



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7506

Radiodetektion von Luftschauern unter dem Einfluss starker elektrischer Felder in der Atmosphäre

M. Ender

Institut für Kernphysik

Oktober 2009

Forschungszentrum Karlsruhe

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7506

Radiodetektion von Luftschauern unter dem
Einfluss starker elektrischer Felder in der
Atmosphäre

Moses Ender

Institut für Kernphysik

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2009

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

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

ISSN 0947-8620

urn:nbn:de:0005-075067



Universität Karlsruhe (TH)
Fakultät für Physik
Institut für Experimentelle Kernphysik

Radiodetektion von Luftschauern unter dem Einfluss starker elektrischer Felder in der Atmosphäre

Diplomarbeit
von

Moses Ender

11. August 2008 – 24. Juli 2009

Referent: Prof. Dr. J. Blümer
Korreferent: Prof. Dr. K. D. Beheng
Betreuer: Dr. A. Haungs

Kurzbeschreibung

Der Nachweis ausgedehnter Luftschauer durch Radiosignale ist eine Methode der Messung hochenergetischer Teilchen kosmischen Ursprungs und durch die Verfügbarkeit moderner digitaler Elektronik momentan wieder Gegenstand intensiver Forschung. Die nachgewiesenen Radiosignale werden durch den Geosynchrotron Effekt erzeugt. Der Vorteil der Radiobeobachtung liegt darin, dass sie prinzipiell 24 Stunden pro Tag möglich ist. Allerdings wurde festgestellt, dass starke elektrische Felder in der Atmosphäre, wie sie während Gewittern auftreten, das Luftschauersignal beeinflussen können.

Dieser Effekt wurde im Rahmen der hier vorgelegten Diplomarbeit genauer untersucht, wobei die Analyse auf den Daten des LOPES-Experiments basiert. Zusätzlich zu den Radiodaten wurden aus den Daten des KASCADE-Grande Experiments rekonstruierte Luftschauerparameter verwendet sowie Messungen des statischen elektrischen Feldes am Boden durchgeführt. Dabei konnte die Beeinflussung des Luftschauersignals sowohl anhand einzelner Ereignisse, als auch in der Gesamtheit der während Gewittern aufgenommenen Ereignisse gezeigt werden. Außerdem gibt es Hinweise darauf, dass auch starke Felder außerhalb von Gewitterzeiträumen das Signal geringfügig beeinflussen.

Weiterhin wurden die durch atmosphärische Elektrizität erzeugten zusätzlichen Untergrundsignale während Gewittern untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass auch diese die Analyse der aufgenommenen Daten beeinträchtigen und somit eine zusätzliche Quelle von Fehlern in der Rekonstruktion der Luftschauerparameter darstellen.

Durch die Ausbildung eines Luftschauers in der Atmosphäre ändern sich lokal die elektrischen Bedingungen. Es gibt Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen Luftschauern der kosmischen Strahlung und der Entstehung von Blitzen. Auch dieser Frage wurde in dieser Arbeit im Rahmen der experimentellen Möglichkeiten nachgegangen, wobei der Versuch einer gleichzeitigen Beobachtung des Luftschauersignals und des wesentlich stärkeren Radiosignals eines Blitzes unternommen wurde. Es konnte jedoch kein Hinweis zur Bestätigung dieser Theorie gefunden werden. Da dies wahrscheinlich an der mangelnden Eignung des experimentellen Aufbaus für diese spezielle Frage liegt, wurde ein Vorschlag erarbeitet, wie ein Experiment speziell für diese Fragestellung aussehen sollte.

Radio detection of air showers during strong atmospheric electric fields

Radio detection of extensive air showers is a technique for measuring high energy cosmic ray particles which again has become a very active field of research over the last few years, driven by the availability of modern digital electronics. This detection method is based on radio emission caused by the geosynchrotron effect and has the advantage of a very high duty cycle of nearly 24 hours a day. However, it has been found that strong electric fields, as those occurring during thunderstorms, can influence the air shower radio signal.

The influence of these atmospheric electric fields has been studied in this diploma thesis, based on the data of the LOPES experiment. Additionally, the air shower parameters reconstructed by the KASCADE-Grande experiment and measurements of the static electric field have been used. The influence of strong electric fields on the air shower signal has been shown to be significant, based on single events and on the entirety of all events that have been recorded during thunderstorms. It seems that even in absence of thunderstorms strong electric fields can influence the air shower signal.

Furthermore, the additional background signals produced by atmospheric electricity during thunderstorms have been studied. It could be shown that these signals can also compromise the analysis of the recorded data. Thus, they are an additional source of errors in the reconstruction of air shower parameters on the basis of radio signals.

During the development of a cosmic ray air shower the electric conditions in the atmosphere change. There are indications for a correlation between extensive air showers and the formation of lightnings. Within the experimental possibilities of the LOPES experiment this issue has also been investigated. The attempt to observe an air shower and a signal from lightning simultaneously has been made. No indications have been found that could support or disprove this theory. It can be assumed that this is due to the inability of the experimental design to address this particular question. Therefore, an experimental design suited to examine correlations between extensive air showers and lightnings has been proposed.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Kosmische Strahlung	3
2.1	Entdeckung der kosmischen Strahlung	3
2.2	Das Energiespektrum der kosmischen Strahlung	3
2.3	Quellen der kosmischen Strahlung	5
2.4	Massenspektrum der kosmischen Strahlung	6
2.5	Ausgedehnte Luftschauer	6
2.6	Etablierte Nachweismethoden für Luftschauer	7
3	Radioemission ausgedehnter Luftschauer	11
3.1	Modell der transversalen Ströme	12
3.2	Geosynchrotronmodell	13
3.3	Berücksichtigung elektrischer Felder im Geosynchrotronmodell	14
4	Atmosphärische Elektrizität	19
4.1	Struktur und Entstehung elektrischer Felder in Gewitterwolken	19
4.2	Arten von Gewittersystemen	21
4.3	Messmethoden der Ladungsverteilung	23
4.4	Blitze	26
4.4.1	Ursprung der Blitze	26
4.4.2	Verschiedene Blitzarten	26
4.4.3	Ablauf eines negativen Wolke-Boden-Blitzes	28
4.4.4	Andere Formen der elektrischen Entladung	29
5	Experimenteller Aufbau	35
5.1	KASCADE und KASCADE-Grande	35
5.2	Das LOPES-Experiment	35
5.3	Verarbeitung der aufgenommenen Daten	39
5.4	Messung des elektrischen Feldes	44
6	Zusätzlicher Radiountergrund während Gewittern	47
6.1	Radiosignale von Entladungsprozessen	47
6.2	Radiosignale eines durch Luftschauer ausgelösten Runaway Breakdowns	53

6.3	Einfluss auf die Messung des Radiosignals der Luftschauber	57
6.4	Mögliche Probleme für den Betrieb eines selbstgetriggerten Radiodetektors	59
7	Einfluss des elektrostatischen Feldes auf die Radioemission von Luftschauern	61
7.1	Einfluss des elektrischen Feldes auf die Detektionseffizienz	61
7.1.1	Ausgewählte Datensätze	62
7.1.2	Ergebnis der Analyse	65
7.2	Einfluss des elektrischen Feldes auf individuelle Luftschaubersignale . .	69
7.2.1	Lateralprofil des Radiosignals	69
7.2.2	Polarisation des Radiosignals	71
7.2.3	Dauer des Radiopulses	72
7.2.4	Einfluss auf die Kohärenz	72
8	Untersuchung möglicher Korrelationen zwischen Luftschauern und Blitzen	75
8.1	Beeinflussung der Blitze durch Luftschauber	75
8.2	Experimentelle Ergebnisse mit LOPES	75
8.2.1	Zeitkorrelation zwischen Luftschauberereignissen und Unstetigkeiten im elektrischen Feld	76
8.2.2	Richtungskorrelation von Luftschauern und Blitzen	79
8.3	Mögliche Verbesserungen des experimentellen Aufbaus	81
9	Zusammenfassung und Ausblick	83
	Literaturverzeichnis	87

1 Einleitung

Auf der Suche nach Antworten auf die grundlegenden Fragen der Physik widmet sich die Astroteilchenphysik der Erforschung mikroskopischer Vorgänge um ein makroskopisches Verständnis des Universums zu erlangen. Dabei spielen hochenergetische Teilchen aus astrophysikalischen Quellen als Boten eine entscheidende Rolle. Sie tragen wichtige Informationen über ihre Quelle in Form ihrer Ankunftsrichtung, ihrer Energie und ihrer Masse. Vor allem der höchste Energiebereich ist unter einer Vielzahl von Gesichtspunkten interessant, wobei dort der Fluss der kosmischen Strahlung auf der Erde sehr gering ist.

Um diese geringe Anzahl an Ereignissen überhaupt nachweisen zu können, müssen riesige Flächen mit Detektoren ausgestattet werden. Dabei darf nach Möglichkeit kein einziges Teilchen der kosmischen Strahlung falsch rekonstruiert werden, da auf Grund der geringen Statistik jedes einzelne Ereignis signifikant zum Gesamtergebnis beiträgt. Deshalb ist Interesse an der simultanen Messung eines Luftschauerereignisses mit mehreren unabhängigen Detektionstechniken aufgekommen. Damit ist die Bestimmung der Luftschauerparameter nicht nur genauer möglich, sondern es besteht auch die Chance, Fehler in der Rekonstruktion eines einzelnen Ereignisses zu erkennen und die entsprechenden Daten zu verwerfen. Leider weisen die bisher zur Ergänzung der bodengebundenen Teilchendetektoren eingesetzten Fluoreszenz-Teleskope den Nachteil auf, dass sie nur während eines Bruchteils der zur Verfügung stehenden Zeit messen können. Diese Einschränkung besitzt die Radiodetektion ausgedehnter Luftschauer nicht. Sie kann prinzipiell immer und überall eingesetzt werden. Einzige Einschränkung sind Zeiträume mit starken elektrischen Feldern in der Atmosphäre, wie sie im Allgemeinen während Gewittern auftreten. Diese beeinflussen das Radiosignal des Luftschauers und können somit zu einer falschen Rekonstruktion der Luftschauerparameter führen.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung dieser Einflüsse. Dazu wird zunächst ein Überblick über kosmische Strahlung und den Nachweis von Luftschauern gegeben (Kapitel 2). Anschließend wird der Emissionsmechanismus der Radiostrahlung der Luftschauer näher betrachtet und wie im Rahmen der Erklärungsmodelle der Einfluss statischer elektrischer Felder zu verstehen ist (Kapitel 3). Um die Auswirkungen der elektrischen Felder in der Praxis zu verstehen, ist es zunächst notwendig, die grundlegenden Mechanismen der atmosphärischen Elektrizität sowie das Zustandekommen starker elektrischer Felder zu verstehen, die sich in Form von Gewittern bemerkbar machen (Kapitel 4). Außerdem sind die Radiosignale atmosphärischer

Entladungen eine starke Untergrundquelle bei der Messung der schwachen Luftschauersignale, weshalb ein Überblick über die auftretenden Entladungserscheinungen gegeben wird.

Als nächstes folgt eine Beschreibung des experimentellen Aufbaus der Radiodetektoren, der Teilchendetektoren und der Vorrichtung zur Messung des statischen elektrischen Feldes. Des Weiteren wird auf die standardmäßige Verarbeitung dieser Daten eingegangen, damit der Einfluss der Störungen während des Analyseprozesses deutlich wird (Kapitel 5).

Auf dieser Basis aufbauend, folgt eine Analyse der Untergrundsignale, wie sie während Gewittern auftreten. Dabei geht es zum einen um die direkte Beeinflussung der bisher durchgeführten Messungen und Analysen. Zum anderen werden mögliche Probleme für den Betrieb eines autonomen Triggersystems auf Basis der Radiodaten beleuchtet (Kapitel 6).

Außerdem werden die Einflüsse der extrem starken statischen elektrischen Felder in Gewitterwolken untersucht. Den Schwerpunkt bildet hierbei die Betrachtung des statistischen Einflusses auf die Gesamtheit der während Gewitter durchgeführten Messungen. Zusätzlich werden mögliche Einflüsse auf der Basis von einzelnen Ereignissen betrachtet (Kapitel 7).

Abschließend folgt eine erste Betrachtung der während Gewittern aufgenommenen Daten im Hinblick auf eine mögliche Korrelation zwischen ausgedehnten Luftschauern und der Entstehung von Blitzen (Kapitel 8). Motivation hierfür ist das Rätsel über den genauen Ablauf der Zündung eines Blitzes, wobei starke Hinweise darauf existieren, dass der Anfang einer Blitzentladung eng mit den Auswirkungen der kosmischen Strahlung in der Atmosphäre verknüpft ist.

Schließlich folgt eine Zusammenfassung der erhaltenen Ergebnisse sowie ein Ausblick für die Zukunft der Radiomessungen, speziell im Zusammenhang mit Gewittern.

2 Kosmische Strahlung

2.1 Entdeckung der kosmischen Strahlung

Im Jahr 1912 entdeckte Viktor Hess während seiner Ballonflüge einen Anstieg des Ionisationsgrades der Atmosphäre mit zunehmender Höhe. Er postulierte ionisierende Strahlung als Ursache und schloss aus dem Verhalten bei zunehmenden Höhen, dass der Ursprung dieser Strahlung nicht auf der Erde, sondern außerhalb der Atmosphäre liegen muss. Weitere Untersuchungen bestätigten die Annahme über den kosmischen Ursprung dieser Strahlung. Für einige Zeit war die kosmische Strahlung die einzige Möglichkeit, exotische Teilchen zu studieren. Das änderte sich erst, als künstliche Teilchenbeschleuniger leistungsfähig genug wurden, um neue Teilchen in Kollisionen zu erzeugen.

Heute sind kosmische Strahlen jedoch wieder mehr in den Mittelpunkt des Interesses gerückt und können als Ergänzung zu den Messungen an Teilchenbeschleunigern gesehen werden. Der Grund dafür ist der Zugang zu viel höheren Energien als sie in künstlichen Beschleunigern erreicht werden können. Der LHC als leistungsfähigster Teilchenbeschleuniger wird Energien von ungefähr 10^{17} eV erreichen, wobei Teilchen der kosmischen Strahlung Energien von bis zu 10^{20} eV aufweisen. Außerdem sind die Teilchen der kosmischen Strahlung Boten aus zum Teil weit entfernten Gebieten unseres Universums. Photonen und Neutrinos erreichen die Erde unbeeinflusst von den galaktischen und extragalaktischen Magnetfeldern. Aber auch geladene Teilchen ausreichend hoher Energie, die von nahen Quellen stammen, erfahren nur eine geringe Ablenkung. Damit tragen sie wichtige Informationen über ihren Entstehungsort und die Prozesse, die in der Lage sind, Teilchen so hoher Energie zu erzeugen. Neben der Ankunftsrichtung sind für die Untersuchung der Beschleunigungsmechanismen und der Propagation vor allem das Massen- und Energiespektrum der kosmischen Strahlung von Bedeutung.

2.2 Das Energiespektrum der kosmischen Strahlung

Das Energiespektrum der kosmischen Strahlung folgt einem Potenzgesetz mit einem Spektralindex, der über 10 Größenordnungen hinweg fast konstant bleibt (Abbildung 2.1). Das bedeutet, dass die Zahl der Teilchen N je Energieintervall mit

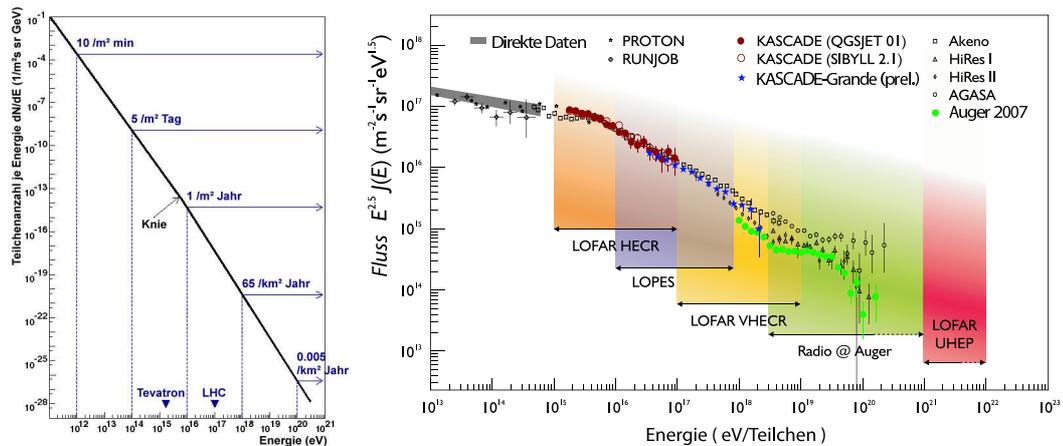


Abbildung 2.1: Das Energiespektrum der kosmischen Strahlung folgt einem Potenzgesetz mit einem fast konstanten Exponenten über einen sehr weiten Bereich (links) (nach [Kom]). Zur besseren Sichtbarkeit der Änderungen in der Steigung wurde das Spektrum mit $E^{2,5}$ multipliziert (rechts)[KAS09].

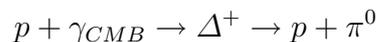
steigender Energie abnimmt:

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

Es gibt nur zwei kleine Auffälligkeiten im Spektrum. Zum einen ist dies eine Änderung des Spektralindex von $\gamma \approx 2.7$ nach $\gamma \approx 3$ in der Region zwischen 10^{15} und $5 \cdot 10^{15}$ eV. Dieser Übergang wird das „Knie“ des Spektrums genannt. Da die maximal erreichbare Energie eines Beschleunigers mit der Masse des beschleunigten Teilchens zunimmt, ist eine mögliche Ursache des „Knies“ das Ende des Energiespektrums des Protons als leichteste Komponente der kosmischen Strahlung. Eine alternative Erklärung des „Knies“ ist das beginnende Entweichen der kosmischen Strahlung aus unserer Galaxie. Der Grund dafür ist, dass die galaktischen Magnetfelder die geladenen Teilchen nur bis zu einer bestimmten Maximalenergie in unserer Galaxie halten können.

Die zweite Auffälligkeit ist wieder ein Abflachen des Spektrums bei Energien oberhalb von ungefähr 10^{18} eV. Dies wird als „Knöchel“ bezeichnet, da der gesamte Verlauf des Energiespektrums an die Form eines Beines erinnert. Dies wird deutlich, wenn man die Änderungen der Steigung durch eine Multiplikation des Spektrums mit $E^{2,5}$ hervorhebt. Eine mögliche Erklärung für dieses Abflachen ist der Übergang von galaktischen zu extragalaktischen Quellen, die dann ein Energiespektrum mit einem anderen Spektralindex besitzen. Diese Erklärung ist motiviert durch das Fehlen geeigneter Quellen in unserer Galaxie, die solche hohen Energien erreichen können. Würden sie in der Milchstraße existieren, müssten diese als Häufungspunkte der Ankunftsrichtungen sichtbar sein, was nicht beobachtet wurde.

Bei noch höheren Energien bricht das Spektrum scharf ab [Abr08]. Das liegt an einem ab $5 \cdot 10^{19}$ eV auftretenden Reaktionskanal über die Δ^+ -Resonanz. Dabei wechselwirkt ein Proton mit einem niederenergetischen Photon der kosmischen Hintergrundstrahlung und verliert Energie unter Erzeugung eines π^0 -Mesons.



Dieser Effekt wurde bereits 1966 von Kenneth Greisen, Georgiy Zatsepin und Vadim Kuz'min unabhängig voneinander vorhergesagt [Gre66], [Zat66], kurz nachdem 1965 die Existenz der kosmischen Hintergrundstrahlung von Arno Penzias und Robert Wilson experimentell bestätigt wurde. Diese Unterdrückung des Spektrums wird nach den Initialen der Entdecker *GZK-cut off* genannt.

2.3 Quellen der kosmischen Strahlung

Bei den niedrigsten Energien ($< 10^9$ eV) dominiert der Sonnenwind den Fluss der kosmischen Strahlung. Er besteht hauptsächlich aus Protonen, Elektronen und Heliumkernen und ist zum Beispiel für das Polarlicht verantwortlich. Durch Sonneneruptionen kann sowohl der Fluss als auch die Energie vorübergehend ansteigen. Außerdem korreliert der kosmische Teilchenfluss mit der Sonnenaktivität, besitzt also eine Modulation mit einer elfjährigen Periode. Niederenergetische kosmische Strahlung, deren Quelle außerhalb des Sonnensystems liegt, muss auf dem Weg zur Erde in die Heliosphäre, dem Einflussbereich des Sonnenwindes, eindringen. Durch das im Sonnenwind eingefrorene Magnetfeld bildet sich in der Heliosphäre eine magnetische Barriere aus, die von der kosmischen Strahlung überwunden werden muss. In Zeiten erhöhter solarer Aktivität ist diese magnetische Barriere stärker, wodurch die niederenergetischen Teilchen der kosmischen Strahlung vermehrt von der Erde ferngehalten werden. Daraus folgt eine Antikorrelation zwischen dem Teilchenfluss im niederenergetischen Bereich bis ungefähr 1 GeV und der Aktivität der Sonne. Dieses Phänomen wird solare Modulation genannt [Sta04].

Die galaktische Komponente der kosmischen Strahlung bis hin zum Knie im Spektrum wird durch Beschleunigung geladener Teilchen in der Schockfront von Supernovaüberresten verursacht. Diesen Beschleunigungsmechanismus an magnetisierten Plasmawolken postulierte Enrico Fermi bereits 1949. Auch im Energiebereich zwischen Knie und Knöchel wird von galaktischen Quellen ausgegangen. Als Kandidat für die Quellen wird beispielsweise eine spezielle Unterart von Supernovaüberresten in Betracht gezogen.

Bei den allerhöchsten Energien, also jenseits des Knöchels, kommen nur noch extragalaktische Quellen in Frage, da das Magnetfeld der Milchstraße zu schwach ist, um die Teilchen in diesem Energiebereich in der Galaxie zu halten. Außerdem wurden

keine galaktischen Quellen in diesem Energiebereich gefunden. Der Beschleunigungsmechanismus ist noch unbekannt. Es wird jedoch vermutet, dass aktive Schwarze Löcher in den Zentren von Galaxien eine entscheidende Rolle spielen.

2.4 Massenspektrum der kosmischen Strahlung

Die Zusammensetzung der kosmischen Strahlung lässt sich nur im niederenergetischen Bereich durch direkte Messungen exakt bestimmen. Dabei bilden Atomkerne den Hauptbestandteil der kosmischen Strahlung, nur bei zwei Prozent handelt es sich um Elektronen. Die Massenverteilung der Kerne spiegelt ungefähr die relative Elementhäufigkeit in der Sonne wieder (Abbildung 2.2, links), was auf einen stellaren Ursprung schließen lässt [Gru05], [Sta04].

Auffällig ist jedoch ein deutlicher Überschuss für Lithium, Beryllium und Bor. Dies ist durch Spallation schwererer Elemente aus der CNO-Gruppe zu verstehen. Auf die gleiche Weise entsteht die Überhäufigkeit unterhalb der Eisengruppe.

Bei höheren Energien können keine direkten Messungen mehr durchgeführt werden, womit auch die Masse des Primärteilchens nicht mehr gemessen werden kann. Die einzige Möglichkeit diese abzuschätzen, besteht im Vergleich der gemessenen Luftschauereigenschaften mit Simulationsergebnissen für verschiedene Massengruppen (Abbildung 2.2, rechts). Die erhaltenen Ergebnisse sind jedoch sehr stark vom verwendeten Wechselwirkungsmodell abhängig.

2.5 Ausgedehnte Luftschauer

Bei Energien oberhalb von einigen hundert GeV sind direkte Messungen der Teilchen der kosmischen Strahlung nicht mehr praktikabel. Der Grund dafür ist der extrem geringe Fluss ab diesem Energiebereich, wodurch riesige Detektoren nötig würden. Oberhalb von 10^{16} eV beträgt der Fluss nur noch ungefähr ein Teilchen pro Quadratmeter und Jahr. Die einzige Möglichkeit die Teilchen bei den höchsten Energien trotzdem nachzuweisen, besteht in der Nutzung natürlicher Materialien als Detektorvolumen. Bei der Ausnutzung der Erdatmosphäre als Reaktionsmedium wird dann nicht das Primärteilchen, sondern die Reaktionsprodukte der Wechselwirkungen mit Luftmolekülen nachgewiesen. Durch Messung der Eigenschaften des sich ausbildenden Luftschauers lassen sich Rückschlüsse auf Richtung, Energie und Art des Primärteilchens ziehen.

Nachdem das Primärteilchen auf die oberen Schichten der Atmosphäre getroffen ist, geht es zunächst hadronische Wechselwirkungen mit Kernen der Luftmoleküle ein. Dadurch wird eine Teilchenlawine ausgelöst (Abbildung 2.3). Diese Lawine besteht hauptsächlich aus Elektronen und Positronen, die durch Paarbildung entstehen.

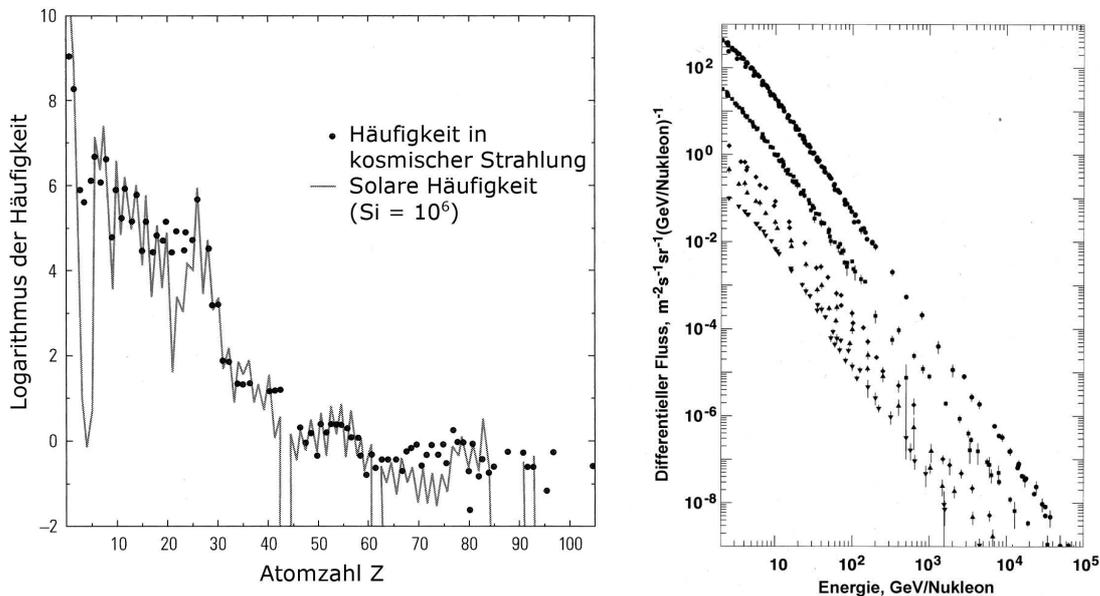


Abbildung 2.2: Relative Häufigkeit der niederenergetischen Primärteilchen mit Atomzahlen von 1 bis 100 verglichen mit der solaren Elementhäufigkeit (links) [Gru05]. Bei höheren Energien lässt sich lediglich das Flussspektrum für verschiedene Massengruppen bestimmen (rechts) [Sta04]. Es handelt sich hierbei um die Massengruppen H, He, CNO, Ne-Si und $Z > 17$ (von oben nach unten).

Zusammen mit den Photonen werden sie als elektromagnetische Komponente des Schauers bezeichnet.

Einen viel geringeren Anteil an der Gesamtzahl der geladenen Teilchen stellen die Myonen dar. Die myonische Komponente wird hauptsächlich durch den Zerfall geladener Mesonen produziert und kann viel längere Strecken ohne Wechselwirkung zurücklegen, als die elektromagnetische Komponente. Dadurch dringt sie tiefer in die Atmosphäre ein. Aus dem Vergleich beider Komponenten lässt sich auf das Entwicklungsstadium des Luftschauers schließen.

Den kleinsten Anteil am Luftschauer im späten Entwicklungsstadium stellen die Hadronen dar. Durch ihren relativ hohen Impuls entlang der Schauerachse konzentrieren sie sich vor allem in der Nähe des Schauerzentrums.

2.6 Etablierte Nachweismethoden für Luftschauer

Die älteste Nachweisteknik für Luftschauer ist die Messung der geladenen Teilchen, die den Erdboden erreichen. Diese bodengebundenen Experimente können aus Szintillatoren, Wasser-Čerenkov-Tanks oder anderen Teilchendetektoren bestehen. Mit einer großen Anzahl an Detektorstationen ist es möglich, die Ankunftsrichtung, das

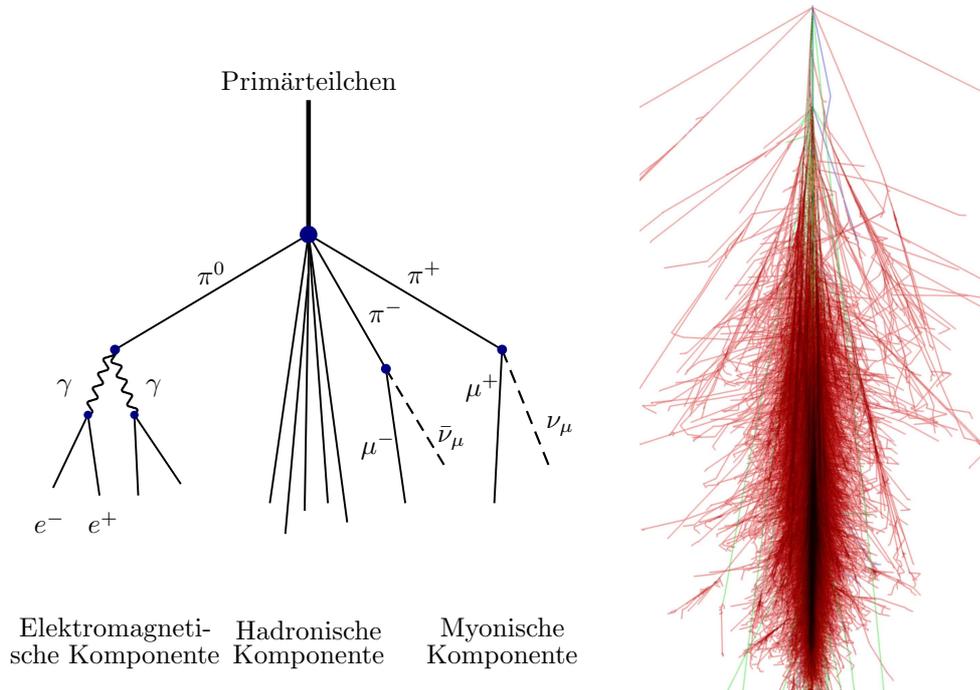


Abbildung 2.3: Schematische Ansicht der Komponenten eines ausgedehnten Luftschauers (links) und eine Simulation eines Luftschauers für ein vertikal einfallendes Proton mit einer Energie von 10^{12} eV (rechts). Die roten Spuren gehören zur elektromagnetischen Komponente, Myonen sind blau dargestellt und die grünen Spuren sind Hadronen [Sch].

transversale Schauerprofil sowie die Energie des Primärteilchens zu bestimmen. Das größte Problem dieser Technik ist jedoch die starke Abhängigkeit von Simulationen. Die dafür benötigten Wirkungsquerschnitte, vor allem für die hadronischen Wechselwirkungen, müssen aus dem für Beschleuniger zugänglichen Energiebereich extrapoliert werden.

Eine andere Technik ist der Nachweis der Čerenkov-Strahlung, die vom Luftschauer ausgeht, während sich die Teilchenfront durch die Atmosphäre bewegt. Diese kurzen, nur wenige Nanosekunden langen Lichtblitze, können mithilfe großer Teleskopspiegel und Fotomultiplier-Kameras detektiert werden. Da der Čerenkov-Lichtkegel nur eine begrenzte Fläche am Boden bedeckt, muss das Teleskop in die Einfallsrichtung des Luftschauers blicken, um die Messung durchzuführen. Deshalb bietet sich diese Messmethode vor allem zur Messung hochenergetischer Gammastrahlen an [Aha97a], [Aha97b]. Da ihre Propagation nicht von Magnetfeldern beeinflusst wird, bewegen sie sich geradlinig von der Quelle zur Erde. Ein Luft-Čerenkov-Teleskop kann also auf eine bekannte Quelle ausgerichtet werden, um den Fluss der Gammastrahlen zu messen. Die Energiegrenze zum Einsatz dieser Technik beträgt einige 10^{10} eV und

liegt somit sehr niedrig.

Die dritte im großen Stil eingesetzte Nachweismethode ist die Messung des ausgesendeten Fluoreszenzlichts. Dieses wird von Stickstoffatomen emittiert, die von den relativistischen Teilchen des Luftschauers angeregt worden sind. Beim Übergang in den Grundzustand wird die Anregungsenergie als Fluoreszenz-Photon abgegeben, dessen Wellenlänge im ultravioletten Spektralbereich liegt. Das Fluoreszenzlicht kann man ebenfalls an großen Teleskopen mit Fotomultiplier-Kameras messen, wobei der Luftschauer als Spur in der Atmosphäre abgebildet wird. Die Energieschwelle für diese Nachweismethode liegt mit etwa 10^{17} eV recht hoch. Leider kann diese Messmethode, genauso wie die Luft-Čerenkov-Technik, nur während dunkler Nächte mit sauberer Atmosphäre eingesetzt werden. Die Messzeit beträgt dadurch lediglich etwa zehn Prozent der eigentlich zur Verfügung stehenden Zeit. Aber auch diese geringe Messdauer reicht schon aus, um eine Energiekalibration der Messung der Teilchendetektoren durchzuführen, die dann mit voller Statistik messen können, ohne dass ihre Energiekalibration direkt von Simulationen abhängt. Eine simultane Messung mit zwei verschiedenen Nachweismethoden hat aber noch weitere Vorteile. Einerseits werden die Fehler der simultan gemessenen Größen kleiner, andererseits werden zusätzliche Informationen verfügbar, die das Risiko einer unbewussten falschen Rekonstruktion stark verringern. Das ist vor allem bei den höchsten Energien von großer Bedeutung, da der Fluss so gering ist, dass jedes einzelne falsch rekonstruierte Ereignis einen Einfluss auf das Ergebnis der Analyse hat.

Um die Informationen von oberflächengebundenen Teilchendetektoren zu vervollständigen, könnte der Radio-Nachweis der Luftschauer wichtig werden. Der Vorteil der Radiotechnik ist die hohe Messzeit von nahezu 100 Prozent. Lediglich bei extremen Wetterbedingungen in der Atmosphäre, wie zum Beispiel Gewittern, sind die Messungen nicht aussagekräftig. Da es sich um eine integrale Messung der Radioemission aus der gesamten Luftschauerentwicklung handelt, werden zusätzliche Informationen verfügbar. Außerdem wird erwartet, dass mit der Radiodetektion eine sehr hohe Winkelauflösung erreichbar ist.

3 Radioemission ausgedehnter Luftschauer

Es wurde bereits 1962 von G. Askaryan vorhergesagt, dass die relativistische Bewegung der geladenen Teilchen eines Luftschauers in der Atmosphäre zur Emission von Radiowellen führen muss. Sein Modell stützt sich dabei auf die Emission von Čerenkov-Strahlung, die eine bewegte Ladung emittiert, deren Geschwindigkeit größer als die Lichtgeschwindigkeit im umgebenden Medium ist. Bei der Ladung handelt es sich um einen negativen Ladungsüberschuss in der Schauerfront. Dieser bildet sich im Laufe der Schauerentwicklung aus, da die durch Paarerzeugung entstandenen Positronen teilweise in der Atmosphäre annihilieren. Die negative Überschussladung bewegt sich näherungsweise mit Lichtgeschwindigkeit und somit schneller als die Lichtgeschwindigkeit in der Atmosphäre und führt so zur Emission elektromagnetischer Strahlung. Auf Grund der geringen Dicke der Schauerfront von nur wenigen Metern, ist die Emission im Radiobereich bis zu einer Wellenlänge von wenigen Metern kohärent. Das entspricht einem Frequenzbereich bis etwa 100 MHz.

Wie jedoch schon die ersten Experimente von J. V. Jelley [JEL65], H. R. Allan [All71] und anderen zeigten, traten bevorzugt Polarisationsrichtungen auf, die eine Abhängigkeit von der Richtung relativ zum Erdmagnetfeld nahe legten. Daraufhin wurde von F. D. Kahn und I. Lerche (1966) sowie von S. A. Colgate (1967) ein alternativer Emissionsprozess vorgeschlagen. Dieser basiert auf der Ladungstrennung innerhalb des Luftschauers durch das magnetische Feld der Erde. Die dadurch hervorgerufenen transversalen Ströme führen ebenfalls zu einer kohärenten Emission. Eine detaillierte experimentelle Untersuchung war zu damaliger Zeit mit rein analoger Elektronik allerdings noch nicht möglich. Vor allem die fehlende Möglichkeit, Störsignale zuverlässig zu erkennen und herauszufiltern sowie der Erfolg anderer Messtechniken führte zur Einstellung der Messungen.

Mit der Wiederaufnahme der Messungen mittels ausgereifter Digitaltechnik und anschließender Signalaufbereitung wurden auch die theoretischen Erklärungsversuche wieder aufgenommen. Das führte zu zwei Emissionsmodellen, die beide auf den Auswirkungen des Erdmagnetfeldes auf die geladenen Teilchen basieren, jedoch unterschiedliche Ansätze verwenden.

3.1 Modell der transversalen Ströme

Das von F. D. Kahn, I. Lerche und S. A. Colgate entwickelte makroskopische Modell der transversalen Ströme ist von O. Scholten und K. Werner aufgegriffen worden [Sch09a]. Es basiert auf der Ladungstrennung innerhalb des Schauers durch die Lorentzkraft, die durch das Erdmagnetfeld hervorgerufen wird. Die Ladungstrennung kann durch eine Stromdichte beschrieben werden, die proportional zur Anzahl der Ladungsträger ist. Das bedeutet, dass die Stromdichte bis zum Erreichen des Maximums der Schauerentwicklung anwächst. Durch Kenntnis der zeitabhängigen Stromdichte, kann die Radioemission berechnet werden. Dabei werden die mikroskopischen Eigenschaften der Teilchen im Luftschauer, wie die Winkelverteilung oder die Lateralverteilung nicht berücksichtigt. Außerdem wird eine konstante Driftgeschwindigkeit über den Verlauf der Atmosphäre angenommen. Auf Grund der Tatsache, dass sich die im Ruhesystem des Luftschauers definierte Stromdichte mit nahezu Lichtgeschwindigkeit durch die Atmosphäre bewegt, führt die Lorentz-Transformation in das Bezugssystem des Betrachters zu einer starken Bündelung der Strahlung, die dann in einem schmalen Kegel in Richtung der Schauerachse abgestrahlt wird.

Aus geometrischen Betrachtungen der Laufzeitunterschiede sowie den Geschwindigkeitsunterschieden der Teilchen innerhalb des Schauers lässt sich ableiten, dass die Strahlung bei Frequenzen unterhalb von ungefähr 100 MHz kohärent ist. Ein Problem bei der Berechnung der transversalen Stromdichte stellt jedoch die Bestimmung der

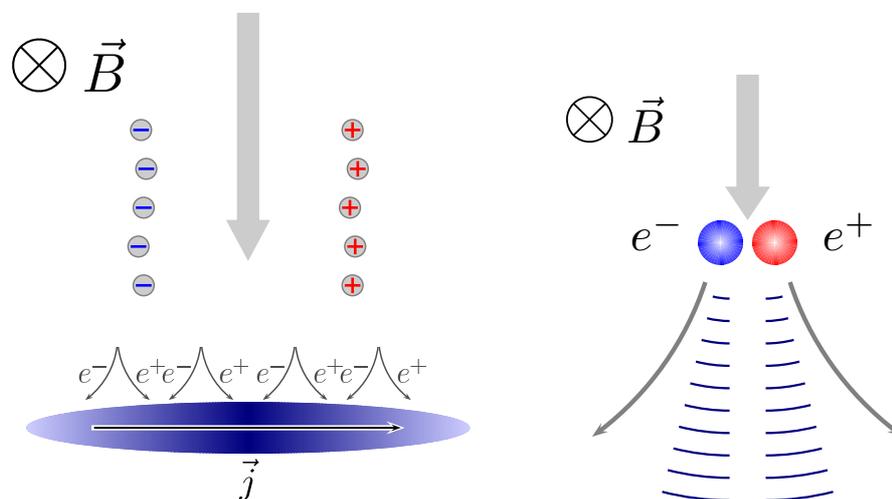


Abbildung 3.1: Veranschaulichung des makroskopischen Modells der transversalen Ströme (links). Die sich hinter dem Schauer ausbildende bipolare Ladungsstruktur liefert einen zusätzlichen Strahlungsbeitrag. Im Gegensatz dazu werden im mikroskopischen Geosynchrotronmodell (rechts) die einzelnen Elektron-Positron-Paare der elektromagnetischen Komponente betrachtet.

mittleren Driftgeschwindigkeit der Elektronen in der Schauerfront dar, die im Detail von den Wechselwirkungen der Sekundärteilchen im Luftschauer mit den Luftmolekülen abhängt. Zusätzlich zu der durch das Magnetfeld hervorgerufenen Stromdichte kommt es zur Ausbildung einer bipolaren Ladungsstruktur in der Atmosphäre hinter dem Luftschauer (Abbildung 3.1, links). Die Bildung dieses Dipols führt zu einem zusätzlichen Strahlungsbeitrag [Sch08].

Die Berechnungen führen zu bipolaren Pulsen (Abbildung 3.2). Allerdings wird die Stärke der im Experiment beobachteten Pulse noch nicht korrekt beschrieben. Die gemessenen Radiopulse sind systematisch höher als die mit dem Modell der transversalen Ströme berechneten Pulse.

3.2 Geosynchrotronmodell

T. Huege und H. Falcke haben hingegen ein mikroskopisches Modell der Radioemission entwickelt [Hue03]. Dieses basiert auf der Betrachtung der Bewegung eines einzelnen geladenen Teilchens im Magnetfeld der Erde. Jedes geladene Teilchen bewegt sich innerhalb seiner Lebensdauer auf einem kleinen Abschnitt einer helixförmigen Bahnkurve. Dabei emittiert es Synchrotronstrahlung, die in einem Strahlungskegel vorwärts gerichtet ist (Abbildung 3.1, rechts). Der Öffnungswinkel des Strahlungskegels eines einzelnen Teilchens ist umgekehrt proportional zum Lorentzfaktor des Teilchens. Die Synchrotronstrahlung hat ihr Maximum im Spektrum bei ungefähr 1 GHz. Auf Grund der Ausdehnung des Luftschauers und der Mittlung über die Strahlungsbeiträge aller Teilchen ist die oberhalb von 100 MHz emittierte Strahlung nicht kohärent und somit durch die geringen Amplituden schwer beobachtbar. Unterhalb von ungefähr 100 MHz ist die Strahlung jedoch kohärent.

Als mikroskopisches Modell ermöglicht es detaillierte theoretische Studien durch Monte-Carlo-Simulationen. Vor allem der Einfluss der genauen Energie- und Impulsverteilung sowie der räumlichen Ausdehnung des Luftschauers kann erfasst werden.

Ein Kritikpunkt sind die bisher in den Simulationen nicht berücksichtigten Strahlungsbeiträge durch die Änderung der Anzahl der Ladungsträger. Diese Beiträge durch das Erzeugen, beziehungsweise die Vernichtung der Teilchen kann in Form von Start- und Endpunktbeiträgen berücksichtigt werden. Ohne Berücksichtigung dieser Beiträge führen die Simulationen zu einem unipolaren Puls (Abbildung 3.2). Man geht jedoch davon aus, dass die Erweiterung des Modells um diese Beiträge zu bipolaren Pulsen führen wird [Lud09]. Die vom Geosynchrotronmodell ohne Endpunktbeiträge vorhergesagte absolute Feldstärke stimmt in einem typischen Abstand zum Schauerzentrum von etwa 75 m recht gut mit der tatsächlich gemessenen Feldstärke überein. Auch die Lateralverteilung lässt sich im Detail mit den experimentellen Messungen vergleichen [Neh08]. Dabei kommt es in den Simulationen systematisch zu steileren Lateralverteilungen, als im Experiment gemessen. Ein großer Vorteil der

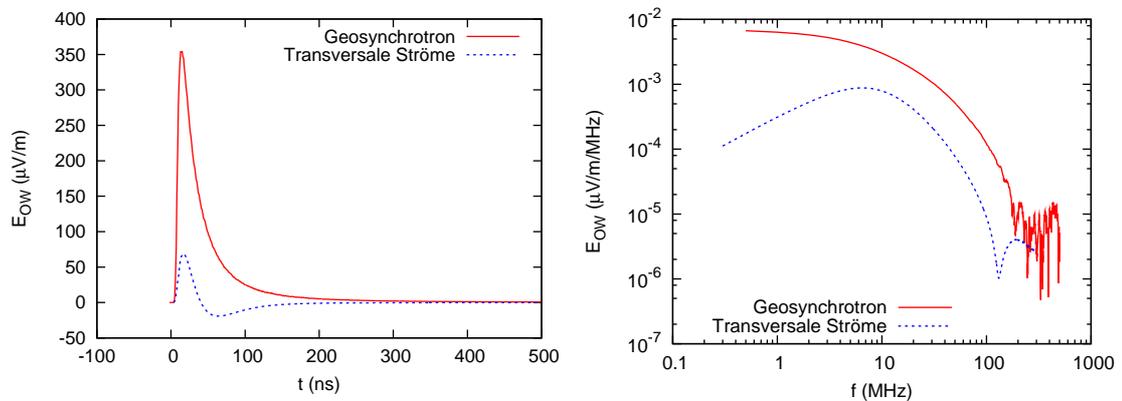


Abbildung 3.2: Vergleich der berechneten Pulsformen eines Schauers für das Geosynchrotronmodell und das Modell der transversalen Ströme. Die Spektren besitzen im Frequenzbereich von LOPES (40-80 MHz) eine sehr ähnliche Form [Bui09].

mikroskopischen Beschreibung ist die Möglichkeit, auch die elektrischen Felder in der Atmosphäre auf mikroskopischer Ebene berücksichtigen zu können.

Letzten Endes sollte es mit beiden Ansätzen gelingen, eine korrekte Beschreibung der Radioemission zu liefern. Voraussetzung dafür ist jedoch die vollständige Berücksichtigung aller Effekte. Unterschiede in den beiden Beschreibungen sollten dann ausschließlich Auswirkungen der angewendeten Näherungen sein. Zur detaillierten Betrachtung sind zusätzlich der durch den Čerenkov-Effekt der negativen Überschussladung beigetragene Anteil sowie Beiträge durch weitere Effekte, wie die Änderung des Brechungsindex der Luft in Abhängigkeit der Höhe, zu berücksichtigen.

3.3 Berücksichtigung elektrischer Felder im Geosynchrotronmodell

Elektrische Felder in der Atmosphäre führen zu zusätzlichen Kräften auf die geladenen Teilchen eines Luftschaers. Sie lassen sich durch zusätzliche Ströme im makroskopischen Modell beziehungsweise durch geänderte Bahnkurven im mikroskopischen Modell berücksichtigen. Hinzu kommt, dass die Ionisationselektronen durch die elektrischen Felder beschleunigt werden. Auch das führt zu einer Emission im Radiobereich, die jedoch nicht vorwärtsgerichtet ist (Abbildung 3.3) [Tom74]. Die Strahlungscharakteristik hängt dabei von der Geometrie der Stromdichte ab, kann in erster Näherung jedoch als dipolförmig angenommen werden. Bei sehr starken Feldern kann der Energiegewinn den Verlust sogar übersteigen. In diesem Fall kommt es zu einem *Runaway Breakdown* genannten Prozess, der ebenfalls Quelle intensiver Radiostrahlung ist (Abschnitt 4.4.4).

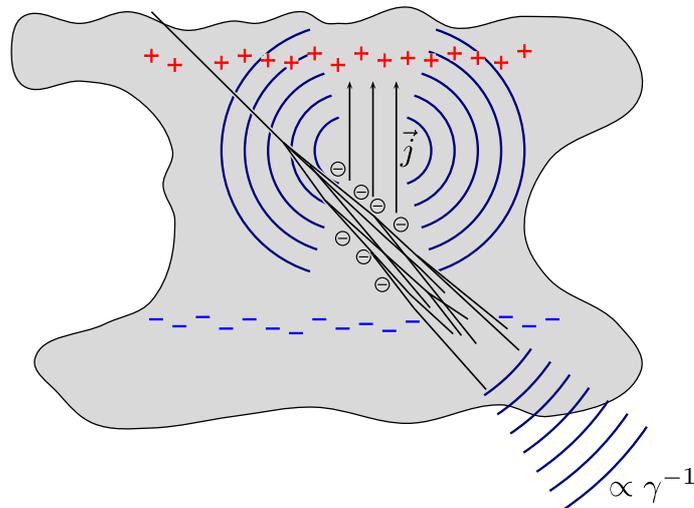


Abbildung 3.3: Veranschaulichung der Strahlungscharakteristik des Geosynchrotroneffekts mit dem zusätzlichen Strahlungsbeitrag durch die erzeugten Ionisationselektronen in einer Region hoher Feldstärke, wie zum Beispiel einer Gewitterwolke. Die Stromdichte \vec{j} führt in erster Näherung zu einer dipolartigen Abstrahlung.

Betrachtet man den Einfluss des elektrischen Feldes auf die Trajektorien eines Elektron-Positron-Paares, so hängt die Auswirkung im beobachteten Radiosignal stark von der Orientierung der Schauerachse relativ zum elektrischen Feld ab (Abbildung 3.4). Ein elektrisches Feld senkrecht zur Schauerachse wirkt sich gleichermaßen auf beide Ladungskomponenten aus. Eine stärkere Krümmung der Bahnkurven führt zu erhöhten Strahlungsverlusten, aber gleichzeitig überstreicht auch der Strahlungs-

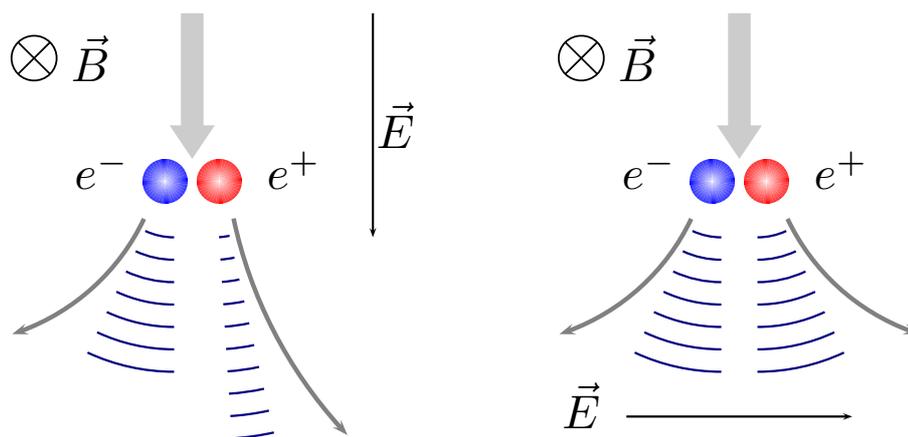


Abbildung 3.4: Veranschaulichung des Einflusses der unterschiedlichen Orientierungen des elektrischen Feldes auf die Radioemission eines Elektron-Positron-Paares.

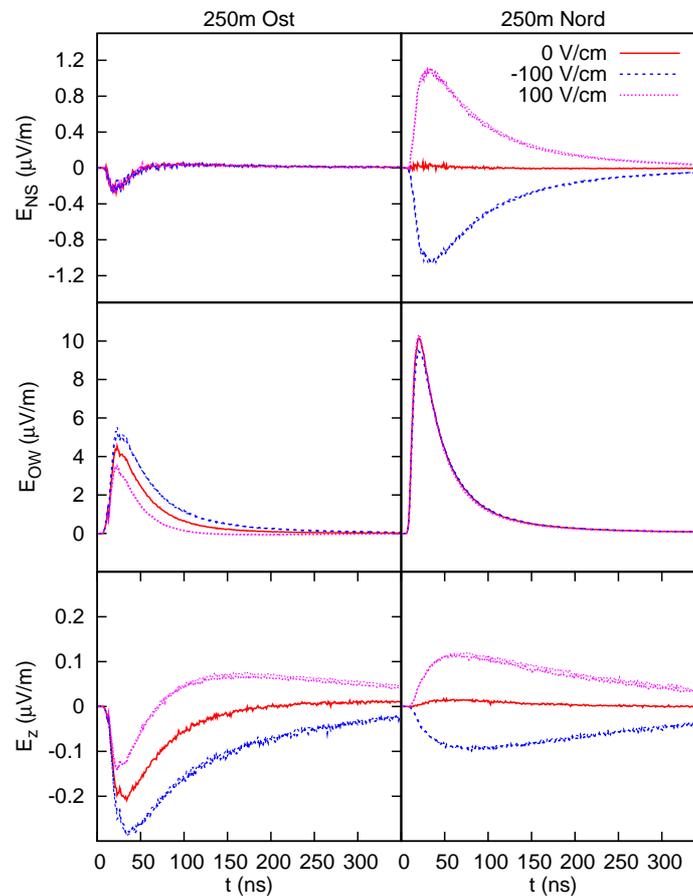


Abbildung 3.5: REAS-Simulation zum Einfluss eines homogenen elektrischen Feldes auf die Radioemission. Abgebildet ist der simulierte Radiopuls eines vertikalen 10^{16} eV Luftschauers an zwei Positionen in einer Entfernung von 250 m zum Schau-erzentrum auf Meereshöhe. Die Feldstärke beträgt $\pm 100 \text{ Vcm}^{-1}$, wobei für die Simulation das magnetische Feld von Karlsruhe berücksichtigt wurde. Zu beachten sind die unterschiedlichen Skalierungen der Feldstärke [Bui09].

kegel eine größere Fläche am Boden. Ist das elektrische Feld parallel zur Schauerachse orientiert, so wirkt es sich unterschiedlich auf beide Ladungskomponenten aus. Die verstärkte beziehungsweise abgeschwächte Emission einer der Ladungskomponenten kann auch in diesem Fall eine Verstärkung beziehungsweise Abschwächung der beobachteten Pulse zur Folge haben.

In Monte-Carlo-Simulationen mit REAS2 (**R**adio **E**mission from **A**ir **S**howers) [Hue07], einem auf CORSIKA (**C**osmic **R**ay **S**imulations for **K**ASCADE) [Hec98] aufbauenden, mikroskopisch rechnendem Programm, zur Simulation der Radioemission von Luftschauern, wurden homogene elektrische Felder verschiedener Stärke be-

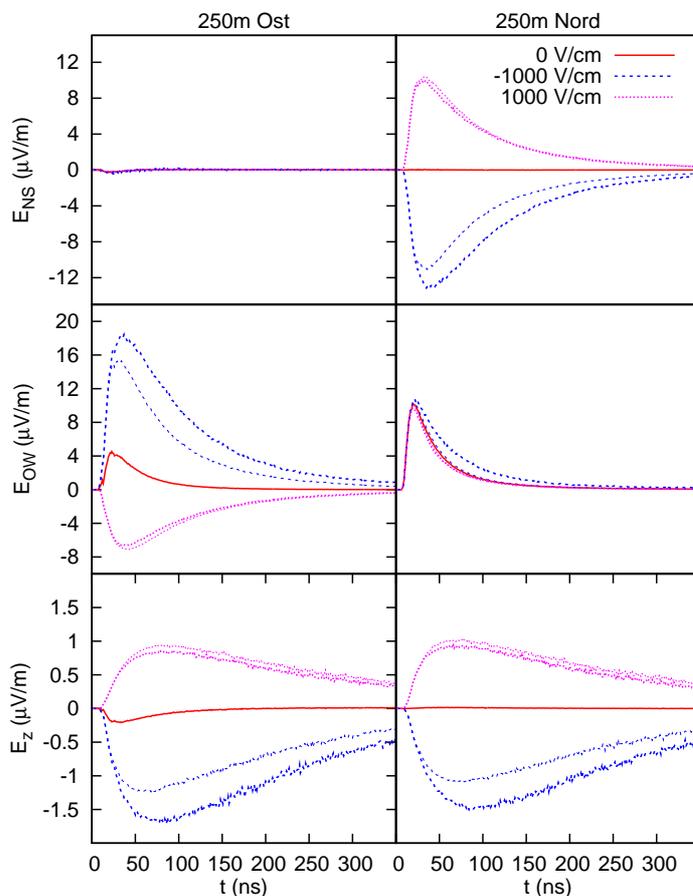


Abbildung 3.6: Wie Abbildung 3.5, jedoch für eine Feldstärke von $\pm 1000 \text{ V cm}^{-1}$ [Bui09].

rücksichtigt [Bui09]. Je nach Stärke des elektrischen Feldes und Richtung relativ zum Luftschauer wurden sowohl verstärkende als auch abschwächende Effekte beobachtet (Abbildung 3.5 und 3.6). Auch Polarisationskomponenten, die durch die Geometrie mittels eines rein geomagnetischen Emissionsprozesses nicht erklärt werden können, treten in den Simulationen auf und sind somit ein deutlicher Hinweis auf den Einfluss der elektrischen Felder.

Auch wenn durch Simulationen grundsätzlich gezeigt werden konnte [Bui09], dass sowohl Verstärkung als auch Abschwächung in einem homogenen elektrischen Feld auftreten kann, ist einer der nächsten notwendigen Schritte die Untersuchung des Effekts inhomogener elektrischer Felder und der Einfluss der Polaritätsänderung des Feldes, wie sie in Gewitterwolken auftritt. Dadurch tritt allerdings eine zusätzliche Abhängigkeit von dem Entwicklungsstadium des Luftschauers auf, die den Vergleich

mit experimentellen Daten erschwert.

4 Atmosphärische Elektrizität

Um den Einfluss elektrischer Felder auf die Radioemission der Luftschaue unter-
suchen zu können, ist zunächst ein grundlegendes Verständnis der atmosphärischen
Elektrizität notwendig. Vor allem das Auftreten sehr starker Felder in Gewitterwolken
und die mit Gewittern verbundenen Radiosignale als zusätzliche Untergrundquelle
sind von Bedeutung.

4.1 Struktur und Entstehung elektrischer Felder in Gewitterwolken

Grundvoraussetzung für die räumliche Trennung großer Ladungsmengen in der At-
mosphäre sind starke vertikale Luftbewegungen. Steigt warme, feuchte Luft auf, so
kühlt sie auf Grund des sinkenden Luftdrucks um ungefähr ein Grad je hundert Me-
ter ab (trockenadiabatischer Aufstieg). Hat die Temperatur der aufsteigenden feuch-
ten Luft den Taupunkt erreicht, so fängt das Wasser an zu kondensieren. Durch
die frei werdende latente Wärme verlangsamt sich die Abkühlung der aufsteigen-
den Luftschichten. Sie nimmt dann nur noch um $0,65^{\circ}\text{C}$ je hundert Meter ab. Sinkt
die Temperatur der umgebenden Luftschichten schneller mit der Höhe, so bildet der
feuchtadiabatische Aufstieg einen effizienten Antriebsmechanismus, da die Tempera-
turdifferenz zwischen den Luftmassen stetig ansteigt.

Der Aufstieg der warmen, feuchten Luft kann bei geeigneter Schichtung der At-
mosphäre in große Höhen vordringen. Erst wenn der Temperaturgradient der Atmo-
sphäre wieder abnimmt, stellt sich ein Gleichgewicht ein. Dies findet in der Regel
in der Nähe der Tropopause statt, die im Sommer in einer Höhe von etwa 12 km
liegt. Sie stellt die Grenzschicht zwischen der Troposphäre und der Stratosphäre dar.
Dieser Aufstiegseffekt der warmen, feuchten Luft führt zur typischen Säulenform der
Gewitterwolken (Cumulonimbus). Manchmal kommt es zur Ausbildung eines so ge-
nannten Amboss, einer Verbreiterung der Wolke in der oberen Region (Abbildung
4.1). Dieses Phänomen kennzeichnet das Erreichen der Gleichgewichtsbedingung.

Die starken Aufwinde tragen kleine Wassertröpfchen in den oberen Teil der Wolke,
wo diese gefrieren und weiter anwachsen. Haben die Eispartikel eine gewisse Größe
erreicht, sind sie ausreichend schwer, um trotz Aufwind Richtung Erde zu fallen.
Dabei kollidieren sie mit leichteren Eiskristallen, die sich nach oben bewegen. Die
kleineren Eiskristalle übertragen bei den Kollisionen eine elektrische Ladung auf die

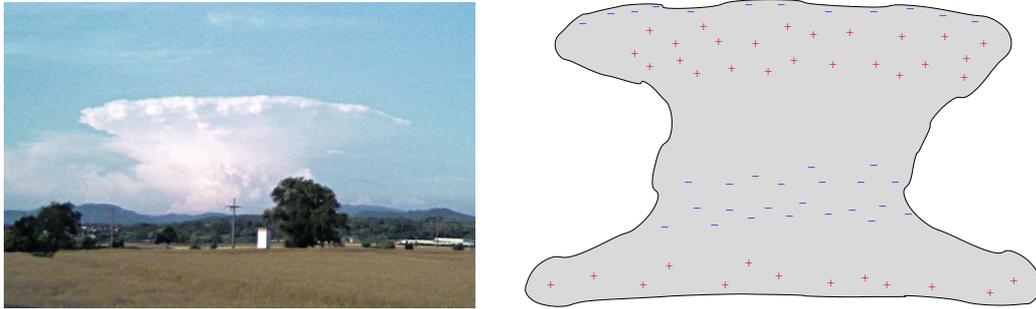


Abbildung 4.1: Typische Ambossform einer Gewitterwolke, die sich beim Erreichen der Tropopause ausbildet (links). Schematische Ladungsverteilung innerhalb einer isolierten Gewitterzelle (rechts). Die vertikale Ausdehnung des gesamten Systems reicht typischerweise von der Wolkengrenze in etwa 4 km Höhe bis zum Beginn der Tropopause in ungefähr 12 km Höhe.

Graupelkörner. Das Vorzeichen des Ladungsübertrags hängt hauptsächlich von der Temperatur ab. In Luftschichten kälter als -20°C geben die Eiskristalle negative Ladung an den Graupel ab, in wärmeren Luftschichten laden sich die Eiskristalle negativ auf (Abbildung 4.2).

Die nach dem Stoß positiv geladenen leichten Eiskristalle bewegen sich in den Aufwinden weiter nach oben. Das führt zu einer starken räumlichen Ladungstrennung, die zunächst einen Dipol hervorruft. Dieser besitzt eine Region negativer Ladung im unteren sowie eine positive Raumladung im oberen Bereich der Wolke. Hinzu kommen Influenzladungen an der oberen Wolkengrenze sowie eine zusätzliche Ladungsschicht im unteren Bereich der Wolke, deren Ursprung noch nicht eindeutig geklärt ist. Im einfachsten Modell führt dies zu vier Ladungsschichten (Abbildung 4.1) mit jeweils

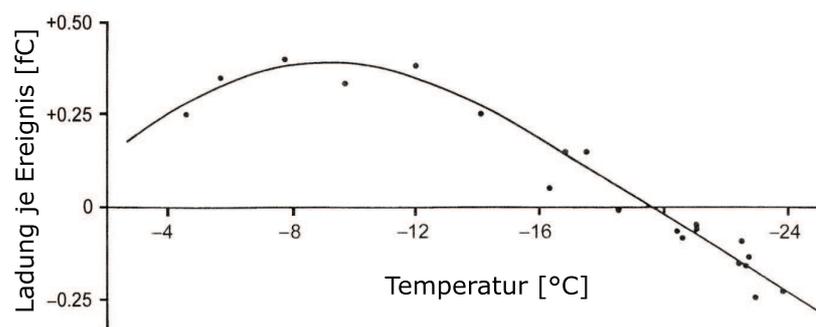


Abbildung 4.2: Die Abbildung zeigt die Ladungsmenge, die an ein Hagelkorn abgegeben wird, als Funktion der Temperatur. Das durch eine vereiste Elektrode dargestellte Hagelkorn wurde von etwa $50\ \mu\text{m}$ großen Eiskristallen mit einer Geschwindigkeit von $2,9\ \text{ms}^{-1}$ getroffen [Rak03].

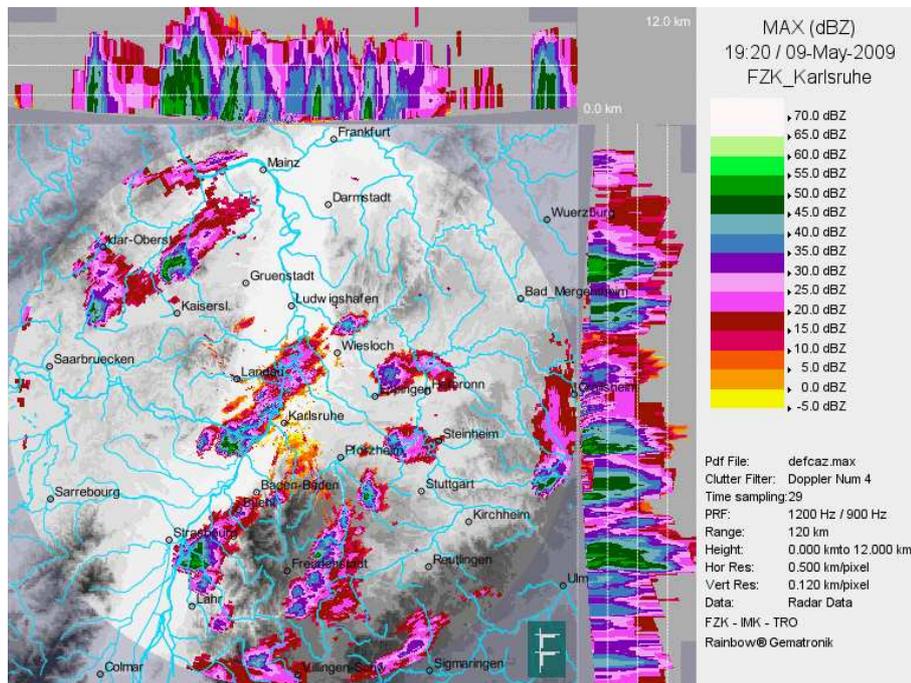


Abbildung 4.3: Reflektivität der Region um Karlsruhe mit mehreren einzelnen Gewitterzellen. Karlsruhe befindet sich im Zentrum der Karte (Standort des Radars), wobei die Reichweite des Radars durch den helleren Kreis angedeutet ist. Die Reflektivität nimmt von gelb zu grün zu. Die Gewitterzellen sind als Regionen hoher Reflektivität und großer vertikaler Ausdehnung zu erkennen [Gys].

wechselnder Polarität. In den mittleren Ladungsregionen liegt die Ladungsmenge in der Größenordnung mehrerer zehn Coulomb, die untere positive Ladungsschicht trägt typischerweise eine Ladung einiger weniger Coulomb. Die experimentellen Ergebnisse stimmen jedoch nicht immer mit diesem Modell überein. Bei Ballonmessungen in größeren Gewittersystemen wurden teilweise deutlich mehr Ladungsschichten gemessen [Rak03].

4.2 Arten von Gewittersystemen

Die einfachste Form eines Gewittersystems ist eine isolierte Gewitterzelle. Sie entsteht durch den in Abschnitt 4.1 beschriebenen Konvektionsprozess. Ihre Lebensdauer liegt in der Größenordnung einer halben Stunde und die verursachten Gewitter sind eher schwach. Isolierte Gewitterzellen (Abbildung 4.3) treten in der Region Karlsruhe recht häufig auf.

Größere Gewittersysteme bestehen aus mehreren Zellen, die sich gegenseitig beeinflussen und in der Regel verschiedene Entwicklungsstadien haben. Sind die Zellen

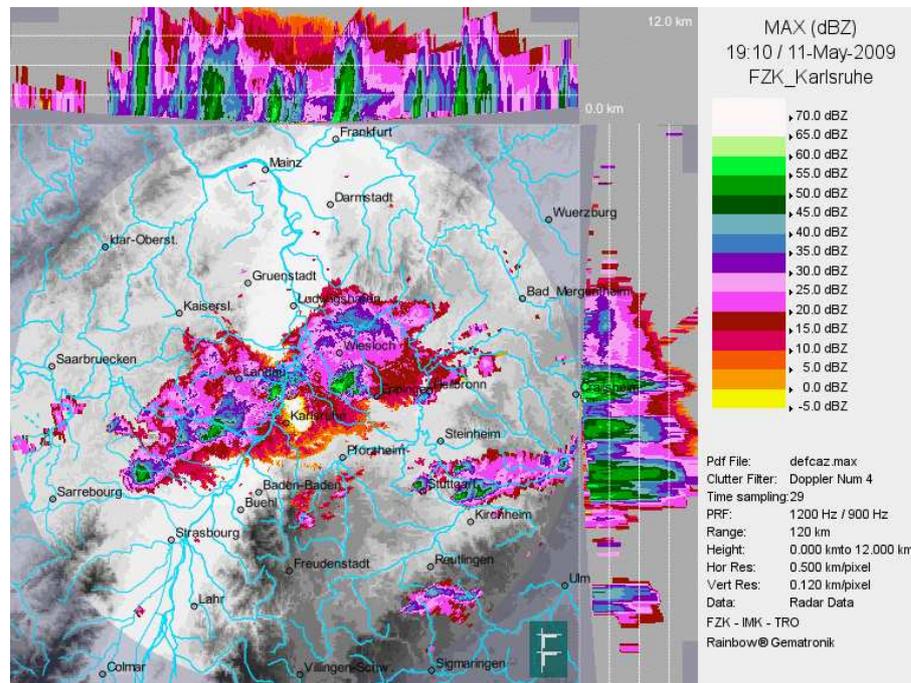


Abbildung 4.4: Reflektivität der Region um Karlsruhe. Zu sehen ist eine Gewitterfront mit einer Breite von etwa 120 km aus vielen Einzelzellen, die ständig neu entstehen [Gys].

in einer Linie angeordnet, wird dieses System als Gewitterfront bezeichnet (Abbildung 4.4). Diese kann sehr große Ausdehnungen erreichen und hat Lebensdauern von mehreren Stunden. Die Erzeugung neuer Gewitterzellen in der Front wird durch die abkühlende Luft unterhalb des Gewitters verursacht, die sich auf Grund der höheren Dichte unter die warmen Luftmassen vor der Front schiebt. Das Anheben der warmen Luftmassen leitet die Entstehung einer neuen Gewitterzelle ein. Dieser Prozess hält an, solange die atmosphärischen Bedingungen vor der Front die Voraussetzungen zur Bildung neuer Gewitterzellen erfüllen, der vertikale Temperaturgradient und die Luftfeuchtigkeit also bestimmte Werte aufweisen.

Sind die Gewitterzellen in einem mehr oder weniger stark lokalisiertem Bereich angeordnet, so spricht man von einem Cluster, der ebenfalls eine deutlich höhere Lebensdauer hat. Je nach Größe unterscheidet man zwischen einem mesoskaligem konvektiven System (MCS), einem mesoskaligem konvektiven Cluster (MCC) oder einem mesoskaligem konvektiven Wirbel (MCV), wenn die Ausdehnung groß genug ist, dass die durch die Erdrotation verursachte Corioliskraft einen Einfluss auf die Bewegung der Luftmassen hat. Unter geeigneten klimatischen Bedingungen kann sich aus einem solchen Wirbel ein Hurrikan entwickeln. Mesoskalig heißt in diesem Zusammenhang, dass sich die Prozesse auf mittleren räumlichen Skalen von ungefähr

5 km bis einigen hundert Kilometern abspielen.

Manchmal bilden sich so genannte Superzellen aus. Das sind einzelne Gewitterzellen, deren Aufwindbereich eine stabile Rotation aufweist. Diese Superzellen können ebenfalls in Multizellen oder Cluster eingebettet sein und sind Ursprung besonders heftiger Wetterphänomene. Dazu gehören Fallwinde, Hagel mit einer Korngröße über 4 cm und Tornados.

4.3 Messmethoden der Ladungsverteilung

Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten, elektrische Felder in Gewitterwolken zu messen, um daraus Rückschlüsse auf die Ladungsverteilung in der Wolke zu ziehen. Zum einen können Messungen des elektrischen Feldes im Inneren der Wolke durchgeführt werden, wofür Wetterballone oder Raketen verwendet werden. Zum anderen kann man aus der räumlichen und zeitlichen Variation des elektrischen Feldes am Erdboden die Ladungsverteilung in der Wolke ableiten.

Ballonmessungen sind ein beliebtes Mittel der Wetterforschung. Ein klarer Vorteil ist neben der Information über das elektrische Feld in Abhängigkeit der Höhe auch die zusätzliche Information über Temperatur und Luftfeuchtigkeit (Abbildung 4.5). Außerdem können auch die Geschwindigkeiten der Auf- und Abwinde abgeschätzt werden, auch wenn sich die beobachteten Effekte nicht immer von einer Änderung des Gesamtgewichts des Ballones durch Eisablagerungen trennen lassen. Nachteilig wirkt sich jedoch die Tatsache aus, dass die Dauer für einen kompletten Ballonaufstieg durch ein Gewittersystem in derselben Größenordnung liegt wie die Zeitskala, in der wichtige Änderungen in der Entwicklung des Systems stattfinden. Somit lassen sich beobachtete Änderungen unter Umständen nicht zweifelsfrei der räumlichen oder der zeitlichen Entwicklung zuordnen [Sto98c].

Mit Feldmühlen durchgeführte, bodengebundene Messungen der vertikalen elektrischen Feldstärke in verschiedenen Entfernungen der Wolke lassen ebenfalls Rückschlüsse auf die Ladungsstruktur der Wolke zu. Im einfachsten Modell wird dazu von einem ebenen Erdboden ausgegangen, der als idealer Leiter angenommen wird. Das elektrische Feld in Bodennähe verläuft dann immer senkrecht zum Boden. Durch Positionierung virtueller Spiegelladungen kann das elektrische Feld am Boden in verschiedenen Entfernungen zur Wolkenachse berechnet werden (Abbildung 4.6). Direkt unter der Wolke dominiert die unterste Ladungsschicht. Mit wachsender Entfernung überwiegt jeweils die nächsthöhere Ladungsregion. So kann aus der räumlichen Struktur des Feldes am Boden die Ladungsverteilung der Wolke abgeleitet werden. Alternativ zur gleichzeitigen Messung mit mehreren Feldmühlen kann die zeitliche Änderung des Feldes an einer festen Position analysiert werden, während die Wolke darüber wegzieht. Dabei ist natürlich der minimale Abstand zur Wolkenachse zu berücksichtigen [Rak03]. Bei diesem Verfahren wird jedoch auch die typische Zeitskala

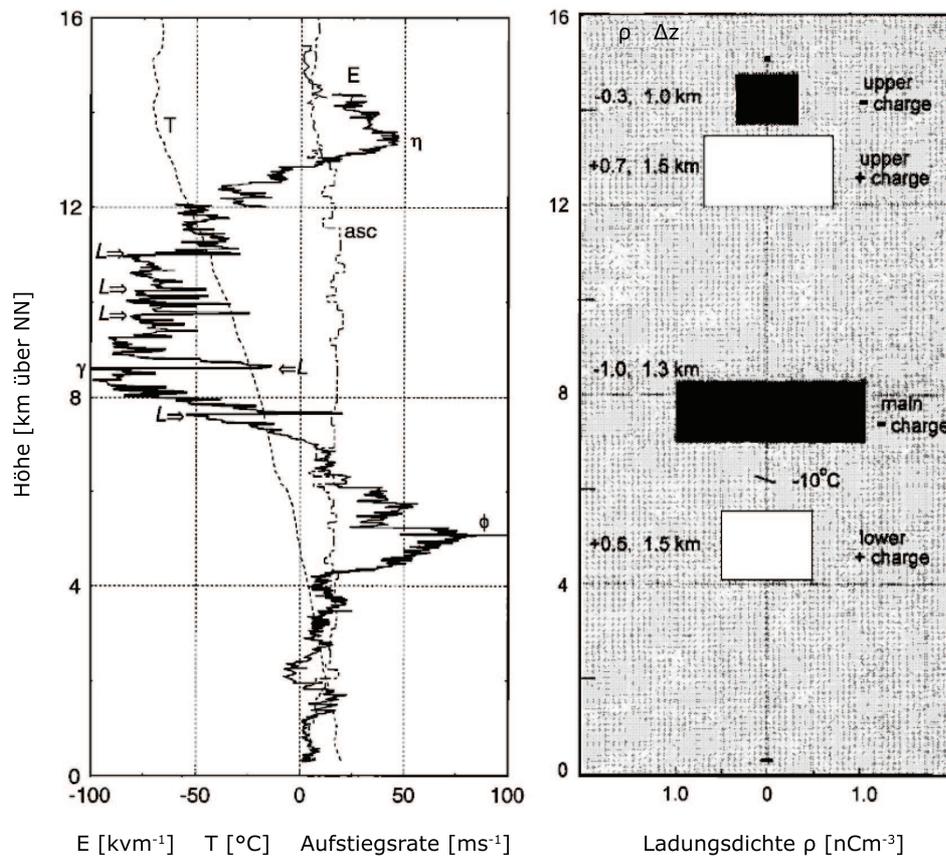


Abbildung 4.5: Messung des vertikalen elektrischen Feldes während eines Ballonaufstiegs im konvektiven Bereich eines MCS (links). Die Änderungen der Ladungsverteilungen durch Blitze sind im elektrischen Feld als horizontale Sprünge zu sehen, von denen einige mit einem L markiert sind. Die Maximalwerte der Feldstärke sind mit ϕ , γ und η gekennzeichnet. Aus dem Verlauf des Feldes lässt sich mit einigen Annahmen die Ladungsstruktur der Wolke ableiten (rechts) (nach [Sto98c]).

der Vorgänge in der Gewitterwolke zum Problem. Sie liegt in derselben Größenordnung wie die von der Wolke benötigte Zeit, den Beobachtungspunkt zu passieren.

Insgesamt ergeben die Messungen noch kein konsistentes Bild. Die bodengebundenen Messungen deuten auf eine tripolare Ladungsstruktur hin, wohingegen Messungen mit Ballonaufstiegen eine zusätzliche negative Ladungsschicht an der oberen Wolkengrenze ergeben. Diese kann als Abschirmladung gesehen werden und ist auch mit den bodengebundenen Messungen verträglich, da ihre Gesamtladung deutlich geringer ist. Über das Zustandekommen der untersten positiven Ladungsschicht herrscht noch kein Konsens. Ballonmessungen außerhalb des konvektiven Be-

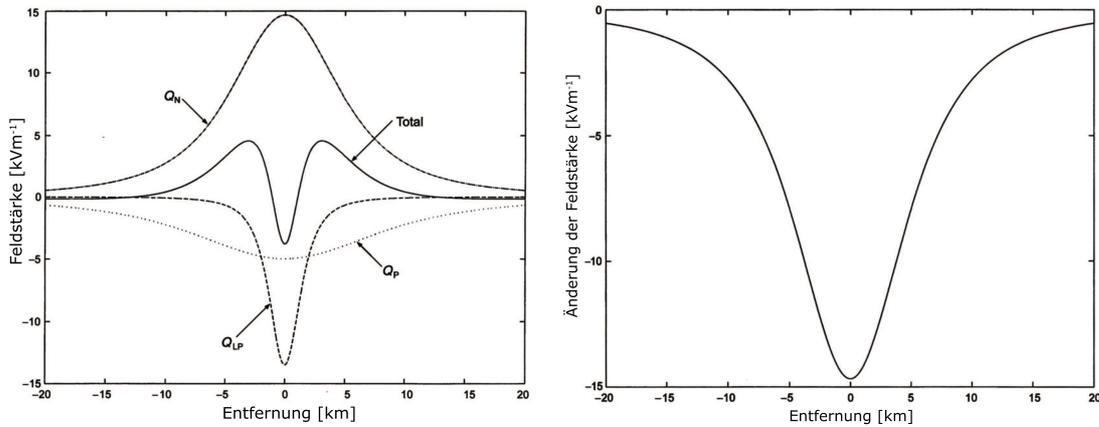


Abbildung 4.6: Messung des vertikalen elektrischen Feldes am Boden in verschiedenen Entfernungen (links) lassen Rückschlüsse auf die Ladungsstruktur der Wolke zu. Zusätzlich lässt der Vergleich der Feldstärkenänderungen bei einem Blitz in verschiedenen Entfernungen Rückschlüsse auf die Art des Blitzes zu. Abgebildet ist die gemessene Änderung der Feldstärke auf Grund der kompletten Entfernung der negativen Ladungsregion (rechts) (nach [Rak03]).

reichs eines MCS ergaben sechs und mehr Ladungsschichten (Abbildung 4.7).

Die Ladungsverteilungen können sich von System zu System deutlich unterscheiden. Bei dem Zusammenspiel mehrerer konvektiver Zellen kann es zu einer Vielzahl verschiedener Ladungsverteilungen kommen. Eine Messung der Ladungsverteilung in Gewittersystemen lässt sich nur mit recht großem Aufwand anhand mehrerer Bal-

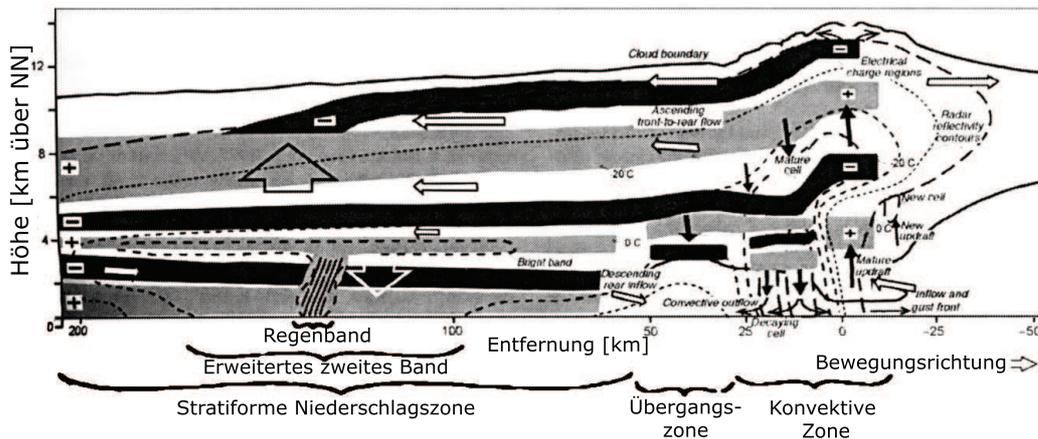


Abbildung 4.7: Ladungsverteilung in einem mesoskaligem konvektiven System (nach [Sto98c]).

lonaufstiege, bodengebundener Messungen des elektrischen Feldes sowie Radarmessungen zur Erfassung der Konvektionen durchführen. Deshalb sind die momentanen Felder in der Atmosphäre, die die Messung der Luftschauee beeinflussen können, in der Regel nicht bekannt. Die bodengebundenen Messungen können jedoch als Basis für eine Abschätzung der aktuellen atmosphärischen Bedingungen dienen und liefern somit einen wichtigen Beitrag zur Überwachung der Atmosphäre.

4.4 Blitze

4.4.1 Ursprung der Blitze

Der grundlegende Mechanismus der Ladungstrennung in Gewitterzellen wurde in Abschnitt 4.1 beschrieben. Die großen Ladungsmengen, die dabei räumlich voneinander getrennt werden, sind die Ursache der Entladungen, die man als Blitze sehen und als Donner hören kann.

In Ballonaufstiegsmessungen wurden Feldstärken von teilweise mehr als 100 kVm^{-1} gemessen. Diese Feldstärken reichen jedoch bei weitem noch nicht für eine gewöhnliche Funkenentladung aus. Diese tritt unter normalen atmosphärischen Bedingungen auf, wenn eine Feldstärke von ungefähr 3 MVm^{-1} überschritten wird. Dann erreicht ein freies Elektron ausreichend Energie, um durch Stoßionisation weitere freie Elektronen zu erzeugen. Wenn die Ionisationsrate die Rekombinationsrate übersteigt, kommt es zum Durchschlag des Funkens. Obwohl der mit der Höhe abnehmende Luftdruck sowie die hohe Luftfeuchtigkeit die notwendige Feldstärke herabsetzen, reichen die gemessenen Felder in Gewitterwolken nicht aus, um die Entladung auf herkömmliche Weise in Gang zu bringen. Eine wichtige Rolle bei der Ausbildung eines Blitzes könnte eine relativistische Form des Lawinendurchbruchs sein, der Runaway Breakdown genannt wird (siehe Abschnitt 4.4.4).

4.4.2 Verschiedene Blitzarten

Grundsätzlich können mehrere Arten von Blitzen unterschieden werden, charakterisiert durch ihren Anfangs- und Endpunkt. Eine schematische Übersicht der häufigsten Blitztypen ist in Abbildung 4.8 zu sehen.

Die häufigste Form der Blitze findet zwischen zwei unterschiedlich geladenen Regionen derselben Wolke statt (*Intra-Cloud*, IC). Der Blitzkanal ist dann meistens nicht direkt zu sehen, sondern macht sich durch ein Leuchten großer Teile der Wolke bemerkbar. Durch die veränderte Ladungsverteilung innerhalb der Wolke, ändert sich auch das vertikale elektrische Feld am Boden.

Besteht das Gewittersystem nicht aus einer einzelnen Gewitterzelle, sondern aus einem Zusammenschluss mehrerer, so kann die Entladung auch zwischen unterschied-

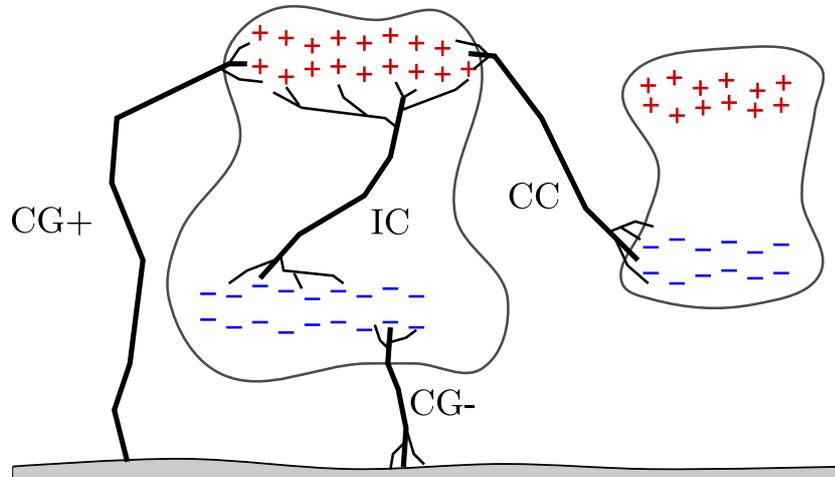


Abbildung 4.8: Veranschaulichung der häufigsten Blitztypen. Dabei steht IC für Blitze innerhalb einer Wolke, CC für Blitze von einer Wolke zu einer anderen und CG für Blitze von der Wolke zum Boden. Letztere treten in zwei Erscheinungsformen auf, entweder von der positiven Ladungsregion aus (CG+) oder von der negativen (CG-).

lich geladenen Regionen zweier Gewitterzellen stattfinden (*Cloud to cloud*, CC). Blitze zwischen den Wolken können sich über große Entfernungen erstrecken, wobei der Blitzkanal oft gut zu sehen ist.

Der am besten beobachtbare und auch beeindruckendste Blitztyp ist die Entladung zwischen einer Wolke und der Erde (*Cloud to ground*, CG). Dabei müssen zwei Unterarten unterschieden werden. Der negative Wolke-Boden-Blitz (CG-) startet in der negativen Ladungsregion der Wolke und endet am Boden, wobei es sehr häufig zu Verzweigungen in Bodennähe kommt. Diese werden durch das Entgegenkommen mehrerer Blitze vom Boden aus verursacht, die in der Regel von erhöhten Gegenständen aus entspringen. Seltener kommt es zu einer Entladung, die im oberen, positiven Bereich der Wolke startet und im Boden endet (CG+). Diese bestehen im Normalfall aus nur einem Entladungskanal, der keine Verzweigungen in Bodennähe aufweist. Sie können in großer Distanz zur Wolke einschlagen und sind eine Möglichkeit eines Blitzes ohne erkennbarem Gewitter, auch als „Blitz aus dem Blauen“ bekannt. Wodurch genau eine solche Entladung verursacht wird, ist noch nicht geklärt.

Der grundsätzliche Ablauf der Entwicklung eines Blitzes wird anhand eines negativen Wolke-Boden-Blitzes näher beleuchtet. Die einzelnen Schritte der Blitz-Entwicklung sind in Abbildung 4.9 dargestellt.

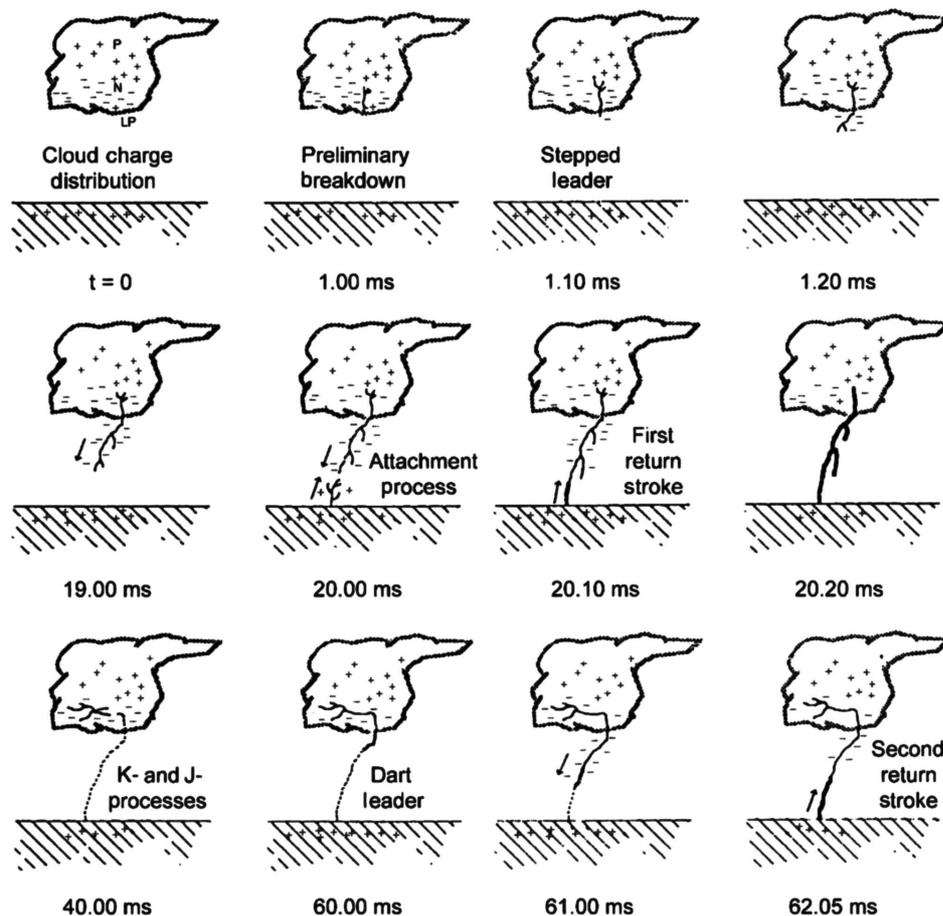


Abbildung 4.9: Schrittweiser Ablauf eines CG-Blitzes [Rak03]

4.4.3 Ablauf eines negativen Wolke-Boden-Blitzes

Die Entwicklung des Blitzes (Abbildung 4.9) beginnt mit Entladungen innerhalb der Wolke (*preliminary breakdown* oder *initial breakdown*), die zu einer Umverteilung der Ladung führen und dadurch den nächsten Schritt ermöglichen. Über den genauen Prozess dieser Anfangsentladungen besteht keine Einigkeit. Wahrscheinlich wird die untere positive Ladungsschicht dabei neutralisiert.

Anschließend entwickelt sich ein so genannter *stepped leader*. Dabei kommt es zur Ausbildung negativ geladener Ionisationskanäle, die sich stufenweise in Richtung Boden fortpflanzen. Jedes Segment hat dabei eine Länge in der Größenordnung von zehn Metern. Auf diese Weise bildet sich ein leitfähiger Kanal zwischen der negativen Ladungsregion in der Wolke und dem Boden aus.

Kurz bevor der Ionisationskanal den Boden erreicht, steigt die Feldstärke am Bo-

Prozess	Pulsdauer	Pulsabstand	Anmerkungen
<i>initial breakdown</i>	20-40 μs	70-130 μs	findet einige Millisekunden vor der ersten Hauptentladung statt
<i>stepped leader</i>	1-2 μs	15-25 μs	findet innerhalb von 200 μs direkt vor der ersten Hauptentladung statt
<i>dart-stepped leader</i>	1-2 μs	6-8 μs	findet innerhalb von 200 μs direkt vor einer Hauptentladung statt
<i>return stroke</i>	30-90 μs	60 ms	Im Mittel 3-5 mal je Blitz

Tabelle 4.1: Übersicht über die wichtigsten Eigenschaften der Stufen in der Entwicklung eines negativen Wolke-Boden Blitzes (nach [Rak03])

den und vor allem an erhöhten Objekten so stark an, dass die Bedingungen zur Zündung einer oder mehrerer weiterer Entladungen erreicht werden. Diese aufsteigenden Entladungen (*upward connecting leaders*) starten vom Boden und schließen sich mit dem Ionisationskanal zusammen (*attachment process*).

Die Verbindung der leitfähigen Kanäle leitet die nächste Entladung ein (*first return stroke*). Dabei fließt die im Plasmakanal deponierte Ladung ab, wobei Stromstärken von mehreren zehntausend Ampere erreicht werden. Das führt zu einer starken Aufheizung der Luft und damit zur Bildung eines leuchtenden Plasmakanals. Die Druckwelle auf Grund des Temperaturanstiegs ist als Donner hörbar.

Da die Gewitterwolke große Ladungsmengen beherbergt, kann es im Anschluss zu einer erneuten Umverteilung der Ladung kommen (J- und K-Prozesse). Dabei wird Ladung aus anderen Teilen der Wolke zum Ursprungsort des Blitzes nachgeführt. Diese Ladung wird dann wieder entlang des ionisierten Kanals verteilt, wobei dieser Vorgang dann kontinuierlich erfolgt (*dart leader*). Grund dafür ist die Existenz des bereits bestehenden Ionisationskanals.

Die Ladung fließt dann in einer zweiten Entladung (*second return stroke*) ab. Dieser Prozess kann sich einige Male wiederholen. Die dabei nacheinander stattfindenden Entladungen sind als Flackern des Blitzes zu sehen. Tabelle 4.1 gibt einige zusätzliche Informationen über die stattfindenden Prozesse [Rak03].

4.4.4 Andere Formen der elektrischen Entladung

Die starken atmosphärischen Felder, die in Gewittern auftreten, können zu einer speziellen Form des elektrischen Durchbruchs führen, dem so genannten *Runaway Breakdown*. Dabei handelt es sich um einen relativistischen Lawineneffekt, der nur in Gegenwart starker elektrischer Felder auftritt. Ermöglicht wird diese Form des Durch-

bruchs durch das Abnehmen des Wirkungsquerschnitts für die Ionisation und damit dem Sinken der Ionisationsverluste mit steigender Energie. Oberhalb einer bestimmten Energie übersteigt der Energiegewinn im elektrischen Feld die Ionisationsverluste (Abbildung 4.10). Die Energie steigt folglich weiter an, wobei eine obere Grenze von einigen hundert MeV erreicht werden kann. Die Energie der durch Stoßionisation freigewordenen Elektronen kann mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit über der Schwelle zum Auftreten des Runaway Breakdowns liegen, womit die Ionisationselektronen selbst zu Saatelektronen werden. Es bildet sich eine exponentiell anwachsende Elektronenlawine in Richtung des elektrischen Feldes aus, wobei diese auf die Region der starken Felder begrenzt ist. Die Leitfähigkeit der Atmosphäre wird in dieser Region durch die zahlreich auftretenden niederenergetischen Ionisationselektronen stark erhöht, was zu einer Umverteilung der Ladung und somit letzten Endes zu einem elektrischen Durchbruch führt [Gur05].

Dieser Mechanismus scheint eine wichtige Rolle in der Blitzentstehung zu spielen. Zu Beginn eines Blitzes tritt immer ein kurzer, bipolarer Radiopuls auf. Sowohl die Amplitude, als auch die Dauer passen zu den berechneten Radiosignalen eines durch Luftschauer ausgelösten Runaway Breakdowns (Abschnitt 6.2) [Gur05], [Dwy09]. Gestützt wird diese Theorie durch Ergebnisse von Ballonmessungen. Diese zeigen, dass die maximal beobachteten Feldstärken erstaunlich nah an der für den Runaway Breakdown vorhergesagten kritischen Feldstärke liegen (Abbildung 4.11). Rechnungen ergeben, dass durch die kosmische Strahlung immer eine ausreichen-

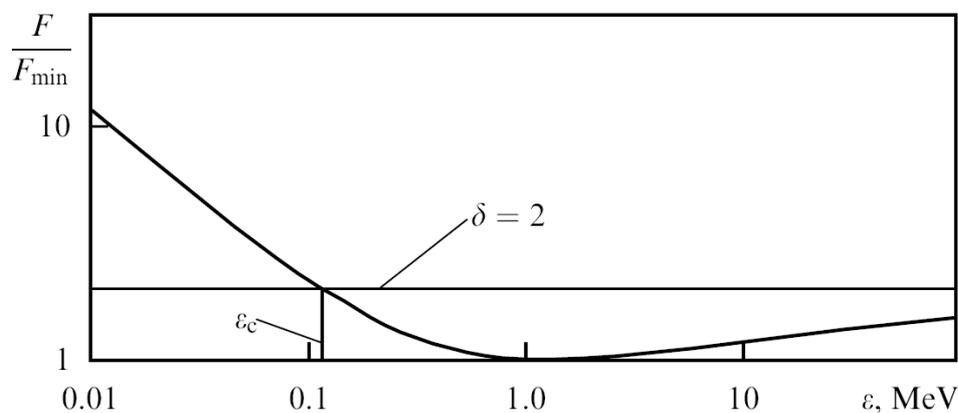


Abbildung 4.10: Die relative Bremskraft F/F_{min} auf Grund von Ionisationsverlusten in Abhängigkeit der Elektronenenergie. Dabei ist F die Bremskraft, die auf ein Elektron der Energie ϵ auf Grund der Ionisationsverluste wirkt, und F_{min} die minimale Bremskraft bei der Energie ϵ_{min} . Der Parameter $\delta = E/E_c$ legt bei einer Feldstärke E die kritische Energie ϵ_c fest, die ein Elektron besitzen muss, um als Saatelektron zu dienen [Gur01].

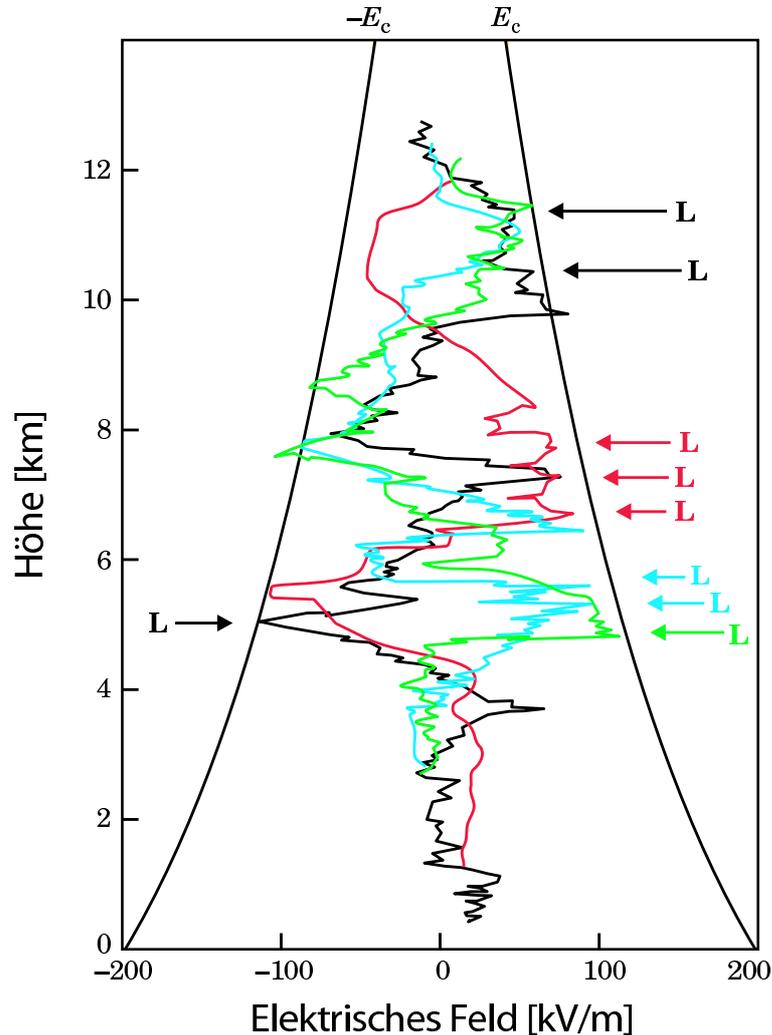


Abbildung 4.11: Vergleich der mit der Höhe abnehmenden kritischen Feldstärke für den Runaway Breakdown E_c (durchgezogene Linien) mit den gemessenen Feldstärken in vier verschiedenen Ballonaufstiegen, die durch unterschiedliche Farben dargestellt sind. Auffällig ist die Korrelation zwischen dem Auftreten eines Blitzes (L) und dem Erreichen der kritischen Feldstärke [Gur05].

de Anzahl an Saatelektronen vorhanden ist. Somit wäre das Erreichen der kritischen Feldstärke die einzige Bedingung zum Auftreten eines Runaway Breakdowns [Gur01].

Außerdem treten während der Ausbildung des Vorblitzes (*stepped leader*) Gammastrahlenausbrüche auf, die sich vom Boden aus detektieren lassen. Die Stärke dieser sehr kurzen Strahlungsausbrüche passt zu der für Runaway Breakdowns simulierten Gammastrahlung und tritt pulsartig während der Ausbildung der einzelnen Stufen des Blitzkanals auf [Bet09], [Chu09]. Dabei treten die Gammastrahlenausbrüche

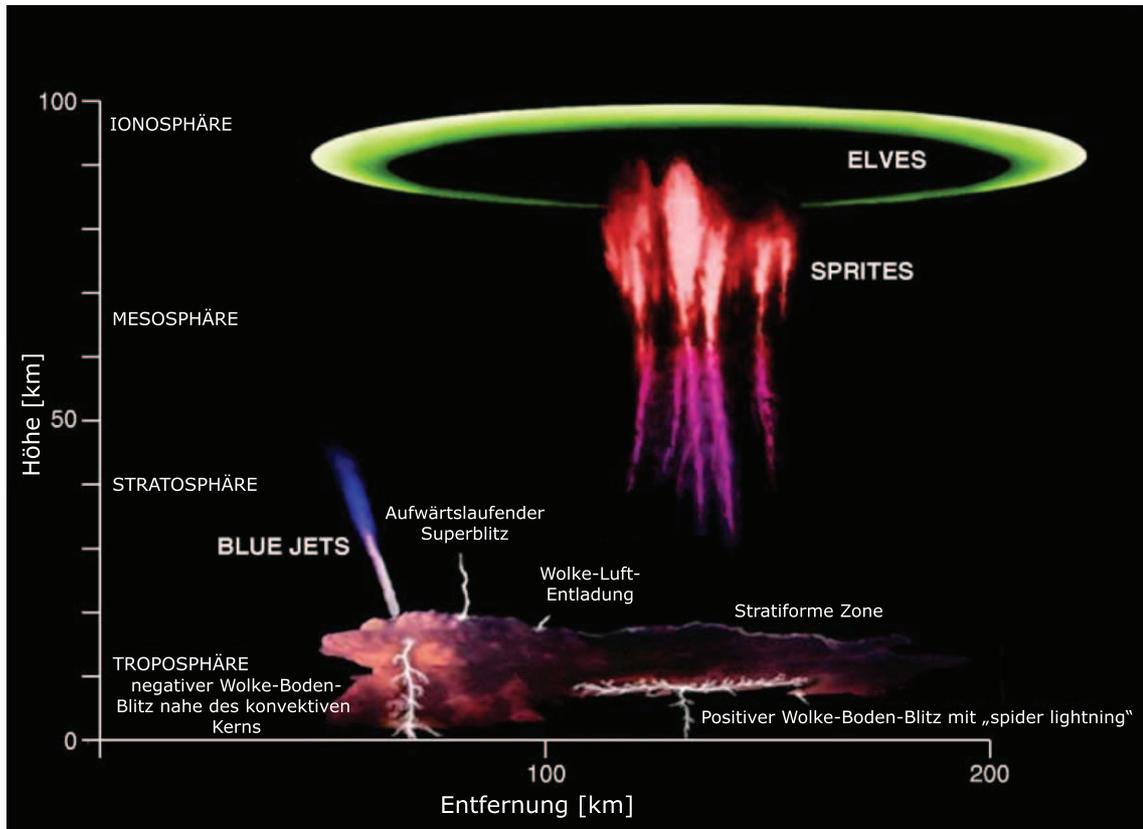


Abbildung 4.12: Darstellung der wichtigsten elektrischen Erscheinungen in der oberen Atmosphäre, die in Zusammenhang mit Gewittern auftreten (nach [NOO]).

gleichzeitig mit den Änderungen im elektrischen Feld auf.

In Verbindung mit Gewittern treten in den oberen Teilen der Atmosphäre noch weitere Erscheinungen auf (Abbildung 4.12), die vermutlich ebenfalls Quellen zusätzlicher Radioemission sind.

In Höhen von ungefähr 100 km über großen Gewittersystemen kann es zu kurzen, typischerweise eine Millisekunde dauernden Leuchterscheinungen kommen, die dabei einen Durchmesser von 400 km aufweisen können. Sie werden als **Elves** (**E**missions of light and **v**ery low frequency perturbations from **e**lectromagnetic pulse **s**ources) bezeichnet. Die Leuchterscheinung entsteht durch Anregung der Stickstoffmoleküle durch Elektronenstöße.

Eine weitere Wettererscheinung tritt häufig in Verbindung mit positiven Wolke-Boden-Blitzen auf. Dabei handelt es sich um großräumige elektrische Entladungen in Höhen von 80 bis 150 km, wobei die rötliche Leuchterscheinung durch ein kaltes Plasma hervorgerufen wird. Es handelt sich also nicht um einen Blitz im herkömmlichen Sinn. Diese Erscheinungen werden als Koblode (*sprites*) bezeichnet und dau-

ern in der Regel wenige Millisekunden. Manchmal werden sie von einer haloartigen Leuchterscheinung begleitet, die auf Grund des ähnlichen Aussehens und der Dauer oft fälschlicherweise für Elves gehalten werden. Durch Satellitenbeobachtung simultan auftretender Grammastrahlenausbrüche wird ein Zusammenhang mit Runaway Breakdowns in der oberen Atmosphäre vermutet [Gur01].

Seltener gehen von den oberen Bereichen der Gewitterwolke Entladungserscheinungen aus, die die Form einer Keule haben und dabei blau leuchten (*blue jets*). Sie können ebenfalls sehr weit in die Ionosphäre reichen, wobei ihre typische Dauer im Bereich von mehreren hundert Millisekunden liegt. Auch sie stehen möglicherweise im Zusammenhang mit aufwärts laufenden Runaway Breakdowns [Sen95], [Rak03].

Mangels zusätzlicher Informationen über das Auftreten dieser noch nicht sehr ausführlich erforschten Ereignisse ist es nicht möglich, Aussagen über Art und Stärke möglicher Störungen zu machen, die in dem Frequenzbereich liegen, der zum Radionachweis von Luftschauern verwendet wird. Wichtig ist jedoch die Erkenntnis, dass sie ausschließlich in Zusammenhang mit starken Gewittern am Boden auftreten.

5 Experimenteller Aufbau

Zur experimentellen Untersuchung der Auswirkungen der atmosphärischen Bedingungen auf die Radioemission der Luftschauber müssen einerseits die Eigenschaften des Luftschauers möglichst genau bekannt sein. Dazu werden sowohl die ankommenden Teilchen als auch die Radioemission gemessen. Andererseits müssen Informationen über die Ladungsverhältnisse in der Atmosphäre vorliegen. Dazu werden zusätzliche Messungen mit einer elektrischen Feldmühle durchgeführt.

5.1 KASCADE und KASCADE-Grande

Das KASCADE-Experiment (**K**arlsruhe **S**hower **C**ore and **A**rray **D**etector) [Ant04] und seine Erweiterung KASCADE-Grande [Nav03] sind Teilchendetektoren, die sowohl die elektromagnetische als auch die myonische Komponente des Teilchenschauers messen. Das ursprüngliche KASCADE-Experiment besteht aus 252 Detektorstationen, die in einem regelmäßigen Gitter mit einem Abstand von 13 m angeordnet sind. Damit wird eine Fläche von $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ abgedeckt. Zusätzlich gibt es den Zentraldetektor, der auch die hadronische Komponente detektiert und mit einem Spurdetektor für Myonen ausgestattet ist, sowie einen zusätzlichen unterirdischen Myon-Spurdetektor.

Der Aufbau des KASCADE-Grande Feldes ist weiter ausgedehnt und besteht aus 37 Stationen. Diese sind in einem Abstand von jeweils ungefähr 130 m in einem hexagonalen Gitter angeordnet und bedecken so eine Fläche von einem halben Quadratkilometer (Abbildung 5.1).

Die für die Analyse der Radiodaten wichtigsten Informationen sind der Zeitpunkt des Luftschauers, die Position des Schauerzentrums am Boden sowie die Einfallrichtung, die aus den Messungen der Teilchendetektoren bestimmt werden. Außerdem wird ein Schätzwert für die Energie des Primärteilchens aus der Elektronen- und Myonenzahl des Luftschauers ermittelt.

5.2 Das LOPES-Experiment

Mit dem in Bau befindlichen Radioteleskop LOFAR (**L**ow **F**requency **A**rray), einem riesigen digitalen Radioteleskop aus vielen tausend einzelnen Antennen, wird neben

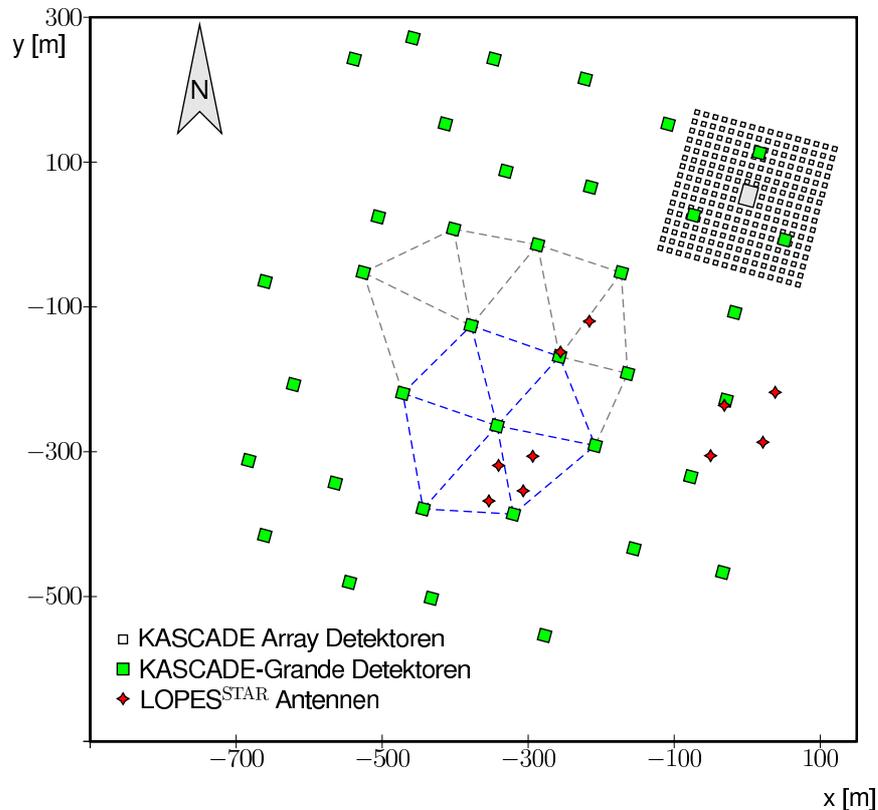


Abbildung 5.1: Anordnung der KASCADE und KASCADE-Grande Stationen. Als Ursprung des Koordinatensystems wird das Zentrum des KASCADE-Arrays verwendet. Die Trigger-Hexagone 9, 10 (grau) und 13 (blau) für LOPES sind durch gestrichelte Linien hervorgehoben. Außerdem sind die Positionen der zehn LOPES^{STAR}-Antennen eingezeichnet.

der Beobachtung astronomischer Ziele auch nach Radiosignalen hochenergetischer Luftschauer gesucht werden. Um die generelle Machbarkeit des Radionachweises von Luftschauern zu demonstrieren, wurde LOPES (**LOFAR prototype station**) mit ursprünglich 10 Antennen gebaut [Fal05]. Später wurde LOPES dann auf 30 Antennen ausgebaut, um den Emissionsprozess genauer zu untersuchen und zu verstehen. LOPES befindet sich auf dem Gelände des Luftschauerexperiments KASCADE im Forschungszentrum Karlsruhe. Dadurch wird eine simultane Messung von Luftschauern ab einer Energie von $5 \cdot 10^{16}$ eV mit beiden Technologien möglich.

LOPES besteht in der jetzigen Konfiguration aus dreißig umgekehrt v-förmigen Dipolantennen mit einer Armlänge von einem Meter, die im Frequenzbereich zwischen 40 und 80 MHz betrieben werden (Abbildung 5.2). Seit Dezember 2006 wird die Hälfte der Antennen in Ost-West-Polarisation und die andere Hälfte in Nord-Süd-Polarisation betrieben, um Studien zur Polarisation des Radiosignals der Luftschauer

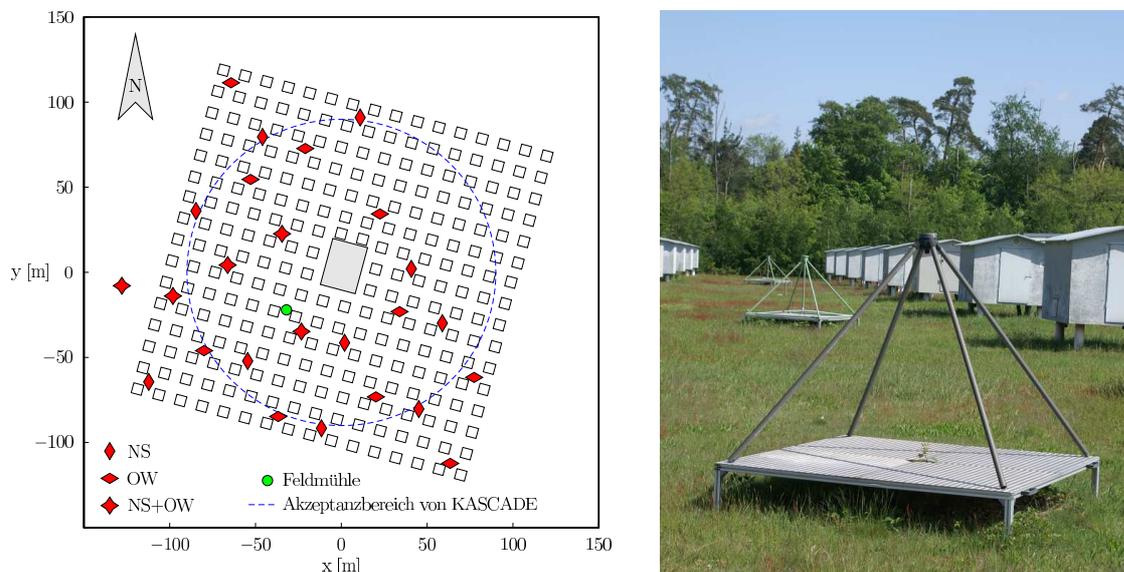


Abbildung 5.2: Die dreißig LOPES-Antennen befinden sich innerhalb des KASCADE-Experiments (links) im Forschungszentrum Karlsruhe. Der gestrichelt umrandete Bereich zeigt das Gebiet an, in dem die Schauerzentren liegen dürfen, damit KASCADE eine verlässliche Rekonstruktion liefert. Die Antennen sind als umgekehrt v-förmige Dipolantennen mit einer Armlänge von einem Meter ausgeführt (rechts).

durchführen zu können.

Außerdem wurde das zu LOPES gehörende Experiment LOPES^{STAR} (**LOPES** self triggered array of radio detectors) [Asc08] gebaut, um die Machbarkeit eines eigenständigen Triggersystems auf Basis der Radiodaten zu demonstrieren. LOPES^{STAR} besteht aus zehn logarithmisch periodischen Dipolantennen, die innerhalb des KASCADE-Grande-Experiments positioniert sind (Abbildung 5.1). Die Daten werden, wie auch bei LOPES, im Frequenzband von 40 bis 80 MHz aufgenommen, wobei hier jede Antenne für beide Polarisationsrichtungen konstruiert ist. Das Triggersystem basiert auf einer Echtzeitanalyse der Daten.

KASCADE stellt für LOPES einen speziellen Trigger für hochenergetische Luftschauer zur Verfügung. Jedes Mal wenn 10 der 16 Detektorgruppen, bestehend aus 4×4 Stationen, getriggert haben, erhält LOPES das Signal zum Auslesen der kontinuierlich in einen Ringpuffer geschriebenen Daten. Diese Auslesebedingung entspricht einer Energie von etwa 10^{16} eV, wobei dieser Trigger dann volle Effizienz besitzt. Es werden also alle Luftschauer mit einer Energie über 10^{16} eV registriert. Das steile Energiespektrum der kosmischen Strahlung führt jedoch dazu, dass etwa die Hälfte aller aufgenommenen Ereignisse eine Energie unterhalb von 10^{16} eV besitzen. Entsprechend beträgt die Triggerrate knapp zwei Ereignisse je Minute.

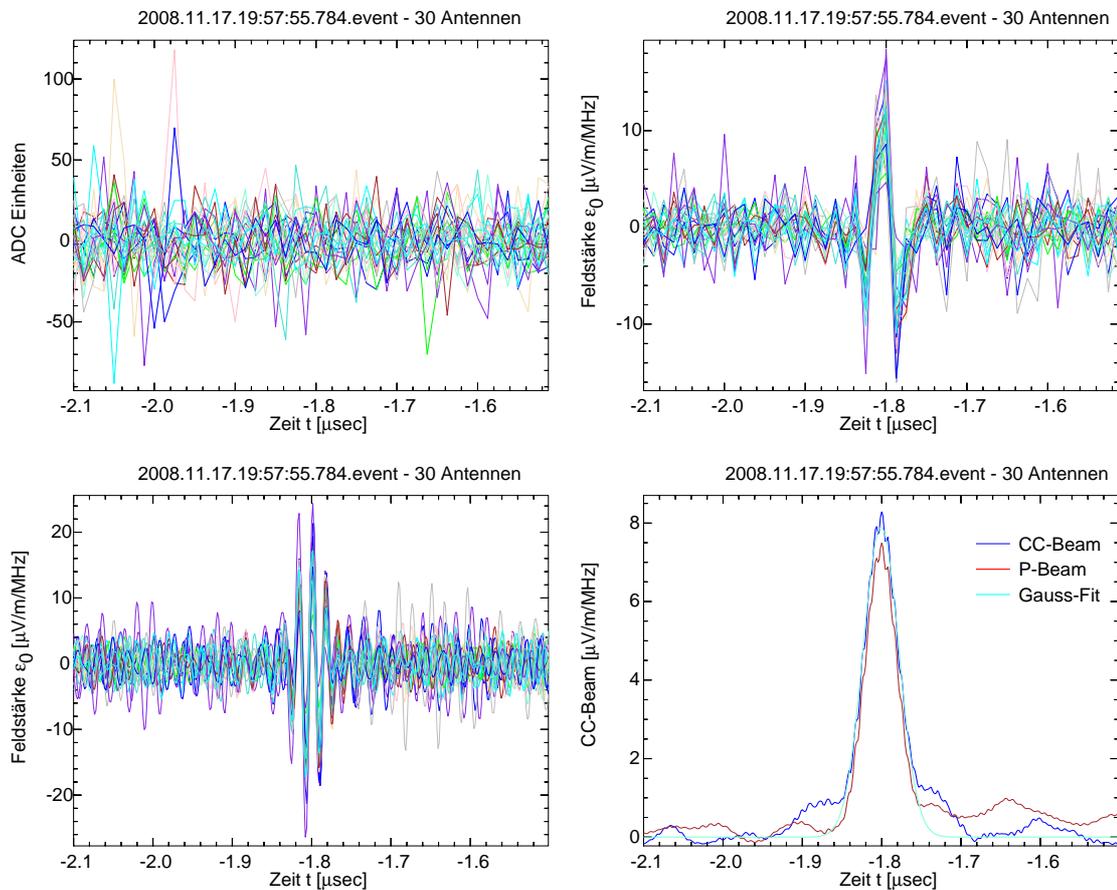


Abbildung 5.3: Die Rohdaten der dreißig LOPES-Antennen wie sie vom AD-Wandler übertragen werden (links oben), nach digitaler Filterung, Kalibrierung und Zeitkorrektur (rechts oben) und die kalibrierten Daten nach dem Hochtasten (links unten). Das Radiosignal des Luftschauers ist in Form eines kohärenten Pulses bei ungefähr $-1.8 \mu\text{s}$ sichtbar. Die Berechnung des CC-Beams liefert einen eindeutigen Puls (rechts unten), dessen Höhe mit der Energie des Luftschauers korreliert ist.

Zusätzlich erhält LOPES einen Trigger von KASCADE-Grande, dessen Stationen in Trigger-Hexagone zusammengefasst sind. Jedes Hexagon besteht aus einer zentralen und sechs umliegenden Stationen. Diese Stationen generieren einen gemeinsamen Trigger, wenn alle sieben Stationen koinzident getriggert haben. Wenn die drei zentralen Hexagone 9, 10 und 13 (Abbildung 5.1) gleichzeitig einen Luftschauer nachweisen, wird das Triggersignal zu LOPES weitergeleitet. Die auf diese Weise aufgenommenen Luftschauer sind besonders hochenergetisch und weit von den LOPES-Antennen entfernt. Sie eignen sich damit besonders zur Untersuchung des Lateralprofils des Radiosignals. Außerdem liegen die Antennen von LOPES^{STAR} in

der Nähe der Triggerhexagone. Die Rate des von KASCADE-Grande bereitgestellten Triggers ist jedoch mit weniger als zehn Ereignissen je Stunde sehr klein.

Wenn LOPES ein Triggersignal empfängt, wird eine Spur mit 2^{16} Messpunkten aufgenommen, jeweils mit der selben Anzahl von Messpunkten vor und nach dem Triggerzeitpunkt. Mit der eingesetzten Abtastfrequenz von 80 MHz entspricht dies einer Aufnahmedauer von 0,8192 ms.

5.3 Verarbeitung der aufgenommenen Daten

Die Datenaufnahme erfolgt in der zweiten Nyquist-Zone. Im Fall von LOPES bedeutet das, dass das Signal zwischen 40 und 80 MHz bandpassgefiltert und anschließend mit einer Abtastfrequenz von 80 MHz digitalisiert wird. Dabei bleibt die volle Information erhalten. Um die echte Spur der aufgenommenen Radiowellen zu bekommen, muss das Signal einen *Upsampling* genannten Prozess durchlaufen. Dabei wird das Signal hochgetastet, also die fehlenden Zwischenpunkte berechnet. Prinzipiell wird das durch eine Fouriertransformation erreicht, die zunächst Frequenzwerte zwischen 0 und 40 MHz liefert. Dieses Spektrum wird an der Obergrenze gespiegelt und komplex konjugiert. Außerhalb des gemessenen Frequenzbereichs von 40 bis 80 MHz werden im Spektrum Nullen eingefügt. Die Rücktransformation ergibt dann die Kurve mit zusätzlichen Datenpunkten, wobei die Anzahl der oberhalb von 80 MHz angehängten Nullen die gewünschte Auflösung bestimmt.

Es gibt einige Schritte in der Analyse, die standardmäßig durchgeführt werden. Zuerst findet eine digitale Unterdrückung schmalbandiger Störquellen statt. Anschließend wird die Verzögerung des Signals in der gesamten Signalkette, sowie die Dispersion im Filter korrigiert. Außerdem wird die richtungs- und frequenzabhängige Verstärkung der Antenne berücksichtigt, wobei die Richtungsinformation der rekonstruierten KASCADE-Daten verwendet wird. Um eine hochpräzise Zeitinformation zu bekommen, wie sie für die digitale Kombination der einzelnen Antennen nötig ist, wird eine Phasenkalibration durchgeführt [Fal05], [Sch09b]. Dazu wird bei zwei Frequenzen ein sinusförmiges Signal ausgestrahlt, das von allen Antennen empfangen werden kann. Durch den Vergleich der Phasenlage dieser Signale in den verschiedenen Antennen, kann die relative Zeitdifferenz sehr genau bestimmt werden.

Nach dieser Vorverarbeitung kann ein Richtstrahl (*beam*) berechnet werden. Das bedeutet zunächst, dass die Spuren der einzelnen Antennen so gegeneinander verschoben werden, dass die unterschiedlichen Signallaufzeiten von der Quelle zu den Antennen ausgeglichen werden. Das Antennenfeld wird also digital fokussiert. Ein Signal einer Punktquelle erscheint dann an derselben Position in den Daten aller Antennen (Abbildung 5.3).

Diese ausgerichteten Daten können auf verschiedene Weisen miteinander verknüpft werden.

- Der F-Beam (*fieldstrength beam*) ist die über alle Antennen gemittelte Feldstärke. Das ist die Betriebsart eines so genannten *phased arrays*. Das Signal eines kohärenten Pulses kann sowohl positiv als auch negativ sein.

$$f_F[t] = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f_n[t]$$

Dabei sind N die Anzahl der Antennen und $f_n[t]$ die in der Zeit verschobenen Messwerte der n -ten Antenne.

- Der P-Beam (*power beam*) ist die Wurzel der gemittelten Leistungen aller Antennen, die immer positiv ist. Daraus kann jedoch nicht bestimmt werden, ob ein Signal kohärent ist oder nicht.

$$f_P[t] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N_{ant}} f_n^2[t]}$$

- Der CC-Beam (*cross-correlation beam*) ist das Ergebnis der interferometrischen Kombination der Antennen. Dies geschieht durch Berechnung der Kreuzkorrelation aller Antennenpaare. Es wird also jedes Signal einer Antenne mit den Signalen aller anderen Antennen multipliziert. Diese Werte werden anschließend gemittelt. Die Wurzel des Betrages ist dann der Wert des CC-Beams, wobei das Vorzeichen als Vorzeichen des CC-Beams behalten wird. Dieses gibt an, ob die Ursprungssignale kohärent waren oder nicht.

$$f_{CC}[t] = \pm \sqrt{\left| \frac{1}{N_{Paare}} \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m>n}^N f_n[t] \cdot f_m[t] \right|}$$

Der CC-Beam eines kohärenten Signals ist immer positiv, während inkohärentes Rauschen einen Wert nahe Null liefert, da sich Beiträge unterschiedlichen Vorzeichens herausmitteln. Ein gegenphasiges Signal in den Antennenpaaren liefert einen negativen Wert für den CC-Beam.

- Um ein Signal zu vermeiden, das durch starkes Rauschen in nur wenigen Antennen verursacht wird, kann der CC-Beam mit dem Verhältnis von CC-Beam und P-Beam multipliziert werden. Das Resultat ist der X-Beam (*excess beam*), ein Maß für den kohärenten Anteil innerhalb eines Signals.

$$f_X[t] = f_{CC}[t] \cdot \left| \frac{\langle f_{CC}[t] \rangle_{BA}}{\langle f_P[t] \rangle_{BA}} \right|$$

Dabei bedeutet $\langle \dots \rangle_{BA}$ die Mittelung der ursprünglichen Daten über drei Werte, um den Einfluss hochfrequenter Oszillationen abzuschwächen.

Gewöhnlich wird für die Analyse der LOPES-Daten der CC-Beam verwendet. Dieser hat die Eigenschaft, dass die Höhe des Signals im CC-Beam, im Fall eines rein kohärenten Signals, identisch zur Höhe des P-Beams ist. Inkohärente Signale werden jedoch stark unterdrückt. Da das Antennenfeld bei dieser Berechnung als Interferometer für die Radiowellen fungiert, kommt es, genau wie bei der Betrachtung einer optischen Punktquelle durch ein Gitter, zur Ausbildung eines Beugungsmusters. Dies ist als Folge der unvollständigen Abtastung der Raumfrequenzen durch die Antennen zu verstehen. Das Beugungsmuster weist außer dem Hauptmaximum noch weitere Maxima auf, die im Fall eines Antennenfeldes als Nebenkeulen (*grating lobes*) bezeichnet werden [Bal05]. Sie entstehen durch die geometrischen Gangunterschiede s_i der Radiowellen. Für eine einzelne Frequenz lässt sich für jede Antenne der Phasenunterschied $\Delta\varphi_i$ des Signals einer punktförmigen Quelle, relativ zum Ursprung des Antennenfeldes, berechnen.

$$\Delta\varphi_i = 2\pi \frac{f}{c} \cdot s_i$$

Dabei ist f die Frequenz, bei der die Quelle strahlt, c die Lichtgeschwindigkeit und s_i der geometrische Gangunterschied zwischen der Position, für die der CC-Beam berechnet wird, und der Position der Quelle.

Nun berechnet man auf Basis dieser Gangunterschiede den CC-Beam in eine bestimmte Richtung nach der Vorschrift

$$CC = \frac{1}{N_{Paare}} \sum_{i,j < i}^{N_{Ant.}} \pm \sqrt{|\cos(\Delta\varphi_i - \varphi_0) \cdot \cos(\Delta\varphi_j - \varphi_0)|}$$

wobei das Vorzeichen vor der Wurzel entsprechend des verworfenen Vorzeichens des Radikanten gewählt wird und φ_0 die Phasenlage des Signals im Ursprung des Antennenfeldes ist. Man erhält die Stärke des Signals einer Quelle Q bei einer Berechnung des CC-Beams für den Punkt P (Abbildung 5.4). Es ist also nicht möglich, durch Berechnung des CC-Beams alle Signale aus anderen Richtungen vollständig zu unterdrücken.

Berechnet man die Stärke des Signals der Quelle Q für alle Punkte P am Himmel, so erhält man eine Himmelskarte, auf der sich eine Art gitterförmiges Interferenzmuster zeigt (Abbildung 5.4). Die richtungsabhängige Empfindlichkeit der Einzelantenne wurde in dieser Berechnung ignoriert, da diese während der Kalibration korrigiert wird. Die Position der Nebenmaxima am Himmel ist charakteristisch für eine bestimmte Anordnung der Antennen. Die Positionen der Nebenmaxima hängen von der Frequenz ab, lediglich die Position des Hauptmaximums ist für alle Frequenzen gleich. Das entsprechende Beugungsmuster für den gesamten Frequenzbereich von

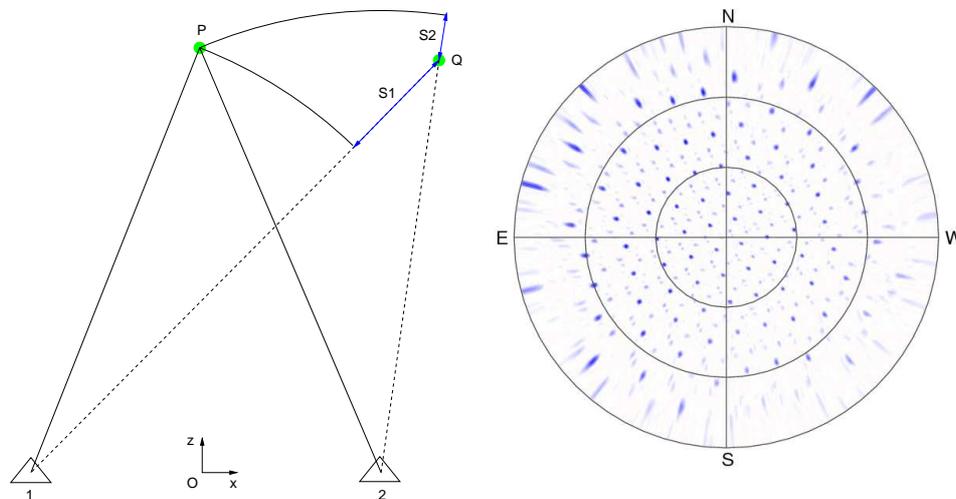


Abbildung 5.4: Skizze zur Veranschaulichung des geometrischen Gangunterschieds zwischen den Signalen, die zwei verschiedene Antennen sehen (links). Dabei ist Q die Signalquelle und P der Punkt, für den der CC-Beam berechnet wird. Daraus resultiert für eine bestimmte Frequenz ein Empfindlichkeitsmuster, das sich gitterförmig über den Himmel erstreckt (rechts), wobei für dieses Beispiel mit 60 MHz die Mitte des von LOPES benutzen Frequenzbandes gewählt wurde. Die eigentliche Position der Quelle ist kaum zu erkennen.

LOPES erhält man durch Mittlung der Muster für die Einzelfrequenzen. Je nach Position der Quelle unterscheidet sich das strahlenförmige Muster (Abbildung 5.5). Gut zu sehen ist auch die schlechter werdende Auflösung im Zenitwinkel in der Nähe des Horizonts. Das liegt daran, dass es sich bei LOPES um ein zweidimensionales Antennenfeld handelt. Entsprechend lassen sich Objekte in der Nähe der Antennen-Ebene schlechter trennen, da sich ein kleiner Winkelabstand zwischen den Objekten kaum als Gangunterschied bemerkbar macht. Eine punktförmige Quelle wird in der Nähe des Horizonts zu einem langgestreckten Strahl.

Da LOPES über das zeitliche Verschieben der aufgezeichneten Daten während der Analyse auf jeden beliebigen Punkt am Himmel ausgerichtet werden kann, ist es auch möglich über den CC-Beam eine Himmelskarte der kohärenten Radioemission eines Luftschauerereignis zu erzeugen. Dazu wird der Himmel in einer vorgegebenen Schrittweite abgerastert und für jeden Punkt der CC-Beam berechnet. Der zeitliche Mittelwert des CC-Beams ergibt dann ein Maß für die Stärke des Signals in einer bestimmten Richtung während des betrachteten Zeitraums.

Im Falle eines Luftschauerereignisses, dessen eigentliches Signal mit weniger als $0,1 \mu\text{s}$ sehr kurz ist und immer ungefähr $1,8 \mu\text{s}$ vor dem Triggerzeitpunkt liegt, reicht eine Blocklänge von $3,18 \mu\text{s}$ aus. Das entspricht einer Unterteilung der gesamten Daten in 256 Datenblöcke, wobei die Berechnung mit Block 127 durchgeführt wird.

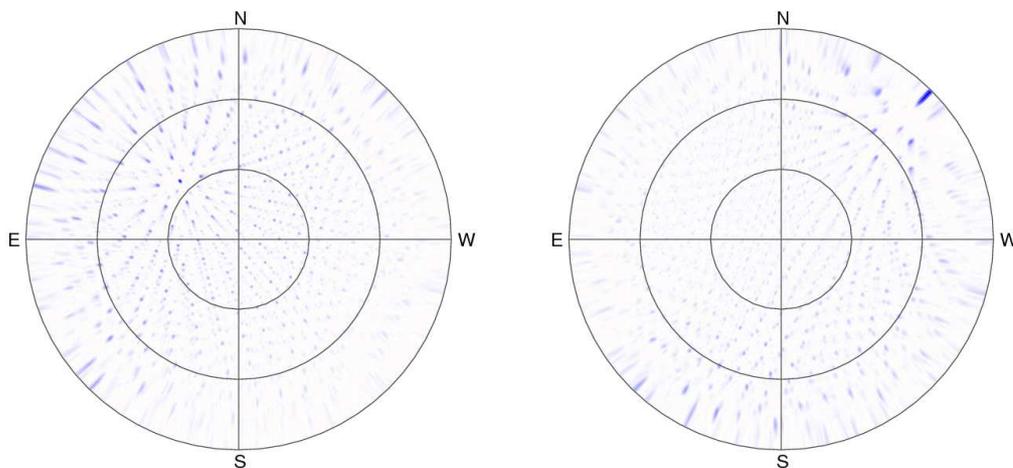


Abbildung 5.5: Durch die Phasenunterschiede bei verschiedenen Wellenlängen erzeugte Beugungsmuster, die von einer punktförmigen Quelle hervorgerufen werden, die im Frequenzbereich von 40 bis 80 MHz emittiert. Einmal befindet sich die Quelle in einer Höhe von 8 Kilometern und einem horizontalen Abstand von 4,2 Kilometern (links), relativ zum Ursprung des LOPES-Koordinatensystems. Das andere Mal befindet sich die Quelle auch in einer Entfernung von 4,2 Kilometern, allerdings in einer Höhe von nur 10 Metern (rechts). In Beiden Fällen wurde der CC-Beam für die Entfernung zwischen dem Ursprung des Antennenfeldes und der Quelle berechnet.

Abbildung 5.6 zeigt das Radiosignal eines Luftschauers und die zugehörige Himmelskarte der mittleren Radioemission während der $3,18 \mu\text{s}$ vor dem Triggersignal.

Bei der Berechnung der Himmelskarte wird für jeden Punkt die richtungsabhängige Verstärkung der Antennen berücksichtigt und korrigiert [Neh08]. Die entsprechenden Korrekturfaktoren wurden durch Simulationen der verwendeten Antennen ermittelt und mit den Messungen verglichen. Bei der Betrachtung der Himmelskarte (Abbildung 5.6) fallen vier Bereiche stark erhöhter Emission am Horizont auf. Die Ausdehnung dieser Regionen entspricht gerade dem Bereich, für den ein Eintrag in den Kalibrationstabellen gültig ist. Dies ist ein Effekt der Antennensimulation, da eine idealisiert betrachtete LOPES-Antenne in Richtung des Horizonts eine verschwindende Empfindlichkeit besitzt. Der daraus resultierende große Korrekturfaktor entspricht nicht dem tatsächlichen Empfindlichkeitsmuster. Dieses Phänomen ist bisher nicht in Erscheinung getreten, da Luftschauerereignisse nur bis zu einem Zenitwinkel von maximal 45° analysiert werden.

Die Nebenkeulen des Antennenfeldes, die bei der Berechnung des CC-Beams entstehen, führen zu dem als Strahlen sichtbaren Beugungsmuster, das sich über den gesamten Himmel erstreckt. Der gemeinsame Ursprung dieser Strahlen ist die Quelle der Radioemission, die von einem Minimum umgeben ist.

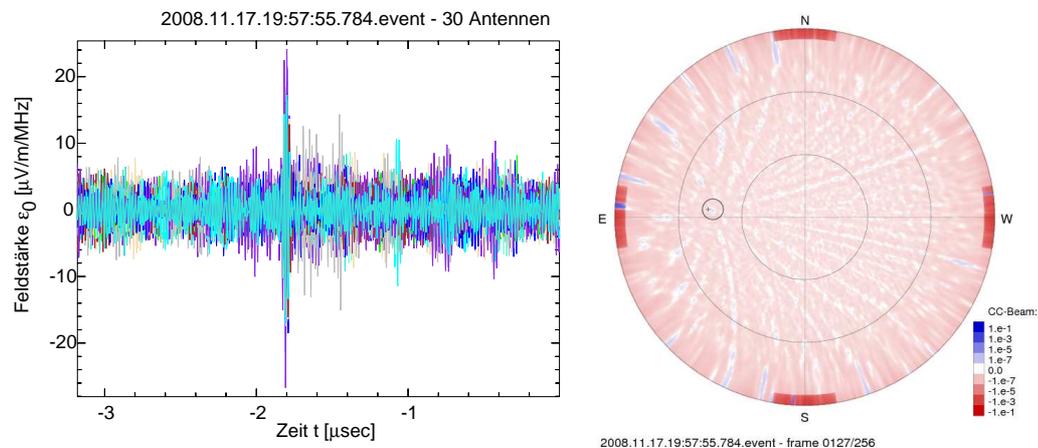


Abbildung 5.6: Signal eines Luftschauers (links) und die Himmelskarte der mittleren Radioemission während der $3,18 \mu\text{s}$ um das Luftschauersignal. Die Radioemission des Luftschauers ist in westlicher Richtung bei einem Azimut von $\phi = 85,2^\circ$ und einem Zenitwinkel von $\theta = 43,8^\circ$ gut zu sehen (Kreis). Die mit KASCADE rekonstruierte Richtung ist durch ein Kreuz gekennzeichnet. Bei der Farbkodierung handelt es sich um unkalibrierte logarithmische Einheiten.

5.4 Messung des elektrischen Feldes

Um das statische elektrische Feld zu messen, werden Feldmühlen, auch Rotationsvoltmeter genannt, eingesetzt. Diese basieren auf dem Prinzip, dass sich ein Plattenkondensator, der einem elektrischen Feld einer bestimmten Stärke ausgesetzt wird, auf eine Spannung auflädt, die proportional zur Feldstärke ist. Um diese Spannung zu messen, werden zwei Plattenkondensatoren abwechselnd durch einen rotierenden, geerdeten Flügel vom elektrischen Feld abgeschirmt. Somit lässt sich zwischen den Platten der zwei Kondensatoren eine Wechselspannung abgreifen, deren Amplitude proportional zur Feldstärke ist (Abbildung 5.7).

Eine solche Feldmühle von Campbell Scientific (CS110) wurde auf dem Gelände des KASCADE-Experiments zur Messung der vertikalen Komponente des statischen elektrischen Feldes installiert (Abbildung 5.7). Die Messung findet in einer Höhe von etwa drei Metern über Grund statt, wobei jede Sekunde ein Messwert genommen wird. Die aufgezeichneten Daten werden zunächst lokal gespeichert. In regelmäßigen Abständen wird eine Zeitsynchronisation durchgeführt und die Daten in eine eigene Datenbank übertragen, damit sie zur späteren Analyse zur Verfügung stehen.

Während schönem Wetter hat das elektrische Feld in Bodennähe einen Wert zwischen -100 Vm^{-1} und -200 Vm^{-1} (Abbildungen 5.9). Auftretende kleine Änderungen verlaufen langsam, mit einer typischen Zeitskala im Minutenbereich. Vorüberziehende Wolken machen sich durch größere Feldstärken bemerkbar, aber auch

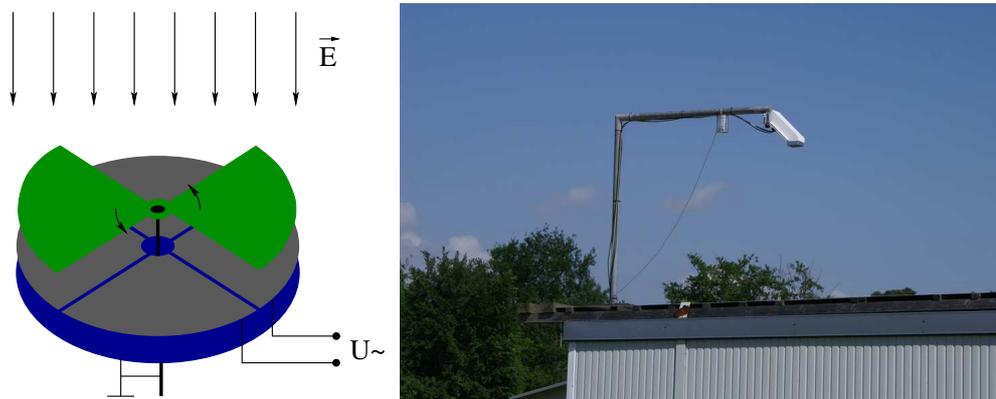


Abbildung 5.7: Prinzipskizze zur Funktionsweise der Feldstärkemessung (links). Die Feldmühle zur Messung der vertikalen Komponente des statischen elektrischen Feldes ist in einer Höhe von ungefähr drei Metern auf dem geerdeten Dach von einem der 16 KASCADE Elektronikcontainern angebracht (rechts).

dann sind die Änderungen kontinuierlich. Wenn jedoch ein Gewitter auftritt, ändern sich die Bedingungen recht dramatisch. Die Feldstärke am Boden kann Werte von $\pm 20 \text{ kVm}^{-1}$ überschreiten (Abbildungen 5.8 und 5.9). Außerdem sind Blitze als Sprungstellen in den aufgenommenen Daten sichtbar. Die Größe und die Richtung der Sprünge hängt von dem Ort und der Art der Entladung ab. Aus dem Betrag

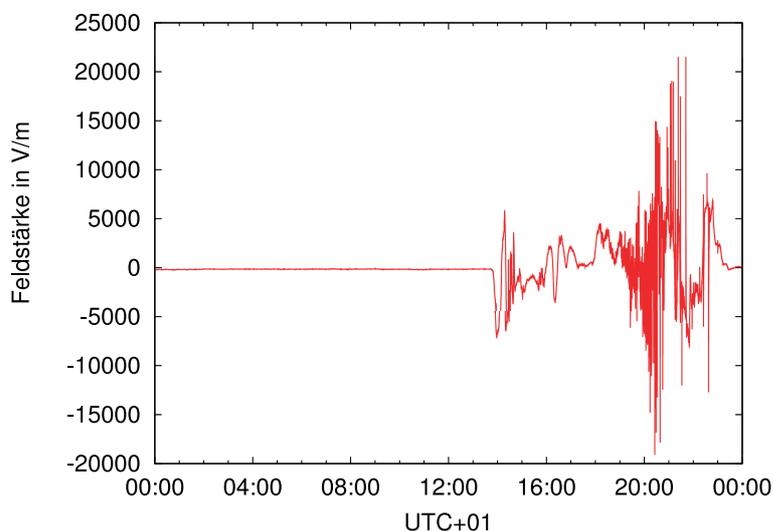


Abbildung 5.8: Zu sehen ist der Verlauf des elektrischen Feldes im Tagesverlauf des 02.06.2008, aufgenommen auf dem Gelände des LOPES-Experiments. Auffällig ist der Regen am Nachmittag und das Gewitter am Abend, die sich deutlich vom schönen Vormittag unterscheiden.

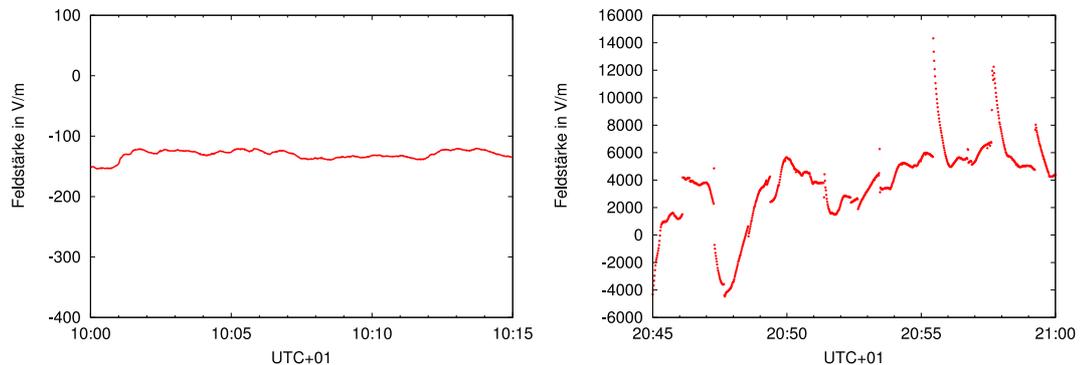


Abbildung 5.9: Zwei Ausschnitte des 02.06.2008 (Abbildung 5.8). Während schönem Wetter nimmt die Feldstärke Werte von -100 bis -200 Vm^{-1} an und hat einen recht glatten Verlauf (links). Wenn ein Gewitter auftritt, steigt die Feldstärke auf große Werte an. Zusätzlich sind Blitze als Sprünge in der Feldstärke sichtbar (rechts).

der Feldstärke und dem Auftreten von Sprüngen lassen sich Gewitter zuverlässig und automatisiert erkennen [Neh08].

Für diese automatische Erkennung werden alle drei Minuten die letzten 15 Minuten des elektrischen Feldes analysiert. Die Entscheidung, ob die Daten ein Gewitter zeigen oder nicht, basiert zum einen auf der maximalen Feldstärke, die 500 Vm^{-1} überschreiten muss. Außerdem muss ein Sprung im elektrischen Feld aufgetreten sein, dessen Höhe mindestens das doppelte des RMS-Werts der Daten der letzten 15 Minuten beträgt. Als zusätzliches Kriterium kommt ein Winkelunterschied in den Steigungen vor und nach dem Sprung von mindestens 40° hinzu.

Wenn auf diese Weise ein lokales Gewitter entdeckt wird, wird LOPES in einen speziellen Aufnahmemodus versetzt, in dem die Länge der aufgenommenen Datenblöcke von $819 \mu\text{s}$ auf 6.55 ms hochgesetzt wird, wobei die Dauer vor dem Triggerzeitpunkt unverändert bei $409,6 \mu\text{s}$ bleibt. Durch die achtfache Länge steigt die Wahrscheinlichkeit stark an, in einem durch einen Luftschauder getriggerten Ereignis zusätzlich das Radiosignal eines Blitzes aufzunehmen. Nach einem Gewitter, genauer gesagt 15 Minuten nach dem letzten Sprung im elektrischen Feld, wechselt LOPES wieder zurück in den normalen Datenaufnahmemodus. Während sich LOPES im Gewittermodus befindet, steigt die Totzeit der Datenaufnahme stark an. Im normalen Betrieb werden etwa 1,4 Sekunden für das Auslesen und Übertragen der dreißig Datenblöcke benötigt, was einem Verlust von 4,8 Prozent aller getriggerten Ereignisse entspricht. Während der Gewittermodus aktiv ist, steigt diese Zeit auf ungefähr 8 Sekunden an. Dadurch können 25 Prozent der getriggerten Ereignisse nicht aufgezeichnet werden.

Da die Verlängerung des aufgenommenen Datenblocks die Möglichkeit gibt, nach einem Zusammenhang zwischen einem Luftschauder und dem Auftreten eines Blitzes zu suchen (Kapitel 8), wurde dieser Verlust jedoch bewusst in Kauf genommen.

6 Zusätzlicher Radiountergrund während Gewittern

Die natürlichen Radio-Untergrundsignale, wie zum Beispiel die Radiostrahlung unserer Galaxie, sind in der Regel breitbandig und besitzen zufällige Phasen. Die Amplituden sind dabei nicht so stark, als dass sie eine Messung der Radiosignale von Luftschauern unmöglich machen würden, ihre Stärke gibt aber die untere Nachweisbarkeitsgrenze der Luftschauersignale vor. Die künstlichen Störquellen hingegen sind meist um ein Vielfaches stärker. Schmalbandige Störungen, wie sie von Sendern aller Art ausgestrahlt werden, lassen sich dank der digitalen Signalverarbeitung gut herausfiltern. Breitbandige Störungen lassen sich allerdings nicht unterdrücken, sofern sie innerhalb des Frequenzbandes der Messung liegen. In Karlsruhe ist ein Großteil der künstlichen Störquellen schmalbandig und lässt sich somit herausfiltern. Breitbandige Störungen, deren Phasen nicht zufällig verteilt sind, erzeugen kurze Radiopulse. Ihre Quellen sind meist nicht dauerhaft vorhanden, da sie überwiegend von technischen Geräten verursacht werden, wie zum Beispiel Schweißgeräten oder Zündspulen von Verbrennungsmotoren. Diese kurzen Pulse stellen ein besonderes Problem für die Entwicklung eines zuverlässigen Selbsttriggers dar.

Entladungsprozesse in der Atmosphäre stellen jedoch eine natürliche Störquelle dar, die in einem weiten Frequenzbereich emittiert und dabei sehr hohe Leistungen abstrahlt. Die Quelle kann dabei in beliebiger Richtung liegen und ist nicht auf Horizontnähe beschränkt. Diese Störungen sollen im Folgenden genauer betrachtet werden.

6.1 Radiosignale von Entladungsprozessen

Wie in Abschnitt 4.4 beschrieben, besteht ein Blitz aus mehreren Teilprozessen. Die dabei auftretenden Ströme haben alle das Merkmal, dass sie zu Beginn steil ansteigen und danach mehr oder weniger schnell wieder abfallen (Abbildung 6.1) [Rak03]. Dabei steigen die Ströme innerhalb von wenigen Mikrosekunden auf Werte von bis zu einigen zehntausend Ampere an. Da sich die Zeitskalen, in denen der Blitz abläuft, in der Größenordnung von Millisekunden bewegt, liegt die stärkste Emission im Kilohertz-Bereich. Im von LOPES verwendeten Frequenzband ist das Spektrum einer solchen Entladung schon stark unterdrückt (Abbildung 6.2).

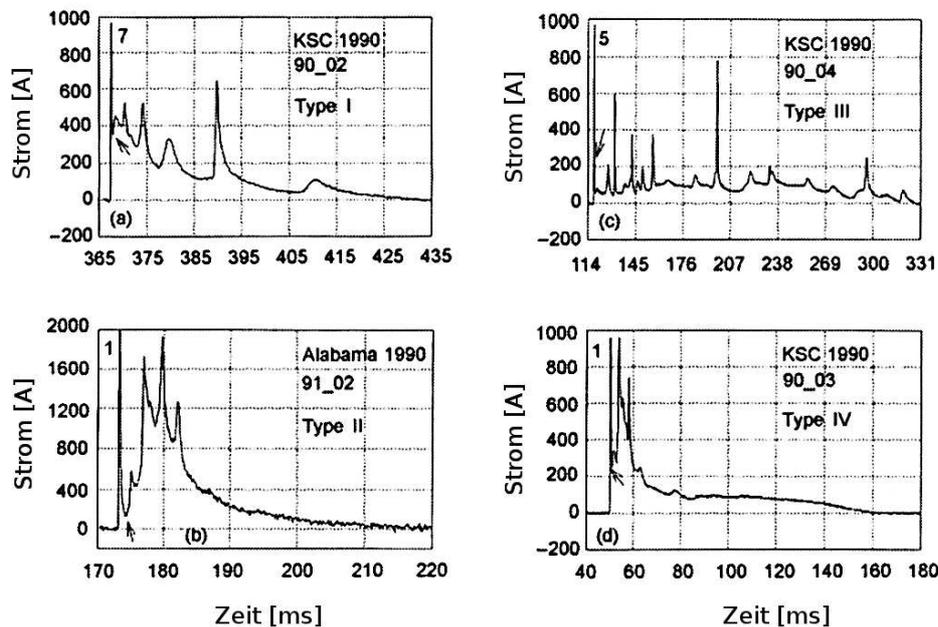


Abbildung 6.1: Typische Stromverläufe während eines künstlich ausgelösten Blitzes. Bei natürlichen Blitzen kommt es teilweise zu wesentlich höheren Strömen [Rak03].

In den Daten der LOPES-Antennen ist jedoch nicht das durch den Stromfluss erzeugte Radiosignal direkt zu sehen, sondern die Reaktion des verwendeten Bandpassfilters auf dieses Signal. Das hat zur Folge, dass nur die Flanken des Strompulses aufgezeichnet werden. Die beobachteten Signale haben also immer mindestens die Breite der Impulsantwort des verwendeten Bandpassfilters. Erfolgen die Änderungen im Signal in zeitlichen Abständen, die kürzer als diese Breite der Impulsantwort ist, so führt die Überlagerung zu einem längeren Signal in den Daten.

Finden Prozesse mit den enorm hohen auftretenden Strömen in der Nähe des LOPES-Experiments statt, so ist das Radiosignal trotz des steil abfallenden Spektrums so stark, dass die digitale Elektronik in Sättigung gerät. Dieser Effekt ist in den Rohdaten der Antennen deutlich zu sehen. (Abbildung 6.3).

In diesem Fall lassen sich natürlich keine Rückschlüsse auf die tatsächliche Stärke ziehen. Es besteht aber dennoch die Möglichkeit, eine Himmelskarte der Störung zu berechnen. Auch wenn die Stärke der Quelle dadurch unbekannt bleibt, kann über die Phaseninformation zumindest die Position der Quelle bestimmt werden.

Prinzipiell lassen sich die während Gewittern beobachteten Radiosignale in verschiedene Kategorien einteilen. Es gibt natürlich nach wie vor Ereignisse, in denen kein zusätzliches Signal zu sehen ist. Ein Teil der Ereignisse weist aber einige wenige

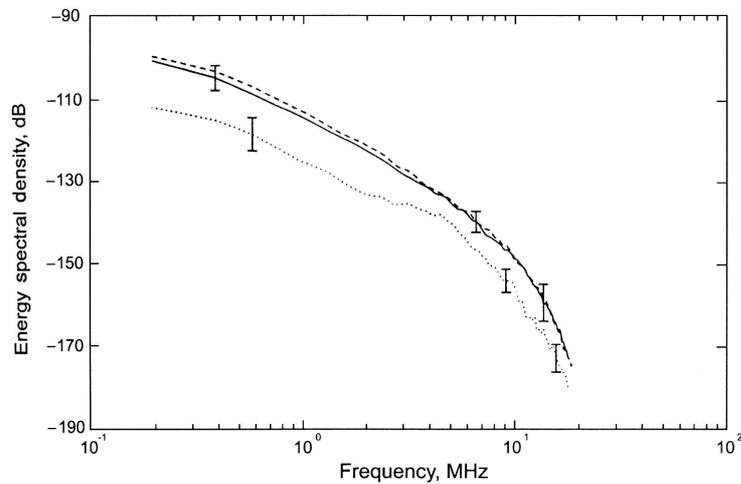


Abbildung 6.2: Gemittelte Frequenzspektren von der ersten Hauptentladung (durchgezogene Linie), von Folgentladungen (gestrichelte Linie) und von den Anfangsentladungen in der Wolke (gepunktete Linie) [Rak03].

starke Pulse auf, die einen zeitlichen Abstand von meist mehr als einer Millisekunde haben. Ihre Anzahl ist in der Regel auf weniger als drei innerhalb der 6,5 ms der Datenaufnahme beschränkt, wobei die einzelnen Pulse ungefähr die gleiche Amplitude haben, ohne jedoch zu einer Sättigung zu führen.

Dann gibt es Ereignisse, die eine sehr große Anzahl kurzer Pulse mit verschiedenen

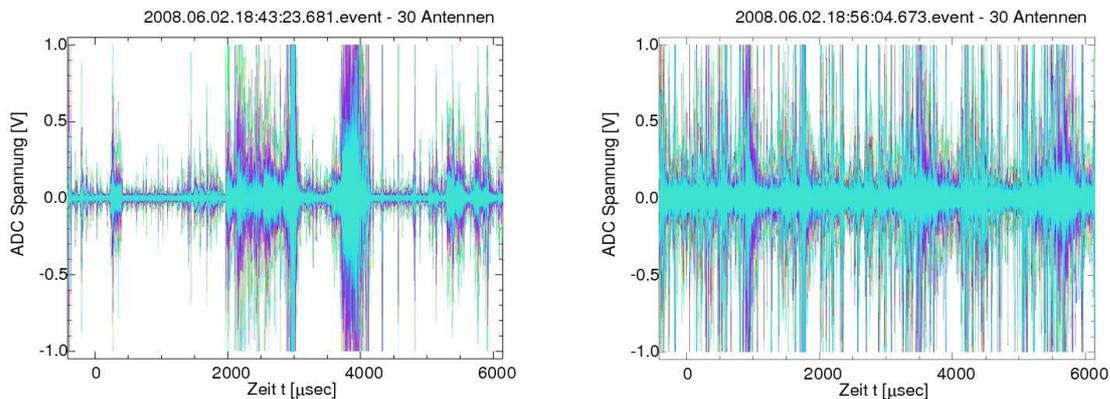


Abbildung 6.3: Zwei Beispiele während Gewitter auftretender Sättigung der digitalen Elektronik von LOPES. In beiden Fällen wurde mit dem Signal des LNA der Eingangsbereich des AD-Wandlers überschritten. Es handelt sich hierbei um unkali-brierte Rohdaten, da während der Kalibration eine Fouriertransformation durchgeführt wird und die Sättigung somit nicht sichtbar würde.

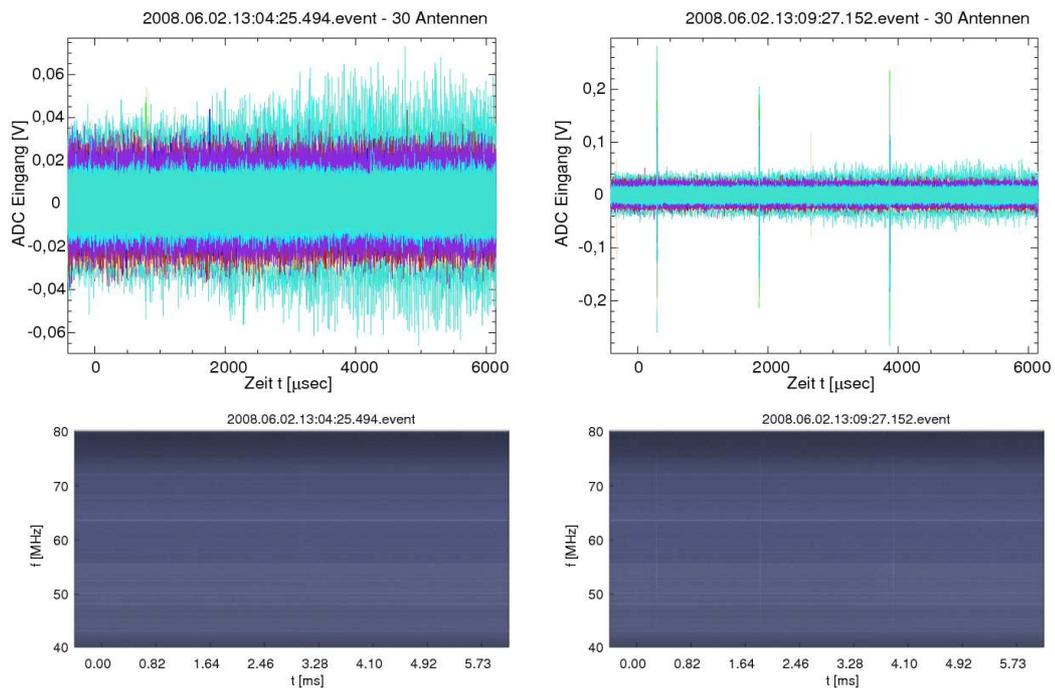


Abbildung 6.4: Beispiele der am häufigsten vorkommenden Arten von Ereignissen während Gewittern mit ihren dynamischen Spektren (siehe auch Abbildung 6.5). Ein Teil der Ereignisse weist kein stärkeres Radiosignal auf, das sich mit Entladungen in Verbindung bringen lässt (links). Ein weiterer Bruchteil der Ereignisse weist einige wenige starke Pulse auf (rechts). Zu beachten sind die unterschiedlichen Skalierungen. Es handelt sich hier um Rohdaten, wobei der AD-Wandler einen Spannungsbereich von ± 1 V digitalisiert. Die Helligkeit in den dynamischen Spektren repräsentiert die logarithmische Signalstärke in willkürlichen Einheiten.

Höhen aufweisen. Sie erstrecken sich über den gesamten Zeitraum des aufgenommenen Datenblocks. Diese Klasse der Ereignisse tritt manchmal noch in viel stärkerer Form in Erscheinung. Dabei kann jeder Puls zur Sättigung der Elektronik führen. Die Auswertung der erzeugten Himmelskarten zeigt, dass es sich hierbei um Wolke-Boden-Blitze handelt.

Außerdem gibt es noch starke und ebenfalls länger anhaltende Radiosignale von Entladungen. Diese sind in der Regel viel stärker als die einzelnen Pulse. Ihre Länge ist um Größenordnungen länger als die typische Nachschwingzeit des Bandpassfilters. Die Betrachtung der Himmelskarten ergibt, dass es sich hierbei um Blitze innerhalb einer Gewitterwolke oder von Wolke zu Wolke handeln muss.

Typische Beispiele der einzelnen Ereignisklassen sind in Abbildung 6.4 und 6.5 dargestellt. Es handelt sich auch hier wieder um unkalibrierte Rohdaten, da im Rahmen der Kalibration auch die winkelabhängige Verstärkung der Antennen berücksichtigt

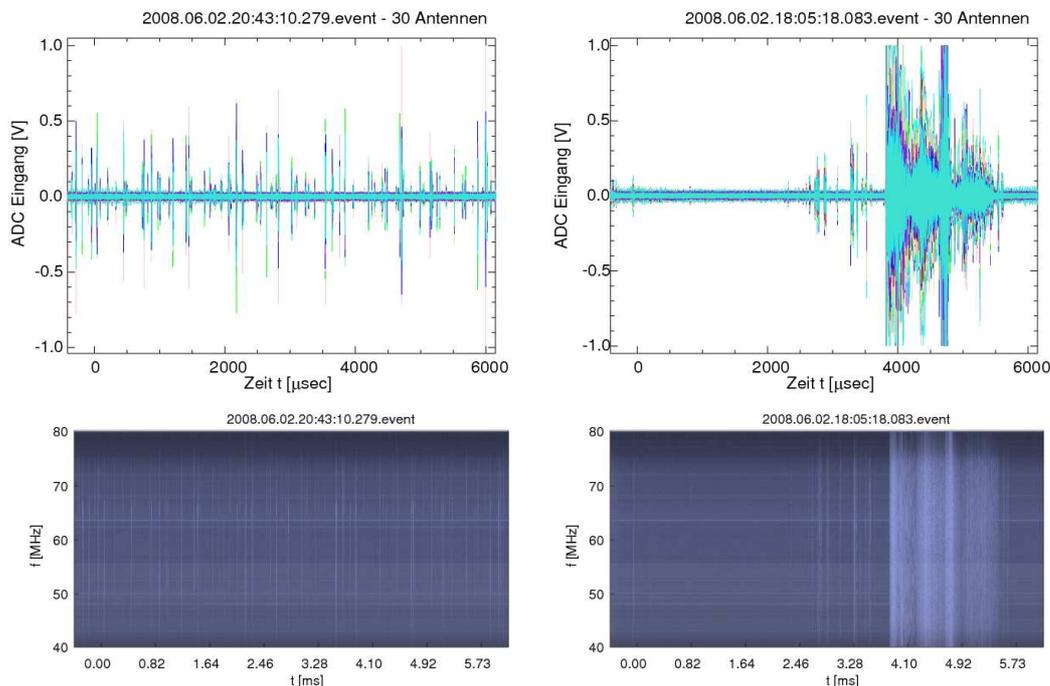


Abbildung 6.5: Beispiele der am häufigsten vorkommenden Arten von Ereignissen während Gewittern mit ihren dynamischen Spektren (siehe auch Abbildung 6.4). Es gibt Ereignisse, die eine große Anzahl unterschiedlich hoher Pulse beinhalten (links). Außerdem verursachen die Hauptentladungen sehr starke Radiosignale (rechts), die zur Sättigung der Elektronik führen können.

werden würde, wozu jedoch zunächst die Information über die Ursprungsrichtung des Signals notwendig ist. Es ist zu beachten, dass die Empfindlichkeit der LOPES-Antennen für große Zenitwinkel stark abnimmt [Neh08]. Da die Quellen der meisten Radiosignale von Blitzen auf den Himmelskarten in Horizontnähe zu sehen sind, ist die Amplitude des tatsächlichen Signals also höher als die gemessene Signalstärke.

Die Ereignisse der einzelnen Klassen weisen ähnliche Häufigkeiten auf, während der Gewittermodus aktiv ist. Dies ist jedoch spezifisch für die Länge des Datenblocks von 6,55 ms und gilt nicht für kürzere Ereignisdauern.

28 Prozent der Ereignisse weisen einen Untergrund auf, der weitestgehend vergleichbar mit dem Untergrund während normalen Wetterbedingungen ist. 26 Prozent der Ereignisse beinhalten kurze starke Pulse, wobei deren Höhen innerhalb eines Ereignisses in der Regel vergleichbar sind. In 25 Prozent der Ereignisse ist eine große Zahl an Pulsen sichtbar, die sich meist über den gesamten aufgenommenen Zeitraum erstrecken und dabei unterschiedliche Amplituden aufweisen. Ein besonders starkes und länger dauerndes Radiosignal einer Entladung ist in 21 Prozent der Ereignisse sichtbar. Diese Zahlen basieren auf den Daten des Jahres 2008, wobei 2909 Ereignisse,

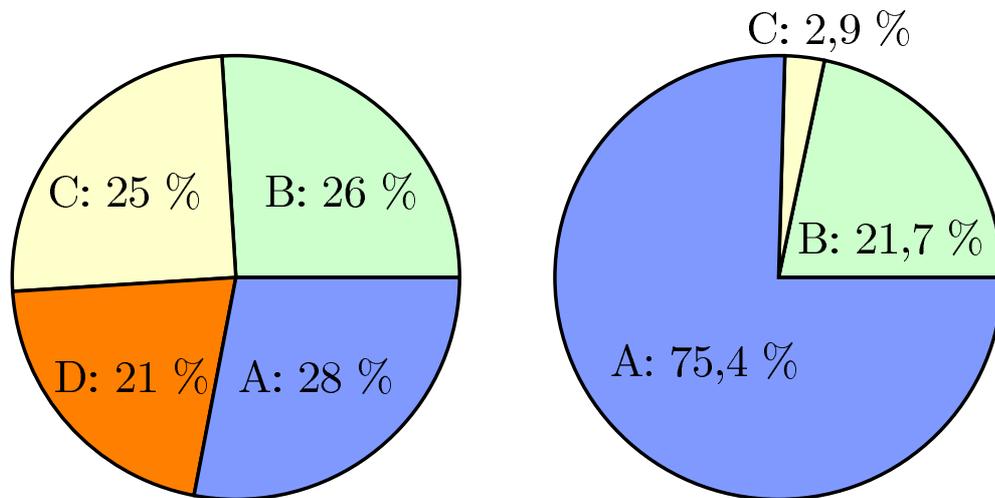


Abbildung 6.6: Prozentuales Auftreten der einzelnen Ereignisklassen während Gewittern (links) und während Kontrollmessungen bei schönem Wetter (rechts). Kategorie A entspricht dabei Ereignissen ohne zusätzlichem Signal. Kategorie B beinhaltet wenige starke Pulse, Kategorie C hingegen eine sehr große Anzahl einzelner Pulse. Der Anteil der Kategorie D besteht aus Ereignissen, die ein starkes Radiosignal eines Blitzes beinhalten.

die während Gewittern auftraten, berücksichtigt wurden.

Zur Generierung eines Referenzdatensatzes wurde LOPES an einem Tag ohne Gewitter für ungefähr drei Stunden künstlich in den Datenaufnahmemodus versetzt, der sonst nur während Gewittern aktiviert ist. Die dabei aufgenommenen 281 Ereignisse wurden auf die gleiche Weise analysiert, wie die Gewitterereignisse.

Überraschend war dabei, dass auch bei schönem Wetter Ereignisse mit wenigen starken Pulsen auftreten. Die Häufigkeit ist dabei mit knapp 22 Prozent etwas geringer (Abbildung 6.6) als während Gewittern, wobei eine große statistische Unsicherheit vorliegt. Die Berechnung einer Himmelskarte des entsprechenden Zeitabschnitts zeigt, dass sich die Quelle der Emission immer an der selben Stelle im Nordwesten von LOPES befindet. Auch bei Messungen mit LOPES^{STAR} wurden zahlreiche Radiopulse aus Nordwesten gefunden [Asc08]. Die mit LOPES^{STAR} über die Ankunftszeiten rekonstruierte Herkunftsrichtung der Pulse besitzt einen Azimut von 321° , wobei sich diese Angabe auf das Antennencluster D17 bezieht, das ungefähr 300 Meter südlich von LOPES liegt. Damit weicht die Richtung etwas von der mit LOPES aus Himmelskarten bestimmten Richtung ab. Falls es sich um die gleiche Quelle handelt lässt das vermuten, dass sich die Position der Quelle in der Nähe der Antennen befindet. Durch weitere Analysen der Himmelskarten konnte die Entfernung der Quelle auf einen Radius von 450 bis 550 Meter eingegrenzt, sowie der Azimut zu ungefähr 318° bestimmt werden. Die Berechnung einer Himmelskarte für eine bestimmte Entfer-

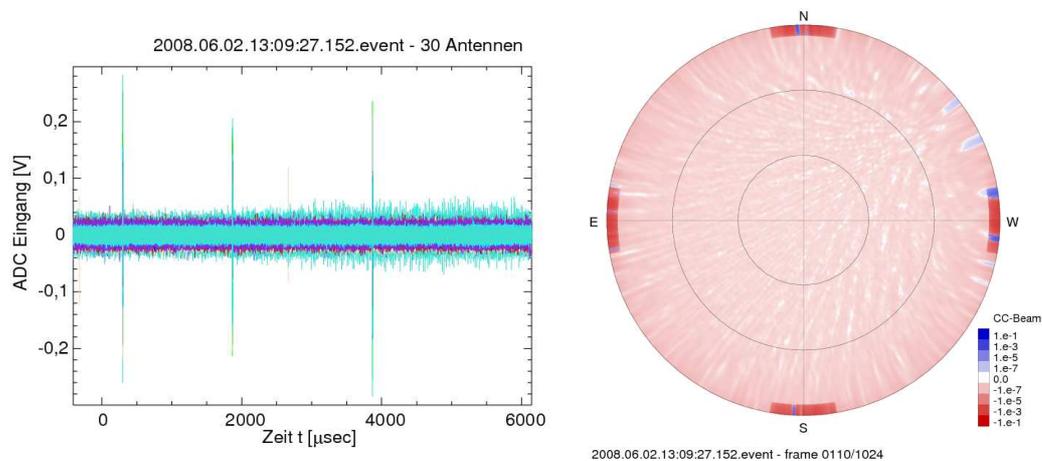


Abbildung 6.7: Mit LOPES während einem Gewitter aufgenommenes Radioereignis, das einzelne, starke Pulse enthält, deren Dauer vergleichbar mit der Dauer eines Luftschauersignals ist (links). Die Berechnung einer Himmelskarte eines Zeitausschnitts von $6,4 \mu\text{s}$ um einen Puls zeigt jedoch, dass die künstliche Quelle am Horizont im Nordwesten liegt.

nung entspricht der Fokussierung des Antennenfeldes auf diese Distanz, wobei diese Entfernung gerade dem Krümmungsradius der Front der elektromagnetischen Welle entspricht. Als Schätzwert für den Abstand der Quelle wurde deshalb die Entfernung gewählt, in der die Emissionsregion am schärfsten begrenzt war. Ein Vergleich mit Luftaufnahmen des Forschungszentrums ergibt, dass die Quelle vermutlich auf dem Gelände des Instituts für Technische Chemie, Abteilung Chemisch-Physikalische Verfahren liegt. Die Anlage oder das Gerät, das diese Radiosignale produziert, konnte nicht identifiziert werden. Es muss sich jedoch um etwas Stationäres handeln, da die Signale seit mindestens einem Jahr in unveränderter Form auftreten und während allen Gewitterzeiträumen nachweisbar waren. Die Wahrscheinlichkeit, diese Pulse auch in den normalen Daten zu sehen, ist kleiner, da die Dauer der aufgenommenen Daten mit $819,2 \mu\text{s}$ geringer ist, als der minimale Abstand der Pulse von ein bis zwei Millisekunden.

6.2 Radiosignale eines durch Luftschauer ausgelösten Runaway Breakdowns

Wenn ein Luftschauer eine Region starker elektrischer Felder durchquert, besteht die Möglichkeit, einen Runaway Breakdown auszulösen. Neben dem Radiosignal des Luftschauers und der Ionisationselektronen, ist auch die Elektronenlawine des Runaway Breakdowns eine zusätzliche Quelle von Radioemission. Detaillierte Berech-

nungen und Simulationen zeigten, dass der Runaway Breakdown ein bipolares Radiosignal mit einer Länge von typischerweise $0,5 \mu\text{s}$ erzeugt [Dwy09], wobei dessen Höhe sowohl mit der Feldstärke als auch mit der Energie des Luftschauers korreliert ist (Abbildung 6.8). Die Abhängigkeit von der Energie des Luftschauers ist durch die unterschiedliche Anzahl an Saatelektronen zu verstehen, die zu Beginn des Runaway Breakdowns zur Verfügung steht.

Die Simulationen haben ergeben, dass der Runaway Breakdown bei extrem hohen Feldstärken im Bereich einiger 10 MVm^{-1} nicht nur eine Lawine ausbildet, sondern über eine Art relativistischen Rückkopplungseffekt verfügt [Bet09]. Zum einen können rückwärtsgestrene Positronen durch Stoßionisation neue Saatelektronen erzeugen, zum anderen kann dies mittels Paarerzeugung oder Compton-Streuung durch ein Bremsstrahlungsphoton geschehen (Abbildung 6.9). Die so erzeugten Saatelektronen führen zu neuen Lawinen und somit zu einer exponentiellen Zunahme der Leitfähigkeit, was den Kollaps des elektrischen Feldes zur Folge hat. Damit ist der rückgekoppelte Runaway Breakdown ein echter Durchbruch, da er, einmal gestartet, nicht mehr von einer äußeren Quelle der hochenergetischen Elektronen abhängt. Dies setzt eine obere Grenze für das in der Atmosphäre erreichbare elektrische Feld.

Es gibt derzeit Überlegungen, ob unter Ausnutzung des normalen Runaway Breakdowns eine Bestimmung der Feldstärken innerhalb von Gewitterzellen durch Messung der erzeugten Radiopulse möglich ist [Dwy09]. Der Vorteil dieser Methode wäre, dass auch kleinräumige und kurzlebige Regionen extrem starker Felder erfasst werden könnten, die mittels Ballonaufstiegen verborgen bleiben. Die Kenntnis darüber, ob solche kleine Regionen viel höherer Feldstärke existieren, ist eine wichtige Grundlage zur Untersuchung des Entstehungsmechanismus eines Blitzes. Dazu ist prinzipiell nur die Bestimmung der Einfallrichtung sowie der Energie des Luftschauers nötig. Sowohl die Form als auch die Höhe des Pulses geben dann Aufschluss über die Feldstärke in der Region des Runaway Breakdowns.

Interessant ist nun, ob man diese Signale mit LOPES messen kann oder ob der von LOPES verwendete Frequenzbereich von 40 bis 80 MHz zu hoch liegt. Dazu wurden im Rahmen dieser Arbeit bipolare Pulse parametrisiert und an die Pulse der veröffentlichten Simulationen (Abbildung 6.8) angepasst. Durch Filterung des Spektrums auf den LOPES-Frequenzbereich kann das Radiosignal abgeschätzt werden, das LOPES messen würde. Dafür wurde als erster Versuch ein rechteckförmiger Bandpassfilter eingesetzt. Normiert wurde der Puls auf die Breite des Frequenzbandes von 40 MHz, um mit LOPES vergleichbare Einheiten zu erhalten.

Auch wenn der Hauptteil der emittierten Leistung unterhalb des LOPES-Frequenzbereichs liegt, könnten die Signale unter Umständen mit LOPES nachweisbar sein. Der bei einer Feldstärke von 375 kVm^{-1} durch einen Luftschauer mit einer Energie von 10^{17} eV und einem Einfallswinkel von 45° erzeugte Radiopuls liegt mit einer Höhe von ungefähr $1 \mu\text{Vm}^{-1}\text{MHz}^{-1}$ noch deutlich unter dem Untergrundrauschen in Karlsruhe von etwa $5 \mu\text{Vm}^{-1}\text{MHz}^{-1}$. Aber bereits bei einer Feldstärke von

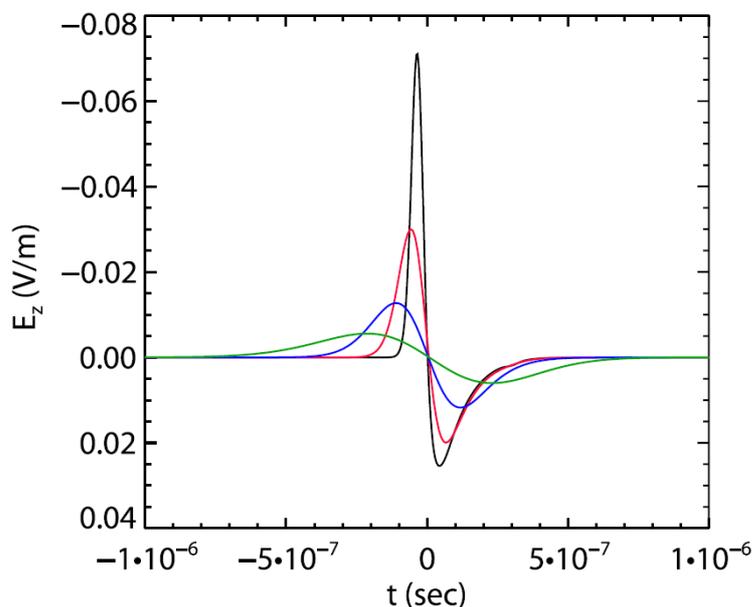


Abbildung 6.8: Simulierte Radiopulse eines Runaway Breakdowns, die durch einen Luftschauer mit einer Energie von 10^{17} eV und einer Einfallsrichtung von 45° relativ zur Senkrechten hervorgerufen werden. Die Feldstärken für die berechneten Pulse sind 250 kVm^{-1} , 375 kVm^{-1} , 625 kVm^{-1} und 1250 kVm^{-1} . Die Antenne befindet sich nahe des Luftschauerzentrums am Boden, wobei die Region mit der hohen Feldstärke in einer Höhe von 5 Kilometern liegt [Dwy09].

625 kVm^{-1} würde LOPES unter gleichen Bedingungen ein Puls mit einer Höhe von knapp $20 \mu\text{Vm}^{-1}\text{MHz}^{-1}$ messen. Das liegt an der starken Abhängigkeit der Pulsform von der Feldstärke in der Region, in der der Runaway Breakdown stattfindet. Es muss jedoch bedacht werden, dass der Rauschuntergrund in anderen Regionen deutlich geringer ist, als in Karlsruhe. Deshalb sind dann eventuell auch die Pulse eines Runaway Breakdowns sichtbar, der bei geringeren Feldstärken stattfindet.

Diese Betrachtung der im LOPES Frequenzband sichtbaren Signale ist jedoch nur als grobe Abschätzung anzusehen, da auch kleine Änderungen in der Form des Pulses einen Effekt auf das Signal im LOPES-Frequenzband haben. Eine exakte Abschätzung der zu erwartenden Pulshöhen ist daher ohne Kenntnis der genauen Simulationsergebnisse nicht möglich.

In den während Gewittern mit LOPES aufgenommenen Daten sind zahlreiche Pulse verschiedenster Höhe sichtbar. Allerdings kommen diese Pulse zum Großteil aus Horizontnähe. Das schließt einen Runaway Breakdown als Ursprung aus, da diese Signale aus der Richtung der Gewitterzelle über dem Gelände und damit nicht aus der Nähe des Horizonts kommen sollten. Da das Erstellen der Himmelskarten viel

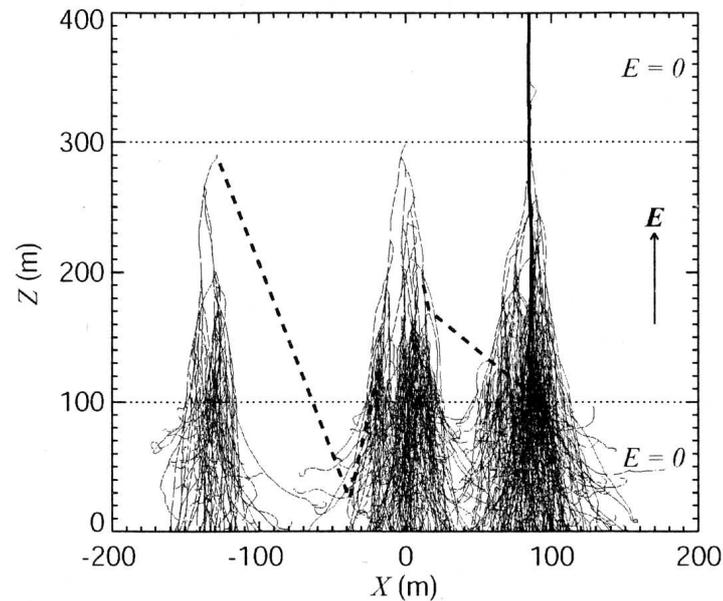


Abbildung 6.9: Simulation zum Auftreten einer relativistischen Rückkopplung während des Runaway Breakdowns durch Bremsstrahlungsphotonen oder rückwärtgestreuter Positronen [Bet09]. Die Simulation wurde mit einem 1 MeV Elektron gestartet, das oben in der Mitte in einen Bereich mit einer Feldstärke von 1000 kV m^{-1} eintrat. Links und rechts davon sind beispielhaft die zwei möglichen Arten der Rückkopplung dargestellt.

Rechenzeit benötigt, ist es schwierig, mit dieser Vorgehensweise einzelne Pulse zu finden, die auf Grund ihrer Position mögliche Kandidaten für das Signal eines Runaway Breakdowns sind.

Durch Antennen mit einem größeren Abstand und einer damit verbundenen Richtungsrekonstruktion über die Ankunftszeiten kann eine automatisierte Auswertung mit wesentlich geringerem Zeitaufwand durchgeführt werden. Dann wird eine Filterung horizontnaher Pulse und somit die Zuordnung eines beobachteten Radiopulses eines Runaway Breakdowns zu einem gemessenen Luftschauerereignis möglich. Eventuell ist dazu eine getrennte Erfassung der Radiosignale des Runaway Breakdowns in einem niedrigeren Frequenzbereich praktikabel, da diese dort wesentlich stärker sind. Dann könnte auch unterschieden werden, ob es sich um einen positiven oder negativen bipolaren Puls handelt, was die Richtung des Runaway Breakdowns widerspiegelt.

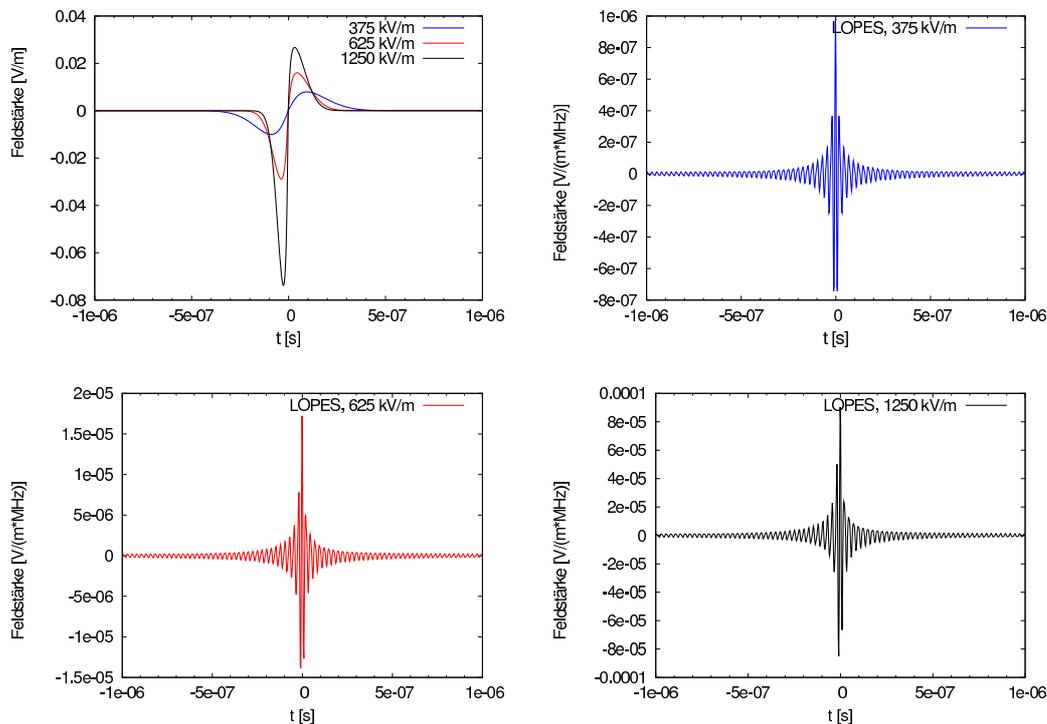


Abbildung 6.10: Parametrisierte Radiopulse eines Runaway Breakdowns und das Signal im Frequenzband von LOPES zwischen 40 und 80 MHz.

6.3 Einfluss auf die Messung des Radiosignals der Luftschauer

Die Sättigung des Eingangssignals durch Radiosignale von Blitzen tritt vor allem bei nahen Gewittern häufig auf. Dies führt zu einem Abschneiden der Schwingungen des Bandpassfilters beim höchsten zulässigen Wert des AD-Wandlers, der im Fall des bei LOPES eingesetzten 12 Bit Wandlers bei ± 2048 ADC liegt. Dies entspricht einer Eingangsspannung von 1 Volt. Infolgedessen treten bei der Fouriertransformation zusätzliche Frequenzen auf, die nur teilweise außerhalb des benutzten Frequenzbandes liegen. Dieser Anteil kann zwar herausgefiltert werden, insgesamt wird das Signal-Rausch-Verhältnis aber schlechter.

Der offensichtlichste Einfluss des starken Radiosignals einer Entladung besteht in der kompletten Überdeckung des Radiosignals des Luftschauers. Auch wenn die Wahrscheinlichkeit dafür nicht sehr groß ist, besteht im Falle des zeitlichen Übereinanderliegens der beiden Signale keine Möglichkeit, das Radiosignal des Luftschauers zu extrahieren. Dafür sind die Amplituden des Störsignals zu hoch. Die typischen Pulshöhen eines Luftschauersignals in dem von LOPES gemessenen Energiebereich liegen in der Größenordnung von einigen $\mu\text{V m}^{-1}\text{MHz}^{-1}$ bis einige $10 \mu\text{V m}^{-1}\text{MHz}^{-1}$, wohingegen das Blitzsignal Werte von einem $\text{mV m}^{-1}\text{MHz}^{-1}$ überschreiten kann.

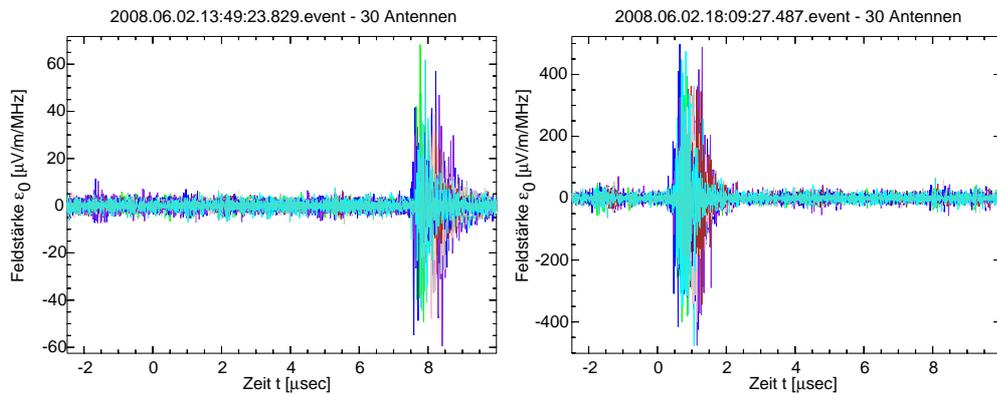


Abbildung 6.11: Kurze Radiopulse, wie sie bei LOPES während Gewittern auftreten. Sowohl die Dauer als auch in der Höhe der Pulse liegen im Bereich der Pulse, die von einem Runaway Breakdown erwartet werden. Auch der Abstand zur Ankunftszeit des Luftschauersignals, das bei $-1,8 \mu\text{s}$ erwartet wird, liegt mit wenigen Mikrosekunden im Bereich des Möglichen. Die Himmelskarten dieser Ereignisse zeigen jedoch, dass es sich um Signale entfernter Wolke-Boden-Blitze handelt.

Für die Verarbeitung der aufgenommenen Daten, vor allem für das Beamforming, ist eine sehr präzise Zeitinformation für die einzelnen Kanäle unabdingbar. Dies wird durch eine Phasenkalibration erreicht [Fal05], [Sch09b]. Dafür werden von einem Sender, der auf dem Dach eines nahen Gebäudes montiert ist, zwei Sinuswellen von $63,5$ und $68,1$ MHz ausgesendet. Die relativen Phasen dieser Signale in den einzelnen Kanälen werden miteinander verglichen. Daraus lässt sich eine Zeitdifferenz zwischen

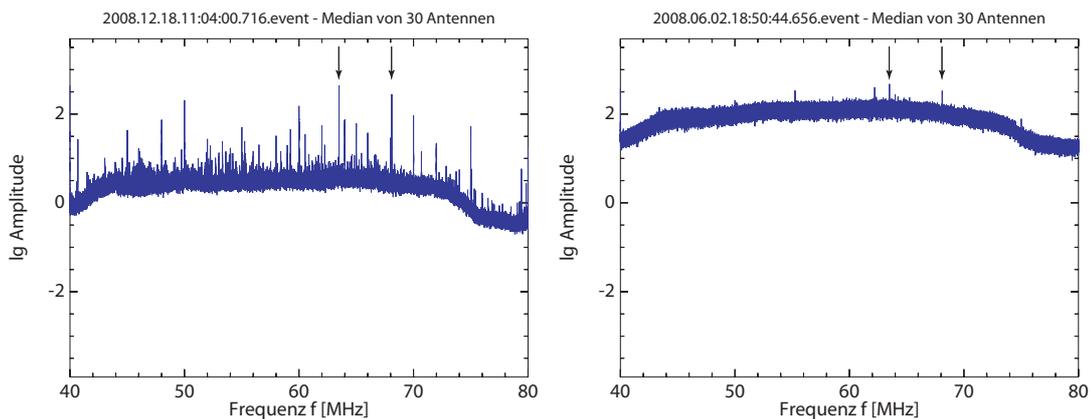


Abbildung 6.12: Spektrum eines typischen, von LOPES gemessenen, Radioereignisses (links). Durch starke Radiosignale eines Blitzes kann das Spektrum im gesamten betrachteten Frequenzbereich so stark angehoben werden, dass sich die Referenzsignale ($63,5$ und $68,1$ MHz) nicht mehr zur Zeitsynchronisation verwenden lassen.

den Kanälen bestimmen. Weichen die aus den beiden Frequenzen ermittelten Werte zu stark voneinander ab, so wird der entsprechende Kanal in der Analyse nicht berücksichtigt. Eine Erhöhung des gesamten Spektrums durch starke Störsignale (Abbildung 6.12) führt dazu, dass die Phasen der Referenzsignale nicht mehr genau genug bestimmt werden können. In Einzelfällen können die Referenzsignale im Spektrum sogar komplett überdeckt werden. Das entsprechende Ereignis lässt sich dann nicht verlässlich auswerten.

Einen weiteren Einfluss hat die Erhöhung des Spektrums auf die digitale Unterdrückung der schmalbandigen Störquellen. Diese können nicht komplett herausgefiltert werden, da sie teilweise oder ganz im Untergrund versinken. Selbst wenn das Radiosignal eines Blitzes erst nach dem interessierenden Bereich auftritt, steigt durch die unvollständige Filterung das Grundrauschen gegenüber einem Ereignis ohne zusätzlichem Signal an. Lässt man den Zeitbereich mit dem zusätzlichen Signal des Blitzes außen vor, so ist zwar eine Unterdrückung der schmalbandigen Störungen möglich, dabei leidet jedoch die Frequenzauflösung.

6.4 Mögliche Probleme für den Betrieb eines selbstgetriggerten Radiodetektors

Da LOPES durch KASCADE extern getriggert wird, kann davon ausgegangen werden, dass alle Signale außerhalb eines sehr kleinen Zeitfensters nicht von Luftschauern stammen. Für zukünftige Anwendungen der Radiodetektion von Luftschauern ist es jedoch nicht praktikabel, zusätzlich eine große Anzahl an Teilchendetektoren für die Auslösung der Datenaufnahme aufzustellen.

Deshalb wurde mit LOPES^{STAR} der Versuch unternommen, direkt auf das Radiosignal des Luftschauers zu triggern [Asc08]. Dabei werden die Pulse in jedem Kanal in Echtzeit analysiert. Nur wenn bestimmte Bedingungen an das Auftreten und die Form des Pulses erfüllt sind, wird für diesen Kanal ein Triggersignal generiert. Bei einer Koinzidenz in mehreren Kanälen wird ein so genannter Clustertrigger generiert. Dabei werden die Einfallsrichtungen der Signale bestimmt und horizontnahe Pulse zurückgewiesen.

Die starken Signale der Hauptentladungen werden dabei zuverlässig zurückgewiesen, da ihre Dauer die typische Dauer eines Luftschauersignals bei weitem übersteigt. Eine weitere Bedingung für die Aufnahme der Daten ist, dass in einem bestimmten Zeitfenster nur ein Puls auftritt. Somit können auch Ereignisse mit einer großen Anzahl kurzer Pulse zurückgewiesen werden.

Es wurden auch Ereignisse mit einzelnen starken Radiopulsen aufgenommen. Diese könnten grundsätzlich zu einem Problem für den Selbsttrigger werden, da typische Abstände zwischen diesen Pulsen in der Größenordnung von Millisekunden liegen

und die Dauer sehr kurz ist. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass diese Pulse von einer künstlichen Quelle kommen. Sie weisen Zenitwinkel von ungefähr 90° auf und werden somit über die Ankunftsrichtung unterdrückt.

Unter Umständen könnten aber die Radiosignale eines Runaway Breakdowns in Regionen hoher Feldstärke (Abschnitt 6.2) zu einer Triggerentscheidung führen. Sowohl die Höhe als auch die Dauer des Pulses ist vergleichbar mit dem Radiosignal des Luftschauers. Auch über die Richtung alleine kann keine Information über die Herkunft des Signals gewonnen werden, da Gewitterwolken relativ zu einem feststehenden Antennenfeld in beliebigen Richtungen auftreten können. Lediglich die Form des Pulses und damit das Spektrum unterscheidet sich von einem Luftschauersignal. Dieses sollte im Fall des Signals eines Runaway Breakdowns deutlich zu kleineren Frequenzen hin ansteigen. Da es fraglich ist, ob eine so detaillierte Echtzeitanalyse möglich, ist besteht die Gefahr, dass die Radiosignale des Runaway Breakdowns zu falschen Triggerentscheidungen führen, die nicht zwangsläufig als solche zu erkennen sind. Dem ist natürlich vorausgesetzt, dass diese Regionen extrem starker Feldstärken existieren. Eine genaue Kenntnis der Position der Gewitterzelle könnte jedoch bei der Unterscheidung des Ursprungs des Signals helfen.

7 Einfluss des statischen elektrischen Feldes der Atmosphäre auf die Radioemission von Luftschauern

In den starken elektrischen Feldern während Gewittern werden die Radiosignale der Luftschauer beeinflusst. Dieser Einfluss macht sich sowohl im statistischen Mittel als auch auf Basis einzelner Ereignisse bemerkbar.

7.1 Einfluss des elektrischen Feldes auf die Detektionseffizienz

Die Energieschwelle des Triggers für LOPES wurde unter die Nachweisbarkeitsschwelle des Radiosignals gelegt. Folglich werden sehr viele Ereignisse aufgenommen, in denen kein Radiosignal des Luftschauers sichtbar ist, da die Signalamplitude im Hintergrundrauschen untergeht. Nur in einem kleinen Teil der getriggerten Ereignisse ist der Radiopuls des Luftschauers zu sehen. Die Kohärenz dieser Signale wird durch die Berechnung des CC-Beams sichtbar. Da aber die Optimierungsroutine zur Suche der Position der maximalen Radioemission auch den CC-Beam einer zufälligen Kohärenz in den Daten maximiert, muss eine Schwelle definiert werden, ab der ein Signal im CC-Beam als Signal gewertet wird. Dazu bietet es sich an, das Verhältnis zwischen dem Maximum des CC-Beams und dem RMS-Wert des CC-Beams in einem Zeitbereich vor dem Luftschauersignal zu verwenden. Zur Berechnung des RMS-Wertes wird das Intervall von $-204,8 \mu\text{s}$ bis $-45,5 \mu\text{s}$ benutzt. Dieses Intervall liegt außerhalb des Einflussbereichs des für die Fouriertransformation verwendeten Hanning-Filters und vor dem Zeitpunkt des Luftschauersignals.

Der Anteil der Ereignisse oberhalb dieser Schwelle wird in Abbildung 7.1 als Funktion dieses Verhältnisses aufgetragen. Bei geringen Werten des Verhältnisses ist die Detektionseffizienz fast eins, was durch zufällige Kohärenzen in den Daten verursacht wird. Es wird also fast nur Rauschen detektiert. Erst bei größeren Werten des Verhältnisses erkennt man einen starken Abfall und ein anschließendes Abflachen. Ab hier beginnt der Bereich, in dem überwiegend echte Radiosignale detektiert worden sind. Das weitere langsame Abnehmen der detektierten Ereignisse ist auf die höhere Energie zurückzuführen, die ein Luftschauer besitzen muss, damit er in der Lage ist, ein entsprechend großes Signal-Rausch-Verhältnis zu erzeugen.

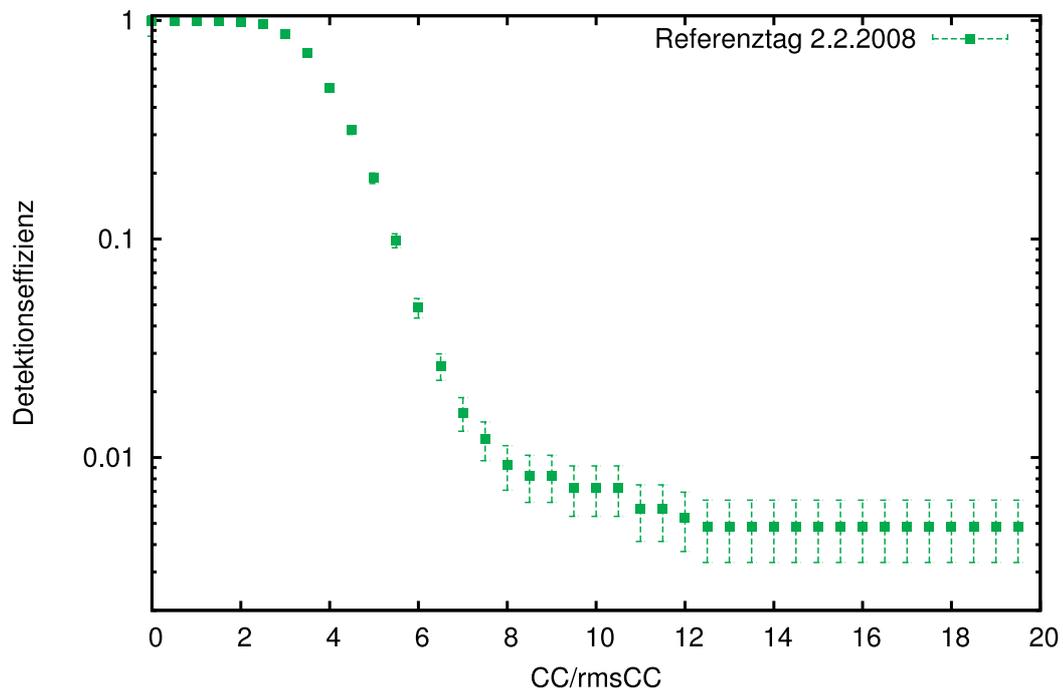


Abbildung 7.1: Detektionseffizienz des Luftschauersignals mit LOPES. Zu beachten ist die logarithmische Skalierung der Ordinate.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Radiosignal als detektiert betrachtet, dessen Verhältnis zwischen Maximum des CC-Beams und dem RMS-Wert einen Wert von acht überschreitet. Damit besitzt man nun ein Kriterium, mit dem man beurteilen kann, ob die während eines Gewitters gemessenen Radiosignale prinzipiell stärker oder schwächer werden. Die Detektionseffizienzen unabhängiger Datensätze, die bei verschiedenen Wetterbedingungen aufgenommen wurden, werden bestimmt und miteinander verglichen.

Die bestimmten Fehler sind rein statistischer Natur und durch die Anzahl der Ereignisse bestimmt, die für den jeweiligen Datensatz ausgewählt wurden.

7.1.1 Ausgewählte Datensätze

Analysiert wurden die Luftschauerereignisse, die seit 2007 während Gewittern aufgenommen wurden, wobei die Daten von 2009 nicht mehr einfließen konnten, da noch keine Kalibration der Detektoren von KASCADE-Grande vorlag und eine Prozessierung somit nicht möglich war. Auf die vorhandenen Daten wurden die Qualitätskriterien für eine erfolgreiche Rekonstruktion der Luftschauerdaten aus KASCADE angewendet. Dabei werden durch die Bedingung an die Position des Schauerkerens die meisten Ereignisse von der Analyse ausgeschlossen. Dieser muss für ein von KAS-

Zeitraum	Aufgenommene Ereignisse	Analysierte Ereignisse
2007	2544	1525
2008	2948	1871
2009 (bis Mai)	1060	0
Gesamt	6552	3396

Tabelle 7.1: Übersicht der zur Verfügung stehenden Ereignisse, die während Gewittern aufgenommen wurden. Der Unterschied zwischen den aufgenommenen und den analysierten Ereignissen kommt durch die Qualitätskriterien für die Rekonstruktion zustande.

Zeitraum	Aufgenommene Ereignisse	Analysierte Ereignisse
02.02.2008	3097	2062
10.02.2008	2532	1640
22.05.2008	3061	2894
Gesamt	8690	6596

Tabelle 7.2: Übersicht der gewählten Referenztage mit den aufgenommenen und den analysierten Ereignissen.

Dauer	Aufgenommene Ereignisse	Analysierte Ereignisse
96h 55m	5330	4795

Tabelle 7.3: Übersicht der aufgenommenen Ereignisse während Perioden starker elektrischer Felder, ohne dass ein Gewitter aufgetreten ist. Dabei wurde als Kriterium das Überschreiten eines Wertes von $\pm 3000 \text{ Vm}^{-1}$ festgelegt.

CADE rekonstruiertes Ereignis innerhalb eines Radius von 90 Metern um das Zentrum KASCADE liegen. Für KASCADE-Grande-Ereignisse muss für die Position $-420 \text{ m} < x < -50 \text{ m}$ und $-550 \text{ m} < y < -30 \text{ m}$ gelten, um eine zuverlässige Rekonstruktion zu gewährleisten. Außerdem muss der Zenitwinkel kleiner als 45° sein. Diese Kriterien führen zu einer Verringerung der Anzahl der analysierten Ereignisse gegenüber den aufgenommenen Ereignissen. Insgesamt wurden 6552 Luftschauerereignisse während Gewittern aufgenommen, von denen 3396 analysiert wurden (Tabelle 7.1). Das entspricht der Datenmenge, die im normalen Betrieb in etwas mehr als zwei Tagen aufgenommen wird.

Zum Vergleich wurde eine ähnliche Datenmenge aus Zeiträumen ohne Gewitter ausgewählt (Tabelle 7.2). Dabei handelt es sich um drei Tage mit einem elektrischen Feld, das konstant auf einem leicht negativen Wert geblieben ist und keine größeren Strukturen durch vorbeiziehende geladene Wolken zeigt.

Außerdem musste auch getestet werden, ob eine mögliche Beeinflussung außerhalb

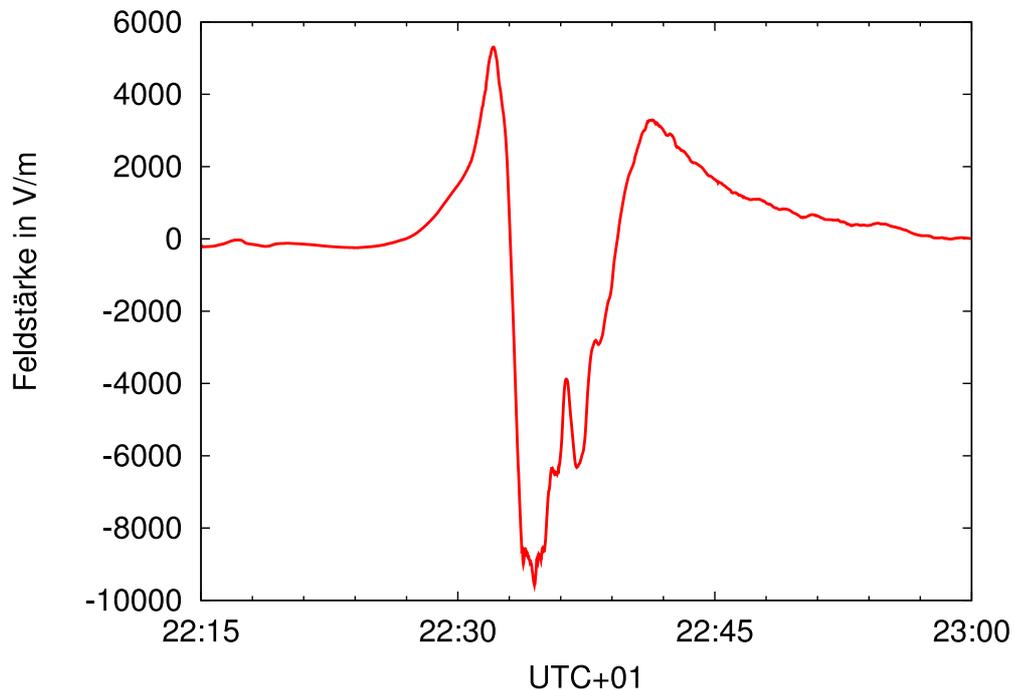


Abbildung 7.2: Beispiel eines typischen zeitlichen Verlaufs der Feldstärke am Boden beim Vorbeiziehen einer stark geladenen Wolke, ohne dass es zu einem Gewitter kommt.

von Gewitterzeiträumen stattfinden kann. Dafür kommen vor allem Wolken in Frage, deren Felder zwar nicht ausreichen, um Blitze auszulösen, aber dennoch starke Felder am Boden hervorrufen. Um dies zu untersuchen, wurde ein dritter Datensatz zusammengestellt (Tabelle 7.3). Dieser besteht aus Ereignissen, die in dem Zeitraum von 15 Minuten vor, bis 15 Minuten nach dem Auftreten starker elektrischer Felder aufgenommen wurden, ohne dass innerhalb einer halben Stunde davor oder danach ein Gewitter aufgetreten ist.

Der Startpunkt der Periode wurde 15 Minuten vor das erstmalige Überschreiten eines Absolutwertes der Feldstärke von 3000 Vm^{-1} gesetzt. Die Periode endet 15 Minuten nach dem letzten Erreichen dieser Grenze. Dies entspricht ungefähr dem Zeitraum, der in Abbildung 7.2 zu sehen ist. Überschneiden sich zwei dieser mindestens halbstündigen Perioden, so werden sie als eine Periode behandelt. Um ungefähr die gleiche Anzahl an Ereignissen zu bekommen, wie in den anderen Kategorien, wurden nicht alle zur Verfügung stehenden Ereignisse verwendet. Die Auswahl beschränkt sich auf den Zeitraum vom 1. Januar 2008 bis 31. Juli 2008.

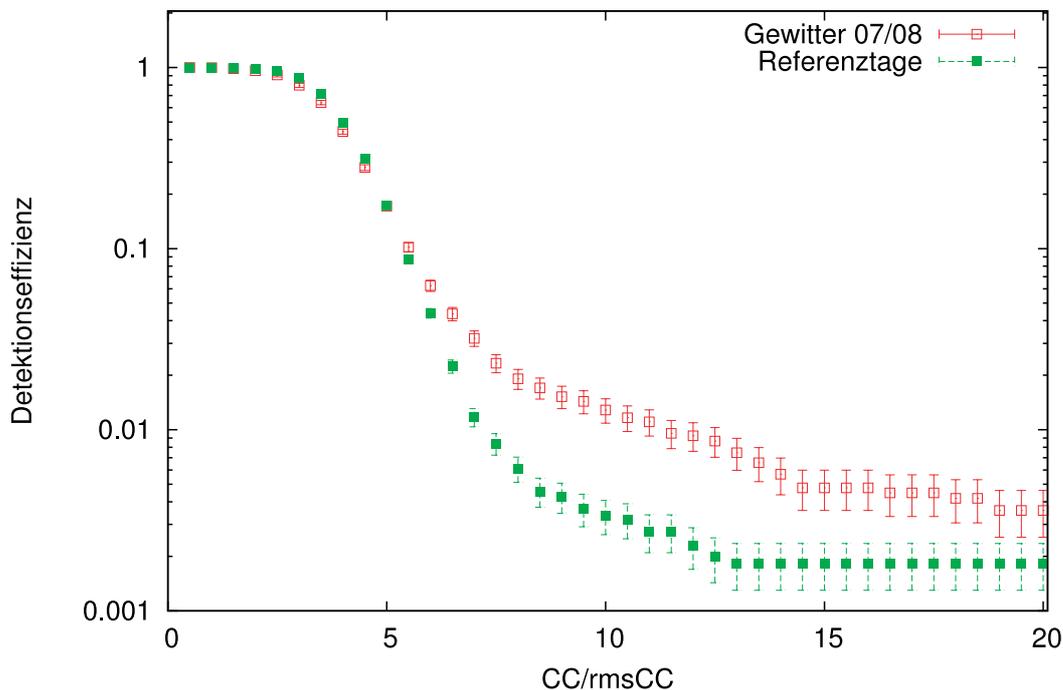


Abbildung 7.3: Detektionseffizienz der Luftschauersignale während Gewittern

7.1.2 Ergebnis der Analyse

In Abbildung 7.3 ist die Detektionseffizienz über dem Verhältnis zwischen dem Maximum des CC-Beams und seinem RMS-Wert für den Gewitterdatensatz und für den Referenzdatensatz aufgetragen. Der Unterschied zwischen den beiden Datensätzen ab einem Verhältnis von acht zwischen dem Maximum des CC-Beams und dessen RMS-Wert im Zeitbereich vor dem Puls, ist deutlich zu sehen. Dabei ist der Anteil der Ereignisse aus Gewitterzeiträumen im Mittel etwa doppelt so hoch wie der Anteil der Ereignisse, die in Schönwetterperioden aufgenommen wurden.

Das zeigt eindeutig, dass die elektrischen Felder in Gewitterwolken einen starken Einfluss auf die Radioemission der Luftschauer haben können. Die Frage ist nun aber, ab welchen Feldstärken der Einfluss signifikant wird.

Dazu wurde für den Datensatz ohne Gewitter, jedoch mit starken elektrischen Feldern ebenfalls die Detektionseffizienz berechnet. Das Ergebnis ist in Abbildung 7.4 zu sehen. Der Verlauf dieses Datensatzes liegt zwischen dem Verlauf, der aus Schönwetterperioden bestimmten Detektionseffizienz und dem Verlauf während Gewittern.

Starke elektrische Felder können also auch einen Einfluss auf die Radioemission der Luftschauer haben, wenn die Feldstärke noch nicht für das Zünden einer Blitzentladung in der Wolke ausreicht. Um abschätzen zu können, ab welchen Feldstärken dieser Effekt auftritt und ob es sich hier wirklich um einen Effekt handelt, der

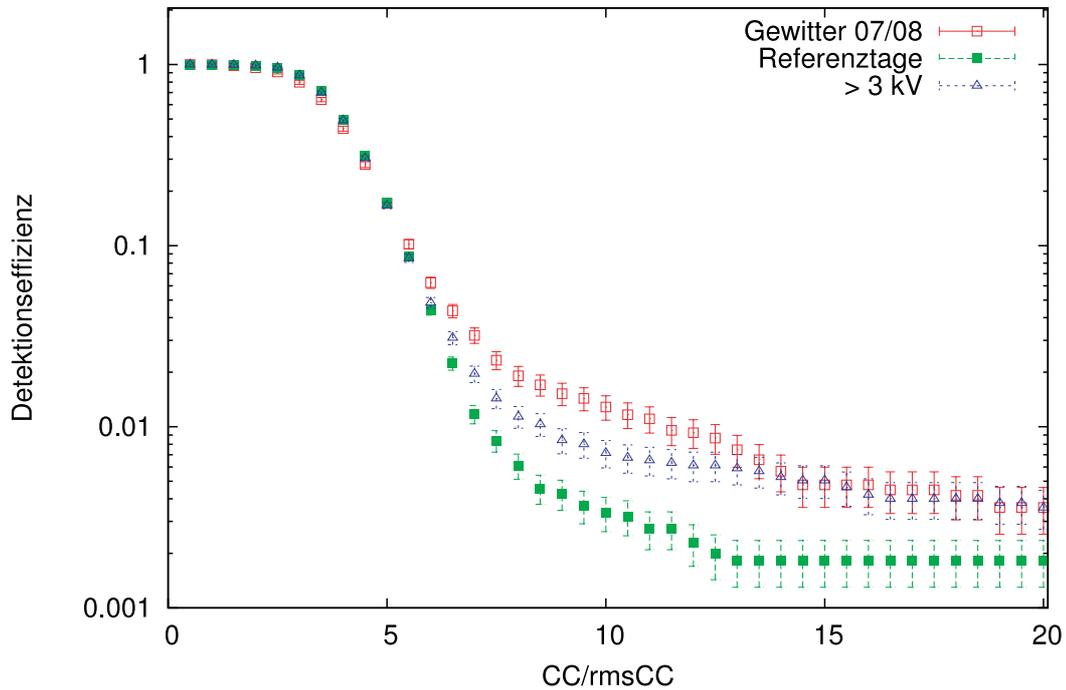


Abbildung 7.4: Detektionseffizienz der Luftschauersignale während Zeiten starker elektrischer Felder ohne Gewitter

mit der Amplitude des elektrischen Feldes zusammen hängt, wurde die Analyse mit einem weiteren Datensatz wiederholt. Dabei beschränkte sich die Auswahl der Ereignisse wieder auf Zeiträume von 15 Minuten vor, bis 15 Minuten nach dem Auftreten eines Maximums im elektrischen Feld, das zwischen 2 und 3 kV m^{-1} lag (Tabelle 7.4).

Das Ergebnis zeigt auch hier einen Unterschied zu den bei schönem Wetter aufgenommenen Ereignissen (Abbildung 7.5). Der Verlauf der Detektionseffizienz liegt quasi auf der Kurve des Datensatzes mit Feldstärken über 3 kV m^{-1} . Das liegt vermutlich daran, dass die Zeiten mit einer Feldstärke deutlich größer als 3 kV m^{-1} nur selten ohne Gewitter auftritt. Der Unterschied zwischen den beiden Datensätzen ist also nur gering und lässt sich mit der vorhandenen Statistik noch nicht zeigen. Zusätzlich nimmt die Signifikanz des Unterschieds zu den anderen Datensätzen bei größeren

Dauer	Aufgenommene Ereignisse	Analysierte Ereignisse
60h 11m	5209	4598

Tabelle 7.4: Übersicht der aufgenommenen Ereignisse während Perioden starker elektrischer Felder, ohne dass ein Gewitter aufgetreten ist. Dabei wurde als Kriterium das Erreichen eines Spitzenwertes zwischen $\pm 2000 \text{ V m}^{-1}$ und $\pm 3000 \text{ V m}^{-1}$ festgelegt.

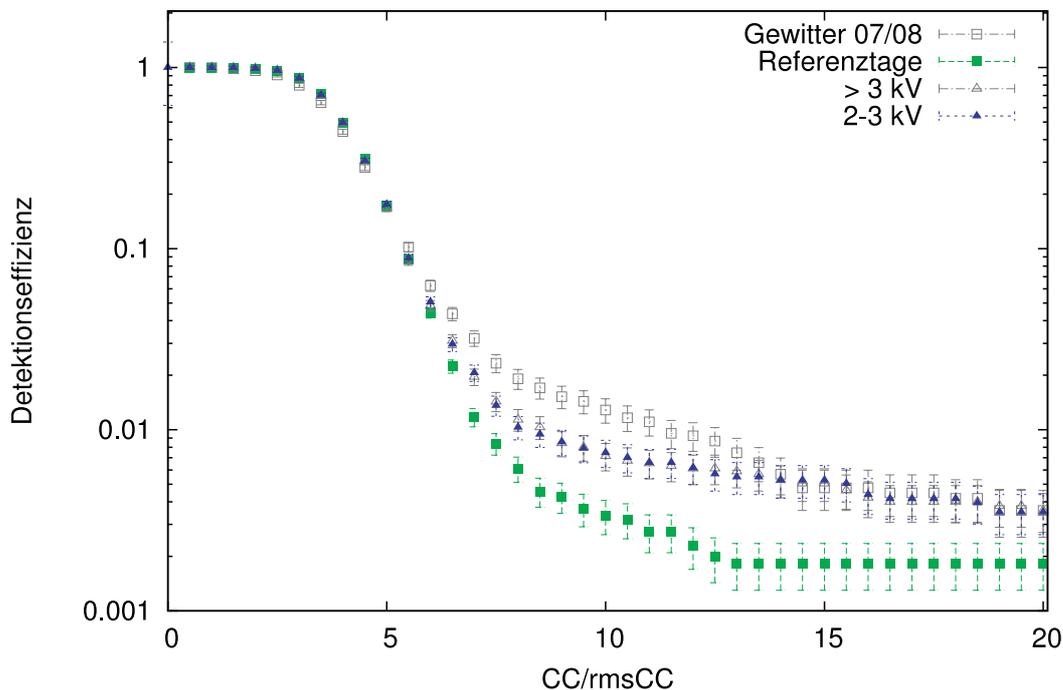


Abbildung 7.5: Vergleich der Detektionseffizienzen bei schönem Wetter und bei Wolken, die elektrische Felder zwischen 2 und 3 kVm^{-1} hervorrufen. Zum Vergleich sind die Detektionseffizienzen der anderen Datensätze in grau dargestellt.

Werten des Verhältnisses zwischen dem Maximum des CC-Beams und dessen RMS-Werts ab. Dies entspricht einem relativ gesehen niedrigeren Einfluss des elektrischen Feldes auf das Radiosignal des Luftschauers bei höheren Energien.

Es ist jedoch zu beachten, dass der mit LOPES untersuchte Energiebereich nur knapp oberhalb der Nachweisbarkeitsgrenze liegt. Da die gemessenen Radiosignale sehr schwach sind, reicht schon ein kleiner zusätzlicher Beitrag, um das Gesamtsignal signifikant zu beeinflussen. Vermutlich sinkt der relative Einfluss der elektrischen Felder, wenn man die Messung zu sehr hohen Luftschauerenergien verlagert. Ansatzweise ist das auch schon im Energiebereich von LOPES sichtbar. Der Unterschied in der Detektionseffizienz für die einzelnen Datensätze wird bei größeren Verhältnissen vom CC-Beam zu dessen RMS-Wert, was höheren Energien entspricht, immer kleiner (Abbildung 7.4 und 7.5). Deutlicher wird dieses Verhalten, wenn man den Verlauf auch für größere Werte des Verhältnisses aufträgt (Abbildung 7.6), dabei wurde auf die Fehlerbalken verzichtet, um die Übersichtlichkeit nicht unnötig zu beeinflussen. Der starke Abfall und das anschließende Ende der Detektionseffizienz für den Gewitterdatensatz in Abbildung 7.6 ist auf die geringe Ereignisstatistik zurückzuführen. In den betrachteten Zeiträumen liegen keine Ereignisse vor, deren Energie für ein stärkeres Signal ausgereicht hat. Auch die anderen Datensätze weisen bei größeren Verhält-

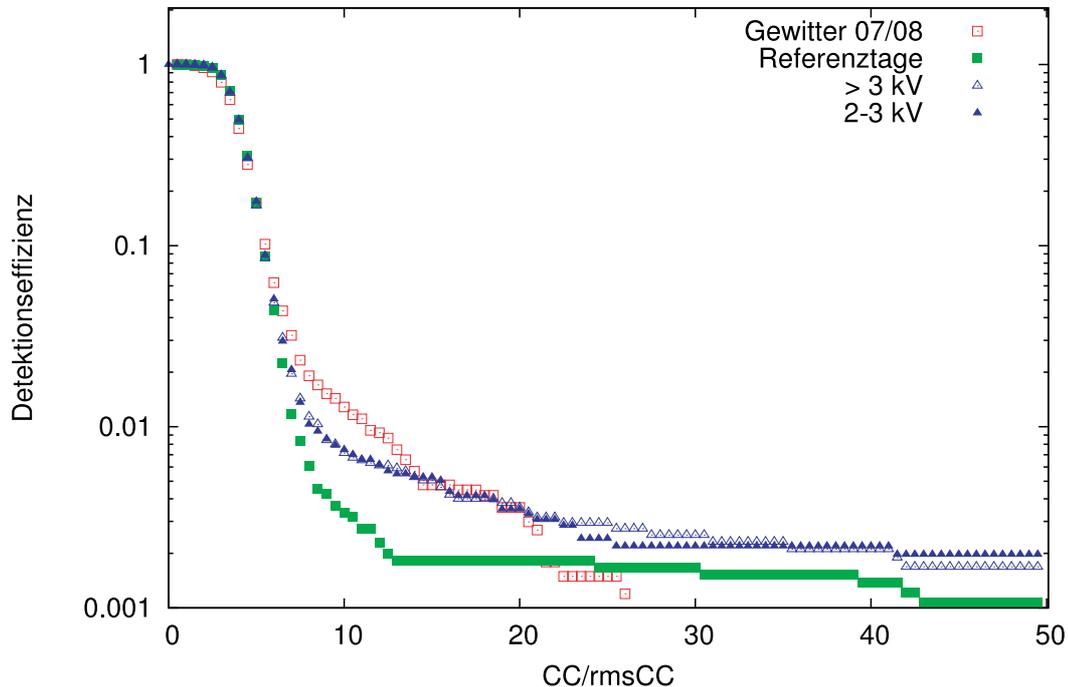


Abbildung 7.6: Vergleich der Detektionseffizienzen der Luftschauersignale unterschiedlicher Datensätze, diesmal jedoch bis zu einem Verhältnis von $CC/RMS(CC)=50$. Auf die Fehlerbalken wurde aus Übersichtlichkeitsgründen verzichtet. Anhand des Abbrechens des Gewitterdatensatzes ist der Einfluss der geringen Statistik oberhalb eines Verhältnisses von 20 gut zu sehen.

nissen des CC-Beams zu dem RMS-Wert des CC-Beams eine sehr geringe Statistik auf. Dies macht sich in der Abbildung durch die Stufen bemerkbar, die jeweils dem Wegfallen eines Ereignisses entsprechen.

Außerdem muss bedacht werden, dass eine Gewitterzelle nur einen kleinen Teil des Himmels bedeckt. Bei der geringen Statistik besteht deshalb die Möglichkeit, dass die wenigen gemessenen Ereignisse aus einer anderen Himmelsrichtung kamen und somit nicht durch die elektrischen Felder in der Wolke beeinflusst werden konnten.

Aber selbst wenn alle Zeiträume von der Analyse ausgeschlossen würden, in denen die Feldstärke einen Wert von 2000 Vm^{-1} überschritten hat, wäre der Verlust an Statistik gering. In Karlsruhe machen die Gewitterzeiträume im Mittel nur 0,55% aus, Zeiträume mit Feldstärken über 3000 Vm^{-1} entsprechen 1,90% und Zeiträume mit Feldstärken zwischen 2000 und 3000 Vm^{-1} bilden einen Anteil von 1,18%. Damit würde der Zeitraum, in dem die Radiodetektion verwendbar ist, um etwa 3,6% verringert, was auch einer Reduktion der Statistik um 3,6% entspricht.

Die höchsten mit LOPES messbaren Energien stellen gerade die untere Grenze des Energiebereichs dar, der mit dem in Argentinien geplanten Antennenfeld untersucht

werden soll. Es bedarf daher einer weitergehenden Analyse der in Argentinien aufgenommenen Daten in Bezug auf starke elektrische Felder und Gewitter, um herauszufinden, ob auch sehr hochenergetische Luftschauper mit einer Energie über 10^{18} eV signifikant beeinflusst werden. Sollte dies der Fall sein, kann der Verlust an Statistik minimiert werden, wenn die Positionen der Ladungskonzentrationen beziehungsweise der Gewitterzellen bestimmt werden können. Mit dieser zusätzlichen Information kann eine verlässliche und nachvollziehbare Entscheidung getroffen werden, ob die Gefahr besteht, dass das gemessene Signal verfälscht wurde.

7.2 Einfluss des elektrischen Feldes auf individuelle Luftschauersignale

Der Einfluss der starken elektrischen Felder macht sich jedoch nicht nur statistisch in der Gesamtheit aller aufgenommenen Ereignisse bemerkbar. Auch das Radiosignal eines individuellen Luftschauers kann beeinflusst werden, wie bereits durch Simulationen gezeigt wurde [Bui09]. Grund dafür sind Änderungen in der Entwicklung der elektromagnetischen Schauerkomponente sowie zusätzliche Emissionsmechanismen (Abschnitt 3.3). Das kann sich auf verschiedene Arten bemerkbar machen.

7.2.1 Lateralprofil des Radiosignals

Durch die zusätzlichen Beschleunigungen, die auf Grund der elektrischen Felder auf die Ladungen im Luftschauper wirken, verändert sich die Strahlungscharakteristik des Luftschauers. Die Synchrotronstrahlungskegel können einen größeren Bereich am Boden überstreichen, da die Teilchenbahnen stärker gekrümmt sind. Eine weitere Quelle von Radiostrahlung ist zum Beispiel die Beschleunigung der hinter dem Schauer zurückbleibenden Ionisationselektronen durch die elektrischen Felder. Dies führt in erster Näherung zu einer dipolähnlichen Strahlungscharakteristik, die sich dem Strahlungskegel der Synchrotronstrahlung überlagert. Dadurch kann es zu einem geänderten Lateralprofil des Radiosignals kommen. Zusätzlich kann die durch die starken Felder bedingte Änderung der räumlichen Verteilung der geladenen Teilchen selbst zu einer Änderung des Lateralprofils des Radiosignals führen.

Da der Skalenparameter des Lateralprofils auch bei normalen Bedingungen eine beträchtliche Streuung aufweist und zudem das Auftreten von Ereignissen mit ungewöhnlich flachem Lateralprofil noch nicht verstanden ist [Neh08], ist ein quantitativer Vergleich der Skalenparameter nicht aussagekräftig. Abgesehen davon ist die Anzahl der während Gewittern aufgenommenen Ereignisse, die die Qualitätskriterien erfüllen und in ausreichend vielen Antennen einen deutlichen Puls im Radiosignal aufweisen, verschwindend gering.

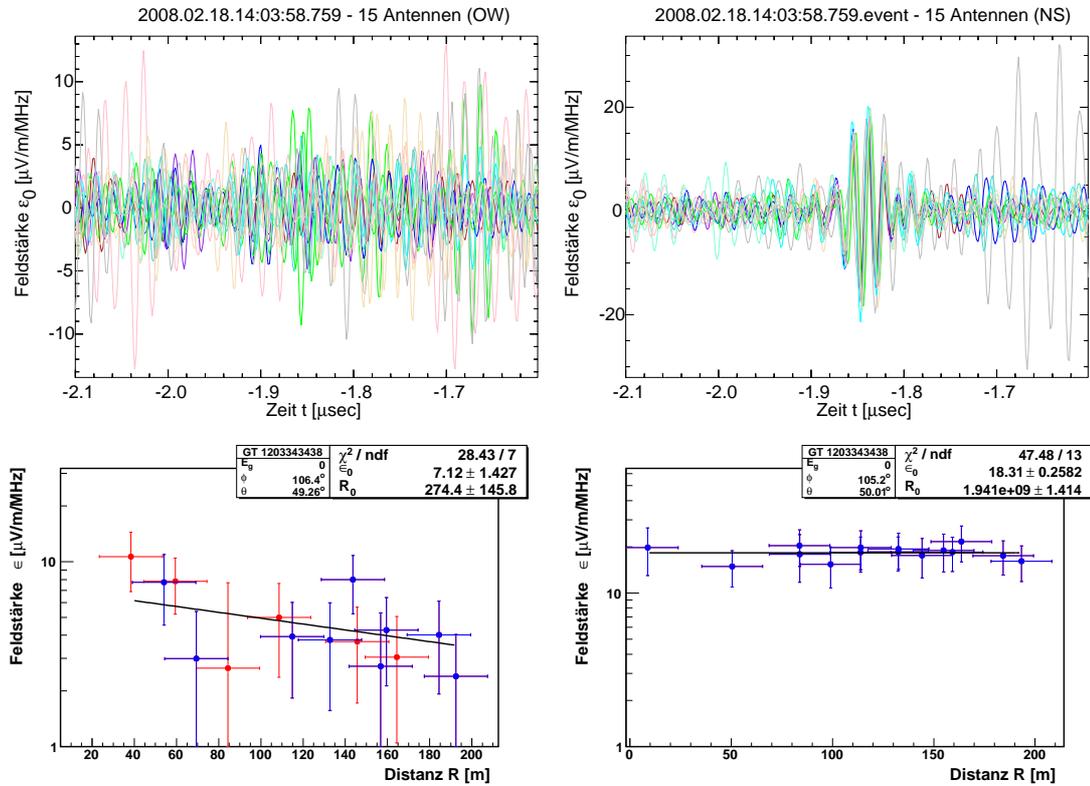


Abbildung 7.7: Radiosignale und entsprechende Lateralverteilungen eines während normalen Wetterbedingungen aufgenommenen Luftschauers. Links jeweils die Ost-West-Polarisation und rechts die Nord-Süd-Polarisation. Die mit KASCADE-Grande rekonstruierte Energie des Luftschauers beträgt $3,2 \cdot 10^{17}$ eV bei einer Einfallrichtung von $\phi = 104,5^\circ$ und $\theta = 44,6^\circ$. Rote Messpunkte haben die Qualitätskriterien nicht überstanden und werden vom Fit ausgeschlossen.

Einen beispielhaften Vergleich zeigen die Abbildungen 7.7 und 7.8. Die Ereignisse unterscheiden sich in der Elektronen- und Myonenzahl des Luftschauers um weniger als 20 Prozent. Die Unterschiede in der Richtung liegen bei weniger als 5 Grad. Abbildung 7.7 zeigt das Ereignis, das bei normalen Wetterbedingungen aufgenommen wurde. Wie bei einem Luftschauer aus östlicher Richtung ($\phi \approx 106^\circ$) zu erwarten ist, überwiegt die Nord-Süd-polarisierte Komponente des Radiosignals. Da die Ost-West-polarisierte Komponente keinen sichtbaren Puls in den Daten aufweist, ist das Ergebnis der Analyse der Lateralverteilung lediglich durch den Untergrund bestimmt und somit nicht aussagekräftig. Die Nord-Süd-polarisierte Komponente besitzt hingegen eine sehr flache Lateralverteilung.

Bei dem Gewitterereignis hingegen, zeigen beide Polarisationen ein deutliches Radiosignal des Luftschauers (Abbildung 7.8). Dadurch lassen sich für beide Polarisa-

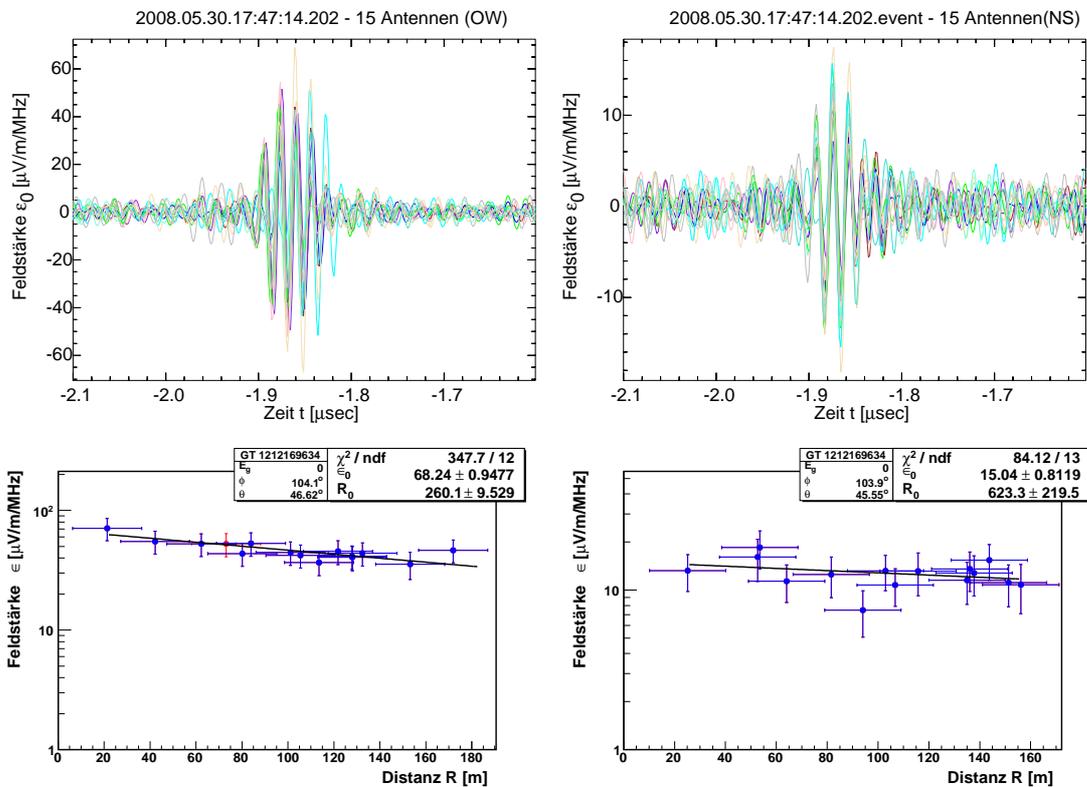


Abbildung 7.8: Radiosignale und entsprechende Lateralverteilungen eines während eines Gewitters aufgenommenen Luftschauers. Links jeweils die Ost-West-Polarisation und rechts die Nord-Süd-Polarisation. Die mit KASCADE-Grande rekonstruierte Energie des Luftschauers beträgt $4,0 \cdot 10^{17}$ eV bei einer Einfallrichtung von $\phi = 104,5^\circ$ und $\theta = 50,1^\circ$.

tionsrichtungen die Parameter der Lateralverteilung bestimmen, obwohl der Luftschauer auch hier aus östlicher Richtung ($\phi \approx 104^\circ$) eingefallen ist. Auch wenn die Lateralverteilung der Nord-Süd-Komponente recht flach ist, sind die Verteilungen beider Komponenten deutlich steiler als die Nord-Süd-Lateralverteilung des Vergleichsereignisses. Dieser Unterschied muss jedoch nicht unbedingt in Zusammenhang mit den elektrischen Feldern stehen und kann zahlreiche andere Ursachen haben, da das Zustandekommen dieser sehr flachen oder zum Zentrum hin abflachenden Lateralverteilungen noch nicht verstanden ist.

7.2.2 Polarisation des Radiosignals

Auf Grund des geomagnetischen Ursprungs der von einem Luftschauer ausgehenden Radioemission ist das Signal senkrecht polarisiert zur Ebene, die durch die Schauer-

achse und den Feldvektor des Erdmagnetfeldes aufgespannt wird. Dadurch wird das Radiosignal eines aus nördlicher Richtung kommenden Luftschauers hauptsächlich in den Kanälen nachweisbar sein, die die Ost-West-polarisierte Komponente messen.

Während Gewittern kommen hingegen häufiger Luftschauerereignisse vor, die in beiden Polarisationskanälen ein Signal zeigen, was ebenfalls durch die Abbildungen 7.7 und 7.8 veranschaulicht wird. Das ist ein klarer Hinweis auf einen zusätzlichen Emissionsmechanismus, der unabhängig vom magnetischen Feld der Erde existiert. Dieses Verhalten wurde schon früher vermutet [Bui07], kann nun aber erstmals gezeigt werden. Für eine detaillierte Analyse reicht die Statistik der während Gewittern aufgenommenen Daten jedoch noch nicht aus.

Eine mögliche Ursache für die Strahlungsbeiträge in beiden Polarisationskanälen sind die zusätzlichen Ablenkungen durch die elektrischen Felder. Aber auch das Radiosignal der beschleunigten Ionisationselektronen kann die Polarisation des Radiosignals verändern, vorausgesetzt es erreicht die Antenne zur selben Zeit wie das Radiosignal des Luftschauers.

7.2.3 Dauer des Radiopulses

Auffällig ist auch, dass die während Gewittern gemessenen Radiopulse der Luftschauer oft etwas breiter sind als die bei gutem Wetter aufgenommenen. Durch die Pulsdauer wird das Spektrum des Pulses beeinflusst. Bei der Untersuchung der spektralen Eigenschaften der Luftschauersignale ist aufgefallen, dass ein während eines Gewitters aufgenommenes Ereignis ein zu höheren Frequenzen steiler abfallendes Spektrum besitzt. Das Spektrum wurde dafür aus einem Bereich von 32 Datenpunkten (400 ns) um den Zeitpunkt des Luftschauersignal bestimmt [Nig08].

7.2.4 Einfluss auf die Kohärenz

Teilweise kommt es bei Luftschauerereignissen, die während Gewittern aufgenommen wurden, zu Problemen bei der Bestimmung der Position der maximalen Radioemission am Himmel. Um diese Position zu finden, wird für verschiedene Richtungen und Entfernungen der CC-Beam berechnet. Mit einem Maximierungs-Algorithmus wird die Höhe des CC-Beams durch Änderung der Richtung und der Entfernung optimiert. Existiert kein ausgeprägtes Maximum, können die einzelnen Radiosignale der Antennen nicht kohärent überlagert werden. Wird die Optimierung mit einem schlechten Anfangswert gestartet, zum Beispiel auf Grund einer schlechten Richtungsrekonstruktion durch KASCADE, besteht die Möglichkeit, dass nur ein lokales Maximum gefunden wird.

Eine weitere mögliche Ursache bildet die inkohärente Überlagerung der Signale der beschleunigten Ionisationselektronen und dem Radiosignal der Schauerfront. Die gemeinsame Ausdehnung der Quelle ist dann deutlich größer als die Wellenlänge,

was zum partiellen Verlust der Kohärenz führen kann. In diesem Fall existiert kein ausgeprägtes Maximum der Radioemission an einem Punkt. Dieses Verhalten wird sich in Zukunft mit LOFAR genauer untersuchen lassen, da der dort verwendete Spektralbereich, der sich von 10 bis 290 MHz erstreckt, deutlich größer ist.

8 Untersuchung möglicher Korrelationen zwischen Luftschauern und Blitzen

8.1 Beeinflussung der Blitze durch Luftschauer

Wie bereits in Abschnitt 4.4.4 beschrieben, dienen die Elektronen im Luftschauer als Saatelektronen für die Ausbildung eines Runaway Breakdowns. Auch wenn inzwischen Hinweise existieren, dass jede Stufe bei der Ausbildung eines *stepped leaders* mit einem Runaway Breakdown zusammenhängt, ist noch immer unklar, wie die komplette Blitzentstehung abläuft.

Ein Luftschauer, dessen Maximum in der Schauerentwicklung mit den Regionen hoher Feldstärke in einer Gewitterwolke zusammen fällt, erzeugt eine sehr große Anzahl potentieller Saatelektronen, die zur Ausbildung zahlreicher Runaway Breakdowns, so genannter *micro runaway breakdowns*, in der Gewitterwolke führen. Die durch diesen Prozess erzeugten Ionisationselektronen führen zu einer stark erhöhten Leitfähigkeit in der Wolke und kann somit zu einer Ladungsumverteilung führen. Es ist bisher nicht geklärt, ob ein Zusammenhang mit den Vorentladungen in der Wolke (*preliminary breakdown*) besteht.

Grundsätzlich ist es denkbar, dass die Bildung eines Blitzes bei entsprechenden atmosphärischen Bedingungen durch einen Luftschauer gestartet oder zumindest begünstigt wird. Dabei ist bisher jedoch vollkommen unbekannt, in welchem Energiebereich ein Luftschauer für eine solche Beeinflussung liegen muss. Abgesehen von der Energie spielt auch die Einfallrichtung des Luftschauers eine wichtige Rolle. Da eine Gewitterzelle räumlich stark begrenzt ist, kann ein Zusammenhang nur dann bestehen, wenn sich der Luftschauer durch die entsprechenden Bereiche hoher Feldstärken fortbewegt.

8.2 Experimentelle Ergebnisse mit LOPES

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten, nach einer solchen Korrelation mit LOPES zu suchen. Zum einen lassen sich die Zeitdifferenzen zwischen einem Luftschauerereignis und einem Sprung im elektrischen Feld untersuchen. Die andere Methode besteht in der Suche nach einer Richtungskorrelation zwischen einem Luftschauerereignis und

einem darauf folgenden Blitz, dessen Radiosignal im selben Ereignis aufgenommen wurde.

8.2.1 Zeitkorrelation zwischen Luftschauerereignissen und Unstetigkeiten im elektrischen Feld

Die Messung des elektrischen Felds erfolgt unabhängig von den Radiomessungen. Da die Feldmühle eine interne Uhr besitzt, die regelmäßig synchronisiert werden muss, kann prinzipiell eine Verschiebung zwischen den Zeitstempeln der Feldstärkemessungen und der Radiodaten auftreten. Um das zu vermeiden wurde ein Zeitraum ausgewählt, in dem die korrekte Synchronisation der internen Uhr sichergestellt werden konnte. Innerhalb dieses Zeitraums haben mehrere Gewitter stattgefunden. (Tabelle 8.1)

Es wurden keine Qualitätskriterien bei der Auswahl der LOPES-Daten zugrunde gelegt, da für diese Untersuchung keine Rekonstruktion oder Kalibration der Daten der Teilchendetektoren verwendet werden muss.

Bei der Auswahl der Unstetigkeiten im elektrischen Feld wurden lediglich Sprünge mit einer Feldstärkedifferenz von mindestens $\pm 300 \text{Vm}^{-1}$ ausgewählt. Dasselbe Kriterium wird auch für den Wechsel der Datenaufnahme in den Gewittermodus angewendet [Neh08]. Zur Berechnung der Zeitdifferenz zwischen dem Luftschauerereignis und einem Sprung im elektrischen Feld wurden aus Kausalitätsgründen nur die Unstetigkeitsstellen berücksichtigt, deren Zeitstempel nach dem Luftschauerereignis liegt. Dieser Annahme liegt zu Grunde, dass sich der Luftschauer mit einer Geschwindigkeit durch die Atmosphäre bewegt, die nicht viel langsamer ist, als die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Radiowellen. Wenn der Luftschauer die Entladung startet oder begünstigt, sollte das Radiosignal der darauf folgenden Blitzes nicht vor dem Luftschauer nachweisbar sein.

Tag des Gewitters	Anzahl der LOPES-Ereignisse
24.04.2009	281
09.05.2009	116
10.05.2009	41
11.05.2009	119
13.05.2009	135
14.05.2009	131
Gesamter Datensatz	823

Tabelle 8.1: Ausgewählter Datensatz zur Untersuchung der Zeitkorrelation. Es wurden keine Qualitätskriterien angewendet, da zur Untersuchung der Zeitkorrelation keine Rekonstruktion benötigt wird.

Die Entwicklung eines Blitzes von den ersten Prozessen in der Wolke (*preliminary breakdown*) bis zur Hauptentladung, die sich im elektrischen Feld als Sprung bemerkbar macht, vergehen zwischen einigen zehn und wenigen hundert Millisekunden. Im Fall eines Zusammenhangs würde man also eine Häufung im ersten Bin des Histogramms erwarten, entsprechend einer Zeitdifferenz zwischen dem Sprung in den Feldmühlendaten und dem Auftreten eines Ereignisses bei KASCADE von weniger als einer Sekunde. Da bei einem Prozess, der der Poissonstatistik folgt, die Abstände zwischen einem beliebig ausgewählten Zeitpunkt und dem Auftreten eines Ereignisses exponentiell verteilt sind, würde man auch ohne Zusammenhang zwischen Luftschauern und Blitzen eine Häufung in den ersten Bins des Histogrammes erwarten.

Um zwischen diesen Effekten unterscheiden zu können, wurden die Berechnungen wiederholt, wobei die Datensätze einmal um 100 Sekunden und einmal um 200 Sekunden gegeneinander verschoben wurden. Für die Berechnung der Zeitdifferenzen wurde dann wieder der nächste auf das Luftschauerereignis folgende Sprung im verschobenen elektrischen Feld verwendet.

Die drei erhaltenen Verteilungen (Abbildung 8.1 und 8.2) wurden mit dem Kolmogorow-Smirnow-Test auf Kompatibilität getestet. Dabei wurden im ersten Durchlauf nur Zeitunterschiede bis 25 Sekunden berücksichtigt. Zum Vergleich wurde ein weiterer Test mit den Zeitdifferenzen bis 250 Sekunden durchgeführt. In beiden Fällen lagen die Daten gebinnt, mit einer Schrittweite von 0,5 Sekunden vor.

Der Test liefert für die Zeitdifferenzen bis 25 Sekunden eine Wahrscheinlichkeit der

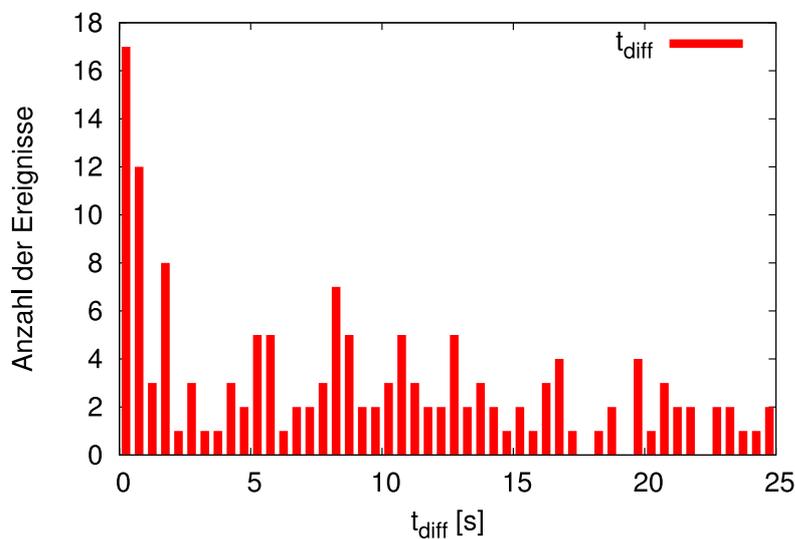


Abbildung 8.1: Verteilung der Zeitdifferenzen zwischen einem im Gewittermodus aufgezeichneten LOPES-Ereignis und einem nachfolgenden Sprung im elektrischen Feld (Sprunghöhe > 300 V/m).

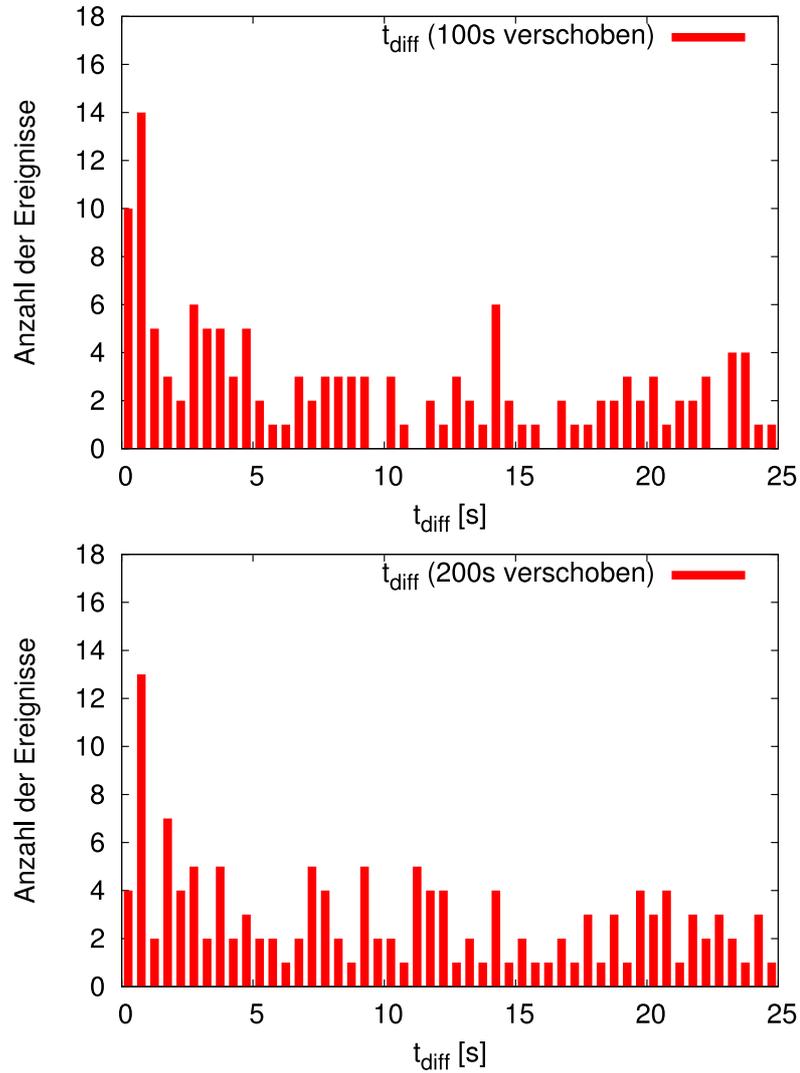


Abbildung 8.2: Verteilung der Zeitdifferenzen wie in Abbildung 8.1, wobei die Datensätze um 100 Sekunden (oben) und 200 Sekunden (unten) gegeneinander verschoben wurden.

Übereinstimmung der Verteilung der Originaldaten mit den Vershobenen von

$$\mathcal{P}_{100s}(t_{diff} \leq 25 \text{ s}) = 0.32$$

$$\mathcal{P}_{200s}(t_{diff} \leq 25 \text{ s}) = 0.78$$

Werden Zeitdifferenzen bis 250 Sekunden berücksichtigt, gibt es quasi keinen Unterschied in den Verteilungen. Die Wahrscheinlichkeiten für das Übereinstimmen der zugrunde liegenden Verteilungen ist in diesem Fall

$$\mathcal{P}_{100s}(t_{diff} \leq 250 \text{ s}) = 0.90$$

$$\mathcal{P}_{200s}(t_{diff} \leq 250 \text{ s}) = 0.93$$

Der Vergleich der Zeiten des Auftretens eines Sprungs im elektrischen Feld, der eine Entladung anzeigt, und der Zeitstempel der mit LOPES aufgenommenen Luftschauerereignisse zeigt mit dieser groben Zeitauflösung also keinen Zusammenhang. Dabei muss jedoch bedacht werden, dass die Energieschwelle des von KASCADE an LOPES weitergegebenen Trigger für volle Effizienz bei ungefähr 10^{16} eV liegt. Eine direkte Korrelation zwischen den viel häufigeren niederenergetischeren Luftschauern und darauf folgende Entladungen kann daher nicht ausgeschlossen werden. Denn die für den Runaway Breakdown benötigten Elektronenenergien oberhalb von ungefähr 1 MeV kommen auch in niederenergetischen Luftschauern in großer Zahl vor.

Um den Energiebereich für volle Effizienz von KASCADE bis zur unteren Grenze von etwa 10^{15} eV für die Suche nach einer zeitlichen Korrelation auszunutzen, reicht die Zeitauflösung der elektrischen Feldmühle nicht aus. Da der Zeitstempel eine Unsicherheit von ungefähr einer Sekunde hat und auch nur ein Datenpunkt je Sekunde geschrieben wird, kann der Zeitpunkt eines Blitzes lediglich mit einer Genauigkeit von ein bis zwei Sekunden bestimmt werden. Dies ist zu wenig für die Ereignisrate von KASCADE, die ungefähr 4 Hz beträgt.

8.2.2 Richtungskorrelation von Luftschauern und Blitzen

Betrachtet man die von LOPES während Gewittern aufgezeichneten Daten, zeigt ein recht großer Anteil der Ereignisse zusätzliche Signale, die während dem normalen Betrieb nicht auftreten. Meistens befindet sich in diesen Ereignissen ein Teil des Signals auch deutlich vor dem Triggerzeitpunkt. Ein direkter Zusammenhang des Luftschauerereignisses mit der Quelle des zusätzlichen Radiosignals kann in diesen Fällen ausgeschlossen werden. Es gibt jedoch einen kleinen Anteil der aufgenommenen Daten, in denen ein Radiosignal erst deutlich nach dem Triggerzeitpunkt auftritt (Abbildung 8.3). Diese Ereignisse sind Kandidaten, bei denen eine mögliche Korrelation zwischen dem einfallenden Luftschauer und der anschließenden Entladung bestehen könnte.

Um die Richtung der Quelle der Entladung zu bestimmen, wurde aus dem jeweiligen Ausschnitt der Radiodaten wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, eine Himmelskarte der kohärenten Radioemission berechnet. Je kohärenter und stärker das Signal aus einer bestimmten Richtung ist, desto höher ist der Wert des entsprechenden Pixels und wird in der Himmelskarte durch einen kräftigeren Blauton dargestellt. Inkohärente Signale zeichnen sich durch einen kleinen CC-Beam aus und werden, da sie im Mittel leicht negativ sind, in der Himmelskarte in hellem Rot dargestellt (Abbildung 8.3).

Auf Grund der Nebenkeulen des Antennenfeldes sind in der Himmelskarte die

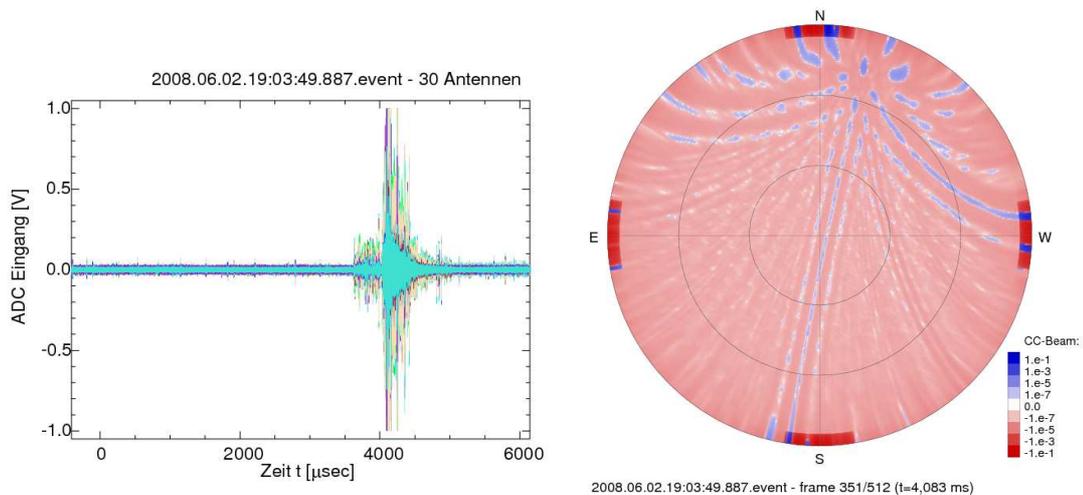


Abbildung 8.3: Beispiel eines Luftschauerereignisses, das zwar kein sichtbares Luftschauersignal aber dafür ein starkes Radiosignal eines Blitzes deutlich nach dem Triggerzeitpunkt ($t = 0$) aufweist (links). Die Himmelskarte des CC-Beams zeigt die Quelle der Emission (rechts). Zur Berechnung wurde der Zeitbereich von 4083 bis 4095 μs zugrunde gelegt.

Nebenmaxima zu sehen, die sich von der Quellregion strahlenförmig nach außen erstrecken. Im Fall des Ereignisses in Abbildung 8.3 handelt es sich also um einen Blitz innerhalb einer Wolke, der von LOPES aus gesehen in Richtung Nord-Nordwest in einer Höhe von knapp 20° aufgetreten ist. Der Luftschauer, der dieses Ereignis getriggert hat, kam jedoch eher aus östlicher Richtung ($\phi = 63^\circ$) und weist einen Zenitwinkel von nur 12° auf. Ein Zusammenhang zwischen dem Luftschauer und der Entladung kann in diesem Fall also ausgeschlossen werden.

Die meisten starken, von Blitzen verursachten Signale haben eine Quelle, die recht weit entfernt ist. Das wird in der Himmelskarte dadurch deutlich, dass der Bereich der kohärenten Emission selten über einer Höhe von zwanzig Grad über dem Horizont liegt. Daraus lässt sich bei einem Wolke-Boden-Blitz in erster Näherung die Entfernung der Entladung abschätzen. Geht man beispielsweise von einer Höhe der negativen Ladungsregion von 4 km über dem Boden aus, bei einer oberen Grenze der Quelle von 20° , so erhält man eine Entfernung von ungefähr 11 km. Teilweise ist die Elektronik von LOPES schon bei diesen recht weit entfernten Ereignissen in Sättigung geraten.

Einige wenige während Gewittern aufgezeichnete Ereignisse weisen solch eine Sättigung in großen Teilen des aufgenommenen Zeitbereiches auf. Leider können diese Ereignisse auf Grund der Sättigung nicht genauer analysiert werden. Es ist jedoch zu vermuten, dass es sich hier um Entladungen in unmittelbarer Nähe des Forschungszentrums handelt. Würde ein Zusammenhang zwischen Luftschauern und

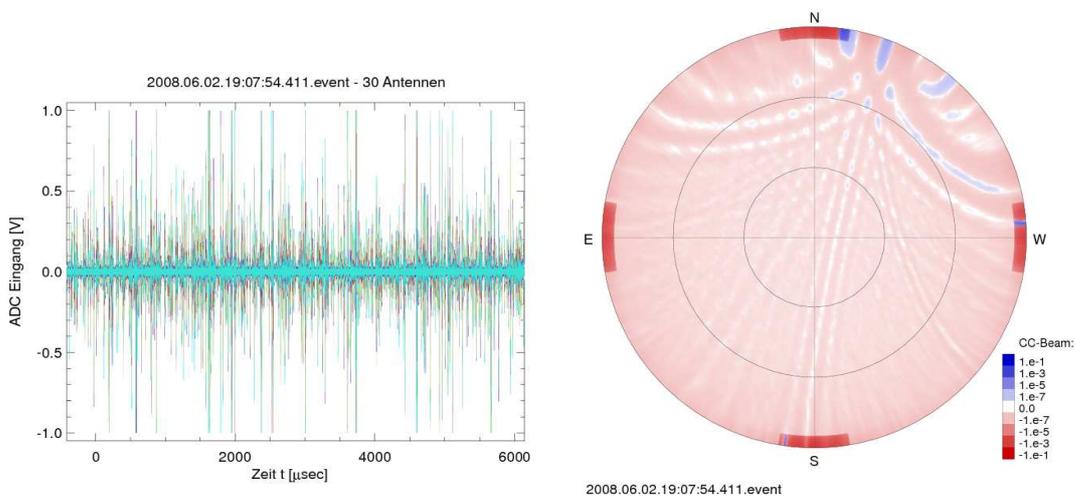


Abbildung 8.4: Himmelskarte der Radioemission eines Wolke-Boden-Blitzes. Das kohärente Radiosignal des Ionisationskanals ist in Richtung Nord-Nordwest zu sehen und erstreckt sich von einer Höhe von ungefähr fünfzehn Grad bis zum Horizont.

Blitzen existieren, wären genau das die Ereignisse, mit denen ein simultaner Nachweis sowohl des Radiosignals des Luftschauers als auch des Blitzes gelingen könnte. Allerdings ist dafür der Messbereich des LOPES-Experiments nicht ausgelegt.

8.3 Mögliche Verbesserungen des experimentellen Aufbaus

Die Frage nach einem Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Luftschauern und der Ausbildung von Blitzen könnte mit zukünftigen Experimenten beantwortet werden. Der Aufwand zur Umsetzung eines geeigneten experimentellen Designs ist klein, verglichen mit den anderen Teilen des Experiments.

Zur Suche nach zeitlichen Korrelationen zwischen Luftschauern und Blitzen wäre ein kontinuierlich aufgezeichnetes Radiosignal im kHz-Bereich besser geeignet als die Daten des statischen elektrischen Feldes. Eine gut synchronisierte Uhr vorausgesetzt, sollte sich daraus der Anfangszeitpunkt eines Blitzes mit mindestens Millisekunden-Genauigkeit bestimmen lassen. Vor allem ein eventuell auftretender Runaway Breakdown zu Beginn eines Blitzes sollte im Frequenzbereich unter 1 MHz deutlich sichtbar sein. In Verbindung mit dem in LOPES bewährten Beamforming, würde sich die Entwicklung der Blitze sowohl räumlich als auch zeitlich verfolgen lassen. Die mit der niedrigeren Frequenz verbundene geringere Datenrate würde eine durchgängige Aufzeichnung des Radiountergrunds während Gewittern erlauben. Die Antennen sollten eine möglichst schwach ausgeprägte Richtcharakteristik besitzen, wobei sie auf Grund der zur erwartenden Signalstärke nicht besonders empfindlich zu sein brauchen.

Als Ergänzung kann auch eine Feldmühle mit höherer Aufnahme­rate interessant sein. Allerdings können damit nur einige zehn Messungen je Sekunde durchgeführt werden. Entsprechend kann der Zeitpunkt eines Blitzes nicht genauer als einige hundertstel Sekunden bestimmt werden. Durch mehrere Messstationen im Abstand einiger Kilometer könnte man auch Informationen über die Position der Ladungskonzentrationen in der Atmosphäre gewinnen.

Um verlässliche Daten zu bekommen, wäre ein Luftschauerexperiment mit einer deutlich größeren räumlichen Ausdehnung als LOPES, beziehungsweise KASCADE, hilfreich. Dadurch könnte ein viel größerer Anteil der Luftschauer, die die Gewitterzelle durchquert haben, nachgewiesen werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde die Beeinflussung der Radiodetektion ausgehnter Luftschauer durch die starken elektrischen Felder während Gewittern, sowie durch die zusätzlichen Radiosignale der Blitze untersucht. Dazu wurden im ersten Teil der Arbeit die Grundlagen des Radionachweises von Luftschauern sowie das theoretische Verständnis des Emissionsmechanismus dargestellt. Es wurde auch auf die elektrischen Prozesse, die während eines Gewitters in der Atmosphäre ablaufen, eingegangen, da sie die Basis für die Betrachtung der Einflüsse auf die Luftschauermessungen bilden. Der Darstellung der physikalischen Grundlagen folgt ein Überblick über das LOPES-Experiment sowie über die Standardanalyse der aufgenommenen Daten.

Auf der Basis dieser Informationen wurden zunächst die Radiosignale der elektrischen Prozesse während Gewittern betrachtet, die eine starke Untergrundquelle für die Messung der im Verhältnis dazu schwachen Radiosignale der Luftschauer darstellen. Die beobachteten Radiosignale konnten klassifiziert und unterschiedlichen Blitztypen zugeordnet werden. Dabei hat sich die Visualisierung der Radioemission in Form einer Himmelskarte als sehr nützlich erwiesen. Es hat sich herausgestellt, dass die breitbandigen Radiosignale eines Blitzes innerhalb einer Wolke mit ein bis zwei Millisekunden recht kurz sind und dadurch das eigentliche Luftschauersignal nur selten überdecken. Allerdings wird durch die enorme Stärke dieses Radiosignals das gesamte Spektrum so stark angehoben, dass die auf dem Spektrum basierenden Analyseschritte, wie die Phasenkalibration oder die Unterdrückung schmalbandiger Störquellen, in diesem Zeitraum nicht mehr durchführbar sind. Die starken Radiosignale von Wolke-Boden-Blitzen halten mit bis zu mehreren hundert Millisekunden wesentlich länger an. Dadurch überdecken sie jedes andere Radiosignal in dem entsprechenden Zeitraum.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Analyse der Untergrundsignale im Hinblick auf eine Beeinträchtigung eines selbstgetriggerten Radiodetektors, wie er für zukünftige großräumige Anwendungen der Radiodetektion von Luftschauern geplant ist. Da die Radiosignale der eigentlichen Blitzenladungen von den Selektionsalgorithmen des Triggersystems erfasst werden, sind vor allem die vorhergesagten Radiosignale des Runaway Breakdowns in den Mittelpunkt des Interesses gerückt. Obwohl der Großteil der Leistung dieser kurzen bipolaren Pulse unterhalb des verwendeten Frequenzbereichs emittiert wird, könnten diese Signale trotz des hohen Radiountergrunds in der Umgebung von Karlsruhe mit LOPES gemessen werden. In diesem Fall können diese

kurzen Radiopulse zu falschen Triggerentscheidungen während Gewittern führen. Im Rahmen der Analyse dieser Untergrundsignale sind kurze, immer ähnlich starke Radiopulse aufgefallen, die sowohl während Gewittern, als auch bei schönem Wetter auftreten. Die Analyse dieser Ereignisse hat gezeigt, dass diese Radiopulse immer aus derselben Richtung kommen. Die Position der Quelle konnte auf den Umkreis des Geländes des Instituts für technische Chemie am Forschungszentrum Karlsruhe eingegrenzt, aber letztlich nicht identifiziert werden.

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit wurde auf den experimentellen Nachweis der Beeinflussung des Radiosignals gelegt, das von einem Luftschauer ausgeht. Dazu wurde ausgenutzt, dass in den meisten getriggerten Ereignissen kein Radiosignal eines Luftschauers sichtbar ist. Es ist deshalb sinnvoll eine Schwelle zu definieren, ab der ein Signal in den Radiodaten als solches gewertet wird. Dazu wurde der CC-Beam verwendet, da dadurch nur kohärente Signale selektiert werden. Mit einer so definierten Schwelle wurden die während unterschiedlichen Bedingungen aufgenommenen Daten im Bezug auf die Anzahl der detektierten Ereignisse analysiert.

Es hat sich gezeigt, dass deutlich mehr Ereignisse aus dem während Gewittern aufgenommenen Datensatz dieses Detektionskriterium erfüllen, als aus dem bei schönem Wetter aufgenommenen Referenzdatensatz. Überraschenderweise zeigen eine solche Erhöhung auch Datensätze, deren Ereignisse in Zeiträumen starker elektrischer Felder aufgenommen wurden, ohne dass ein Gewitter aufgetreten ist. Im Vergleich zu einem Anteil von 0,34% der Ereignisse, die während schönem Wetter einen CC-Beam aufweisen, der das Zehnfache des RMS-Werts des CC-Beams im Zeitraum vor dem Luftschauersignal beträgt, findet man während Gewittern einen Anteil von 1,28% der aufgenommenen Ereignisse, die dieses Kriterium erfüllen. Wenn das elektrische Feld am Boden einen Wert von 2 kVm^{-1} überschreitet, ohne dass ein Gewitter auftritt, liegt der Anteil bei ungefähr 0,7%.

Bei hohen Luftschauerenergien wird der Unterschied zwischen den Datensätzen sehr klein. Allerdings wird auch die Statistik der LOPES-Daten in diesem Energiebereich so gering, dass keine verlässlichen Aussagen über die Stärke der Beeinflussung möglich sind. Dies muss in zukünftigen Experimenten, die Zugang zu höheren Luftschauerenergien haben, weiter untersucht werden.

Für einzelne Luftschauerereignisse, die während Gewittern aufgenommen wurden, konnten bei schönem Wetter aufgenommene Zwillings-Ereignisse mit sehr ähnlichen rekonstruierten Luftschauerparametern gefunden werden. Die Signale in diesen Ereignissen unterscheiden sich teilweise sehr stark. Im Gegensatz zu der Erkenntnis, dass je nach Einfallrichtung relativ zum Erdmagnetfeld, eine Polarisationsrichtung überwiegt, wurden bei den Zwillingsereignissen während Gewittern teilweise Signale in beiden Polarisationskanälen entdeckt. Auch wenn die Statistik der Ereignisse mit einem sichtbaren Luftschauersignal während Gewittern noch zu gering für eine detaillierte Analyse ist, deutet die Existenz solcher Ereignisse stark auf eine Änderung des Emissionsmechanismus durch die elektrischen Felder hin.

Bis die Art und die Umstände der Beeinflussung genauer verstanden sind, sollten die Ereignisse aus Gewitterzeiträumen auch bei zukünftigen Experimenten von der standardmäßigen Analyse ausgeschlossen werden. Aber selbst wenn zusätzlich auch noch die Perioden starker elektrischer Felder von der Analyse ausgeschlossen werden, können die Messungen in über 95 Prozent der Zeit durchgeführt werden. Die von der Analyse ausgeschlossenen Ereignisse sollten jedoch zusammen mit detaillierten meteorologischen Informationen betrachtet und mit den unter normalen Bedingungen aufgenommenen Daten verglichen werden. Die Überwachung der elektrischen Bedingungen in der Atmosphäre auf der Basis von Feldmühlenmessungen hat sich bei LOPES bewährt. Hilfreich könnte dabei die Lokalisierung der Ladungszentren über simultane Messungen mit einer größeren Anzahl von Feldmühlen sein. So könnte entschieden werden, ob ein Luftschauer eine Region starker elektrischer Felder durchlaufen hat oder nicht, was eine wesentlich fundiertere Selektion der interessierenden Ereignisse zulassen würde.

Um der Frage eines Zusammenhangs zwischen ausgedehnten Luftschauern und der Entstehung von Blitzen nachzugehen, ist die Verwendung der zur Messung des Radiosignals der Luftschauer gedachten Antennen nicht praktikabel. Das hat sich bei der Betrachtung der mit LOPES aufgenommenen Daten gezeigt. Zum einen ist die Dauer der aufgenommenen Ereignisse viel zu kurz, zum anderen ist die gesamte Messelektronik viel zu empfindlich für die extrem starken Radiosignale der Blitze. Hinzu kommt noch, dass Messungen bei niedrigeren Frequenzen zur Unterscheidung des Blitztypes besser geeignet sind. Der wesentlich höhere Untergrund in diesem Frequenzbereich spielt auf Grund der Stärke der interessierenden Signale eine untergeordnete Rolle. Die Beobachtung bei niedrigeren Frequenzen entschärft auch das Problem der entstehenden Datenmenge, so dass eventuell eine kontinuierliche Überwachung des Radioundergrunds während Gewittern möglich wird.

Allerdings konnte den LOPES-Daten auch die prinzipielle Machbarkeit der Lokalisierung der Emissionsregion durch digitales Beamforming gezeigt werden, wobei die Dauer der aufgenommenen Daten zu kurz war, um den Ablauf eines Blitzes zeitlich zu verfolgen. Unter Verwendung dieser Technik bei niedrigeren Frequenzen und den damit möglichen längeren Aufnahmezeiten sollte eine zeitliche und räumliche Verfolgung der Blitzentstehung möglich sein. In Verbindung mit detaillierten Informationen über die Luftschauer wird es möglich sein, genaue Aussagen über einen eventuellen Zusammenhang zwischen dem Auftreten eines Luftschauers und der Entstehung eines Blitzes zu machen.

Die mit dem LOPES-Experiment aufgenommenen Daten ermöglichten erstmals eine detaillierte Untersuchung des Emissionsmechanismus der Radiosignale ausgedehnter Luftschauer unter dem Einfluss zusätzlicher elektrischer Felder. Außerdem bot sich die Möglichkeit der Blitzlokalisierung, was in Zusammenhang mit den Luftschauerdaten einen neuen Zugang zur Blitzforschung ermöglichte. Die Überwachung der elektrischen atmosphärischen Bedingungen muss auch bei zukünftigen Experi-

menten zur Radiodetektion weiter verfolgt und optimiert werden, um verlässliche Ergebnisse in der Luftschauerrekonstruktion zu erhalten. Dabei können sicherlich auch hochinteressante Ergebnisse außerhalb der reinen Astroteilchenphysik erzielt werden.

Literaturverzeichnis

- [Abr08] ABRAHAM, J. ET AL.: Observation of the Suppression of the Flux of Cosmic Rays above $4 \cdot 10^{19}$ eV. *Physical Review Letters* (2008), Bd. 101(6):061101
- [Aha97a] AHARONIAN, F. A.; HOFMANN, W.; KONOPELKO, A. K. und VÖLK, H. J.: The potential of ground based arrays of imaging atmospheric Cherenkov telescopes. I. Determination of shower parameters. *Astroparticle Physics* (1997), Bd. 6(3-4): S. 343 – 368
- [Aha97b] AHARONIAN, F. A.; HOFMANN, W.; KONOPELKO, A. K. und VÖLK, H. J.: The potential of the ground based arrays of imaging atmospheric Cherenkov telescopes. II. Gamma ray flux sensitivities. *Astroparticle Physics* (1997), Bd. 6(3-4): S. 369 – 377
- [All71] ALLAN, H. R.: Radio Emission from Extensive Air Showers. *Progress in Elementary Particles and Cosmic Ray Physics* (1971), Bd. 10: S. 171
- [Ant04] ANTONI, T. ET AL.: The Cosmic-Ray Experiment KASCADE. *NIM A* (2004), Bd. 518
- [Asc08] ASCH, Thomas: *Self-triggering of Radio Signals from Cosmic Ray Air showers*, Dissertation, Fakultät für Physik, Universität Karlsruhe (2008)
- [Bal05] BALANIS, Constantine. A.: *Antenna Theorie: Analysis and Design*, Wiley-Interscience, 3. Aufl. (2005)
- [Bet09] BETZ, H.D.; SCHUMANN, U. und LAROCHE, P.: *Lightning: Principles, Instruments and Applications*, Springer (2009)
- [Bui07] BUITINK, S. ET AL.: Amplified radio emission from cosmic ray air showers in thunderstorms. *Astronomy & Astrophysics* (2007)
- [Bui09] BUITINK, Stijn: *Radio Emission from Cosmic Particle Cascades*, Dissertation, Radboud University, Nijmegen (2009)
- [Chu09] CHUBENKO, A.P. ET AL.: Energy spectrum of lightning gamma emission. *Physics Letters A* (2009)
- [Dwy09] DWYER, J. R.; UMAN, M. A. und RASSOUL, H. K.: Remote measurements of thundercloud electrostatic fields. *J. Geophys. Res.* (2009), Bd. 114(D09208)

- [Fal05] FALCKE, H. ET AL.: Detection and imaging of atmospheric radio flashes from cosmic ray air showers. *Nature* (2005), Bd. 435
- [Gre66] GREISEN, K.: End to the Cosmic-Ray Spectrum? *Physical Review Letters* (1966), Bd. 16: S. 748
- [Gru05] GRUPEN, Claus: *Astroparticle physics*, Springer Verlag (2005)
- [Gur01] GUREVICH, A. V. und ZYBIN, K. P.: Runaway breakdown and electric discharges in thunderstorms. *Physics-Uspekhi* **44(11)**1119-1140 (2001) (2001)
- [Gur04] GUREVICH, A. V. und ZYBIN, K. P.: High energy cosmic ray particles and the most powerful discharges in thunderstorm atmosphere. *Physics Letters A* **329** (2004) 341-347 (2004)
- [Gur05] GUREVICH, A. V. und ZYBIN, K. P.: Runaway Breakdown and the Mysteries of Lightning. *Physics Today* (2005), Bd. 58,5: S. 37–43
- [Gys] GYSI, H.: Radar Info, <http://www.radar-info.de/frei.html>
- [Hec98] HECK, D.; KNAPP, J.; CAPDEVIELLE, J.N.; SCHATZ, G. und THOUW, T.: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers. *FZKA report* (1998), Bd. 6019
- [Hor09] HORNEFFER, A. ET AL.: The LOPES System for the Detection of Radio Pulses from Air Showers. *Submitted to Astronomy & Astrophysics* (2009)
- [Hue03] HUEGE, T und FALCKE, H.: Radio emission from cosmic ray air showers: Coherent geosynchrotron radiation. *Astronomy & Astrophysics* (2003), Bd. 412: S. 19–34
- [Hue07] HUEGE, T.; ULRICH, R. und ENGEL, R.: Monte Carlo simulations of geosynchrotron radio emission from CORSIKA-simulated air showers. *Astropart. Physics* **27**, 392-405 (2007)
- [JEL65] JELLEY, J. V.; FRUIN, J. H.; PORTER, N. A.; WEEKES, T. C.; SMITH, F. G. und PORTER, R. A.: Radio Pulses from Extensive Cosmic-Ray Air Showers. *Nature* (1965), Bd. 205: S. 327–328
- [KAS09] KASCADE-GRANDE KOLLABORATION: (2009), private Kommunikation
- [Kom] KOMITEE FÜR ASTROTEILCHENPHYSIK: Astroteilchenphysik in Deutschland, <http://www.astroteilchenphysik.de>
- [Lud09] LUDWIG, M.: (2009), private Kommunikation
- [Nav03] NAVARRA, G. ET AL.: KASCADE-Grande: a large acceptance, high-resolution cosmic-ray detector up to 10^{18} eV. *NIM A* (2003), Bd. 513

- [Neh08] NEHLS, Steffen: *Calibrated Measurements of the Radio Emission of Cosmic Ray Air Showers*, Dissertation, Fakultät für Physik, Universität Karlsruhe (2008)
- [Nig08] NIGL, A. ET AL.: Frequency spectra of cosmic ray air shower radio emission measured with LOPES. *Astronomy & Astrophysics* (2008)
- [NOO] NOAA: National Severe Storms Laboratory: Lightning Basics - Transient Luminous Events,
<http://www.nssl.noaa.gov/primer/lightning/ltg%5Ftle.html>
- [Rak03] RAKOV, Vladimir A. und UMAN, Martin A.: *LIGHTNING, Physics and Effects*, Cambridge University Press, 3. Aufl. (2003)
- [Sch] SCHMIDT, F.: CORSIKA Shower Images,
<http://www.ast.leeds.ac.uk/~fs/showerimages.html>
- [Sch08] SCHOLTEN, O.; WERNER, K. und RUSYDI, F.: A macroscopic description of coherent geo-magnetic radiation from cosmic-ray air showers. *Astroparticle Physics* 29 (2008) 94–103 (2008)
- [Sch09a] SCHOLTEN, O. und WERNER, K.: Macroscopic model of geomagnetic-radiation from air showers. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* (2009), Bd. 604: S. 24–+
- [Sch09b] SCHRÖDER, F. ET AL.: Time Calibration of the Radio Air Shower Array LOPES. *Proceedings of the 31st ICRC* (2009)
- [Sen95] SENTMAN, D. D. und WESCOTT, E. M.: Red sprites and blue jets: Thunderstorm-excited optical emissions in the stratosphere, mesosphere, and ionosphere. *Physics of Plasmas* (1995), Bd. 2(6): S. 2514–2522, URL <http://link.aip.org/link/?PHP/2/2514/1>
- [Sta04] STANEV, Todor: *High Energy Cosmic Rays*, Springer Verlag, 2. Aufl. (2004)
- [Sto98a] STOLZENBURG, M.; RUST, W. D. und MARSHALL, T. C.: Electrical structure in thunderstorm convective regions 2. Isolated storms. *Journal of Geophysical Research* (1998), Bd. 103: S. 14079–14096
- [Sto98b] STOLZENBURG, M.; RUST, W. D. und MARSHALL, T. C.: Electrical structure in thunderstorm convective regions 3. Synthesis. *Journal of Geophysical Research* (1998), Bd. 103: S. 14097–14108
- [Sto98c] STOLZENBURG, M.; RUST, W. D.; MARSHALL, T. C. und SMULL, B. F.: Electrical structure in thunderstorm convective regions 1. Mesoscale convective systems. *Journal of Geophysical Research* (1998), Bd. 103: S. 14059–14078
- [Tom74] TOMPKINS, Donald R.: Thundercloud radio emission from cosmic-ray-shower ionization electrons. *Phys. Rev. D* (1974), Bd. 10(1): S. 136–145

- [Zat66] ZATSEPIN, G. T. und KUZ'MIN, V. A.: Upper limit of the spectrum of cosmic rays. *JETP Lett.* (1966), Bd. 4: S. 78