
Messung der Radioemission kosmischer Strahlung im kHz-Frequenzbereich

Diplomarbeit
von
Katrin Link

Karlsruhe im Mai 2009

Referent: Prof. Dr. Johannes Blümer
Korreferent: Prof. Dr. Günter Quast



Universität Karlsruhe (TH)
Forschungsuniversität • gegründet 1825



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Zusammenfassung

Hochenergetische kosmische Strahlung wird durch indirekte Messungen auf verschiedene Arten nachgewiesen, wobei jede Detektionsvariante ihre eigenen Vorteile hat. Eine dieser Methoden ist die Messung der vom Luftschauer emittierten Radiostrahlung im MHz-Bereich. Es gibt jedoch auch Hinweise darauf, dass Luftschauer zusätzlich im kHz-Bereich Radiostrahlung emittieren. In dieser Arbeit wird die Möglichkeit untersucht, diese Strahlung zu messen. Hierfür wurden mit drei Antennen innerhalb des KASCADE- und LOPES-Feldes Radiosignale im Bereich von 50kHz bis 500kHz aufgenommen. Dabei wurde insbesondere der Untergrund analysiert, um konstante Störsignale zu identifizieren und herauszufiltern. Zur Messung der Luftschauer wurde die Datennahme extern mit Hilfe von KASCADE auf hochenergetische Ereignisse getriggert. Bei der Analyse dieser Daten konnten keine Zusammenhänge zwischen den gemessenen Signalen und den rekonstruierten Luftschauerparametern gefunden und somit kein Luftschauersignal im kHz-Bereich nachgewiesen werden. Durch Kombination der Luftschauermessungen und der Untergrundanalyse ist es allerdings möglich, eine obere Grenze von $136^{+48}_{-47} \text{mV}/(\text{m}\cdot\text{MHz})$ für die vertikale Komponente der Feldstärke der von Luftschauern emittierten Radiostrahlung zu bestimmen. Dieser Wert liegt oberhalb gemessener Feldstärken von Luftschauersignalen aus älteren Experimenten, woraus geschlossen werden kann, dass der Rauschpegel im Forschungszentrum Karlsruhe zu hoch oder die Energie der gemessenen Luftschauer zu klein für eine Messung der Luftschauersignale im kHz-Bereich ist.

Measurement of kHz radio emission of air showers

There are several methods for high energy cosmic ray air shower detection, each providing different information. One of these techniques is measuring the air shower's radio emission in the MHz frequency range. However, some historic experiments suggest that air showers also emit radio signals in the kHz frequency range. The present work evaluates the feasibility of this detection method. Three antennas have been installed in the KASCADE and LOPES arrays, measuring the radio signal in the frequency range from 50kHz up to 500kHz. To identify and filter constant noise, in particular the background was analysed. The air shower measurements were triggered externally by KASCADE on high energies. The investigation of these data revealed no coincident relation between air shower parameters and the measured kHz signals. By combining the noise measurements and the data of the triggered high-energy events, an upper limit of $136_{-47}^{+48} \text{mV}/(\text{m}\cdot\text{MHz})$ was defined for the vertical field strength of radio emission induced by air showers. Since this value exceeds the measured field strength of older experiments, it can be concluded that the noise level on site of the Forschungszentrum Karlsruhe is too high or the energy of the triggering cosmic rays is too low for air shower measurements in the kHz-range.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Kosmische Strahlung	3
2.1. Schauerbildung	4
2.2. Das Spektrum der kosmischen Strahlung	6
3. Experimente zur kosmischen Strahlung in Karlsruhe	11
3.1. KASCADE-Grande	11
3.2. LOPES	12
4. Lang- und Mittelwellen	15
4.1. Empfangsmöglichkeiten	15
4.2. Wellenausbreitung	19
4.3. Rauschen	23
5. Historische Messungen	25
5.1. Experimente	25
5.2. Theoretische Überlegungen zum Entstehungsmechanismus	32
6. Aufbau des Experimentes	35
6.1. Testmessungen im Audiobereich	35
6.2. Antennen	37
6.3. Frequenzfilter	39
6.4. Messkarte	41
6.5. Kombination aller Bauteile	44
7. Untergrundanalyse	47
7.1. Untergrundsignale	47
7.2. Dynamische Spektren	53
7.3. Filterung unerwünschter Signale	55
7.4. Gefilterte Tagesverläufe	57
7.5. Kalibrierung des gemessenen Signals	59
7.6. Testpulse	62

8. Analyse	67
8.1. Analyse ausgehend von kHz-Daten	67
8.2. Analyse ausgehend von KASCADE-Grande-Daten	74
8.3. Ergebnis und Vergleich mit historischen Messungen	78
9. Zusammenfassung und Ausblick	81
A. Anhang	ix

1. Einleitung

Die Erforschung der kosmischen Strahlung ist ein wichtiger Bereich der Astroteilchenphysik. Die kosmische Strahlung liefert einerseits Informationen über unser Universum, andererseits können Informationen über die Elementarteilchen und deren Wechselwirkungen gewonnen werden. Die Teilchen der kosmischen Strahlung können Energien von 10^{10} eV bis über 10^{20} eV erreichen und liegen damit weit über dem Energielimit irdischer Beschleuniger. Über die Untersuchung der kosmischen Strahlung können somit Wechselwirkungsmodelle bei sehr hohen Energien überprüft werden. Dabei stellt sich die Frage, woher diese kosmischen Teilchen stammen, durch welchen Beschleunigungsmechanismus sie so hohe Energien bekommen und aus welchen Teilchen sich die kosmische Strahlung zusammensetzt. Für die verschiedenen Energiebereiche gibt es auf diese Fragen unterschiedliche Antworten und es kommen unterschiedliche Detektionsmethoden zum Einsatz. Eine direkte Messung der Strahlung ist nur außerhalb der Atmosphäre bei niedrigen Energien möglich. Da es beim Eintritt in die Atmosphäre zu Wechselwirkungen der Primärteilchen mit Luftmolekülen kommt und daraus ein Schauer aus Sekundärteilchen entsteht, können auf der Erde nur indirekte Messungen stattfinden. Diese Schauer können mit unterschiedlichen Detektoren gemessen werden. Zum Einsatz kommen Teilchendetektoren, welche die Sekundärteilchen auf der Erde messen, Fluoreszenz- und Cherenkovteleskope, welche die entstehenden Lichtsignale detektieren oder Radioantennen, welche die Radiostrahlung im MHz-Bereich, die durch den Geosynchrotroneffekt entsteht, empfangen.

Die Zusammensetzung und die Beschleunigerquellen der kosmischen Strahlung sind bei niedrigen Energien durch Experimente wie KASCADE-Grande¹ schon weitgehend bekannt. Doch bei höheren Energien bedarf es weiterer Untersuchungen. Dieser hochenergetische Bereich ist vor allem deshalb interessant, da dort die Möglichkeit besteht, aus der Ankunftsrichtung des Primärteilchens auf dessen Quelle zu schließen. Bei niedrigeren Energien ist die Ablenkung der Primärteilchen in den galaktischen und extragalaktischen Magnetfeldern zu groß.

Für die Teilchenphysik ist die Untersuchung des GZK-cut-off² ein wichtiger Aspekt: Bei sehr hohen Energien sollte eine Wechselwirkung der Protonen mit dem Mikrowellenhintergrund stattfinden, welche im Spektrum durch ein Abknicken oberhalb von 10^{20} eV sichtbar würde.

Bei der Messung der kosmischen Strahlung können die besten Ergebnisse mit so-

¹Karlsruhe Shower Core and Array Detector + Grande

²Greisen-Zatsepin-Kuzmin cut-off

genannten Hybrid-Experimenten erreicht werden, welche verschiedene Detektionsmethoden kombinieren. Jede dieser Methoden liefert andere Informationen:

Beispielsweise haben Teilchendetektoren eine gute örtliche Auflösung am Erdboden und Fluoreszenzteleskope sind besonders sensitiv auf die Energie des Primärteilchens. Daher besteht weiterhin ein Interesse, neue Detektionsmöglichkeiten zu finden.

Eine bisher nicht genutzte Möglichkeit könnte die Messung von Radioemission im kHz-Bereich sein. Es gibt Hinweise darauf, dass die kosmische Strahlung neben der Radiostrahlung im MHz-Bereich auch Strahlung im kHz-Bereich durch einen bisher unbekanntem Mechanismus emittiert. Diese Detektionsmöglichkeit wurde im Rahmen dieser Arbeit getestet. Hierfür wurden neue Antennen und ein neues Aufnahmesystem in Karlsruhe innerhalb des KASCADE- und LOPES-Feldes aufgebaut und Messungen durchgeführt.

In **Kapitel 2** wird die kosmische Strahlung über das gesamte Spektrum beschrieben und die Entstehung von Luftschauern erläutert.

In **Kapitel 3** werden die in Karlsruhe betriebenen Experimente KASCADE-Grande und LOPES vorgestellt, auf deren Messungen in dieser Studie zurückgegriffen wurde.

Bei den gemessenen Frequenzen handelt es sich um Strahlung im Langwellen- und Mittelwellenbereich. Deren Eigenschaften und Empfangsmöglichkeiten werden in **Kapitel 4** dargestellt.

Einige historische Experimente zur Radioemission von Luftschauern im kHz-Bereich und theoretische Überlegungen zum Emissionsmechanismus sind in **Kapitel 5** zusammengefasst.

Der Aufbau des Experimentes zur kHz-Messung mit allen dazugehörigen Komponenten wird in **Kapitel 6** beschrieben.

Die Auswertung der gemessenen Daten findet in den anschließenden Kapiteln statt: In **Kapitel 7** wird der Rauschuntergrund untersucht und Möglichkeiten zur Minimierung dieses Rauschens angeführt.

In **Kapitel 8** werden die getriggerten Messungen auf Signale aus Luftschauern geprüft.

Kapitel 9 gibt eine Zusammenfassung und einen Ausblick darauf, wie das Experiment verbessert werden könnte.

2. Kosmische Strahlung

Die kosmische Strahlung wurde im Jahr 1912 von Viktor Hess mit Hilfe von mehreren Ballonflügen entdeckt. Er stellte fest, dass mit zunehmender Höhe auch eine höhere ionisierende Strahlung messbar war, welche er Höhenstrahlung nannte. Aus dieser Entdeckung ließ sich schließen, dass die Strahlung nicht nur von der Erde stammen kann, sondern ihren Ursprung auch außerhalb der Atmosphäre haben muss. In den folgenden Jahren wurde durch intensive Messungen festgestellt, dass es sich bei der kosmischen Strahlung um geladene Teilchen handelt, welche einen großen Energiebereich abdecken. Der Fluss der Teilchen nimmt dabei mit steigender Energie stark ab: Bei 10^{12} eV werden zehn Teilchen pro Quadratmeter und Minute gemessen, bei 10^{18} eV dagegen nur noch 65 Teilchen pro Quadratkilometer und Jahr. Warum der Teilchenfluss zu höheren Energien so stark abfällt, ist noch nicht vollständig geklärt. Dies liegt darin begründet, dass auch die Entstehungs- und Beschleunigungsmechanismen vor allem für Teilchen hoher Energien noch unbekannt sind. Unklar ist auch, wie der Verlauf des Spektrums bei Energien oberhalb von 10^{20} eV generell aussieht, da hier bisherige Experimente noch nicht genügend Statistik liefern konnten. Diese großen Variationen in Energie und Teilchenfluss machen es unmöglich, den gesamten Energiebereich mit nur einem Experiment ausmessen zu können. Für die verschiedenen Energiebereiche müssen daher unterschiedliche Messtechniken angewendet werden.

Außerhalb der Atmosphäre können die Teilchen der kosmischen Strahlung mit Ballon- oder Satellitenexperimenten direkt gemessen werden. Oberhalb einer Energie von $5 \cdot 10^{14}$ eV sind wegen des geringen Teilchenflusses große Detektorflächen und lange Messzeiten nötig, welche sich nur auf der Erde realisieren lassen. Außerdem ist die Energie der Teilchen so hoch, dass sie in kleinen Detektoren nicht mehr gestoppt werden können und so keine Energiemessung mehr möglich ist. Am Erdboden ist jedoch nicht mehr direkt das Teilchen der kosmischen Strahlung messbar. Das Primärteilchen stößt auf dem Weg durch die Atmosphäre mit Luftmolekülen zusammen und produziert dabei neue Teilchen. Diese können wiederum wechselwirken und dadurch weitere Teilchen erzeugen. So entsteht ein ausgedehnter Luftschauer aus Sekundärteilchen, welcher dann am Erdboden mit Teilchendetektoren gemessen werden kann. Der Teilchenschauer emittiert außerdem Radiostrahlung, Cherenkov- und Fluoreszenzlicht. Diese Effekte können ebenfalls zur Detektion genutzt werden.

Im Folgenden wird zuerst die Entstehung der Luftschauer erklärt und dann das

Spektrum für verschiedene Energiebereiche näher betrachtet.

2.1. Schauerbildung

In der Atmosphäre kommt es zu Wechselwirkungen zwischen den Primärteilchen der kosmischen Strahlung und den Luftmoleküle. Dabei entstehen Sekundärteilchen, welche wiederum wechselwirken. So entsteht ein Schauer aus verschiedenen Teilchen, welcher sich in drei Komponenten aufteilen lässt: die hadronische, die elektromagnetische und die myonische Komponente.

Hadronische Komponente Bei Hadronen handelt es sich vorwiegend um Kaonen und Pionen sowie um Protonen und Neutronen. Diese Komponente konzentriert sich um die Schauerachse und hat abhängig von der Energie eine laterale Ausbreitung von bis zu 30m. Außerdem ist die Ausbreitung in Richtung der Schauerachse bei dieser Komponente am geringsten, da die Pionen schnell zerfallen und es bei den Protonen und Neutronen zu weiteren Wechselwirkungen mit Luftmoleküle kommt. Durch den Zerfall der π^0 entstehen γ -Quanten, welche zur elektromagnetischen Komponente beitragen, und durch den Zerfall der π^+ und der π^- entstehen Myonen und myonische Neutrinos. So erreichen nur vereinzelt und nur bei sehr hohen Primärenergien Hadronen die Erdoberfläche. Bei der Wechselwirkung von Neutronen und Protonen entstehen weitere Hadronen mit geringerer Energie.

Elektromagnetische Komponente Diese Komponente besteht aus Elektronen, Positronen und γ -Quanten und macht etwa 90% der Teilchen im Schauer aus. Die hochenergetischen γ -Quanten entstehen aus dem Zerfall der Pionen und können durch Paarbildung Elektronen und Positronen erzeugen. Diese bilden durch Bremsstrahlung wieder γ -Quanten, aus welchen erneut über Paarbildung Elektronen und Positronen entstehen können. Somit nimmt die elektromagnetische Komponente immer mehr an Teilchen zu. Dies geschieht solange, bis die neu entstehenden Teilchen nicht mehr genügend Energie für Bremsstrahlung und Paarbildung besitzen und somit über Ionisationsprozesse beziehungsweise Comptonstreuung ihre Restenergie verlieren und die Anzahl an elektromagnetischen Teilchen wieder abnimmt. Dieser Punkt wird auch als Schauermaximum bezeichnet. Die Lateralverteilung dieser Komponente kann auf Meereshöhe bis zu mehreren hundert Metern weit sein. Diese Komponente ist für die Radioemission verantwortlich.

Myonische Komponente Zur myonischen Komponente zählen neben den Myonen auch die myonischen Neutrinos. Diese Komponente hat die größte Reichweite und kann in die Erde eindringen, die Neutrinos diese sogar durchqueren. Zwar zerfallen die Myonen ebenso wie die Pionen in Elektronen, Positronen und

Neutrinos, jedoch ist die Lebensdauer der Myonen deutlich länger, so dass die meisten Myonen die Erdoberfläche schon vor ihrem Zerfall erreicht haben.

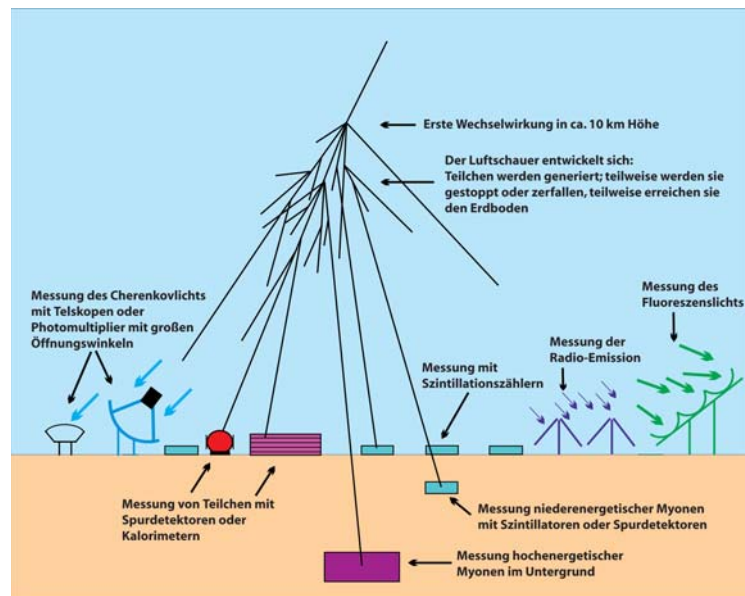


Abbildung 2.1.: Schematische Ansicht eines Luftschauers und seiner Detektionsmöglichkeiten nach [22]

Die Teilchen der verschiedenen Komponenten bilden auf diese Weise eine sogenannte Schauerfront, welche am Erdboden eine Dicke von etwa einem Meter und eine Ausdehnung von mehreren hundert Metern hat, siehe Abbildung 2.1. Die unterschiedlichen Komponenten können am Boden mit verschiedenen Detektoren gemessen werden. Dabei werden meistens nicht sämtliche Teilchen erfasst, sondern je nach Detektorgröße und -fläche nur ein Teil der Teilchen, woraus jedoch die Gesamtzahl der Teilchen sowie die Form und Größe der Schauerfront bestimmt werden können. Aus der Anzahl der gemessenen Teilchen, ihrer Verhältnisse zueinander, ihrer Energie und ihrer Verteilung können Aussagen über das Primärteilchen gemacht werden: aus der zeitlichen Verteilung der Teilchen am Erdboden kann die Richtung, aus welcher der Luftschauer kam, rekonstruiert werden; aus dem Verhältnis von Elektronen zu Myonen, kann ermittelt werden, ob es sich bei dem Primärteilchen um ein Proton oder einen Eisenkern gehandelt hat; aus der Anzahl der gemessenen Myonen lässt sich abschätzen, welche Energie dieses Primärteilchen hatte.

Um diese Eigenschaften korrekt bestimmen zu können, werden exakte Simulationen und Wechselwirkungsmodelle benötigt. Bei niedrigen Energien kann man die Wechselwirkungen der Teilchen auch durch Beschleunigerexperimente ermitteln. Bei höheren Energien müssen diese Wechselwirkungen extrapoliert werden und die Ergebnisse können nur über die kosmische Strahlung getestet werden, da diese Energien noch nicht durch Beschleuniger erreicht werden können. Um trotzdem auch bei hohen

Energien die Eigenschaften der Luftschauer genau ermitteln zu können, setzt zum Beispiel das Pierre-Auger-Observatorium auf Hybridtechnik und nutzt dabei noch weitere Möglichkeiten Informationen über Luftschauerparameter zu erhalten. Das Pierre-Auger-Observatorium kombiniert Teilchendetektoren mit Teleskopen, welche das Fluoreszenzlicht, das die Luftschauer auf ihrem Weg zur Erde aussenden, messen [25]. Diese Technik ermöglicht eine bessere Bestimmung der Primärenergie. Die Kombination verschiedener Techniken ist vielversprechend und eine Integration weiterer Messtechniken, wie zum Beispiel der Messung der Radioemission, erstrebenswert und in Planung. Dazu wird die Radioemission im MHz-Bereich von Experimenten wie LOPES¹ detailliert untersucht, um zu lernen, welche Informationen aus den Radiopulsen erhalten werden können. Dies ist jedoch nur möglich, wenn bekannt ist, auf welchen Emissionsmechanismus die Radiostrahlung zurückzuführen ist.

2.2. Das Spektrum der kosmischen Strahlung

Das Spektrum der kosmischen Strahlung, siehe Abbildung 2.2, lässt sich auf Grund seines Verlaufes in verschiedene Bereiche einteilen. Im niedrigsten Energiebereich, bis 10^{10} eV, ist der Verlauf des Spektrums bestimmt durch den geomagnetischen cut-off und die solare Modulation. Oberhalb von 10^{10} eV folgt das Spektrum einem Potenzgesetz:

$$\frac{d\phi}{dE} \propto E^{-\gamma}$$

Jedoch ist γ nicht für alle Energien konstant, sondern wechselt mindestens zweimal signifikant seinen Wert. Dies führt zu einer Einteilung in drei weitere Energiebereiche. Der erste Wechsel von $\gamma=2,7$ auf $\gamma=3,1$ findet bei etwa $4 \cdot 10^{15}$ eV statt und wird als Knie der kosmischen Strahlung bezeichnet. Der zweite Wechsel wird als Knöchel bezeichnet und tritt bei einer Energie von etwa $5 \cdot 10^{18}$ eV auf. Hier verringert sich der Wert wieder auf etwa $\gamma=2,7$.

2.2.1. Der Energiebereich bis 10^{10} eV

Wichtig in diesem Bereich sind der geomagnetische cut-off und die solare Modulation, welche dafür verantwortlich sind, dass kosmische Teilchen mit niedrigeren Energien als 10^{10} eV die Erde nicht mehr erreichen können. Beide Effekte werden im Folgenden kurz erläutert:

geomagnetischer cut-off Bei Energien unterhalb von 10GeV bricht das Spektrum durch den geomagnetischen cut-off ab, da die Primärteilchen im Erdmagnetfeld durch die Lorentzkraft so stark abgelenkt werden, dass sie die Erde nicht

¹LoFAR Prototype Station

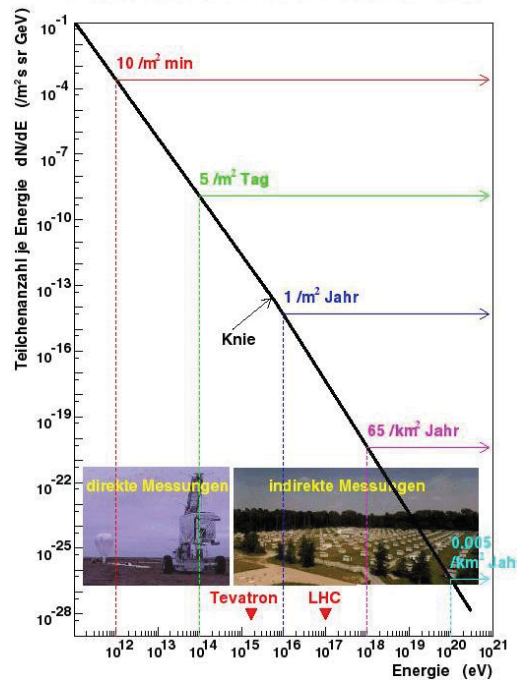


Abbildung 2.2.: Energiespektrum der kosmischen Strahlung [7]

mehr erreichen können und im Magnetfeld der Erde gefangen werden. Die genaue Energie, bei welcher dieser Effekt zu sehen ist, ist abhängig von der Ladungszahl und von der geographischen Lage. Teilchen, die die Magnetfeldlinien senkrecht kreuzen, erfahren die größte Ablenkung. Deshalb ist der geomagnetische cut-off am Äquator schon bei hohen Energien (10GeV) zu sehen, an den Polen dagegen ist fast kein geomagnetischer cut-off zu beobachten. Dort ist dagegen die solare Modulation besonders signifikant.

solare Modulation Bei Energien um 1GeV kann ein Abflachen des Spektrums durch die solare Modulation beobachtet werden. Die Primärteilchen müssen auf ihrem Weg zur Erde den Sonnenwind durchqueren und verlieren dabei an Energie. Dies führt dazu, dass die niederenergetischsten Teilchen ihre gesamte Energie verlieren und die Erde somit nicht mehr erreichen können. Bei starker Sonnenaktivität intensiviert sich der Sonnenwind und dadurch werden auch Teilchen höherer Energie so stark abgebremst, dass sie die Erde nicht mehr erreichen können. Dies führt zu einer Modulation des Spektrums, welche antikorreliert zur Sonnenaktivität ist. Daraus kann geschlossen werden, dass die Strahlung in diesem Energiebereich nicht solaren Ursprungs sein kann, da sonst eine korrelierte Abhängigkeit messbar sein müsste.

Meist ist nur der geomagnetische cut-off sichtbar, da dieser bei Energien über 1GeV einsetzt. An den Polen, bei starker Sonnenaktivität und bei niedrigen Ladungszahlen

wird jedoch die solare Modulation sichtbar. Das Spektrum im Energiebereich bis 10^{10} eV ist daher von der geographischen Lage und dem Zeitpunkt des Messens abhängig.

2.2.2. Der Energiebereich unterhalb des Knies (10^{10} eV bis $4 \cdot 10^{15}$ eV)

Unterhalb des Knies ist der Teilchenfluss noch hoch genug, um die Primärteilchen direkt messen zu können. Hierzu können die Teilchendetektoren entweder an einem Ballon in die obersten Atmosphärenschichten gebracht werden oder mit Hilfe von Satelliten oder Raumfähren sogar außerhalb der Atmosphäre eingesetzt werden. Bei den benutzten Detektoren handelt es sich im Allgemeinen um Detektorsysteme², welche es ermöglichen, den gemessenen Teilchen Attribute wie Masse, Energie, Ladung und Geschwindigkeit zuzuordnen zu können und sie so zu identifizieren. Aus diesen Messungen kann die genaue Zusammensetzung der kosmischen Strahlung in diesem Energiebereich bestimmt werden: Sie besteht zu 98% aus Atomkernen und zu 2% aus Elektronen. Bei den Atomkernen dominieren die Protonen mit etwa 87%, gefolgt von den Heliumkernen mit etwa 12% und den schwereren Kernen mit nur noch 1%. Es konnten Anteile aller Kerne bis zu Ordnungszahlen von etwa 90 nachgewiesen werden. In Abbildung 2.3 ist die relative Häufigkeit der gefundenen Atomkerne der kosmischen Strahlung und die relative Häufigkeit der Atomkerne unseres Sonnensystems zu sehen. Die ähnliche Zusammensetzung lässt darauf schließen, dass die kosmische Strahlung in diesem Energiebereich in einem Stern entstanden ist. Mögliche Kandidaten sind Supernovaüberreste.

Zwar unterscheiden sich die Zusammensetzungen bei einigen Kerngruppen, jedoch lässt sich dies auf die Propagation der Primärteilchen der kosmischen Strahlung durch das interstellare Medium erklären. Hierbei kommt es zu Spallation und Fragmentierung der Kerne und es entstehen Kerne mit niedrigerer Ladungszahl. Deutlich sichtbar ist dies bei der Elementgruppe unterhalb von Eisen. Diese kommen in der kosmischen Strahlung deutlich häufiger vor, da einige Eisenkerne durch Wechselwirkungen während der Propagation zu Kernen mit niedrigerer Ladungszahl wurden. Die Anzahl an Eisenkernen ist dementsprechend niedriger (man beachte die logarithmische Skala).

Mit Supernovaüberresten als Beschleunigungskandidaten lassen sich Teilchenenergien bis 10^{15} eV erklären. In den Supernovaüberresten kann Fermi-Beschleunigung stattfinden. Mit der Fermibesleunigung lässt sich ein Spektrum mit $\gamma=2$ vorhersagen. Doch auch hier müssen die Auswirkungen durch die Propagation der Primärteilchen vor ihrem Erreichen der Erde berücksichtigt werden. Dies führt zu einem Spektralindex von $\gamma=2,7$, welcher mit dem experimentell ermittelten Wert übereinstimmt.

²aus beispielsweise Kalorimeter, Spektrometer, Spurdetektoren

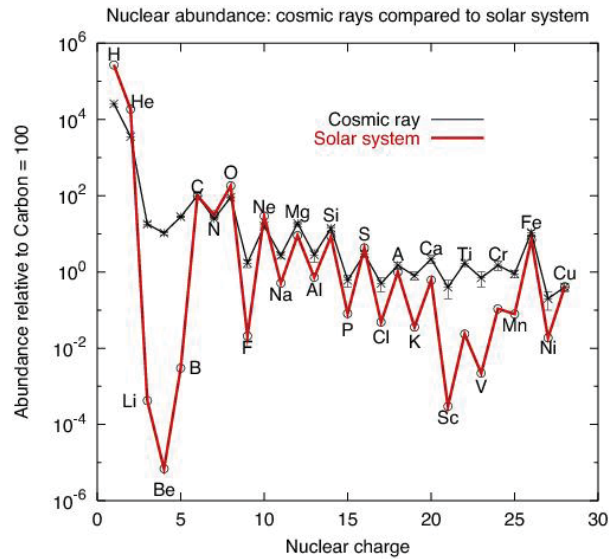


Abbildung 2.3.: Vergleich der kosmischen und solaren Elementhäufigkeiten, nach [31]

2.2.3. Der Energiebereich vom Knie bis zum Knöchel ($4 \cdot 10^{15}$ eV bis $5 \cdot 10^{18}$ eV)

In diesem Energiebereich ist der Teilchenfluss schon so gering, dass zu indirekten Messungen mit Hilfe von Luftschauern übergegangen werden muss. Durch die indirekte Messung ist es schwieriger, die genaue Zusammensetzung der kosmischen Strahlung zu bestimmen, da die experimentelle Identifikation des Primärteilchens schwieriger wird. Informationen über die Zusammensetzung, vor allem in der Region um das Knie, sind jedoch wichtig, um zu verstehen, durch welche Prozesse die Teilchen so stark beschleunigt wurden und wodurch das Knie zustande kommt. Dies ist ein Ziel des KASCADE-Grande Experimentes. Es wurde inzwischen gezeigt, dass das Knie abhängig ist von der Ladungszahl des Primärteilchens und hauptsächlich durch leichte Primärteilchen verursacht wird [6]. Für höhere Ladungszahlen und Massen knickt das Spektrum erst bei höheren Energien ab. Womit dieses Abknicken erklärt werden kann, ist jedoch noch unklar. Vermutet wird, dass die maximal mögliche Beschleunigung in Supernovaüberresten hier erreicht wird. Durch welchen Mechanismus die Teilchen auf noch höhere Energien beschleunigt werden, ist noch nicht geklärt. Eine Rekonstruktion durch die Ankunftsrichtung der Teilchen und eine Korrelation mit bekannten Objekten ist nicht möglich. Zwar kann die Richtung bestimmt werden, aus welcher das Primärteilchen auf der Erde eintraf, allerdings muss dies nicht die Richtung zur Quelle des Teilchens sein. Der Grund sind galaktische Magnetfelder, welche das geladene Teilchen auf dem Weg zur Erde kontinuierlich ablenken. So erreichen die Teilchen die Erde isotrop verteilt. KASCADE-Grande wird in Zukunft noch weitere Informationen zu diesem Energiebereich liefern können.

2.2.4. Der Energiebereich des Knöchels und darüber (ab $5 \cdot 10^{18}$ eV)

Ab dem Energiebereich des Knöchels wird das Spektrum des Teilchenflusses wieder flacher. Gründe für diesen Effekt sucht das Pierre-Auger-Observatorium. Möglicherweise könnte die Änderung im Spektrum durch einen Übergang der Strahlung von galaktischem zu extragalaktischem Ursprung erklärt werden. Die galaktischen Magnetfelder sind zu gering, um Teilchen mit Energien über 10^{17} eV in der Galaxie zu halten, weshalb diese Teilchen unsere Galaxie verlassen. Dies geht einher mit einer Änderung der Elementzusammensetzung der Strahlung und daher mit einer Änderung des Spektrums. Diese hochenergetischsten Teilchen sind auch aus anderen Gründen höchst interessant. Einerseits werden die Teilchen durch ihre hohen Energien auf ihrem Weg zu uns nicht so stark abgelenkt, weshalb man über deren Ankunftsverteilung Rückschlüsse auf ihre Quellen ziehen kann. Erste Untersuchungen haben eine mögliche Korrelation mit aktiven galaktischen Kernen gezeigt. Andererseits sagt die Teilchenphysik ein Abknicken des Spektrums durch Wechselwirkungen mit der Hintergrundstrahlung voraus, den GZK-cut-off. Das Pierre-Auger-Experiment sieht dieses Abknicken des Spektrums, andere Experimente haben jedoch auch oberhalb des GZK-cut-offs Teilchen gemessen. Die Teilchenflüsse sind jedoch so gering, dass bisher nicht genug Daten in diesem Bereich gesammelt werden konnten, um endgültige Aussagen darüber treffen zu können.

3. Experimente zur kosmischen Strahlung in Karlsruhe

3.1. KASCADE-Grande

Das KASCADE-Grande Experiment misst seit 1996 kosmische Strahlung in einem Energiebereich von $10^{14} - 10^{18}$ eV über den Nachweis der Luftschauer aus Sekundärteilchen. Um möglichst viele und genaue Informationen über die kosmische Strahlung zu erhalten, werden die verschiedenen Schauerkomponenten mit einer Vielzahl von Detektoren gemessen:

Das Array umfasst 252 **Detektorstationen** zum Messen der elektromagnetischen Komponente. Die äußeren 196 Stationen enthalten außerdem Myondetektoren. Die Detektoren nehmen insgesamt eine Fläche von $200\text{m} \times 200\text{m}$ ein und sind in Cluster unterteilt von denen jeder aus 16 bzw. 15 Stationen besteht, siehe Abbildung 3.1(a). Als weiterer **Myondetektor** dient der 50m lange Myonentunnel, welcher auch die Rekonstruktion der Spur der Myonen ermöglicht.

Des Weiteren können sowohl Myonen als auch die hadronische Komponente im **Zentraldetektor** nachgewiesen werden.

Im Jahr 2003 wurde das Array um 37 Detektorstationen erweitert, die **Grande-Detektoren**. Diese messen die elektromagnetische Komponente über eine Fläche von etwa $0,5\text{km}^2$, wodurch es nun möglich ist, Primärenergien bis zu 10^{18} eV zu messen. Die Grande-Detektoren sind zu sogenannten Trigger-Hexagons zusammengeslossen, siehe Abbildung 3.1(b), mit deren Hilfe die Triggerbedingungen festgelegt werden können.

Aus den gemessenen Daten können anschließend mit Hilfe der Analysesoftware KRETA¹ wichtige Schauerparameter, wie zum Beispiel die Richtung der Schauer, die Art der Primärteilchen, ihre Primärenergie, das Schaueralter oder die Teilchenanzahl am Boden bestimmt werden [5]. Die gemessenen Daten können außerdem mit durch CORSIKA² [23] simulierte Daten verglichen und dadurch zum Beispiel Wechselwirkungsmodelle getestet werden. KASCADE-Grande konnte so das Spektrum für verschiedene Primärteilchengruppen einzeln bestimmen und beispielsweise neue Informationen zum Zustandekommen des Knies liefern. Nach etwa 14 Jahren

¹Kascade Reconstruction for Extensive Airshowers

²Cosmic Ray Simulation for KASCADE

3. Experimente zur kosmischen Strahlung in Karlsruhe

Messzeit wurde das Experiment KASCADE-Grande am 30.03.2009 beendet. Das Detektorfeld bleibt allerdings in Betrieb, um neue Detektormethoden, wie zum Beispiel kHz-Messungen, zu testen. Die Datenanalyse wird ebenfalls fortgesetzt.

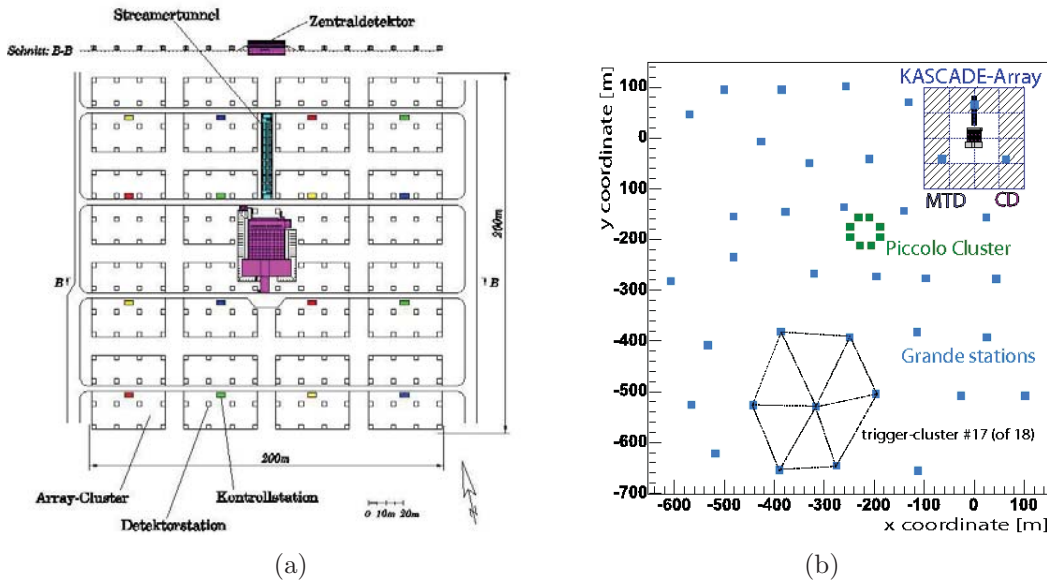


Abbildung 3.1.: a) KASCADE und b) KASCADE-Grande Layout

3.2. LOPES

LOPES ist das erste Experiment, das kosmische Strahlung über die von Sekundärteilchen emittierte Radiostrahlung zweifelsfrei nachweisen konnte [17]. Dazu wurden anfänglich zehn invertierte V-Dipolantennen mit Ost-West-Ausrichtung innerhalb des KASCADE-Feldes aufgebaut, Abbildung 3.2(a). Diese Antennen messen in einem Frequenzbereich von 40MHz bis 80MHz und messen sowohl horizontal polarisierte als auch vertikal polarisierte Anteile der Radiostrahlung. Da dieser Aufbau jedoch nur eine Messung der horizontalen Ost-West-polarisierten Radiostrahlung zulässt, wurde das Antennenfeld 2006 nach einem Jahr Messzeit auf 30 Antennen erweitert, von denen die Hälfte in Nord-Süd-Richtung ausgerichtet ist, siehe Abbildung 3.2(b). Dies ermöglicht eine Messung beider horizontalen Polarisationsrichtungen. Außerdem ist es durch die erhöhte Anzahl an Antennen möglich, höhere Energien zu vermessen, bessere Statistiken zu erreichen und die Genauigkeit der Messung für einzelne Ereignisse zu erhöhen. Die Datennahme findet in Koinzidenz mit KASCADE-Grande statt. Durch den Vergleich der von LOPES gemessenen Daten mit den von KASCADE-Grande bereitgestellten Schauerparametern

war es möglich, die gemessene Radiostrahlung eindeutig Luftschauern zuzuordnen. Des Weiteren konnte eine Korrelation zwischen der Pulshöhe der Radiostrahlung und der Myonenzahl und somit der Energie des Primärteilchens beobachtet werden. Zudem war ein Zusammenhang der gemessenen Pulse von der Ankunftsrichtung der Teilchen sichtbar, woraus auf eine Abhängigkeit des Entstehungsmechanismus vom Erdmagnetfeld geschlossen werden kann.

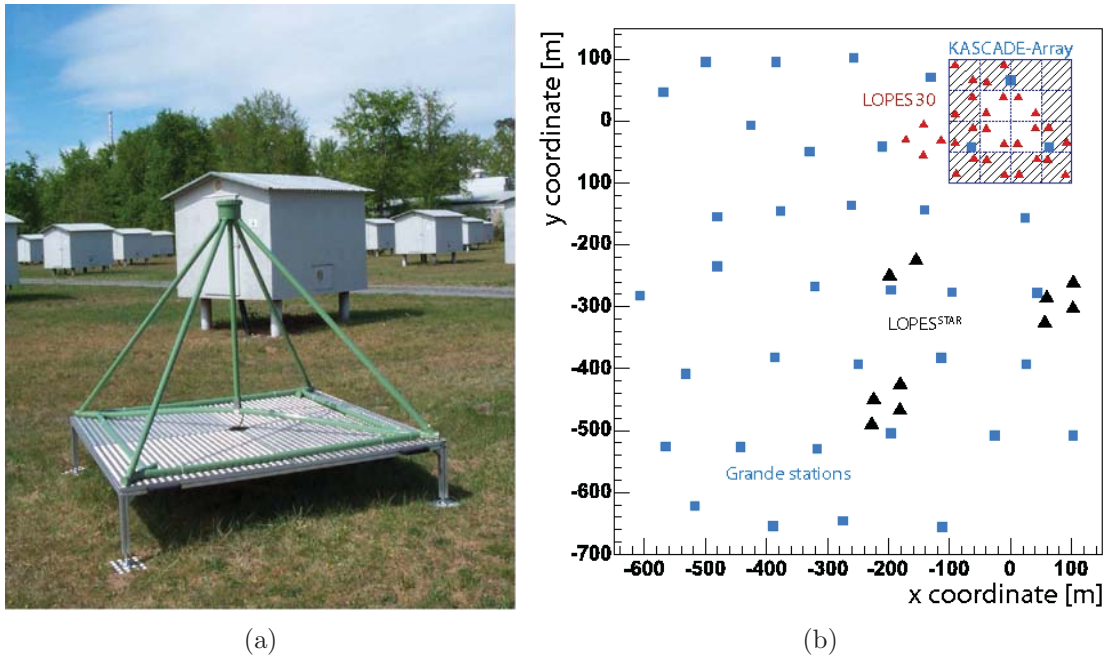


Abbildung 3.2.: a) LOPES Dipolantenne und b) LOPES Antennen-Layout

Gleichzeitig wurde die Radioemission von Luftschauern theoretisch betrachtet. Eine Erklärung für die Emission der Radiostrahlung liefert der Geosynchrotron-effekt: Innerhalb des Luftschauers entstehen Elektronen und Positronen in einem Energiebereich von etwa zehn MeV. Diese erfahren durch die Lorentzkraft im Erdmagnetfeld eine Ablenkung auf entgegengesetzte Kreisbahnen. Da die Elektronen und Positronen hochrelativistisch sind, wird dabei Radiostrahlung, äquivalent zu Synchrotronstrahlung in Ringbeschleunigern, emittiert. Diese Strahlung hängt dabei von der Richtung und Stärke des Erdmagnetfeldes ab [24].

Die experimentell gemessene Abhängigkeit vom Erdmagnetfeld bekräftigt also diesen theoretischen Ansatz. Auch die simulierte Pulsform lässt sich experimentell bestätigen. Um weitere Vergleiche von Theorie und Experiment machen zu können, wurde eine genaue Kalibrierung der Antennen durchgeführt [32]. Dadurch konnte die Lateralverteilung von experimentellen und simulierten Daten verglichen werden. Da hier Theorie und Experiment noch nicht übereinstimmen, wird sowohl der theoretische Ansatz weiter verbessert, als auch die experimentellen Werte und deren Fehler

3. Experimente zur kosmischen Strahlung in Karlsruhe

genau untersucht.

Um die Radiotechnik weiter etablieren zu können, wurde ein weiteres Antennensystem, LOPES^{STAR} ³, in Karlsruhe aufgebaut. Dabei wurden nicht mehr die bisher benutzten einfachen Dipolantennen verwendet, sondern LPDAs⁴, welche ebenfalls in einem Frequenzbereich von 40MHz bis 80MHz messen. Für diese Antennen wurde ein Selbsttrigger-System entwickelt, welches notwendig ist, um von Teilchendetektoren unabhängige Messungen durchzuführen. Die Antennen befinden sich innerhalb des KASCADE-Grande Feldes und jede der insgesamt elf Antennen misst beide Polarisationsrichtungen.

Im Hinblick auf eine Zusammenarbeit mit dem Pierre-Auger-Observatorium wurde noch eine weitere Antenne getestet, die SALLA⁵, welche neben guten elektrischen Eigenschaften auch eine höhere mechanische Stabilität aufweist als die LPDAs.

³LOPES Self Triggered Array of Radiodetectors

⁴logarithmisch-periodische Dipolantennen

⁵Small Aperiodic Loaded Loop Antenna

4. Lang- und Mittelwellen

In der vorliegenden Studie wird die Radiostrahlung im kHz-Bereich von etwa 50kHz bis 500kHz betrachtet. Dies entspricht dem LF¹- und MF²-Bereich, also den Langbeziehungsweise Mittelwellen. In diesem Kapitel werden generelle Empfangsmöglichkeiten dieser Wellen, ihre Ausbreitung und der Rauschhintergrund in diesem Frequenzbereich diskutiert.

4.1. Empfangsmöglichkeiten

Grundsätzlich besteht ein Empfangssystem für Radiostrahlung aus einer Antenne und einem Empfänger. Dabei müssen Antenne und Empfänger auf die gewünschte Frequenz abgestimmt sein. Gegebenenfalls werden zusätzliche Frequenzfilter benötigt. Um die empfangenen Daten zu speichern, zu bearbeiten oder sichtbar beziehungsweise hörbar zu machen, sind eventuell weitere Geräte nötig.

4.1.1. Antennen

Die verschiedenen Antennenformen unterscheiden sich in ihren Eigenschaften. Wichtig sind beispielsweise die gemessene Komponente der elektromagnetischen Welle, die Polarisation, die Bandbreite und die Richtungssensitivität. Im Folgenden sollen die Eigenschaften der zwei bekanntesten Antennenformen, die Dipol- und die Rahmenantenne, diskutiert werden. Rahmen- sowie Dipolantenne lassen sich beide aus dem einfachsten Schwingkreis bestehend aus Kondensator und Spule ableiten, siehe Abbildung 4.1. Wird der Kondensator auseinandergezogen, wie in b), so entsteht ein Hertzscher Dipol. Zieht man dagegen die Spule auseinander, wie in c) entsteht eine Rahmen- oder Ringantenne. Daran wird auch schon ein wesentlicher Unterschied der beiden Antennenformen deutlich: Die Dipolantenne misst die elektrische Komponente der Strahlung, die Rahmenantenne die magnetische Komponente.

Jedoch sind die Richtdiagramme der Rahmenantennen und des $\lambda/2$ -Dipols sehr ähnlich und folgen der typischen Achter-Figur, siehe Abbildung 4.2. Beim Dipol ist die Richtcharakteristik stark abhängig vom Verhältnis der Wellenlänge zur Dipollänge. Da es bei der Messung der Radioemission kosmischer Strahlung wichtig ist, mit jeder Antenne einen möglichst großen Raumbereich abzudecken, muss dies bei der

¹Low Frequency: 30kHz bis 300kHz

²Mid Frequency: 300kHz bis 3000kHz

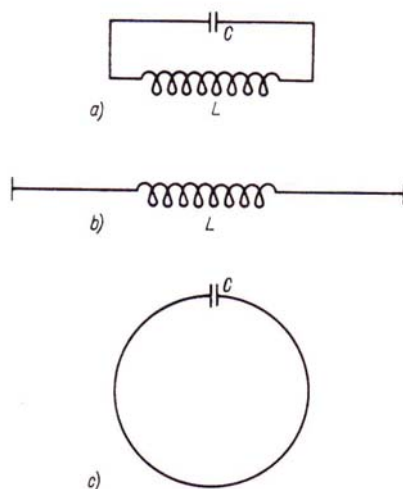


Abbildung 4.1.: a) geschlossener Schwingkreis ohne nennenswertes Nahfeld,
 b) offener Schwingkreis mit vorwiegend elektrischem Nahfeld,
 c) geschlossener Schwingkreis mit vorwiegend magnetischem Nahfeld

Entwicklung einer geeigneten Antenne berücksichtigt werden. Ideal wäre eine Richtcharakteristik, wie sie der Rundstrahler aufweist, dies ist praktisch jedoch nicht möglich. Mittels zweier Antennen mit Achtercharakteristik ist jedoch ebenfalls eine Abdeckung des gesamten Raumes möglich, wenn diese senkrecht zueinander aufgebaut werden.

Je nach Aufbau ist es außerdem möglich, horizontal oder vertikal polarisierte Wellen zu empfangen. Wird die Antenne senkrecht aufgestellt, misst sie die vertikal polarisierte Komponente³, horizontal aufgestellt die horizontal polarisierte Komponente. Die empfangene Frequenz kann je nach Länge des Dipols bzw. je nach Anzahl der Wicklungen der Rahmenantenne variiert werden. Für eine Frequenz von 300kHz müsste ein $\lambda/2$ -Dipol eine Länge von 500m haben. Die Abmessungen für die Rahmenantenne sind etwas komplizierter zu berechnen. Die Resonanzfrequenz ergibt sich aus der Formel für den Schwingkreis:

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

Die Kapazität C und die Induktivität L entstehen durch die Wicklung des Drahtes und müssen daher für jede Antennenform unterschiedlich berechnet oder gemessen werden. Für eine quadratische Rahmenantenne aus Kupferlackdraht mit zwei Metern Seitenlänge ergibt sich für zehn Windungen eine Resonanzfrequenz von etwa 216kHz [19]. Durch aktive Anpassschaltungen ist es möglich, die Frequenz und Bandbreite

³hierbei ist immer die Polarisation der elektrischen Komponente gemeint

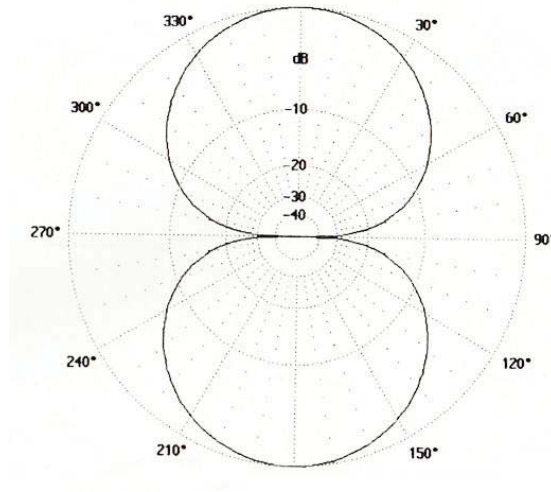


Abbildung 4.2.: Polardiagramm mit logarithmischer Teilung (Freiraum-Diagramm eines Dipols)

noch zu verändern. So erweiterte Antennen werden aktive Antennen genannt. Zur Messung der kHz-Radioemission eignen sich somit sowohl aktive Dipol- als auch aktive Rahmenantennen

4.1.2. Empfänger

Der Empfänger hat die Aufgabe, die von der Antenne gemessenen Signale entweder zu speichern, anzuzeigen oder an andere Geräte weiterzugeben. Außerdem steuert er wann Daten ausgelesen werden sollen und wann nicht. Heutzutage übernimmt diese Funktion meistens eine Messkarte und ein Computer. Die Messkarte dient dabei als A/D-Wandler⁴ und bestimmt, wann und wie Daten aufgenommen werden sollen. Der Computer dient als Speicher- und Arbeitsmedium. Wichtige Eigenschaften der Messkarte sind beispielsweise Samplerate und Auflösung:

Die Samplerate bestimmt, wie häufig der analoge Wert aufgenommen und digitalisiert werden soll. Dies beeinflusst den messbaren Frequenzbereich. Je höher die Samplerate ist, desto höhere Frequenzen können ohne Informationsverlust digitalisiert werden. Dies wird beschrieben durch das Nyquist-Shannonsche Abtasttheorem, welches besagt, dass ein Signal mit einer Maximalfrequenz f_{grenz} mindestens mit der doppelten Frequenz $2 \cdot f_{grenz}$ abgetastet werden muss. Die Samplerate muss also an die Antenne angepasst sein.

Die Auflösung dagegen beeinflusst, wie präzise die Spannungswerte digitalisiert werden.

Wenn die Daten durch den A/D-Wandler digitalisiert wurden, können sie einfach gespeichert werden. Dies ermöglicht eine spätere, genaue Analyse der Daten.

⁴Analog/Digital-Wandler

Als die digitale Technik noch nicht so weit entwickelt war, wurden die gemessenen Signale analog verarbeitet. Eine Möglichkeit bestand darin, die Signale direkt von einem Oszilloskop anzeigen zu lassen. Um die Signale zu speichern, konnten diese Oszilloskopbilder dann abfotografiert und so für spätere Analysen genutzt werden. Genauso konnten die Signale für eine Betrachtung im Frequenzraum von einem Spektrumanalysator angezeigt und abfotografiert werden. Eine andere Möglichkeit war die Weitergabe der Signale an einen x-y-Schreiber, welcher den Signalverlauf auf Papier zeichnen konnte.

Alle diese analogen Aufnahmemöglichkeiten können natürlich auch heute genutzt und mit der digitalen Technik kombiniert werden. Außerdem ist es möglich sich Signale und deren Spektren mit verschiedener Software sowohl am Computer anzeigen als auch drucken zu lassen, so dass ein Gerät für alle Aufgaben genügt.

4.1.3. Filter

Wenn der Frequenzbereich der Antenne und die Samplerate des Empfängers nicht optimal aufeinander und an die gewünschte Frequenz und Bandbreite angepasst sind, wird der Einsatz von Frequenzfiltern notwendig. Hierbei können analoge oder digitale Filter als Bandpass, Bandstop, Hoch- oder Tiefpassfilter eingesetzt werden.

Um die Bandbreite der Antenne zu verändern eignet sich ein Bandpassfilter. Dieser lässt nur Frequenzen zwischen zwei Grenzfrequenzen passieren.

Um einzelne Frequenzen herauszufiltern, kann dagegen ein Bandstopfilter eingesetzt werden. Dies ermöglicht beispielsweise das Herausfiltern von Rundfunksignalen.

Wenn die Samplerate des Empfängers nicht an die Empfangsfrequenzen der Antenne angepasst ist, muss ein Tiefpassfilter zwischen Antenne und Empfänger eingebaut werden. Ansonsten kommt es zum sogenannten Aliasrauschen:

Wird mit weniger als der doppelten empfangenen Frequenz $2 \cdot f_{grenz}$ abgetastet, so werden Frequenzen oberhalb der Grenzfrequenz f_{grenz} falsch digitalisiert. Ein Signal mit einer Frequenz von $f_{real} = 700kHz$ wird bei einer Samplerate von $2 \cdot f_{grenz} = 1MHz$, also einer Grenzfrequenz von $f_{grenz} = 500kHz$, so digitalisiert, dass es als Signal bei $f_{alias} = 300kHz$ sichtbar wird. Die ungewünschte Frequenz wird an der Grenzfrequenz gespiegelt und taucht somit im betrachteten Frequenzbereich als Aliasrauschen wieder auf.

Ein Tiefpassfilter muss also alle Frequenzen oberhalb der Grenzfrequenz herausfiltern.

Viele Eigenschaften eines Filters lassen sich an dessen Frequenzgang ablesen. Hierbei wird die Dämpfung über der Frequenz aufgetragen. Abbildung 4.3 zeigt den Frequenzgang verschiedener Filter. Die Filter werden je nach Frequenzgang unabhängig von deren Realisierung in verschiedene Typen eingeteilt. Hier sind die typischen Frequenzgänge eines Filters mit kritischer Dämpfung (Reihenschaltung aus entkoppelten Tiefpässen), eines Besselfilters, eines Butterworth-Filters und eines

Tschebyscheff-Filtern zu sehen.

Eine wichtige Eigenschaft, die sich hier ablesen lässt, ist die Ordnung des Filters, welche beschreibt, wie stark die Abschwächung um die Grenzfrequenz zu- oder abnimmt.

Eine weitere wichtige Eigenschaft eines Filters ist dessen Gruppenlaufzeit. Unter Umständen ist die Zeit, welche das Signal zum Durchlaufen des Filters benötigt, stark frequenzabhängig. Dies würde breitbandige Signale stark verzerren, was bei der Messung von Radioemission aus Luftschauern sehr ungünstig ist.

Alle diese Eigenschaften müssen beim Einsatz eines Filters beachtet und gegebenenfalls angepasst oder korrigiert werden.

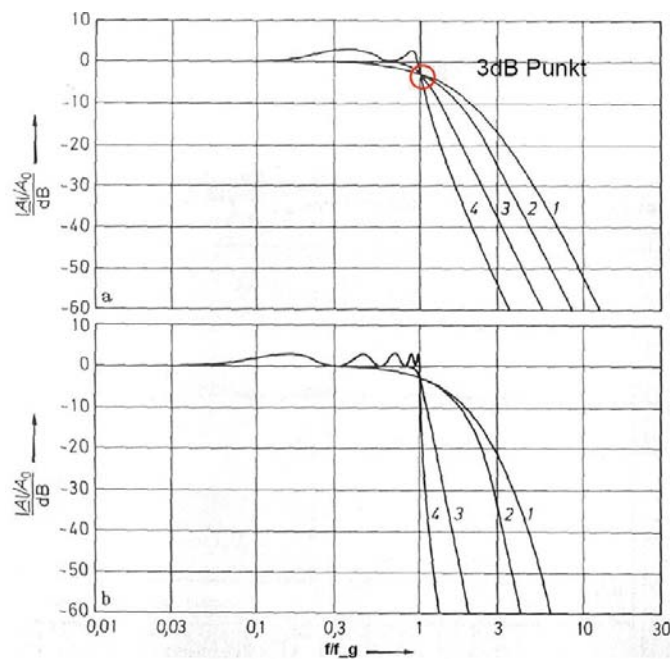


Abbildung 4.3.: Frequenzgänge verschiedener Tiefpassfiltertypen verschiedener Ordnung [20]

oben: 4. Ordnung, unten: 10. Ordnung

1 - kritische Dämpfung, 2 - Besselfilter, 3 - Butterworth-Filter, 4 - Tschebyscheff-Filter

4.2. Wellenausbreitung

Grundsätzlich können sich elektromagnetische Wellen auf drei Arten ausbreiten: Raumwelle, Bodenwelle und Troposphärenwelle. Allerdings spielt die Ausbreitung über die Troposphärenwelle nur bei sehr hohen Frequenzen (VHF⁵ und höher) eine

⁵Very High Frequency: 30MHz bis 300MHz

Rolle, weshalb hier nicht näher darauf eingegangen wird [35].

4.2.1. Raumwelle

Unter der Raumwelle wird jene Welle verstanden, welche in den Raum abgestrahlt wird und von der Ionosphäre zum Empfänger reflektiert wird. Sie ist somit abhängig von den Eigenschaften der Ionosphäre. Diese erstreckt sich von etwa 80km bis 800km Höhe. Sie besteht, wie der Name vermuten lässt, aus ionisierten Luftmolekülen. Die Ionisation der Moleküle entsteht durch die UV-Strahlung der Sonne. Da diese Strahlung aus vielen verschiedenen Frequenzen zusammengesetzt ist und die Atmosphäre aus verschiedenen Gasen besteht, entstehen unterschiedliche Ionisationsschichten in verschiedenen Höhen. Zusätzlich zur Ionisation kommt es jedoch auch zu Rekombination der ionisierten Moleküle und der freien Elektronen. Das Verhältnis zwischen Strahlungsintensität und Rekombinationsrate bestimmt den Ionisationsgrad. Die Strahlungsintensität hängt vom Tagesverlauf und der Sonnenaktivität ab. Die Rekombinationsrate wiederum ist abhängig von der Dichte der Moleküle. Je dichter die Moleküle und Elektronen sind, desto schneller finden sie einen Partner, mit dem sie rekombinieren können. Dies führt zu unterschiedlichen Ionisationsgraden und somit zu verschiedenen Eigenschaften der einzelnen Schichten. Die Lage der Schichten ist in Abbildung 4.4 zu sehen. Während des Tages, also während der Sonneneinstrahlung, halten sich Ionisation und Rekombination in allen Schichten die Waage. Nachts ist das Verhalten für jede Schicht unterschiedlich.

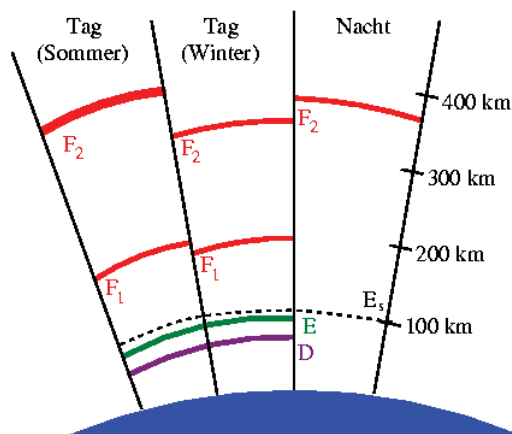


Abbildung 4.4.: Aufbau der Ionosphäre bei verschiedenen Jahres- und Tageszeiten [38]

Die unterste Schicht, die sogenannte D-Schicht, hat einen geringen Ionisationsgrad, da hier die Rekombinationsrate auf Grund der hohen Teilchendichte ebenfalls hoch

ist. Diese hohe Rekombinationsrate führt des Weiteren dazu, dass die D-Schicht nachts verschwindet. Die Rekombination von Ionen und Elektronen überwiegt, sobald die UV-Strahlung der Sonne die Moleküle nicht mehr ionisiert.

Oberhalb der D-Schicht befindet sich die E-Schicht. Auch in dieser Schicht überwiegt während den sonnelosen Stunden die Rekombination und es kommt zum Abbau der E-Schicht.

Die darüber liegende F-Schicht wird in zwei Schichten unterteilt, die F1- und F2-Schicht. Ähnlich der E-Schicht wird auch die F1-Schicht nachts abgebaut, jedoch langsamer. Bei der F2-Schicht dagegen ist die Gaskonzentration schon so gering, dass die Rekombinationsrate so klein wird, dass selbst während der Nacht die Ionisation bestehen bleibt.

Dies ist wichtig für die Ausbreitung der Lang- und Mittelwellen. Während die D-Schicht wegen ihrer niedrigen Ionisation nur Längstwellen⁶ unterhalb von 15kHz reflektiert und höhere Frequenzen absorbiert, werden an der E-Schicht Wellen mit Frequenzen bis 1,5MHz und an den F-Schichten der komplette Bereich der Kurzwellen reflektiert. Somit ist nachts eine Ausbreitung der Lang- und Kurzwellen über die Raumwelle möglich, tagsüber wegen der absorbierenden D-Schicht jedoch nicht. Dies hat zur Folge, dass sich unter anderem das Hintergrundrauschen nachts auf zwei Wegen ausbreiten kann und somit deutlich höher ist als tagsüber.

Auf Grund der großen Reichweite der Raumwelle können sich Lang- und Mittelwellen nachts um die gesamte Erde ausbreiten. Wegen dieser zusätzlichen, nächtlichen Ausbreitungsmöglichkeit ist auch die Reichweite von Radiosendern nachts erhöht, weshalb viele Lang- und Mittelwellenrundfunksender nachts die Abstrahlleistung reduzieren [29].

4.2.2. Bodenwelle

Die Bodenwelle ist tagsüber die wichtigste Ausbreitungsart für Lang- und Mittelwellensender. Sie kann wiederum in drei Wellenarten unterteilt werden:

Direktwelle: auch Sichtwelle, ist die direkte Verbindung zwischen Sender und Empfänger

Erdreflexionswelle: trifft auf den Erdboden auf und wird von dort zum Empfänger reflektiert

Oberflächenwelle: nutzt die Erdoberfläche als Wellenleiter

Da Erdreflexionswelle und Oberflächenwelle den Erdboden nutzen, ist die Bodenwelle abhängig von dessen Leitfähigkeit. Einen großen Einfluss auf die Leitfähigkeit des Bodens hat die Bodenfeuchte. Tabelle 4.1 gibt die Leitfähigkeit verschiedener Bodentypen an.

⁶Wellenlängen über 10km

Bodenart	Leitfähigkeit σ in S/m	Dielektrizitäts- konstante ϵ
Seewasser mit durchschnittl. Salzgehalt	4	80
Frischwasser (20°C)	$3 \cdot 10^{-3}$	80
Feuchter Boden	10^{-2}	30
Mittlerer Boden	10^{-3}	15
Trockener Boden	$3 \cdot 10^{-5}$	4
Sehr trockener Boden	10^{-5}	4

Tabelle 4.1.: Bodenleitfähigkeiten nach [29]

Da wir uns in Karlsruhe nicht in Meeresnähe oder in der Nähe großer Seen befinden, spielt hauptsächlich die Feuchte des Erdbodens eine Rolle. Diese ist natürlich auch von der Wetterlage abhängig. Es sollte also eine Korrelation zwischen Untergrundrauschen und den Wetterbedingungen sichtbar sein.

Des Weiteren spielt die Polarisationsrichtung der Welle eine Rolle bei der Ausbreitung über die Bodenwelle. Da die horizontale Komponente stark gedämpft wird, ist über die Bodenwelle hauptsächlich eine Ausbreitung der vertikalen Komponente möglich. Dies ist auch der Grund dafür, dass Lang- und Mittelwellenrundfunksender meist vertikal polarisierte Signale senden. Die horizontale Komponente sollte also deutlich rauschärmer sein [21]. Bei vertikaler Polarisation und durchschnittlicher Bodenleitfähigkeit kann die Reichweite von Langwellen bis 1000km, von Mittelwellen bis 250km erreichen. Somit können auch weit entfernte Radiosender und andere Störquellen, wie das atmosphärische Rauschen, empfangen werden, was zu hohem Rauschen im kHz-Frequenzbereich führt. Deshalb ist eine genaue Analyse des Untergrundes notwendig, um den Einfluss des Rauschens möglichst zu minimieren.

4.2.3. Bedeutung für die Messung von Signalen aus Luftschauern

Nachts ist das Untergrundrauschen geringer als tagsüber, da sich die Wellen dann zusätzlich zur Ausbreitung über die Bodenwelle auch über die Raumwelle ausbreiten können. Ob dadurch tagsüber Radiostrahlung von Luftschauern besser nachgewiesen werden kann, ist abhängig vom Entstehungsmechanismus dieser Strahlung. Entsteht die Strahlung in der Nähe der Antenne und ist sie vertikal polarisiert, sollte nachts der Empfang deutlich kleinerer Pulse möglich sein. Entsteht sie dagegen weit von der Antenne entfernt und ist horizontal polarisiert, kann die Radiostrahlung der Luftschauber sich nicht weit ausbreiten und das Signal ist schlechter zu empfangen.

4.3. Rauschen

Neben der Radiostrahlung durch kosmische Strahlung werden von den Antennen auch Störsignale empfangen. Dies ist im Lang- und Mittelwellenbereich (30kHz bis 3000kHz) zum einen das breitbandige atmosphärische Rauschen, zum anderen Lang- und Mittelwellenrundfunksender. Im Folgenden werden allgemeine Rauschquellen vorgestellt, in Kapitel 7 wird dann auf die tatsächlichen Messungen eingegangen.

4.3.1. Breitbandiges Hintergrundrauschen

Das Hintergrundrauschen wird im kHz-Frequenzbereich vom atmosphärischen Rauschen bestimmt, wie in Abbildung 4.5 deutlich wird. Dieses entsteht überwiegend durch Gewitter, genauer durch Blitzentladungen. Auf Grund der in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Tag/Nacht-Variationen der Ionosphäre wirken sich im Lang- und Mittelwellenbereich tagsüber nur Gewitter im Nahbereich störend aus, nachts dagegen können Gewitter weltweit zum Rauschen beitragen. Bei niedrigem atmosphärischen Rauschen kann industrielles Rauschen sichtbar werden. Dieses wird verursacht durch vom Menschen genutzte, technische Geräte. Auf dem Gelände des Forschungszentrums Karlsruhe könnte dieses Rauschen deshalb deutlich erhöht sein.

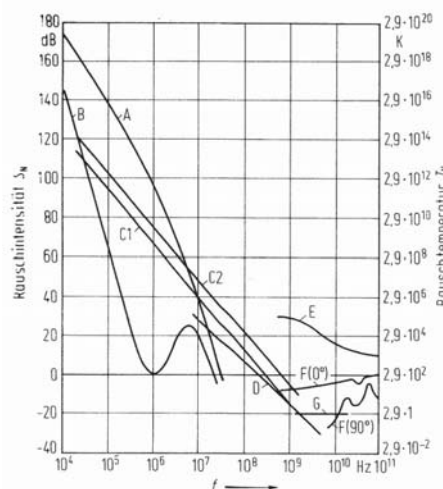


Abbildung 4.5.: Rauschintensitäten in Abhängigkeit der Frequenz nach dem CCIR Report 670

A atmosphärisches Rauschen (Maximalwert), B atmosphärisches Rauschen (Minimalwert), C1 industrielles Rauschen (ländlicher Empfangsort), C2 industrielles Rauschen (Stadt), D galaktisches Rauschen, E ruhige Sonne (Keulbreite der Antenne $0,5^\circ$), F Rauschen infolge Sauerstoff und Wasserdampf (obere Kurve für 0° Elevation, untere Kurve für 90° Elevation), G Strahlung des kosmischen Hintergrundes mit 2,7 K [21]

4.3.2. Rundfunksender und andere schmalbandige Störungen

Der Frequenzbereich von 148,5kHz bis 283,5kHz ist laut Frequenznutzungsplan [10] für den Langwellenrundfunk freigegeben, der Bereich von 520kHz bis 1620kHz für

den Mittelwellenrundfunk. Somit spielen die Mittelwellenrundfunksender eigentlich keine Rolle, durch Aliasrauschen können jedoch auch diese Sender im Frequenzband bis 500kHz sichtbar werden, wie in Abschnitt 6.3 beschrieben. Wichtig ist hierbei vor allem die Sendeanlage in Mühlacker, welche bei 576kHz sendet. Dieser Sender liegt so nahe bei 500kHz, dass sich ein Herausfiltern durch einen Tiefpass als schwierig gestalten könnte.

Der Langwellenrundfunk hingegen sendet genau in dem Frequenzbereich, in welchem auch die Radiostrahlung der Luftschauer gemessen werden soll. Interessant für die Messungen in Karlsruhe sind vor allem die in Tabelle 4.2 aufgeführten Sendeanlagen.

Frequenz in kHz	Sendername	Ort, Land
153	Deutschlandfunk	Donebach, Deutschland
162	France Inter	Allouis, Frankreich
183	Europe 1	Felsberg-Berus, Deutschland
207	Deutschlandfunk	Aholming, Deutschland
234	RTL	Beidweiler, Luxemburg

Tabelle 4.2.: Langwellensender

Eine weitere schmalbandige Störung ist das Zeitzeichensignal DCF-77 bei 77kHz. Dieser Sender übermittelt ein Zeitsignal, welches zum Beispiel von Funkuhren genutzt wird. Auch das KASCADE-Grande Experiment und die kHz-Messungen nutzen dieses Signal als Zeitgeber. Der Sender befindet sich in der Nähe von Frankfurt am Main, in Mainflingen und sendet mit einer Leistung von 50kW.

Laut Frequenznutzungsplan dürfen Frequenzen zwischen 9kHz und 500kHz ansonsten nur für den zivilen und militärischen Navigationsfunkdienst genutzt werden.

5. Historische Messungen

Bereits vor mehr als 30 Jahren wurde von Allan Radiostrahlung bei niedrigen Frequenzen (in diesem Fall bei 2 MHz) gemessen [4]. Die Stärke der Strahlung war bei niedrigen Frequenzen 100mal höher als erwartet und somit nicht mit der damaligen Theorie vereinbar [3]. Man vermutete daher unterschiedliche Emissionsmechanismen bei niedrigen und hohen Frequenzen. In den folgenden Jahren gab es sowohl auf experimenteller als auch auf theoretischer Seite viele Versuche, Experiment und Theorie in Einklang zu bringen. Einige dieser Experimente und theoretischen Überlegungen zu den Entstehungsmechanismen werden im Folgenden diskutiert.

5.1. Experimente

Die historischen Experimente fanden bei unterschiedlichen Bedingungen statt. Einerseits gab es Unterschiede durch die geographische Lage, andererseits entwickelte sich die Aufnahmetechnik über die letzten Jahre erheblich. Es gab Experimente in Russland und Italien, welche auf über 1000m beziehungsweise über 2000m ü. NN stattfanden, ein Experiment in Australien wurde dagegen auf Meereshöhe durchgeführt. Die Experimente in Russland und in Japan konnten noch nicht auf moderne Digitaltechnik zurückgreifen, sondern die Daten mussten analog mit Hilfe von Fotografien und Oszilloskop ausgewertet werden. Die vier im Folgenden vorgestellten Experimente sollen einen Überblick über die historischen Messungen verschaffen.

Eine der frühesten Messungen der Radioemission im kHz-Bereich gab es 1973 in **Australien** im „Buckland Park air shower array“ bei Adelaide [14]. Das dort befindliche Detektorfeld diente einerseits als Trigger für die Messung, andererseits konnten aus den dort gemessenen Daten Informationen über Schauerparameter gewonnen werden. Die Radiostrahlung wurde mit drei verschiedenen Kupferantennen gemessen. Zwei der Antennen waren 90m lange Drahtantennen, die rechtwinklig zueinander drei Meter über dem Boden aufgespannt waren. Sie maßen also die horizontale Komponente der Welle. Die dritte Antenne war eine Vertikalantenne, die neun Meter in die Höhe reichte. Aufgenommen wurden die Daten mit einem Empfänger, welcher die Daten an einen x-y-Schreiber weiterleitete. Bei jedem Trigger durch das Detektorfeld wurden 256 Sample mit einer Samplerate von 1MHz aufgenommen. In Abbildung 5.1 ist eine dieser Aufnahmen zu sehen. Diese Aufnahme wurde verglichen mit der eines positiven Pulses mit dem gleichen Empfänger. Mit diesem Aufbau war es möglich, Radiostrahlung bei 100kHz mit einer Bandbreite von 80kHz zu messen.

Getriggert wurde hierbei auf Schauer mit Energien von 10^{15} eV bis 10^{16} eV, welche von den Teilchendetektoren gemessen wurden. Innerhalb von 310 Stunden Datenaufnahme wurden 2694 Schauer mit einem Signal-zu-Rausch-Verhältnis von 2,1 gemessen. Da die horizontalen Antennen ein besseres Signal-zu-Rausch-Verhältnis lieferten, wurden zur Analyse nur die dort gewonnenen Daten verwendet. Nachdem anfangs eine Variation der quadratisch gemittelten Amplituden über den Tagesverlauf beobachtet wurde, musste diese Aussage nach weiteren Messungen zurückgenommen werden [13]. Letztendlich konnte in diesem Experiment zwar Radiostrahlung koinzident mit Luftschauern gemessen werden, jedoch war es nicht möglich, Aussagen über Korrelationen mit anderen messbaren Parametern, wie Schauereigenschaften oder Wetterbedingungen, zu machen. Außerdem war es nicht möglich, Aussagen über mögliche Emissionsmechanismen zu treffen.

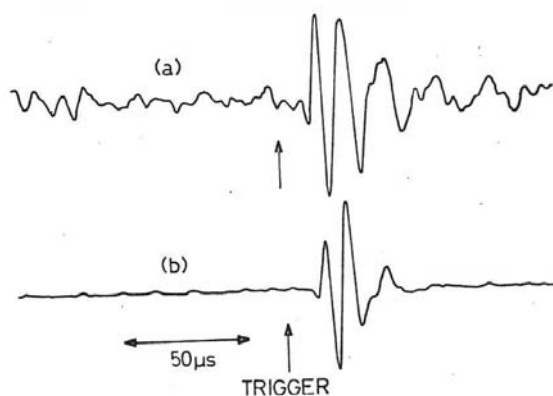


Fig. 1. a) A typical 100 kHz trace containing a large radio pulse.
b) The response of the same 100 kHz receiver to a positive impulse.

Abbildung 5.1.: Am Empfänger des kHz-Experimentes in Australien gemessener Puls verglichen mit einem positiven Testpuls am selben Empfänger [14]

In **Russland**, genauer in Grozny und Yakutsk, wurden in den achtziger Jahren Experimente zur Messung der Radioemission durchgeführt [2]. Mit einer zwei Meter langen, vertikal aufgestellten Eisenantenne konnte Strahlung im Bereich von 1kHz bis 100kHz gemessen werden. In Grozny wurde die Aufnahme durch ein Szintillatortarray getriggert, in Yakutsk dagegen wurde die Anlage mit einem Selbsttrigger betrieben. So wurden in Grozny Schauer mit Energien um 10^{16} eV und in Yakutsk mit 10^{17} eV, mit einem Signal-zu-Rausch-Verhältnis von 10 und höher, detektiert. Beobachtet wurden zwei Arten von Pulsen, welche beide eine ungefähre Dauer von $35\mu\text{s}$ aufwiesen und bipolar waren, sich aber durch ihre Form und Amplitude unterschieden. Bei der häufigeren Art waren sowohl positive als auch negative Amplitude ungefähr gleich groß und im Bereich von 30mV/m bis 80mV/m. Bei der seltener gefundenen Art war der positive Puls im Bereich von 300mV/m, der negative aber etwa dreimal kleiner. Diese Pulse wurden im Gegensatz zu der häufigeren Variante nicht

gleichverteilt während der gesamten Messzeit gefunden, sie traten meist gehäuft in Intervallen von mehreren Tagen auf, bevorzugt vor und während Gewitterwetter, also bei hohen elektrischen Feldstärken in der Atmosphäre. Dies ist ein Hinweis auf einen Emissionsmechanismus, welcher durch das elektrische Feld der Erde beeinflusst wird. Für die Analyse wurden nur 45 der insgesamt über 600 gemessenen Pulse benutzt. Welche Selektion durchgeführt wurde, ist der Veröffentlichung nicht zu entnehmen. Bei diesen Pulsen wurde keine Korrelation mit Schauerparametern wie Energie, Zenit- und Azimutwinkel und Abstand zum Schauerkern sichtbar, wie in Abbildung 5.2 deutlich wird .

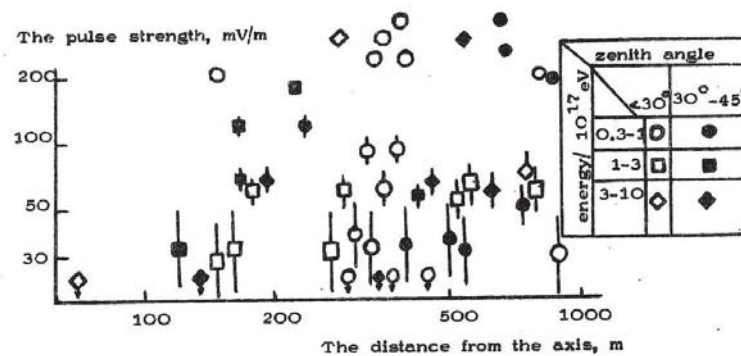


Fig. 4. The experimental data obtained at the Yakutsk EAS array

Abbildung 5.2.: Beobachtete Zusammenhänge zwischen Pulshöhe und Schauerparametern in Yakutsk [2]

Zeitgleich zu den Messungen in Russland fanden Messungen in Akeno, **Japan**, statt. Dort wurden die Antennen innerhalb des AGASA-Experimentes¹ aufgebaut. Auch hier diente das Feld aus Teilchendetektoren als Trigger-Geber. Anfangs wurden zwei verschiedene Antennen genutzt: zum einen eine kugelförmige Antenne und zum anderen eine vertikal aufgestellte, zehn Meter lange Drahtantenne. Mit beiden war es möglich im Bereich von einigen Hertz bis 10MHz zu messen. Mit verschiedenen Empfängern wurden bei 50kHz, 170kHz und 1647kHz Daten mit einer Bandbreite von etwa ± 7 kHz aufgezeichnet [36]. Diese wurden entweder an ein Oszilloskop weitergeleitet und von dort abfotografiert oder das Signal wurde gefiltert, eine Fouriertransformation durchgeführt und das transformierte Signal abfotografiert. Mit diesem ersten Aufbau konnten Radiopulse mit großen Abständen zum Schauerzentrum detektiert werden. Für spätere Messungen wurde der Aufbau leicht abgeändert: Anstelle der kugelförmigen Antenne wurden mehrere vertikale Antennen genutzt und die Datenaufnahme wurde mehrfach verändert. Während anfangs weiter mit abfotografierten Signalen gearbeitet werden musste, konnte später auf Rechner und Bandsysteme (8mm Bänder) zurückgegriffen werden. Das Signal wurde weiterhin gefiltert, um Störungen von beispielsweise lokalen Radiosendern zu unterdrücken. Auch

¹Akeno Giant Air Shower Array Experiment [1]

mit diesen Aufnahmesystemen wurden Radiopulse koinzident mit Luftschauern gemessen. Bis zu einem Abstand von über einem Kilometer zwischen Antenne und Schauerachse konnten den Teilchenschauern Radiopulse zugeordnet werden. Dabei wurde betrachtet, wie sich die gemessene Feldstärke mit zunehmendem Radius änderte: Mit zunehmendem Abstand zur Schauerachse reduzierte sich die Feldstärke der gemessenen Pulse, wie in Abbildung 5.3 zu sehen ist. Weitere Zusammenhänge zwischen gemessener Feldstärke und anderen Variablen konnten nicht festgestellt werden. Untersucht wurden sowohl meteorologische Variablen als auch Schauerparameter wie die Ankunftsrichtung des Luftschauers. Diese Ergebnisse wurden mit verschiedenen Emissionmechanismen verglichen [33] [27] [26]. Mehrere bis dahin bekannte Theorien konnten ausgeschlossen werden. Als nicht widersprüchlich zu den Daten wurde die Übergangsstrahlung präsentiert.

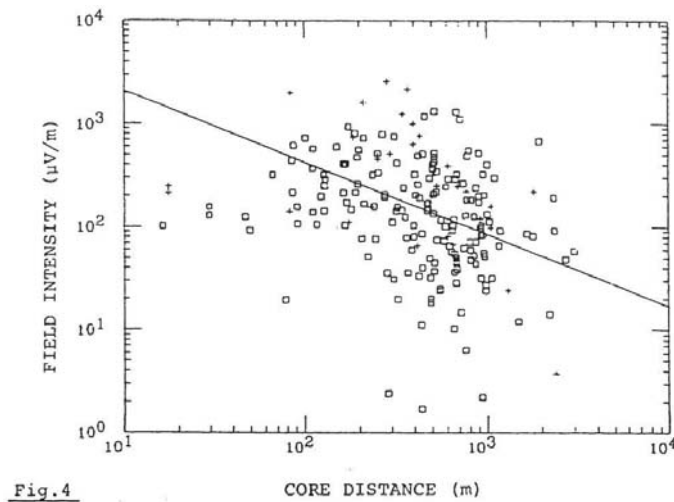


Abbildung 5.3.: Beobachtete Feldstärke über dem Abstand zum Schauerkern des japanischen Experimentes. Die Feldstärken sind normiert auf einen Schauer mit einer Größe von 10^8 Teilchen. [27]

1990 wurden auch in **Italien** innerhalb des EASTOP-Detektorfeldes am Gran Sasso Radiomessungen im kHz-Bereich durchgeführt. Das Experiment lief unter dem Namen EASRADIO. Auch hier wurde die Antennenaufnahme durch die Teilchendetektoren getriggert. Gemessen wurde in zwei Frequenzbereichen, bei 350kHz bis 500kHz und bei 1,8MHz bis 5MHz, wobei das Aufnahmesystem und die Antennen eine Variation der aufgenommenen Frequenz und Bandbreite ermöglichten. Bei einer der benutzten Antennen handelte es sich um eine 15m hohe, vertikal aufgestellte Antenne, welche auf den Frequenzbereich von 100kHz bis 30MHz sensitiv war. Die andere Antenne war eine ein Meter große Breitbandantenne, welche hauptsächlich zur Messung des elektrischen Feldes diente. Die Variation der Frequenzen war durch den Empfänger möglich. Dieser wurde speziell für EASRADIO entwickelt und auf die oben genannten Frequenzbereiche abgestimmt. Diese wurden gewählt, da dort

die geringsten Störungen durch Rundfunksender zu erwarten waren. Zur weiteren Verarbeitung der Signale wurde ein 8bit A/D-Wandler eingesetzt. Mit einer Samplerate von 10MHz wurden vor und nach dem Trigger Daten gespeichert, insgesamt maximal 2048 Byte. Auch hier konnten Radiopulse gleichzeitig mit Teilchenschauern gemessen werden. Dies war in Energiebereichen mit Elektronenanzahlen von $5 \cdot 10^5$ bis 10^8 möglich. Dabei konnte festgestellt werden, dass mit abnehmender Frequenz die gemessene Feldstärke zunimmt. Außerdem gab es Hinweise darauf, dass die gemessene Feldstärke abhängig ist vom Abstand zwischen der Antenne und dem Schauerkern [11]. Um weitere Aussagen treffen zu können, wurde der Aufbau des Experimentes erweitert und verändert. So entstand ein Antennenfeld mit drei 15m hohen Antennen mit über 400m Abstand zueinander, siehe Abbildung 5.4. Das Aufnahmesystem blieb weitestgehend gleich, nur wurden die gemessenen Frequenzbänder leicht verändert, hin zu 300kHz bis 500kHz und 2,3MHz bis 3,5MHz.

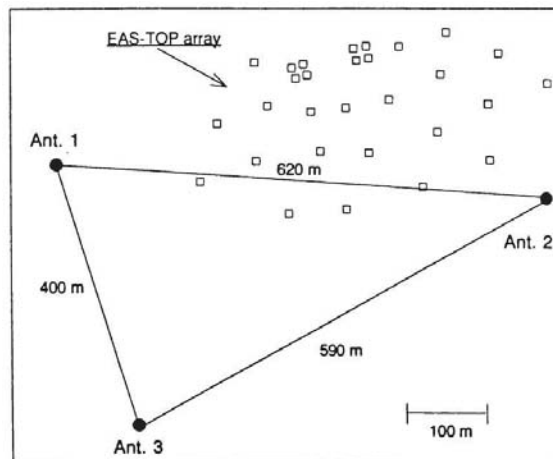


Fig. 1 - Layout of EASRADIO antennas and EAS-TOP modules.

Abbildung 5.4.: Layout des EASRADIO-Experimentes in Italien [12]

Zusätzlich zu dem Trigger von EASTOP wurde noch ein Selbsttriggersystem getestet. Aus der Analyse der Daten, welche in Koinzidenz mit den Teilchendetektoren gemessen wurden, konnte folgende Abhängigkeit zwischen dem gemessenen elektrischen Feld I und der Primärenergie der Teilchen E_0 gefunden werden:

$$I \propto E_0^{0,5}$$

Außerdem konnte der Selbsttriggermodus erfolgreich getestet werden. Wenn in allen drei Antennen innerhalb einer festgelegten Zeitspanne ein Signal über einer bestimmten Grenzspannung gemessen wurde, wurden Daten gespeichert. Aufgenommen wurden Daten bei 2,6MHz und einer Bandbreite von 500kHz. Die Zeitspanne und Grenzspannung wurden variiert, um den optimalen Wert zu ermitteln, an welchem keine „falschen“, durch Rauschquellen verursachten Signale mehr aufgenom-

men, aber die „echten“ Signale weiterhin erkannt wurden. Es wurde eine Grenzspannung von $150\mu\text{V}/\text{m}$ und eine Zeitspanne von weniger als $2\mu\text{s}$ gewählt. Ein mit dieser Konfiguration aufgenommenes Ereignis ist in Abbildung 5.5 zu sehen. Aus den gemessenen Amplituden und Ankunftszeitpunkten der einzelnen Antennen müsste es möglich sein, die Ankunftsrichtung und den Schauermittelpunkt eines Luftschauers zu bestimmen. Berechnungen hierzu wurden jedoch nicht vorgestellt [12].

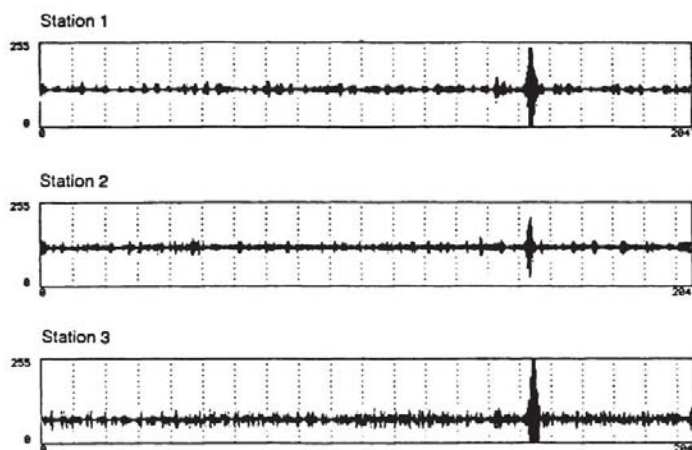


Fig. 2 - Example of event recorded in self-triggering configuration.

Abbildung 5.5.: Selbsttrigger-Signal in allen drei Stationen des EASRADIO-Experimentes [12]

Endgültige Resultate stellte keines dieser Experimente vor, weshalb es notwendig ist, weitere Untersuchungen im kHz-Bereich durchzuführen. Eine Zusammenfassung über die verschiedenen Ergebnisse der hier vorgestellten Experimente soll Tabelle 5.1 geben. Hier wird noch einmal deutlich, dass man zwar Radiostrahlung in Koinzidenz mit Luftschauern messen konnte, allerdings wenig Aussagen über Zusammenhänge zwischen Parametern der Radiostrahlung und Parametern der Luftschauer getroffen werden konnten. Daher ist es auch schwierig, Aussagen über den möglichen Entstehungsmechanismus zu treffen. Es ist außerdem auch möglich, dass die gemessenen Radiosignale nicht durch Luftschauer selbst verursacht wurden, sondern durch die Teilchendetektoren. Diese Möglichkeit wurde vermutlich von keinem der Experimente genauer untersucht oder zumindest nie veröffentlicht.

	Australien	Russland	Japan	Italien
ungefährer Messzeitraum	1973-1975	1984-1987	1983-1993	1990-1993
Referenz	[13], [14]	[2]	[26], [27], [33], [36]	[11], [12]
benutzte Antenne	90m lange, horizontale Drahtantenne	2m lange, vertikale Eisenantenne	10m lange, vertikale Drahtantenne	15m lange, vertikale Antenne
Beobachtungshöhe	etwa Meereshöhe	1000m ü. NN	900m ü. NN	2000m ü. NN
betrachtete Abstände zur Scherachse	mehrere 100m	bis 1km	bis 2km	mehrere 100m
Frequenz	60-140kHz	1-100kHz	50kHz, 170kHz, 1647kHz	350-500kHz und 1,8-5MHz
Pulsdauer	$\sim 50\mu s$	$\sim 35\mu s$	$\sim 5\mu s$	über $10\mu s$ bei 450-500kHz
Feldstärke	keine Angaben	$5 - 30 \frac{mV}{m \cdot MHz}$	$\sim 1 - 140 \frac{mV}{m \cdot MHz}$	bis $1, 1 \frac{mV}{m \cdot MHz}$
Energie	$10^{15} - 10^{16} eV$	$10^{16} - 10^{17} eV$	$N_e \approx 10^9$	$N_e \approx 5 \cdot 10^9 - 10^8$
gefundenen Abhängigkeiten	keine	Feldstärke wetterabhängig	Feldstärke $\propto \frac{1}{Abstand}$	Feldstärke \propto Primärenergie
Selbsttrigger	nein	ja	nein	ja

Tabelle 5.1.: Vergleich der Experimente

5.2. Theoretische Überlegungen zum Entstehungsmechanismus

Neben den experimentellen Versuchen, Luftschauer über die kHz-Strahlung nachzuweisen, wurden die möglichen Entstehungsmechanismen der Strahlung im kHz-Bereich theoretisch untersucht. Im Folgenden sollen einige dieser Ansätze betrachtet werden.

Bereits bevor erste Messungen durchgeführt worden waren, stellte Wilson im Jahr 1957 einen möglichen Emissionmechanismus vor, welcher Strahlung im kHz-Bereich voraussagte:

Der Luftschauer führt zu zusätzlicher Ionisation der Luftmoleküle. Dies hat eine Änderung des elektrischen Feldes zur Folge, welche, ähnlich wie in einer Ionisationskammer, messbar ist [39]. Dieser Mechanismus jedoch sagte, verglichen mit späteren Messungen, zu niedrige Feldstärken voraus. Ebenso die 1983 von Kaneko [28] vorgestellte Idee:

Die elektrische Komponente des Schauers führt zu einem negativen Strom. Zwar entstehen anfangs gleich viele Elektronen wie Positronen, doch da die Positronen mit den Ionen der Atmosphäre wechselwirken, entsteht ein Überschuss an Elektronen. Dieser negative Strom ändert sich sowohl zeitlich als auch räumlich, was zur Emission von Radiostrahlung führt. 1985 verglich Suga seine experimentellen Daten mit den Theorien von Wilson und Kaneko und erkannte, dass beide Theorien im Vergleich zu seinen Daten zu niedrige Feldstärken voraussagten und stellte deshalb eine neue Theorie vor [36]:

Er betrachtete ebenfalls die durch die Ionisation entstandenen Elektronen. Jedoch wollte er nicht wie Kaneko das dadurch veränderte elektrische Feld messen, sondern die Radiostrahlung, die diese Elektronen emittieren. Auf Grund des Erdmagnetfeldes werden die Elektronen beschleunigt und senden dabei Radiostrahlung aus. Dieser Ansatz lieferte zwar genügend hohe Feldstärken, jedoch müsste hier die messbare Feldstärke der Radioemission von dem elektrischen Feld der Atmosphäre abhängen, was Suga selbst 1987 widerlegte. Nach dieser Erkenntnis war für Suga der einzige mögliche Emissionsmechanismus die Übergangsstrahlung am Erdboden [33]:

Übergangsstrahlung entsteht, wenn die geladenen Teilchen den Erdboden erreichen. Dieser Mechanismus wurde bereits 1985 von Nishimura [34] betrachtet und mit anderen Mechanismen verglichen. Auch er kam zu dem Schluss, dass die Übergangsstrahlung der wichtigste Mechanismus zur Radioemission bei niedrigen Frequenzen darstellt. Indische Physiker der Gauhati Universität haben in den folgenden Jahren verschiedene Berechnungen zur Übergangsstrahlung veröffentlicht. Ihre Berechnungen verglichen sie mit experimentellen Daten und fanden viele Übereinstimmungen [8] [9] [15] [16].

Auch der ukrainische Physiker A.D. Filonenko hat sich mit der Theorie der Radioemission im kHz-Bereich beschäftigt. Im Jahr 2001 veröffentlichte er eine Zusammenfassung verschiedener Entstehungsmechanismen von Radiostrahlung sowie bis-

heriger Experimente. Laut Filonenko könnten neben der Übergangstrahlung auch ein Strom von δ -Elektronen oder eine Zyklotron²-Emission für die Radiostrahlung im kHz-Bereich verantwortlich sein [18].

5.2.1. Übergangstrahlung

Heute erscheint die Übergangstrahlung als wahrscheinlichster Emissionsmechanismus, da die anderen Theorien durch die experimentellen Daten mehr oder weniger ausgeschlossen wurden. Diese soll nun etwas genauer betrachtet werden.

Übergangstrahlung entsteht beim Durchgang geladener Teilchen durch die Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften. Qualitativ lässt sich die Entstehung dieser Strahlung wie folgt erklären: Fliegt ein geladenes Teilchen mit konstanter Geschwindigkeit durch ein Medium, so wird es von charakteristischen Feldern umgeben. Diese unterscheiden sich für Medien mit anderen elektrischen Eigenschaften - die Felder müssen sich folglich ändern. Diese Veränderung geschieht durch Aussenden von Übergangstrahlung. Erstmals erwähnt wurde diese Strahlung von Frank und Ginsburg im Jahr 1946.

Die Gruppe der Gauhati Universität hat ausgehend von den Maxwellgleichungen eine Formel für die Übergangstrahlung, welche durch Luftschauer entsteht, aufgestellt [9] [15]. Demnach nimmt die Radiostrahlung zu niedrigeren Frequenzen hin zu und hat sowohl vertikal als auch horizontal polarisierte Anteile. Bei einem leichten Primärteilchen mit einer Energie von 10^{18} eV sollen bei einer Frequenz von 100kHz Feldstärken von etwa 10mV/m messbar sein, bei einer Primärenergie von 10^{19} eV Feldstärken über 100mV/m. Diese Werte können als Richtwerte für Messungen genutzt werden, allerdings wurde nicht angegeben, für welchen Untergund oder welche Antennenposition diese Werte gelten.

²Zyklotronstrahlung entspricht der Synchrotronstrahlung für nichtrelativistische Teilchen

6. Aufbau des Experimentes

In Karlsruhe wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Experiment aufgebaut, um zu testen, ob die Radioemission kosmischer Strahlung im Frequenzbereich unterhalb von 500kHz gemessen werden kann. Dieses Experiment besteht aus drei Antennen, dazugehörigen Filtern und einem Aufnahmesystem. In diesem Kapitel werden zuerst alle zur Messung benutzten Komponenten einzeln vorgestellt und im letzten Abschnitt ein Überblick über das Experiment und die Datenaufnahme im Ganzen gegeben.

6.1. Testmessungen im Audibereich

Bevor das eigentliche Experiment aufgebaut wurde, wurden erste Testmessungen mit einer bereits vorhandenen Antenne durchgeführt. Dabei handelt es sich um eine Rahmenantenne mit etwa zwei Meter Durchmesser und 30 Wicklungen, siehe Abbildung 6.1.

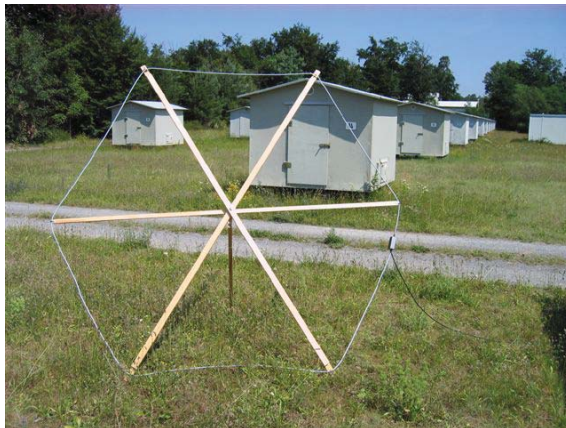


Abbildung 6.1.: Antenne zur Messung im Audibereich bis 22kHz, aufgestellt im KASCADE-Feld

An die Antenne wird eine Verstärkerschaltung, bestehend aus drei Verstärkerstufen, geschaltet. Diese Antenne ist ausgelegt auf die Messung von Radiostrahlung im Audibereich bis 22kHz. Als Analog-Digital-Wandler diente die Soundkarte Aureon 5.1, welche mit 44kHz sampelt. Die aufgenommenen Daten wurden mit LabVIEW¹

¹Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench

6. Aufbau des Experimentes

ausgewertet. In Abbildung 6.2 und 6.3 sind das Zeit- und das Frequenzsignal einer Messung zu sehen. Es wurde deutlich, dass der Untergrund in diesem Frequenzbereich sehr hoch ist und viele schmalbandige Peaks das Signal stören. Um 12kHz ist ein verstärkter Untergrund zu sehen. Dieser resultiert aus einer Übersteuerung der ersten Verstärkerstufe. Dies konnte jedoch erst erkannt werden, als die Soundkarte durch eine Messkarte mit höherer Samplerate ersetzt wurde. Auf Grund des hohen Rauschsignals in diesem Messbereich und der Informationen aus den historischen Messungen wurde entschieden, dass weitere Messungen mit einer anderen Antenne in einem Frequenzbereich von 50kHz bis 500kHz stattfinden sollten.

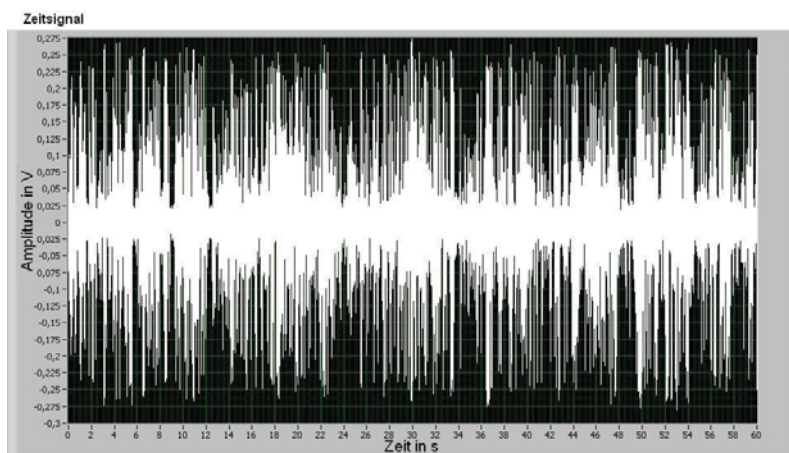


Abbildung 6.2.: Zeitsignal einer Messung im Audibereich

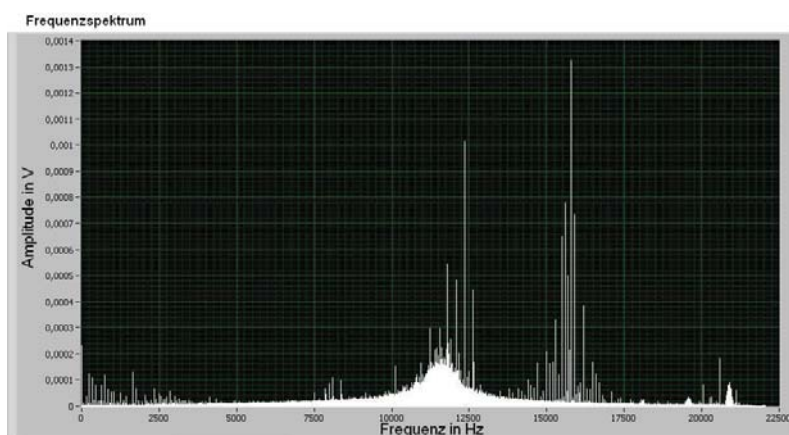


Abbildung 6.3.: Frequenzsignal einer Messung im Audibereich

6.2. Antennen

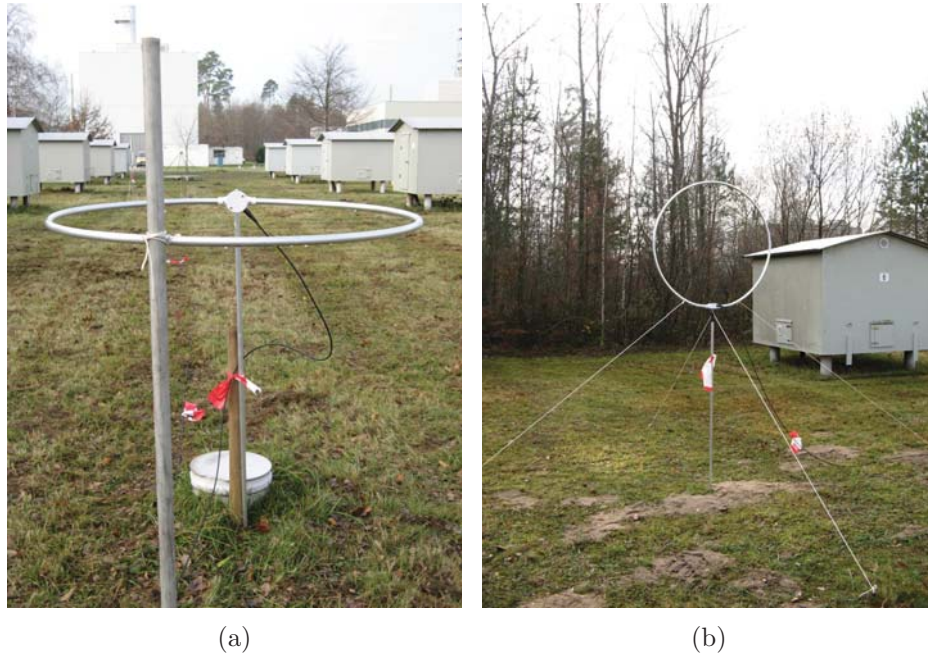


Abbildung 6.4.: a) Horizontale Antenne, b) Vertikale Antenne

Eine der wichtigsten Komponenten zur Messung der Radioemission im kHz-Bereich ist eine geeignete Antenne. Der hier erwünschte Frequenzbereich von 50kHz bis 500kHz entspricht einer Wellenlänge von mehreren hundert Metern bis zu einigen Kilometern. Die häufig einfachste Antennenform, der Dipol, ist in diesem Fall schwierig realisierbar, da dieser eine Länge ähnlich der gewünschten Wellenlänge erfordert. Ebenso wird der $\lambda/2$ - und $\lambda/4$ -Dipol zu lang. Eine andere Antennenform, welche ähnliche Eigenschaften wie die Dipolantenne hat, ist die Rahmenantenne. Ein wichtiger Unterschied zur Dipolantenne ist die gemessene Komponente der elektromagnetischen Welle. Die Dipolantenne ist sensitiv auf die elektrische und die Rahmenantenne auf die magnetische Komponente der Welle. Die Rahmenantenne wird aus diesem Grund auch als magnetische Antenne bezeichnet. Kombiniert man die Rahmenantenne mit aktiven Bauelementen, so ist es möglich, mit einer vergleichsweise kleinen und einfachen Antenne im kHz-Bereich zu messen. Eine solche Kombination bietet die Firma WELLBROOK Communications [37] mit der Antenne LFL1010.

6.2.1. Eigenschaften der Antenne LFL1010

Bei dieser Antenne handelt es sich um eine aktive magnetische Rahmenantenne, bestehend aus einem hohlen Aluminiumreifen, den aktiven Bauelementen direkt an der Antenne, welche auch als Verstärker dienen, und einer Anpassungsschaltung (im Folgenden Interface genannt) zwischen Antenne und Messkarte, welche mit 12V Versorgungsspannung betrieben wird. Die Antenne und das Interface sind über ein 100m langes Koaxialkabel verbunden, welches es ermöglicht, eine vom eigentlichen Aufnahmesystem ungestörte Messung durchzuführen. Dieser Aufbau und die Verarbeitung der Bauelemente im Verstärker an der Antenne bieten eine hohe Wetterbeständigkeit, weshalb die Antenne ohne Probleme im Freien betrieben werden kann. Der Aluminiumreifen der Antenne hat einen Durchmesser von einem Meter. Zusammen mit den aktiven Bauelementen entsteht so eine Antenne, die im Bereich von 10kHz bis 10MHz sensitiv ist. Im Anhang A befinden sich von der Firma WELLBROOK Communications zur Verfügung gestellte Kalibrierungsdaten. Diese können jedoch nur als Richtwert angesehen werden, da die Umgebung der Antenne und die Montage Einfluss auf die Empfindlichkeiten haben können. Eine Kalibrierung vor Ort ist jedoch sehr schwierig zu realisieren, da die aktiven Antennen nur für den Empfang und nicht zum Senden geeignet sind. Die Ausmaße einer geeigneten Sendeantenne übersteigen die verfügbaren Möglichkeiten.

Des Weiteren wird die LFL1010 als äußerst rauscharm beschrieben: Durch die Messung der magnetischen Komponente können lokale Störungen durch elektrische Felder reduziert werden. In der Nähe des Stromnetzes überwiegt das elektrische Feld, erst im Fernfeld haben die magnetische Komponente $c \cdot B$ und die elektrische Komponente F die gleiche Amplitude. Eine weitere Rauschquelle ist die Intermodulation². Die Intermodulationsprodukte sind bei der LFL1010 jedoch so weit reduziert, dass sie unterhalb des atmosphärischen und industriellen Rauschens liegen.

Es besteht die Möglichkeit, die Antenne auf verschiedene Arten zu befestigen und dadurch verschiedene Polarisationsrichtungen zu messen. Wird die Antenne vertikal montiert, so ist sie sensitiv auf den vertikal polarisierten Anteil der Wellen, wird sie horizontal montiert, auf den horizontalen Anteil. Die unterschiedliche Montage führt auch zu leicht unterschiedlichen Richtdiagrammen. Die Richtdiagramme zweier horizontal beziehungsweise vertikal montierter Rahmenantennen sind in Abbildung 6.5 dargestellt. Bei der senkrechten Aufstellung entspricht das Richtdiagramm der typischen Achter-Charakteristik, wie sie auch der Dipol aufweist. Bei der horizontalen Aufstellung wird dieses Muster etwas verzerrt. Abhängig vom Abstand zur Erde werden die Doppelkreise angehoben - je geringer der Abstand, desto stärker die Verschiebung.

²Durch nichtlineare Bauelemente werden aus gemessenen Signalen neue Signale erzeugt, welche als Intermodulationsprodukt bezeichnet werden [21].

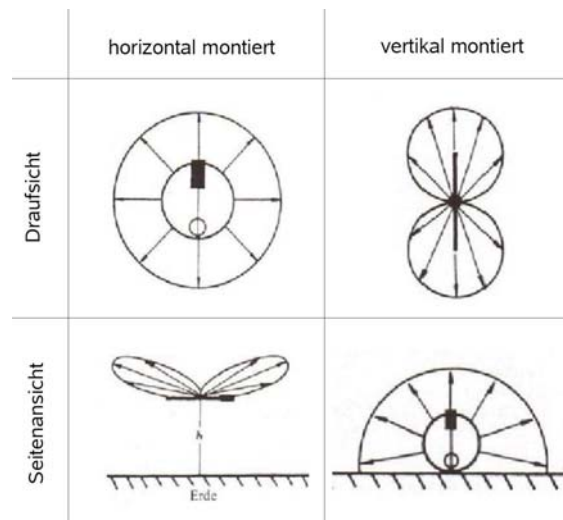


Abbildung 6.5.: Richtdiagramme einer Rahmenantenne aus [35]

6.3. Frequenzfilter

Um Aliasrauschen³ zu verhindern, wird ein Tiefpassfilter benötigt. Benutzt wird ein Filter der Firma Linear Technology. Bei diesem Filter, Typ LTC1560-1, siehe Abbildung 6.6(a), handelt es sich um einen digitalen elliptischen Filter 5. Ordnung. Die Grenzfrequenz kann auf 1MHz oder 500kHz eingestellt werden. Auf Grund einer Samplerate von 1MHz an der Messkarte werden als Grenzfrequenz 500kHz gewählt. Um eine stärkere Dämpfung oberhalb von 500kHz zu erreichen, wurden verschiedene zusätzliche RC-Glieder angeschlossen. Abbildung 6.7(a) zeigt den Frequenzgang des originalen Filters mit verschiedenen Zusatzschaltungen. Für die Messung wurde die Zusatzschaltung mit dem Kondensator $C=330\text{pF}$ gewählt. Bei niedrigeren Kapazitäten ist zwar die Dämpfung oberhalb von 500kHz besser, jedoch besteht bereits unterhalb von 500kHz eine nicht geringe Dämpfung, welche das Signal vermindert. Abbildung 6.7(b) zeigt den Frequenzgang für die drei Filter der einzelnen Antennen. Die Unterschiede der verschiedenen Filter sind vernachlässigbar.

Eine weitere positive Eigenschaft des Filters ist die relativ konstante Gruppenlaufzeit. Im Bereich von 0kHz-500kHz ist die Differenz der Laufzeiten kleiner als $2\mu\text{s}$, dies entspricht weniger als zwei Sample. Die vom Hersteller bereitgestellten Daten hierfür sind in Abbildung 6.6(b) zu sehen.

³Näheres hierzu siehe 4.1.3

6. Aufbau des Experimentes

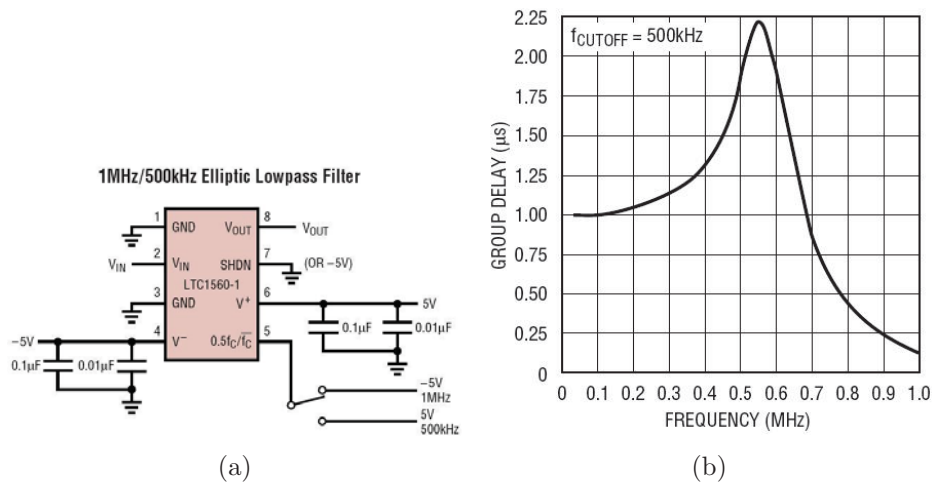


Abbildung 6.6.: a) Standardschaltung und b) Gruppenlaufzeit des LTC1560-1 [30]

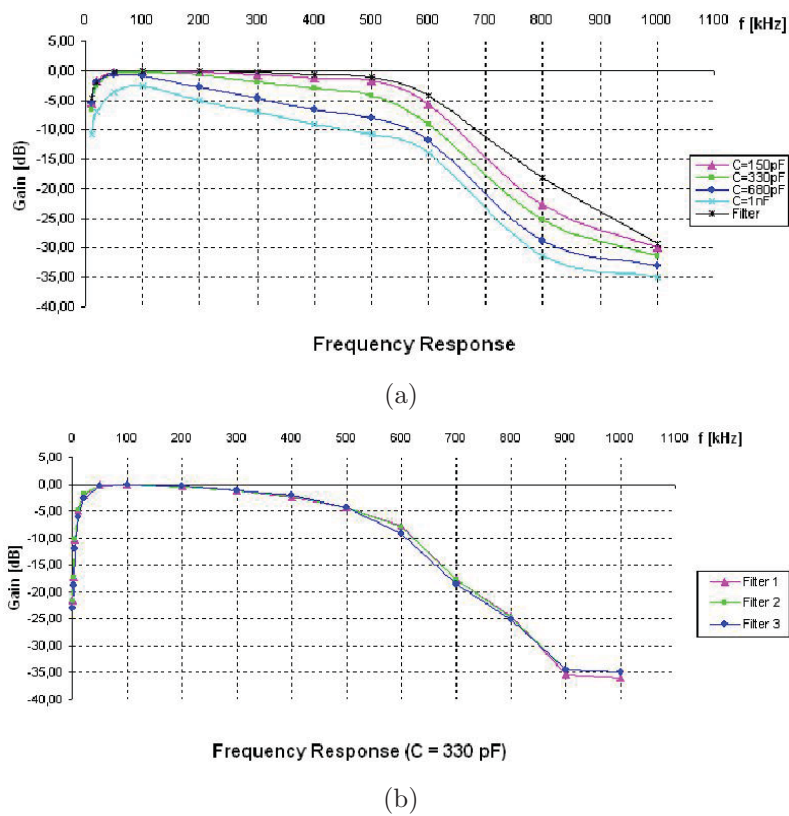


Abbildung 6.7.: Frequenzgang des LTC1560-1
 a) mit verschiedenen Zusatzschaltungen, b) für die drei benutzten Filter der Antennen

6.4. Messkarte

Die Messkarte dient als Analog/Digital-Wandler und steuert die Aufnahme. Benutzt wird in diesem Experiment die Messkarte M2i4641 von SPECTRUM Systementwicklung. Diese wird mit dem Softwareprogramm LabVIEW gesteuert, mit welchem auch die weitere Analyse durchgeführt wird.

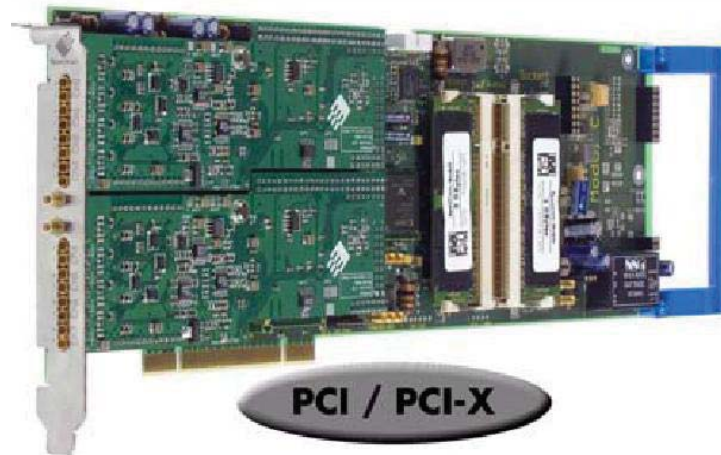


Abbildung 6.8.: Messkarte M2i4641 von SPECTRUM Systementwicklung

6.4.1. Eigenschaften der Messkarte M2i4641

Bei der Messkarte M2i4641 stehen vier analoge Signaleingänge zur Verfügung, deren Spannungsbereich von $\pm 50\text{mV}$ bis $\pm 10\text{V}$ variiert werden kann. Es ist außerdem möglich, einen festen Offset-Wert einzustellen oder direkt die Differenz zweier Signale zu messen. Jeder dieser Eingänge wird mit einer Auflösung von 16bit und einer Samplerate von 1MHz ausgelesen.

Als Taktgeber kann entweder ein externer oder ein interner⁴ Taktgeber gewählt werden. Genauso gibt es verschiedene Triggermöglichkeiten. Hier kann gewählt werden, ob ein internes Signal, ein externes TTL⁵ Signal oder einer der Eingangskanäle als Triggersignal dienen soll. Es können auch mehrere Triggerbedingungen durch „und/oder“-Verknüpfungen kombiniert werden. Des Weiteren kann das Triggerlevel und die Triggerflanke eingestellt werden.

Außerdem stehen verschiedene Aufnahmeoptionen zur Verfügung: der „Standard Single“- und der „FIFO⁶ Single“-Aufnahmemodus. Beim „Standard Single“ arbeitet die Messkarte unabhängig vom Computer. Die Daten werden kontinuierlich auf

⁴intern bedeutet hier, von der Messkarte selbst erstellt

⁵Transistor-Transistor-Logik

⁶First In First Out

den Kartenspeicher geschrieben. Nach einem Triggersignal werden die Daten an den Computer weitergeleitet und können dann verarbeitet werden. Beim „FIFO Single“ werden die Daten kontinuierlich an den Computer weitergeleitet und können dort direkt bearbeitet werden. In beiden Aufnahmeoptionen kann die gespeicherte Anzahl an Sample pro Trigger definiert werden. Ebenso kann bei beiden Optionen ein Pretrigger und ein Posttrigger festgelegt werden. Die maximal mögliche Anzahl an Sample, die aufgenommen werden können, ist abhängig vom verfügbaren Speicher. Auf der Karte stehen standardmäßig 256MB Speicher zur Verfügung, es kann jedoch zusätzlicher Speicher auf der Karte montiert werden.

6.4.2. LabVIEW in der Aufnahmesteuerung

LabVIEW ist eine graphische Programmiersprache, welche nach dem Datenfluss-Modell funktioniert. Die einzelnen Programme werden als VIs ⁷ bezeichnet. VIs können auch als Sub-VIs in andere VIs eingebunden und verwendet werden. Eine Auswahl an VIs, mit welchen die Messkarte gesteuert werden kann, wurde von SPECTRUM Systementwicklung zur Verfügung gestellt. Dies erleichtert die Kommunikation zwischen Computer und Messkarte. Nachdem das Aufnahmesystem programmiert wurde, ist die Bedienung der Karte durch den Nutzer sehr einfach. Mit einer graphischen Oberfläche können die in Abschnitt 6.4.1 vorgestellten Einstellungen verändert werden. Außerdem kann das gemessene Signal direkt angezeigt werden. In Abbildung 6.9 ist diese graphische Oberfläche zu sehen.

⁷Virtual Instrument

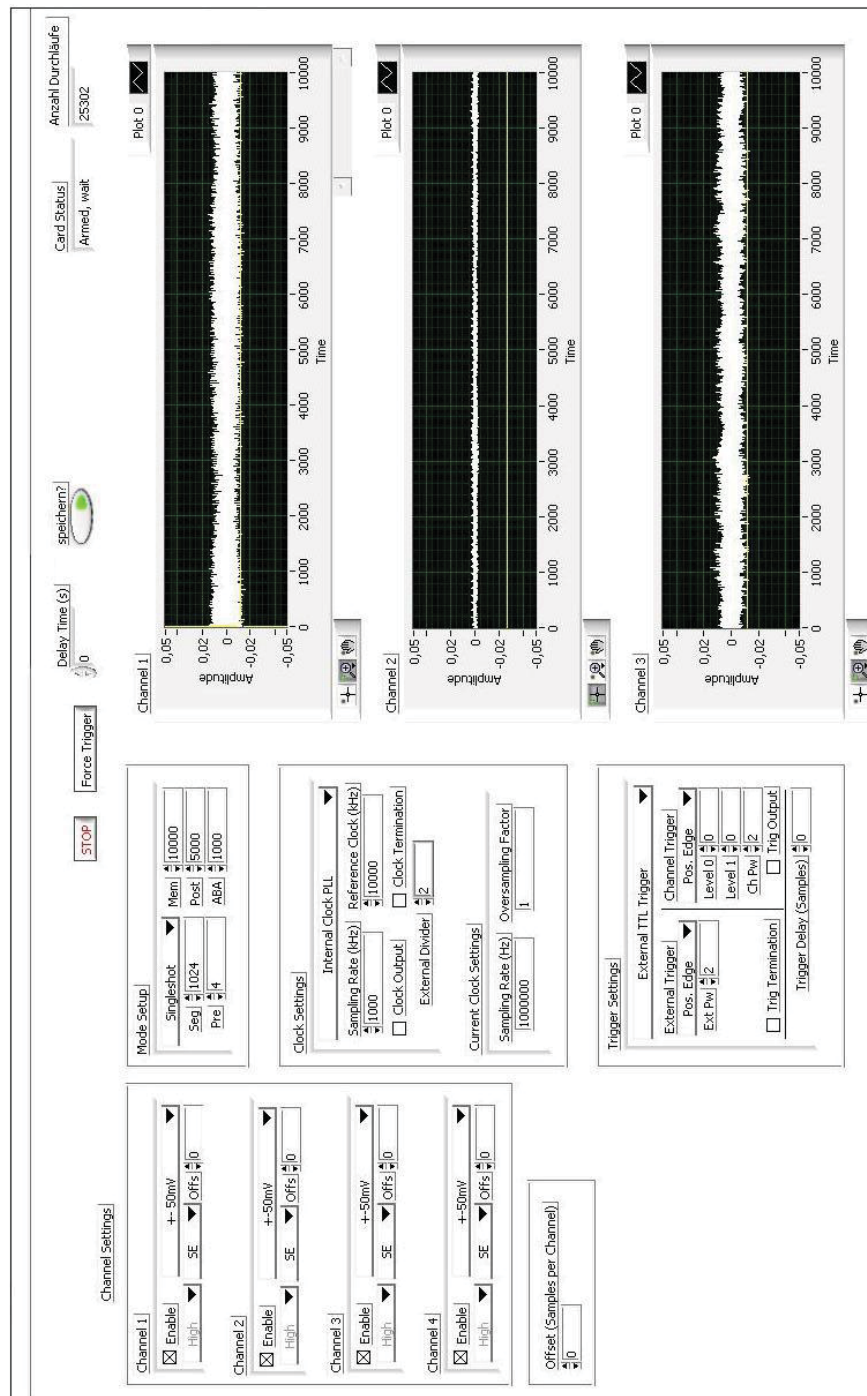


Abbildung 6.9.: Graphische Bedienoberfläche des experimentellen Aufbaus mit Anzeige des aktuellen Signals

6.5. Kombination aller Bauteile

Der Aufnahmerechner mit der eingebauten Messkarte befindet sich innerhalb des KASCADE-Experimentes im Aufnahmecontainer, dem sogenannten „Cluster-König“, von Cluster 2. Dort befinden sich auch die Filter und das Antennen-Interface. Von dort führen die 100m langen Koaxialkabel zu den drei Antennen. Dieser Aufbau ist schematisch in Abbildung 6.10 zu sehen. Da die Kabel auf der Erde liegen, ist es nicht möglich, die Wege innerhalb des KASCADE-Feldes zu kreuzen. Darum wurden die Standorte wie in Abbildung 6.11 gewählt. Die Antennen wurden auf Metallstangen in etwa 1,5m Höhe montiert.

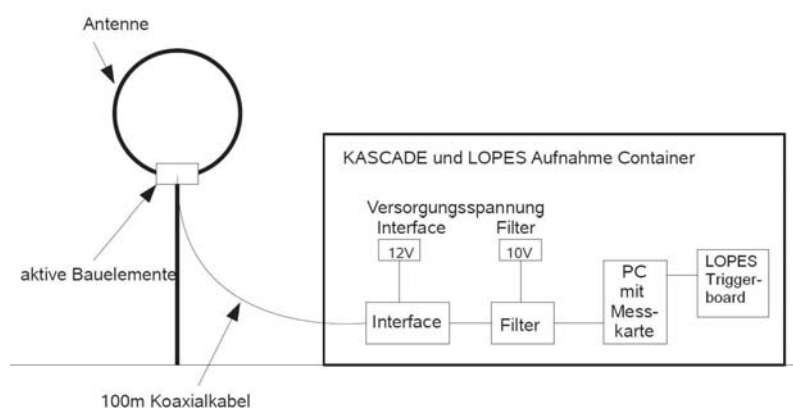


Abbildung 6.10.: Schematische Darstellung des Antennensystems

Um eine möglichst gute Abdeckung des Raumes und aller Polarisationsrichtungen zu erreichen, wurden zwei Antennen vertikal und eine dritte horizontal aufgestellt. Die vertikalen Antennen sind senkrecht zueinander und um ca. 15° gedreht zu den Himmelsrichtungen, da sie am KASCADE-Feld ausgerichtet sind. Antenne 1, im Folgenden Antenne N-S, ist die westlichste Antenne. Sie ist vertikal aufgestellt und grob in Nord-Süd-Richtung ausgerichtet. Antenne 2, im Folgenden Antenne Ho, ist im Abstand von etwa 13m zu Antenne N-S aufgestellt. Sie misst die horizontal polarisierte Strahlung. Die östlichste Antenne, Antenne 3 oder Antenne O-W, misst wieder die vertikal polarisierte Strahlung. Antenne O-W ist grob in Ost-West-Richtung ausgerichtet und etwa 120m von Antenne N-S entfernt. Laut Richtdiagramm in Abbildung 6.5 ist es daher mit den Antenne N-S und O-W gemeinsam möglich, aus allen Himmelsrichtungen vertikal polarisierte Strahlung zu empfangen. Antenne Ho kann horizontal polarisierte Strahlung aus fast allen Richtungen messen. Nur Strahlung, die senkrecht und mittig auf die Antenne trifft, kann nicht empfangen werden. Um eine höhere mechanische Stabilität zu erreichen wurden die vertikalen Antennen mit jeweils vier Seilen und Haken am Erdboden befestigt und die horizontale Antenne an eine zusätzliche Haltestange gebunden. Dies ist in den Abbildungen 6.4(a) und 6.4(b) zu sehen.

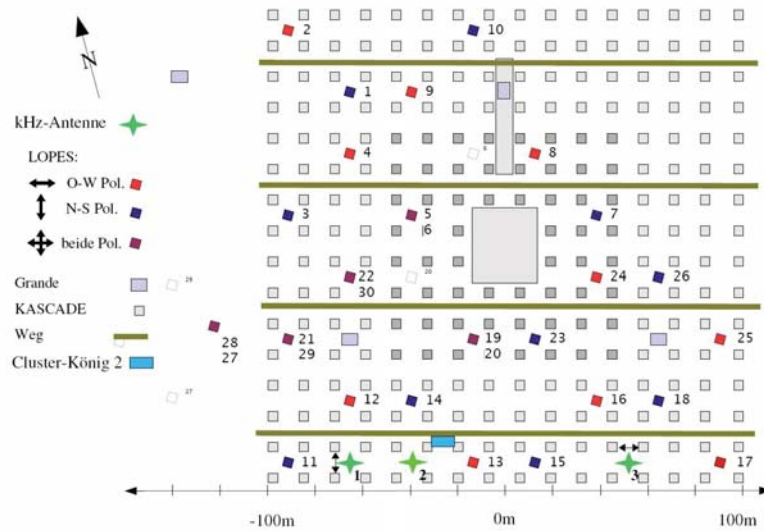


Abbildung 6.11.: Layout der kHz-Antennen innerhalb des KASCADE-Feldes

An den Antennen werden die Signale verstärkt und von dort an das Antenneninterface weitergeleitet. Dann gelangen die Signale zu den drei Filtern, wo Frequenzen oberhalb von 500kHz gedämpft werden. So wird das Aliasrauschen beim Abtasten mit 1MHz vermindert.

Die Messkarte arbeitet im „Standard Single“ Aufnahmemodus und wird im Normalfall extern durch KASCADE-Grande getriggert. Die Triggerbedingungen sind die gleichen, welche für die LOPES-Datennahme genutzt werden: Wenn mindestens 10 der 16 KASCADE-Cluster oder die KASCADE-Grande Triggerhexagons 9, 10 und 13 gleichzeitig triggern, wird das Triggersignal an LOPES und somit auch an die kHz-Messung weitergeleitet. Dies führt zu einer Triggerrate von rund 0,03Hz. Für Untergrundmessungen wird jede Minute ein internes Triggersignal gegeben. Aufgenommen werden immer 10000 Sample, dies entspricht 10ms. Davon werden 5000 Sample vor dem Trigger und 5000 Sample nach dem Trigger aufgezeichnet. Für jede Antenne und jeden Tag werden die entstehenden Dateien in einzelne Ordner gespeichert. Der Dateiname enthält die Uhrzeit des Beginns der Datennahme in der Form hh:mm:ss,(ms). Diese Daten werden auf dem Computer gespeichert und können von dort weiterverarbeitet werden.

7. Untergrundanalyse

Bevor eine Analyse der durch KASCADE-Grande getriggerten Daten stattfinden kann, muss der Radiountergrund analysiert werden. Mit den erhaltenen Ergebnissen, können schmalbandige Störungen und zeitlich konstanter Untergrund herausgefiltert werden. Durch Luftschauer verursachte Signale werden bei dem dann niedrigeren Rauschen leichter erkannt.

7.1. Untergrundsignale

7.1.1. Vergleich der mit beziehungsweise ohne Frequenzfilter gemessenen Signale

Um einen ersten Eindruck des von den Antennen aufgenommenen Frequenzspektrums zu erhalten, wurde mit Hilfe eines Spektrumanalysators das Frequenzspektrum noch vor dem Frequenzfilter gemessen. In Abbildung 7.1 ist dieses Frequenzspektrum für Antenne N-S zu sehen. Es wird deutlich, dass die Antenne auch Frequenzen oberhalb von 500kHz misst: sowohl das natürliche Hintergrundrauschen, als auch einige Mittelwellenrundfunksender. Dabei ist der Sender mit dem größten Signal der Rundfunksender von Mühlacker, welcher bei 576kHz sendet. Diese gemessenen Signale machen deutlich, wie wichtig es ist, einen Tiefpassfilter zwischen Antennen und Messkarte zu installieren, um Aliasrauschen zu verhindern.

In Abbildung 7.2 ist das Frequenzspektrum derselben Antenne nach Einbau des Filters LTC1560-1 zu sehen. Die meisten schmalbandigen Störungen oberhalb von 500kHz konnten erfolgreich gedämpft werden. Unterhalb von 500kHz bleibt das Spektrum am Spektrumanalysator unverändert. Bei der Anzeige am PC ist eine Reduktion des Rauschens sichtbar. Allerdings ist es mit dem zur Verfügung stehenden Filter nicht möglich, den Sender bei 576kHz genügend zu dämpfen. Hierzu wäre ein Filter mit einem oberhalb von 500kHz steiler abfallenden Frequenzgang nötig. Es ist bereits geplant, einen steileren Filter einzubauen, um eine bessere Dämpfung zu erreichen. Dies konnte jedoch nicht mehr im Rahmen dieser Arbeit verwirklicht werden.

7. Untergrundanalyse

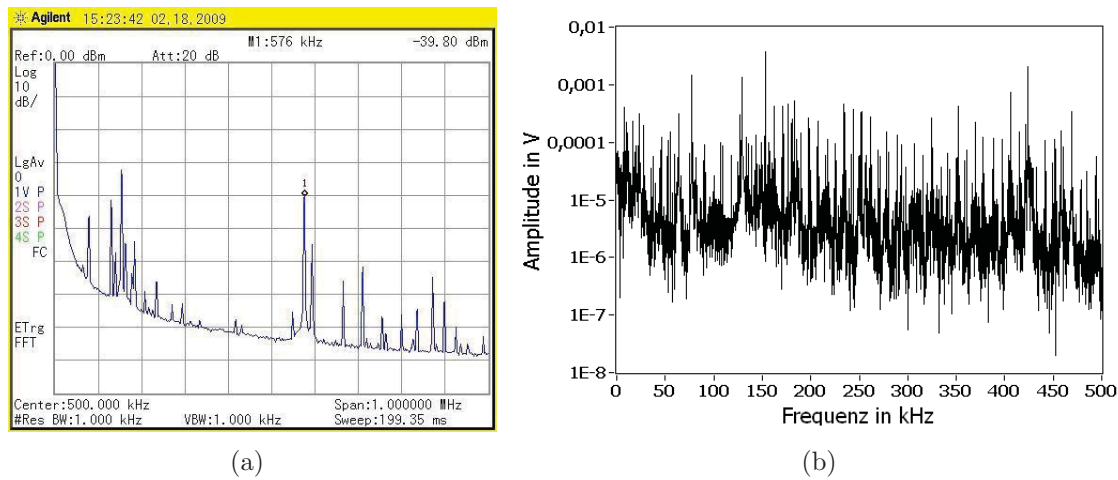


Abbildung 7.1.: Frequenzspektrum von Antenne N-S
a) am Spektrumanalysator von 0MHz bis 1MHz, b) an der Messkarte von 0kHz bis 500kHz

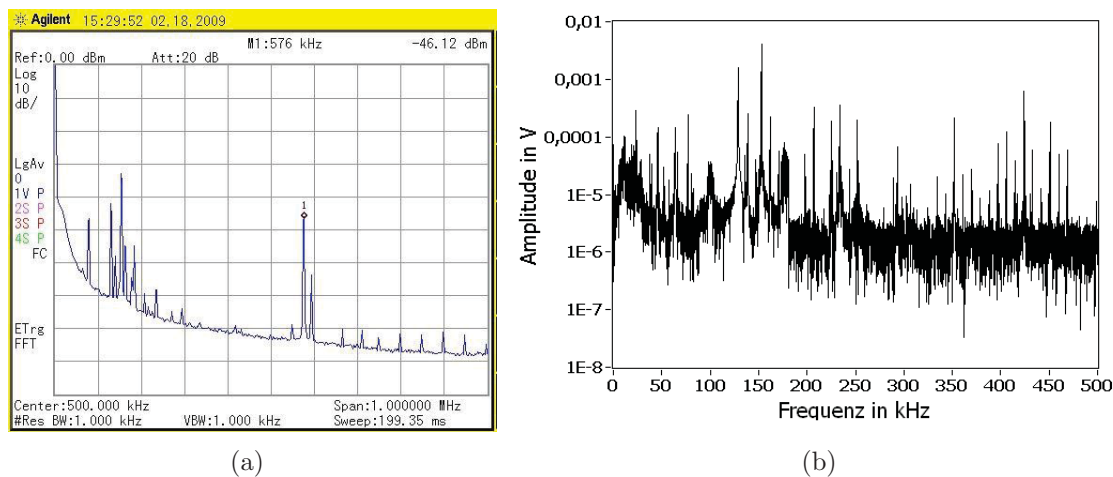


Abbildung 7.2.: Frequenzspektrum von Antenne N-S mit Frequenzfilter
a) am Spektrumanalysator von 0MHz bis 1MHz, b) an der Messkarte von 0kHz bis 500kHz

7.1.2. Zeitsignale und Frequenzspektren

In Abbildung 7.3 ist nun ein typisches intern getriggertes Signal, wie es von der Messkarte ausgegeben wird, zu sehen. Das Frequenzspektrum gemittelt über den gesamten Tag ist in Abbildung 7.4(a) abgebildet. Durch diese Mittelung sind ständige Signale, wie zum Beispiel Rundfunksender, leichter zu identifizieren.

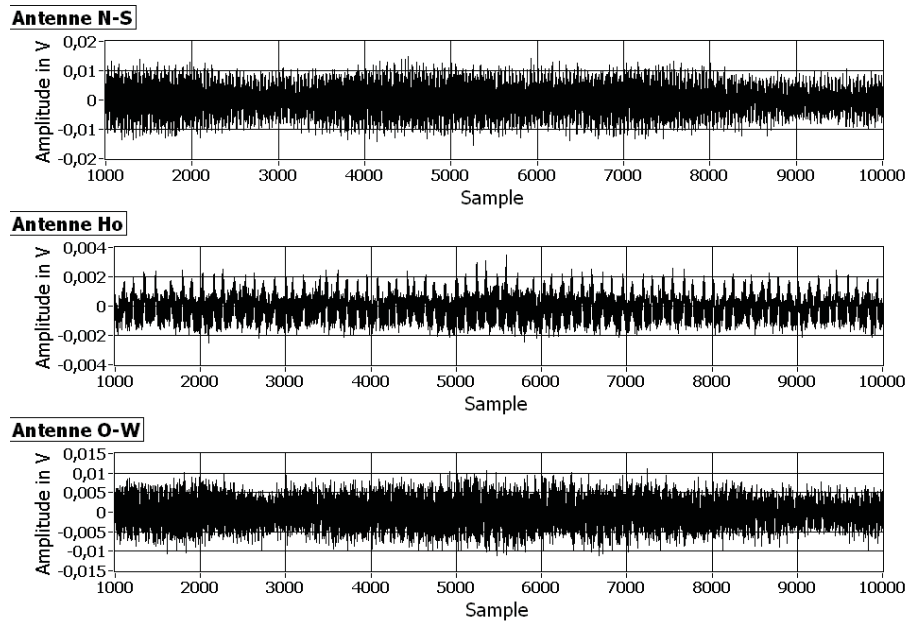


Abbildung 7.3.: Typisches Rauschsignal in den einzelnen Antennen vom 19.04.2009, 00:03:52; man beachte die unterschiedlichen Skalen auf der Amplituden-Achse

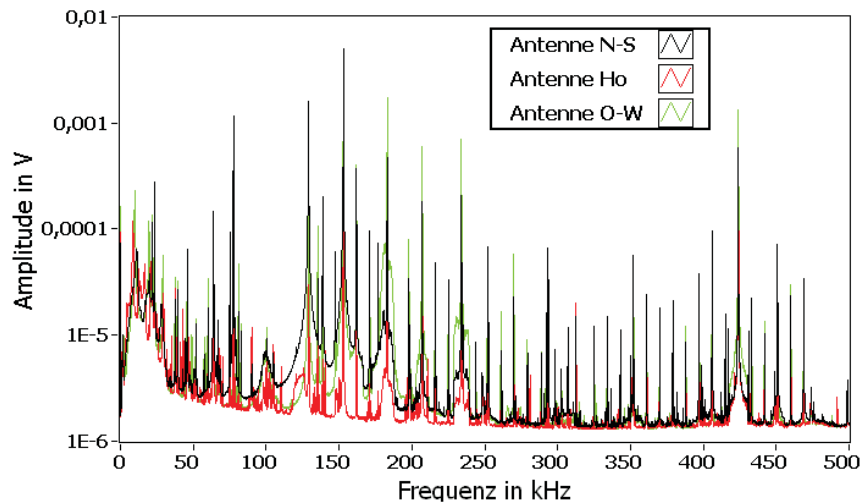
Beim Betrachten der Zeitsignale fällt auf, dass das Signal von Antenne Ho eine deutlich geringere Amplitude hat, als das Signal von Antenne N-S und Antenne O-W. Bei Antenne Ho handelt es sich um die horizontal montierte Antenne, welche die horizontal polarisierte Komponente der Radiostrahlung misst. Somit ist das niedrigere Signal darauf zurückzuführen, dass weniger Radiosignale empfangen werden, da die meisten Radiosender vertikal polarisierte Strahlung aussenden. Das Signal in den Antennen N-S und O-W wird von diesen Langwellensendern dominiert. Dies wird auch beim Betrachten des Frequenzspektrums deutlich: Das breitbandige Rauschen der drei Antennen hat oberhalb von 200kHz eine ähnliche Amplitude, die schmalbandigen Störungen im Langwellenbereich hingegen sind größtenteils nur in den Antennen N-S und O-W zu sehen.

Das Signal von Antenne Ho wird dominiert von einem niederfrequenten Signal mit einer Frequenz von etwa 8kHz. Dieses wird zwar von den Antennen N-S und O-W ebenfalls gemessen, ist aber nicht zu sehen, da deren Amplituden zu hoch sind: Das niederfrequente Signal geht im Rauschen durch die schmalbandigen Signale unter. Vermutlich entsteht dieses niederfrequente Signal durch elektrische Bauteile in der Umgebung der Antennen.

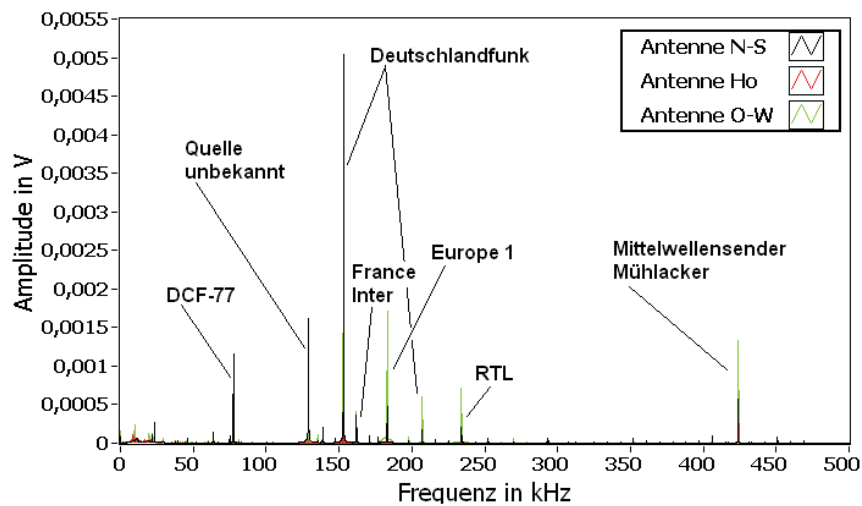
Die meisten der schmalbandigen Störungen werden von Rundfunksendern im Langwellenbereich verursacht. Außerdem kann man das Signal des Zeitzeichensenders DCF-77 und des Mittelwellenrundfunksenders von Mühlacker sehen. Letzterer wur-

7. Untergrundanalyse

de jedoch durch den Aliaseffekt an den 500kHz gespiegelt und liegt somit bei 424kHz. Einige der niedrigen Peaks werden vermutlich ebenfalls durch gedämpfte und durch Aliasrauschen gespiegelte Mittelwellenrundfunksender verursacht. In Abbildung 7.4(b) sind die größten Peaks den bekannten Quellen zugeordnet. Ein hoher Peak bei etwa 130kHz konnte jedoch bisher keiner bekannten Quelle zugeordnet werden.



(a)



(b)

Abbildung 7.4.: Gemitteltetes Frequenzspektrum vom 19.04.2009
a) logarithmische Auftragung,
b) lineare Auftragung mit zugeordneten Quellen

Die Amplituden der Peaks durch Langwellensender sind in den verschiedenen Antennen unterschiedlich hoch. Dies liegt einerseits daran, dass die Antennen sich in ihrer Empfindlichkeit leicht unterscheiden können. Dieser Fehler ließe sich jedoch nur mit einer genauen „vor Ort“-Kalibrierung umgehen. Andererseits unterscheiden sich auch die empfangenen Signale je nach Lage des Senders, da die Sensitivität der Antennen richtungsabhängig ist. Ein Sender nördlich des Forschungszentrums wird beispielsweise von Antenne N-S deutlich stärker empfangen als von Antenne O-W. Über diese Richtungsabhängigkeit kann die Zuordnung der Sender nochmals überprüft werden. Dies soll hier am Beispiel des Senders Europe 1 bei 183kHz durchgeführt werden:

Europe 1 befindet sich westlich von Karlsruhe in Felsberg, Überherrn im Saarland. In Abbildung 7.5 ist der Standort der beiden Antennen N-S und O-W zu sehen sowie die Richtung, in welcher sich der Sender befindet. Antenne N-S ist senkrecht zu den Wegen des KASCADE-Feldes ausgerichtet, Antenne O-W parallel dazu. Laut Richtdiagramm aus Abbildung 6.5 bedeutet dies, dass Antenne N-S den Sender Europe 1 deutlich schlechter empfangen sollte als Antenne O-W. Die gemessenen Amplituden bestätigen dies: Antenne N-S hat bei 183kHz eine gemittelte Amplitude von $0,47 \cdot 10^{-3}\text{V}$, die Amplitude von Antenne O-W ist mit $1,74 \cdot 10^{-3}\text{V}$ etwa 3,7 mal höher.

Mit dieser Richtungsabhängigkeit der gemessenen Amplituden kann eventuell auch die Richtung der durch Luftschauer verursachten Radioemission bestimmt werden und somit die Ankunftsrichtung des Luftschauers.



Abbildung 7.5.: Standort der Antennen und Richtung des Senders Europe 1

Der Peak bei 130kHz kann auf diese Weise ebenfalls näher untersucht werden: Das Signal in den Antennen N-S und O-W hat eine höhere Amplitude, somit muss es sich um ein hauptsächlich vertikal polarisiertes Signal handeln. Außerdem ist das Signal in Antenne N-S fast 5 mal stärker als in Antenne O-W. Dies lässt vermuten, dass

die Quelle eher im Norden oder Süden zu finden ist, als im Westen oder Osten. Laut Frequenznutzungsplan ist dieser Frequenzbereich für den Navigationsfunkdienst vorgesehen. Es sind jedoch weder im Norden noch im Süden des Forschungszentrums solche Funkanlagen bekannt. Ansonsten könnte es sich auch um ein von KASCADE-Grande oder von anderen elektrischen Bauteilen verursachtes Signal handeln.

7.1.3. Tagesverläufe

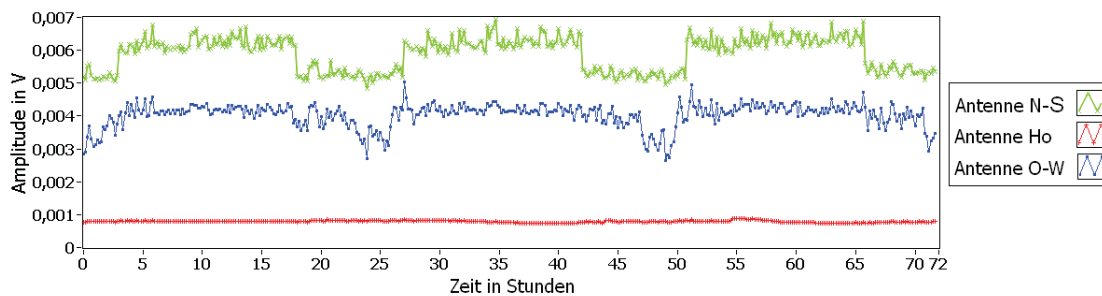
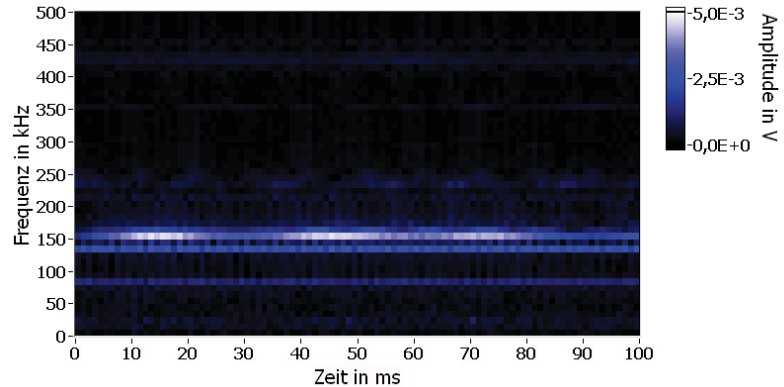


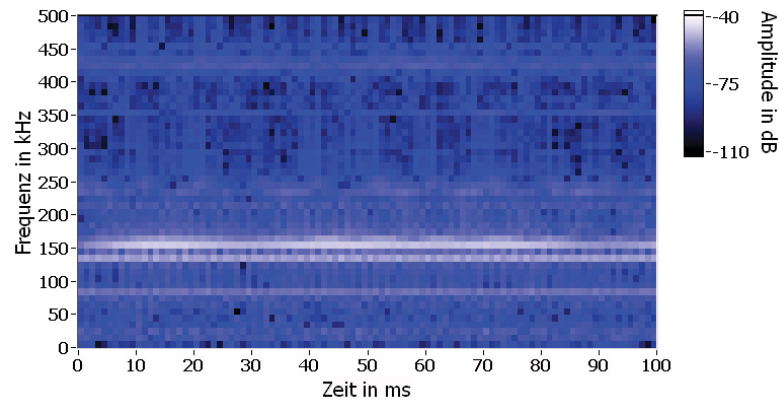
Abbildung 7.6.: Quadratisch gemittelte Amplituden der einzelnen Antennen über mehrere Tage;
Startzeit der Messung: 18.04.2009, 00:00 Uhr,
Ende der Messung: 20.04.2009 24:00 Uhr

In Abbildung 7.6 ist der Tagesverlauf für die Zeit vom 18.04.09 bis 20.04.09 zu sehen. Dabei wurde jeweils der quadratische Mittelwert von zehn Messungen mit einer Dauer von 10ms und einem zeitlichen Abstand von 60s gebildet und über der Zeit aufgetragen. In Antenne Ho ist fast keine Abhängigkeit, in Antenne O-W eine leichte Abhängigkeit und in Antenne N-S eine starke Abhängigkeit von der Tageszeit zu beobachten. Eine Zunahme des Signals gegen 03:00 Uhr und eine Abnahme des Signals um etwa 18:00 Uhr sind deutlich erkennbar. Diese werden durch den Sender Deutschlandfunk auf 153kHz verursacht: Dieser Sender halbiert seine Leistung während der Nacht. Auf Grund der geographischen Lage und der gesendeten Polarisation wird dieser Sender hauptsächlich von Antenne N-S empfangen, weshalb dort die Tag/Nacht-Unterschiede am größten sind. Das durch die zusätzliche Ausbreitung über die Raumwelle erwartete Ansteigen des Rauschpegels während der Nacht (Abschnitt 4.2.1) ist hier nicht sichtbar.

7.2. Dynamische Spektren



(a)



(b)

Abbildung 7.7.: Dynamisches Spektrum eines ungetriggerten Signals vom 19.04.2009, 00:03:52 Uhr, aufgenommen von Antenne N-S

- a) Amplitude in V,
- b) Amplitude in dB

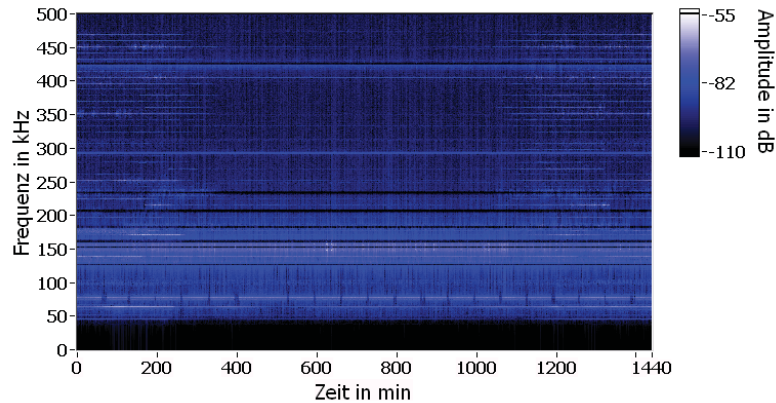
Um die zeitliche Änderung der Frequenz darzustellen, können dynamische Spektren erstellt werden. Hierzu wird die Frequenz über der Zeit aufgetragen und die Höhe der jeweiligen Amplituden werden farblich dargestellt. Dabei muss eine geeignete Frequenz- und Zeitaufösung gewählt werden: je höher die zeitliche Auflösung, desto geringer die Frequenzaufösung. In Abbildung 7.7 wurde die Frequenz jeweils über 100 Sample bestimmt, das bedeutet, dass die Zeitaufösung $100\mu\text{s}$ beträgt und die Frequenzaufösung 10kHz . Dargestellt ist sowohl die lineare Amplitude als auch die Amplitude in dB¹ aufgetragen. Wieder sind die starken Signale der Radiosender bei

¹dB: Logarithmus der Amplitude bezogen auf 1V

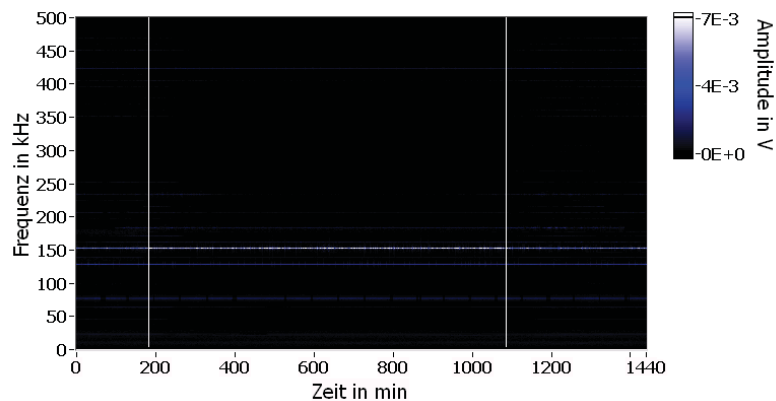
7. Untergrundanalyse

153kHz und bei 424kHz, des Senders DCF-77 bei 77kHz und das Signal der unbekanntenen Quelle bei 130kHz zu sehen.

Auch über den Tagesverlauf können mit dem dynamischen Spektrum weitere Erkenntnisse gewonnen werden. Hierzu wird von jedem Signal eines kompletten Tages die Frequenz aus den ersten 1000 Sample berechnet und dann über der Zeit aufgetragen. Die zeitliche Auflösung beträgt daher eine Minute und die Frequenzauflösung 1kHz.



(a)



(b)

Abbildung 7.8.: Dynamisches Spektrum vom 19.04.2009 aufgenommen von Antenne N-S, die senkrechten Linien wurden bei 03:00 Uhr und 18:00 Uhr eingezeichnet;

0min entspricht 00:00 Uhr; 1440min entspricht 24:00 Uhr

a) Amplitude in dB,

b) Amplitude in V

Anhand des dynamischen Spektrums, Abbildung 7.8 am Beispiel des 19.04.2009, lässt sich nochmals überprüfen, wodurch der Anstieg des Signals während des Tages

zustande kommt. Obwohl viele der Peaks im Bereich oberhalb von 200kHz nachts sogar stärker werden, (siehe a), wurde im vorigen Abschnitt eine Abnahme des Signals während der Nacht beobachtet. Jedoch kann bei dem Signal vom Deutschlandfunk bei 153kHz eine Zunahme des Signals nach etwa 181 Minuten und eine Abnahme nach etwa 1088 Minuten erkannt werden, (siehe b). Dieses Signal ist stärker als die anderen und führt somit zu einem Anstieg des Zeitsignals um 03:00 Uhr und einer Abnahme um 18:00 Uhr, was genau mit den Uhrzeiten, welche im vorigen Abschnitt bestimmt wurden, übereinstimmt.

7.3. Filterung unerwünschter Signale

Um das Rauschen in den Antennen zu minimieren, werden die besprochenen schmalbandigen Störungen digital herausgefiltert. Dies beeinflusst das Signal der Luftschauer kaum, da dieses als sehr breitbandig vermutet wird. Mit Hilfe von LabVIEW werden die Signale bei 128kHz, 153kHz, 162kHz, 183kHz und 234kHz mit einer Bandbreite von 6kHz, bei 207kHz und 426kHz mit einer Bandbreite von 7kHz und bei 77kHz mit einer Bandbreite von 1kHz herausgefiltert. Hierzu wird jeweils ein Butterworthfilter dritter Ordnung simuliert. Außerdem werden die Frequenzen unterhalb von 50kHz abgeschnitten, um niederfrequentes Rauschen zu vermeiden. Dies geschieht mit einem Butterworthfilter zehnter Ordnung.

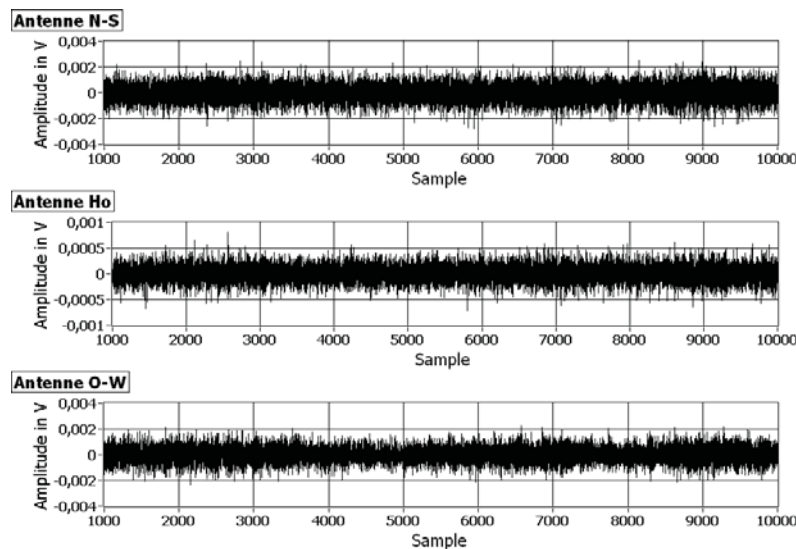


Abbildung 7.9.: Rauschsignal in den verschiedenen Antennen nach Filterung der schmalbandigen Störungen vom 19.04.2009, 00:03:52 Uhr

In Abbildung 7.9 ist das daraus erhaltene Signal zu sehen. Es handelt sich um die gleiche Aufnahme wie in Abbildung 7.3. Eine deutliche Reduktion der Amplitude ist

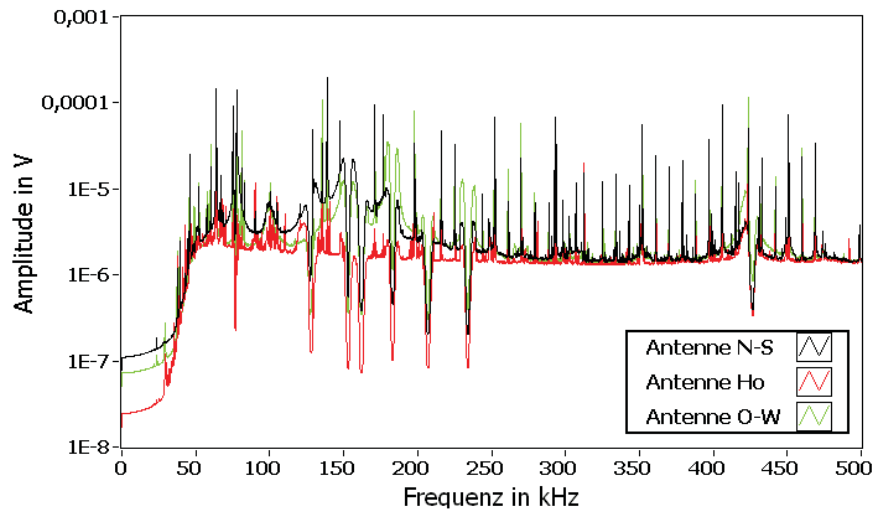


Abbildung 7.10.: Gemitteltes Frequenzspektrum nach Filterung der schmalbandigen Störung

zu erkennen: In den Antennen N-S und O-W etwa um Faktor 10, in Antenne Ho um Faktor 4. Das Frequenzspektrum nach dem Filtern ist in Abbildung 7.10 zu sehen. In den Abbildungen 7.11 und 7.12 wurden die verschiedenen Filter einzeln dazugeschaltet und es ist möglich, schrittweise die Veränderung des gemessenen Signals

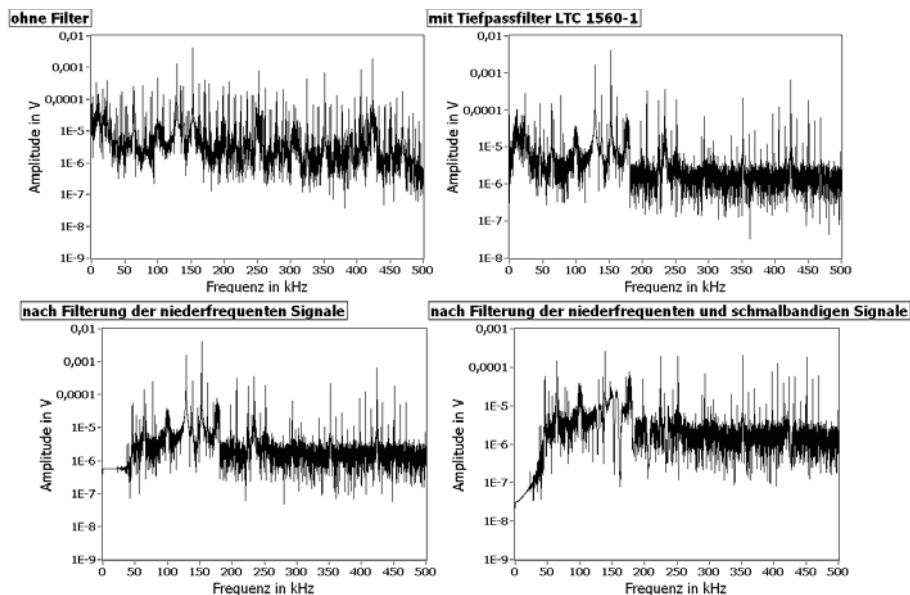


Abbildung 7.11.: Veränderung des Frequenzspektrums beim Dazuschalten weiterer Filter

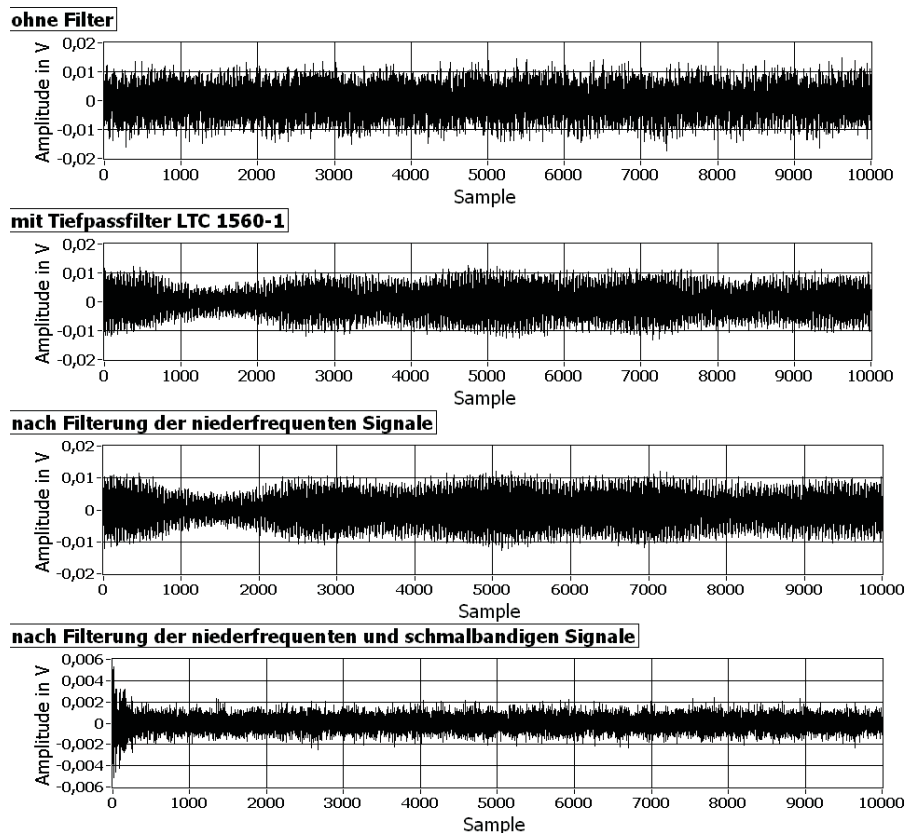


Abbildung 7.12.: Veränderung der Zeitsignale beim Dazuschalten weiterer Filter

zu verfolgen. Die Messung ohne Tiefpassfilter ist vom 01.02.2009, die anderen Messungen sind vom 19.04.2009, jeweils um etwa 00:00 Uhr aufgenommen von Antenne N-S. Im Zeitsignal ist eine deutliche Reduktion der Amplitude zu sehen. Im Frequenzspektrum sind nach der kompletten Filterung deutlich weniger und niedrigere schmale Peaks zu sehen.

7.4. Gefilterte Tagesverläufe

Nach dem Filtern der schmalbandigen Störungen werden nun erneut der Verlauf des quadratischen Mittelwertes über mehrere Tage und das dynamische Spektrum eines Tages betrachtet.

Beim Betrachten von Abbildung 7.13 wird deutlich, dass nun der Rauschpegel während der Nacht deutlich höher liegt als am Tag. Dies liegt daran, dass sich nachts sämtliche Störquellen nicht nur über die Bodenwelle, sondern auch über die Raumwelle ausbreiten können, wie in Abschnitt 4.2.1 bereits erläutert. Auch die vorher vergleichsweise niedrigen Peaks, oberhalb von 200kHz, tragen jetzt mehr zum Signal bei, da die vorher dominierenden Signale herausgefiltert wurden. Vermut-

7. Untergrundanalyse

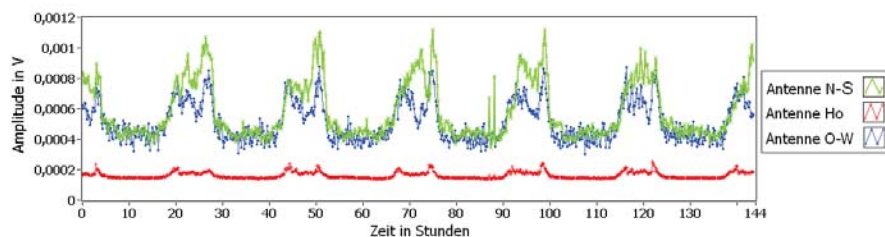


Abbildung 7.13.: Quadratische Mittelwerte über mehrere Tage;
Startzeit der Messung: 18.04.2009, 00:00 Uhr,
Ende der Messung: 23.04.2009 24:00 Uhr

lich handelt es sich bei diesen Peaks um Radiosender, welche während des Tages auf Grund ihrer geringen Reichweite nicht sichtbar sind. Während der Nacht erhöht sich die Reichweite und die Signale werden sichtbar. Diese Peaks oberhalb von 200kHz sind in Abbildung 7.14, welche das gefilterte dynamische Spektrum vom 19.04.2009 zeigt, deutlich zu sehen. Bei Antenne O-W sind die Schwankungen der Signale deut-

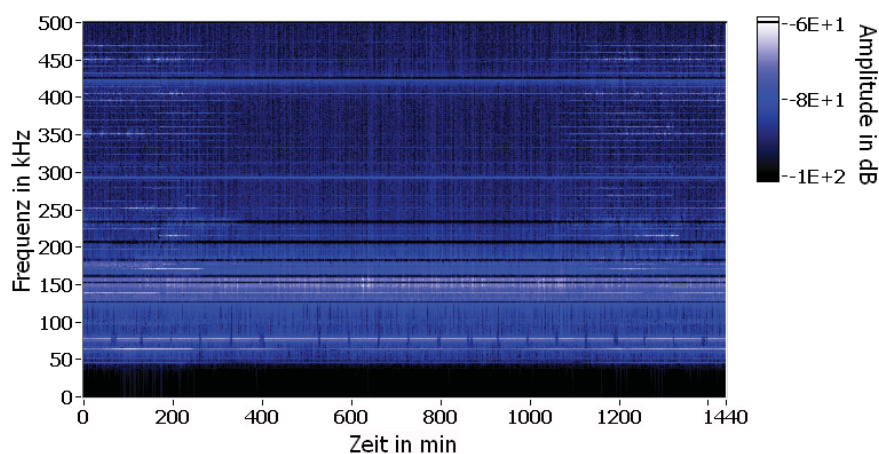


Abbildung 7.14.: Gefiltertes dynamisches Spektrum vom 19.04.2009, aufgenommen von Antenne N-S, Amplitude in dB

lich höher als bei Antenne N-S. Teilweise sind tagsüber Signale mit ähnlich hohen Mittelwerten wie nachts zu finden und nachts gibt es Zeiten, in denen die Signale ähnlich niedrig sind wie tagsüber. Dieser Unterschied zu Antenne N-S kommt dadurch zustande, dass die beiden Antennen unterschiedliche Radiosender empfangen können, welche sich unterschiedlich verhalten und zu verschiedenen Zeiten mit variablen Leistungen senden.

Ein vermuteter Zusammenhang mit dem Wetter (Abschnitt 4.2.1) kann jedoch nicht beobachtet werden. Am 18. und 19.04.2009 gab es in Karlsruhe Niederschläge, die

restliche Messzeit war sonniges Wetter. Erwartet wurde ein höheres Rauschsignal während der Regentage, da dort der Boden eine höhere Leitfähigkeit aufweist und somit die Bodenwelle eine größere Reichweite hat. Dieser Effekt ist vermutlich zu gering, um sichtbar zu sein, eventuell auch wegen der an diesen Tagen relativ geringen Niederschlagsmengen.

Ziel dieser Betrachtungen war es, ein zeitlich konstantes Rauschen zu finden, welches vom Signal abgezogen werden könnte und das Ermitteln von Radiosignalen aus Luftschauern somit erleichtern würde. Es sind jedoch große zeitliche Schwankungen im Mittelwert zusätzlich zur Tag/Nacht-Schwankung sichtbar. Ein zeitlich konstantes Rauschen außerhalb der schmalbandigen Störungen konnte daher nicht bestimmt werden.

7.5. Kalibrierung des gemessenen Signals

Durch die Antennen selbst und den eingebauten Filter wird das aufgenommene Signal verfälscht. Um aus dem gemessenen Signal auf die tatsächliche Feldstärke schließen zu können, muss das Signal demnach korrigiert werden.

Die Dämpfung des Signals durch die Filter wurde nachgemessen und entspricht dem in Abbildung 6.7(b) auf Seite 40 dargestellten Werten. Da die Dämpfung durch die Filter im Bereich von 50kHz bis 500kHz maximal -5dB beträgt, kann dieser Einfluss vernachlässigt werden.

Die Daten zur Kalibrierung der Antenne befinden sich im Anhang A. Da eine eigene „vor-Ort“-Kalibrierung im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war, werden die vom Hersteller gelieferten Daten verwendet. Informationen über die Unsicherheiten der Messung und Richtungsabhängigkeiten wurden durch den Hersteller nicht mitgeliefert. Es ist auch unbekannt, ob es sich um gemittelte oder um Maximalwerte handelt.

Um von den gemessenen Werten auf die tatsächliche Feldstärke zu schließen, wird der Kalibrierungsfaktor $c[dB(m^{-1})]$ für jede Frequenz zu den gemessenen Spannungswerten $U_{gem}[dB(\mu V)]$ addiert. So erhält man die tatsächliche Feldstärke $F[dB(\frac{\mu V}{m})]$. Stattdessen kann jedoch auch der Kalibrierungsfaktor in einen absoluten Wert $k[m^{-1}]$ umgerechnet werden. Das gemessene Signal $U_{gem}[\mu V]$ kann nun mit $k[m^{-1}]$ multipliziert werden und man erhält die tatsächliche Feldstärke $F[\frac{\mu V}{m}]$.

Der Kalibrierungsfaktor k ist wie c frequenzabhängig und berechnet sich wie folgt:

$$k[m^{-1}](f) = 10^{\frac{c(f)[dB(m^{-1})]}{20}}$$

Die so errechneten Werte für k wurden über der Frequenz aufgetragen, siehe Abbildung 7.15, und es wurde folgende Funktion angepasst:

$$k(f) = \frac{5118,25}{f^2} + 6,72 \quad (7.1)$$

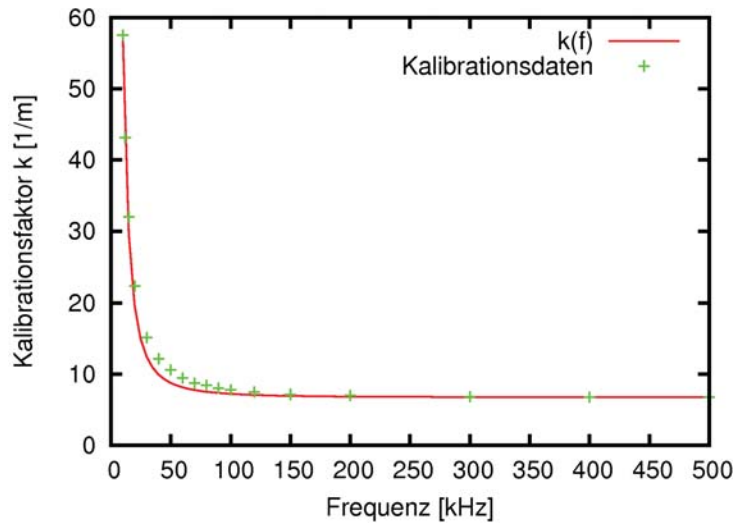


Abbildung 7.15.: Kalibrierungsdaten mit angepasster Funktion

Es ist zu erkennen, dass sich der Kalibrierungsfaktor im Bereich zwischen 50kHz und 500kHz kaum verändert. Dies ist der Bereich, welcher für die Analyse genutzt wird. Der Mittelwert und die Standardabweichung in diesem Bereich sind:

$$k(50kHz - 500kHz) = 6,92(\pm 0,34)m^{-1}$$

Für die weitere Analyse wird der Kalibrierungsfaktor darum als frequenzunabhängig betrachtet. Um aus den gemessenen Signalen die tatsächlichen Feldstärken in $\frac{\mu V}{m}$ zu bestimmen, muss also das Signal mit $6,92m^{-1}$ multipliziert werden.

Könnte der Kalibrierungsfaktor nicht als frequenzunabhängig betrachtet werden, müsste das Signal fouriertransformiert, jeder Frequenzwert mit dem dazugehörigen Kalibrierungsfaktor multipliziert und wieder rücktransformiert werden. Ein Vergleich der auf diese Weise erhaltenen Signale ist in Abbildung 7.16 zu sehen. Es handelt sich wieder um das Signal vom 19.04.2009, 00:03:52, aufgenommen von Antenne N-S, nachdem die schmalbandigen Störungen herausgefiltert wurden. Für Abbildung 7.17 wurde das Frequenzspektrum des Signals mit frequenzunabhängigem k vom Frequenzspektrum des Signals mit frequenzabhängigem k abgezogen. Aus dem Ergebnis wird noch einmal deutlich, dass die Annahme eines frequenzunabhängigen Kalibrierungsfaktors berechtigt ist.

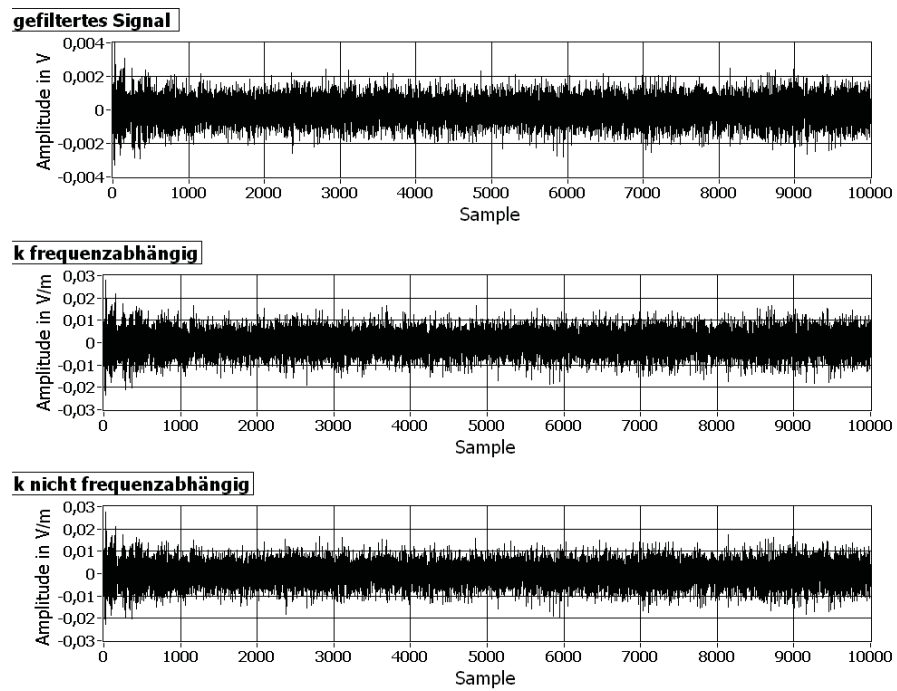


Abbildung 7.16.: Vergleich des gefilterten Eingangssignals mit den kalibrierten Signalen mit unterschiedlichen Kalibrierungsfaktoren

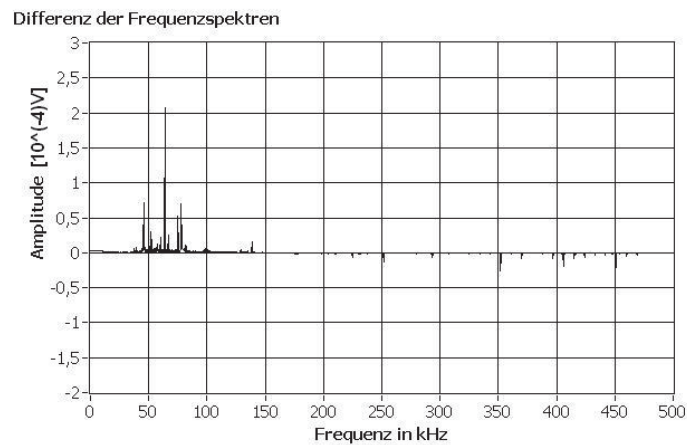


Abbildung 7.17.: Differenz der Frequenzspektren bei unterschiedlichen Kalibrierungen

7.6. Testpulse

Mit Testpulsen wird die Fragestellung untersucht, wie sich mögliche gemessene Pulse während des Filterns verhalten und welche Feldstärken diese Pulse haben müssten, um erkannt werden zu können. Hierzu wurden zwei leicht unterschiedliche Pulse generiert:

Ein von LabVIEW bereitgestellter Gauss'scher Monopuls, der wie folgt gebildet wird:

$$Y(i) = 2\pi a_{Gauss} \sqrt{e} x_i f_c e^{-2(\pi x_i f_c)^2}$$

Dabei gilt:

$$x_i = (i\Delta t) - d$$

$$i = 0, 1, \dots, N - 1$$

Anzahl der Sample $N = 10000$

Sampleintervall $\Delta t = 10^{-6} s$

Verschiebung $d = 0,005 s$

Mittelfrequenz $f_c = 250 kHz$

Die Pulsamplitude a_{Gauss} kann beliebig gewählt werden, um die Höhe des Gauss'schen Testpulses zu variieren. Wird für $a_{Gauss} = 0,3 V/m$ gewählt, so entspricht dies dem Puls in Abbildung 7.18. Das dazugehörige Frequenzspektrum ist ebenfalls in Abbildung 7.18 zu sehen.

Der zweite Puls wird über die Frequenz gebildet. So soll ein über das annähernd gesamte gemessene Spektrum konstanter Puls simuliert werden. Im Bereich von 0Hz bis 10kHz steigt das Spektrum von Null auf die Amplitude $100 \cdot a_{konst}$ und bleibt konstant auf diesem Wert, bis bei 490kHz das Spektrum wieder abfällt und bei 500kHz wieder den Wert Null annimmt. Der dadurch entstehende Puls und das Spektrum sind in Abbildung 7.19 für $a_{konst} = 0,002 V/m$ zu sehen. Die Amplitude kann ebenfalls variiert werden.

Um nun herauszufinden, welches Signal diese Pulse in der Antenne verursachen würden, werden die Pulse kalibriert und somit der Empfang durch die Antenne simuliert. Hierzu dient Formel 7.1. Im Frequenzraum werden die Frequenzamplituden der Pulse bei jeder Frequenz durch den dazugehörigen Kalibrierungsfaktor k geteilt. Abbildung 7.18 und 7.19 zeigen die so entstandenen Pulse.

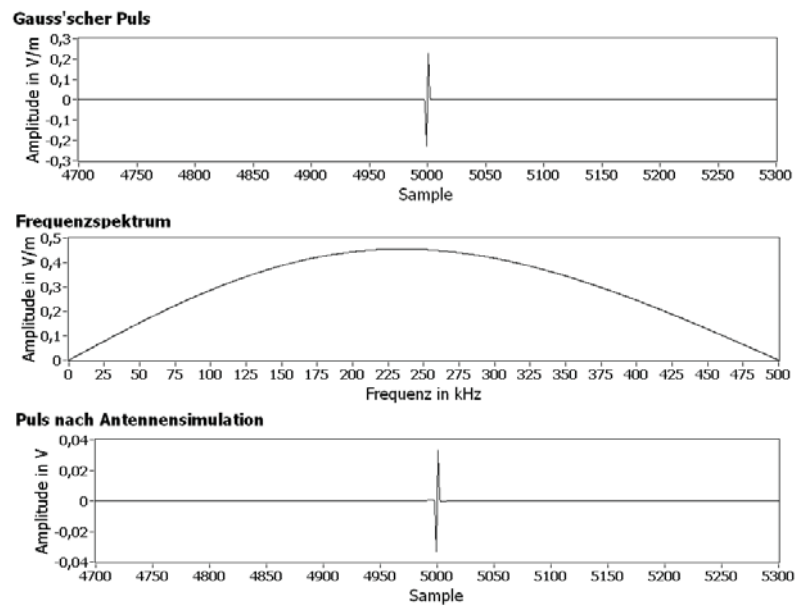


Abbildung 7.18.: Zeitsignal, Frequenzspektrum und Zeitsignal nach der Simulation einer Antenne des Gauss'schen Pulses mit Amplitude $a_{Gauss} = 0,3\text{V/m}$

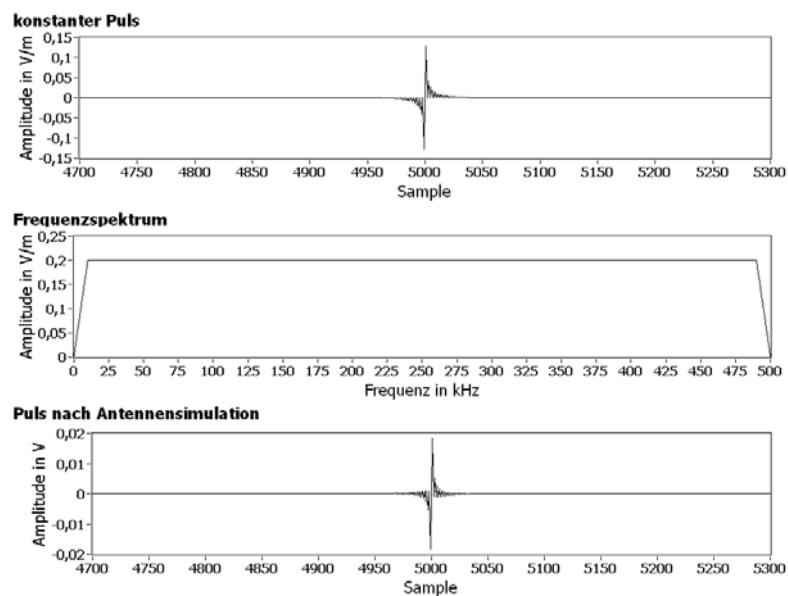


Abbildung 7.19.: Zeitsignal, Frequenzspektrum und Zeitsignal nach der Simulation einer Antenne des konstanten Pulses mit Amplitude $a_{konst} = 0,002\text{V/m}$

7. Untergrundanalyse

Diese Pulse werden nun zu einem typischen Rauschsignal addiert. Das so entstandene Signal kann analysiert werden. Dabei wird betrachtet, ab welcher Pulshöhe der Puls unter dem Rauschen sichtbar wird. In einer ersten Analyse gilt der Puls dann als sichtbar, wenn der Spitze-Spitze-Wert des Signals zehnmal höher ist als der quadratische Mittelwert. Diese Überprüfung findet sowohl ohne eine Filterung der schmalbandigen Störungen statt als auch mit einer Filterung. Als Untergrundsignal wurden die Signale eines gesamten Tages benutzt und der Mittelwert und die Standardabweichung der minimalen Amplituden berechnet. Tabelle 7.1 gibt die Grenzwerte an, ab denen ein Puls als solcher erkannt wurde. Der Fehler macht noch einmal deutlich, wie sehr sich der Rauschuntergrund zeitlich ändert, wodurch unterschiedlich hohe Pulse erkannt werden können.

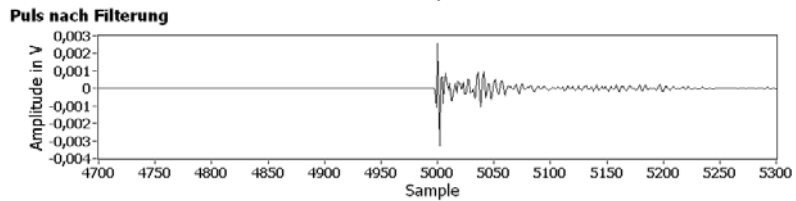
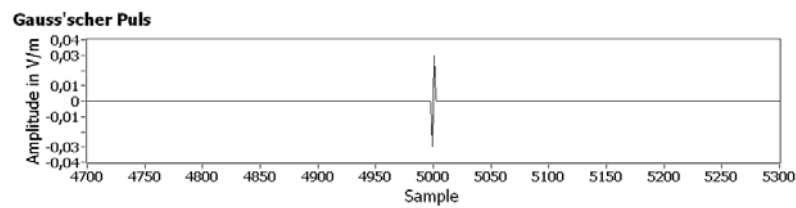
Antenne	$a_{Gauss}[\frac{V}{m}]$, ungefilterte	$a_{Gauss}[\frac{V}{m}]$, gefiltert	$a_{konst}[\frac{V}{m}]$, ungefiltert	$a_{konst}[\frac{V}{m}]$, gefiltert
N-S	$0,309 \pm 0,060$	$0,0398 \pm 0,0144$	$0,00322 \pm 0,00063$	$0,000482 \pm 0,000175$
Ho	$0,0362 \pm 0,0066$	$0,0108 \pm 0,0023$	$0,000434 \pm 0,0000838$	$0,000131 \pm 0,000026$
O-W	$0,188 \pm 0,037$	$0,0346 \pm 0,0140$	$0,00244 \pm 0,00045$	$0,000417 \pm 0,000170$

Tabelle 7.1.: Minimalwerte der Amplituden bei Analyse ungefilterter und gefilterter Signale

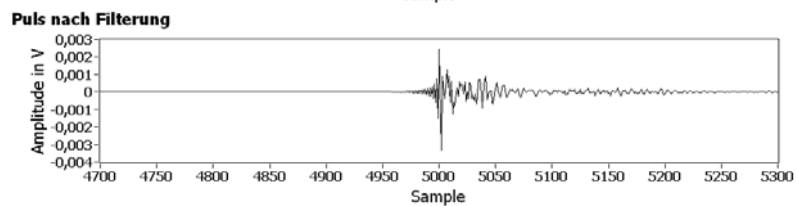
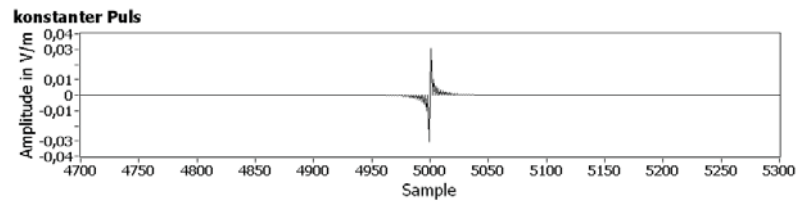
Diese Werte sind so jedoch noch nicht besonders aussagekräftig. Stattdessen sollte der mit diesen Werten simulierte Puls betrachtet werden. Die Spitze-Spitze-Werte dieser Pulse sind in Tabelle 7.2, die Zeitsignale in Abbildung 7.20 zu sehen. Dort ist auch der Puls nach dem Filtern der schmalbandigen Störungen zu sehen. Form und Amplitude des Pulses haben sich verändert, der Puls ist jedoch noch deutlich zu erkennen und wird schon mit kleinerer Amplitude registriert. Durch die Filterung wird es möglich, je nach Antenne Pulse mit einem drei- bis siebenmal niedrigeren Spitze-Spitze-Wert zu messen. Nach diesen Betrachtungen sollte es also möglich sein, Signale aus Luftschauern zu sehen, die einen Puls mit einem horizontalen Spitze-Spitze-Wert von etwa $0,0165V/m$ und einem vertikalen Spitze-Spitze-Wert im Bereich von $0,0527V/m$ bis $0,0605V/m$ erzeugen. Die leicht abweichenden Werte bei Antenne N-S und Antenne O-W kommen durch den unterschiedlichen Rauschhintergrund zustande. Dieser entsteht dadurch, dass die Antennen Signale aus verschiedenen Richtungen empfangen, welche nicht immer gleich stark sind. Der hier angegebene Fehler entsteht durch den nicht konstanten Rauschuntergrund.

Antenne	$PP_{Gauss}[\frac{V}{m}]$, ungefiltert	$PP_{Gauss}[\frac{V}{m}]$, gefiltert	$PP_{konst}[\frac{V}{m}]$, ungefiltert	$PP_{konst}[\frac{V}{m}]$, gefiltert
N-S	$0,460^{+0,097}_{-0,084}$	$0,060^{+0,0218}_{-0,0217}$	$0,410^{+0,080}_{-0,080}$	$0,061^{+0,022}_{-0,021}$
Ho	$0,0540^{+0,0106}_{-0,0094}$	$0,0163^{+0,0035}_{-0,0035}$	$0,0552^{+0,0107}_{-0,0106}$	$0,0167^{+0,0033}_{-0,0033}$
O-W	$0,284^{+0,055}_{-0,056}$	$0,0523^{+0,0210}_{-0,0213}$	$0,310^{+0,058}_{-0,057}$	$0,053^{+0,022}_{-0,022}$

Tabelle 7.2.: Minimalwerte der Amplituden bei Analyse ungefilterter und gefilterter Signale,
PP: Spitze-Spitze



(a)



(b)

Abbildung 7.20.: Kleinste, beobachtbare Pulse in Antenne N-S vor und nach der Filterung der schmalbandigen Störungen
a) Gauss'scher Puls, b) konstanter Puls

Diese Rechnung kann jedoch nur als grobe Orientierung dienen, da für eine genaue Analyse auch eine genaue Kalibrierung nötig wäre. Die zur Verfügung gestellten Kalibrierungsdaten reichen hierfür aber nicht aus. Es müsste eine genaue Vermessung des kompletten, richtungsabhängigen Empfangsverhalten der Antennen vor Ort durchgeführt werden, dies ist jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

8. Analyse

In diesem Kapitel wird die Analyse der von KASCADE-Grande getriggerten Daten vorgestellt. Diese Analyse kann einerseits von den kHz-Daten und andererseits auch von den KASCADE-Grande-Daten ausgehend durchgeführt werden. Der Zeitraum der Datennahme, für welchen diese Analysen gemacht wurden, erstreckt sich über 13 Tage, vom 26.03.2009 bis zum 07.04.2009.

8.1. Analyse ausgehend von kHz-Daten

8.1.1. Pulse in mindestens einer der drei Antennen

Die gemessenen Daten wurden auf breitbandige, kurze Pulse durchsucht. Hierbei wurden die Ereignisse ausgesucht, in welchen der Spitze-Spitze-Wert von mindestens einer Antenne zehnmal höher war als deren quadratisch gemittelte Amplitude. Hierzu wurden die Daten mit herausgefilterten schmalbandigen Störungen genutzt. Durch das Herausfiltern dieser Störungen kommt es am Anfang der Zeitsignale zu Verzerrungen, weshalb nur der Bereich von Sample 1000 bis 10000 für die Analyse genutzt wurde. Es wurden 1101 Ereignisse mit der gewünschten Amplitude in mindestens einer der drei Antennen gefunden. Beim Betrachten der Ereignisse fällt jedoch auf, dass es sich oftmals nicht um kurze, breitbandige Pulse handelt, welche die zehnmal höheren Spitze-Spitze-Werte verursacht haben, sondern um längere Schwebungen, wie in Abbildung 8.1 zu sehen ist.

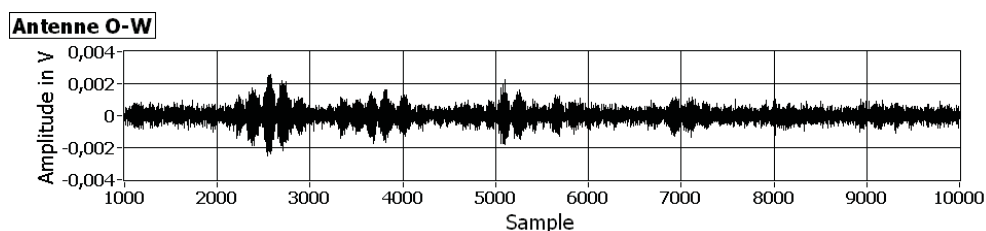


Abbildung 8.1.: Signal mit hohem Spitze-Spitze-Wert ohne einzelnen Puls vom 25.03.2009, 15:12:17 Uhr

Um diese unerwünschten Ereignisse herauszufiltern, müsste das Verhältnis von Spitze-Spitze-Werten zur quadratisch gemittelten Amplitude vergrößert werden. Dieses Verhältnis ist jedoch bereits relativ hoch gewählt und es gingen, würde es weiter

erhöht werden, viele der gesuchten breitbandigen Pulse ebenfalls verloren. Deshalb wurden die ermittelten Ereignisse durchsucht und die ungewünschten Ereignisse von Hand aussortiert. Danach bleiben noch 103 Ereignisse mit breitbandigem, kurzen Puls, wie exemplarisch in Abbildung 8.2 dargestellt. Es ist zu beachten, dass das Signal in Antenne Ho und somit auch die gefundenen Pulse deutlich niedrigere Amplituden besitzen.

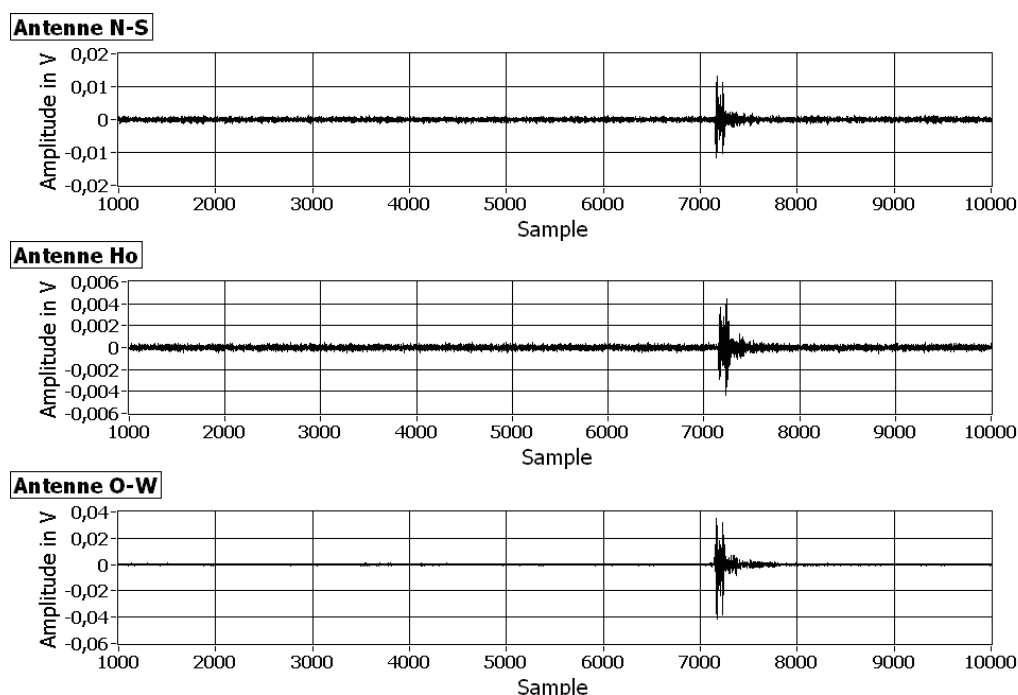


Abbildung 8.2.: Signal mit kurzem breitbandigen Puls in allen drei Antennen vom 05.04.2009, 14:08:27 Uhr

Vergleich der gemessenen Pulse bei getriggelter und ungetriggelter Messung

Nun soll untersucht werden, ob es sich bei diesen Pulsen tatsächlich um Radioemission von Luftschauern handelt. Dafür werden verschiedene Eigenschaften analysiert. Zuerst soll die Häufigkeit von gefundenen Pulsen bei getriggerten Daten mit der Häufigkeit von Pulsen bei ungetriggerten Daten verglichen werden. Dabei wurde nicht beachtet, in wieviel oder in welchen Antennen ein Puls gemessen wurde. Bei den ungetriggerten Daten wurden bei 8638 Ereignissen 41 mit kurzem Puls gefunden, bei den getriggerten Daten waren es 103 Ereignisse mit kurzem Puls von insgesamt 40947 aufgenommenen Ereignissen. Dies entspricht einem Anteil von 0,28% bei den getriggerten beziehungsweise 0,47% bei den ungetriggerten Daten, was deutlich gegen Signale aus Luftschauern spricht.

Verteilung der Pulse um den Triggerzeitpunkt

Dass die Pulse zu sehr unterschiedlichen Abständen zum Triggerzeitpunkt registriert werden, spricht ebenfalls gegen Luftschauersignale. Würde es sich um „echte“ Signale handeln, sollten die Pulse immer zum ungefähr gleichen Zeitpunkt um den Trigger ankommen und dürften maximal um einige μs schwanken. Tatsächlich sind jedoch die Pulse im gesamten betrachteten Zeitraum zu finden. Die Spitze-Spitze-Werte variieren dabei ebenfalls unkorreliert. Dies ist in Abbildung 8.3(a) zu sehen. Hier wurden die Spitze-Spitze-Werte der gemessenen Pulse über dem zugehörigen Sample aufgetragen.

Da jedoch der Entstehungsmechanismus der Radioemission von Luftschauern im kHz-Bereich noch nicht bekannt ist, könnte durch diesen eventuell eine solche Verschiebung entstehen. Weit entfernte Schauer könnten beispielsweise erst später registriert werden. Dies scheint nach Abbildung 8.3(b) jedoch nicht der Fall zu sein. Dort wurde der Abstand der einzelnen Antennen zum Auftreffort des Schauers über dem Sample, in welchem ein Puls gemessen wurde, aufgetragen. Der Auftreffort wurde mit den KASCADE-Daten rekonstruiert.

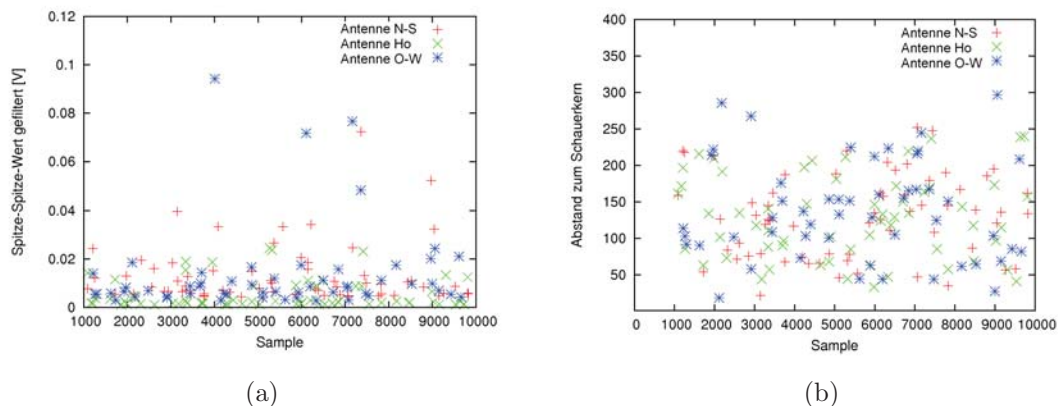


Abbildung 8.3.: a) Spitze-Spitze-Werte der hohen Pulse im kHz-Bereich, b) Abstand der Antenne zum von KASCADE rekonstruierten Schauerkeim jeweils über dem Sample, in welchem der Puls gemessen wurde

Korrelationen zwischen der Registrierung eines Pulses und Schauerparametern

Nun können die Ereignisse mit Puls im kHz-Bereich noch mit weiteren Schauerparametern der KASCADE-Daten verglichen werden. Zu 15 der Ereignisse stehen keine Rekonstruktionsdaten von KASCADE zur Verfügung. Diese Schauer sind beispielsweise zu weit außerhalb oder zu schräg aufgetroffen und somit ist der Rekon-

struktionsalgorithmus von KASCADE dort nicht anwendbar. Deshalb werden für diesen Teil der Analyse nur die übrigen 98 Ereignisse ausgewertet. Verschiedene Grafiken wurden erstellt, in welchen 98 beliebige Schauer mit den 98 Schauern mit Pulsen im kHz-Bereich verglichen wurden. Diese sind in den Abbildungen 8.4, 8.5 und 8.6 zu sehen. Elektronen- sowie Myonenzahl sind ein Maß für die Energie des Primärteilchens. Bei einem Signal, welches durch Luftschauer entstanden ist, wäre bei höherer Energie ein höherer Puls zu erwarten. Dies bedeutet, dass auch die Anzahl an gemessenen Pulsen bei hohen Energien größer sein sollte. Die Ereignisse mit Puls haben zwar eine leichte Tendenz zu höheren Energien, signifikant ist diese jedoch nicht. Eine Richtungsabhängigkeit ist weder im Schauermittelpunkt noch im Azimut- beziehungsweise Zenitwinkel zu sehen. Eine solche Korrelation zwischen der Anzahl der Ereignisse und Azimut- beziehungsweise Zenitwinkel wäre nach der Theorie der Übergangsstrahlung auch nicht zu erwarten. Nahe Schauer sollten jedoch einen größeren Puls erzeugen und somit sollten in der Nähe der Antennen mehr Pulse messbar sein. Die Antennen befinden sich an folgenden Positionen: Antenne N-S (-65,-90), Antenne Ho (-40,-90) und Antenne O-W (55,-90). Die Ereignisse mit Puls im kHz-Bereich sind etwas nach Südwest, also in Richtung Antenne N-S und Antenne Ho, verschoben, nicht jedoch zu Antenne O-W. Auch im Schaueralter¹ sind keine signifikanten Unterschiede der beiden Kurven zu sehen.

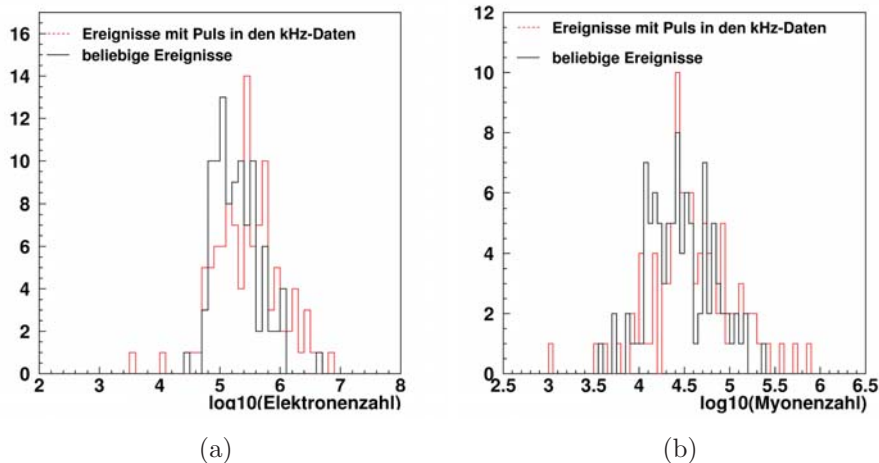


Abbildung 8.4.: Vergleich von 98 beliebigen Luftschauern mit den 98 Luftschauern mit Puls im kHz-Bereich für Elektronen- und Myonenzahl

¹Das Schaueralter beschreibt die longitudinale Ausbreitung des Schauers und kann Werte zwischen 0 und 3 annehmen

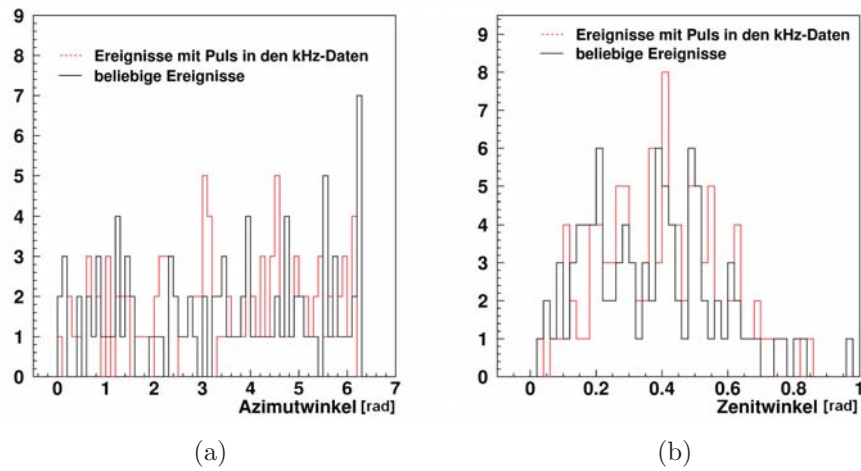


Abbildung 8.5.: Vergleich von 98 beliebigen Luftschauern mit den 98 Luftschauern mit Puls im kHz-Bereich für Ankunftsrichtung

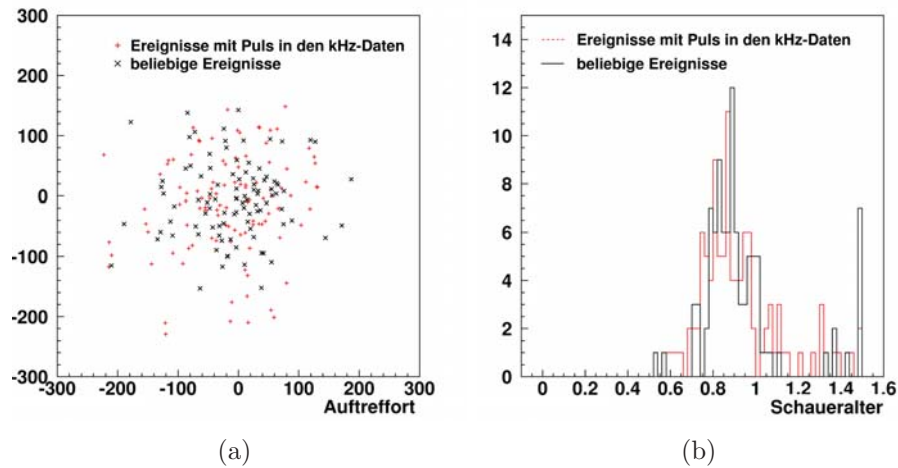


Abbildung 8.6.: Vergleich von 98 beliebigen Luftschauern mit den 98 Luftschauern mit Puls im kHz-Bereich für Schauerkerneln und Schaueralter

Korrelationen zwischen der Amplitude eines Pulses und Schauerparametern

Zwar weist die Messung eines Pulses keine Korrelation mit Luftschauerparametern auf, vielleicht jedoch die Pulshöhe. Hierzu wurde der Spitze-Spitze-Wert der Pulse nach der Filterung ermittelt und über verschiedenen Schauerparametern aufgetragen. Daraus konnten folgende Informationen gewonnen werden:

Es wurde keine Abhängigkeit der Pulshöhe von der Ankunftsrichtung des Luftschau-

ersichtbar. Bei der Anzahl der Pulse war eine solche Abhängigkeit zwar nicht zu erwarten gewesen, wohl aber bei der Pulshöhe in den einzelnen Antennen. Je nach Zenit- und Azimutwinkel müsste das Signal in den unterschiedlichen Antennen auf Grund des richtungsabhängigen Empfangsverhaltens unterschiedlich hoch sein. Nach den historischen Messungen und der Theorie der Übergangsstrahlung wäre eine Abhängigkeit der Pulshöhe von der Energie zu erwarten gewesen. Je mehr Myonen und Elektronen entstehen, desto höher ist die Energie und desto höher sollten die gemessenen Pulse sein. Es war jedoch keine solche Abhängigkeit zu erkennen. Auch der erwartete Abfall der Signalhöhe bei zunehmendem Abstand zur Schauerachse ist in Abbildung 8.7(a) nicht feststellbar.

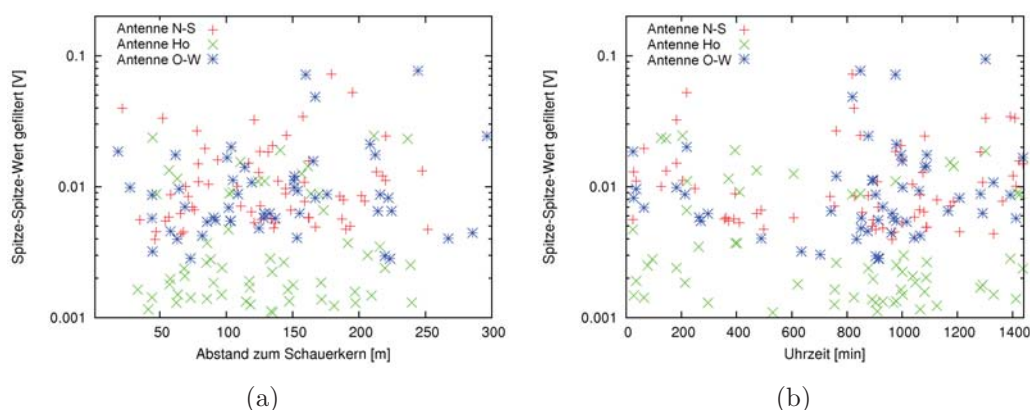


Abbildung 8.7.: Spitze-Spitze-Wert der kHz-Pulse über
 a) dem Abstand zum Schauerkern, b) der Tageszeit der Messung;
 0min entspricht 00:00 Uhr; 1440min entspricht 24:00 Uhr

Die Messung von Luftschauern sollte unabhängig von der Tageszeit sein. Jedoch wurde in der Zeit von 05:00 Uhr bis 20:00 Uhr pro Stunde durchschnittlich ein Puls mehr gemessen als in der restlichen Zeit. Dies kann auf den niedrigeren Rauschuntergrund zurückgeführt werden. Tagsüber sind Pulse messbar, die nachts zu klein gegenüber dem Rauschen sind. Dies erklärt einen Teil der erhöhten Anzahl an Pulsen. Jedoch ist in Abbildung 8.7(b) erkennbar, dass außerdem zwischen 14:00 Uhr und 17:00 Uhr mehr Pulse als sonst gemessen wurden. Diese Zeitverteilung spricht gegen Luftschauer.

8.1.2. Pulse in allen drei Antennen

Bisher wurden alle Ereignisse betrachtet, bei denen mindestens eine Antenne einen hohen Spitze-Spitze-Wert aufweist. Da einige Ereignisse einen Puls in allen drei

Antennen verursachten, sollen diese noch gesondert betrachtet werden: In Abbildung 8.8 ist die Energie der Luftschauer über dem Sample, in welchem der Puls gemessen wurde aufgetragen, sowohl für alle Pulse als auch für gleichzeitige Pulse in allen drei Antennen. Es ist zu erkennen, dass gleichzeitige Pulse vermehrt nach dem Trigger gefunden werden. Beim Vergleich der dazugehörigen Energien der Luftschauer sind jedoch keine Unterschiede feststellbar.

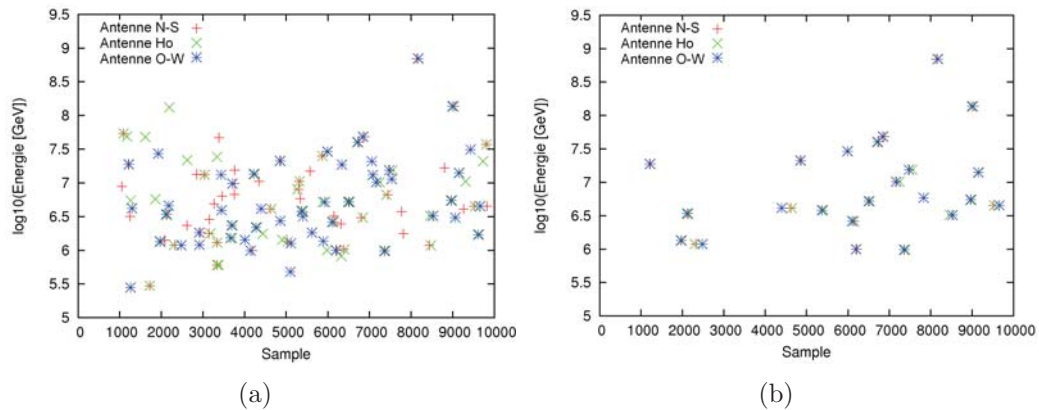


Abbildung 8.8.: Energie der Luftschauer über dem Sample, in welchem ein kHz-Puls registriert wurde
a) alle Pulse im kHz-Bereich, b) gleichzeitige Pulse in allen drei kHz-Antennen

8.1.3. Diskussion

Da bei diesen Untersuchungen keinerlei Korrelationen zwischen den kHz-Signalen und Luftschauern auftraten, kann ausgeschlossen werden, dass es sich bei diesen Pulsen um Signale aus Luftschauern handelt.

Obwohl die bisherigen Untersuchungen keine Hinweise auf Radiostrahlung von Luftschauern liefern, ist es trotzdem möglich, dass diese existiert. Vermutlich sind die dabei entstehenden Pulse zu klein, um bei dieser Analyse entdeckt zu werden. Um eventuell vorhandene kleinere Pulse zu finden, wurden die quadratischen Mittelwerte aller Ereignisse aufaddiert. Nicht berücksichtigt wurden dabei die 98 Ereignisse mit kurzen starken Pulsen, da diese das addierte Signal dominieren. Pulse, welche durch Radiostrahlung induziert wurden, sollten immer beim ungefähr gleichen Sample auftreten. Bei der Addition vieler Signale müsste daher in diesem Sample ein deutliches Signal sichtbar werden. Ein solches Verhalten ist jedoch in Abbildung 8.9 für keine Antenne feststellbar.

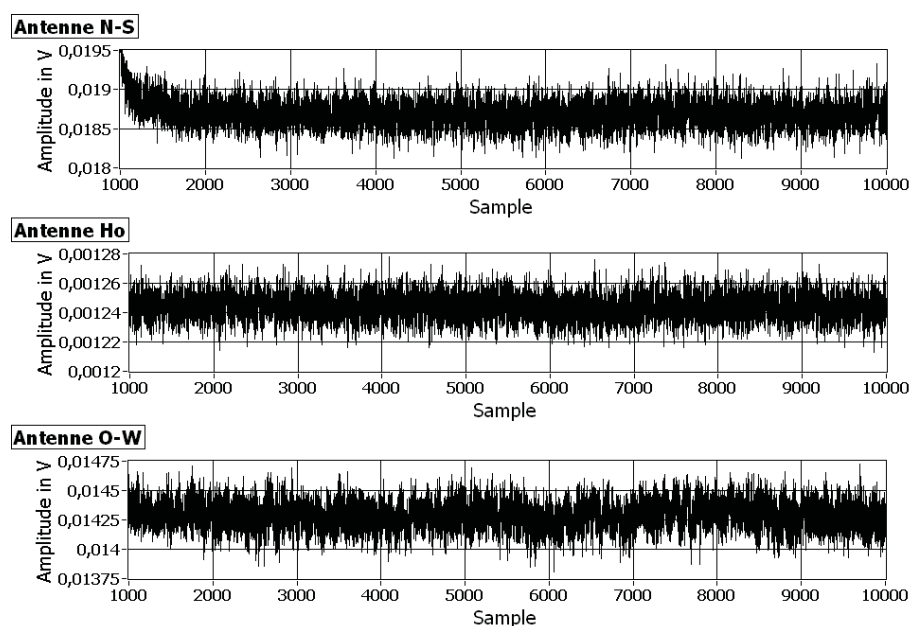


Abbildung 8.9.: Addierte Signale vom 26.03.-07.04.2009

Somit ist es auch hier nicht möglich, Radiostrahlung von Luftschauern im kHz-Bereich nachzuweisen. Jedoch wurde für diesen Teil der Analyse die Annahme gemacht, dass es sich bei der Radiostrahlung von Luftschauern um kurze, breitbandige Pulse handelt. Bei der folgenden Analyse wird diese Annahme vermieden.

8.2. Analyse ausgehend von KASCADE-Grande-Daten

8.2.1. Auffälligkeiten in den kompletten kHz-Signalen bei Luftschauern mit hohen Energien

Für diese Analyse werden die Schauer mit hohen Elektronen- und Myonenzahlen herausgesucht und die dazugehörige Radiostrahlung im kHz-Bereich analysiert. Hohe Elektronen- und Myonenzahlen werden aus folgenden Gründen gewählt: Die hohe Myonzahl bedeutet eine hohe Energie des Primärteilchens und bei hohen Energien wird mehr Radiostrahlung erwartet. Falls die Radiostrahlung im kHz-Bereich durch die Übergangsstrahlung am Erdboden entsteht, sind außerdem bei vielen Elektronen ebenfalls höhere Feldstärken zu erwarten.

Ereignisse mit den höchsten Elektronen- und Myonenzahlen

Zuerst werden die Schauer mit den fünf höchsten Elektronen- sowie den fünf höchsten Myonenzahlen bestimmt. Da zwei Luftschauber beide Bedingungen erfüllen, ergeben sich somit acht Ereignisse. Von diesen Ereignissen wurden die Zeit- und Frequenzsignale der dazugehörigen kHz-Messungen betrachtet. Es konnten keine Auffälligkeiten und somit keine Unterschiede zu den ungetriggerten Signalen festgestellt werden. Dies wird in Abbildung 8.10(a) deutlich. Dort wurden die Spitze-Spitze-Werte der kHz-Signale über der Tageszeit, zu welcher diese gemessen wurden, aufgetragen. Die gemessenen Spitze-Spitze-Werte sind im gleichen Bereich wie das Rauschen, welches in Abbildung 8.10(b) nochmals abgebildet ist. Für die Ereignisse konnte demnach keine erhöhte Radiostrahlung im kHz-Bereich gemessen werden. Dies wurde auch durch den Vergleich mit anderen Schauerparametern wie Energie, Ankunftsrichtung und Schaueralter bestätigt, da dort keinerlei Korrelationen sichtbar sind.

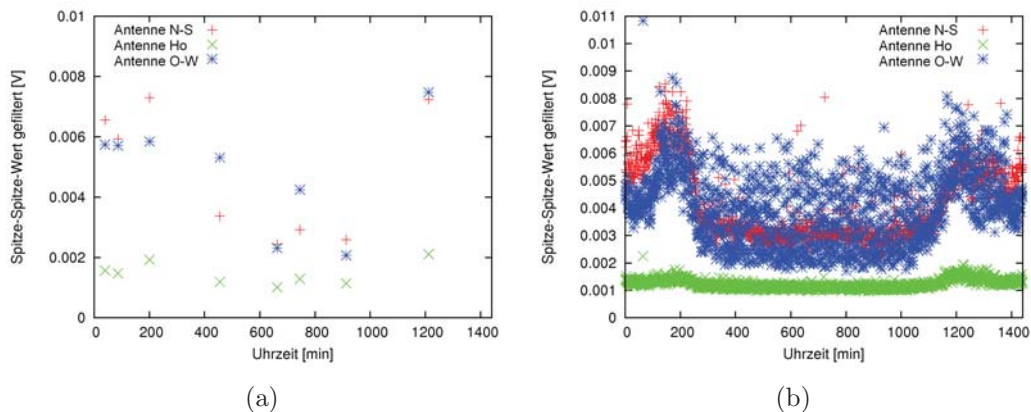


Abbildung 8.10.: Spitze-Spitze-Werte der kHz-Daten über der Uhrzeit zu welcher das Signal aufgenommen wurde

a) Luftschauber mit hohen Elektronen- oder Myonenzahlen, b) ungetriggerte Signale eines Tages

0min entspricht 00:00 Uhr; 1440min entspricht 24:00 Uhr

Ereignisse mit hohen Elektronen- und Myonenzahlen

Um die Statistik zu verbessern, werden die Auswahlkriterien für die Luftschauber gelockert. Nun werden Luftschauber betrachtet, deren Elektronenzahl N_e größer als 10^7 oder deren Myonenzahl N_μ größer als $5 \cdot 10^5$ ist.

Auch hier wurden alle Zeit- und Frequenzsignale auf Auffälligkeiten untersucht und

8. Analyse

sowohl die gemessenen Spitze-Spitze-Werte, als auch die RMS²-Werte der gefilterten Zeitsignale über den Luftschauerparametern aufgetragen. Doch auch hier konnten keine Zusammenhänge festgestellt werden. Als Beispiel befindet sich in Abbildung 8.11 die Auftragung der Spitze-Spitze-Werte über dem Zenitwinkel. Die Spitze-Spitze-Werte liegen auch hier im Bereich des Rauschens. Beim Vergleich mit Abbildung 8.7 wird deutlich, dass die Amplituden auch weit unterhalb der Amplituden der registrierten Pulse liegen.

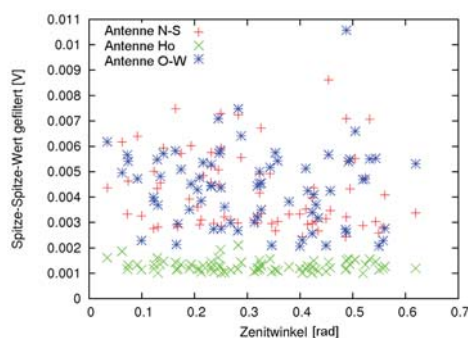


Abbildung 8.11.: Spitze-Spitze-Werte der kHz-Messung über dem Zenitwinkel der dazugehörigen Luftschauer

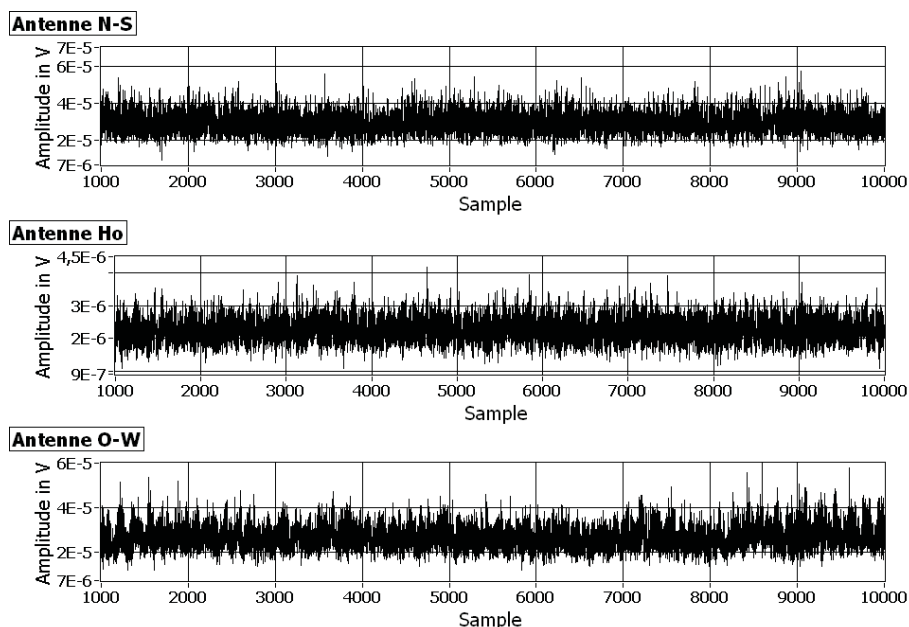


Abbildung 8.12.: Summe aller Ereignisse bei hochenergetischen Luftschauern

²rootmeansquare - quadratischer Mittelwert

In Kapitel 8.1 wurden alle Signale addiert, um mögliche kleine Pulse zu ermitteln. Falls diese Pulse jedoch nur bei hochenergetischen Schauern entstehen, kann es sein, dass deren Signal in der Summe aller Ereignisse nicht zu sehen ist. Daher wurden nun die Messungen bei allen hochenergetischen Schauern addiert. Dies ist in Abbildung 8.12 zu sehen. Ein erhöhtes Signal bei einem bestimmten Sample ist jedoch auch hier nicht zu sehen. Selbst bei diesen Schauern ist daher kein Puls zu einem konstanten Zeitpunkt im kHz-Bereich messbar.

8.2.2. Auffälligkeiten in den kHz-Signalen nahe dem Triggerzeitpunkt bei Luftschauern mit hohen Energien

Bisher wurden im kHz-Bereich die Daten der gesamten aufgenommenen 10ms ausgewertet, um ein mögliches Signal sicher sehen zu können. Vermutet wird das Signal eines Luftschauers jedoch in der Nähe des Triggerzeitpunktes. Deshalb wurde die Analyse auch für den eingeschränkten Bereich von Sample 4600 bis Sample 5200 durchgeführt, um eventuelle Störungen durch andere Signale zu minimieren. Es wurde jedoch deutlich, dass sich die in diesem Bereich erhaltenen Spitze-Spitze- und RMS-Werte im Wesentlichen nicht von den bisher betrachteten Werten unterscheiden. In Abbildung 8.13 sind die gemessenen RMS-Werte über der zugehörigen Uhrzeit aufgetragen. Die gemessenen Werte sind in derselben Größenordnung wie das Rauschen, welches bereits in Kapitel 7.4 in Abbildung 7.13 auf Seite 58 dargestellt wurde.

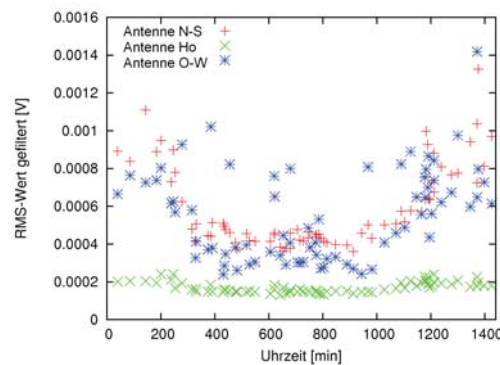


Abbildung 8.13.: RMS-Wert des kHz-Signals in Triggernähe über dem Zeitpunkt der Messung

8.2.3. Diskussion

Auch bei der Analyse ausgehend von den KASCADE-Daten konnten keine Korrelationen zwischen Luftschauerparametern und den Signalen im kHz-Bereich gefunden werden. Dabei wurde sowohl der Bereich nahe des Triggerzeitpunktes als auch das

gesamte Signal betrachtet. Die betrachteten Luftschauer emittieren also keine, mit diesem Experiment, messbare Strahlung im kHz-Bereich.

8.3. Ergebnis und Vergleich mit historischen Messungen

Mit dem aktuellen Aufbau dieses Experimentes konnte keine Radioemission aus Luftschauern gemessen werden. Betrachtet wurden bei der Analyse ausgehend von den KASCADE-Daten, mit den Auswahlkriterien $N_e > 1 \cdot 10^7$ oder $N_\mu > 5 \cdot 10^5$, Luftschauer mit einer mittleren Energie von $1,72 \cdot 10^{17}$ eV in einem Abstand von bis zu 370m zu den Antennen. Die genaue Energieverteilung ist in Abbildung 8.14 zu sehen. Die Energie wurde aus Myonenzahl, Elektronenzahl und Zenitwinkel der KASCADE-Daten, wie in [32], berechnet.

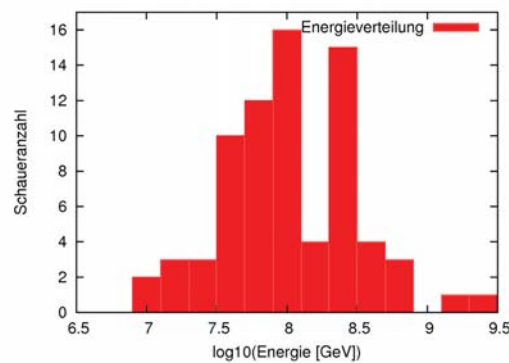


Abbildung 8.14.: Energieverteilung der betrachteten Luftschauer

Gemessen wurde Radiostrahlung in einem Frequenzbereich von 50kHz bis 500kHz auf dem Gelände des Forschungszentrums. In Abschnitt 7.6 wurde untersucht, ab welcher Amplitude ein Signal durch einen Luftschauer bei der durchgeführten Analyse auf jeden Fall registriert werden würde. Da keine Pulse aus Luftschauern registriert wurden, kann ausgeschlossen werden, dass die hier betrachteten Luftschauer einen Radiopuls im Bereich von 50kHz bis 500kHz emittieren, dessen horizontale Spitze-Spitze-Amplitude über $0,0167_{-0,0033}^{+0,0033}$ V/m und dessen vertikale Spitze-Spitze-Amplitude über $0,061_{-0,021}^{+0,022}$ V/m liegt und welcher länger als $1\mu s$ andauert. Dabei wurden die höchsten Werte der jeweiligen Komponente angenommen. Die hier angegebenen Werte haben die gleichen Unsicherheiten wie in Kapitel 7.6 angegeben. Diese enthalten die Unsicherheiten, welche durch Tag/Nacht-Schwankungen und durch Wetterabhängigkeiten entstehen. Die berechnete absolute Feldstärke der Pulshöhen hängt jedoch wesentlich von der Kalibrierung der Antennen ab, über deren Unsicherheiten nichts bekannt ist. Jedoch ist das Verhältnis von Spitze-Spitze-Amplitude zu

quadratischem Mittelwert des Signals relativ hoch gewählt worden. Damit werden einerseits die relativ großen Variationen des Rauschuntergrundes erfasst, andererseits wird damit auch eine Unsicherheit in der absoluten Feldstärke des Testpulses berücksichtigt.

Um diese Werte mit historischen Experimenten vergleichen zu können, wird der Wert für die vertikale Komponente nun in $mV/(m \cdot MHz)$ umgerechnet. In Tabelle 8.1 ist dieser Wert und die Werte der historischen Messungen angegeben. Die vertikale Amplitude wurde gewählt, da die historischen Messungen nur mit vertikalen Antennen durchgeführt wurden. Innerhalb der angegebenen Fehler widersprechen sich die Ergebnisse der Messungen in Karlsruhe und der historischen Messungen nicht.

Experiment	vertikale Amplitude [mV/(m·MHz)]
Karlsruhe	unter 136_{-47}^{+48}
Russland	von 5 bis 30
Japan	von 1,43 bis 143
Italien	bis 1,1

Tabelle 8.1.: Ermittelte, maximal mögliche Feldstärke der Radioemission von Luftschauern im Vergleich mit gemessenen Emissionen aus historischen Messungen

Der Rauschuntergrund in Karlsruhe innerhalb des Forschungszentrums scheint zu groß zu sein, um mögliche Radiostrahlung von Luftschauern messen zu können. Eine Möglichkeit, dessen störenden Einfluss auf die Messung weiter zu minimieren, ist der Einbau eines verbesserten Tiefpassfilters, welcher Rauschen durch Aliassignale besser unterdrückt. Vermutlich ist in ländlichen Gebieten oder schon außerhalb des Forschungszentrums der Rauschuntergrund von sich aus geringer und es wäre eine Messung von niedrigeren Pulsen möglich.

Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, dass die Pulse nicht gemessen werden können, weil sie zu kurz sind. Um diese Möglichkeit auszuschließen, müsste mit einer anderen Samplerate gemessen werden, da die zeitliche Auflösung bei einer Samplerate von 1MHz nur $1\mu s$ beträgt. Dies würde bedeuten, dass die Aufnahmekarte gewechselt und somit das gesamte Aufnahmesystem verändert werden müsste. Alle historischen Messungen maßen jedoch Pulsdauern von mehreren Mikrosekunden, weshalb diese Möglichkeit als Ursache unwahrscheinlich ist.

Da die Radiostrahlung mit zunehmender Energie des Primärteilchens zunehmen sollte, könnte bei Luftschauern höherer Energien eine Messung mit dem momentanen Aufbau möglich sein. Da diese höchstenergetischen Schauer selten sind, laufen die Messungen weiter. So könnten eventuell Schauer mit höheren Energien gemessen werden und diese auf Signale im kHz-Bereich untersucht werden.

9. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Radiostrahlung im kHz-Bereich auf Signale aus Luftschauern untersucht. Hierzu war es wichtig, die Eigenschaften der Lang- und Mittelwellen zu kennen, um die gemessenen Signale zu verstehen.

Um ein geeignetes Experiment aufzubauen, wurden verschiedene Empfangsmöglichkeiten vorgestellt. Das Experiment bestand letztendlich aus drei aktiven magnetischen Rahmenantennen, einem Tiefpassfilter und einem Aufnahmecomputer mit Messkarte. Die Aufnahme wurde von LabVIEW gesteuert und auch die Analyse wurde größtenteils mit LabVIEW durchgeführt. Gemessen wurde im Frequenzbereich von 50kHz bis 500kHz, mit 16bit Auflösung und einer Samplerate von 1MHz. Dabei wurden sowohl Untergrundmessungen durchgeführt als auch von KASCADE-Grande getriggerte Signale aufgenommen.

Bei der Analyse der Untergrundmessung wurde deutlich, dass im betrachteten Frequenzbereich einige schmalbandige Störungen auftreten. Diese werden größtenteils durch Langwellensender verursacht. Diese schmalbandigen Störungen und die Frequenzen unterhalb von 50kHz wurden per Softwarefilter herausgeschnitten. Nach dieser Filterung konnten die erwarteten tageszeitlichen Schwankungen des Rauschuntergrundes durch die verschiedenen Ausbreitungsmöglichkeiten beobachtet werden. Mit Hilfe von Testpulsen, welche auf das Rauschsignal addiert wurden, konnte eine minimale Feldstärke angegeben werden, ab welcher Luftschauersignale sichtbar würden.

Bei der Analyse der getriggerten Daten wurden die gemessenen Signale auf kurze hohe Pulse im kHz-Bereich untersucht. Zwar konnten solche Pulse gefunden werden, jedoch konnten sie nicht mit Luftschauern in Verbindung gebracht werden. Auch die Analyse ausgehend von Luftschauerparametern machte deutlich, dass mit diesem Experiment keine Radiosignale von Luftschauern im kHz-Bereich gemessen wurden. Als obere Grenze für das durch Luftschauer emittierte Signal im kHz-Bereich konnte eine Feldstärke von $136_{-47}^{+48} \text{mV}/(\text{m}\cdot\text{MHz})$ für die vertikale Komponente bestimmt werden. Vermutlich ist das Untergrundrauschen in Karlsruhe in diesem Frequenzbereich zu hoch, um Pulse aus Luftschauern im kHz-Bereich messen zu können. Dies bestätigt auch ein Vergleich mit historischen Messungen.

Um das Experiment zu verbessern und mögliche kleinere oder kürzere Pulse zu messen, gibt es verschiedene Möglichkeiten:

Die Samplerate der Messkarte und das Aufnahmesystem könnten so verändert wer-

den, dass auch kürzere Pulse gemessen werden können. Ausgehend von den Aussagen der historischen Messungen scheint es jedoch eher an dem zu hohen Untergrundsignal zu liegen, dass keine Radiostrahlung von Luftschauern gemessen wurde, und nicht an der zeitlichen Auflösung.

Um das Rauschen zu minimieren, könnte der Tiefpassfilter LTC1650-1 gegen einen Tiefpassfilter mit steilerem Frequenzgang ausgetauscht werden. Dies würde das Aliasrauschen verringern und somit zu einem niedrigeren Untergrundsignal führen.

Ein niedrigeres Untergrundsignal könnte auch durch einen Standortwechsel erreicht werden. Jedoch ist eine Messung in Verbindung mit einem Teilchendetektorfeld notwendig, um gemessene Signale mit Luftschauern zu korrelieren. Ein möglicher Standort könnte das Pierre-Auger-Observatorium in Argentinien sein. Dieses bietet neben einem vermutlich geringeren Radioundergrund außerdem die Möglichkeit, bei höheren Luftschauerenergien zu messen. Diese verursachen vermutlich ein höheres Radiosignal und sind daher auch bei höherem Rauschuntergrund messbar.

Zwar konnten in dieser Arbeit keine Radiosignale von Luftschauern im kHz-Bereich gemessen werden, ob diese Strahlung jedoch existiert oder nicht, bleibt unklar. Es scheint daher lohnenswert, dieses Experiment in ruhigerer Umgebung und leicht verändertem Aufbau zu wiederholen. Dann könnten eventuell Luftschauersignale im kHz-Bereich gemessen werden und es gäbe eine weitere Möglichkeit, kosmische Strahlung, vor allem bei den höchsten Energien, zu detektieren. Diese könnte weitere Informationen, vor allem in Verbindung mit anderen Detektionssystemen, liefern.

A. Anhang

Kalibrierungsdaten der Antenne LFL1010

von der Firma WELLBROOK Communications zu Verfügung gestellt

CERTIFICATE OF CALIBRATION
UKAS Accredited Calibration Laboratory No. 0685.

Certificate No. 1132
Page 2 of 2

LFL 1010 Ser. No 6045
07 AUGUST 2007

Table 1.

Equivalent Electric Field Calibration.

Frequency Hz.	Calibration factor dB (m [∧] - 1).	Frequency Hz.	Calibration factor dB (m [∧] - 1).
10 k	35.2	1.0 M	16.4
12 k	32.7	2.0 M	16.4
15 k	30.1	3.0 M	16.5
20 k	27.0	4.0 M	16.2
30 k	23.6	5.0 M	16.1
40 k	21.7	6.0 M	16.0
50 k	20.5	7.0 M	16.0
60 k	19.5	8.0 M	16.0
70 k	18.8	9.0 M	15.9
80 k	18.5	10 M	15.9
90 k	18.1	12 M	15.8
100 k	17.8	13 M	15.5
120 k	17.5	14 M	15.3
150 k	17.1	15 M	15.1
200 k	16.9	16 M	15.0
300 k	16.7	18 M	15.0
400 k	16.6	20 M	15.6
500 k	16.6	22 M	16.4
600 k	16.5	24 M	17.1
700 k	16.5	26 M	17.3
800 k	16.5	28 M	17.6
900 k	16.4	29 M	17.4
		30 M	17.1

Adding the above Calibration Factors to receiver indication converts dB(μV) to dB(μV/m).

To convert to dB(μA/m), subtract 51.5 dB from the above Calibration Factors.

Measurements carried out by:

--- END ---

Literaturverzeichnis

- [1] AGASA: www.akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA/, Januar 2009.
- [2] ALEKSANDROV, A. V. et al.: *Interpretation of Cosmic Ray Interaction in 10^{15} to 10^{18} eV / About the Low-frequency Radioemission Pulses detected synchronously with EAS*. In: *International Cosmic Ray Conference*, Bd. 6 d. Reihe *International Cosmic Ray Conference*, S. 132–+, 1987.
- [3] ALLAN, H. R.: *Low Frequency Radio Emission from Extensive Air Showers*. *Nature*, 237:384–385, 1972.
- [4] ALLAN, H. R., R. W. CLAY und J. K. JONES: *Frequency Spectrum of Air Shower Radio Pulses*. *Nature*, 225:253–254, 1970.
- [5] ANTONI, T. et al.: *Electron, Muon, and Hadron Lateral Distributions Measured in Air-Showers by the KASCADE Experiment*. *Astroparticle Physics*, 14:245–260, 2001.
- [6] ANTONI, T. et al.: *KASCADE measurements of energy spectra for elemental groups of cosmic rays: Results and open problems*. *Astroparticle Physics*, 24:1–25, 2005.
- [7] ASTROTEILCHENPHYSIK: www.astroteilchenphysik.de, 2009.
- [8] BAISHYA, R., P. DATTA, P. M. KALITA, G. K. D. MAZUMDAR und P. K. M.: *On the production mechanism of MF-HF radiopulses associated with large extensive air showers*. *Nuovo Cimento C Geophysics Space Physics C*, 16:17–22, Feb. 1993.
- [9] BAISHYA, R. et al.: *Characteristics of VLF-LF radio emission (RE) from Giant Air Shower (GAS)*. In: *International Cosmic Ray Conference*, Bd. 9 d. Reihe *International Cosmic Ray Conference*, S. 111–+, 2005.
- [10] BUNDESNETZAGENTUR: *Frequenznutzungsplan*, April 2008.
- [11] CASTAGNOLI, C. et al.: *Measurements of L.F.-M.F. Radio Pulses from E.A.S. at Gran Sasso (2000m a.s.l.)*. In: *International Cosmic Ray Conference*, Bd. 4 d. Reihe *International Cosmic Ray Conference*, S. 363–+, Aug. 1991.

- [12] CASTAGNOLI, C., P. L. GHIA et al.: *Self-triggering Radio Antennas for Extensive Air Shower Detection*. In: *International Cosmic Ray Conference*, Bd. 4 d. Reihe *International Cosmic Ray Conference*, S. 258–+, 1993.
- [13] CLAY, R. W., P. C. CROUCH, A. G. GREGORY, J. H. HOUGH und J. R. PRESCOTT: *A Re-Appraisal of Low Frequency Radio Emissions Associated with Extensive Air Showers*. In: *International Cosmic Ray Conference*, Bd. 8 d. Reihe *International Cosmic Ray Conference*, S. 3093–+, 1975.
- [14] CLAY, R. W., P. C. CROUCH, A. G. GREGORY und J. R. PRESCOTT: *Low Frequency Radio Signals from Extensive Air Showers*. In: *International Cosmic Ray Conference*, Bd. 4 d. Reihe *International Cosmic Ray Conference*, S. 2420–+, 1973.
- [15] DATTA, P., R. BAISHYA und K. R. SINHA: *Studies on Radioemission from EAS by the GUCR Group*. In: SALTZBERG, D. und P. GORHAM (Hrsg.): *Radio Detection of High Energy Particles*, Bd. 579 d. Reihe *American Institute of Physics Conference Series*, S. 98–+, 2001.
- [16] DATTA, P. und M. K. PATHAK: *On the Contribution of Transition Radiation Effect Towards VLF Emission From EAS*. In: *International Cosmic Ray Conference*, Bd. 9 d. Reihe *International Cosmic Ray Conference*, S. 218–+, 1990.
- [17] FALCKE, H. et al.: *Detection and imaging of atmospheric radio flashes from cosmic ray air showers*. *Nature*, 435:313–316, 2005.
- [18] FILONENKO, A. D.: *Superhigh-energy cosmic ray detection using shower radioemission*. *Physics-Uspekhi*, 45 (4):403–432, 2002.
- [19] FRIESE, W.: *Außergewöhnliche Empfangsantennen*. Verlag für Technik und Handwerk, 2007.
- [20] GEMMEKE, H.: *Vorlesung Einführung in die Elektronik*. Universität Karlsruhe, WS 2007/2008.
- [21] H. MEINKE, F. G.: *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik*. Springer Verlag, 1992.
- [22] HAUNGS, A., H. REBEL und M. ROTH: *Energy spectrum and mass composition of high-energy cosmic rays*. *Reports on Progress in Physics*, 66:1145–1206, 2003.
- [23] HECK, D., J. KNAPP, J. CAPDEVIELLE, G. SCHATZ und T. THOUW: *CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers*, 1998.
- [24] HUEGE, T.: *Radio Emission from Cosmic Ray Air Showers*. Doktorarbeit, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität at Bonn, 2004.

-
- [25] J. ABRAHAM ET AL. [PIERRE AUGER COLLABORATION]: *Properties and performance of the prototype instrument for the Pierre Auger Observatory*. Nuclear Instruments and Methods, A523:50, 2004.
- [26] KADOTA, K., Y. SUZUKI et al.: *LF-MF Radio Signals from Large Air Showers*. In: *International Cosmic Ray Conference*, Bd. 4 d. Reihe *International Cosmic Ray Conference*, S. 262–+, 1993.
- [27] KAKIMOTO, F., T. UMEZAWA, T. NISHIYAMA und K. NISHI: *LF-MF Signals From Large Air Showers*. In: *International Cosmic Ray Conference*, Bd. 9 d. Reihe *International Cosmic Ray Conference*, S. 213–+, 1990.
- [28] KANEKO, T. et al.: *Acoustic and Vlf-Elf Radio Detections of Super Giant Air Showers*. In: *International Cosmic Ray Conference*, Bd. 11 d. Reihe *International Cosmic Ray Conference*, S. 428–+, Aug. 1983.
- [29] KLAWITTER, G.: *Ionosphäre und Wellenausbreitung*. Siebel Verlag, 2000.
- [30] LINEAR TECHNOLOGY: *Datenblatt des LTC1560-1*, 2009.
- [31] LONGAIR, M. S.: *High Energy Astrophysics, Volume 1, Particles, photons and their detection*. Cambridge Univ. Pr., 2. ed., repr. with corr. Aufl., 1997.
- [32] NEHLS, S.: *Calibrated Measurements of the Radio Emission of Cosmic Ray Air Showers*. Doktorarbeit, Institut für Kernphysik, FZK / Universität Karlsruhe, 2008.
- [33] NISHI, K. und K. SUGA: *On the Low Frequency Radioemission from Extensive Air Showers*. In: *International Cosmic Ray Conference*, Bd. 6 d. Reihe *International Cosmic Ray Conference*, S. 125–+, 1987.
- [34] NISHIMURA, J.: *Radio wave emitted by an extensive air showers in 10kHz to 1MHz region*. In: *International Cosmic Ray Conference*, Bd. 7, S. 308, 1985.
- [35] ROTHAMMEL, K.: *Antennenbuch*. DARC Verlag Baunatal, 2002.
- [36] SUGA, K., F. KAKIMOTO und K. NISHI: *Radio signals from very large showers*. In: JONES, F. C. (Hrsg.): *International Cosmic Ray Conference*, Bd. 7 d. Reihe *International Cosmic Ray Conference*, S. 268–271, Aug. 1985.
- [37] WELLBROOK COMMUNICATIONS: www.wellbrook.uk.com, 2009.
- [38] WIKIPEDIA: <http://de.wikipedia.org/wiki/Ionosphäre>, Mai 2009.
- [39] WILSON, R. R.: *Atmospheric Signals Caused by Cosmic-Ray Showers*. Phys. Rev., 108(1):155–156, Oct 1957.

Danksagung

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

Besonderer Dank geht an

- Herrn Prof. Dr. Blümer für die Übernahme des Referats,
- Herrn Prof. Dr. Quast für die Übernahme des Korreferats,
- Andreas Haungs für die gute Betreuung,
- Horia Bozdog und Oliver Krömer für die technische Unterstützung beim Aufbau des Experimentes,
- Frank Hase und Hermann-Josef Mathes, die mir den Einstieg in das Thema erleichtert haben,
- die gesamte LOPES-Kollaboration, vor allem an Marianne und Moses, für ihre guten Tips und netten Gespräche,

und natürlich an meine Familie und an Sebastian - danke für einfach alles!

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel verwendet zu haben.

Karlsruhe, den 28. Mai 2009

Katrin Link