Abbildung 4.8 am rechten oberen Bildrand zu erkennen ist, verursacht eine starke elektromagnetische Störung. Diese ist in Abbildung 5.8 im Vergleich zum Störsignal des Detektors aus Abbildung 5.1, die im Abstand von 2 m gemessen wurde, dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Störung des Krans die des Detektors deutlich überwiegt. Die Störung wirkt sich so stark aus, weil die Antenne aufgrund ihrer Richtcharakteristik, die in Abbildung 3.4 dargestellt ist, nach oben deutlich sensitiver als zu den Seiten ist, wo der Detektor steht. Aufgrund dieser Störung wurde nur an Tagen gemessen, an welchen der Kran nicht in Betrieb war, um Verfälschungen der Messungen zu vermeiden. Weitere elektromagnetische Störungen in der Größenordnung des Störsignals des Detektors sind nur sehr vereinzelt beobachtet (ca. 2-3 mal pro Woche) worden. Messergebnisse, die durch solche Störungen verfälscht wurden, konnten durch das in Abschnitt 5.1 beschriebene Messschema erkannt und wiederholt werden.

Reflexionen

Da sich die Wände und die Metallzäune in der Halle in Gebäude 601 des Forschungszentrums Karlsruhe in der Nähe des Detektors und der Antenne befinden, ist die Freifeldbedingung nicht erfüllt (siehe auch Abschnitt 4.1). Damit können Reflexionen von elektromagnetischen Wellen an diesen nicht ausgeschlossen werden. Daraus ergeben sich Überlagerungen und Interferenzen, die nicht zu kontrollieren sind. Da während der Messungen die Position der Wände und Metallzäune nicht verändert und nur Verhältnisse betrachtet wurden, kann der Einfluss durch diese als gering eingeschätzt werden.

Als zusätzlicher Reflektionspunkt kommt der Kran hinzu, der durch die ganze Länge der Halle bewegt werden kann. Dieser ist besonders kritisch. Befindet er sich direkt über der Antenne, so kann die Störung des Detektors am Kran in die Antenne reflektiert werden. Da die Antenne aufgrund ihrer Richtcharakteristik nach oben hin sensitiver

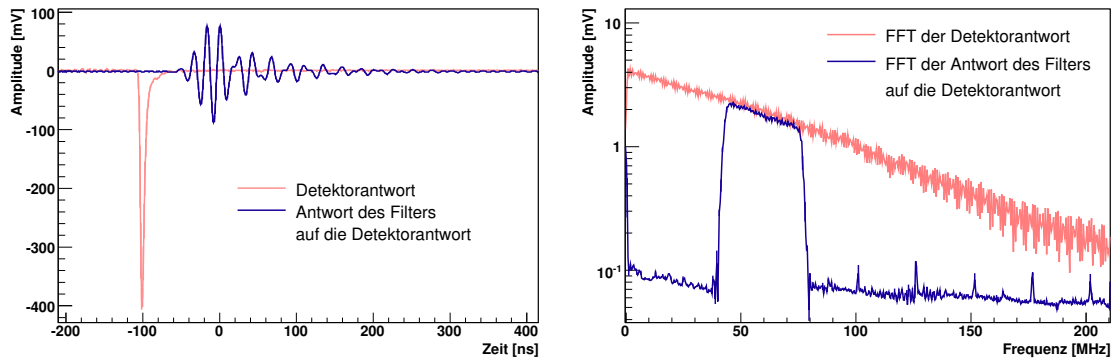


Abbildung 5.9: Links: Antwort des Filters auf einen delta-förmigen Puls, in diesem Fall die Detektorantwort auf einen Laserpuls. Rechts: FFT der beiden Signale.

ist, kann die reflektierte Strahlung stärker sein, als die, welche über die direkte Strecke Detektor-Antenne gemessen wird. Da es aufgrund des logistischen Aufwandes nicht möglich war, für jede Messung den Kran zu verschieben, wenn er direkt über der Antenne stand, ist ein Einfluss des Krans nicht auszuschließen, was sich auch in den Ergebnissen widerspiegelt. Die Ergebnisse, bei denen die Kranposition in der Halle nicht beachtet wird, lassen auf einen Einfluss des Krans schließen, der die Verhältnisse der Energien des reinen Störsignals zum reduzierten Störsignal $V_{Red,Proz}$ um ca. 10 % verändert hat. Dieser Fehler muss bei der Auflistung der Ergebnisse zusätzlich beachtet werden.

Es ist allerdings ein Fall gemessen worden, bei dem ein Unterschied der Verhältnisse, mit derselben Reduktionmaßnahme, etwas größer ist. Bei der ersten Messung stand der Kran direkt über der Antenne. Dabei hat sich ein besonders starkes Störsignal gezeigt. Die Reduktionsmaßnahme zeigte eine Reduktion von 91 % in der Energie. Wurde der Kran ans andere Ende der Halle gefahren, so wurde bei der nächsten Messung ein deutlich reduziertes Signal festgestellt. Die gleiche Reduktionsmaßnahme wie bei der ersten Messung ergab eine Reduktion von nur 67 %. Dies ist allerdings ein Extremfall, der nur einmal gemessen wurde. Er wird als Ausreißer betrachtet und kann auf eine ungewöhnliche Konstellation zurückgeführt werden. Eine mögliche Begründung dazu findet sich in Anhang B.

Phasenverschiebungen des Systems

Das Gesamtsystem, welches sich aus Antenne, Vorverstärker, Signalkabel, Verstärker und Filter zusammensetzt, bewirkt eine Phasenverschiebung des ursprünglichen Störsignals, bevor es von der Antenne aufgefangen wird. Der Filter, welcher Frequenzen außerhalb von 40-80 MHz unterdrückt, bewirkt dabei den größten Einfluss auf die ursprüngliche Phase des Signals. Abbildung 5.9 zeigt einen Puls, der durch den Filter geschickt wird. Es sind die Schwingungen, d.h. die Phasenverschiebung des Signals, zu erkennen. Diese entstehen durch die Unterdrückung der Frequenzen unterhalb von 40 MHz und oberhalb von 80 MHz, sowie frequenzabhängige Gruppenlaufzeiten des Signals. Dies führt zu einer linearen Verzerrung des Pulses im Filter. Im Frequenzraum ist eine Reduktion des Signals außerhalb der genannten Frequenzen des Filters zu erkennen, wobei zwischen 40 und 80 MHz die Energie erhalten bleibt. Die kleine Reduktion der Fouriertransformierten (FFT) der Filterantwort ergibt sich durch das

„fenstern“ (Anhang A) des Zeitsignals vor der Fouriertransformation und eine minimale Dämpfung durch den Filter selbst.

Neben dem Filter bewirken die anderen Komponenten eine zusätzliche Verschiebung der Phase des Signals. Um Rückschlüsse auf das ursprüngliche Signal zu ziehen, müsste eine Phasenkalibration des gesamten Systems durchgeführt werden. Mit dieser könnte eine Entfaltung durchgeführt und daraus das Originalsignal ermittelt werden. Solch eine Kalibration ist jedoch sehr aufwendig und umfangreich. Da diese für das LOPES-Experiment mit seltenen Solar Bursts (siehe Glossar) ermittelt werden, wird bei der Analyse der Messungen keine Entfaltung durchgeführt.

Polarisation

Es besteht die Möglichkeit, dass die elektromagnetische Störung des Detektors in einer Polarisationsrichtung stärker ist als in einer anderen. Um dies zu überprüfen, wurde die Antenne um 45° und um 90° gedreht. Die Messungen ergaben, dass die Störung in beiden Polarisationsrichtungen bis auf einen Unterschied von ca. 25% die selbe Stärke hat. Zusätzlich wurde die Reduktion der Störung in beiden Polarisierungen gemessen, welches in beiden Polarisationsrichtungen reduziert werden konnte (siehe auch Anhang E).

Einfluss der Anordnung der Signal-, HV- und Netzkabel auf dem Boden in der Halle

Bei den ersten Messungen hat sich gezeigt, dass eine Verlegung oder Verschiebung der Signal- und HV-Kabel des Detektors, sowie des Netzkabels des Lasers, einen entscheidenden Einfluss auf die Messergebnisse haben. Um den Ergebnissen eine möglichst hohe Konsistenz zu geben, wurden die Positionen der Signal- und HV-Kabel bei unterschiedlichen Abständen von Detektor - Antenne mit Photos dokumentiert. Auf Basis dieser Bilder konnte die Kabel nach einer Verschiebung des Detektors wieder repositioniert werden.

Störung durch den Laser

Bei einer möglichen Störung durch den Laser im Versuchsaufbau muss zwischen einer gleichmäßigen und einer temporären Störung unterschieden werden. Als gleichmäßige Störung wird eine Störung bezeichnet, die zu allen Zeiten zu sehen ist, wenn der Laser mit Strom versorgt ist. Messungen des Untergrundes haben gezeigt, dass der Untergrund bei Laser mit Strom nur minimal stärker ist, als der Untergrund bei stromlosen Laser. Daher kann die gleichmäßige Störung der Messungen vernachlässigt werden. Um den Detektor in Sättigung zu fahren, wird vom Laser ein Lichtpuls ausgesendet. Dieser wird wenige ns, bevor er den Photomultiplier in Sättigung fährt, erzeugt. Dies lässt eine temporäre Störung durch den Laser vermuten. Um diese Störung zu ermitteln, wurden mehrere Messungen durchgeführt. Allerdings musste dafür der Versuchsaufbau mehrmals modifiziert werden. Aus den Ergebnissen konnte keine Störung durch den Laser erkannt werden.

Einfluss der Anordnung der Kabel auf der Oberfläche des Detektors

Bei den anfänglichen Versuchen, die zur Messung der Störung der Detektoren durchgeführt wurden, hat sich herausgestellt, dass die Anordnung der Signal- und HV-Kabel auf der Oberfläche des Detektorvolumens einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag

zur Stärke des Störsignals liefert. Dies ist dadurch zu erklären, dass der Kabelschirm der Kabel kapazitiv mit dem Stahl des Detektors koppelt. Im Laufe der Messungen hat sich herauskristallisiert, dass je weiter die Kabel vom Detektorvolumen entfernt sind, die Störung zunimmt. Um diesen Einfluss zu beurteilen, wurden Messungen mit unterschiedlichen Anordnungen der Kabel durchgeführt, die in Abschnitt 5.4.4 vorgestellt werden.

5.4 Messergebnisse

Alle Messungen der elektromagnetischen Störung des Detektors wurden im Zeitbereich von $t_k = -200$ ns bis $t_k = 1800$ ns durchgeführt. Um den Fehler zu minimieren wurden nur die Samples von $t_k = +300$ ns bis $t_k = 1800$ ns ausgewertet, da sonst der Beitrag bei der linearen Addition des systematischen Fehlers zu groß wird. Dies wird dadurch begründet, dass das Störsignal, wie in Abbildung 5.3 zu sehen ist, erst bei ca. 400 ns beginnt.

Als Reduktionsmaßnahmen wurden folgende Anwendungen getestet, die jeweils in den Abständen 2-8 m Antenne - Detektor durchgeführt wurden:

- Ferrite an Signal- und HV-Kabeln des Detektors
- Kupferband zur Erdung der Signal- und HV-Kabel des Detektors
- Erdung der Kabel mit Verbindungskabel zur Detektormasse
- Anordnung der Kabel, die eine geringere Störung zur Folge haben
- Installation eines neuen Detektordeckels zur Erdung der Kabel
- Abschirmung möglicher Emissionsstellen von Störstrahlung mit Kupferband. Darunter sind Stellen zu verstehen, wo das Gehäuse des Detektors aus nicht metallischem Material besteht.

Zur Orientierung dient die in Abbildung 5.10 dargestellte Beschreibung der Orte, an welchen Reduktionsmaßnahmen am Detektor installiert wurden.

5.4.1 Ferritmessungen

Für diese Messungen wurden die Kabel so auf der Oberfläche des Detektorvolumens angeordnet, dass die Störung durch den Detektor möglichst maximal wird. Diese Anordnung wurde einmal erstellt und bis zu den Messungen in Abschnitt 5.4.4 beibehalten (Abbildung 5.11). Die verwendeten Ferrite wurden vor den Messungen zur Reduktion der Störung auf ihre Eignung im Bereich von 40-80 MHz untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass diese sich sehr gut dafür eignen. Um die Quelle der elektromagnetischen Störung zu finden, wurde als erstes jeweils ein Ferrit an den in Abbildung 5.10 dargestellten Stellen installiert. Es zeigte sich, dass die Störung hauptsächlich vom Kabelschirm des Anodensignalkabels und teilweise von den anderen beiden Kabelschirmen emittiert wird. Dies kann dadurch erklärt werden, dass eine hochfrequente Störung auf dem Schirm des Koaxialkabels aus dem Photomultiplier herausläuft. Der Schirm wirkt wie eine Antenne, die an einem Ende gespeist wird, auch Wanderwellenantenne genannt [Kar04].

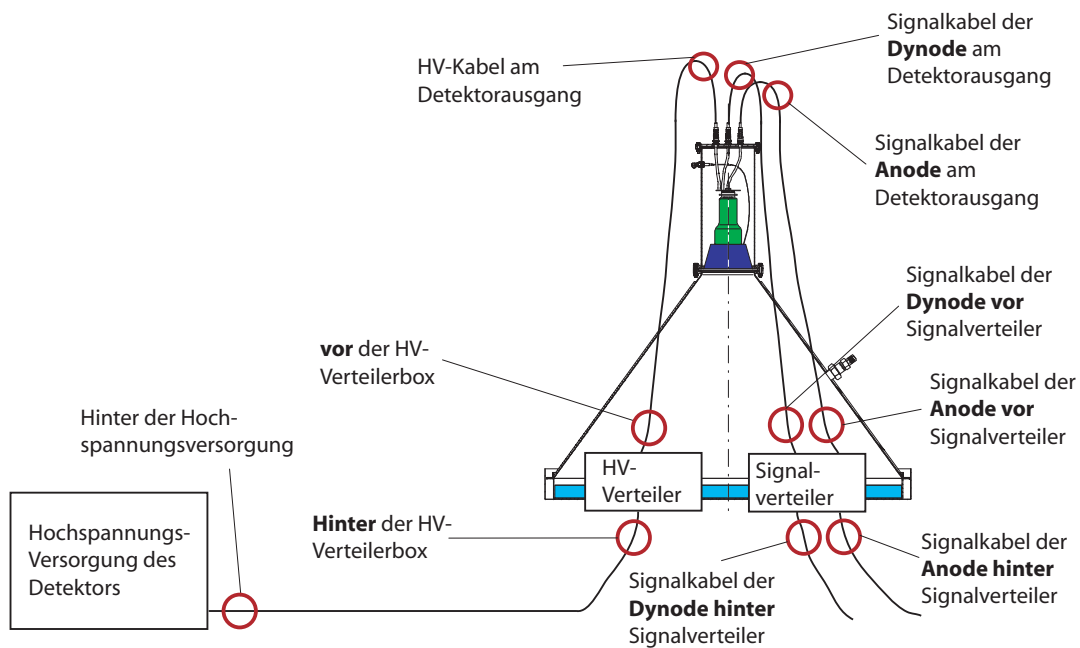


Abbildung 5.10: Beschreibung der Installation für Reduktionsmaßnahmen am Detektor.

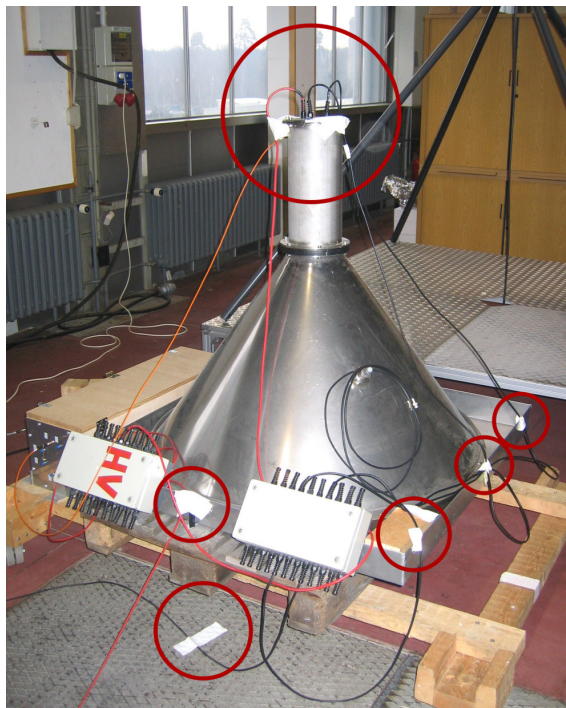


Abbildung 5.11: Fixierung der Kabel auf der Detektoroberfläche, so dass die Störung möglichst maximal wird.

Hat ein Ferrit die Störung erfolgreich reduziert, so wurde an der selben Stelle ein zweiter installiert. Hat dieser die Störung noch weiter reduziert, wurde ein dritter installiert usw. Abhängig von den Installationsorten, wo die Ferrite die größte Reduktion brachten, wurden Kombinationen getestet. Um eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse in Einklang mit den bereits erwähnten Einflüssen zu erhalten, wurden zwei Messreihen durchgeführt. Zuerst wurde die Messreihe „Red. 1“ (Reduktion der elektromagnetischen Störung in Messreihe 1) durchgeführt. Dabei hat sich die Position des Krans nicht verändert. Ebenso wurde am Versuchsaufbau nichts geändert, d. h. der Detektor wurde nicht verschoben und die Anordnung der Kabel auf der Oberfläche des Detektors wurde nicht verändert. Das reine Störsignal des Detektors hat sich in dieser Zeit kaum verändert, so dass ein Vergleich der Messungen zueinander möglich ist. Dies bedeutet, die erste Messung kann mit der zweiten verglichen werden, die zweite mit der dritten usw. Um die Ergebnisse zu reproduzieren, wurde eine zweite Messreihe („Red. 2“) durchgeführt, bei welcher dieselben Voraussetzungen galten, wie bei der ersten Messreihe. Auch können die Ergebnisse auf dieselbe Weise ausgewertet werden. Mit diesem Ergebnis ergibt sich, dass die Störung durch den Detektor mit den angegebenen Ferritkonstellationen konsistent reduzieren lässt.

Die wichtigsten Ergebnisse zur Reduktion der elektromagnetischen Störung sind in den Tabellen 5.2 und 5.3 dargestellt. Um eine umständliche und lange Beschreibung der Installationsorte der Ferrite zu vermeiden, wurde eine Abkürzungskonvention definiert (Tabelle 5.1), die auch für die nachfolgenden Tabellen gilt. Der Übersichtlichkeit halber sind nur die Werte für Messungen in 2 m und 8 m aufgeführt. Der angegebene Fehler entspricht dem systematischen Fehler, der durch die Unsicherheit $\Delta V_{Red,Proz,sys}$ im Oszilloskop entsteht. Der Diskretisierungsfehler und der statistische Fehler sind stets ein und mehr Größenordnungen kleiner, weshalb sie nicht aufgeführt werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit einem Ferrit auf dem Signalkabel der Anode am Detektorausgang eine sehr gute Reduktion erzielt wird. Der zweite Ferrit auf dem Signalkabel der Anode am Detektorausgang bringt zwar keine große Reduktion in der Energie, jedoch in der maximalen Amplitude, wie in Abbildung 5.12 gezeigt. In der Fouriertransformierten (Abbildung 5.13) der gezeigten Signale ist dieser Unterschied jedoch fast nicht zu erkennen.

Die Ferritkonstellation, die im zweitletzten Punkt in den Tabellen 5.2 und 5.3 aufgeführt sind, reduziert das Störsignal nahezu genauso, wie diejenige, welche in den Niederlanden eine gute Reduktion erzielte, obwohl zwei Ferrite weniger zum Einsatz kommen. Zum Vergleich mit den Messungen im nächsten Abschnitt ist zusätzlich die Reduktion mit Hilfe des Kupferbandes angegeben, mit der ungefähr die gleiche Reduktion erzielt werden kann, wie mit den beiden Ferritkonstellationen, die zuletzt genannt sind. Werden benachbarte Ergebnisse verglichen, so ergibt sich im Rahmen der Messungenauigkeit ein gleichmäßiger Abstand von einer Ferritkonstellation zur nächsten. Der große Unterschied der Messungen bei 2 m und 8 m kommt wahrscheinlich dadurch zustande, dass sich der Detektor in einem Abstand von 2 m im Nahfeld der Antenne befindet und die Störung sich dort anders auswirkt als im Fernfeld, welches bei 8 m Entfernung fast erreicht ist. Auch kommen ist es möglich, dass bei 2 m Abstand mehrere Koppelmechanismen gleichzeitig zur Störung beitragen, während bei 8 m Abstand die Strahlungskopplung dominiert. Dennoch lässt sich das Störsignal bei 8 m selbst mit drei Ferriten (Abbildung 5.14) um bis zu 70-80 % reduzieren, während zusätzliche Ferrite (Abbildung 5.15) nur eine weitere Verbesserung um 10 % bringen. In der Fouriertransformierten tritt in allen Frequenzbereichen nahezu gleichmäßige Redukti-

Abkürzung	Beschreibung des Installationsortes
An	Signalkabel der A node am Detektorausgang
Dy	Signalkabel der D yode am Detektorausgang
HV	HV -Kabel am Detektorausgang
HVh	HV -Kabel h inter der HV-Verteilerbox
Anv	Signalkabel der A node v or Signalverteilerbox
Dyv	Signalkabel der D yode v or Signalverteilerbox
NL	Ferrite wurden so installiert, wie sie bei den Messungen in den Niederlanden die beste Reduktion lieferten (Kap. 3)
Kupf.bd.	Kupferband

Tabelle 5.1: Abkürzungskonvention zur Beschreibung der Intallationsorte von Ferriten am Detektor (siehe Abbildung 5.10)

Ferritinstallation	Red. 1 [%]	Red. 2 [%]
1 × An	94,5 ± 0,7	95,2 ± 0,6
2 × An	95,3 ± 0,6	95,5 ± 0,5
1 × An, 1 × Dy	95,3 ± 0,6	97,4 ± 0,3
2 × An, 1 × Dy	97,5 ± 0,3	98,1 ± 0,2
2 × An, 1 × Dy, 1 × HV	98,2 ± 0,2	98,2 ± 0,2
2 × An, 1 × Dy, 1 × HV, 1 × HVh, 1 × Anv, 1 × Dyv	98,5 ± 0,2	98,9 ± 0,1
NL	98,6 ± 0,2	98,5 ± 0,2
Kupf.bd. An, Dy, HV	98,6 ± 0,2	99,4 ± 0,1

Tabelle 5.2: Reduktion durch Ferrite bei 2 m Abstand Detektor - Antenne. Bereits mit einem Ferrit (1×An) kann das Störsignal sehr gut abgeschwächt werden. Weitere Ferrite erreichen eine weitere Reduktion. Durch das Kupferband kann die Störung genauso reduziert werden, wie mit den beiden zuletzt aufgeführten Ferritkombinationen.

Ferritinstallation	Red. 1 [%]	Red. 2 [%]
1 × An	53,2 ± 5,6	59,7 ± 4,8
2 × An	59,7 ± 4,8	63,6 ± 4,4
1 × An, 1 × Dy	64,4 ± 4,3	73,9 ± 3,1
2 × An, 1 × Dy	70,7 ± 3,5	80,3 ± 2,4
2 × An, 1 × Dy, 1 × HV	77,1 ± 2,7	83,1 ± 2,0
2 × An, 1 × Dy, 1 × HV, 1 × HVh, 1 × Anv, 1 × Dyv	82,1 ± 2,1	88,2 ± 1,4
NL	86,0 ± 1,7	90,0 ± 1,2
Kupf.bd. An, Dy, HV	83,6 ± 2,0	88,5 ± 1,4

Tabelle 5.3: Reduktion durch Ferrite bei 8 m Abstand Detektor - Antenne. Auch hier gilt, dass bereits mit einem Ferrit das Störsignal reduziert werden kann, allerdings nur zur Hälfte. Die zusätzlichen Ferrite scheinen aber eine bessere Reduktion als bei 2 m zu liefern (Erklärung siehe Text).

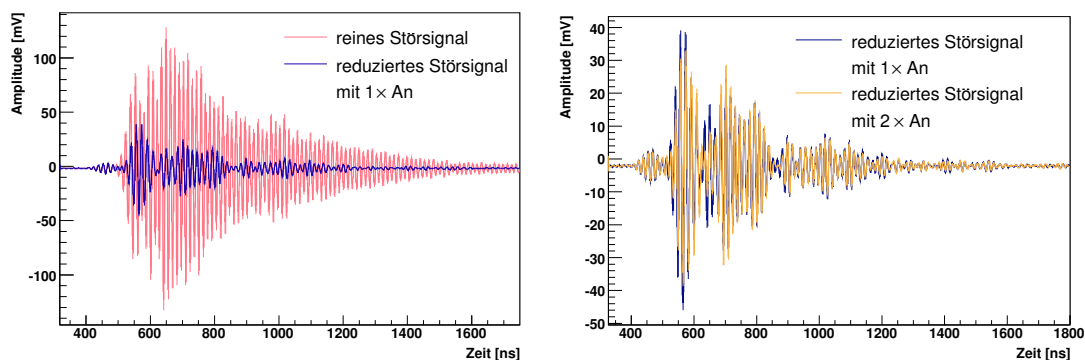


Abbildung 5.12: Links: Vergleich reines Störsignal bei 2 m Abstand und mit einem Ferrit auf dem Anodenkabel am Detektorausgang (Red. 94,5 %). Rechts: Vergleich des reduzierten Signal mit einem und zwei Ferriten auf dem Anodenkabel am Detektorausgang mit einer anderen Skalierung. Bei dem zweiten Ferrit (Red.95,3 %) wird zwar nicht die Energie stark abgeschwächt, dafür aber die maximale Amplitude.

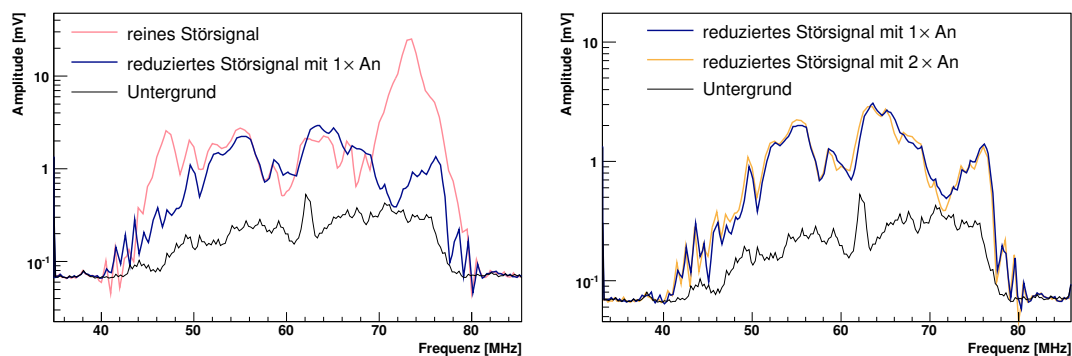


Abbildung 5.13: Fouriertransformierte der Signale aus Abbildung 5.12 in logarithmischer Darstellung. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Hauptanteil des Störsignals im Bereich von 75 MHz zu finden ist. Dieser kann durch die Installation eines Ferrits deutlich reduziert werden (links). Allerdings ist durch den zweiten Ferrit keine weitere Reduktion der Störung zu sehen (rechts).

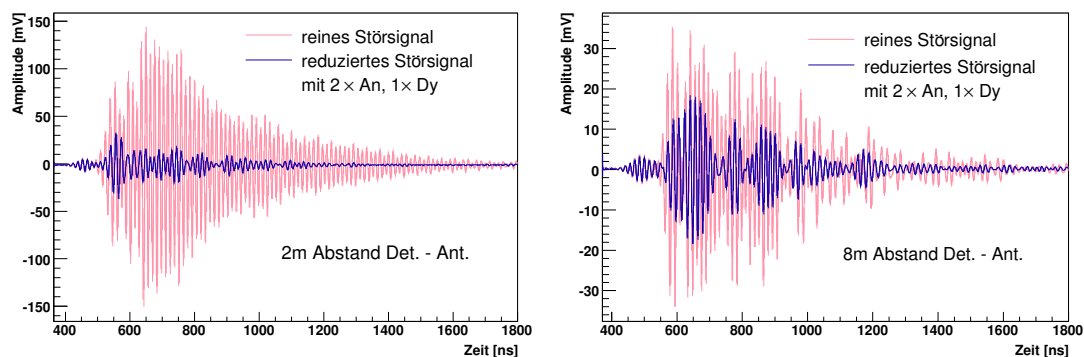


Abbildung 5.14: Vergleich des reinen Störsignals und dem mit drei Ferriten (2 An, 1 Dy) bei 2 m (links, 97,5 % und 8 m (rechts, 70,7 %) Abstand Antenne Detektor. Bei 2 m ist eine deutlichere Reduktion zu erkennen als bei 8 m (Begründung: siehe Text). Auch ist die absolute Stärke des Störsignals bei 8 m viel kleiner als bei 2 m.

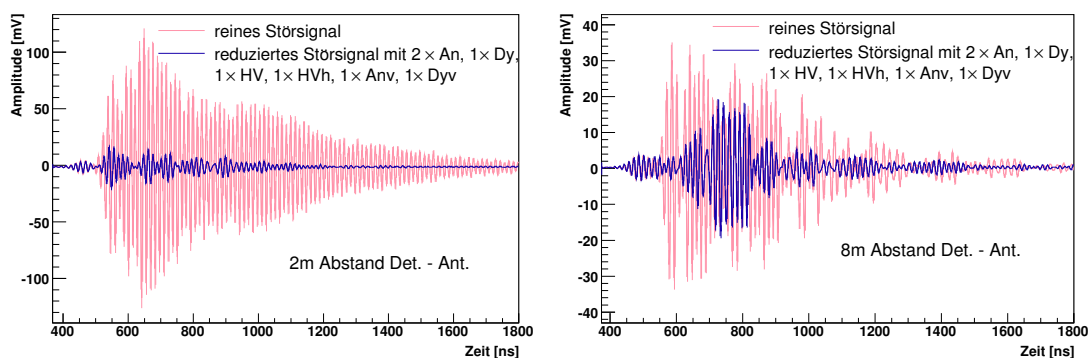


Abbildung 5.15: Vergleich des reinen Störsignals und dem mit sieben Ferriten (2 An, 1 Dy, 1 HV, 1 HVh, 1 Anv, 1 Dyv) bei 2 m (links, 95,5 % und 8 m (rechts, 82,1 %) Abstand Antenne Detektor. Mit dieser Ferritinstitution kann das Signal bei beiden Abständen im Vergleich zu Abbildung 5.14 sowohl in der Energie als auch in der Amplitude noch weiter reduziert werden.

on auf. Sie werden der Übersichtlichkeit halber bei den beiden letztgenannten und den folgenden Abbildungen nicht gezeigt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit den Ferriten eine Reduktion der Störung erreicht werden kann. Diese kann jedoch nicht vollständig eliminiert werden. Je mehr Ferrite installiert werden, desto größer ist auch die Reduktion. Jedoch kann durch eine geeignete Kombination der Effekt weiter vergrößert werden.

5.4.2 Erdung mit Kupferband

Zur Erdung mit Hilfe des Kupferbandes wurden die Kabelschirme am Ausgang des Detektors an einer Stelle abisoliert. Das selbstklebende Kupferband wurde um die Signal- und HV-Kabel gewickelt, so dass sie mit dem Schirm eine leitende Verbindung eingingen. Um eine Verbindung mit der Detektormasse herzustellen, ist das Kupferband schließlich auf den Detektordeckel geklebt worden (siehe auch Abbildung 3.9). Es wurden zuerst jeweils ein Kupferband an einem Kabel installiert, um eine Reduktion zu testen. Dies ist für die beiden Signalkabel und das HV-Kabel durchgeführt worden. Danach wurden alle drei Kabel mit Kupferband ausgestattet. Die Ergebnisse sind nur für Abstände von 2 m in Tabelle 5.4 aufgeführt. Die Messungen mit einem Kupferband wurden nur auf 2 m durchgeführt, da bereits hier kaum eine Reduktion der Störung zu erkennen war. Damit die Ergebnisse mit einander verglichen werden können wurden wiederum zwei Messreihen durchgeführt. Wird das Kupferband jedoch an allen drei Kabeln befestigt, so kann eine sehr gute Reduktion nachgewiesen werden (Tabellen 5.5, 5.6 und Abbildung 5.16), die eine mit der Reduktion durch die Ferrite durchaus vergleichbar ist.

Als letztes ist in Tabelle 5.4 eine Messung aufgeführt, bei der das Kupferband an einem oder mehreren Kabelschirmen nicht richtig klebt, so dass nur ein Teil der Störung reduziert wird. Dies kann beispielsweise am KASCADE-Experiment passieren, wenn sich der Klebstoff durch die dort herrschende Feuchtigkeits- und Temperaturunterschiede löst.

Die Installation zusätzlicher Ferrite zum Kupferband bringt keine weitere Reduktion, eher eine Verschlechterung (negative Werte). In den Tabellen 5.5 und 5.6 ist ein

Kupferband	Red. 1 [%]	Red. 2 [%]
An	$4,9 \pm 11,4$	$-11,6 \pm 13,4$
Dy	$26,8 \pm 8,8$	$18,6 \pm 9,8$
HV	$22,9 \pm 9,2$	$5,3 \pm 11,4$
An, Dy, HV	$98,6 \pm 1,7$	$99,4 \pm 0,1$
An, Dy, HV unsachgemäß		$42,2 \pm 6,9$

Tabelle 5.4: Reduktion durch Kupferband bei 2 m Abstand Detektor - Antenne. Kupferband an nur einem Kabel bewirkt so gut wie keine Reduktion der Störung. Nur, wenn es an allen drei befestigt ist, kann sie reduziert werden. Eine „unsachgemäße“ Installation kann die Störung allerdings wieder verstärken.

Kupferband + Ferrite	Red. 1 [%]	Red. 2 [%]
Kupf.bd., 1 × An, 1 × Dy	$-8,4 \pm 13,0$	$-11,0 \pm 13,3$
Kupf.bd., 2 × An, 1 × Dy, 1 × HV, 1 × HVh, 1 × Anv, 1 × Dyv	$-10,6 \pm 13,3$	$9,6 \pm 10,8$

Tabelle 5.5: Direkter Vergleich, Kupferband gegen Kupferband + Ferrite bei 2 m Abstand Detektor - Antenne. Der Vergleich zeigt, dass durch zusätzliche Ferrite keine weitere Reduktion der Störung erreicht werden kann.

Kupferband + Ferrite	Red. 1 [%]	Red. 2 [%]
Kupf.bd., 1 × An, 1 × Dy	$-1,9 \pm 12,2$	$5,8 \pm 11,3$
Kupf.bd., 2 × An, 1 × Dy, 1 × HV, 1 × HVh, 1 × Anv, 1 × Dyv	$2,5 \pm 11,7$	$0,4 \pm 11,9$

Tabelle 5.6: Direkter Vergleich, Kupferband gegen Kupferband + Ferrite bei 8 m Abstand Detektor - Antenne. Auch hier kann keine weitere Reduktion der Störung durch zusätzliche Ferrite festgestellt werden.

direkter Vergleich dargestellt, der durch Messung des Störsignals mit Kupferband und anschließender zusätzlicher Installation von Ferriten erreicht wurde.

5.4.3 Erdung mit Kabeln

In diesem Fall sind an die abisolierten Stellen des HV- und der Signalkabel kurze Kupferkabel von ca. 10 cm Länge angelötet worden. Die anderen Enden wurden am Deckel des Detektors befestigt. Dazu wurden Messungen durchgeführt, die eine gute Reduktion der Störung versprochen. Allerdings konnte das Störsignal mit dieser Maßnahme nur um ca. 65 % reduziert werden. Dies ist weniger als mit der Reduktion durch Ferriten oder Kupferband erreicht werden kann.

Bei der Überprüfung der Ergebnisse ist jedoch die Isolation eines Signalkabels zwischen Schirm und Innenleiter beim Lötvorgang durch die Hitze geschmolzen. Dies ergab einen Kurzschluss zwischen Schirm und Innenleiter. Deshalb werden die Resultate hier nicht aufgeführt, da wegen des Risikos des erneuten Schmelzen keine Reproduktions-

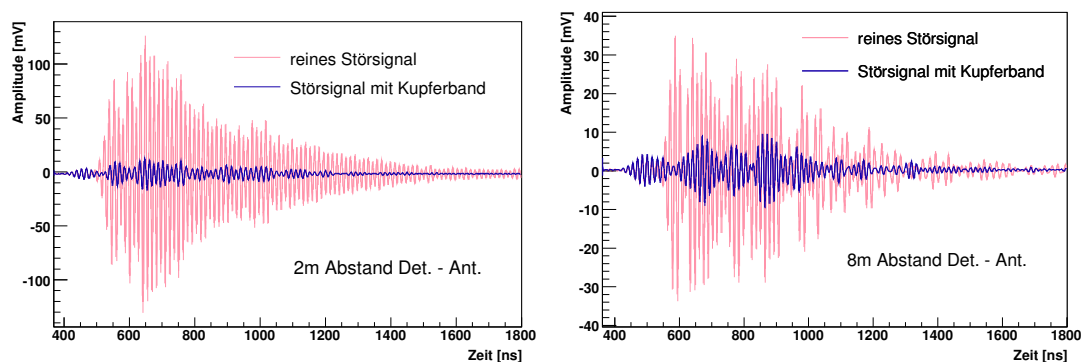


Abbildung 5.16: Vergleich des Störsignals mit dem reduzierten Störsignal bei 2 m (links, 98,6 %) und 8 m Abstand (rechts, 92,1 %) Detektor - Antenne. Das Kupferband reduziert das Störsignal sowohl in der Amplitude, als auch in der Energie. Bei 8 m Abstand ist die Reduktion jedoch nicht so stark wie bei 2 m Abstand.

messungen mehr durchgeführt wurden. Da die Gefahr besteht, dass die Isolation der Signal- oder HV-Kabel beim KASCADE-Experiment ebenfalls schmilzt, ist diese Lösung zur großflächigen Reduktion der Störung unpraktikabel und gefährdet obendrein den Messbetrieb.

5.4.4 Anordnung der Kabel zur weiteren Reduktion der Störung

Um eine zusätzliche Reduktion der Störung zu erreichen, wurden die Kabel auf unterschiedliche Weise empirisch auf der Oberfläche des Detektorkörpers, was im Folgenden als Kabelkonfiguration bezeichnet wird, angeordnet. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Kabelkonfigurationen zum Einen praktikabel am KASCADE-Experiment und zum Anderen einfach zu realisieren ist. Mit Photos wurden die gemessenen Kabelkonfiguration dokumentiert, um eine Repositionierung zu ermöglichen (beispielsweise Abbildung 5.11). 22 verschiedene Kabelkonfigurationen wurden getestet. Der Großteil der Messungen wurde wegen des großen Zeitaufwandes nur auf 2 m Abstand durchgeführt und nur die wichtigsten bei 8 m Abstand wiederholt. Wie in Abschnitt 5.4.1 wurde eine Messreihe durchgeführt, bei der eine Messung mit ihrer darauffolgenden verglichen werden kann. Nachdem die 22 Kabelkonfigurationen gemessen wurden, wurde eine zweite Messreihe durchgeführt, wobei versucht wurde, die Kabel mit Hilfe der Bilder wieder so zu positionieren, wie sie in Messreihe 1 positioniert waren. Ließ sich das Störsignal des Detektors bei einer bestimmten Kabelkonfiguration in Messreihe 2 im Vergleich zum Störsignal in Messreihe 1 vergleichen und zusätzlich zu den Messungen in Abschnitt 5.4.1 reduzieren, so wurde diese Kabelposition auch auf 8 m gemessen. Für Messreihe 1 und Messreihe 2 gilt, dass sich die Position des Krans und des Detektors nicht verändert hat, so dass davon keine zusätzlichen Einflüsse auf die Messergebnisse zu erwarten sind. Bei 2 m Abstand stellten sich 8 Kabelkonfigurationen heraus, die reproduzierbar ein reduziertes Störsignal lieferten. Diese 8 Konfigurationen wurden erneut auf 8 m gemessen. Dabei stellte sich heraus, dass bei dieser Entfernung nur eine (Abbildung D.1) von den 8 Kabelkonfigurationen reproduzierbar das selbe Störsignal lieferte, was durch mehrfache Messung bestätigt wurde. Um eine weitere Reduktion der Störung zu erreichen, wurden zusätzlich Ferrite installiert.

Vergleichsmessung	Ferritinstallation	Red. 1 [%]	Red. 2 [%]
schwächste	-	96,5 ± 0,4	94,1 ± 0,7
schwächste	2 × An, 1 × Dy	98,7 ± 0,2	98,8 ± 0,1
letzte	-	97,6 ± 0,3	95,9 ± 0,5
letzte	2 × An, 1 × Dy	99,1 ± 0,1	99,1 ± 0,1

Tabelle 5.7: Vergleich der neuen Kabelkonfiguration mit der aus Abschnitt 5.4.1 bei 2 m Abstand Antenne - Detektor. Dabei wurde die letzte Messung der Störung ohne Ferrite und die schwächste aus Messreihe 2 in Tabelle 5.2 als Referenzwert genommen. Die neue Kabelkonfiguration bewirkt eine Reduktion, die mit der aus genannter Tabelle vergleichbar ist.

Vergleichsmessung	Ferritinstallation	Red. 1 [%]	Red. 2 [%]
schwächste = letzte	-	87,5 ± 1,5	85,1 ± 1,8
schwächste = letzte	2 × An, 1 × Dy	78,3 ± 2,6	76,0 ± 2,9

Tabelle 5.8: Vergleich der neuen Kabelkonfiguration mit der aus Abschnitt 5.4.1 bei 8 m Abstand Antenne - Detektor. Auch hier wurden als Referenz die Messwerte aus Messreihe 2 von Tabelle 5.2 herangezogen. Eine Begründung für die Verringerung der Reduktion mit Ferriten findet sich im Text.

Ein Vergleich mit der Kabelkonfiguration, die in Abschnitt 5.4.1 gemessen wurde, kann nur bedingt gemacht werden, da bei den Messungen der 22 verschiedenen Kabelkonfigurationen einige Tage vergingen und der Detektor in dieser Zeit zwischen 2 m und 8 m Abstand von der Antenne verändert wurden. Auch kann die Störung der Kabelkonfiguration aus Abschnitt 5.4.1 nicht reproduziert werden, da diese empirisch ermittelt wurde und die Störung sich, schon bei Verschiebungen der Kabel um einige Millimeter, verändert. Jedoch haben sich die Umgebungsvariablen, wie z. B. die Position des Krans, nicht verändert³.

Ein bedingter Vergleich konnte durchgeführt werden, indem mit dem Störsignal ohne Ferrite verglichen wird, das in Messreihe 2 in Abschnitt 5.4.1 gemessen wurde (siehe Fußnote). Dafür werden zwei Störsignale als Referenz verwendet. Zum Einen wird mit dem von der Energie her schwächsten Störsignal in der genannten Messreihe verglichen. Zum Anderen wird als Referenz das Störsignal verwendet, das am Ende von Messreihe 2 gemessen wurde. Für die Messungen bei 8 m hat sich herausgestellt, dass das schwächste Störsignal auch das zuletzt gemessene ist.

Der Vergleich ist in den Tabellen 5.7 und 5.8, sowie Abbildung 5.17 dargestellt. Mit den neu angeordneten Kabeln lässt sich das Störsignal bei 8 m um ca. 85 % im Vergleich zu der in Abschnitt 5.4.1 beschriebenen Kabelkonfiguration, reduzieren. Bei der Installation von Ferriten resultiert bei 8 m ein stärkeres Störsignal, als ohne Ferrite. Dies wurde sowohl in Messreihe 1, als auch in Messreihe 2 gemessen. Allerdings ist dies nur bei 8 m der Fall. Bei 2 m lässt sich die Störung noch weiter reduzieren (Abbildung 5.18). Der Unterschied ist nicht eindeutig erklärbar. Dies kann eventuell mit der Wechselwirkung der Ferrite mit den Kabelschirmen zusammen hängen. Da der Kabelschirm als Wanderwellenantenne klassifiziert werden kann, deren Richtcharak-

³Anmerkung: Die Messungen in der Messreihe 2 in Abschnitt 5.4.1 fanden im Zeitraum vom 14.02.2006 - 28.02.2006 statt. Die Messungen in diesem Abschnitt vom 14.02.2006 - 22.03.2006 statt. Im Zeitraum von 01.03.2006 - 22.03.2006 hat sich die Position des Krans nicht verändert.

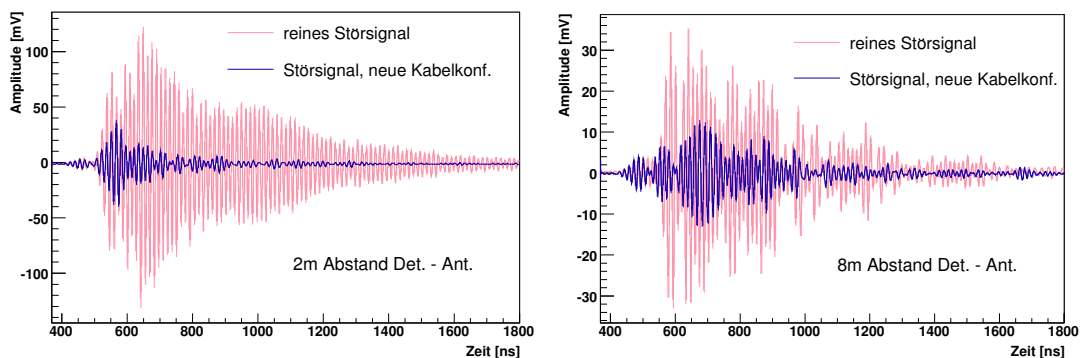


Abbildung 5.17: Vergleich des „letzten“ Störsignals (siehe Text) mit der Kabelkonfiguration aus Abschnitt 5.4.1 mit dem Störsignal der neuen Kabelkonfiguration bei 2 m (links, 96,5 %) und 8 m Abstand (rechts, 87,5 %) Detektor - Antenne. Die Störung bei der neuen Kabelkonfiguration ist sowohl in der Energie als auch in der Amplitude reduziert.

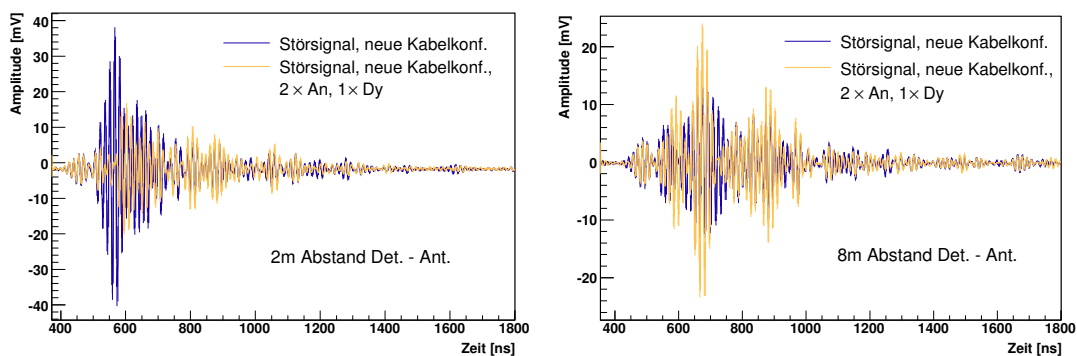


Abbildung 5.18: Vergleich der Störsignale der neuen Kabelkonfiguration bei 2 m (links, 99,1 %) und 8 m Abstand (rechts, 78,3 %) Detektor - Antenne. Bei 2 m lässt ist das Störsignal noch weiter reduziert, was jedoch bei 8 m nicht der Fall ist. Dieser Widerspruch kann eventuell auf Reflexionen in der Halle zurückgeführt werden.

teristik durch die Biegungen der Kabel sehr komplex ist, kann durch die Installation der Ferrite die Richtcharakteristik verändert werden. Dadurch wird die Störung in andere Richtungen abgestrahlt, was zu anderen Reflexionswinkeln an den Wänden und Zäunen führt. Die reflektierten elektromagnetischen Wellen könnten in diesem Falle konstruktiv interferieren, so dass in der Antenne ein stärkeres Störsignal zu sehen ist.

5.4.5 Reduktion durch Installation eines neuen Detektordeckels

Wie sich in den Abschnitten 5.4.1 und 5.4.2 herausgestellt hat, stammt die elektromagnetische Störung der Detektoren von den Kabelschirmen der Signalkabel. Das Kupferband lieferte eine sehr gute Reduktion der Störung, da es wie eine Erdung der Kabelschirme an der Detektormasse wirkte. Diese Wirkung konnte mit einem neuartigen Detektordeckel verbessert werden. Im KASCADE-Experiment sind die Signal- und HV-Kabel direkt an der Elektronik der Photomultiplier der Detektoren befestigt und

Vergleichsmessung	Ferritinstallation	Red. 1 [%]	Red. 2 [%]
schwächste	-	99,4 ± 0,1	99,4 ± 0,1
schwächste	2 × An, 1 × Dy	99,4 ± 0,1	99,4 ± 0,1
letzte	-	99,6 ± 0,1	99,6 ± 0,1
letzte	2 × An, 1 × Dy	99,6 ± 0,1	99,6 ± 0,1

Tabelle 5.9: Vergleich der Störung mit neuem Deckel mit der aus Abschnitt 5.4.1 bei 2 m Abstand Antenne - Detektor. Die Referenz bildet wiederum die schwächste und letzte Messung der Störung aus Messreihe 2 von Tabelle 5.2. Es zeigt sich, dass mit diesem neuen Deckel das Störsignal fast vollständig reduziert werden kann.

Vergleichsmessung	Ferritinstallation	Red. 1 [%]	Red. 2 [%]
schwächste = letzte	-	95,8 ± 0,5	96,4 ± 0,4
schwächste = letzte	2 × An, 1 × Dy	96,7 ± 0,4	96,6 ± 0,4

Tabelle 5.10: Vergleich der Störung mit neuem Deckel mit der aus Abschnitt 5.4.1 bei 8 m Abstand Antenne - Detektor

werden durch den Deckel des Detektors herausgeführt. Dabei gehen sie keine Verbindung mit der Masse des Detektors ein. Um diese Verbindung herzustellen, wurde ein neuer Deckel gebaut, der innen und außen Anschlüsse für die Kabel besitzt. Damit sind die Schirme der Kabel mit der Detektormasse geerdet. Mit dem neuen Deckel wurde die Störung erneut gemessen, womit die bisher beste Reduktion erzielt wurde. Dabei ist das Störsignal mit dem neuen Deckel unabhängig von der verwendeten Kabelkonfiguration. Um einen Vergleich mit den Messungen in den Abschnitten 5.4.1 und 5.4.2 zu erzielen, wurde wieder mit dem stärksten und schwächsten Störung, die bei diesen Messungen in Messreihe 2 gemessen wurden, verglichen. In den Tagen seit den letzten Messungen von den Abschnitten 5.4.1 und 5.4.2 bis zu den Messungen mit dem neuen Deckel hat sich die Position des Krans nicht verändert, so dass davon kein zusätzlicher Einfluss zu erwarten ist. Zum Vergleich werden die gleichen Messungen, die auch im letzten Abschnitt zum Vergleich der unterschiedlichen Kabelkonfigurationen herangezogen wurden, verwendet. Der Vergleich ist in den Tabellen 5.9 und 5.10, sowie Abbildung 5.19 dargestellt.

Daraus ergibt sich die bisher beste Reduktion der elektromagnetischen Störung. Sowohl bei 2 m als auch bei 8 m wird die Störung sehr gut reduziert. Zusätzliche Ferrite haben im Rahmen der Messungenauigkeit keine weitere Reduktion zur Folge. Dies gilt auch für eine Veränderung der Kabelkonfiguration, die nur in 2 m Abstand gemessen wurde.

5.4.6 Abschirmung möglicher Emissionsstellen mit Kupferband

Unter den weiteren Emissionsstellen sind Orte am Detektor zu verstehen, an denen der Photomultiplier nicht komplett mit Stahl umgeben ist. Dies ist an den Flanschen der Fall, wo der Zylinder, in welchem der Photomultiplier steckt, auf den Kegel oder der Deckel auf den Zylinder, geschraubt ist. Dadurch, dass die elektromagnetische Störung des Detektors durch die Installation eines neuen Deckels unabhängig von der verwendeten Kabelkonfiguration ist, können diese Stelle mit Kupferband umwickelt

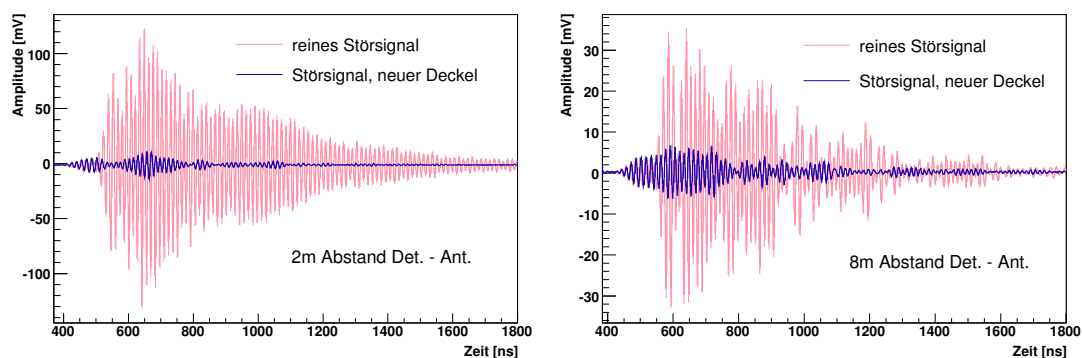


Abbildung 5.19: Vergleich des „letzten“ Störsignals mit der Kabelkonfiguration aus Abschnitt 5.4.1 mit dem Störsignal, das bei Installation eines neuen Deckels resultiert 2 m (links, 99,6 %) und 8 m Abstand (rechts, 95,8 %) Detektor - Antenne. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit einem neuen Deckel das Störsignal fast eliminiert ist.

werden. Dazu wurden zwei Lagen Kupferband angebracht. Diese reichen von der Dicke als Schirm aus, um elektromagnetische Strahlung vom Innern des Zylinders abzuschirmen [Mor77]. Die elektromagnetische Störung, die in Abschnitt 5.4.5 gemessen wurde, konnte nicht weiter reduziert werden.

5.5 Diskussion der Ergebnisse und Anwendbarkeit bei KASCADE

Die ausführlichen Messungen, die in diesem Kapitel aufgeführt sind, dienen der Ermittlung der elektromagnetischen Störung durch den im Versuchsaufbau verwendeten Detektor. Anhand der Ergebnisse lassen sich Maßnahmen zur Reduktion der Störung ableiten, welche sich überwiegend in kurzer Zeit mit relativ geringem finanziellen Aufwand auf das KASCADE-Experiment übertragen lassen. Durch die beschriebenen Einflüsse sind die Ergebnisse quantitativ nicht direkt auf KASCADE-Bedingungen anwendbar, bieten jedoch eine gute qualitative Aussage.

Die elektromagnetischen Störungen der e/γ -Detektoren des KASCADE-Experiments konnten bei den Messungen in der Versuchsanordnung in einer Entfernung Detektor - Antenne von 2-8 m reduziert werden. Diese Reduktion konnte mit Ferriten erreicht werden, die vor allem am Anodensignalkabel am Ausgang des Detektors installiert wurden. Diese Reduktionsmaßnahme kann bei KASCADE angewendet werden. Erste Messungen hierzu werden im nächsten Abschnitt diskutiert.

Genauso konnte mit der Erdung der Kabelschirme mit Kupferband eine gute Reduktion erreicht werden. Dies allerdings nur, wenn alle drei Kabel mit dem Detektordeckel verbunden werden. Löst sich das Kupferband durch die Temperaturschwankungen und die Luftfeuchtigkeit am KASCADE-Experiment, so kann die elektromagnetische Störung nur bedingt reduziert werden. Ein weiteres Problem ergibt sich durch die Erdung der Kabelschirme an der Detektormasse. Da diese bereits in der jeweiligen Cluster-Elektronikstation geerdet sind, kann es vorkommen, dass das eine Ende des Kabelschirms auf einem anderen Potential liegt, als das andere. Zusätzlich besteht dann die Gefahr, dass ein in eine Detektorstation einschlagender Blitz über die Erdung bis in die Cluster-Elektronik gelangt. Dieses ist ein Risiko für den Messbetrieb, weshalb bei

KASCADE keine Messungen mit Kupferband durchgeführt wurden.

Mit einem neuen Detektordeckel konnte das Störsignal am besten reduziert werden. Da diese Maßnahme jedoch sehr kosten- und arbeitsintensiv ist, wird sie bei KASCADE nicht angewendet. Zudem müsste für eine Installation der Messbetrieb unterbrochen werden. Außerdem gilt bei einem neuen Deckel dieselbe Argumentation wie bereits beim Kupferband, da bei diesem das eine Ende des Kabelschirms (an der Detektorstation) auf einem anderen Potential liegt als das Andere (in der Cluster-Elektronikstation).

Da die Kabelkonfiguration einen Einfluss auf die Reduktion der Störung hat, wird versucht mit einer geeigneten Kabelkonfiguration die elektromagnetische Störung zu verringern. Dabei wird sich auf die Konfiguration beschränkt, die in Abschnitt 5.4.4 reproduzierbar die beste Reduktion lieferte. Allerdings wird die Anwendung einer neuen Kabelkonfiguration zur Reduktion der Störung im gesamten Experiment davon abhängen, wie sich diese in Kombination mit Ferriten auswirkt.

6 Messungen und Ergebnisse am KASCADE-Experiment

Die Messungen am Versuchsaufbau (Abbildung 4.8) haben gezeigt, dass die Störung durch die e/γ -Detektoren durchaus reduzierbar ist. Jedoch kann durch die diskutierten Einflüsse, keine Aussage über die absolute Stärke der Reduktion gemacht werden. Die gefundenen wirksamen Reduktionsmaßnahmen wurden deshalb direkt am KASCADE-Experiment verifiziert, um eine zuverlässigere Aussage zu treffen.

6.1 Messung der elektromagnetischen Störung am KASCADE-Experiment

6.1.1 Versuchsaufbau

Für eine möglichst realistische Messung der elektromagnetischen Störung der e/γ -Detektoren wurde Cluster 2 des KASCADE-Experiments ausgewählt (Abbildung 6.1). Dafür wurde Antenne Nummer 13 für die Dauer der Messungen aus der Messung des LOPES-Experimentes herausgenommen. Anstatt der LOPES-Datenaufnahme wurde die Elektronik des Versuchsaufbaus (Abbildung 4.8) angeschlossen. Zur Messung der elektromagnetischen Störung der Detektoren wurde eine Detektorstation in der unmittelbaren Umgebung von Antenne 13 gewählt; sie ist in Abbildung 6.1 markiert. In dieser Station befinden sich zwei Detektoren. Deshalb wurden die Reduktionsmaßnahmen an beiden Detektoren getestet. Auch wurde versucht, die Kabel der Detektoren mit den gewonnenen Erkenntnissen so anzuordnen, dass die Störung der Detektoren zusätzlich reduziert wurde. Das Triggersignal der Detektoren wurde von der KASCADE-Datenaufnahme (DAQ) abgegriffen. Neben den Signalanschlüssen, die in der DAQ vorhanden sind, existiert ein Summenausgang für zwei Detektoren, welcher an das Oszilloskop angeschlossen wurde. Der Summenausgang gibt die Summe der Detektorantwort der beiden Detektoren aus. Die LOPES-Antenne befindet sich in 8-9 m Abstand von den Detektoren. Ihr Signalkabel wurde von der LOPES-Elektronik entfernt und ebenfalls an das Oszilloskop angeschlossen. Der Laser wurde zwischen den beiden Detektoren positioniert, so dass diese mit dem Lichtleiterkabel verbunden werden konnten. Es hat sich gezeigt, dass die Amplitude der Detektorantwort auf einen Laserpuls nicht die Höhe erreicht wie am Versuchsaufbau. Dies hängt zum Einen mit der Höhe der angelegten Hochspannung an den Detektoren, zum Anderen aber auch mit der Position des Lichtleiterkabels im Detektor zusammen. Zudem sind die Reflexionen nicht so stark, wie bei den Messungen am Versuchsaufbau.

6.1.2 Messung

Es wurde in diesem Versuchsaufbau in gleicher Weise gemessen, wie in Kapitel 5 beschrieben. Die Störung der Detektoren wurde dadurch erzeugt, indem der Detektor

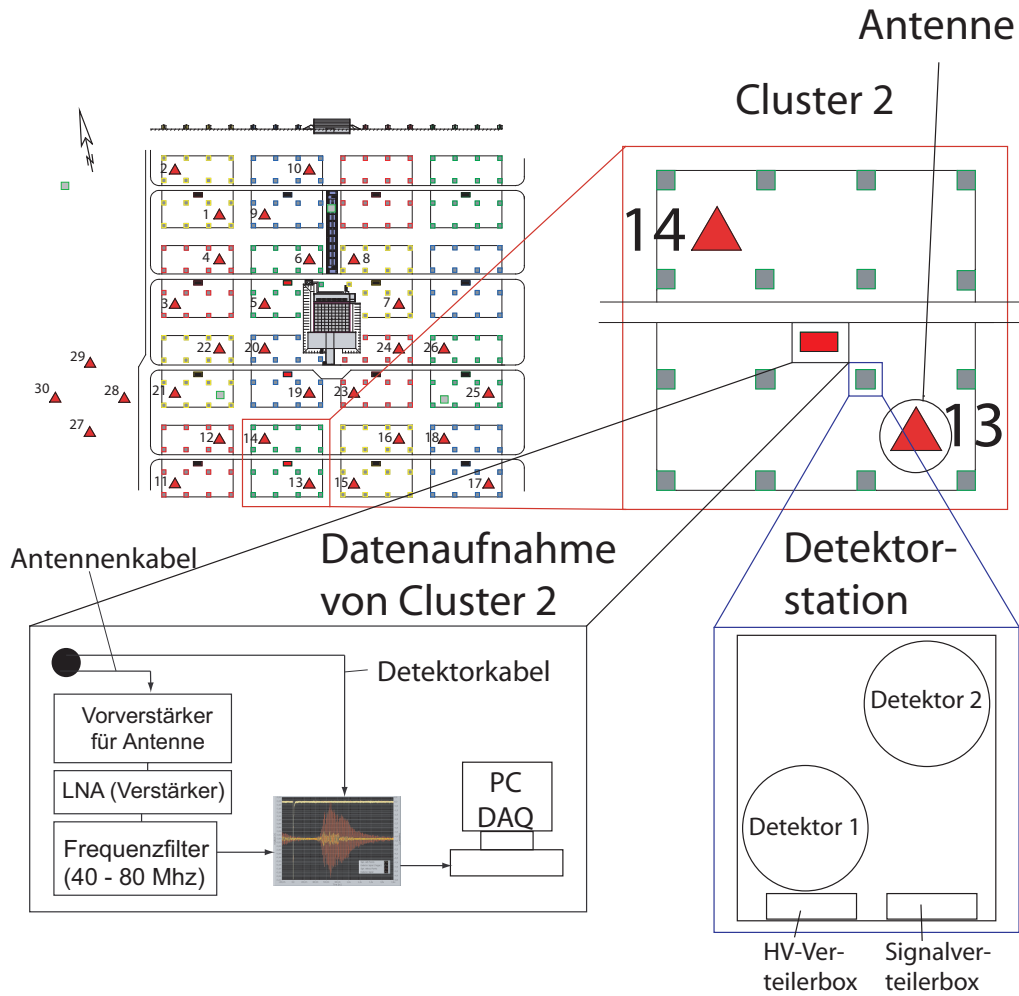


Abbildung 6.1: Versuchsaufbau am KASCADE-Experiment. Die Aufbauten zur Datennahme von LOPES- und KASCADE-Daten im DAQ-Container sind der Übersichtlichkeit halber nicht gezeigt.

mit einem Laserpuls beschossen wurde. Es wurde wiederum ein Mittelwert über 200 Messwerte gebildet und wiederum in 5 Schritten verfahren:

1. Untergrund 1
2. reines Störsignal, ohne Reduktionsmaßnahmen
3. Reduziertes Störsignal (z.B. mit Ferriten)
4. reines Störsignal, ohne Reduktionsmaßnahmen
5. Untergrund 2

Bei den ersten Messungen wurde deutlich, dass die unkorrelierten Störungen, wie der Fernsender der ARD, fast die gleiche Amplitude besitzt, wie die Störung des Detektors. Abbildung 6.2 zeigt den Vergleich zwischen einer einzelnen Messung und dem über 200 Messungen berechneten Mittelwert. Da diese und andere Störungen als statistisch unabhängig von den Messungen der Störungen der Detektoren betrachtet werden

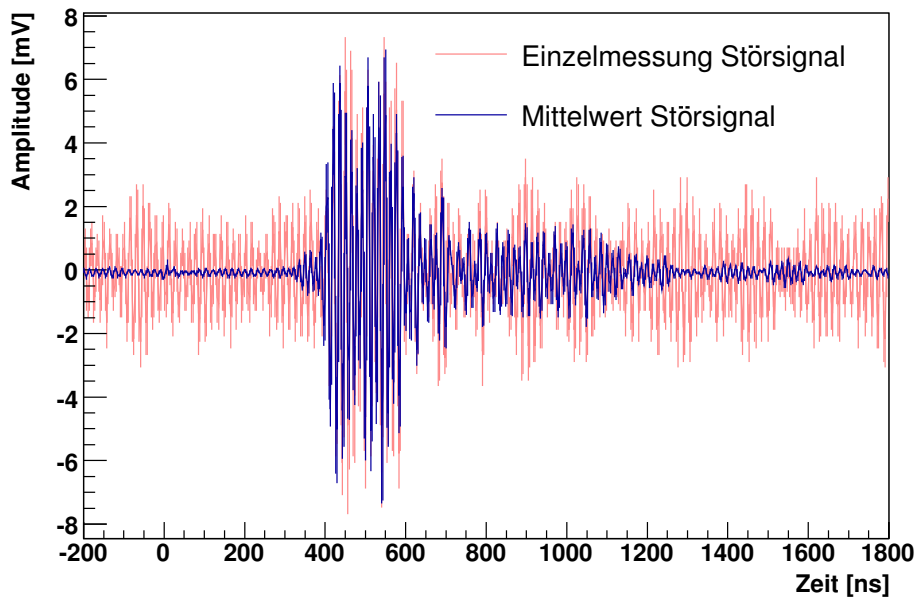


Abbildung 6.2: Vergleich einer Einzelmessung der Störung eines Detektors mit dem Mittelwert. In dieser Abbildung ist sehr gut zu erkennen, dass die Amplitude der Störung um eine Größenordnung kleiner als die der Störung in Kapitel 5 ist (siehe z. B. Abbildung 5.14).

kann, ist die Bildung des Mittelwerts zulässig. Durch dieses Verfahren können sich positive und negative Interferenzen herausmitteln. Der Fehler wird auf die gleiche Weise ermittelt, wie in Kapitel 5 beschrieben. Da die Temperatur durch die Klimaanlage im Datenaufnahme-Container bei 20 °C konstant gehalten wird, wurde hier der systematische Fehler des Oszilloskops ΔU_{sys} anstatt 3 % mit 2 % bewertet.

6.2 Einflüsse auf die Messergebnisse

Auch am KASCADE-Experiment müssen wieder Einflüsse durch Reflexionen und die Anordnung der Kabel auf der Detektoroberfläche mit in Betracht gezogen werden. Zusätzlich ergibt sich durch unterschiedliche Bodenfeuchtigkeiten ein Einfluss auf die Verstärkung in der Antenne.

Reflexionen

Bei den in diesem Kapitel behandelten Messungen kann ein Einfluss der Messergebnisse durch metallische Gegenstände wie Zäune oder Wände ausgeschlossen werden. Es wurde darauf geachtet, dass sich in der Zeit, in welcher gemessen wurde, keine parkenden PKWs oder sonstige metallische Gegenstände im Umkreis von 10 m von der Antenne und den Detektoren befanden, welche die Messungen beeinflussen hätten können.

Ein Einfluss von Reflexionen an den Oberflächen der Detektoren oder den Bleiplatten, die zur Abschirmung der Myondetektoren (siehe Kapitel 2) dienen, kann jedoch nicht ausgeschlossen werden. Dieses Problem wird dadurch behoben, dass Messungen für jeden der beiden in Abbildung 6.1 dargestellten Detektoren separat durchgeführt wurden. Da die Detektorstationen am KASCADE-Experiment zum Großteil wie in

der beschriebenen Detektorstation angeordnet sind, kann eine separate Lösung zur Reduktion der elektromagnetischen Störung für jeden der beiden Detektoren bestimmt werden.

Anordnung der Kabel¹

Da aufgrund der Länge der Kabel der in Abbildung 6.1 dargestellten Detektorstation die Anordnung der Kabel, so wie sie bei den Messungen am Versuchsaufbau die beste Reduktion ergab, nicht für jeden der beiden Detektoren realisiert werden kann, wurde zuerst eine Reduktion der Störung mit Hilfe von Ferriten untersucht. Dabei wurde die Kabelkonfiguration verwendet, welche ursprünglich in der Detektorstation vorhanden war. Ursprüngliche Kabelkonfiguration bedeutet in diesem Fall diejenige Kabelkonfiguration, wie sie in der Detektorstation vor Beginn der Messungen vorgefunden wurde.

Bodenfeuchtigkeit

Während der Kalibration des LOPES-Experiments hat sich herausgestellt, dass die Bodenfeuchtigkeit einen entscheidenden Einfluss auf Reflexionen am Boden hat [Hak05]. Bei trockenem Boden sind diese geringer als bei feuchtem. Dies spiegelt sich in unterschiedlichen Signalstärken in der Antenne wieder. Deshalb werden nur Messungen verglichen, die unter vergleichbaren Bodenfeuchtigkeiten vorgenommen wurden. Da an den meisten Tagen der Messungen der Boden trocken war, werden nur diese Ergebnisse vorgestellt. Ein direkter Vergleich findet allerdings nur zwischen Störsignalen statt, die am selben Tag unter den selben Wetterbedingungen gemessen wurden, andernfalls wird darauf hingewiesen. Dies ist notwendig, da das Messsignal an unterschiedlichen Tagen eine andere Struktur besitzt. Ein Beispiel dazu wird in Abschnitt 6.4 diskutiert (Abbildung 6.9).

6.3 Messergebnisse Detektor 1

Dies bezeichnet den Detektor, der in Abbildung 6.1 als „Detektor 1“ gekennzeichnet ist. Der Zugang für Wartungsarbeiten befindet sich am unteren Rand der dargestellten Detektorstation. An diesem befinden sich die Verteilerboxen für die Signal- und HV-Kabel der Detektoren.

6.3.1 Ferritmessungen

Für die Messung zur Reduktion der Störung wurden diejenigen Kombinationen von Ferritinstallationen verwendet, die sich bei den Messungen am Versuchsaufbau in der Halle als geeignet herausgestellt haben. Zur Beschreibung der Installationsorte wird wieder Abbildung 5.10 herangezogen. Dabei ist zu beachten, dass sowohl beide Detektoren als auch die Myondetektoren an den selben Verteilerboxen angeschlossen sind. Eine Reduktion der Störung konnte durch Ferrite allerdings nur an den Kabeln erreicht werden, die auch zu demjenigen Detektor gehören, an welchem der Photomultiplier mit dem Laserpuls in Sättigung gefahren wurde.

Es wurden wieder zwei Messreihen durchgeführt, wobei sich die Werte reproduzieren lassen. Eine Aufstellung der Ergebnisse für den behandelten Detektor findet sich

¹Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird „Die Anordnung der Kabel auf der Oberfläche eines Detektorvolumens“ als „Kabelkonfiguration“ bezeichnet.

Abkürzung	Beschreibung des Installationsortes
An	Signalkabel der A node am Detektorausgang
Dy	Signalkabel der D yode am Detektorausgang
HV	HV -Kabel am Detektorausgang
HVh	HV -Kabel h inter der HV-Verteilerbox
Anv	Signalkabel der A node v or Signalverteilerbox
Anh	Signalkabel der A node h inter Signalverteilerbox
Dyv	Signalkabel der D yode v or Signalverteilerbox
NL	Ferrite wurden so installiert, wie sie bei den Messungen in den Niederlanden die beste Reduktion lieferten (Kap. 3)

Tabelle 6.1: Abkürzungskonvention zur Beschreibung der Intallationsorte von Ferriten am Detektor (siehe Abbildung 5.10)

Ferritinstallation	Red. 1 [%]	Red. 2 [%]
1 × An, 1 × Dy	81,4 ± 1,5 ± 1,0	81,2 ± 1,5 ± 1,0
2 × An, 1 × Dy	82,3 ± 1,4 ± 1,0	82,7 ± 1,4 ± 1,0
2 × An, 1 × Dy, 1 × HV	81,1 ± 1,5 ± 1,2	82,1 ± 1,4 ± 1,1
2 × An, 1 × Dy, 1 × HV, 1 × HVh, 1 × Anv, 1 × Dyv	88,3 ± 0,9 ± 0,7	88,9 ± 0,9 ± 0,7
NL	86,1 ± 1,3 ± 0,9	85,7 ± 1,1 ± 0,9

Tabelle 6.2: Reduktion der Energie im Störsignal durch Ferrite (bei Detektor 1 in Prozent). Der erste Fehler ist der systematische Fehler ΔU_{sys} von 2 %, der zweite der Diskretisierungsfehler ΔU_{diskr} des Oszilloskops. Zwei Ferrite (1 An, 1 Dy) bewirken bereits 80 % Reduktion. Ein zweiter Ferrit auf dem Anodensignalkabel hat keine zusätzliche Wirkung zur Reduktion der Störung. Noch mehr Ferrite bewirken nur noch eine weitere Reduktion von 6 - 7 %.

in Tabelle 6.2 und in den Abbildungen 6.3 und 6.7. Die Abkürzungen werden in Tabelle 6.1 definiert. Die dargestellten Fehler sind zum Einen der systematische Fehler des Oszilloskops ΔU_{sys} und der Fehler der durch die Diskretisierung entsteht ΔU_{diskr} . ΔU_{diskr} wirkt sich deshalb so stark aus, weil viel kleinere Werte als bei den Messungen am Versuchsaufbau betrachtet werden. Der statistische Fehler ist wieder ein oder zwei Größenordnungen kleiner, weshalb er nicht aufgeführt wird.

Wie deutlich zu erkennen ist, kann die Störung bereits mit zwei Ferriten (1 An und 1 Dy) um mehr als 80 % reduziert werden. Die Installation eines zweiten Ferrits auf dem Anodensignalkabel bringt nur eine weitere geringe Reduktion. Selbst bei der visuellen Betrachtung des Zeitsignals ist nur eine sehr geringe weitere Reduktion der Amplitude festzustellen (Abbildung 6.3). Wird die Installation angewendet, die sich bei den Messungen am Versuchsaufbau als die geeignetste herausgestellt hat, so kann das Störsignal um weitere 6 - 7 % reduziert werden, was allerdings einen deutlich höheren finanziellen Aufwand (7 Ferrite) bedeuten würde. Im Vergleich dazu bringt die Installation von Ferriten, die bereits in den Niederlanden getestet wurde (9 Ferrite), annähernd die selbe Reduktion. Eine Diskussion dieses Sachverhaltes wird am Ende dieses Kapitels durchgeführt.

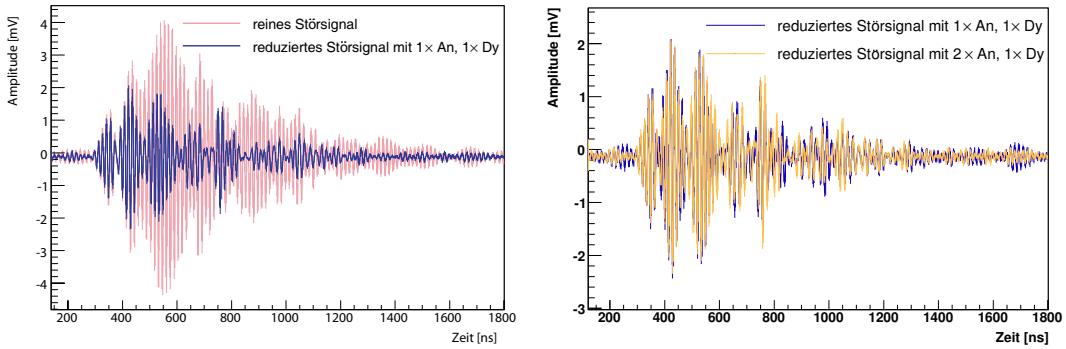


Abbildung 6.3: Vergleich Störung - Reduktion beim KASCADE-Experiment: Messreihe 2, Tabelle 6.2. Links: Vergleich reines Störsignal mit dem reduzierten. Rechts: Vergleich des reduzierten Signal mit einem und zwei Ferriten auf dem Anodenkabel am Detektorausgang. Der zweite Ferrit bringt wenig zusätzliche Reduktion des Störsignal.

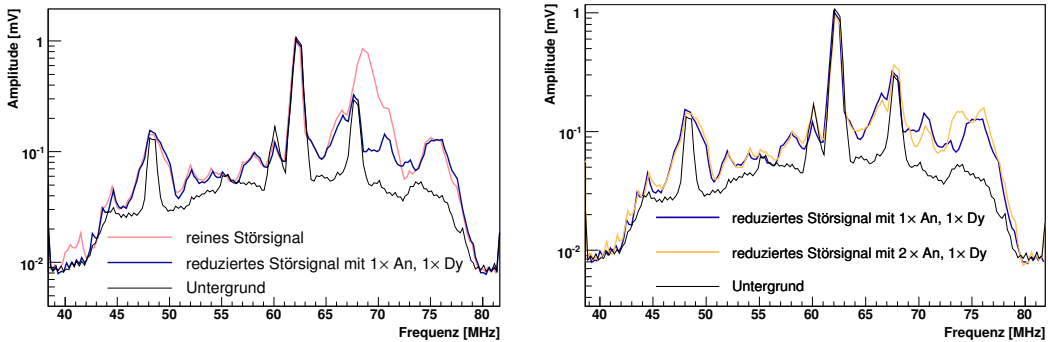


Abbildung 6.4: Fouriertransformierte der Signale aus Abbildung 6.3 in logarithmischer Darstellung. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Hauptanteil des Störsignals im Bereich von 70 MHz zu finden ist. Dieses kann mit der Ferritinstallation „1 An, 1 Dy“ reduziert werden. Allerdings ist durch den zweiten Ferrit keine weitere Reduktion der Störung zu erkennen (rechts). Im Untergrund sind sehr gut die Sender zu sehen, die auch in den LOPES-Daten sichtbar sind.

6.3.2 Reduktion mit neuer Kabelkonfiguration

Als zusätzliche Maßnahme wurden nun die Kabel so angeordnet, wie sie bei den Messungen im Versuchsaufbau die beste reproduzierbare Reduktion brachte, d.h. sie werden nebeneinander in Richtung Verteiler gelegt. Sie müssen dazu nicht am Detektorgehäuse befestigt werden. Auf dem Weg zum Verteiler laufen sie in der kleinen Rinne, die sich am unteren Rand des Edelstahlkegels (Abbildung 4.3) befindet. Da das Anodensignalkabel die größte Störung trägt, ist darauf zu achten, dass dieses am tiefsten von den drei Kabeln liegt. Damit wird eine kapazitive Kopplung der Kabelschirme zum Stahlkörper des Detektors erzeugt. Diese Kopplung ist um so größer, je mehr die Kabel von Metall umschlossen sind. Es hat sich gezeigt, dass, wenn die Kabel an der Oberfläche des Detektorkegels entlanglaufen, kaum eine Reduktion der Störung durch den Detektor zu sehen ist.

Die Ergebnisse, die diese Führung der Kabel bewirkt, können mit den im vorigen

Ferritinstallation	Red. 1 [%]	Red. 2 [%]
-	$88,3 \pm 0,9 \pm 0,8$	$88,0 \pm 1,0 \pm 0,8$
1 \times An, 1 \times Dy	$86,4 \pm 1,1 \pm 0,9$	$88,3 \pm 0,9 \pm 0,8$
2 \times An, 1 \times Dy	$88,0 \pm 1,0 \pm 0,8$	$88,7 \pm 0,9 \pm 0,8$
2 \times An, 1 \times Dy, 1 \times HV, 1 \times HVh, 1 \times Anv, 1 \times Dyv	$87,0 \pm 1,0 \pm 0,9$	$90,1 \pm 0,8 \pm 0,7$
NL	$88,2 \pm 0,9 \pm 0,8$	$90,9 \pm 0,7 \pm 0,7$

Tabelle 6.3: Reduktion der Energie im Störsignal mit neuer Kabelkonfiguration bei Detektor 1 (in Prozent). Dabei wird mit dem Störsignal der ursprünglichen Kabelkonfiguration verglichen, das in Tabelle 6.2 gemessen wurde. Der erste Fehler ist der systematische Fehler ΔU_{sys} von 2 %, der zweite der Diskretisierungsfehler ΔU_{diskr} des Oszilloskops.

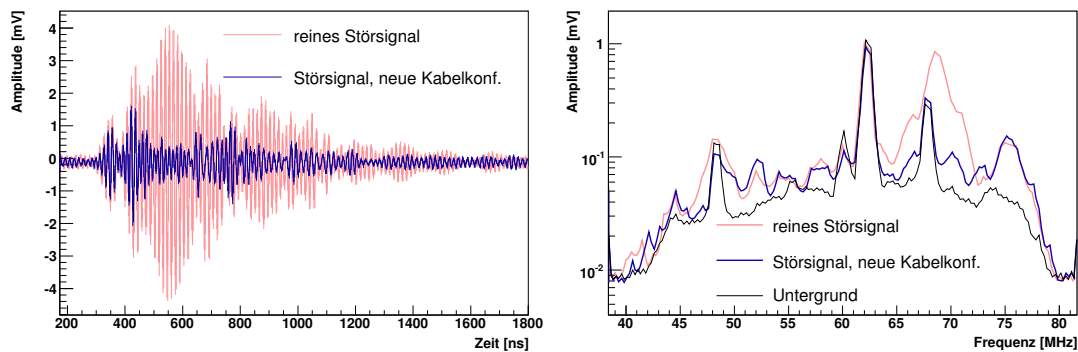


Abbildung 6.5: Vergleich der Störsignale der ursprünglichen Kabelkonfiguration mit der Neuen (im Text beschrieben). Links: Zeitsignal: Es ist deutlich die Reduktion in der Energie zu sehen (88,3%). Rechts: Fouriertransformierte des linken Signals. Auch hier befindet sich die Hauptenergie des Signal im Bereich um 70 MHz, die mit der neuen Kabelkonfiguration reduziert werden kann.

Abschnitt verglichen werden, da sie am selben Tag unter den gleichen Wetterbedingungen durchgeführt wurden (Tabelle 6.3 und Abbildung 6.5). Dadurch ist sehr gut zu erkennen, dass eine alleinige Umpositionierung der Kabel eine deutliche Reduktion der Störung bewirkt. Die zusätzliche Installation von Ferriten hat im Rahmen der Messungenauigkeit wenig Einfluss auf eine weitere Reduktion.

6.4 Messergebnisse für Detektor 2

Dieser Detektor befindet sich vom Zugang aus im hinteren Bereich der Detektorstation. Die Kabel wurden bei den Messungen mit den Ferriten in ihrer ursprünglichen Anordnung belassen, um einen Vergleich mit einer Umpositionierung zu erhalten. Allerdings kann bei diesem Detektor aufgrund der Kabellänge die Kabelkonfiguration aus Abschnitt 6.3 keine Anwendung finden.

Ferritinstallation	Red. 1 [%]	Red. 2 [%]
1 × An, 1 × Dy	69,0 ± 2,5 ± 1,0	72,9 ± 2,1 ± 0,9
2 × An, 1 × Dy	70,2 ± 2,4 ± 1,0	

Tabelle 6.4: Reduktion der Energie im Störsignal durch Ferrite bei Detektor 2 in Prozent. Der erste Fehler ist der systematische Fehler ΔU_{sys} von 2%, der zweite der Diskretisierungsfehler ΔU_{diskr} des Oszilloskops. Die Reduktion in der Energie des Signals ist sehr groß. Die maximale Amplitude des Zeitsignals kann jedoch kaum reduziert werden (Abbildung 6.6). Ein zweiter Ferrit wurde nur einmal getestet, da es sich bei dieser Anordnung um einen Spezialfall handelt (siehe Text).

6.4.1 Ferritmessungen

Wie bereits bei Detektor 1 konnte eine Reduktion durch Ferrite bei ursprünglicher Kabelanordnung erreicht werden. Allerdings ist hier die Reduktion nicht so stark. Eine Auflistung der Ergebnisse findet sich in Tabelle 6.4.

Die Energie im Störsignal kann durch die Ferrite sehr gut reduziert werden. Die genaue Betrachtung des Signals zeigt, dass die maximale Amplitude kaum unterdrückt werden kann (Abbildung 6.6). Auch ein zweiter Ferrit bewirkt keine weitere Reduktion des Störsignals. Dies ist äußerst nachteilig für das LOPES-Experiment. Die erste Amplitude des Störsignals wirkt sich besonders stark in der Analyse der LOPES-Daten aus. Dieses Ergebnis ist auf die Anordnung der Kabel in der Detektorstation zurückzuführen. In diesem Fall wurden die Signalkabel so vorgefunden, dass das Anodensignalkabel wie eine „gerade Antenne“ in der Luft hing. Dies führt dazu, dass eine Abstrahlung von elektromagnetischer Strahlung begünstigt wird. Dabei wird natürlich eine größere Störung in der Antenne gemessen. Durch eine geringe Modifikation an der Kabelanordnung kann das Störsignal deutlich reduziert werden.

6.4.2 Reduktion mit neuer Kabelkonfiguration

Die Kabelkonfiguration aus Abschnitt 6.3 kann an diesem Detektor nicht angewendet werden. Allerdings konnten 4 verschiedene in Frage kommenden Kabelkonfigurationen getestet werden. Davon hat sich eine als geeignet herausgestellt, da sie mehrfach reproduzierbar (6 mal) die selbe Reduktion der Störung bewirkte. Dazu werden die Signal- und HV-Kabel des Detektors so verlegt, dass sie möglichst auf der Bleiplatte, die zur Abschirmung der Myondetektoren dienen, entlang laufen. Zusätzlich sollten sie an der Wanne von Detektor 1 entlanglaufen. Daraus ergibt sich eine kapazitive Kopplung sowohl mit der Bleiplatte als auch mit der Wanne, was das Störsignal etwas reduziert. Auf keinen Fall sollten die Kabel frei in der Luft verlaufen. Der Vergleich, der unter den selben Wetterbedingungen durchgeführt wurde, zwischen der Kabelkonfiguration in obigem Abschnitt und bereits erklärten Kabelkonfiguration findet sich in Tabelle 6.5 und Abbildung 6.5. Kabelkonfiguration 1 (Abbildung D.2) reduziert das Signal vor allem in der Amplitude, was mit den Ferriten nicht erreichbar war. Allerdings kann durch zusätzliche Ferritinstallation das Signal noch weiter reduziert werden (Abschnitt 6.4.3).

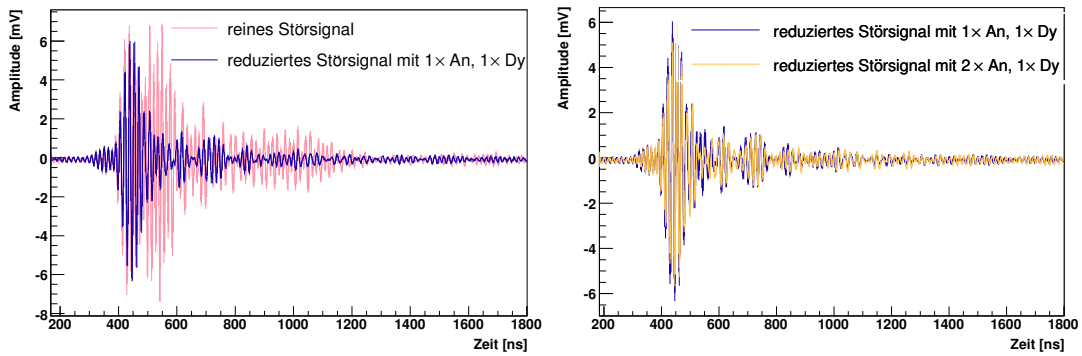


Abbildung 6.6: Vergleich zwischen dem Störsignal und den Reduzierten (Daten aus Tabelle 6.4, Messreihe 1). Es ist deutlich die Reduktion in der Energie (69 %) bei der Installation von zwei Ferriten zu erkennen (links). Ein zweiter Ferrit bewirkt kaum eine weitere Reduktion in der Amplitude (rechts).

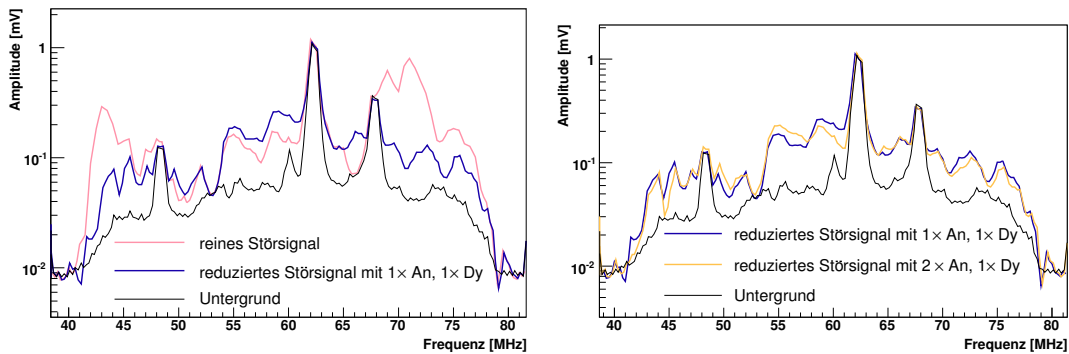


Abbildung 6.7: Fouriertransformierte der Signale aus Abbildung 6.6 in logarithmischer Darstellung. Hier ist die Reduktion in der Leistung zu erkennen. Der zweite Ferrit bringt keine weitere Reduktion der Störung.

6.4.3 Reduktion mit neuer Kabelkonfiguration und Ferriten

Die untersuchten Ferritinstallationen wurden wie in den letzten Abschnitten durchgeführt. Dabei kann nicht direkt mit der Kabelkonfiguration 1 aus vorigem Abschnitt verglichen werden, da die Messungen über mehrere Tage dauerten und sich die Struktur des Störsignal in dieser Zeit etwas veränderte. Diese Strukturänderung ist auf eine Neuverlegung der Kabel von Kabelkonfiguration Nummer 1 zu Kabelkonfiguration Nummer 4 und wieder zurück zu Nummer 1 usw. zurückzuführen. Allerdings kann dieser relative Wert mit dem Wert aus dem letzten Abschnitt kombiniert werden. Er ist in Tabelle 6.6 in Klammern angegeben.

Eine Installation von mehr als 2 Ferriten (1 An., 1 Dy.) liefert keine weitere große Reduktion. Da die in den Niederlanden getestete Ferritinstallation trotz des Fehlers eine etwas größere Reduktion als die beiden erstgenannten lieferte, wurde eine umfangreiche Untersuchung mit Ferriten an allen Signalkabeln (ca. 10 Stück) hinter der Signalverteilerboxen durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass ein zusätzlicher Ferrit am Anodensignalkabel hinter der Signalverteilerbox dieses Detektors eine weitere Reduk-

Kabelkonfiguration	Red. 1 [%]	Red. 2 [%]
Nr. 1 (im Text beschrieben)	$85,8 \pm 1,1 \pm 0,6$	$83,2 \pm 1,3 \pm 0,7$
Nr. 2	$89,4 \pm 0,8 \pm 0,5$	$80,3 \pm 1,6 \pm 0,7$
Nr. 3	$69,8 \pm 2,4 \pm 1,0$	$75,7 \pm 1,9 \pm 0,8$
Nr. 4	$78,0 \pm 1,8 \pm 0,8$	$61,2 \pm 3,1 \pm 1,1$

Tabelle 6.5: Reduktion der Energie im Störsignal mit neuer Kabelkonfiguration bei Detektor 1 in Prozent. Dabei wird mit dem Störsignal der ursprünglichen Kabelkonfiguration von Detektor 2 verglichen, das in Tabelle 6.4 gemessen wurde. Die Konfiguration Nr. 1 liefert reproduzierbar die beste Reduktion.

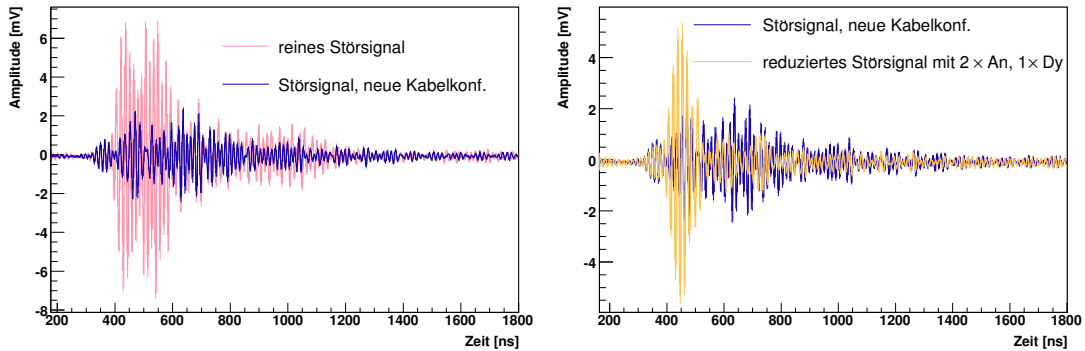


Abbildung 6.8: Vergleich des Störsignals mit der „ursprünglichen“ Kabelkonfiguration mit der Konfiguration aus Tabelle 6.5. Links: ursprüngliche Störung ohne Ferrite zu neuer Kabelkonfiguration ohne Ferrite. Rechts: Vergleich der ursprünglichen Kabelkonfiguration (Abbildung 6.6) mit Ferriten zu neuer Kabelkonfiguration ohne Ferrite. Es ist deutlich eine Reduktion in der Energie als auch in den Amplituden zu erkennen.

tion liefert. Dafür wurden auch direkte Vergleiche durchgeführt. Dies steht etwas im Widerspruch zu den Ergebnissen, die die Messungen im Versuchsaufbau lieferten. Eine mögliche Erklärung dieses Effekts findet sich in Anhang C. Damit ergibt sich eine optimale Reduktion mit einer Konstellation aus richtiger Anordnung der Signal- und HV-Kabel und der Installation von drei Ferriten (1 An., 1 Dy., 1 Anh.). Dieser zusätzliche Ferrit (1 Anh.) wurde auch an Detektor 1 installiert. Allerdings konnte dort keine zusätzliche Reduktion festgestellt werden.

6.5 Diskussion der Ergebnisse

Das Störsignal konnte durch nur 3 Ferrite an Detektor 1 und 2 in der Energie und Amplitude reduziert werden. Die Reduktion ist dieselbe, die mit der bereits in den Niederlanden erfolgreich getestete Version mit 9 Ferriten an einem Detektor erreicht wurde. Während der Messungen hat sich herausgestellt, dass das Störsignal größer wird, je weiter die Signal- und HV-Kabel in der Luft hängen. Dies begünstigt die Abstrahlung von elektromagnetischer Strahlung, da der Kabelschirm dann wie eine Antenne funktioniert. Das Störsignal kann durch eine bessere Anordnung der Kabel weiter reduziert werden. Allerdings ist eine Installation von Ferriten unumgänglich, da diese das Stör-

Ferritinstallation	Red. 1 [%]	Red. 2 [%]	(Komb. Nr. 1 [%])
1 × An, 1 × Dy	33,3 ± 5,3 ± 5,8	42,8 ± 4,6 ± 4,7	(90,5)
2 × An, 1 × Dy, 1 × HV, 1 × HVh, 1 × Anv, 1 × Dyv	31,6 ± 5,5 ± 5,8	41,0 ± 4,7 ± 4,8	(90,1)
NL	36,4 ± 5,1 ± 5,6	49,9 ± 4,0 ± 4,6	(91,4)
1 × An, 1 × Dy 1 × Anh		56,6 ± 3,4 ± 4,3	(92,6)
1 × An, 1 × Dy 1 × Anh, 2. Mess.		57,1 ± 3,4 ± 4,3	(92,8)

Tabelle 6.6: Reduktion der Energie im Störsignal mit neuer Kabelkonfiguration bei Detektor 1 und Ferriten. Dabei wird mit dem Störsignal der Kabelkonfiguration in Nr. 1 in Tabelle 6.5 von Detektor 2 verglichen. Zusätzliche Ferrite liefern eine weitere Reduktion. Eine Erklärung zu den letzten beiden aufgeführten Werten findet sich im Text. In Klammern ist ein Wert aufgeführt, der die Werte aus Messreihe 2 mit dem Wert für die Reduktion von Konfiguration Nr. 1 (Abbildung D.2) in Tabelle 6.5 kombiniert, so dass eine vage Aussage über die absolute Reduktion gemacht werden kann.

signal nachweisbar reduzieren und bei Wartungsarbeiten in den Detektorstationen die Gefahr besteht, dass die Signal- und HV-Kabel ungünstig angeordnet werden. Über die absolute Stärke der Reduktion kann keine Aussage gemacht werden, da dies individuell für jede Detektorstation unterschiedlich ist. Eine Aussage kann erst ein Feldversuch mit einer original LOPES-Messung erfolgen.

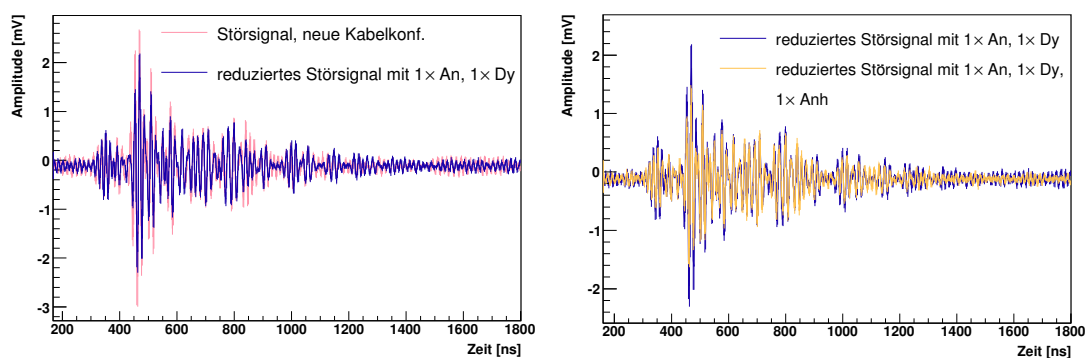


Abbildung 6.9: Vergleich des Störsignals mit der neuen Kabelkonfiguration mit der Konfiguration aus Tabelle 6.5 und Ferriten. Links: Störung ohne Ferrite und mit Ferriten (Red. 42,8 %). Rechts: Zusätzliche Reduktion durch weitere Installation eines weiteren Ferrits (1 Anh, Red. 56,6 % zu „Störsignal, neue Kabelkonf.“ links). Ein direkter Vergleich mit den Messungen aus Abbildung 6.8 ist nur bedingt möglich, da die dort dargestellten Messungen an einem anderen Tag stattfanden. Die Struktur des Störsignals der neuen Kabelkonfiguration (links, „Störsignal, neue Kabelkonf.“) hat sich im Laufe der Tage geändert („Störsignal, neue Kabelkonf“, Abbildung 6.5).

7 Reduktion der Störung in Luftschauermessungen

7.1 Die Messumgebung

In den bisherig beschriebenen Studien wurde gezeigt, wie die elektromagnetische Störung der e/γ -Detektoren, sowohl bei Messungen an einem Versuchsaufbau, als auch bei Messungen am KASCADE-Array, reduziert werden kann. Um ein Aussage darüber zu machen, ob die Störung auch in einer Radioemissionsmessung eines ausgedehnten Luftschauers reduziert werden kann, wurde die in Abbildung 7.1 gezeigte Messkonstellation verwendet. In den vier Detektorstationen um Antenne 13 wurden die Kabel neu verlegt und Ferrite installiert, wie sie für beide Detektoren die beste Reduktion der Störung lieferten (Kapitel 6). An den Detektorstationen um die übrigen Antennen des LOPES-Experimentes wurden keine Veränderungen vorgenommen. Damit nun eine Aussage über die Reduktion der elektromagnetischen Störungen gemacht werden kann, wurde versucht, im gemessenen Datensample hochenergetischer Luftschauer einige Luftschauer zu selektieren (Primärteilchenenergie $> \text{ca. } 10^{16} \text{ eV}$), deren Schauerzentrum genau zwischen Antenne 13 und einer anderen Antenne liegt. Idealerweise sind dafür Antenne 14 und 15 prädestiniert, da in diesem Fall das Schauerzentrum nahe den Detektorstationen liegt, an denen die Reduktionsmaßnahmen angewendet wurden.

7.2 Ergebnisse der Messungen

Da für einen hochenergetischen Luftschauer, dessen Schauerzentrum zwischen Antenne 13 und 14 oder zwischen Antenne 13 und 15 liegt, eine hohe Anzahl gemessener Luftschauer notwendig ist und in der zur Verfügung stehenden Zeit kein Luftschauer mit den genannten Parametern zwischen besagten Antennen gemessen wurde, wurden Schauer zu Hilfe genommen, die den gleichen Abstand zwischen Antenne 13 und einer beliebigen anderen Antenne von Nummer 11 bis 18 hatten. Antenne 19 und 23 wurden dabei nicht beachtet, da deren umliegenden Detektorstationen mit jeweils vier e/γ -Detektoren ausgestattet sind, was zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen würde.

Für den Vergleich der einzelnen Antennensignale sind in einem Zeitraum von 3 Wochen 36 Luftschauer ausgewählt worden, deren Primärenergie genügend hoch war und welche die Voraussetzungen für eine Radioemission erfüllen. Von diesen konnten 4 Stück zu einem Vergleich herangezogen werden, die in den Abbildungen 7.2-7.5 vorgestellt werden. Die angegebenen Werte für Primärenergie und Elektronenzahl sind nur Schätzwerte, da zum Zeitpunkt, als die Daten des KASCADE-Experiments mit der Rekonstruktionssoftware KRETA ausgewertet wurden, keine aktuelle Kalibration von KASCADE vorlag. Die Auswertung der Signale erfolgte mit der extra für die Messung von Radioemissionen in ausgedehnten Luftschauern entwickelte Software LOPES-Tools. Zum Zeitpunkt der Auswertung musste die Kohärenz von Radiosignalen eines Luftschauers zwischen verschiedenen Antennensignalen von LOPES30 noch sehr umständlich per Hand bestimmt, was sehr aufwendig ist. Diese Kohärenz wurde hier nicht

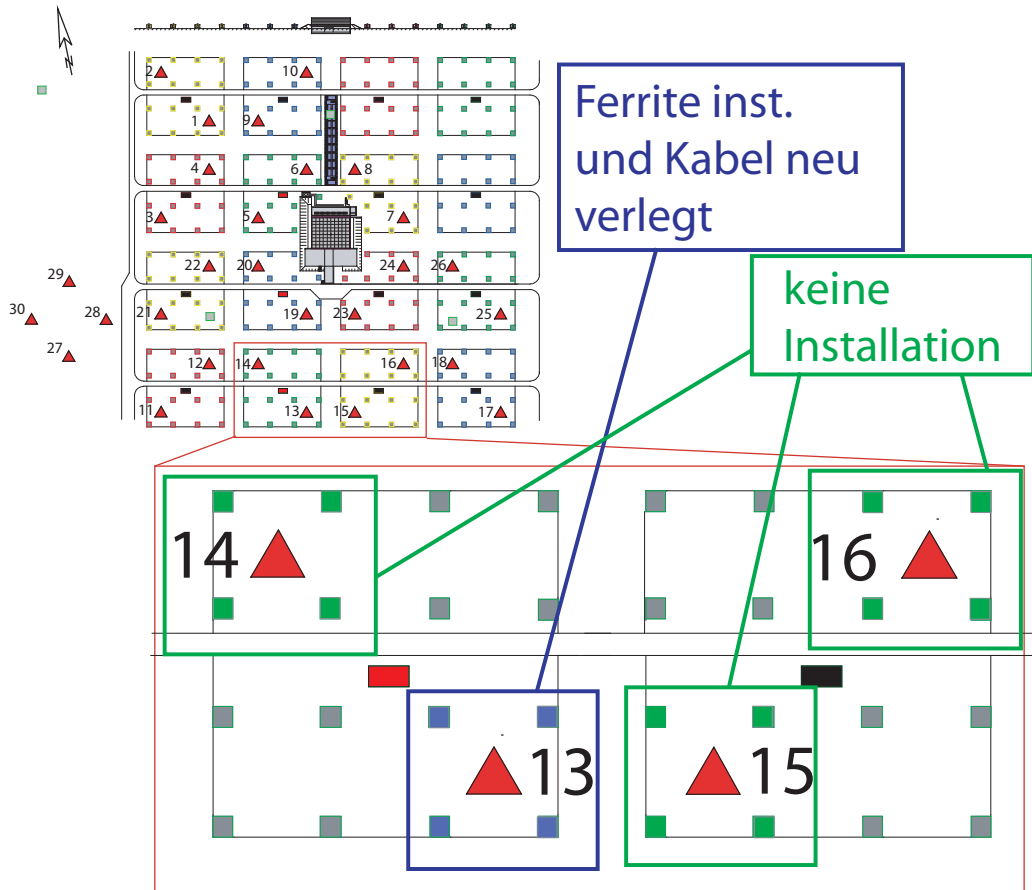


Abbildung 7.1: Layout der Messumgebung zur Messung der Störung. In den Detektorstationen um Antenne 13 wurden die Kabel neu angeordnet, so dass die Störung reduziert wird und zusätzlich Ferrite installiert. In den übrigen Detektorstationen des KASCADE-Arrays wurden keine Veränderungen vorgenommen.

bestimmt, weshalb in den Abbildungen teilweise kein kohärentes Radiosignal eines ausgedehnten Luftschauers zu sehen ist.

Die Messungen zeigen eine deutliche Reduktion des Störsignals der veränderten Detektoren. Allerdings kann dieses nicht vollständig eliminiert werden. Eine Aussage über die Verhältnisse der Energien in den Signalen kann derzeit nicht gemacht werden. Dafür wäre eine sogenannte Interpolation der Antennensignale nötig, da diese derzeit auf 80 MHz gesampelt sind und nicht die benötigte Information zur Berechnung der Energie enthalten. Eine derartige Funktion wird in nächster Zeit in den LOPES-Tools implementiert. Auch kann keine direkte Aussage über das Ende des Radiosignal des Luftschauers und den Beginn der Störung der Detektoren gemacht werden, da in den betrachteten Daten noch keine Phasenkorrektur der Signale durchgeführt wurde.

7.3 Diskussion der Ergebnisse

Eine Reduktion des Störsignals der Detektoren konnte mit der neuen Kabelkonfiguration und der Installation von Ferriten auch im KASCADE-Array verifiziert werden. Diese Ergebnisse stehen allerdings im Widerspruch zu den Resultaten, die bei Testmes-

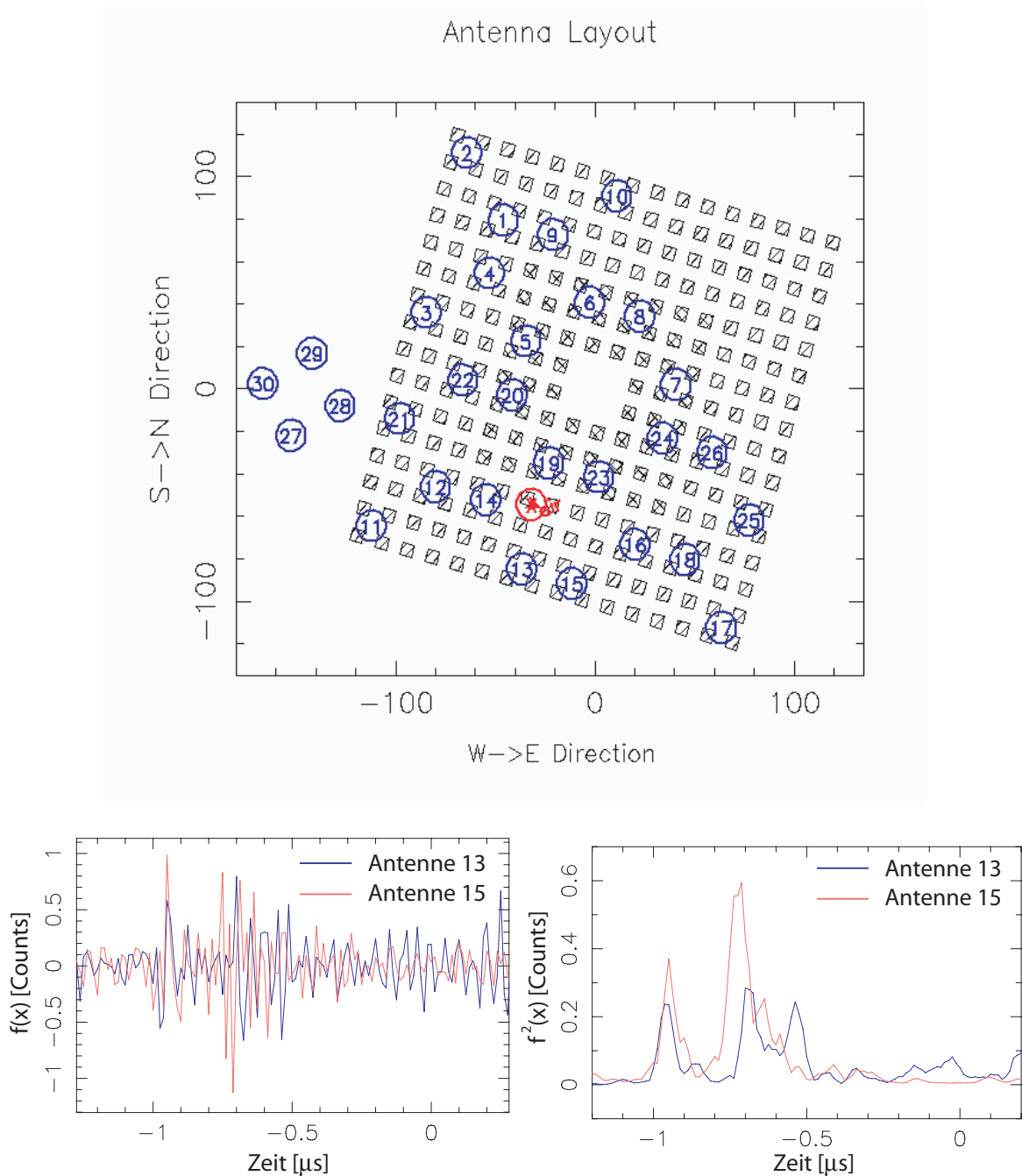


Abbildung 7.2: Luftschauer mit einer Energie von ungefähr $6 \cdot 10^{16}$ eV und ca. $6 \cdot 10^6$ Elektronen, der sein Schauerzentrum in der Nähe von Antenne 13 und 15 hat. Oben: Position des Schauerzentrums (rotes Kreuz), links: Zeitsignal, rechts: Leistung (Betragsquadrat) des Zeitsignals. Obwohl sich Antenne 13 näher am Schauerzentrum befindet, fällt das Störsignal (zwischen $-0,8$ und $-0,4 \mu$ s) der Detektoren geringer aus. Bei der Betrachtung der Leistung ist zu beachten, dass die Werte durch das Betragsquadrat leicht überschätzt werden. Bei $-0,95 \mu$ s ist das kohärente Radiosignal des Luftschauers zu sehen.

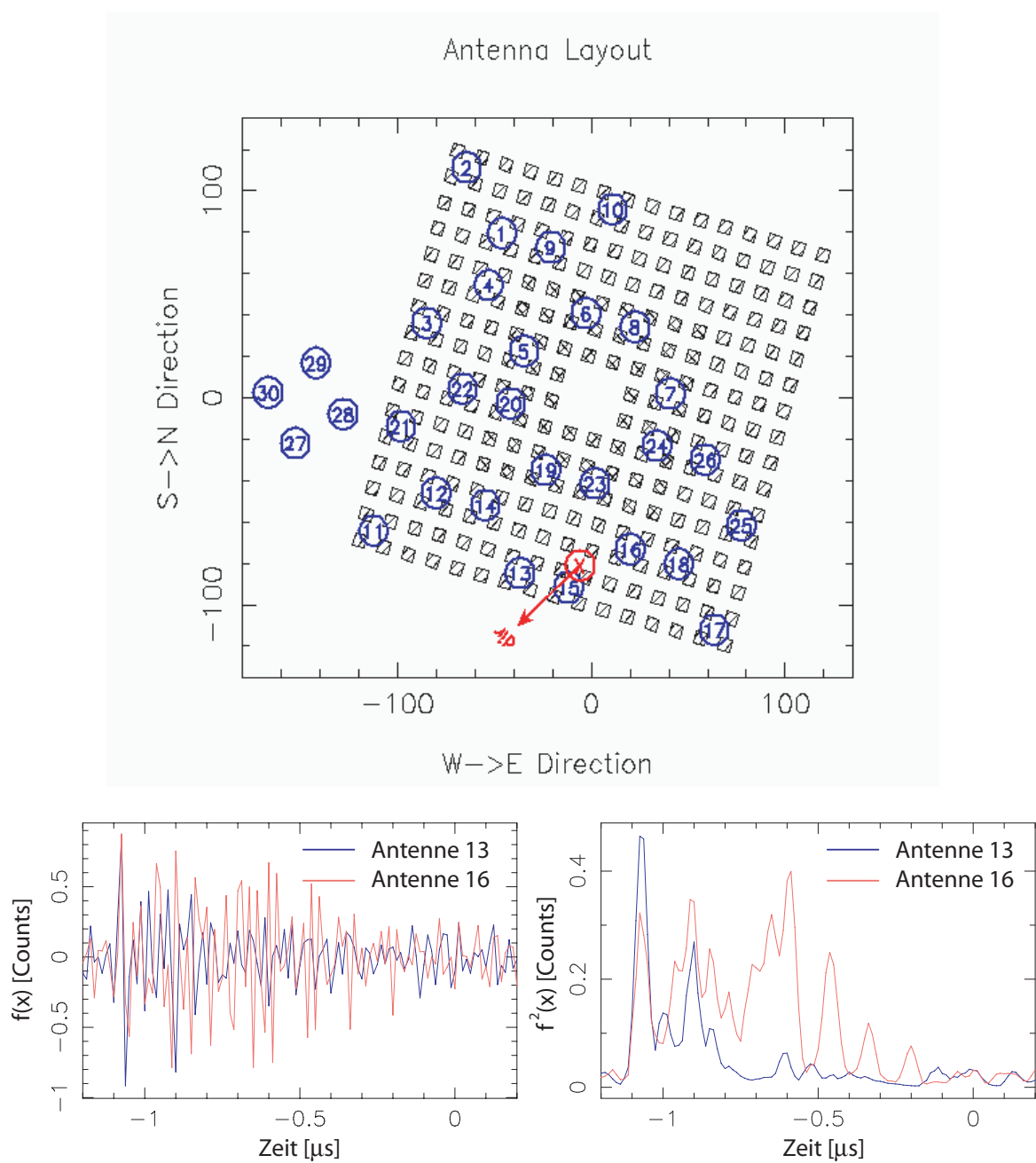


Abbildung 7.3: Luftschauer mit einer Energie von ungefähr $3 \cdot 10^{16}$ eV und ca. $2 \cdot 10^6$ Elektronen, der sein Schauerzentrum in der Nähe von Antenne 13 und 16 hat. Bei ca. $-1,1 \mu$ s ist ein kohärenter Radiopuls des Luftschauers zu erkennen. Das Störsignal der Detektoren beginnt bei ca. -1 bis $-0,8 \mu$ s, wobei das Signal zwischen -1 bis $-0,8 \mu$ s auch noch zum Radiosignal des Luftschauers gehören könnte. Es ist eine deutliche Reduktion der Störung der Detektoren zu erkennen.

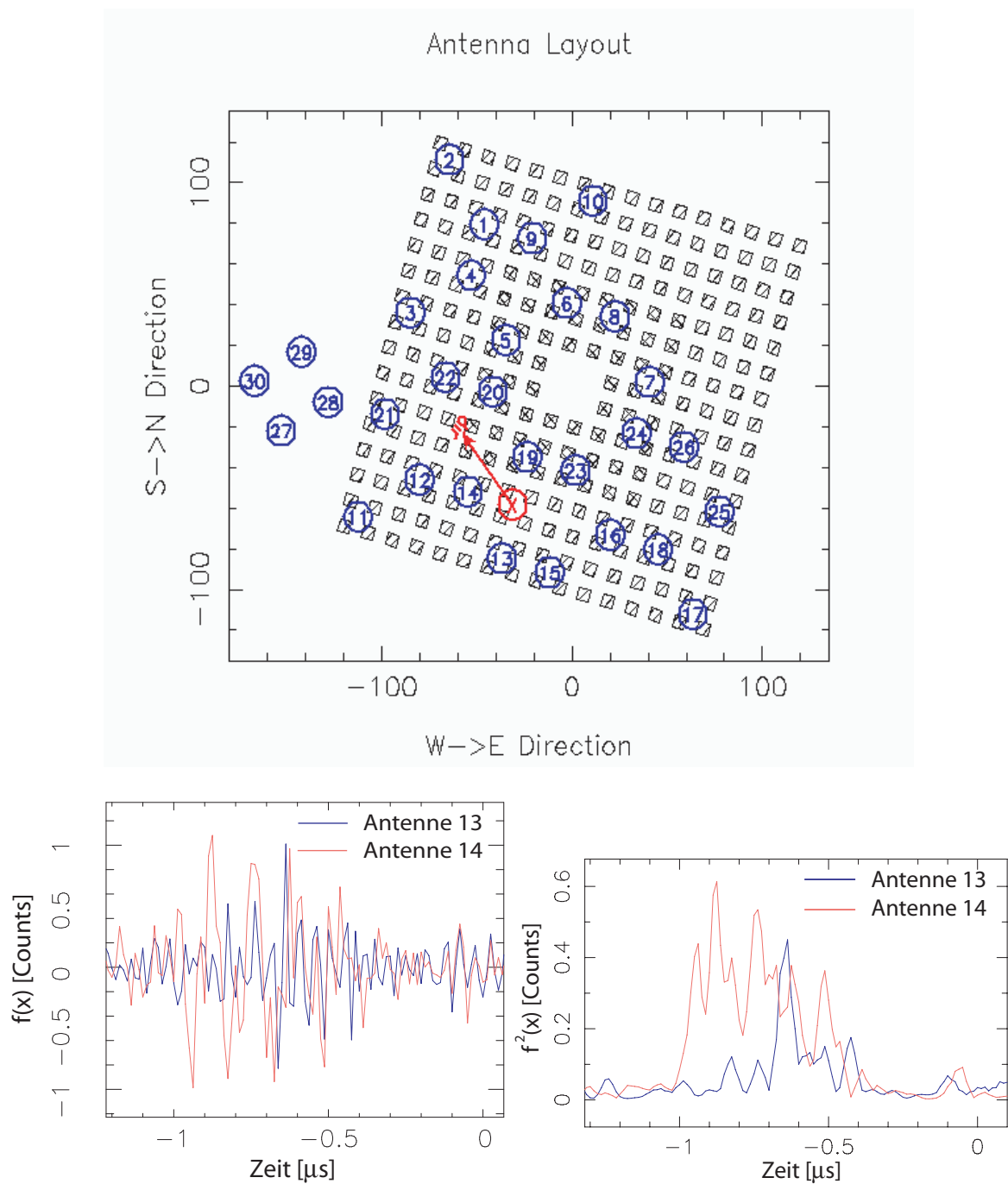


Abbildung 7.4: Luftschauer mit einer Energie von ungefähr $5 \cdot 10^{16}$ eV und ca. $3,5 \cdot 10^6$ Elektronen, der sein Schauerzentrum in der Nähe von Antenne 13 und 14 hat. Bei diesem Luftschauer ist der Radiopuls nur schwer zu erkennen. Die Störung der Detektoren ist bei Antenne 14 viel größer als bei Antenne 13. Es ist jedoch zu beachten, dass das Zentrum des Luftschauers ein wenig näher bei Antenne 14 liegt.

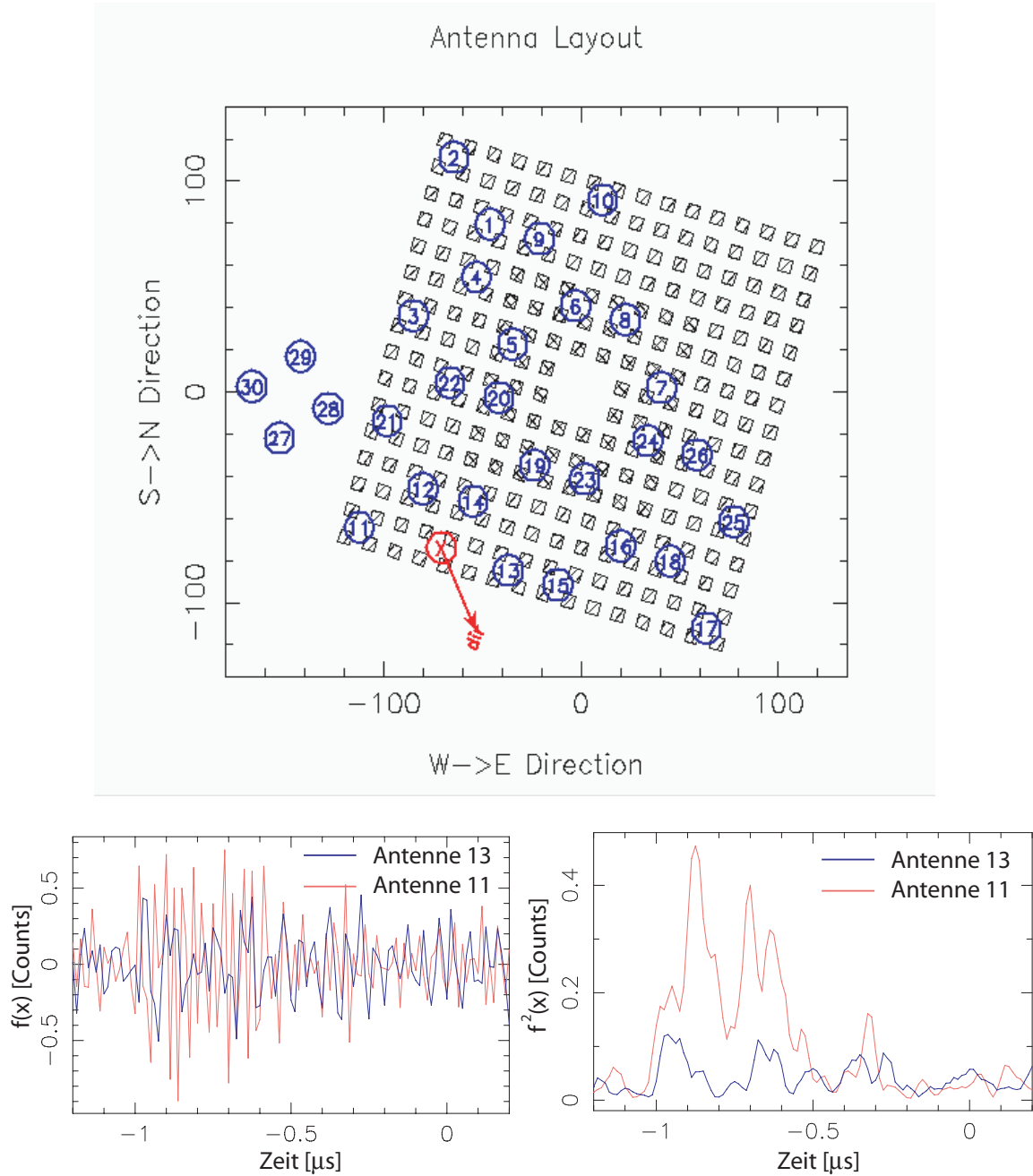


Abbildung 7.5: Luftschauer mit einer Energie von ungefähr $4 \cdot 10^{16}$ eV und ca. $3 \cdot 10^6$ Elektronen, der sein Schauerzentrum in der Nähe von Antenne 13 und 11 hat. Auch hier ist ein kohärenter Radiopuls nur schwer zu erkennen. In Antenne 11 ist die Störung durch die Detektoren deutlich höher als in Antenne 13. Außerdem beginnt sie deutlich früher als in Antenne 13, obwohl beide Antennen ungefähr die gleiche Entfernung vom Schauerzentrum haben. In diesem Fall könnte das stärkere Störsignal eventuell durch einen zusätzlichen Beitrag durch die elektromagnetische Kopplung im Erdreich erklärt werden (Anhang C), da das Radiosignal von Antenne 11 einen längeren Weg bis zur DAQ-Station als das von Antenne 13 zurücklegen muss. Auf diesem Weg ist es möglich, dass Störsignale auf den Kabelschirmen Signal- und HV-Kabel der Detektoren beispielsweise aus Cluster 2 in das Antennenkabel von Antenne 11 koppeln, bevor das eigentliche Radiosignal des Luftschauers die DAQ-Station erreicht.

sungen im KASCADE-Array nach den Studien in den Niederlanden erhalten wurden. Bei diesen Messungen, bei denen in den LOPES-Daten keine Reduktion der elektromagnetischen Störung durch Ferrite erkannt wurde, wurden allerdings Detektoren der inneren Cluster des KASCADE-Arrays mit Ferriten ausgestattet. Eine erneute Installation der Ferrite und der Neuordnung der Kabel an diesen Detektoren wäre sinnvoll, um Vergleichswerte mit den damals durchgeführten Messungen zu erhalten. Jedoch dürfen Effekte wie die elektromagnetische Kopplung im Erdreich nicht vernachlässigt werden. Abbildung 7.5 liefert Indizien dafür. Die Ferrite wurden damals in Detektorstationen um Antennen installiert, die weiter von der Datenaufnahme für die LOPES-Daten entfernt waren. Auf der Strecke von den Antennen zu der DAQ würde eine elektromagnetische Kopplung von dem Schirm eines Signalkabels auf den Innenleiter des Antennenkabels möglich. Eine Untersuchung dieses Effektes wird derzeit durchgeführt, konnte allerdings im Zeitrahmen dieser Arbeit noch nicht abgeschlossen werden. Dieser Effekt könnte sich bei den inneren Clustern des KASCADE-Arrays stärker auswirken, da dort vier Detektoren pro Detektorstation untergebracht sind.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Zur Messung der elektromagnetischen Störungen der e/γ -Detektoren des KASCADE-Arrays bei der Messung von Radioemissionen in ausgedehnten Luftschauern wurde ein eigens für diese Zwecke eingerichteter Versuchsaufbau erstellt. An diesem konnte eine deutliche Reduktion dieser Störung mit einer geeigneten Anordnung der Signal- und Hochspannungsversorgungskabel (HV-Kabel) und der Installation von Ferriten erreicht werden. Eine vollständige Eliminierung der Störung konnte jedoch nicht geleistet werden. Auch konnte eine Reduzierung mit Hilfe der Anbringung von selbstklebendem Kupferband und einem neuen Detektordeckel gemessen werden. Allerdings eignen sich die beiden letztgenannten Maßnahmen nicht für eine weitläufige Anwendung, da mit diesen Maßnahmen eine Erdung zur Detektormasse hergestellt wird. Damit ergibt sich eine leitende Verbindung der Erdung zwischen Detektorstation und Cluster-Elektronikstation, was bei einem Blitzeinschlag katastrophale Folgen für die elektrischen Geräte haben kann. Aufgrund dessen wurde nur die Reduktion derjenigen Maßnahmen, welche durch die neue Anordnung der Signal- und HV-Kabel, sowie die Installation von Ferriten, erreicht wurde, am KASCADE-Experiment gemessen. Auch bei diesen Messungen konnte das Störsignal, sowohl mit neuer Kabelkonfiguration als auch mit Ferriten reduziert werden. Allerdings kann keine Aussage über die absolute Reduktion des Störsignals gemacht werden, da dies für jeden Detektor des KASCADE-Arrays individuell verschieden ist. In dem gemessenen Spezialfall konnte eine Reduktion von 90 % an einem exemplarischen Detektor und 93 % an einem weiteren Detektor in der Energie des Störsignals erreicht werden. Diese Werte ergeben sich allerdings auch bereits mit den Maßnahmen, die in Kapitel 3 verwendet wurden, nur dass sich bei einer Neuverlegung der Signal- und HV-Kabel der Detektoren eine zusätzliche Reduktion der Störung ergibt. Auch konnte die Anzahl der verwendeten Ferrite pro Detektor von 9 auf 3 reduziert werden.

Im Rahmen einer original LOPES-Messung konnte die Störung auch reduziert werden, was durch den Vergleich von Antennensignalen benachbarter Antennen bestimmt wurde. Dies steht allerdings im Widerspruch zu den Ergebnissen, die bei der Installation von Ferriten am KASCADE-Array nach den Testmessungen in den Niederlanden erhalten wurden. Eine mögliche Begründung für diese Ergebnisse ist in Abschnitt 7.3 gegeben. Durch eine großflächige Anwendung am KASCADE-Array kann damit die Störung in den Antennendaten der LOPES-Antennen weiter reduziert werden.

8.2 Ausblick

8.2.1 Untersuchung von weiteren elektromagnetischen Störquellen

Da die elektromagnetische Störung der Detektoren nachweislich reduziert werden konnte, wäre eine Maßnahme zur Anwendung der Reduktionsmaßnahmen an den Detektoren, die um die Antennen installiert sind, sinnvoll. Es besteht allerdings die Gefahr,

dass ein Beitrag der elektromagnetischen Störung, die in den Antennendaten sichtbar ist, im Erdreich entsteht (siehe Anhang C). Eine Untersuchung dieses Beitrages kann durch die Auswertung der LOPES-Daten von Antenne 24 erfolgen, da diese für sechs Monate aus der LOPES-Messung herausgenommen wurde. Die Elektronik dieser Antenne blieb jedoch aktiv, zudem wurde das Antennenkabel von der Datenaufnahme zur Antennenposition im KASCADE-Array mit einem $50\ \Omega$ -Widerstand abgeschlossen. Es müsste aus dem vorhandenen Datensatz ein hochenergetischer Luftschauer (ca. 10^{17} eV) gefunden werden, bei dem die elektromagnetische Störung besonders große Anteile besitzt und dessen Schauerzentrum im Umkreis von ca. 10 m Entfernung von der Antennenposition liegt. Wenn eine elektromagnetische Kopplung über die Kabelschirme existiert, so müsste der in Anhang C beschriebene Effekt in den Antennendaten sichtbar sein, obwohl keine Antenne an das Antennenkabel angeschlossen war. Eine dahingehende Untersuchung ist derzeit im Gange, konnte allerdings vor Ende dieser Arbeit nicht mehr fertig gestellt werden.

8.2.2 Ausblick für zukünftige Experimente

Bei zukünftigen Experimenten mit der kombinierten Messung von ausgedehnten Luftschauern und deren Radioemission mit Teilchendetektoren und Antennen sollte darauf geachtet werden, dass die Teilchendetektoren einer eingehenden Untersuchung im Bezug auf elektromagnetische Störungen unterzogen werden, vor allem in den Frequenzbereichen, in denen eine Radioemission von ausgedehnten Luftschauern gemessen werden soll. Eine mögliche Störung kann dann mit geeigneten Maßnahmen schon beim Design der Teilchendetektoren reduziert werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Positionierung der Antennen in ausreichender Entfernung von den Teilchendetektoren. Damit kann ein eventuelles temporäres Störsignal der Teilchendetektoren aufgrund der Zeit, die das Signal vom Detektor zur Antenne benötigt, vom Signal der Radioemission bei der Datenanalyse separiert werden. Eine große Reduktion der Feldstärke des Störsignals ist nicht zu erwarten, da diese nur im Nahfeld proportional zur dritten Potenz der Entfernung abfällt. Im Fernfeld fällt diese nur proportional zu $\frac{1}{r}$ mit der Entfernung r ab. Zusätzlich wäre eine Erdung der Teilchendetektoren an Ort und Stelle sinnvoll, was allerdings Probleme aufwirft, wenn die Verbindung zur Datenaufnahme per Signalkabel erfolgt, da in diesem Falle Potentialunterschiede der Erdung zwischen Detektorstation und Datenaufnahme herrschen könnten. Insbesondere ist bei Blitzeinschlägen mit katastrophalen Folgen zu rechnen. Dies könnte umgangen werden, indem zur Datenübertragung eine Funkstrecke verwendet wird, wie dies beispielsweise bei einem Radio-Demonstrationsexperiment am Auger-Experiment geplant ist. Der Frequenzbereich dieser Funkstrecke sollte dann außerhalb des Messbereichs der Radioemission in ausgedehnten Luftschauern sein, um unnötige Komplikationen zu vermeiden. Sollte jedoch eine Übertragung der Daten mit Kabeln erforderlich sein, so dürfen Effekte wie die elektromagnetische Kopplung zwischen Kabelschirmen von Signalkabeln und deren Innenleitern nicht vernachlässigt werden. Das Problem kann umgangen werden, indem die Übertragung der Daten mit Glasfaser erfolgt oder aber die Signal- und HV-Kabel der Teilchendetektoren getrennt von den Antennenkabeln verlegt werden. Dabei ist zu beachten, dass ein Beitrag einer solchen Kopplung selbst in einem Abstand von 1 m der Kabel der Detektoren zu den Antennenkabeln noch nicht vernachlässigt werden kann. Ein zusätzlicher Schutz der Antennensignale in den Kabeln vor elektromagnetischen Störungen von Außen kann erreicht werden, indem doppelt geschirmte Koaxialkabel mit hoher Schirmwirkung verwendet werden.

Anhang

A Die schnelle Fouriertransformation (FFT)

Die schnelle Fouriertransformation ist ein algorithmus zur Berechnung der diskreten Fouriertransformation (DFT) eines zeitdiskreten Signals [PTVF02], [wik06]. Sie ergibt sich durch Diskretisierung der kontinuierlichen Fouriertransformation. Damit können näherungsweise die, in einem Signal vorhandenen Frequenzen, bestimmt werden. Die Auflösung der einzelnen Frequenzen hängt von der Länge und der Abtastrate des Zeitsignals ab. Je länger das Signal, wobei die Abtastrate konstant gehalten wird, desto größer ist auch die Frequenzauflösung. Die diskrete Fouriertransformation liefert eine Amplitude und eine Phase in Abhängigkeit von der Frequenz des Zeitsignals. In diesem Versuchsaufbau wurde allerdings nur der Wert der Amplitude verwendet, da nur die Leistung des Zeitsignals untersucht wurde. Mit der inversen DFT (IDFT) kann daraus wieder das Ausgangssignal rekonstruiert werden. Die mathematische Beschreibung der DFT für ein Signal der Länge N mit den Samples $U(t_k)$ lautet

$$F(\omega_n) = \sum_{k=0}^{N-1} e^{-i\omega_n \cdot t_k} U(t_k) \quad (\text{A.1})$$

und der Frequenz

$$\omega_n = 2\pi \frac{n}{NT} \quad n = 0 \dots N - 1 \quad (\text{A.2})$$

wobei T die Länge des Zeitintervalls angibt. Die IDFT lautet dann

$$U(t_n) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{i\omega_n \cdot t_k} F(\omega_n) \quad . \quad (\text{A.3})$$

Diese Gleichungen sind ein Prozess der Ordnung $O(N^2)$, was eine Berechnung langwierig und aufwendig macht. Um den Rechenaufwand zu reduzieren wurde die schnelle Fouriertransformation entwickelt, die den Prozess auf eine Ordnung von $O(N \log_2 N)$ verringert. Dazu wird Gleichung A.1 in gerade und ungerade Anteile zerlegt, was

$$F(\omega_n) = \sum_{k=0}^{N/2-1} e^{-i\omega_n(t_{2k})} U(t_{2k}) + \sum_{k=0}^{N/2-1} e^{-i\omega_n(t_{2k+1})} U(t_{2k+1}) \quad (\text{A.4})$$

ergibt. Diese Methode erfordert beispielsweise für $N = 10^6$ eine Rechendauer auf einem handelsüblichen Mikroprozessor von 30s im Gegensatz zur DFT, welche für gleiches N 2 Wochen benötigt. Der Algorithmus erfordert allerdings, dass N eine Potenz von 2 ist.

Ein zeitbegrenzttes Signal ist in der Regel an den Rändern abgeschnitten. Die diskrete Fouriertransformation fordert aber ein periodisch fortsetzbares Signal. Ist dieses nicht periodisch fortsetzbar, so enthält es Frequenzen, die nicht zu denen gehören, die von der diskreten Fouriertransformation berechnet werden. Dadurch werden diese Frequenzen durch Transformation auf benachbarte verteilt. Das bedeutet, dass das Spektrum

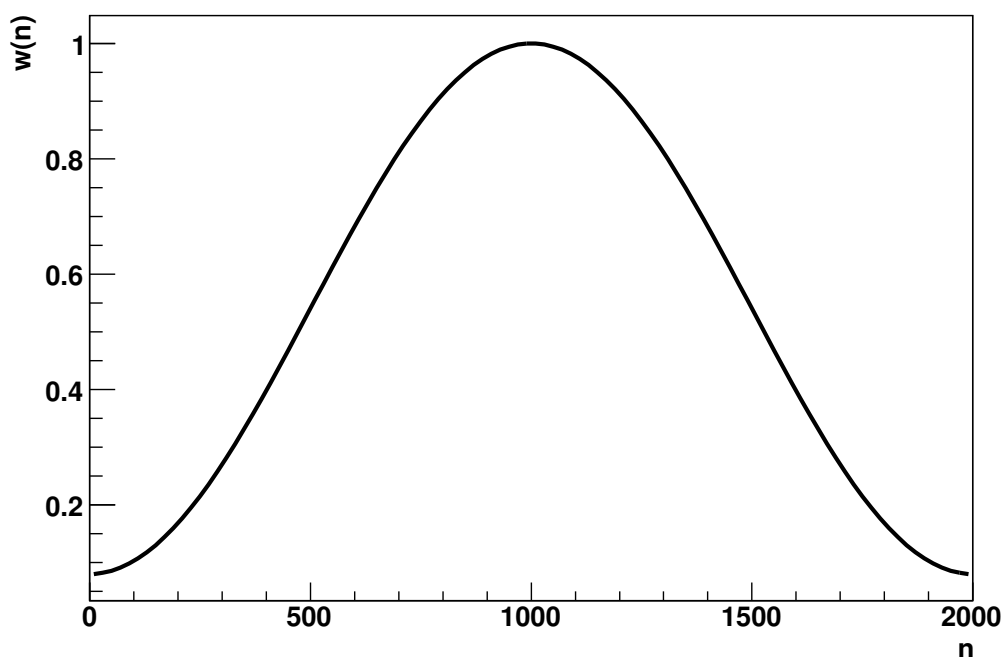


Abbildung A.1: Hamming-Fenster für $N = 2000$

„ausläuft“ und verzerrt wird, was als Leck-Effekt bezeichnet wird. Zur Verringerung dieses Effektes wird das Signal vor der Transformation mit einer sogenannten Fensterfunktion gewichtet. Diese sorgt dafür, dass die Werte an den Rändern gleich sind und damit für eine periodische Fortsetzbarkeit des Signals. Dabei wird das Signal mit einer Funktion multipliziert. Es gibt eine ganze Reihe von Fenstern, wovon das einfachste das Rechteckfenster ist. Bei dieser wird das Signal in einem ausgewählten Bereich mit 1 multipliziert. Außerhalb wird es zu Null gesetzt. Das Fenster, welches sehr häufig in der digitalen Signalverarbeitung und auch in dem verwendeten Oszilloskop angewandt wird, ist das Hamming-Fenster [OS99]. Dabei wird das Signal mit der Funktion

$$w(n) = 0,54 - 0,46 \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad \text{mit} \quad n = -\frac{N}{2} \dots \frac{N}{2} \quad (\text{A.5})$$

multipliziert. Sie ist in Abbildung A.1 für $N = 2000$ dargestellt.

Da das aufgenommene Störsignal fast über die gesamte Länge des Fensters läuft, kann die diskrete Fouriertransformation bzw. die FFT nicht zur Auswertung der Energie des Signals verwendet werden. Sie kann nur zur visuellen Betrachtung des Signals herangezogen werden, um eine Information darüber zu liefern, in welchem Frequenzbereich die Störung durch die Detektoren auftritt.

B Reflexionen am Kran

Der Spezialfall, der in Abschnitt 5.3 besprochen wurde, ist in Abbildung B.1 dargestellt. Wenn der Kran direkt über der Antenne steht, so könnten sich Störungen zusätzlich zu den bereits vorhandenen Reflexionen konstruktiv und destruktiv überlagern. Dies resultiert zum Teil in einem stärkeren Störsignal. In diesem Spezialfall lagen die Signal- und das HV-Kabel des Detektors auf der Vorderseite des Detektorkegels (wie in Abbildung B.1 dargestellt), d. h. in Richtung Antenne. Dadurch ist es möglich, dass die Störung bevorzugt in Richtung Kran emittiert wird, der diese in die Antenne reflektiert. Daraus resultiert eventuell eine größere Störung, als wenn der Kran nicht über der Antenne steht. Werden nun zusätzlich Ferrite installiert, so wirken sich die konstruktiv überlagerten elektromagnetischen Wellen geringer aus als ohne Ferrite. Daraus resultiert eine größere Reduktion der Störung, wenn der Kran über der Antenne steht.

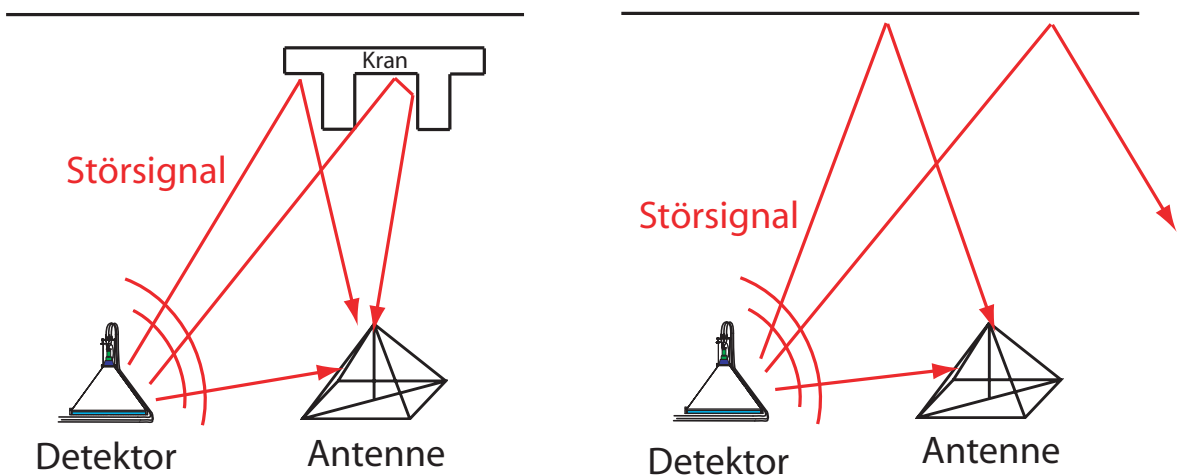


Abbildung B.1: Reflexion am Kran. Links: In diesem Fall wird die Störung mehrfach reflektiert und fällt von oben in die Antenne, wo diese aufgrund ihrer Richtcharakteristik sensitiver ist. Diese Störung können sich konstruktiv und destruktiv überlagern, so dass diese stärker ist, als wenn der Kran nicht direkt über der Antenne steht (rechts).

C Elektromagnetische Kopplung im Erdreich von KASCADE

Einen möglichen Kopplungsmechanismus zeigt Abbildung C.1. Das Störsignal, welches von den Photomultipliern der Detektoren kommt läuft auf dem Kabelschirm des Detektorsignalkabels. Da die Detektorstationen nicht vor Ort geerdet sind, läuft das Störsignal auf dem Kabelschirm bis zur Erdung des jeweiligen Clusters in der Cluster-elektronik. Auf diesem Weg ist eine Überkopplung vom Schirm des Detektorsignalkabels auf den des Antennensignalkabels möglich (in Abbildung C.1 durch die Impedanz Z_1 dargestellt). Von dem Schirm des Antennenkabels ist eine Kopplung auf den Innenleiter möglich (Z_2). Befindet sich das Störsignal nun auf dem Innenleiter des Antennenkabels, so gelangt dieses in die LOPES-Elektronik und wird dort durch den Verstärker zusätzlich verstärkt. Anschließend gelangt dieses verstärkte Störsignal in die Datenaufnahme von LOPES und ist in den Daten sichtbar.

Kopplung vom Schirm auf den Innenleiter eines Koaxialkabels

Normalerweise besteht der Schirm eines Koaxialkabels wie der des RG 213-Kabels des LOPES-Experiments aus verflochtenen kleinen Drähten. Bisher wurde angenommen, dass hochfrequente Störströme auf Schirmen von Koaxialkabel aufgrund des Skin效ekts auf deren Oberfläche fließen, womit keine Kopplung auf den Innenleiter möglich wäre. Neuere Forschungen haben gezeigt [Tie03], dass diese Ströme auf der Oberfläche der kleinen Drähte fließt, woraufhin eine Kopplung auf den Innenleiter möglich ist. Diese Impedanz, welche die Kopplung von Kabelschirm auf den Innenleiter beschreibt, wird Transferimpedanz genannt. Sie ist für ein infinitesimales Kabelelement der Länge dx definiert durch

$$Z'_T = \frac{dU_T}{I_a(x)dx} \quad (\text{C.1})$$

(Abbildung C.2). Darin beschreibt I_a den auf dem Kabelschirm fließenden Strom und U_T die von diesem Strom induzierte Spannung.

In Abbildung C.3 ist die komplexe Transferimpedanz in Abhängigkeit von der Frequenz für das RG 213-Signalkabel des LOPES-Experiments dargestellt. Diese könnte im Bereich zwischen 40 und 80 MHz einen Beitrag zur Kopplung eines Signals vom Schirm auf den Innenleiter haben.

Messung der Kopplung

Um diese mögliche Kopplung vom Schirm der Signalkabel des Detektors auf den Innenleiter des Antennenkabels nachzuweisen, wurde bei den Experimenten am Versuchsaufbau (Abbildung 4.8) eine Testmessung durchgeführt. Dazu wurde der Detektor auf eine Entfernung von 11 m zu der Antenne positioniert. Die Messung des Störsignals des Detektors erfolgte wie in Kapitel 5. Um eine Kopplung zwischen den Kabeln zu messen, wurden die Signalkabel auf ca. 12 m Länge nebeneinander gelegt. Direkt darauf wurden die Signalkabel wieder getrennt, wobei ein Abstand der Signal- und HV-Kabel

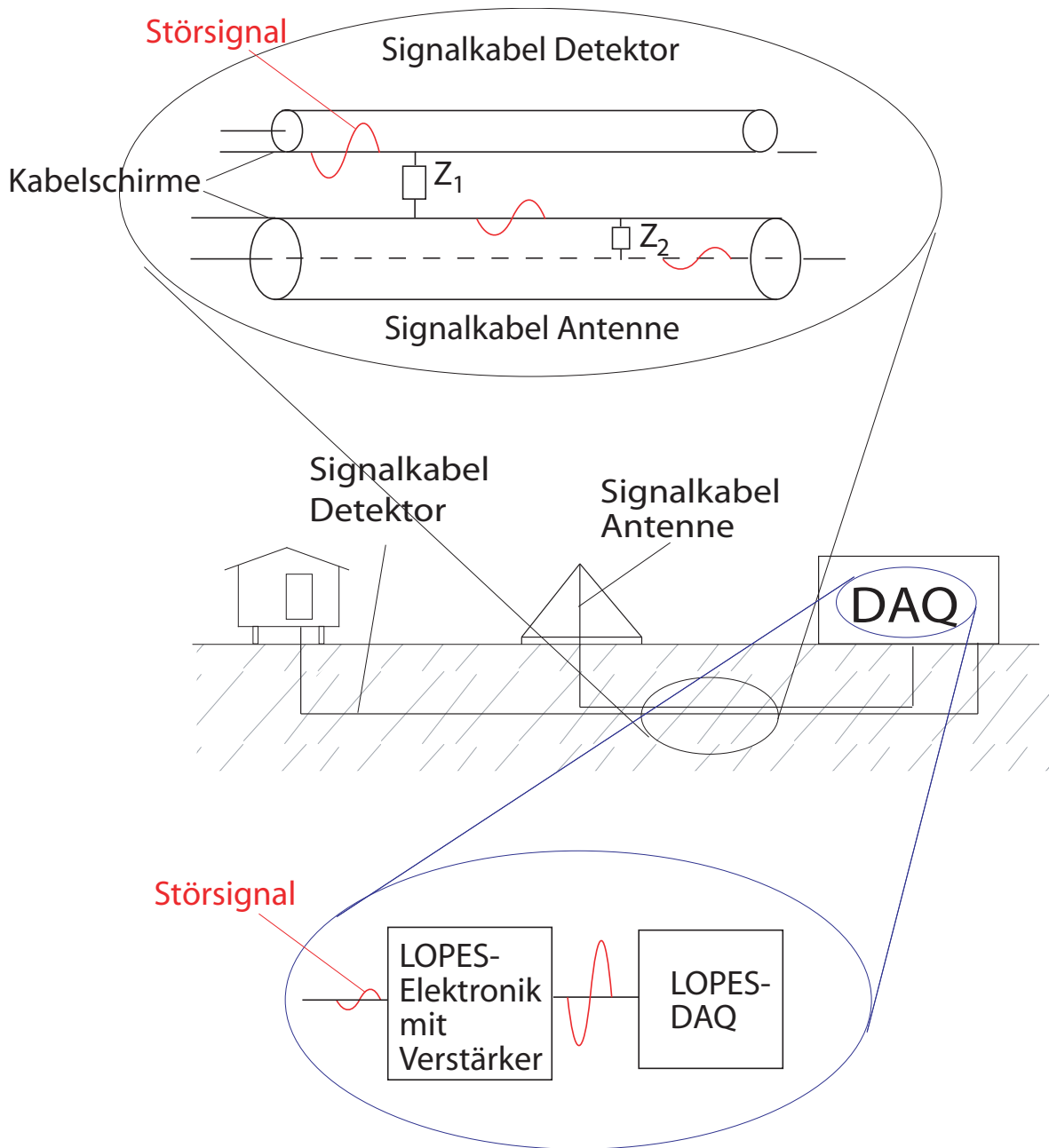


Abbildung C.1: Möglicher Kopplungsmechanismus zwischen den Signalkabeln von KASCADE und LOPES. Das Störsignal der Detektoren wird durch die Kapazität zwischen den Kabelschirmen auf den Schirm des Antennenkabels übertragen. Danach erfolgt eine Einkopplung auf den Innenleiter des Antennenkabels über die Transferimpedanz zwischen Kabelschirm und Innenleiter des Antennenkabels. In der LOPES-Elektronik wird dieses Signal verstärkt und ist in den Daten sichtbar.

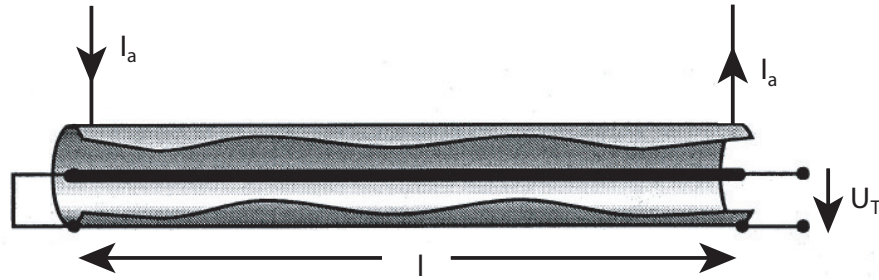


Abbildung C.2: Definition der Transferimpedanz für ein Koaxialkabel der Länge l . Durch den Strom I_a wird im Innenleiter die Spannung U_T induziert. [Tie03]

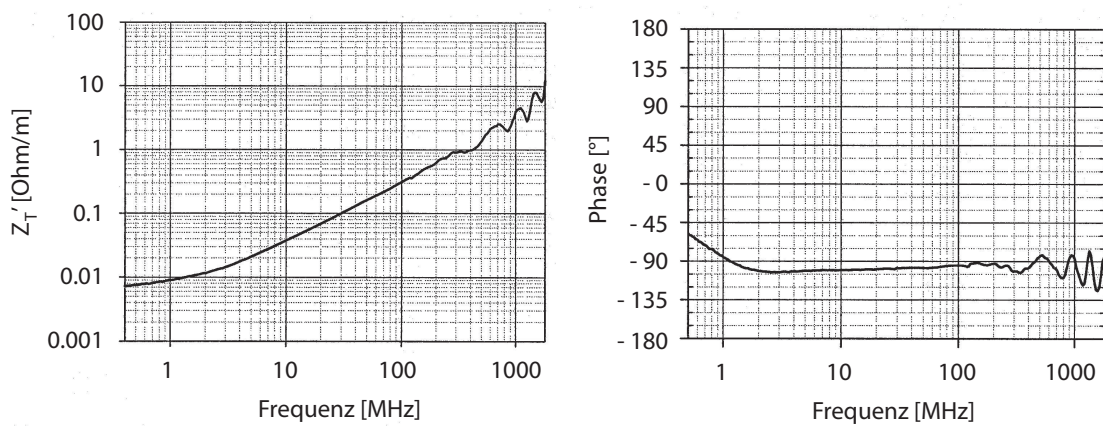


Abbildung C.3: Transferimpedanz in Ω/m für das RG 213-Koaxialkabel, welches im LOPES-Experiment als Antennensignalkabel verwendet wird. Im Bereich zwischen 40 und 80 MHz ist diese nicht vernachlässigbar [Tie03]. Die Messung erfolgte allerdings nur mit einem Kabel der Länge 1 m, weshalb nicht auf die Kabel-längen im LOPES-Experiment extrapoliert werden kann.

des Detektors zum Antennenkabel größer als 1 m eingehalten wurde. Das Signal von der Antenne zum Oszilloskop benötigt ca. 400 ns, die Detektorantwort vom Detektor zum Oszilloskop ca. 50 ns. Das Störsignal, welches auf dem Kabelschirm der Detektor-kabel läuft, benötigt ebenfalls ca. 50 ns zur Erdung durch das Oszilloskop. Deshalb wurden die Signal- und HV-Kabel so neben das Antennenkabel gelegt, dass ein auf den Innenleiter des Antennenkabels einkoppelndes Signal vor dem eigentlichen Störsignal, das von der Antenne aufgenommen wird, zu sehen ist. D.h. die 12 m Signalkabel des Detektors wurden neben die letzten 12 m des Antennenkabels gelegt. Dies bedeutet, dass ein einkoppelndes Signal ca. 88 m zeitlichen „Vorsprung“ vor dem Störsignal hat, das die Antenne liefert. Die Mittelwerte zweier solchen Messungen sind in Abbildung C.4 dargestellt. Die Leistungen zwischen 70 ns und 400 ns sind in Tabelle C.1 für alle Messungen dargestellt.

An den Ergebnissen ist zu erkennen, dass diese Kopplung von den Schirmen der Signal- und HV-Kabel der Detektoren auf den Innenleiter des Signalkabels der LOPES-Antenne existiert. Dieser Effekt bedarf auf jeden Fall einer weiteren Untersuchung. Denn es ist möglich, dass dieser Kopplungsmechanismus einen nicht zu vernachlässi-

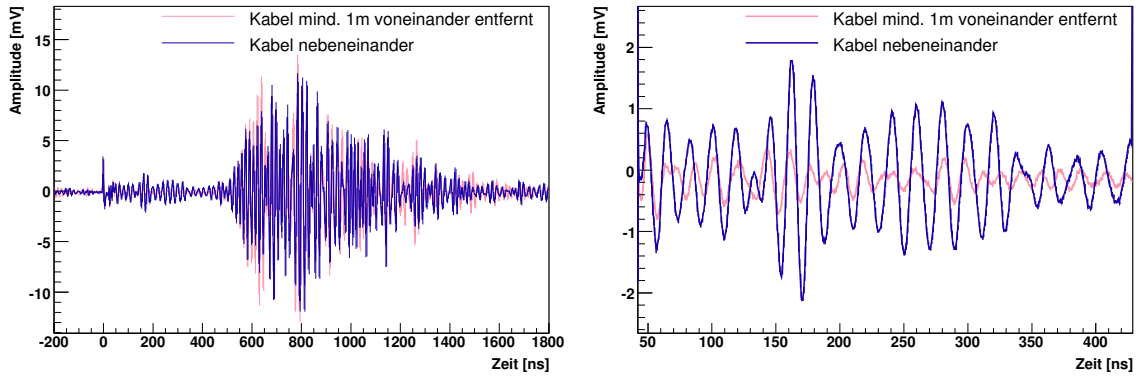


Abbildung C.4: Links: Darstellung der Störsignale mit Kabel des Detektors neben Antennensignalkabel, d. h. nebeneinander und Kabel des Detektors mindestens 1 m getrennt vom Antennensignalkabel. Rechts: Vergrößerung des Bereich zwischen 50 ns und 420 ns. Es ist deutlich der Unterschied zwischen den beiden Signalen zu erkennen.

genden Beitrag zum Störsignal der Detektoren liefert. Dies würde bedeuten, dass nicht nur die Detektoren, die einer bestimmten LOPES-Antenne in 8-9 m am nächsten stehen, sondern alle Signalkabel der Detektoren, die im KASCADE-Experiment parallel zu dem Antennenkabel dieser Antenne, einen Beitrag zum Störsignal liefern. Damit könnte auch das Phänomen erklärt werden, warum bereits bei den Messungen in den Niederlanden (Abschnitt 3.3) eine Reduktion der elektromagnetischen Störung erreicht wurde, die allerdings am LOPES-Experiment keine Reduktion mehr bewirkte.

Verlegungsart der Kabel	Energie [pJ] = [mW·ns]
mind. 1 m auseinander	$0,25 \pm 0,01 \pm 0,02 \pm 0,08$
nebeneinander	$2,75 \pm 0,04 \pm 0,15 \pm 0,27$
mind. 1 m auseinander	$0,23 \pm 0,01 \pm 0,01 \pm 0,08$
nebeneinander	$1,94 \pm 0,03 \pm 0,12 \pm 0,23$
mind. 1 m auseinander	$0,18 \pm 0,01 \pm 0,01 \pm 0,07$

Tabelle C.1: Vergleich der Energien im Zeitfenster $t_k = 70$ ns bis $t_k = 400$ ns, wenn die Kabel des Detektors neben dem Antennenkabel liegen und wenn die Kabel des Detektors mindestens 1 m vom Antennenkabel entfernt sind. Die Fehler sind wie folgt aufgelistet: statistischer Fehler, systematischer Fehler des Oszilloskops, Diskretisierungsfehler des Oszilloskops. Die Messungen wurden in der Reihenfolge von oben nach unten durchgeführt. Die extrem kleinen Energien ergeben sich durch die Aufsummierung in dem schmalen Zeitbereich. Es ist deutlich der Unterschied in den Energien zwischen nebeneinander und getrennt liegenden Kabeln zu sehen.

D Anordnung der Kabel



Abbildung D.1: Anordnung der Signal- und HV-Kabel des Detektors am Versuchsaufbau, so dass das Störsignal reproduzierbar reduziert werden kann. Die beiden schwarzen Kabel sind Anoden- und Dynodensignalkabel, das Rote ist das HV-Kabel.



Abbildung D.2: Anordnung der Signal- und HV-Kabel des Detektors am KASCADE-Experiment für Detektor 2 im Innern einer Detektorstation in Cluster 2, so dass das Störsignal reproduzierbar reduziert werden kann. Die beiden schwarzen Kabel sind Anoden- und Dynodensignalkabel, das Rote ist das HV-Kabel. Das Anodenkabel sollte möglichst nahe an der Wanne von Detektor 1 liegen (links im Bild zu erkennen), damit die kapazitive Wirkung zwischen Wanne und Bleiplatte (unter den Wannen der Detektoren) groß wird.

E Weitere Ergebnisse der Messungen am Versuchsaufbau

Ferritinstallation	Red. 1 [%]	Red. 2 [%]
1 × An	81,7 ± 1,8	82,5 ± 1,8
2 × An	84,5 ± 1,6	84,3 ± 1,6
1 × An, 1 × Dy	91,2 ± 0,9	89,6 ± 1,0
2 × An, 1 × Dy	92,9 ± 0,7	89,6 ± 1,0
2 × An, 1 × Dy, 1 × HV	94,1 ± 0,6	92,4 ± 0,8
2 × An, 1 × Dy, 1 × HV, 1 × HVh, 1 × Anv, 1 × Dyv	96,0 ± 0,3	96,2 ± 0,4
NL	fehlt noch ±	96,4 ± 0,4
Kupf.bd. An, Dy, HV	96,0 ± 2,5	96,9 ± 0,3

Tabelle E.1: Reduktion der elektromagnetischen Störung durch Ferrite und Kupferband mit der Anordnung der Kabel aus Abschnitt 5.4.1 in 3 m Abstand Detektor - Antenne

Ferritinstallation	Red. 1 [%]	Red. 2 [%]
1 × An	51,3 ± 4,9	85,2 ± 1,5
2 × An	60,6 ± 3,9	84,4 ± 1,6
1 × An, 1 × Dy	73,9 ± 2,6	91,1 ± 0,9
2 × An, 1 × Dy	82,3 ± 1,8	91,6 ± 0,8
2 × An, 1 × Dy, 1 × HV	83,5 ± 1,6	94,7 ± 0,5
2 × An, 1 × Dy, 1 × HV, 1 × HVh, 1 × Anv, 1 × Dyv	85,7 ± 1,4	94,8 ± 0,5
NL	84,5 ± 1,5	94,7 ± 0,5
Kupf.bd. An, Dy, HV	85,2 ± 1,5	92,4 ± 0,8

Tabelle E.2: Reduktion der elektromagnetischen Störung durch Ferrite und Kupferband mit der Anordnung der Kabel aus Abschnitt 5.4.1 in 5 m Abstand Detektor - Antenne

Drehung der Antenne	Ferritinstallation	Red. 1 [%]	Red. 2 [%]
0°	2 × An, 1 × Dy	83,3 ± 1,7	84,3 ± 1,6
45°	2 × An, 1 × Dy	82,1 ± 1,8	66,9 ± 3,3
90°	2 × An, 1 × Dy	86,9 ± 1,3	72,7 ± 2,7

Tabelle E.3: Reduktion der elektromagnetischen Störung durch Ferrite bei unterschiedlichen Polarisationen in 3 m Abstand Detektor - Antenne, wofür die Antenne um den angegebenen Winkel gedreht wurde

Drehung der Antenne	Ferritinstallation	Red. 1 [%]	Red. 2 [%]
0°	2 × An, 1 × Dy	71,9 ± 2,8	76,8 ± 2,3
45°	2 × An, 1 × Dy	94,1 ± 0,6	93,2 ± 0,7
90°	2 × An, 1 × Dy	89,4 ± 1,1	91,7 ± 0,8

Tabelle E.4: Reduktion der elektromagnetischen Störung durch Ferrite bei unterschiedlichen Polarisationen in 8 m Abstand Detektor - Antenne, wofür die Antenne um den angegebenen Winkel gedreht wurde

Abbildungsverzeichnis

2.1	Energiespektrum der kosmischen Strahlung	4
2.2	Schematische Darstellung eines ausgedehnten Luftschauers	5
2.3	Emissionsmechanismus der Radiostrahlung und Radioemission eines Luftschauers mit einer Primärteilchenenergie von $10^{17}eV$ bei unterschiedlichen Entfernungen vom Schauerkern	8
2.4	Layout von KASCADE-Grande und des KASCADE-Arrays	9
2.5	Künstlerische Darstellung des LOFAR-Experimentes [lof06].	11
2.6	Layout des LOPES-Experiments im KASCADE-Array	12
2.7	Schema der LOPES-Hardware	13
2.8	LOPES-Antennen im KASCADE-Experiment.	14
2.9	Darstellung von LOPES-Daten: Rohdaten und beamgeformte Daten . .	15
2.10	LOPES-Ergebnisse: mittlere Radiopulshöhe in Abhängigkeit von geomagnetischem Winkel, Myonzahl und Primärenergie.	15
3.1	Horizontale- und vertikales Richtdiagramm eines Dipols	19
3.2	Antennenzonen - Übergang vom Nah- ins Fernfeld	20
3.3	Inverted-Dipol-Antenne und ihre Richtcharakteristik	21
3.4	Richtcharakteristik der LOPES-Antenne	22
3.5	Beeinflussungsmodell [Sch96b] der elektromagnetischen Verträglichkeit .	22
3.6	Elektromagnetische Störungen der e/γ -Detektoren in den LOPES-Daten und Vergleich mit Energiedeposit	23
3.7	Detektorhütte in Maschendraht. Vergleich von Daten mit und ohne Maschendraht	24
3.8	Versuchsaufbau in Holland im Hochfrequenzlabor und deren Ergebnisse	25
3.9	Detektor mit Ferriten und Kupferband wie es in den Niederlanden getestet wurde	25
4.1	Mindestabstände für Freifeldmessungen [Sch96b].	28
4.2	Absorberräume	28
4.3	Darstellung des e/γ -Detektors	29
4.4	Photomultiplier	30
4.5	Datenaufnahme für das digitale Oszilloskop	33
4.6	Automatikfunktion des digitalen Oszilloskops	34
4.7	Versuchsaufbau - schematische Zeichnung	35
4.8	Versuchsaufbau - Photo	35
5.1	Einzelmessung der Detektorstörung	38
5.2	Fouriertransformierte der Einzelmessung in Abbildung 5.1	38
5.3	Mittelwerte für das Antennensignal der Störung und des Untergrundes	40
5.4	Mittelwerte für die Fouriertransformierte der Antennensignale aus Abbildung 5.3	40
5.5	Verschiebung der Detektorantwort auf Laserpulse	43

5.6	Verschiebung der Zeitsignale	44
5.7	Messfehler	46
5.8	Vergleich zwischen der Störung des Krans und der des Detektors	48
5.9	Antwort des Filters auf einen Deltapuls	49
5.10	Beschreibung der Kabelkomponenten	52
5.11	Fixierung der Signal- und HV-Kabel auf der Detektoroberfläche	52
5.12	Unterschied maximaler Amplituden im Störsignal mit verschiedenen Ferritinstallationen	55
5.13	FFT der Signale aus Abbildung 5.12	55
5.14	Vergleich zwischen dem reinen Störsignal und dem mit 3 Ferriten . . .	55
5.15	Vergleich zwischen dem reinen Störsignal und dem mit 7 Ferriten . . .	56
5.16	Vergleich der Störsignale mit und ohne Kupferband auf 2 m und 8 m Abstand	58
5.17	Vergleich der Störsignale alte und neue Kabelkonfiguration bei 2 m und 8 m	60
5.18	Vergleich der Störsignale neue Kabelkonfiguration bei 2 m und 8 m mit und ohne Ferrite	60
5.19	Vergleich der Störsignale der alten Kabelkonfiguration und dem neuen Deckel bei 2 m und 8 m	62
6.1	Layout des Versuchsaufbaus am KASCADE-Experiment	66
6.2	Vergleich Einzelmessung mit Mittelwert am KASCADE-Experiment . .	67
6.3	Unterschied maximaler Amplituden im Störsignal mit verschiedenen Ferritinstallationen bei Detektor 1	70
6.4	FFT der Signale aus Abbildung 6.3	70
6.5	Unterschied des Störsignal bei „ursprünglicher“ Kabelkonfiguration von Detektor 1 zur neuen Kabelkonfiguration	71
6.6	Unterschied maximaler Amplituden im Störsignal mit verschiedenen Ferritinstallationen bei Detektor 2	73
6.7	FFT der Signale aus Abbildung 6.6	73
6.8	Unterschied der Signale bei Detektor 2 mit ursprünglicher und neuer Kabelkonfiguration	74
6.9	Unterschied der Signale bei Detektor 2 mit neuer Kabelkonfiguration und Ferriten	76
7.1	Layout der Messumgebung zur Messung der Störung im Rahmen einer LOPES-Messung	78
7.2	Luftschauer mit dem Schauerzentrum zwischen Antenne 13 und 15 . . .	79
7.3	Luftschauer mit dem Schauerzentrum zwischen Antenne 13 und 16 . . .	80
7.4	Luftschauer mit dem Schauerzentrum zwischen Antenne 13 und 14 . . .	81
7.5	Luftschauer mit dem Schauerzentrum zwischen Antenne 13 und 11 . . .	82
A.1	Haming-Fenster	92
B.1	Reflexionen am Kran	93
C.1	Möglicher Kopplungsmechanismus zwischen Signalkabeln	95
C.2	Definition der Transferimpedanz [Tie03]	96
C.3	Transferimpedanz RG 213 in Abhängigkeit von der Frequenz [Tie03] . .	96

Abbildungsverzeichnis

C.4	Darstellung der Kopplung zwischen Kabel des Detektors und Innenleiter des Antennenkabels	97
D.1	Kabelkonfiguration, welche das Störsignal am Versuchsaufbau reproduzierbar reduzierte	98
D.2	Kabelkonfiguration, welche das Störsignal am KASCADE-Experiment reproduzierbar für Detektor 2 reduzierte	99

Tabellenverzeichnis

4.1	Eigenschaften des Stickstofflasers [Stü03]	30
4.2	Eigenschaften des digitales Oszilloskops	31
5.1	Abkürzungskonvention zur Beschreibung der Installationsorte	54
5.2	Reduktion durch Ferrite bei 2 m Abstand Detektor - Antenne	54
5.3	Reduktion durch Ferrite bei 8 m Abstand Detektor - Antenne	54
5.4	Reduktion durch Kupferband bei 2 m Abstand Detektor - Antenne	57
5.5	Direkter Vergleich, Kupferband + Ferrite, 2 m Abstand Detektor - Antenne	57
5.6	Direkter Vergleich, Kupferband + Ferrite, 8 m Abstand Detektor - Antenne	57
5.7	Vergleich Kabelkonfiguration 2 m	59
5.8	Vergleich Kabelkonfiguration 8 m	59
5.9	Vergleich - neuer Deckel 2 m	61
5.10	Vergleich - neuer Deckel 8 m	61
6.1	Abkürzungskonvention zur Beschreibung der Installationsorte	69
6.2	Reduktion der Störung mit Ferriten bei Detektor 1	69
6.3	Reduktion der Störung mit „besserer“ Kabelkonfiguration bei Detektor 1	71
6.4	Reduktion der Störung mit Ferriten bei Detektor 2	72
6.5	Reduktion der Störung mit „besserer“ Kabelkonfiguration bei Detektor 2	74
6.6	Reduktion der Störung mit „besserer“ Kabelkonfiguration bei Detektor 2 und Ferriten	75
C.1	Vergleich der Energien bei der Kopplung der Detektorsignalkabel auf den Innenleiter des Antennenkabels	97
E.1	Reduktion durch Ferrite und Kupferband in 3 m Abstand Detektor - Antenne	100
E.2	Reduktion durch Ferrite und Kupferband in 5 m Abstand Detektor - Antenne	100
E.3	Reduktion durch Ferrite bei unterschiedlichen Polarisationen in 3 m Abstand Detektor - Antenne	101
E.4	Reduktion durch Ferrite bei unterschiedlichen Polarisationen in 8 m Abstand Detektor - Antenne	101

Literaturverzeichnis

- [A⁺05] ARDOUIN, D. u. a.: Radio Detection of Extensive Air Showers with CODALEMA. In: *Proc. ICRC 2005* (2005)
- [All71] ALLAN, H. R.: Radio emission from extensive air showers. In: *Prog. Element. Part. Cosmic Ray Phys.* 10 (1971), S. 169–302
- [Ask62] ASKARYAN, G. A.: In: *Soviet Phys. JETP* 14 (1962), S. 441
- [Ask65] ASKARYAN, G. A.: In: *Soviet Phys. JETP* 21 (1965), S. 658
- [aug06] *Pierre Auger Observatory*. <http://www.auger.org>. Version: 4 2006
- [B⁺94] BORIONE, A. u. a.: A large air shower array to search for astrophysical sources emitting γ -rays with energies = $10^{14}eV$. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 346 (1994), S. 329–352
- [F⁺05] FALCKE, H. u. a.: Detection and imaging of atmospheric radio flashes from cosmic ray air showers. In: *Nature* 135 (2005), S. 313–316
- [FG03] FALCKE, H. ; GORHAM, P.: Detecting Radio Emission from Cosmic Ray Air Showers and Neutrinos with a Digital Radio Telescope. In: *Astropart. Phys.* 19 (2003), S. 477
- [Gre66] GREISEN, K.: In: *Phys. Rev. Lett.* (1966)
- [Hak05] HAKENJOS, A.: *Kalibration eines astronomischen Radioantennenfeldes durch eine externe Quelle*, Universität Karlsruhe, Diplomarbeit, 2005
- [Hän97] HÄNSLER, E.: *Statistische Signale*. 2. Springer Verlag, 1997
- [Hes11] HESS, V. F.: Über die Absorption der γ -Strahlung in der Atmosphäre. In: *Physikalische Zeitschrift* 12 (1911), S. 998
- [Hes12] HESS, V. F.: In: *Physikalische Zeitschrift* 13 (1912), S. 1084–91
- [HF03] HUEGE, T. ; FALKE, H.: Radio emission from cosmic ray air showers. Coherent geosynchrotron radiation. In: *A&A* 412 (2003), S. 19–34
- [HF05] HUEGE, T. ; FALCKE, H.: Radio emission from cosmic ray air showers: Simulation results and parametrization. In: *Astroparticle Physics* 24 (2005), S. 116–136
- [Hor06] HORNEFFER, A.: *Measuring Radio Emission from Cosmic Ray Air Showers with a Digital Radio Telescope*, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Diss., 2006

- [HR⁺05] HAUNGS, A. ; RISSE, M. u. a.: High-Energy Cosmic Rays Investigated by Air-Shower Measurements with KASCADE, KASCADE-Grande and LOPES 9th ICATPP Conference on Astroparticle, Particle, Space Physics, Detectors and Medical Physics Applications, 2005
- [J⁺65] JELLEY, J. V. u. a.: Radio pulses from extensive cosmic-ray air showers. In: *Nature* 205 (1965), S. 327–328
- [Kar04] KARK, K.: *Antennen und Strahlungsfelder*. Axel Springer Verlag, 2004
- [Köh05] KÖHLER, B.-U.: *Konzepte der statistischen Signalverarbeitung*. Springer Verlag, 2005
- [lab06] *National Instruments - Test and Measurement*. <http://www.labview.com>. Version: 5 2006
- [lof06] *LOFAR-Homepage*. <http://www.lofar.org>. Version: 4 2006
- [Mor77] MORRISON, R.: *Grounding and Shielding - Techniques in Instrumentation*. 2. John Wiley & Sons, Inc., 1977
- [OS99] OPPENHEIMER, A. V. ; SCHAFER, R. W.: *Zeitdiskrete Signalverarbeitung*. 3. R. Oldenburg Verlag, 1999
- [PTVF02] PRESS, W. H. ; TEUKOLSKY, S. A. ; VETTERLING, W. T. ; FLANNERY, B. P.: *Numerical Recipes in C*. 2. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2002
- [Rot95] ROTHAMMEL, K.: *Rothammels Antennenbuch*. 11. Franck-Losmos Verlags-GmbH & Co., 1995
- [Sch96a] SCHIELER, H.: *Konzeption, Entwicklung und Test des lokalen Datenerfassungssystems für das strukturierte Detektor-Array von KASCADE*, Universität Karlsruhe, Diss., 1996
- [Sch96b] SCHWAB, A. J.: *Elektromagnetische Verträglichkeit*. 4. Axel Springer Verlag, 1996
- [Stü03] STÜMPERT, M.: *Entwicklung eines Zeitkalibrationssystems für KASCADE-Grande*, Universität Karlsruhe, Diplomarbeit, 2003
- [Teka] TEKTRONIX (Hrsg.): *Benutzerhandbuch, Digital-Phosphor-Oszilloskope der Serie TDS3000*. Tektronix, (Manufacturing Part Number: 071-0279-01)
- [Tekb] TEKTRONIX (Hrsg.): *Programmer Manual, TDS3000 & TDS3000B Series Digital Phosphor Oscilloscopes*. Tektronix, (Manufacturing Part Number: 071-0381-02)
- [Tie03] TIEDEMANN, R.: Current Flow in Coaxial Braided Cable Shields. In: *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 45 (2003), Nr. 3, S. 531 – 537
- [Wie05] WIESBECK, W.: *Antennen und Antennensysteme*. 2005. – Skriptum zur Vorlesung

Literaturverzeichnis

[wik06] *Wikipedia - Die freie Enzyklopädie*. <http://www.wikipedia.org>. Version: 5
2006

[ZK66] ZATSEPIN, G. T. ; KUZMIN, V. A.: In: *JETP Lett.* 4 (1966), 78 S.

Glossar

AGN engl.: active galactic nucleus. Dies ist eine Galaxie mit einem besonders leuchtstarken Kern. Diese Leuchtkraft ist wahrscheinlich ein Hinweis auf ein massereiches Schwarzes Loch im Zentrum der Galaxie.

Azimut Dies ist die auf Norden bezogene Richtung zu einem Punkt auf der Erdoberfläche oder einem Gestirns.

Bandpassfilter Dies ist eine elektronische Komponente, die Signale in einem bestimmten Frequenzband $\Delta f = f_o - f_u$ durchlässt und Signale, die nicht in diesem Frequenzband liegen deutlich abschwächt (f_o : obere Grenzfrequenz, f_u : untere Grenzfrequenz).

Solar Burst Dies ist eine kurzzeitige Radioemission der Sonnenkorona. Auf diese folgt kurz darauf eine Sonnenerruption. Sie entsteht wahrscheinlich durch hochenergetische Elektronen, die im Magnetfeld der Sonnenkorona gefangen sind.

Supernova Eine Supernova ist die Explosion eines Sterns, bei der er selbst vernichtet wird. Seine Leuchtkraft nimmt dabei so stark zu, dass er eine ganze Galaxie damit überstrahlen kann.

Transferimpedanz Dies ist ein Bewertungskriterium für die Schirmung von Verkabelungssystemen. Sie wird auch Hochfrequenz-Kopplungswiderstand genannt und ist ein Maß für die Güte der Schirmung.

Selbständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, Martin Deutsch, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden, sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Karlsruhe, 21. Juli 2006

Danksagung

Herrn Prof. Dr. J. Blümer möchte ich für die Übernahme des Referats und die Ermöglichung dieser Arbeit am Institut für Kernphysik des Forschungszentrums Karlsruhe danken.

Für sein Interesse und Übernahme des Korreferats gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. H. Gemmeke.

Für die Betreuung dieser Arbeit und die Unterstützung beim Aufbau des Versuchsstandes, die immer währende Diskussionsbereitschaft und sehr viele wertvolle Anregungen danke ich Herrn Dr. H. Schieler.

Herrn Dr. A. Haungs möchte ich für die Betreuung und wertvolle Anregungen bei der Anfertigung dieser Arbeit danken.

Herrn N. Bechtold und Herrn B. Hoffmann möchte ich danken, da sie mich tatkräftig bei den Messreihen unterstützten und immer hilfreiche Tipps und Tricks für mich hatten.

Ohne das Fachwissen von Herrn Dipl.-Ing. O. Krömer wäre mir der Aufbau des Versuchsstandes und die Anfertigung dieser Arbeit sehr viel schwerer gefallen.

Auch danke ich Herrn Dipl.-Phys. Steffen Nehls, der mich bei der Analyse der LOPES-Daten tatkräftig unterstützt hat.

So dürfen auch die Mitglieder der KASCADE-Grande- und LOPES-Kollaboration nicht vergessen werden, die immer ein offenes Ohr für meine dummen Fragen zur Fehlerrechnung und Analyse der Daten hatten.

Außerdem bin ich auch den Technikern des KASCADE-Experiments zu dank verpflichtet, die immer eine kleine Reparatur durchgeführt und auch ein offenes Wort für Fragen hatten.

Nicht zu vergessen die Techniker des KATRIN-Experimentes, die während meinen einsamen Versuchen immer ein nettes Wort übrig hatten und den viel genannten „Kran“ nach seinem Gebrauch immer an den selben Ort außer Reichweite der Antenne gefahren haben.

Für die Korrektur dieser Arbeit möchte ich Herrn O. Mayer, Frau E. Bettini, Herrn C. Schwenger und Herrn Dr. J. Chassein danken.

Insbesondere möchte ich mich auch bei meinen Eltern bedanken, die mir während dieser Arbeit den Rücken gestärkt und diese mit Ihrer finanziellen Unterstützung erst ermöglicht haben.

