
Ortung und Analyse von Blitz- entladungen mittels Registrierung von VLF-Atmospherics innerhalb eines Messnetzes

Kersten Schmidt



München 2007

Ortung und Analyse von Blitz- entladungen mittels Registrierung von VLF-Atmospherics innerhalb eines Messnetzes

Kersten Schmidt

Dissertation
an der Fakultät für Physik
der Ludwig-Maximilians-Universität
München

vorgelegt von
Kersten Schmidt
aus Görlitz

München, den 08.02.2007

Erstgutachter: Prof. Dr. Hans-Dieter Betz

Zweitgutachterin: Prof. Dr. Susanne Crewell

Tag der mündlichen Prüfung: 04.05.2007

Inhaltsverzeichnis

Glossar	xiii
Zusammenfassung	xv
Einleitung	1
1 Aktueller Stand der Blitzforschung	3
1.1 Gewitter und Blitze – ein kurzer Überblick	3
1.1.1 Charakterisierung von Gewittern	3
1.1.2 Elektrische Prozesse in der Atmosphäre	4
1.1.3 Blitztypen	6
1.2 Physikalische Abläufe bei Blitzentladungen	7
1.2.1 Blitzvorgang bei Erdblitzten	8
1.2.2 Blitzvorgang bei Wolkenblitzen	11
1.3 Blitzmessungen	12
1.3.1 Direkte Strommessung	12
1.3.2 Beobachtungen im Bereich des sichtbaren Lichtes	13
1.3.3 Messung des elektrischen und magnetischen Feldes	14
1.3.4 Gegenüberstellung verschiedener Blitzmesssysteme	15
1.3.5 Analysemöglichkeiten verschiedener Blitztypen	15
1.4 Beitrag dieser Arbeit zum aktuellen Erkenntnisstand	18
2 Blitzinduzierte elektromagnetische Wellen	19
2.1 Erzeugung – Modellierung des Stromflusses im Blitzkanal	19
2.1.1 Überblick über bestehende Modelltypen	19
2.1.2 Ermittlung des elektrischen und magnetischen Feldes	21
2.1.3 Anwendbarkeit der Blitzstrommodelle	22
2.2 Änderung der Welleneigenschaften während der Ausbreitung	23
2.2.1 Auftreten von Reflexionsimpulsen	23
2.2.2 Dispersionseinfluss auf die Form des Wellenzuges	27
2.2.3 Amplitudendämpfung auf dem Ausbreitungsweg	32

3	Messsystem zur Erfassung von VLF-Atmospherics	33
3.1	Messaufbau	33
3.2	Prinzip der Datenerfassung	34
3.3	Prüfung der Parameter	36
3.3.1	Absolute Zeitbasis	36
3.3.2	Simulierte Auswirkungen von verschiedenen Filtern auf die Wellenform	37
3.3.3	Frequenz- und Zeitverhalten der Messkette	39
3.4	Beispiele für gemessene VLF-Sferics	43
3.4.1	Zuordnung der Zeitinformation zum gemessenen Signalverlauf . . .	43
3.4.2	Zuordnung des gleichen Ereignisses an verschiedenen Stationen . . .	44
4	Blitzortung	49
4.1	Verfahren zur Blitzortung	49
4.1.1	Winkelpeilung	50
4.1.2	Peilung mittels Ankunftszeiten	51
4.1.3	Interferometrie im VHF-Bereich	53
4.2	Analytische Lösungen zur Ermittlung der Blitzquellorte	55
4.2.1	Analytische Winkelpeilung	55
4.2.2	Analytische Startpunktbestimmung mit Laufzeiten	56
4.3	Blitzortung im VLF-Bereich mittels 3D-Verfahren	59
4.3.1	Prinzip des 3D-Verfahrens	59
4.3.2	Simulation von Blitzhöhen an einem Ort	61
5	Statistische Auswertung der Blitzereignisse	63
5.1	Messkampagnen	63
5.1.1	Südbayern 2003	63
5.1.2	Süddeutschland 2004	64
5.1.3	Süddeutschland 2005	65
5.1.4	Feldkampagnen in Brasilien und Australien 2005/2006	66
5.2	Statistik über gemessene Ergebnisse	69
5.2.1	Laufzeitdifferenzen	69
5.2.2	Fitsumme	71
5.2.3	Amplitudenverteilung	72
5.2.4	Höhenprofil	74
5.2.5	Radardaten von Gewitterzellen	75
6	Vergleiche mit anderen Blitzerfassungssystemen	77
6.1	Turmeinschläge am Gaisberg	77
6.2	Blitzortungssysteme im VLF-Bereich	80
6.2.1	BLIDS in Süddeutschland	81
6.2.2	RINDAT in Brasilien	85
6.2.3	Weltweites Blitzmesssystem – WWLLN	89
6.2.4	Blitzmesssystem – ZEUS	91

6.3	Optische Satellitendaten – LIS	92
7	Eigenschaften verschiedener Blitztypen	97
7.1	Erdblitz	98
7.2	Wolkenblitze	99
7.2.1	Wolkenblitze als Strokeprozesse	100
7.2.2	Wolkenblitze als Leader- und Vorentladungsprozesse	101
	Schlussbemerkungen und Ausblick	107
A	Datenformatdefinition der Stationsdateien	109
B	Analytische Startpunktermittlung mit Zeiten von drei Stationen	111
B.1	Parametrisierte Form einer Hyperbel mit einem Brennpunkt als Koordinatenursprung	111
B.2	Linearer Zusammenhang der Darstellung eines Punktes aus zwei Koordinatensystemen mit gleichem Ursprungsort	112
B.3	Ermittlung der Schnittpunkte zweier Hyperbeläste	114
	Danksagung	128

Abbildungsverzeichnis

1.1	Ladungsverteilung in einer Gewitterwolke	5
1.2	Prozessphasen bei Erdblitzes am Beispiel des negativen Abwärtsblitzes . .	10
1.3	Darstellung eines Blitzereignisses mit einem hochauflösenden VHF-Messsystem	16
2.1	Gangunterschied bei der Ausbreitung der elektromagnetischen Welle mit Reflexionen am Boden und der Ionosphäre	25
2.2	Differenzen der Ankunftszeiten der reflektierten Wellen bei Variation der Blitzhöhe und des Stationsabstandes	26
2.3	Gewichtsfunktion und Phasengeschwindigkeit des Wellenpaketes	28
2.4	Modellimpuls bei verschiedenen Abständen zum Erzeugungsort	30
2.5	Phasenbeziehung zur Ermittlung der TOGA	31
3.1	Schema des Messaufbaus	34
3.2	Magnetische Feldantenne	35
3.3	Test der Zeitkonsistenz zweier GPS-Systeme	37
3.4	Simulation des Tiefpasses	38
3.5	Simulation des Hochpasses	38
3.6	Simulation des Bandpasses	39
3.7	Frequenzverhalten des Sensors	40
3.8	Amplitudengang des Messsystems	41
3.9	Synthetisches Probesignal für den Test des Zeitverhaltens	42
3.10	Differenzzeiten zwischen verschiedenen Messsystemen bei gleichen Signalen	42
3.11	Extrahierung der Zeitinformation aus dem Signalverlauf in Garching	44
3.12	Extrahierung der Zeitinformation aus dem Signalverlauf in Peißenberg . . .	44
3.13	Registriertes Blitzereignis an acht Stationen mit Einfallsrichtung und Entfernung zum Blitzort	45
3.14	Vergleich der Wellenformen an den nördlichen Stationen mit verschiedenen Entfernungen zum Blitz	46
3.15	Vergleich der Wellenformen an Stationen mit verschiedenen Einfallsrichtungen des Blitzes	46
4.1	Prinzip der Winkelpeilung	50

4.2	Prinzip der TOA-Peilung	52
4.3	Einfachstes Interferometrieprinzip	54
4.4	Blitzort und Stationsnetz für die Blitzhöhensimulation	61
4.5	Simulation statistischer Höhenprofile an einem Ort	62
5.1	Blitzmuster und Flugrouten am 04.02.2005 in Brasilien	67
5.2	Blitzmuster am 19. November 2005 in Australien	68
5.3	Blitzkarte vom 29. Juli 2005	69
5.4	Verteilung der Differenzzeiten bei 2D- und 3D-Peilung	70
5.5	Vergleich der Fitsummen bei der 2D- und 3D-Peilung	71
5.6	Verteilung der Amplitudenwerte bei CGs und ICs	72
5.7	Anordnung der Ladungszentren bei der Entladung von CGs und ICs	73
5.8	Verteilung der Blitzhöhen am 29.07.2005	74
5.9	Radarbild mit überlagerten Blitzereignissen vom 29.06.2005, 13:57 UTC	75
5.10	Radarbild mit überlagerten Blitzereignissen vom 29.06.2005, 13:36 UTC	76
6.1	Amplitudenvergleich der Gaisbergeinschläge vom 15.12.2003	78
6.2	Sensorstandorte von Euclid-Betreibern	81
6.3	Blitzkarten vom 7. August 2004 mit Daten von BLIDS und LINET	82
6.4	Peildifferenzen zwischen zeitgleichen Ereignissen von BLIDS und LINET	83
6.5	Amplitudenvergleich zeitgleicher Ereignisse von BLIDS und LINET	84
6.6	Verhältnis der Absolutamplituden der zeitgleichen Ereignissen von BLIDS und LINET	84
6.7	Verteilungen der Amplituden bei BLIDS und LINET	85
6.8	Peildifferenzen zeitgleicher Ereignisse von RINDAT und LINET	86
6.9	Amplitudenvergleich zeitgleicher Ereignisse von RINDAT und LINET	87
6.10	Verhältnis der Absolutamplituden der zeitgleichen Ereignisse von RINDAT und LINET	88
6.11	Verteilungen der Amplituden bei RINDAT und LINET	88
6.12	Peildifferenzen zwischen zeitgleichen Ereignissen von WWLLN und LINET	90
6.13	Verteilungen der Amplituden bei WWLLN und LINET	90
6.14	Peildifferenzen zwischen zeitgleichen Ereignissen von ZEUS und LINET	91
6.15	Verteilungen der Amplituden bei ZEUS und LINET	92
6.16	Vergleich mit LIS- Flash am 04.02.2005	94
6.17	Peildifferenzen zwischen zeitgleichen Ereignissen von LIS und LINET	95
7.1	Wellenform eines CGs	98
7.2	Isoliertes IC-Blitzereignis	101
7.3	Wolkenentladung im Zusammenhang mit einem Erdblitz	103
7.4	Wellenform der IC-Stroke innerhalb von 200 ms	105
7.5	Entladungsstrecken von Wolkenblitzen	106
B.1	Ast einer Hyperbel in parametrisierter Form	111
B.2	Darstellung des Lösungspunktes in zwei Koordinatensystemen	113

Tabellenverzeichnis

4.1	Liste aller Statuskennungen einer erfolgreichen Blitzortbestimmung	60
4.2	Mittlere Höhe \bar{h} und Standardabweichung σ der je 2.000 simulierten Ereignisse in verschiedenen Höhen und bei verschiedenen vorgegebenen Zeitfehlern dt	62
5.1	Stationsnetz Südbayern 2003	64
5.2	Stationsnetz Süddeutschland 2004	65
5.3	Stationsnetz Süddeutschland 2005	65
5.4	Stationsnetz Brasilien Januar/Februar 2005	66
5.5	Stationsnetz Australien November 2005 bis Februar 2006	68
5.6	Differenzzeiten bei der 2D- bzw. der 3D-Peilung	70
6.1	Registrierte Turmeinschläge am Gaisberg am 15.12.2003	79
7.1	Vergleich der IC/CG-Typisierung von zeitgleichen Ereignissen bei BLIDS und LINET	99
7.2	Gepeilte IC-Stroke innerhalb von 200 ms am 29.07.2005	104
A.1	Datenformatdefinition der Stationsdateien – Header	109
A.2	Datenformatdefinition der Stationsdateien – Body	109

Glossar

ALDIS	<i>Austrian Lightning Detection System</i> , österreichisches Blitzmessnetz mit Messtechnik der Firma Vaisala
BLIDS	<i>BLitz InformationsDienst von Siemens</i> , Blitzmessnetz für Deutschland und die Schweiz mit Messtechnik der Firma Vaisala
CG	<i>Cloud-to-Ground</i> , Blitz zwischen Wolke und Erde
Flash	Blitzentladung als Gesamtvorgang, enthält meist mehrere <i>Strokes</i>
IC	<i>Inter-/Intracloud</i> , Blitz zwischen zwei Wolken oder innerhalb einer konvektiven Zelle
LASA	<i>Los Alamos Sferics Array</i> , amerikanisches Blitzmessnetz betrieben vom <i>Los Alamos National Laboratory</i>
Leader	Vorentladungsprozess, Ausbildung eines leitfähigen Kanals für den <i>Stroke</i> -Prozess
LINET	<i>Lightning Detection Network</i> , Name des in dieser Arbeit vorgestellten Blitzmessnetzes
LIS	<i>Lightning Imagine Sensor</i> , Satellit mit integriertem Blitzmesssystem
LF	<i>Low Frequency</i> , Frequenzbereich: 30 – 300 kHz
MDF	<i>Magnetic Direction Finder</i> , Messsystem, das den Einfallswinkel des Blitzes bestimmt
NBE	<i>Narrow Bipolar Event</i> , spezieller Typ von Wolkenblitzen (IC)
NLDN	<i>National Lightning Detection Network</i> , amerikanisches Blitzmessnetz mit Messtechnik der Firma Vaisala
PBL	<i>Preliminary Breakdown Last Stage</i> , Auslösevorgang für Blitzentladungen
RINDAT	<i>Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas</i> , brasilianisches Blitzmessnetz mit Messtechnik der Firma Vaisala
Stroke	Einzelne, vollständige Blitzentladung, mehrere <i>Strokes</i> ergeben einen <i>Flash</i>
TCS	<i>Travelling Current Source</i> , Modell zur Beschreibung von Blitzströmen
TL	<i>Transmission Line</i> , Modell zur Beschreibung von Blitzströmen
TOA	<i>Time of Arrival</i> , Methode zur Blitzpeilung durch Ermittlung der Ankunftszeiten
TOGA	<i>Time of Group Arrival</i> , Methode zur Blitzpeilung durch Ermittlung der Gruppenlaufzeit des Wellenpaketes
UHF	<i>Ultra High Frequency</i> , Frequenzbereich: 0,3 – 3 GHz
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i> , internationale Grundlage für die Zeitbestimmung
VHF	<i>Very High Frequency</i> , Frequenzbereich: 30 – 300 MHz
VLF	<i>Very Low Frequency</i> , Frequenzbereich: 3 – 30 kHz
WWLLN	<i>World Wide Lightning Location Network</i> , Blitzmesssystem mit weltweit aufgestellten Stationen

Zusammenfassung

Natürliche Blitzentladungen können aufgrund ihrer abgestrahlten, elektromagnetischen Impulswellen (*Atmospherics*) in verschiedenen Frequenzintervallen geortet werden. Unter Verwendung magnetischer Sensoren wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Messsystem entwickelt und erprobt, dessen Detektionsschwerpunkt im VLF-Bereich liegt. Unterschiedlichste Blitzentladungen wurden mit Messnetzen in Deutschland, Brasilien und Australien gezielt geortet und analysiert.

Durch eine aufwendige Ermittlung der Signalankunftszeiten an den Messstationen und die Verwendung eines erweiterten Laufzeitverfahrens zur Blitzpeilung, welches neben Länge und Breite auch die Höhe der Blitzentladung als Parameter zulässt, ergaben sich mittlere Laufzeitfehler von nur $0,2 \mu\text{s}$. Simulationen, statistische Vergleiche und alternative Verfahren zur Blitzhöhenbestimmung belegen, dass die jeweils berechnete Höhe eine sinnvolle, physikalische Größe darstellt. Durch diese wird es möglich, Wolken- und Erdblitzte auf einfache Art voneinander zu unterscheiden.

Die Peilgenauigkeit und Effizienz der erfassten Blitzereignisse wurden durch Vergleiche mit einer Reihe von anderen Blitzmessnetzen untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass von unseren Netzwerken bis zu zehn Mal so viele reale Blitzereignisse gemeldet wurden. Die Vergleiche der Stromamplituden zeigen, dass die zusätzlich erfassten Ereignisse fast ausschließlich zu schwächeren Blitzen mit Entladungsströmen unter 5 kA gehören. Die starken Amplituden werden von den verschiedenen Netzen in sehr guter Übereinstimmung gemessen. Die Peildifferenzen zwischen zeitgleichen Ereignissen der verglichenen Datensätze liegen in den meisten Fällen unterhalb eines Kilometers.

Aufgrund der großen Datenfülle und der Emissionshöhenbestimmung der Impulse wurde es erstmals möglich, mit einem VLF-Messnetz dreidimensionale Entladungsstrecken darzustellen. Durch die Analyse der aufgezeichneten Wellenformen wurden Einteilungen der Impulse in verschiedene Kategorien möglich. So ließen sich signifikante Unterschiede zwischen Wolken- und Erdblitzten, aber auch bei Vor- und Hauptentladungen aufzeigen.

Einleitung

Die Beobachtung und Erforschung von Wetterphänomenen sind so alt wie die Menschheit. Seit jeher versucht man Naturkatastrophen vorherzusagen, um entsprechende Vorkehrungen treffen zu können. Vor allem durch die Entdeckung des Elektromagnetismus im 19. Jahrhundert konnten viele neue Verfahren und Instrumente entwickelt werden, die zur Wetterbeobachtung beitragen. Durch die Satellitentechnik wissen wir heute so gut wie noch nie in der Menschheitsgeschichte über Wetterabläufe Bescheid. Trotzdem gibt es im Bereich der Atmosphärenphysik noch viele wissenschaftlich ungeklärte Phänomene.

Blitzentladungen zum Beispiel sind Wettererscheinungen, die physikalisch noch immer nicht vollständig verstanden sind, den Menschen aber seit jeher faszinieren. Es mangelt dabei nicht an Theorien, beispielsweise zur Ladungstrennung, zur Auslösung des Blitzes oder zur Entladung selber, sondern vor allem an Messmethoden, um die eine oder andere Theorie bestätigen oder verwerfen zu können. Das erste Kapitel gibt einen kurzen Überblick über den aktuellen Stand in der Blitzforschung. Es geht dabei vor allem auf die aus der Literatur bekannten Prozesse zur Entstehung von Erd-, aber auch von Wolkenblitzen ein. Des Weiteren werden alle modernen Messverfahren zur Blitzregistrierung beschrieben und ihr Beitrag zur derzeitigen Forschung erläutert.

Blitzinduzierte, elektromagnetische Impulse im VLF-Bereich – auch *VLF-Atmospherics* oder kurz *Sferics* genannt – haben im Vergleich zu Wellen aus anderen Frequenzbereichen einige Besonderheiten aufzuweisen. Sie sind mit empfindlichen Messgeräten über einige tausend Kilometer nachweisbar und können sowohl als Bodenwelle wie auch als Raumwelle mit teilweise mehrfachen Reflexionen an Ionosphäre und Erde auftreten. Während der Ausbreitung über große Distanzen kommt es daher naturgemäß zu Veränderungen der Impulsformen. Unterschiedliche Bedingungen im Resonator zwischen Erdoberfläche und Ionosphäre werden beispielsweise durch Tag-Nacht-Effekte der Raumladungen und des Magnetfeldes der Erde verursacht. Mit Modellrechnungen lassen sich zwar entsprechende Dispersionserscheinungen und andere Beeinflussungen von *Sferics* nachvollziehen, aber die messtechnische Nutzung hängt stark von den verwendeten Distanzen zum Blitzgeschehen und der Bandbreite der Messtechnik ab. Das zweite Kapitel stellt daher einerseits die theoretischen Grundlagen der *Sferics*-Erzeugung bei gängigen Blitzstrommodellen vor sowie die Prozesse, welche die Wellenausbreitung beeinflussen und vergleicht diese mit Messergebnissen aus der aktuellen Forschung.

Im Mittelpunkt der hier vorliegenden Arbeit lag die Entwicklung und Erprobung eines neuartigen Messsystems, bei dem gleichzeitig an verschiedenen Stationen *Sferics* aufge-

zeichnet werden, um den Blitz als Quelle dieser elektromagnetischen Strahlung genau orten zu können. Innerhalb von drei Jahren konnte auf dieser Basis ein zuverlässiges und hoch effizientes Blitzerfassungsnetzwerk errichtet werden. Die verwendeten Einzelkomponenten, die Funktionsweise der Messsysteme sowie das Zeit- und Frequenzverhalten der gesamten Messkette sind die Themen des dritten Kapitels.

Je nach Art und Anzahl der verwendeten Messsysteme wendet man unterschiedliche Verfahren zur Blitzortung im Radiowellenbereich an. Für gewöhnlich kommen bei niederfrequenten Messeinheiten meist Winkelpeilungs- und Laufzeitdifferenzverfahren zum Einsatz, wohingegen Messstationen im hochfrequenten Radiowellenbereich oft als Interferometer arbeiten. Neben den verschiedenen Peilprinzipien stellt das Kapitel 4 iterative und analytische Lösungsansätze vor, mit deren Hilfe sich aus den jeweiligen Messgrößen der Quellort der Welle berechnen lässt. Für diese Arbeit wurde das Laufzeitdifferenzverfahren so erweitert, dass als Ergebnis für den Peilort neben der geographischen Länge und Breite auch die Emissionshöhe ermittelt wird.

Die Untersuchung von Blitzereignissen begann im Frühjahr 2003 mit der Aufstellung von sechs Stationen, die die Aktivität im südbayerischen Raum erfassten. Dieses Netzwerk wurde sukzessive erweitert, so dass im Jahr 2005 Auswertungen mit insgesamt 20 beteiligten Stationen gemacht werden konnten, die Süddeutschland abdeckten. Außerdem kam parallel ein mobiles Messnetz in Brasilien und Australien zu je einem mehrmonatigen Einsatz. Die verschiedenen Standortkonfigurationen sowie die Ermittlung der Datenqualität durch statistische Auswertungen sind Teil des fünften Kapitels. Besonderen Wert wird dort auf die Laufzeitabweichungen gelegt, die sich aus berechneter Blitzzeit, gemessener Ankunftszeit an der Station und Laufzeit zwischen Quelle und Messort ergeben. Die ermittelten Blitzhöhen werden zur Verifizierung sowohl statistisch den aus der Literatur bekannten Wolkenhöhen gegenübergestellt, aber auch in Einzelbeispielen mit zeitgleichen Radarbildern überlagert.

Um den Stellenwert des neu entwickelten Messnetzes einschätzen zu können, sind Vergleiche mit anderen Blitzerfassungssystemen notwendig. In Kapitel 6 konnte auf Referenzdaten von fünf verschiedenen Systemen zurückgegriffen werden, deren Daten geeignete Orts- und Zeitbereiche umfassten. Ein Untersuchungskriterium ist dabei die statistische Verteilung der Peildifferenzen, die über den Abstand der als identisch erkannten Ereignisse bestimmt wird. Da sich stärkere Blitze meist besser detektieren lassen als schwächere, lassen sich durch statistische Auswertungen in verschiedenen Amplitudenintervallen Aussagen über die Ausbeute treffen.

Aufgrund des heutigen Wissensstands geht man davon aus, dass über die Impulsformen der gemessenen *Sferics* Rückschlüsse auf den jeweiligen Blitzerzeugungsvorgang möglich sind. Dies ist insofern nützlich, als dadurch ein weiteres Kriterium zur Unterscheidung von Wolken- und Erdblitzten prinzipiell zur Verfügung steht. In Kapitel 7 wird daher eine Kategorisierung der aus der Literatur bekannten Impulsklassen und eine Einordnung der im Rahmen dieser Arbeit aufgezeichneten Wellenformen vorgenommen. Zu einem tieferen Verständnis des Blitzablaufes gelangt man durch den Vergleich der ermittelten Blitztypen mit den dazugehörigen Impulsformen.

Kapitel 1

Aktueller Stand der Blitzforschung

Ausgehend von den meteorologischen Grundlagen über Gewitter widmet sich dieses Kapitel dem aktuellen Erkenntnisstand in der Blitzforschung. In diesem Zusammenhang ist auf die Vorstellung der in der Literatur gebräuchlichen Bliztypisierungen wie auch auf die Erläuterung der bekannten, physikalischen Entladungsvorgänge einzugehen. Durch die ausführliche Auflistung und die objektive Beurteilung der gängigen Blitzerfassungsverfahren lässt sich der Beitrag der hier vorliegenden Arbeit in das Forschungsgebiet einordnen.

1.1 Gewitter und Blitze – ein kurzer Überblick

1.1.1 Charakterisierung von Gewittern

Gewitterwolken können vereinfacht als eine atmosphärische Wärmekraftmaschine gesehen werden. Die zugeführte Energie kommt größtenteils von der Sonne, als Arbeitssubstanz fungiert Wasserdampf. Abgegeben wird die Energie hauptsächlich in folgenden Formen:

- Mechanische Arbeit in Form von vertikalem und horizontalem Wind
- Ausströmen der kondensierten Materie in Form von Regen, Hagel in der unteren Wolkenhälfte bzw. Eiskristalle in der oberen Wolkenhälfte
- Elektrische Entladungen innerhalb sowie unter und über den Wolken.

Gewitter entstehen, wenn warme, feuchte Luftmassen zum Aufstieg gezwungen werden. Die Ursache für den Aufstieg unterscheidet die einzelnen Gewitterarten. Bei Wärmegewittern werden durch intensive Sonneneinstrahlung die bodennahen Luftmassen erwärmt, die sich dadurch ausdehnen, ihre spezifische Dichte verringern und letztendlich aufsteigen. Bei Frontgewittern dagegen schiebt sich eine einbrechende Kaltfront unter wärmere Luft und drückt diese nach oben. Eine dritte Möglichkeit sind orographische Gewitter, bei denen Luft ansteigendes Gelände überströmt und dadurch angehoben wird.

Den Lebenszyklus eines Gewitters teilt man prinzipiell in drei Phasen ein: Entstehung (Cumulonimbusstadium), Entwicklung (Reifestadium) und Auflösung (Dissipationsstadium). Im Cumulonimbusstadium steigen die erwärmten Luftmassen auf, dehnen sich aus

und bilden durch die Kondensation Wolken. Das Reifestadium ist durch Regen, kräftige Bodenwinde und einen starken Temperaturabfall gekennzeichnet. In seltenen Fällen kann starker Aufwind im Zentrum der Zelle dazu führen, dass feuchte Luft bis in die Stratosphäre gelangt. Je nach Gewitterstärke kommt es zu entsprechend intensiven Niederschlägen bis hin zu Hagelschlag. Bei geringer Windscherung kompensiert sich der aus den Niederschlägen resultierende Abwind den für die Erhaltung der Zelle nötigen Aufwind. Aus diesem Grund haben diese Einzelzellen nur Wolkenhöhen von 5 bis 10 km und können sich höchstens bis zu einer Stunde halten, wobei keine extremen Niederschläge zu erwarten sind.

Als Multizellen bezeichnet man ein Cluster verschiedener Einzelzellen, die meist stabiler sind, da die Windscherung dafür sorgt, dass der Aufwind an feuchter, warmer Luft für einen längeren Zeitraum erhalten bleibt. In solchen Zellen kommt es sehr oft zu starken Niederschlägen oder Hagel.

Aus Multizellen entwickeln sich häufig Superzellen. Dies sind quasistationäre Zellen, die ihren Nachschub aus einem rotierenden Aufwind bekommen. Hier können sehr starke Winde bis hin zu Tornados gemessen werden, außerdem sind Hagelschauer mit überdurchschnittlicher Korngröße keine Seltenheit. Wenn der Zufluss der warmen, feuchten Luft vom Boden unterbrochen ist, bekommt das Gewitter keine zusätzliche Nahrung mehr und löst sich auf.

1.1.2 Elektrische Prozesse in der Atmosphäre

Die elektrische Situation im Schönwetterfall wird von Iribarne und Cho [1980] wie folgt beschrieben: Die Erde und die Ionosphäre bilden zwei konzentrisch sphärische Leiter. Zwischen diesen beiden Oberflächen befinden sich atmosphärische Schichten mit einer sehr geringen Leitfähigkeit. Die Erde kann als eine relativ ebene Platte des sphärischen Kondensators angesehen werden, mit einem abrupten Übergang zur wesentlich schlechter leitenden Atmosphäre. Die Leitfähigkeit nimmt aufgrund steigender Ionen- und Elektronenkonzentration mit der Höhe immer stärker zu. In der Ionosphäre erreicht die Ladungsträgerkonzentration ihr Maximum; mit Elektronendichten von 10^4 bis 10^6 cm^{-3} kann dieses Gebiet als leitfähig betrachtet werden. Iribarne und Cho [1980] berechnen für den Schönwetterfall einen Leckstrom von 1350 A. Dieser kann aufgebracht werden, weil die weltweite Gewittertätigkeit als Generator fungiert.

Fest steht, dass im Schönwetterfall ein statisches elektrisches Feld gemessen werden kann, dessen Feldlinien von der Höhe aus in Richtung Erde gehen. Das elektrische Feld am Boden wird mit ca. 100 V/m angegeben. Nach der atmosphärischen Stromkonvention werden alle elektrischen Felder und Ströme, die zur Erde gerichtet sind, mit einem positiven Vorzeichen versehen. Bei herannahenden Gewittern ändert sich das Feld und nimmt beim direkten Überziehen, je nach Art des direkt darüberliegenden Ladungszentrums, starke negative Werte bzw. positive Werte an [Qie u. a., 2005b]. In der Literatur wird aber auch die genau entgegengesetzte, physikalische Stromkonvention benutzt, die den Koordinatenursprung auf die Erde legt, wobei die z-Achse nach oben zeigt.

Die Verteilung der Ladungszentren innerhalb von Gewitterwolken wurde in einer Reihe von Einzeluntersuchungen erforscht. In zahlreichen Ballonexperimenten stellte man fest,

dass die Ladungszentren, grob gesehen, in einer Tripolstruktur angeordnet sind. Dabei befindet sich im oberen Teil der Gewitterwolke eine positiv, im mittleren eine negativ und am unteren Rand nochmals eine positiv geladene Region. Qie u. a. [2005a] ermittelten die Höhen der Ladungszentren für ein Gewitter im Qinghai-Tibet-Plateau (2650 m üNN). Dabei lag das untere, positiv geladene Gebiet 1,7 km und das negative Hauptladungszentrum 2,2 km über der Erde. Für die mittlere, negativ geladene Zone geben Krehbiel u. a. [1979] Temperaturen zwischen -9 und -17 °C an.

Koshak und Krider [1989] zeigen, dass Blitze in der Wolke häufiger zwischen den mittleren negativen und den oberen, positiven Ladungszentren auftreten; seltener gibt es Entladungen zwischen dem unteren, positiv geladenen Gebiet und der negativen Hauptladungszone in der Mitte der Wolke. Weitere Untersuchungen (z.B. von Stolzenburg u. a. [1998a], Stolzenburg u. a. [1998b], Stolzenburg u. a. [1998c]) belegen, dass die Ladungsstruktur oft komplexer ist und sich je nach Gewitterphase ändert (vgl. Abbildung 1.1).

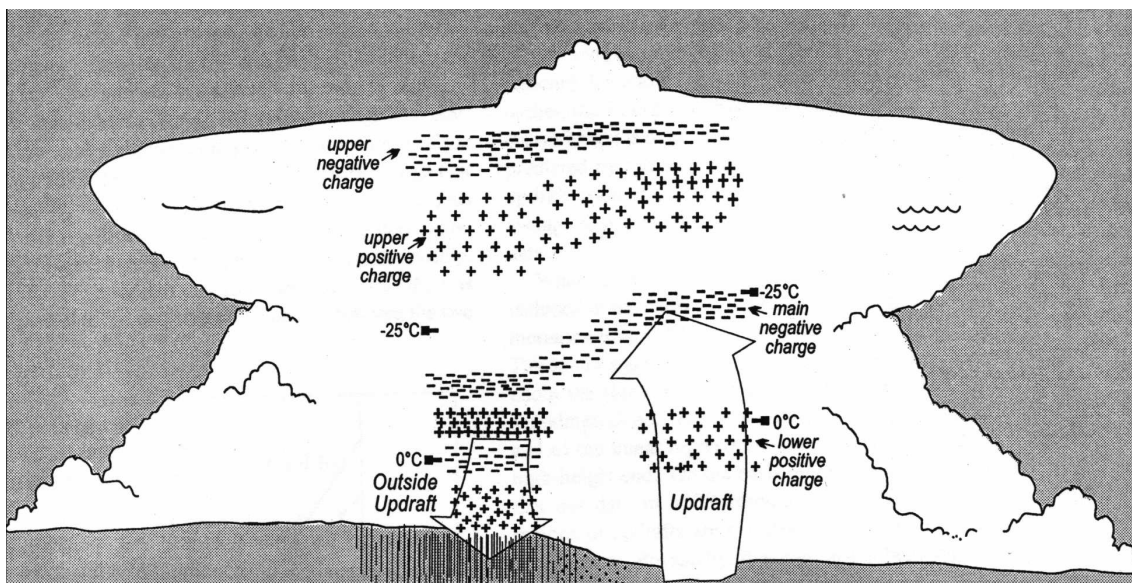


Abbildung 1.1: Schematische Verteilung der Ladungszentren in einer Gewitterwolke, basierend auf insgesamt 49 E-Feldmessungen mit Wetterballons [Stolzenburg u. a., 1998b]

In der Literatur gibt es viele verschiedene Theorien zur Wolkenelektrifizierung. Jede vollständige Theorie über die Entstehung der Ladungsverteilung in der Wolke enthält einen Ladungserzeugungsprozess im kleinen Maßstab und einen Prozess, der die entstandenen Ladungszentren großräumig trennt. Als wichtigste Vertreter der nichtinduktiven Prozesse werden der Konvektions- und der Graupel-Eis-Mechanismus kurz vorgestellt.

Beim Konvektionsmechanismus werden die elektrischen Ladungen durch externe Quellen bereitgestellt. Neue, lokale Ladungszentren entstehen bedingt durch das Schönwetterfeld in wolkenfreier Luft, aber auch durch Koronaentladungen in der Nähe des Erdbodens sowie durch kosmische Strahlung an der Wolkenobergrenze. Durch Konvektion verteilen sich diese Ladungen über den Wolkenbereich.

Der Graupel-Eis-Mechanismus dagegen wird in der Literatur für den dominanteren Mechanismus gehalten, vor allem in der Entstehungsphase der Wolkenelektrizität [Rakov und Uman, 2003]. Nach dieser Theorie werden die elektrischen Ladungen durch Kollisionen von Graupelkörnern mit kleinen Eiskristallen in unterkühlten Cumuluswolken erzeugt. Die harten Graupelkörner fallen durch eine Suspension aus Eiskristallen und teilweise unterkühlten Wassertropfen. Aufgrund der Kollisionen während der sogenannten *Ice Multiplication*- und *Ice Splintering*-Prozesse entstehen verschieden geladene und unterschiedlich große Eis- bzw. Wasserteilchen, die aufgrund ihres Gewichtes in die entsprechenden Wolkenregionen gelangen. Die großräumige Trennung der Ladungsträgerzentren geschieht durch die Gravitation. Es ist möglich, dass in späteren Gewitterphasen auch andere Mechanismen wirken, beispielsweise der Konvektionsmechanismus.

1.1.3 Blitztypen

Alle Blitzprozesse sind mit Ladungsbewegungen verbunden und können deshalb durch die Messung von elektrischen oder magnetischen Feldern wahrgenommen werden. Dabei werden Blitze generell in zwei Gruppen unterteilt:

- Wolke-Erde-Blitze (kurz: Erd- oder Bodenblitze, engl. *cloud-to-ground*, CG) und
- Wolke-Wolke-Blitze (kurz: Wolkenblitze, engl. *intercloud* oder *intracloud*, IC).

Wolkenblitze entladen sich zwischen bzw. innerhalb der Wolken. Wird Ladung, eventuell auch nur teilweise, zwischen Wolken und der Erde ausgeglichen, spricht man von einem Erdblitz.

Erdblitze

Abgeleitet aus der beobachteten Polarität und der Ausbreitungsrichtung werden vier Typen von Erdblitzen unterschieden:

- Negative Abwärtsblitze
- Negative Aufwärtsblitze
- Positive Abwärtsblitze
- Positive Aufwärtsblitze.

Das Vorzeichen des Blitztypes bezieht sich immer auf den Typ der Wolkenentladung; negative CGs transportieren negative Ladungen von der Wolke zur Erde, positive CGs positive Ladungen. Allerdings wurden auch schon Blitze beobachtet, bei denen beide Vorgänge kurz nacheinander stattfanden. Es fällt also schwer, einen solchen Blitz eindeutig als positiv oder negativ zu identifizieren [Jerauld u. a., 2004].

Es wird angenommen, dass der negative Abwärtsblitz der häufigste CG-Blitztyp ist und ca. 90 % Anteil an den weltweiten CGs hat [Rakov und Uman, 2003]. Aufwärtsblitze kommen sehr selten vor, sie wurden bisher nur an hohen, herausstehenden Gebäuden wie beispielsweise an Türmen von mindestens 100 m Höhe oder an Bergspitzen beobachtet.

Wolkenblitze

Der Hauptteil aller Blitzentladungen erreicht nicht den Erdboden. Solche Blitze werden unter dem Sammelbegriff Wolkenblitze zusammengefasst. Dazu gehören Blitzentladungen innerhalb einer Wolke, Entladungen zwischen Ladungszentren verschiedener Wolken, aber auch Entladungen zwischen Wolken und der angrenzenden Luft. Wie im nachfolgenden Kapitel 1.2.1 beschrieben, gibt es bei Bodenblitzen Teilprozesse, die sich nur in den Wolken entladen und als IC-Teilblitz eingeordnet werden können. Dagegen gibt es bei reinen Wolkenblitzen definitionsgemäß keine CG-Teilprozesse.

Polaritätsbestimmungen sind bei Wolkenblitzen schwierig, da die Erde als Bezugspunkt wegfällt. In den Wolken können keine direkten Strommessungen durchgeführt werden, sodass die Bestimmung der Blitzströme bei ICs nur über indirekte Methoden wie die Messung des abgestrahlten elektrischen oder magnetischen Feldes möglich ist. Hier werden bei der Polaritätsermittlung die gleichen Konventionen wie bei Erdblitzentladungen zugrunde gelegt. Bei vielen Wolkenblitzen ist eine Polaritätsbestimmung aufgrund der geometrischen Ausrichtung mit horizontalen Komponenten sowie ihrer bipolaren bzw. multipolaren Wellenform jedoch unmöglich (vgl. Kapitel 7.2.2).

Entladungen in der Stratosphäre

Von der Erde aus ungleich schwerer zu beobachten sind Gewitterentladungen oberhalb der Wolken. Flugzeugpiloten hatten dieses Phänomen schon oft beobachtet, ihre Berichte wurden früher aber meist als unglaubwürdig abgetan. Seit den neunziger Jahren des 20. Jahrhunderts sind diese Erscheinungen zunehmend zum Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen geworden [Yair u. a., 2004]. Die bekanntesten Vertreter solcher *Transient Luminous Events* (TLE) sind sogenannte *Sprites* und *Elves*.

Bei den *Elves* handelt es sich um Blitzentladungen, die die Gase in der Ionosphäre erleuchten. Sie treten über großen Gewitterwolken als rötliche Ringe in etwa 90 km Höhe auf und werden vermutlich durch unmittelbar vorangegangene Wolkenblitze induziert.

Sprites entstehen in der Mesosphäre in einer Höhe von etwa 70 km ebenfalls über gewaltigen Gewittern. Sie breiten sich in Millisekunden nach oben und unten aus, erscheinen meist rötlich und haben unterschiedliche Formen, von Pilzgebilden bis hin zu Lattenzäunen. Wissenschaftliche Untersuchungen belegen, dass das Auftreten von *Sprites* oberhalb der Wolken mit der gleichzeitigen Entladung positiver Erdblitzentladungen unterhalb dieser Wolken gekoppelt ist [Neubert u. a., 2005].

1.2 Physikalische Abläufe bei Blitzentladungen

Wie in Kapitel 1.1.2 beschrieben, gibt es verschiedene Prozesse in Gewitterwolken, die zur Ladungstrennung und zur Bildung der typischen Strukturen großräumig angelegter Ladungszentren beitragen. Dadurch entstehen in der Wolke, aber auch zwischen Wolke und Erde starke elektrische Potentialgefälle. Die kritische Feldstärke, bei der es in der Luft unter Normaldruck und Normaltemperatur zu Durchschlägen kommt, beträgt ca. 3.000 kV/m

[Cooray, 1997]. Welche physikalischen Prozesse Blitzentladungen jeglicher Art auslösen, ist bis dato ungeklärt und Gegenstand aktueller Forschungen [Solomon u. a., 2001].

Nguyen und Michnowski [1996] untersuchen die Möglichkeit, elektrische Felder mit Durchbruchfeldstärke in Wolken vorzufinden. Die stärksten gemessenen Felder kommen in der Wolke meist an den Grenzen der großen Ladungszentren vor und liegen im Bereich von 300 bis 400 kV/m. Man vermutet, dass die hohen Feldstärken, welche für die Auslösung des Blitzvorgangs erforderlich sind, nur in kleinen Gebieten mit hohen elektrischen Feldern und nur unter bestimmten Nebenbedingungen wie z.B. starken Winden oder Niederschlägen entstehen können. Die ungeklärte Frage dieser konventionellen Entladungshypothese ist, ob sich so – also ohne weitere Einflüsse – lokale Überhöhungen um das 10- Fache der gemessenen elektrischen Feldstärken erklären lassen.

In der alternativen *Runaway-Breakdown*-Theorie sind Elektronen aus kosmischer Strahlung der letztendlich auslösende Faktor der Blitzentladungen [Dwyer, 2005]. Für diese These spricht, dass in der Nähe von künstlich ausgelösten Blitzentladungen sowohl Röntgenstrahlung im Bereich von 30 bis 250 keV [Dwyer u. a., 2004a] als auch Gammastrahlung mit mehr als 10 MeV [Dwyer u. a., 2004b] gemessen wurde. Nach dem RREA-Modell (*Relativistic Runaway Electron Avalanche*) erzeugen Elektronen mittels Bremsstrahlung – durch Zusammenstöße mit Luftmolekülen – weitere, energiereiche Elektronen. Da die neu erzeugten Elektronen weitere Schauer hervorrufen, setzt sich dieser Prozess lawinenartig fort und löst letztendlich die Blitzentladung aus.

Für diesen Prozess würde eine Feldstärke von 150 bis 300 kV/m ausreichen. In sogenannten *Cold Electron Models* wird die Röntgen- und Gammastrahlung aus Blitzentladungen auch ohne die Anwesenheit von kosmischer Strahlung erklärt. Um die gemessenen Strahlungswerte mit diesen Modellen verifizieren zu können, wären aber noch höhere elektrische Felder nötig [Krider, 2003].

Ob auf konventionelle Weise oder mit Hilfe kosmischer Strahlung – in jedem Fall führen beschleunigte geladene Teilchen zur Ausbildung von lokalen Entladungsstrecken, sogenannten *Corona Streamers* [Solomon u. a., 2001]. Diese sind der Auslöser von voranschreitenden, ionisierten Kanälen, bekannt als *Leader*, die sich über die Regionen der starken Felderhöhungen hinaus mit messbarem Stromfluss ausbilden. Die hier beschriebenen, blitzleitenden Prozesse werden *Breakdowns* genannt und treten sowohl bei Erd- als auch bei Wolkenentladungen auf.

1.2.1 Blitzvorgang bei Erdblitzen

Als die am häufigsten beobachtete und untersuchte Blitzart gilt der negative Abwärtsblitz. Die Ausführungen in diesem Kapitel sind deshalb exemplarisch auf diesen Blitztyp zugeschnitten. Die Vorgänge während der Einzelprozesse gelten bis auf die Vorzeichen der Ladungen bzw. die Ausbreitungsrichtungen der Kanäle auch für alle anderen Typen von Bodenblitzen. Eine ausführliche Zusammenstellung der aktuellen Erkenntnisse findet man beispielsweise in Ogawa [1995] oder bei Rakov und Uman [2003].

Breakdown-Prozesse

Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, werden Blitze durch einen wolkeninternen Prozess ausgelöst, den sogenannten *Initial* oder *Preliminary Breakdown*. Auf noch nicht vollständig geklärte Art und Weise entstehen dabei ionisierte Kanäle zwischen den einzelnen Wolkenladungszentren, die Überschläge in Form von Koronaentladungen ermöglichen. Eine Pionierarbeit auf diesem Gebiet sind die von Clarence und Malan [1957] präsentierten Signalverläufe von gemessenen elektrischen Feldern und die anschließenden Diskussionen über die physikalischen Hintergründe. Der *Breakdown*-Prozess wird als Initiator für den nachfolgenden, abwärts gerichteten *Stepped Leader* angesehen.

Leader-Prozesse

Bei *Leader*-Prozessen werden Ladungen aus der Wolke in Richtung Erde transportiert und so ein ionisierter Plasmakanal aufgebaut. Bei den ersten *Leader*-Prozessen eines Blitzes, den *Stepped Leaders*, verläuft die Ausbildung stoßweise in Schritten von ca. 10 bis 50 m mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von ca. $2 \cdot 10^5$ m/s. Dabei entstehen viele Verzweigungen in Richtung der Ausbreitung, die aber trotzdem ionisiert sind und deshalb beim nachfolgenden *Return Stroke* ebenfalls aufleuchten (vgl. Abbildung 1.2).

Je näher der *Leader* der Erde kommt, desto mehr steigt das elektrische Feld am Boden an. Bei der Überschreitung eines kritischen Wertes setzt der *Attachment*-Prozess ein, der einen *Leader* vom Boden aus in Richtung des elektrischen Feldes zum ankommenden *Stepped Leader* sendet. Wenn sich die beiden *Leader* treffen, ist der Kanal geschlossen und der *Stroke*-Prozess beginnt.

Leader-Prozesse zwischen zwei *Strokes* nennt man *Dart Leader*. Diese ignorieren typischerweise die Zweige des Blitzkanals und bewegen sich kontinuierlich mit einer Geschwindigkeit von ca. 10^7 m/s abwärts. Manche *Dart Leader* weichen in Bodennähe von dem vorherigen Pfad ab und münden in einen anderen Fußpunkt als ihre Vorgänger.

Stroke-Prozesse

Die Hauptentladung während eines Bodenblitzes nennt man *Return Stroke*. Bei diesem Vorgang werden die elektrischen Ladungen innerhalb des Blitzkanals neutralisiert. Dadurch fließt ein impulsartiger Strom durch den ionisierten Plasmakanal, dessen Maximalamplitude von der angesammelten Ladungsmenge, aber auch von der Wolkenhöhe abhängt. Dieser Stromimpuls breitet sich als Welle von der Erde zur Wolke mit 2 bis $20 \cdot 10^7$ m/s aus, wobei die Geschwindigkeit mit der Höhe abnimmt. Dabei erhitzt der Strom die Luft auf über 30.000 K und ruft eine intensive optische Strahlung hervor.

Innerhalb eines Blitzereignisses kann es zu mehreren, aufeinanderfolgenden *Return Strokes* kommen. Den ersten *Stroke* nennt man *First Return Stroke*, alle weiteren *Subsequent Return Strokes* oder Folgestrokes. Das Zeitintervall zwischen den einzelnen *Strokes* beträgt zwischen 10 ms und 2 s mit Durchschnittswerten von ca. 50 bis 100 ms [de Miranda u. a., 2003].

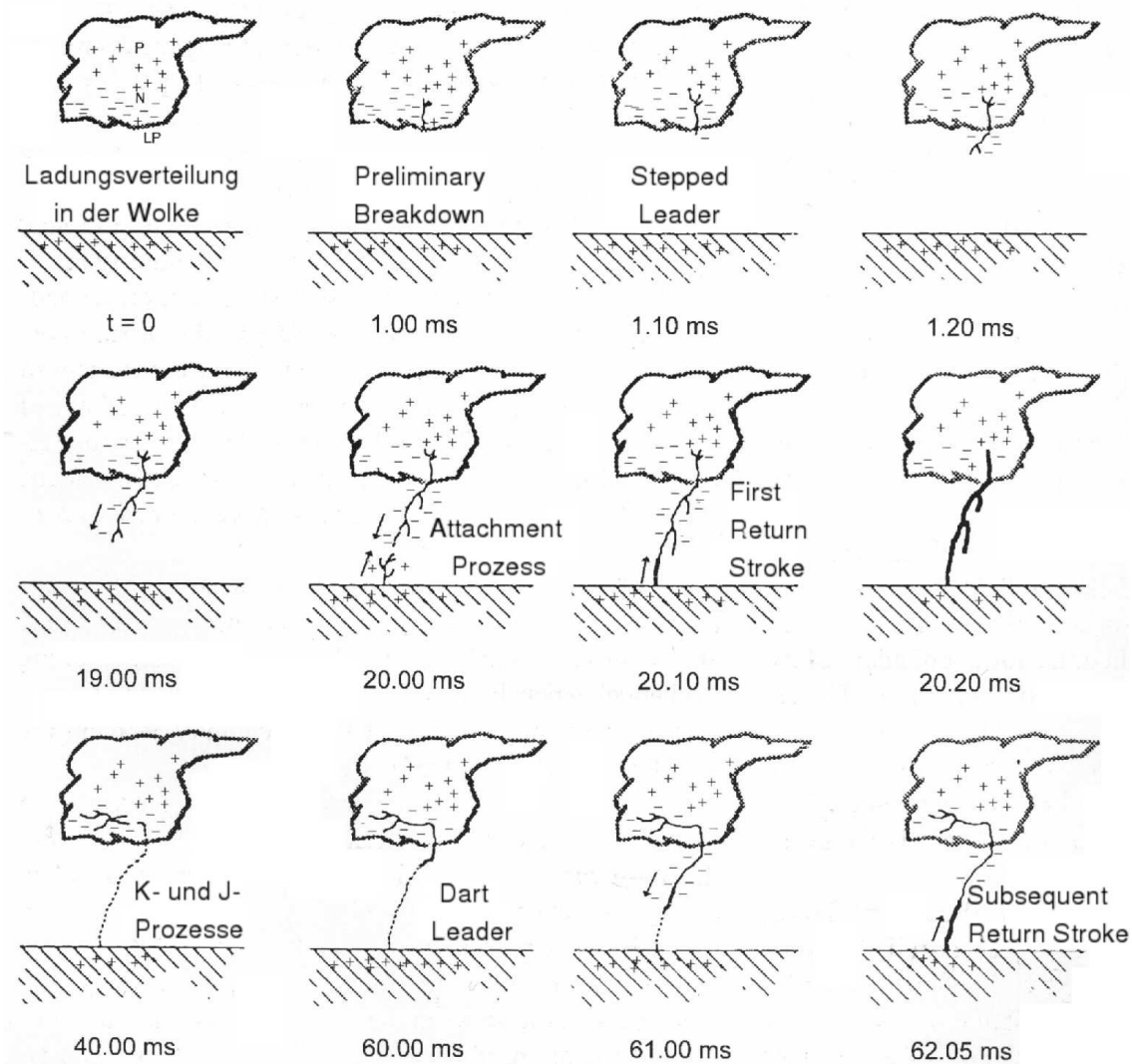


Abbildung 1.2: Prozessphasen bei Erdblitzen am Beispiel des negativen Abwärtsblitzes, nach Rakov und Uman [2003]

Während des *Stroke*-Prozesses wirkt der stromdurchflossene Blitzkanal wie eine kilometerlange Sendeantenne für elektromagnetische Strahlungen. Im Kapitel 2 werden verschiedene Modelle vorgestellt, die die Erzeugung und Übertragung dieser blitzinduzierten Wellen simulieren.

J- und K-Prozesse

Bei einem einzelnen *Return Stroke* sind die Entladungsprozesse nach kleineren Wolkenentladungen – sogenannten F-Prozessen (F steht hier für *final*) – zu Ende. Bei Multistroke-Prozessen werden weitere *Return Strokes* durch *Dart Leader* eingeleitet. Vor dem *Dart Leader* gibt es Übergangsphasen in Form von K- und J-Prozessen, die in der Wolke statt-

finden. Der J-Prozess (abgeleitet von *junction*) ist ein relativ langsamer *Leader*, der sich vom Blitzursprung in Richtung der negativen Wolkenhauptladung bewegt. Dagegen sind K-Prozesse relativ schnelle Vorgänge, die auch *Recoil Streamer* genannt werden. Diese bahnen sich ihren Weg von der positiven Wolkenladung aus in Richtung des Blitzkanals. Sowohl K- als auch J-Prozesse transportieren erneut negative Ladung in den vorionisierten Kanal – die Voraussetzung für den anschließenden *Dart Leader*.

M-Komponenten

Nach einem *Return Stroke* fließen in manchen Fällen für einen Zeitraum von bis zu einigen hundert Millisekunden kontinuierliche Ausgleichsströme durch den Blitzkanal. Wenn diese Ströme Impulskomponenten besitzen, so dass sie im niederfrequenten Bereich Strahlung aussenden, nennt man diese Prozesse M-Komponenten. Dabei fließen Ströme im Bereich von 100 bis 200 A.

1.2.2 Blitzvorgang bei Wolkenblitzen

Es wird angenommen, dass die größte Anzahl der Wolkenblitze Ladungen zwischen dem oberen positiven und dem unteren negativen Ladungszentrum ausgleichen [Shao und Krehbiel, 1996]. Von Kitagawa und Brook [1960] werden Wolkenblitze in drei Phasen eingeteilt: die *Initialphase*, die *Sehr Aktive Phase* und die *Finale Phase*. Shao und Krehbiel [1996] fassen die ersten beiden Phasen zu einer *Aktiven Phase* zusammen. Dieser Vorgang entspricht dem *Initial Breakdown* und den *Stepped Leader*-Prozessen bei den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen negativen Erdblitzern. Dieser Prozess dauert nach Shao und Krehbiel [1996] 10 bis 20 ms und hat eine Vorwachsgeschwindigkeit von ca. 1,5 bis $3,0 \cdot 10^5$ m/s. Am Ende der *Aktiven Phase* ist der Kanal leitfähig. Es wird aber von keinem Vorgang berichtet, der dem *Attachment*-Prozess bei Erdblitzern ähnelt. Die *Finale Phase* ist gekennzeichnet von schnellen Ausgleichsströmen, die genau wie bei Erdblitzern J- und K-Prozesse genannt werden. Shao und Krehbiel [1996] berichten beispielsweise von K-Streamern mit Geschwindigkeiten von 10^6 bis 10^7 m/s.

Auffällig bei der Beschreibung von Vorgängen bei Wolkenblitzen in zusammenfassenden Übersichtsberichten (z.B. Rakov und Uman [2003]) ist das angebliche Fehlen von Entladungen, welche dem *Return Stroke* entsprechen. Diese Lehrmeinung entstand vermutlich dadurch, dass Wolkenblitze in geringerem Maße und dann fast ausschließlich von VHF-Messsystemen untersucht wurden. Wie in Kapitel 1.3.3 näher erläutert, sind diese aber nur auf kurzreichweitige Ladungsbewegungen und nicht auf das anschließende Fließen von Strömen in längeren Kanälen empfindlich.

Eine ausführliche Diskussion der aus der Literatur bekannten Typen von Wolkenentladungen sowie Analysen der jeweils entsprechenden Wellenformen, die mit unserem, im VLF-Bereich empfindlichen Messsystem aufgenommen wurden, erfolgt in Kapitel 7.

1.3 Blitzmessungen

Es gibt eine Reihe von Möglichkeiten, Blitzeinschläge zu registrieren und Blitzparameter wie den Stromverlauf oder Vorwachsengeschwindigkeiten zu messen. Konventionell sind Blitzmesssysteme am Boden installiert, mit den Fortschritten in der Raumfahrt werden aber auch zunehmend Satelliten zur Blitzregistrierung eingesetzt.

Über die Stärke eines Blitzes gibt der Spitzenstrom den besten Aufschluss. Um den wahren Stromverlauf während eines Blitzes aufzuzeichnen, muss dafür gesorgt werden, dass der Blitz an genau definierten und instrumentierten Stellen einschlägt, z.B. in entsprechend ausgerüstete Messtürme. Indirekt ist es aber auch möglich, über die Messung des abgestrahlten elektromagnetischen Feldes auf den Stromverlauf zu schließen. Bekanntlich fungiert der Blitzkanal als eine effektive Strahlungsantenne für elektromagnetische Wellen in einem großen Frequenzbereich. Dieser erstreckt sich vom Radiowellenbereich bis hin zum sichtbaren Licht. Sogar erhöhte Röntgenstrahlung wurde in Verbindung mit Blitzen registriert.

Durch den Aufbau und den Durchzug von Gewitterwolken sowie der damit verbundenen regionalen Ladungsansammlung wird das statische E-Feld ebenfalls beeinträchtigt, dessen Änderung Aufschluss über abgeflossene Ladungsmengen gibt.

1.3.1 Direkte Strommessung

Eine Möglichkeit, den Stromverlauf eines natürlichen Blitzes direkt zu ermitteln, besteht darin, eine Messeinrichtung an hohen Gebäuden zu installieren. In den meisten Fällen wird eine solche an Türmen angebracht, beispielsweise am Funkturm Hoher Peißenberg in Südbayern [Heidler u. a., 1996] oder an dem nahe Salzburg gelegenen Gaisbergturm ([Diendorfer u. a., 2003], [Pichler u. a., 2004]).

Da die Ausbeute an Messungen von direkten Blitzeinschlägen in Türme relativ gering ist, entwickelte man ein Verfahren, mit dem Blitze künstlich ausgelöst werden können. Dafür schießt man Raketen mit anhängenden, dünnen Kupferkabeln in elektrisch geladene Wolkengebiete ([Rakov u. a., 1998], [Uman u. a., 2002]). In den klassischen Raketenexperimenten ist das Kabel elektrisch direkt mit der Erde verbunden. Durch diese Methode wird künstlich ein Aufwärts-Leaderkanal erzeugt, bei dem über einige hundert Millisekunden ein Dauerstrom von einigen hundert Ampere fließt [Saba u. a., 2005]. Dadurch werden abwärts gerichtete *Dart Leader*- und *Return Stroke*-Sequenzen ausgelöst, die sich – im Gegensatz zum Initialprozess – unwesentlich von natürlichen Blitzen unterscheiden.

Die direkte Strommessung bei Turmeinschlägen oder durch Raketenauslöser wird unter anderem dazu benutzt, elektromagnetische Blitzmesssysteme zu eichen. Beispielsweise gibt Orville [1991] für magnetische Sensoren, die beim amerikanischen Blitzmesssystem NLDN benutzt werden, eine Berechnungsvorschrift an, welche mit Hilfe der Strommessungen aus Raketenmessungen ermittelt wurde. Diendorfer u. a. [2002] prüfen die Amplitudenwerte des österreichischen Blitzmesssystems (ALDIS) mit gemessenen Stromwerten bei Einschlägen in den Gaisbergturm. In Kapitel 6 werden einige registrierte Einschläge in den Gaisbergturm auch mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Messsystem verglichen.

Ein anderes Verfahren bei Turmeinschlägen und künstlich ausgelösten Raketenblitzen besteht darin, diese optisch aufzuzeichnen, um daraus Aufschlüsse über die Parameter des Blitzvorganges zu bekommen. Beispielsweise kann so die Vorwachs-geschwindigkeit von *Leader*- und (Folge-) *Return Stroke*-Prozessen ermittelt werden. Wang u. a. [1999] installierten digitale High-Speed-Kameras mit einer Höhengauflösung von 30 m über eine Kanallänge von 400 m. Damit konnten Vorwachs-geschwindigkeiten von *Leadern* bei künstlich ausgelösten Raketenblitzen im Bereich von $1,9 \cdot 10^7$ bis $1,0 \cdot 10^8$ m/s ermittelt werden. Die *Return Stroke*-Geschwindigkeit lag im Bereich von $1,3 \cdot 10^8$ bis $1,5 \cdot 10^8$ m/s, wobei sie dazu tendierte, mit der Höhe abzunehmen.

1.3.2 Beobachtungen im Bereich des sichtbaren Lichtes

Um den gesamten zeitlichen Ablauf eines Blitzes optisch verfolgen zu können, wurden in den sechziger und siebziger Jahren des 20. Jahrhunderts vorzugsweise Boys-Kameras eingesetzt, die den Film während der Belichtung transportieren. Krider [1975] beispielsweise stellt Aufnahmen vor, die mittels einer Kamera mit Fischaugenlinse produziert wurden, bei der sich der Film während der Belichtung mit einer konstanten Rotationsgeschwindigkeit von 1 bis 10 Hz dreht.

In heutiger Zeit zeichnet man Blitzverläufe meist mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitskameras auf. Qie u. a. [2005a] zeigen Blitzbilder vom Qinghai-Tibetan-Plateau mit einer Auflösung von 1 ms, welche mit E-Feld- und Feldmühlmessungen verglichen werden. Neubert u. a. [2005] berichten von einem Kamerasystem auf dem Pic du Midi in Frankreich, das zur Beobachtung von *Sprites* verwendet wird.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, optische Blitzmessungen von Satelliten aus durchzuführen. Die bekannteste Anwendung ist der *Lightning Imaging Sensor* (LIS). Dieser befindet sich an Bord des am 28.11.1997 im Auftrag der NASA gestarteten TRMM-Satelliten (TRMM: *Tropical Rainfall Measuring Mission*). Der Satellit umkreist die Erde mit einer Neigung von 35° , wodurch die Beobachtung auf das Gebiet zwischen 35° n.B. und 35° s.B. eingeschränkt ist. Zu jedem Zeitpunkt deckt der Sensor eine Fläche von $600 \cdot 600$ km² ab. Bei einer Umlaufgeschwindigkeit von 7 km/s bedeutet dies, dass eine einzelne Gewitterzelle 90 s lang beobachtet werden kann [Christian u. a., 1999].

Die LIS-Daten enthalten Wolken- und Erdblitzte, die das System allerdings nicht unterscheiden kann. Im Einzelnen werden die Ereigniszeiten aufgenommen, die abgestrahlte Energie gemessen und der Ort des Blitzereignisses im jeweiligen Blickfeld bestimmt. Die Blitzortungseffizienz im beobachtbaren Zeitfenster wird mit mindestens 90 % angegeben. Auf der Internetseite der NASA (<http://thunder.msfc.nasa.gov/lis>) sind alle gemessenen Blitzdaten frei verfügbar.

Mit unserem System konnten während der TROCCINOX-Mission in Brasilien (10.01.2005 bis 02.03.2005) auch Daten im Einzugsgebiet von LIS erhoben werden. Im Kapitel 6 sind u.a. Einzelbeispiele für korrespondierende Ereignisse beider Systeme dokumentiert, die für statistische Untersuchungen der Ortsabweichung herangezogen wurden.

1.3.3 Messung des elektrischen und magnetischen Feldes

Spätestens seit der Erfindung des Radios beschäftigen sich Menschen mit dem Einfluss von Blitzen auf elektrische und magnetische Felder. Die Blitzentladung wirkt wie ein Sendesignal und stört dabei den örtlichen Radio- und Fernsehempfang, aber auch den Funkverkehr. Blitzmesssysteme nutzen deshalb meist die Ortungsmöglichkeit der Herkunft von elektromagnetischen Wellen aus. Diese sind je nach Anwendung mit elektrischen oder magnetischen Empfangsantennen ausgestattet und meist für einen bestimmten Frequenzbereich konzipiert.

Zwar kann der Blitz in einem weiten Frequenzbereich beobachtet werden, doch sind die Ursachen für die Abstrahlung von elektromagnetischen Wellen in den jeweiligen Frequenzbereichen unterschiedlich. Dem VHF/UHF-Bereich ordnet man idealerweise kurze Entladungsstrecken im Bereich von einigen Metern zu. Deshalb werden mit diesen Systemen meist *Breakdown*- und *Leader*-Prozesse untersucht. Mit Messsystemen, die für den VLF/LF-Bereich ausgelegt sind, detektiert man üblicherweise Blitze mit Ausdehnungen bis zu einigen Kilometern. Der Ortungsschwerpunkt dieser Systeme liegt also eher bei *Return Stroke*-Prozessen, aber auch bei Wolkenaktivität mit längeren Entladungsstrecken.

Ein weiterer Unterschied zwischen Systemen mit hoch- und niederfrequenten Empfangscharakteristiken liegt im Ausbreitungsverhalten der entsprechenden Wellen. Aus der Funktechnik ist bekannt, dass VHF/UHF-Wellen sich nur als Raumwellen, nicht aber als Bodenwellen ausbreiten können. Das bedeutet, dass die Reichweite auf den Sichthorizont eingeschränkt ist und die Amplitudendämpfung bei allseitiger Ausstrahlung mit dem Entfernungskadrat zunimmt. VLF/LF-Wellen dagegen breiten sich gewöhnlich als Bodenwellen aus und haben somit einen größeren Empfangsbereich mit einer schwächeren Amplitudendämpfung, die nur mit der ersten Potenz des zurückgelegten Weges zunimmt. VLF/LF-Raumwellen werden im Gegensatz zu VHF/UHF-Wellen an der Ionosphäre reflektiert. Dadurch wird es möglich, Reflexionsmessungen vorzunehmen, wie sie in Kapitel 2.2.1 beschrieben sind. Wie in Kapitel 2.2 näher ausgeführt, ändern sich aber bei langen Ausbreitungswegen die Wellenformen durch Dispersion. So haben beispielsweise verschiedene Bodenleitfähigkeiten Einfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der VLF/LF-Wellen.

Für die Aufzeichnung von elektrischen Feldänderungen wird im einfachsten Fall eine elektrisch leitende, meist runde Platte verwendet, die in einer bestimmten Höhe über dem Erdboden angebracht wird, so dass sich für diese Apparatur eine Kapazität C ermitteln lässt [Takeuti und Nakano, 1978]. Um unterschiedliches Frequenzverhalten zu gewährleisten, wird mit einem Widerstand R die Zeitkonstante $\tau = R * C$ eingestellt. Sogenannte „langsame“ Antennen haben eine Zeitkonstante von einigen Sekunden; Takeuti und Nakano [1978] nennen für ihre Systeme ungefähr 10 s, Qie u. a. [2005b] 6 s. Bei „schnellen“ E-Antennen werden Zeitkonstanten typischerweise im Milli- bis Mikrosekundenbereich eingestellt; Takeuti und Nakano [1978] geben $100 \mu\text{s}$, Krider u. a. [1977] und Qie u. a. [2005b] jeweils 2 ms an.

Eine andere mögliche Antennenform für die Messung des elektrischen Feldes ist eine einfache Stabantenne. Diese Antennenart verwendet beispielsweise das WWLL-Netzwerk

(*World Wide Lightning Location*) [Rodger u. a., 2004]. Die Eigenschaften dieses Systems sowie Vergleiche der Ortungsgenauigkeit werden in Kapitel 6 näher beschrieben.

Magnetische Feldänderungen hingegen werden in den meisten Fällen mit Rahmenantennen detektiert. Im Gegensatz zu elektrischen Antennen messen diese richtungsabhängig. Deshalb werden typischerweise zwei gekreuzte Antennen an einer Messstation verwendet, sodass eine Winkelpeilung des Signals möglich ist. Krider und Nogge [1975] beispielsweise beschreiben solch ein Antennensystem mit einer Zeitkonstante von 4 ms.

In älteren Arbeiten wurden die erzeugten E- und B-Feldsignale mit einem Oszilloskop aufgenommen. Dieses war meist mit einer Kamera gekoppelt, die automatisch auslöst. In heutiger Zeit werden diese Signale digitalisiert und mit einem Messrechner ausgewertet.

1.3.4 Gegenüberstellung verschiedener Blitzmesssysteme

Die gleichen Blitzereignisse werden von Messsystemen, die in verschiedenen Frequenzbändern messen, unterschiedlich gut detektiert. Um also ein Gesamtbild des Blitzvorgangs zu erhalten und eine Einordnung der Messergebnisse des jeweiligen Systems vornehmen zu können, ist es erforderlich, Messungen von verschiedenen Systemen miteinander zu vergleichen.

Der FORTE-Satellit (*Fast Onboard Recording of Transient Events*) ist für das Studium der Blitzaktivität mit zwei unterschiedlichen Systemen ausgestattet, da er sowohl optische Messinstrumente als auch verschiedene Radiofrequenzempfänger im VHF-Bereich an Bord hat. Dieser Satellit wurde am 29.08.1997 gestartet und umkreist die Erde in einer Höhe von 800 km mit 70 ° Neigung zum Erdäquator. Auswertungen und Vergleiche der verschiedenen FORTE-Daten untereinander sowie ein Vergleich mit dem amerikanischen Blitzmesssystem NLDN finden sich u.a. in Light und Jacobson [2002].

Ein Vergleich von Wellenformen gleicher Ereignisse mit dem im VLF arbeitenden LASA-Netzwerk (*Los Alamos Sferics Array*) zeigt, dass sowohl vom VHF- als auch vom VLF-System *Return Strokes* und *Leader*-Prozesse gesehen werden [Heavner u. a., 2002]. Emissionen aus einer Mindesthöhe von ca. 3 km werden vom Satelliten als Ereignispaare detektiert, da kurz nach der direkten Welle die am Erdboden reflektierte Strahlung ankommt. Durch die Ausnutzung dieser Tatsache können für viele Entladungen Emissionshöhen angegeben werden. Die daraus berechneten *Leader*-Geschwindigkeiten sind im Bereich von 10^6 m/s und damit eine Größenordnung höher als die typischerweise gemessenen Werte. Dies liegt vermutlich daran, dass mit dem FORTE-Satelliten nur sehr strahlungsintensive Impulse vermessen werden können.

1.3.5 Analysemöglichkeiten verschiedener Blitztypen

Erdblitz sind in der Regel leichter zu beobachten und waren in der Vergangenheit eher Forschungsschwerpunkt als Wolkenblitze. Deshalb ist es auch nicht verwunderlich, dass es über Erdblitz einen gesicherteren Erkenntnisstand gibt als über Wolkenblitze. Trotzdem sind die genauen Abläufe, vor allem die Aktivitäten innerhalb der Wolke, auch bei Erdblitz noch nicht vollständig geklärt.

Wenn ein Messsystem in der Lage ist, sowohl Erd- als auch Wolkenblitze zu detektieren, zu separieren und Wolkenblitzen eine Emissionshöhe zuzuordnen, spricht man von einem *Total Lightning*-System. Bei Messungen von Blitzentladungen im breitbandigen Radiowellenbereich finden sich in der Literatur verschiedene Möglichkeiten zur Unterscheidung von Wolken- und Erdblitzten.

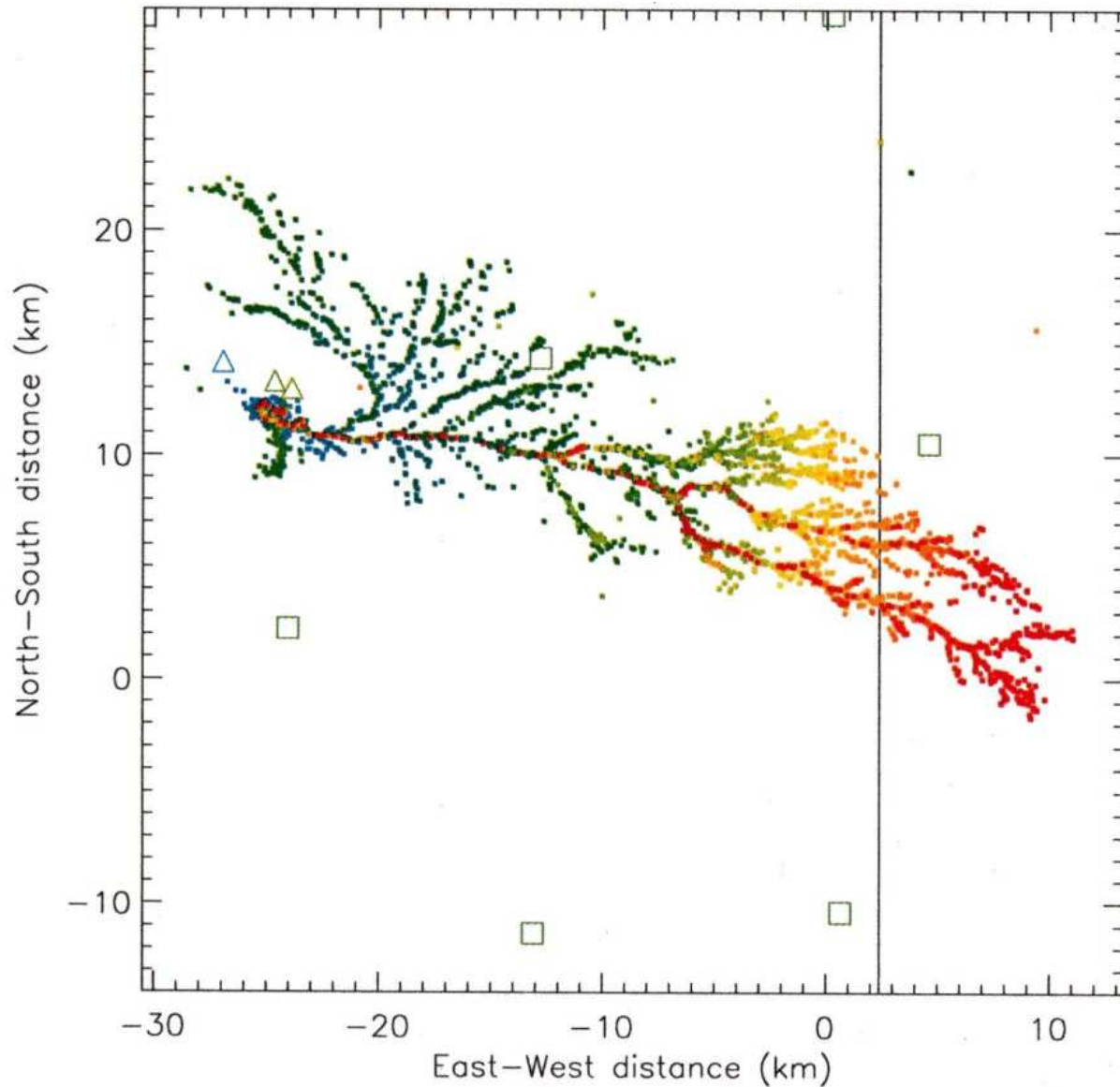


Abbildung 1.3: Darstellung eines zwei Sekunden dauernden Blitzereignisses, gemessen mit dem von Thomas u. a. [2004] vorgestellten VHF-Systems. Die Messstationen sind als Quadrate markiert, die Dreiecke sind zeitgleich registrierte negative Erdblitzereignisse des NLDN-Systems (VLF).

Thomas u. a. [2004] zeigen höhenaufgelöste Entladungen im VHF-Bereich gemessen mit der Laufzeitdifferenz-Methode (siehe Kapitel 4.1.2). Mit diesem System können sehr genau die einzelnen Zweige der *Stepped Leader* zeit- und ortsaufgelöst dargestellt werden (vgl. Abbildung 1.3). Der Vergleich mit dem im VLF-Bereich arbeitenden NLDN-System zeigt, dass unklar ist, ob jeder zur Erde gerichtete *Stepped Leader* auch einen *Return Stroke* ausgelöst hat. Da bei VHF-Systemen alle *Leader*-Prozesse detektiert werden, müssen pro Blitzentladung wesentlich mehr Daten verarbeitet werden als bei vergleichbaren VLF-Netzen. Beispielsweise enthält das in der Abbildung 1.3 dargestellte Blitzereignis innerhalb von zwei Sekunden über 5.000 geortete Strahlungsquellen.

Ein oft genanntes Merkmal für die analytische Separation von Erd- und Wolkenentladungen im VLF-Bereich ist das sogenannte Wellenformkriterium ([Cummins u. a., 1998], [Heavner u. a., 2003]). Danach wird eine Entladung als *Return Stroke* eines Bodenblitzes eingestuft, wenn die Zeit vom Erreichen des Feldmaximums bis zum nächsten Nulldurchgang (peak-to-zero time, kurz: pzt) einen bestimmten Wert überschritten hat. Dieser Wert hängt vom verwendeten Frequenzbereich des Messaufbaus ab und wird von verschiedenen Autoren auch unterschiedlich festgelegt. Dieses Verfahren kommt ausschließlich bei ELF- oder VLF-Systemen zum Einsatz, da die untere Grenzfrequenz möglichst tief sein muss, damit dieser Effekt sichtbar ist.

Eine interessante Möglichkeit, Blitzhöhen mit einem VLF-System zu ermitteln stellen Smith u. a. [2004] vor. Sie ziehen dafür in Betracht, dass die elektromagnetische Welle nicht nur direkt zur Empfangsantenne gelangt, sondern ein Teil davon als Folge der Reflexion an der Ionosphäre verspätet und gedämpft eintrifft. Findet die Entladung in einer gewissen Mindesthöhe statt, gibt es kurz nach der ersten Reflexionswelle noch eine zweite, die vom Blitzort zuerst zum Boden und danach an der Ionosphäre reflektiert wurde. Allerdings müssen die beiden Reflexionsimpulse für die Höhermittlung noch gut detektierbar sein. Aus diesem Grund können diese Messungen nur bei sehr kurzen und strahlungsintensiven Ereignissen, sogenannten NBEs (*Narrow Bipolar Events*), vorgenommen werden, die aber höchstens bei einem Zehntel aller Wolkenentladungen vorkommen. In Kapitel 7.2.1 werden Beispiele und Auswertungen solcher Strahlungen vorgestellt, die mit unserem Messsystem aufgenommen wurden.

Neben der grundlegenden Unterscheidung zwischen Erd- und Wolkenblitzen werden Einzelentladungen auch nach ihrer Wellenform den einzelnen Phasen des Blitzes zugeordnet. Wie in Kapitel 1.2.1 beschrieben, gibt es im Zusammenhang mit Erdblitzen auch Wolkenentladungen, beispielsweise als Vorentladungen in Form von *Breakdowns* oder *Bursts*. Diese zeichnen sich durch eine größere Anzahl aufeinanderfolgender Impulse über einen längeren Zeitraum (ca. 1 bis 3 ms) aus. Im Gegensatz dazu wurden kurze, zeitlich isolierte Impulse mit einer hohen Strahlungsintensität (NBEs) ebenfalls als Wolkenentladungen eingestuft. Im Kapitel 7 werden diese beiden Typen genauer untersucht, wobei angenommen wird, dass länger andauernde Impulse mit vielen Peaks *Leader*-, isolierte Impulse dagegen *Stroke*-Prozessen zuzuordnen sind.

1.4 Beitrag dieser Arbeit zum aktuellen Erkenntnisstand

Systeme, die vom Blitz abgestrahlte elektromagnetische Wellen detektieren, müssen – je nach Messart – besonderen Anforderungen genügen. Im Kapitel 2 werden daher die natürlichen, physikalischen Parameter untersucht, die die Entstehung und Ausbreitung solcher Wellen beeinflussen.

Im Vordergrund dieser Arbeit steht die Entwicklung und Erprobung eines neuartigen Blitzmessnetzes im VLF-Bereich. Dieses besteht aus einer Vielzahl gleichartiger Einzelstationen, die in Aufbau und Funktionsweise in Kapitel 3 genauer vorgestellt werden.

Das Ziel ist es, die gleichzeitig an mehreren Stationen registrierten Blitzereignisse möglichst genau in Ort und Zeit zu lokalisieren. Im Kapitel 4 wird das dafür eigens entwickelte 3D-Verfahren vorgestellt. Diese Methode erlaubt es erstmals, mit gemessenen magnetischen Feldern im VLF-Bereich auch die Höhe des Wellenursprungs zu bestimmen, ohne dabei Reflexionsimpulse berücksichtigen zu müssen. Möglich wird dies durch eine akkurate Zeitbestimmung eines charakteristischen Punktes im Wellenzug. Bei ausgewählten Fällen konnten die ermittelten Blitzhöhen mit einem alternativen Verfahren verifiziert werden.

Die Anzahl und Anordnung der Messstationen im Verbund haben einen großen Einfluss auf die Qualität der Peilergebnisse. Im Kapitel 5 sind diese Parameter für die einzelnen Messkampagnen dokumentiert. Die Blitzorte werden mittels Ausgleichsrechnungen durch die Minimierung der in Kapitel 4 aufgestellten χ^2 -Werte ermittelt. Diese werden statistisch ausgewertet und, ebenso wie die Blitzhöhenprofile, als Güteindikatoren der Endergebnisse herangezogen.

Die in Kapitel 6 vorgestellten Vergleiche mit mehreren anderen Blitzerfassungssystemen unterschiedlichster Art zeigen, dass das neu entwickelte Messsystem mit einer bisher erreichten Effizienz arbeitet. Die Anzahl registrierter Blitzereignisse übertraf jene, die mit herkömmlichen, meist kommerziellen Systemen ermittelt wurde, bis um das Zehnfache. Die Angaben über die Ortungsgenauigkeit konnte dabei über den Vergleich mit zeitgleichen Entladungen verifiziert werden. Der Grund für die immense Detektion zusätzlicher Ereignisse liegt in der Empfindlichkeit des Messnetzes auch bei schwachen Blitzströmen bis zu 1 kA.

Durch die Messung amplitudenschwacher Signale ist es jetzt möglich, auch Wolkenblitze effizient zu erfassen. Dies war bisher mit Messsystemen im VLF / LF-Bereich nicht möglich, sodass es auch in der Literatur dahingehend keine umfassenden Untersuchungen gibt. Mit den Daten aus der hier vorliegenden Arbeit konnten so erstmalig zeit- und höhenaufgelöste Bilder von Entladungsstrecken aus einem VLF-System dargestellt werden, die das Kapitel 7 präsentiert. Eine Klassifizierung von Impulstypen aus dem magnetischen Feldverlauf zeigt markante Unterschiede zwischen Wolken- und Erdblitzten, aber auch unterschiedliche Typen von Wolkenentladungen.

Kapitel 2

Blitzinduzierte elektromagnetische Wellen

Um die Daten aus den Messungen des elektromagnetischen Feldes richtig zu interpretieren und daraus auf Blitzeigenschaften schließen zu können, ist es notwendig, die gesamte Kette von der Blitzerzeugung über die Ausbreitung der Welle bis hin zu den Eigenschaften des Messsystems zu analysieren. Für den Stromverlauf von *Return Strokes* und die Erzeugung des elektromagnetischen Feldes als dessen Folge gibt es verschiedene Beschreibungsmöglichkeiten. Eine Übersicht über häufig angewandte Blitzstrommodelle und ihre Praxistauglichkeit wird in Kapitel 2.1 vorgestellt.

Wenn die elektromagnetischen Felder nicht unmittelbar am Blitzort, sondern in größeren Entfernungen gemessen werden, sind Ausbreitungseffekte in der Atmosphäre zu beachten, die Einfluss auf Form und Größe der Welle haben. Im Kapitel 2.2 werden daher verschiedene Ausbreitungsmodelle vorgestellt und deren praktische Anwendung anhand von Beispielen beschrieben.

2.1 Erzeugung – Modellierung des Stromflusses im Blitzkanal

2.1.1 Überblick über bestehende Modelltypen

Ein wichtiges Gebiet in der Blitzforschung ist die Abschätzung der Stromparameter aus den gemessenen elektromagnetischen Feldern. Generell werden Blitzmodelle, die den elektrischen Strom innerhalb des Kanals berücksichtigen, nach Rakov und Uman [2003] in drei Kategorien eingeteilt:

- elektromagnetische Modelle,
- *Distributed Circuit*-Modelle und
- *Engineering*-Modelle.

In elektromagnetischen Modellen wird der Blitzkanal als eine verlustbehaftete, dünne Drahtantenne dargestellt. Um die zeitliche Entwicklung des Stromverlaufes zu beschreiben, müssen die Maxwell-Gleichungen numerisch gelöst werden.

Distributed Circuit-Modelle hingegen beschreiben den Blitzkanal als ein Netzwerk aus ohmschen, kapazitiven und induktiven Widerständen. Mit Hilfe der Telegraphengleichung wird für dieses Netzwerk ein Zusammenhang zwischen Strom und Spannung in Abhängigkeit von Höhe z und Zeit t angegeben.

Die *Engineering*-Modelle beschreiben den Verlauf des abgestrahlten, elektromagnetischen Feldes, welches durch *Return Strokes* erzeugt wird. Als Ursache des Feldes wird der Stromverlauf in einem vertikalen Blitzkanal durch zwei Effekte beschrieben: einen angenommenen Stromverlauf am Boden sowie dessen Ausbreitung entlang des Blitzkanals. Mit Raketenexperimenten ermittelten beispielsweise Thottappillil und Uman [1993] den zeitabhängigen Strom im Kanalfußpunkt experimentell. Für Simulationen greift man aber üblicherweise auf die von Heidler [1987] vorgestellte Funktion zurück.

$$i_{\text{Boden}}(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{(t/\tau_1)^n + 1} e^{-t/\tau_2} \quad (2.1)$$

Dabei ist I_0 der Stromscheitelwert; τ_1 bezeichnet man als Stirnzeitkonstante, τ_2 als Rückenzeitkonstante, η als Scheitelkorrekturfaktor und n als Steilheitsexponent. Diese Gleichung wird in Kapitel 3.3.2 dazu dienen, einfache magnetische Feldverläufe zu simulieren, um an ihnen verschiedene Filtereigenschaften des Messsystems zu testen.

Wegen verschiedener Ansätze zur Ausbreitung des Stromes im Blitzkanal werden die *Engineering*-Blitzstrommodelle von Rakov und Uman [2003] in zwei Grundtypen eingeteilt, namentlich in

- *Transmission Line*-Modelle (TL) und in
- *Traveling Current Source*-Modelle (TCS).

Bei allen *Engineering*-Modellen wird davon ausgegangen, dass sich eine Wanderwelle mit einer definierten Geschwindigkeit vom Boden aus in Aufwärtsrichtung bewegt. Der Unterschied zwischen den beiden Typen liegt im Ansatz der Stromfunktion bei gegebener Höhe. Die *Traveling Current Source*-Modelle liefern in einer bestimmten Höhe den Stromwert der Bodenfunktion zu der Zeit, die die Welle bis in diese Höhe gebraucht hat. Dabei berücksichtigt man zusätzlich, dass sich diese Information nur mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten kann. Bei den *Transmission Line*-Modellen entspricht die Geschwindigkeit der Wanderwelle der Frontgeschwindigkeit, so dass bei diesen Modellen die Bodenblitzfunktion zu einer bestimmten höhenabhängigen Zeit später eintrifft. Beide Modelltypen weisen verschiedene Abwandlungen auf, bei denen die Ausbreitungsgeschwindigkeit nicht mehr konstant bleibt, sondern durch Dämpfungsfaktoren variabel gestaltet wird.

Bei Vergleichen der simulierten Blitzverläufe mit gemessenen Werten gibt es bisher mit *Engineering*-Modellen die größten Übereinstimmungen. Im Kapitel 2.1.3 werden aktuelle Beispiele aus der Literatur aufgelistet und die Praxistauglichkeit der Modelle diskutiert.

2.1.2 Ermittlung des elektrischen und magnetischen Feldes

Ausgehend vom Stromfluss im Blitzkanal $i(z, t)$ kann das resultierende elektrische und magnetische Feld berechnet werden. Eine ausführliche, allgemeine Herleitung für die Feldstärken am Boden als Funktion von zeit- und höhenabhängigen Änderungen der Ladungsdichte findet man bei Thottappillil u. a. [1997]. Die hier vorgestellte Übersicht ist Ogawa [1995] entnommen.

Angenommen wird eine gerade, vertikale Antenne der Höhe H , die einen idealen Blitzkanal über einer perfekt leitenden Oberfläche symbolisiert. Die vertikale Komponente des elektrischen Feldes und die horizontale Komponente des magnetischen Feldes an einem Beobachtungspunkt P am Boden im Abstand r zum Fußpunkt des Blitzortes zur Zeit t kann durch Gleichung 2.2 und 2.3 bestimmt werden.

$$E_z(r, t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[\int_0^H \frac{2 - 3 \sin^2 \theta}{R^3} \int_0^t i(z, t - R/c) dt dz + \int_0^H \frac{2 - 3 \sin^2 \theta}{cR^2} i(z, t - R/c) dz - \int_0^H \frac{2 - 3 \sin^2 \theta}{c^2 R} \frac{\partial i(z, t - R/c)}{\partial t} dz \right] \quad (2.2)$$

$$B_\phi(r, t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\int_0^H \frac{\sin \theta}{R^2} i(z, t - R/c) dz + \int_0^H \frac{\sin \theta}{cR} \frac{\partial i(z, t - R/c)}{\partial t} dz \right] \quad (2.3)$$

Dabei bezeichnet R den direkten Abstand vom Beobachtungspunkt P zur jeweiligen Blitzhöhe z . An jedem beliebigen Höhengsegment dz spannt der Winkel θ den Bereich zwischen der z -Achse und der Richtung zum Beobachtungspunkt P auf; in der Höhe $z = 0$ beginnt die Integration über z also mit $\theta = 90^\circ$. Die ersten beiden Terme in Gleichung 2.2 bezeichnet man als den elektrostatischen und den induzierten Term, den dritten als elektrischen Strahlungsterm. Beim Magnetfeld (Gleichung 2.3) unterscheidet man zwischen dem magnetostatischen (oder induzierten) Term und dem magnetischen Strahlungsterm.

In genügend großer Entfernung dominiert der Strahlungsterm des elektromagnetischen Feldes, da dieser im Gegensatz zu den beiden anderen Termen proportional zu $1/r$ ist. Für jedes Blitzstrommodell aus Kapitel 2.1.1 kann eine vereinfachte Beziehung $E_z^{rad} = f(i)$ für das Strahlungsfeld aufgestellt werden. Eine zusammenfassende Übersicht stellen Rachidi u. a. [2004] vor. Eine besonders einfache Beziehung für das Fernfeld erhält man bei der Verwendung des TL-Modells.

$$E_z^{rad}(r, t) = -\frac{v}{2\pi\epsilon_0 c^2 r} i_{Boden}(t - r/c) \quad (2.4)$$

Die elektrische Feldstärke ist dabei proportional zum Stromfluss am Boden, der bei Turmeinschlägen oder Raketenexperimenten gemessen werden kann. In den Proportionalitätsfaktor geht u.a. die *Return Stroke*-Geschwindigkeit ein, die im TL-Modell eine Konstante darstellt. Für den Strahlungsterm des korrespondierenden, magnetischen Feldes gilt die klassische Beziehung:

$$|B_\phi^{rad}| = \frac{|E_z^{rad}|}{c} \quad (2.5)$$

Bei Blitzerfassungssystemen nutzt man die Beziehungen aus den Gleichungen 2.4 und 2.5, um aus der gemessenen elektrischen oder magnetischen Feldstärke auf den geflossenen, maximalen Blitzstrom zu schließen. Bei dem in dieser Arbeit vorgestellten Messsystem wurde der Umrechnungsfaktor aus Vergleichen mit Blitzeinschlägen in Türmen ermittelt, die in Kapitel 6.1 näher vorgestellt werden.

2.1.3 Anwendbarkeit der Blitzstrommodelle

In einer Reihe von Arbeiten ([Uman u. a., 2002], [Thottappillil und Uman, 1993], [Nucci u. a., 1990]) werden die verschiedenen Blitzstrommodelle miteinander verglichen und auf ihre Praxistauglichkeit überprüft. Schoene u. a. [2003] beispielsweise vergleichen berechnete E- und B-Feldformen und deren zeitliche Ableitungen aus dem TL- und dem TCS-Modell in Entfernungen von 15 und 30 m vom Blitzort mit gemessenen Daten, die von einem ausgelösten Blitz mit fünf Einzelstrokes aus einem Raketenexperiment gewonnen wurden. Genau wie Thottappillil und Uman [1993] halten sie das TL-Modell wegen seinen einfachen mathematischen Relationen und den gleich guten oder besseren Vergleichsergebnissen für das geeignetste Blitzstrommodell.

Trotzdem muss beachtet werden, dass die in Kapitel 2.1.1 vorgestellten *Engineering*-Blitzstrommodelle möglichst einfach aufgebaut sind und viele wichtige physikalische Aspekte vernachlässigen, beispielsweise den Strahlungseffekt der Koronahülle und die zeitliche Änderung der Leitfähigkeit im Inneren des Blitzkanals. Cooray und Gomes [1998] präsentieren ein Modell, das genau diese Faktoren berücksichtigt. Die dabei erhaltenen Simulationsergebnisse werden mit den Mess- und Simulationsergebnissen von Thottappillil und Uman [1993] verglichen; das Modell von Cooray und Gomes zeigt bessere Übereinstimmungen zwischen Theorie und Messergebnissen. Visacro und Silveira [2004] stellen ein hybrides, elektromagnetisches Modell vor und bemerken, dass die Stromgeschwindigkeit der Wanderwelle durch eine Expansion der Koronahülle reduziert wird und die Dämpfung der Stromwelle durch Leitfähigkeitsverluste im Kern erklärt werden kann.

Ein weiterer Vergleichspunkt ist die Veränderung der *Return Stroke*-Geschwindigkeit während des Blitzvorgangs. Die *Engineering*-Blitzstrommodelle beinhalten, dass, je nach

Wahl der Parameter, die Geschwindigkeit der Wanderwelle konstant bleibt oder mit der Höhe abnimmt. In verschiedenen Experimenten ([Idone und Orville, 1982], [Wang u. a., 1999], [Olsen u. a., 2004]) wurden bei raketengetriggerten Blitzen mittels Hochgeschwindigkeitskameras in verschiedenen Höhensegmenten die jeweiligen *Return Stroke*-Geschwindigkeiten vermessen. Wang u. a. [1999] untersuchten zwei *Return Strokes* in acht Höhensegmenten mit jeweils 30 m Auflösung, Olsen u. a. [2004] fünf *Strokes* in vier Segmenten mit ca. 50 m Auflösung. Beide Experimente zeigen, dass die Geschwindigkeit tendenziell mit der Höhe abnimmt. Allerdings ist die Ereignisanzahl für eine fundierte statistische Aussage zu gering, die Messfehler liegen im Bereich von 10 bis 20 %.

2.2 Änderung der Welleneigenschaften während der Ausbreitung

Die in Kapitel 2.1.2 vorgestellten Gleichungen zur Ermittlung des elektrischen und magnetischen Feldes wurden unter der Voraussetzung einer perfekt leitenden Oberfläche und eines nach oben offenen Raumes aufgestellt. In diesem Kapitel soll nun betrachtet werden, wie sich die elektromagnetische Welle im Erd-Ionosphären-Wellenleiter mit Dispersion, beispielsweise aufgrund endlich leitender Grenzflächen, ausbreitet. Dabei sollen folgende Ausbreitungseffekte näher untersucht werden:

- das Auftreten von zeitlich versetzten Impulsen durch Reflexionen,
- die Veränderung der Form des Wellenzuges aufgrund der Dispersion und
- die Abschwächung der Amplitude über den Ausbreitungsweg.

Die einfachste Modellgeometrie für die Simulation der Ausbreitung stellt sich als zweidimensionale, ebene Fläche dar, die zwei perfekt reflektierende Ränder im Abstand h besitzt. Diese Ränder symbolisieren die Erde bzw. die Ionosphäre. Bei einer exakteren Berechnung muss das Modell entsprechend angepasst werden, indem die Reflexionseigenschaften von Erde und Ionosphäre berücksichtigt werden und eine dreidimensionale, sphärische Rechnung durchgeführt wird.

Die Ausbreitungseffekte fallen naturgemäß mit steigendem Abstand des Messortes zum Ereignisort ins Gewicht. Man unterscheidet zwischen Nah- und Fernfeld, wobei nur eine ungefähre Trennung bei ca. 100 bis 300 km vorgenommen werden kann. Im Nahfeld ist die direkte Strahlung bis zum Sichthorizont bzw. die führende Bodenwelle im gemessenen Feldverlauf dominant; die Dispersion hat nur einen sehr geringen Einfluss. Für das Fernfeld dagegen müssen Reflexionen an der Erde und Ionosphäre berücksichtigt werden, da die Dispersion einen entscheidenden Einfluss auf die Form der Welle hat.

2.2.1 Auftreten von Reflexionsimpulsen

Bei den theoretischen Betrachtungen von Reflexionsimpulsen werden die Signale ausschließlich im Zeitbereich beschrieben. Es wird davon ausgegangen, dass das Ausgangssignal ver-

schiedene Möglichkeiten hat, zum Empfangsort zu gelangen: hauptsächlich als Bodenwelle, aber auch über Einfach- oder Mehrfachreflexionen zwischen der Ionosphäre und der Erde. In der einfachsten, zweidimensionalen Modellgeometrie wird von McDonald u. a. [1979] ein Zusammenhang angegeben, um den Abstand zum Blitzort r bzw. die effektive Ionosphärenhöhe h zu ermitteln (Gleichung 2.6). Dazu benötigt werden die Differenzzeiten zwischen der Ankunft der Bodenwelle und der ersten Reflexionswelle t_1 bzw. zwischen der Bodenwelle und der zweiten Reflexionswelle t_2 .

$$\begin{aligned} r &= \frac{c}{2} \frac{t_2^2 - 4t_1^2}{4t_1 - t_2} \\ h &= \frac{c}{2} \frac{\sqrt{t_1 t_2} \sqrt{t_2 - t_1}}{\sqrt{4t_1 - t_2}} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Unter Berücksichtigung der sphärischen Geometrie kann die Herleitung von McDonald u. a. [1979] benutzt werden, um unabhängig von der Anzahl der Reflexionen die Höhe der Ionosphäre zu ermitteln (Gleichung 2.7). Bei diesen Gleichungen geht man davon aus, dass sich der Ausgangspunkt der Welle am Boden befindet; r_e ist dabei der mittlere Erdradius und d der Abstand auf dem Großkreis zwischen Quell- und Empfangsort der Welle.

$$\begin{aligned} h_1 &= r_E \left[\cos^2 \left(\frac{d}{2r_E} \right) - 1 \right] + \sqrt{r_E^2 \left[\cos^2 \left(\frac{d}{2r_E} \right) - 1 \right] + \left(\frac{ct_1 + d}{2} \right)^2} \\ h_2 &= r_E \left[\cos^2 \left(\frac{d}{4r_E} \right) - 1 \right] + \sqrt{r_E^2 \left[\cos^2 \left(\frac{d}{4r_E} \right) - 1 \right] + \left(\frac{ct_2 + d}{4} \right)^2} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Smith u. a. [2004] stellen eine Berechnungsvorschrift vor, mit der über die Vermessung der Laufzeitunterschiede infolge von Reflexionen auf die Emissionshöhe des Strahlungsobjektes S geschlossen werden kann. Die Geometrie des Fallbeispiels ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Die elektromagnetische Welle wird in einer bestimmten Höhe h_s erzeugt und erreicht als Bodenwelle den Empfangsort R. Der an der Ionosphäre reflektierte Impuls trifft zu einer späteren Zeit am Ort R an. Die Wegdifferenz zwischen dieser reflektierten Welle und der Bodenwelle beträgt d_i (siehe Gleichung 2.8). Dabei ist d der Laufweg der Bodenwelle zwischen S und R, r_E der Erdradius und h_i die Ionosphärenhöhe. Der Winkel ϕ_1 überstreicht die Fläche vom Signalort S zum Reflexionspunkt mit der Ionosphäre, ausgehend vom Erdmittelpunkt, ϕ_2 umfasst den restlichen Winkel vom Reflexionspunkt bis zum Empfangsort R.

$$\begin{aligned} d_i &= \sqrt{(r_E + h_i)^2 + (r_E + h_s)^2 - 2(r_E + h_i)(r_E + h_s) \cos \phi_1} \\ &\quad + \sqrt{(r_E + h_i)^2 + r_E^2 - 2(r_E + h_i)r_E \cos \phi_2} - d \end{aligned} \quad (2.8)$$

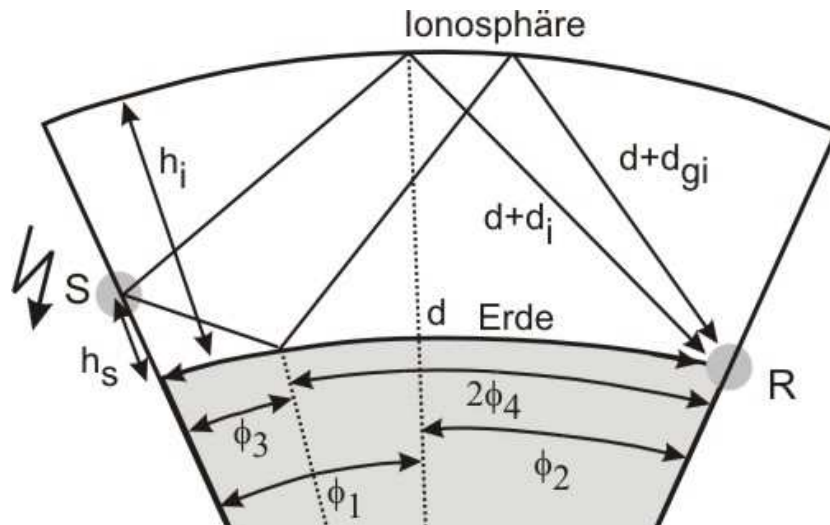


Abbildung 2.1: Gangunterschied bei der Ausbreitung der elektromagnetischen Welle von S zu R mit einer Ionosphärenreflexion und einer Boden-Ionosphärenreflexion

Wenn die Emission in einer nicht zu vernachlässigenden Höhe stattfindet, wird der zeitlich nachfolgende Impuls erst am Boden und anschließend an der Ionosphäre reflektiert. Der Gangunterschied d_{gi} berechnet sich dann nach Gleichung 2.9, wobei ϕ_3 der Winkel zwischen S und dem Reflexionspunkt am Boden ist, vom Erdmittelpunkt aus gesehen, und ϕ_4 der Winkel zwischen den Reflexionspunkten am Boden und der Ionosphäre bzw. von der Ionosphäre bis zu R.

$$d_{gi} = \sqrt{(r_E + h_s)^2 + r_E^2 - 2(r_E + h_s)r_E \cos \phi_3} + 2\sqrt{(r_E + h_i)^2 + r_E^2 - 2(r_E + h_i)r_E \cos \phi_4} - d \quad (2.9)$$

Die Winkel ϕ_1 und ϕ_2 aus der Rechnung mit einer Ionosphärenreflexion (Gleichung 2.8) und die Winkel ϕ_3 und ϕ_4 aus der Rechnung mit Boden- und Ionosphärenreflexion können mit der Näherung einer geringen Erdkrümmung ($d \ll r_E$) wie folgt berechnet werden.

$$\begin{aligned} \tan \frac{\phi_1}{2} &= \frac{\sin(d/2r_E)}{\frac{h_i(r_E + h_s)}{r_E(h_i - h_s)} + \cos(d/2r_E)} \\ \phi_2 &= d/r_E - \phi_1 \\ \phi_4 &= \frac{d/r_E}{h_s/h_i + 2} \\ \phi_3 &= d/r_E - 2\phi_4 \end{aligned} \quad (2.10)$$

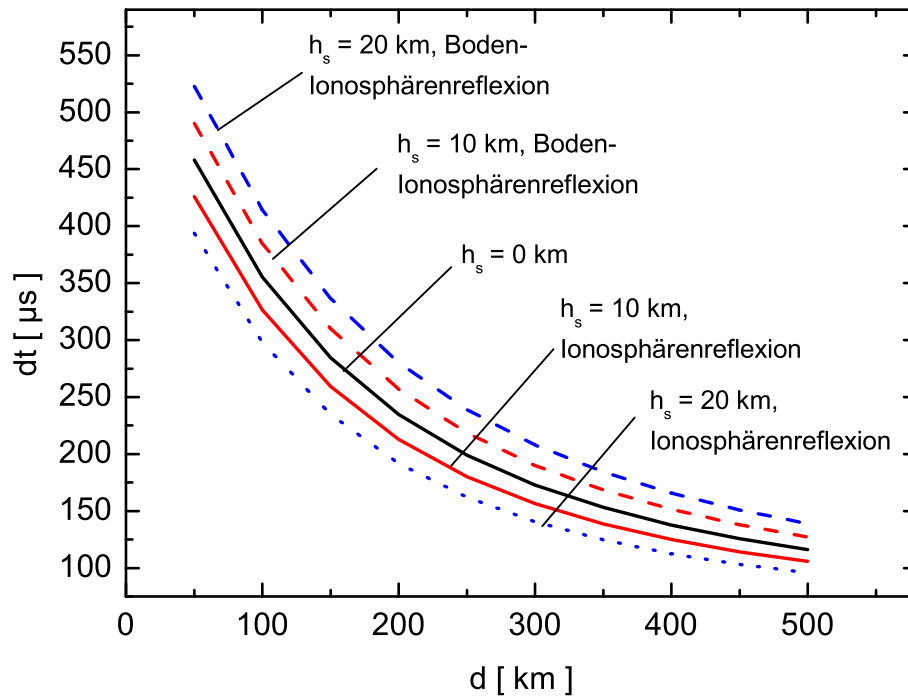


Abbildung 2.2: Differenzen in den Ankunftszeiten dt der reflektierten Wellen bei Variation der Blitzhöhe h_s und des Stationsabstandes d zum Blitzort

Die Auswirkungen auf die Ankunftszeiten der reflektierten Wellen sind in Abbildung 2.2 dargestellt. Aufgetragen sind die Differenzzeiten zur direkten Welle in Abhängigkeit von der Stationsentfernung zum Blitzort. Je näher sich die Station am Blitzort befindet, desto größer ist der ermittelte Gangunterschied in Gleichung 2.8 und Gleichung 2.9. Wenn die Emissionshöhe h_s Null ist, gibt es naturgemäß keinen Unterschied mehr zwischen den Laufwegen der einfachen Ionosphärenreflexion und der Boden-Ionosphärenreflexion.

In Kapitel 7.2.1 werden Blitzhöhen für Einzelereignisse präsentiert, die auf der hier vorgestellten Reflexionsmethode basieren. Dafür muss man aus den Wellenformen der detektierten Ereignisse die Ankunftszeiten der Bodenwellen, aber auch der reflektierten Wellen extrahieren. Zur besseren Identifizierung sollten die Impulse möglichst stark und schmal sein, was die Auswahl passender „Kandidaten“ sehr beschränkt. Eine zeitliche Überlagerung der beiden reflektierten Wellen erschwert die Analyse ebenfalls. Der Abbildung 2.2 ist zu entnehmen, dass die zeitliche Differenz zwischen der oberen und der dazugehörigen unteren Kurve umso kleiner ausfällt, je geringer die Blitzhöhe und je größer der Abstand der Station zum Blitz ist.

2.2.2 Dispersionseinfluss auf die Form des Wellenzuges

Die Ausbreitungseigenschaften der elektromagnetischen Welle können durch eine Transferfunktion $T(\omega)$ beschrieben werden [Volland, 1995]. Diese Transferfunktion wird im Frequenzbereich mit der Fourier-Transformierten des Ausgangssignals multipliziert und anschließend wieder in den Zeitbereich rücktransformiert.

$$E(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{E}_0(\omega) T(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (2.11)$$

Die Transferfunktion kann durch zwei verschiedene Ansätze modelliert werden: einerseits durch die Strahlungstheorie, andererseits durch die Wellentheorie. Bei der Strahlungstheorie wird die Ausbreitung der Welle als Summe der direkt laufenden Bodenwelle und aller Reflexionswellen beschrieben. In die Transferfunktion geht die Überlagerung der verschiedenen Laufwege ein.

Bei der Wellentheorie wird der Erd-Ionosphären-Wellenleiter wie ein Hohlleiter behandelt, in dem sich verschiedene Schwingungsmoden ausbreiten. Diese können im Hohlleiter nur existieren, wenn die Wellenlänge der Schwingungen kleiner als die jeweilige Grenzfrequenz der Mode ist bzw. die Frequenz der ausbreitenden Welle die *cut-off*-Frequenz der Mode überschreitet. Diese *cut-off*-Frequenzen sind von der Art der Moden und der Geometrie des Hohlleiters abhängig. Die Transferfunktion beinhaltet das Verhalten der Wellen in den verschiedenen Moden.

Um die Formänderung der Welle bei der Ausbreitung darzustellen, wird an dieser Stelle ein Beispiel angeführt, das auf einer Rechnung von Dowden u. a. [2002] beruht. Dort wird ein Hohlleiter mit transversal-magnetischen (TM) Moden betrachtet, wobei folgende Dispersionsrelation für die Wellenzahl k gilt:

$$k^2 = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{c^2} \quad (2.12)$$

Dabei ist ω_0 die *cut-off*-Frequenz der jeweiligen TM-Mode. Der kleinste Wert der ersten Mode beträgt bei einer typischen Nachtionosphärenhöhe ungefähr 1,67 kHz.

Die Phasengeschwindigkeit v_p lässt sich aus der Dispersionsbeziehung (Gleichung 2.12) ableiten. Da die Frequenz ω immer größer als die *cut-off*-Frequenz ω_0 ist, bleibt die Phasengeschwindigkeit v_p für alle ω auch immer größer als die Lichtgeschwindigkeit c .

$$v_p = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{\sqrt{1 - \omega_0^2/\omega^2}} \quad (2.13)$$

In einer Ausbreitungssimulation wird ein Modellimpuls mit Hilfe einer Gewichtsfunktion $A(\omega)$ erzeugt.

$$A(\omega) = \cos^2\left(\pi \frac{\omega - \omega_a}{2\omega_r}\right) \quad (2.14)$$

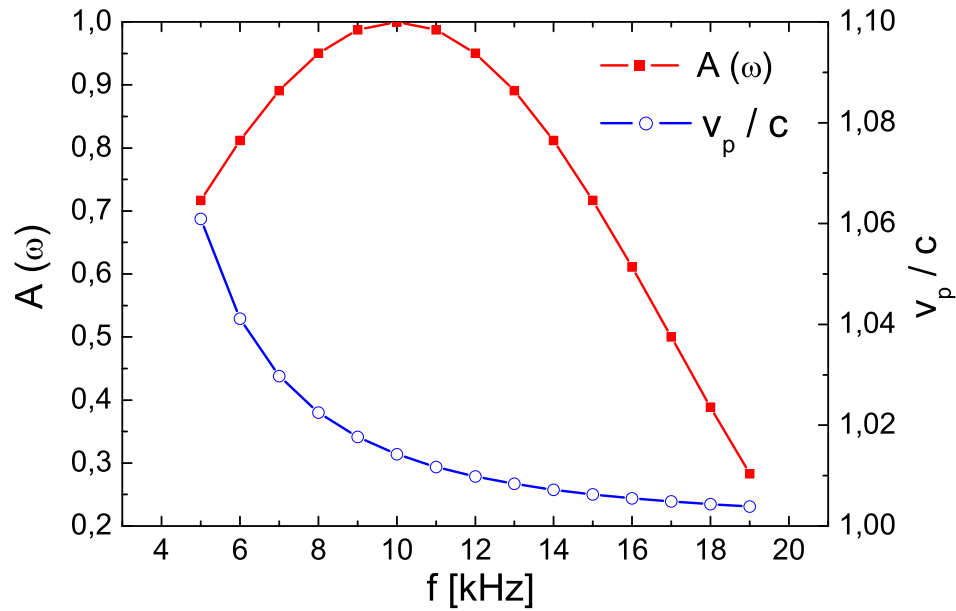


Abbildung 2.3: Gewichtungsfunktion $A(\omega)$ aus Gleichung (2.14) mit $\omega_a = 10 \text{ kHz} \cdot 2\pi$ und $\omega_r = 14 \text{ kHz} \cdot 2\pi$

Dabei ist ω_a die Frequenz, die am geringsten gedämpft wird, und ω_r die Bandbreite der Frequenz. Für das hier dargelegte Beispiel wurden 15 Werte von 5 bis 19 kHz ausgewählt ($\omega_r = 14 \text{ kHz} \cdot 2\pi$) und die Frequenz mit der geringsten Dämpfung wie folgt festgelegt: $\omega_a = 10 \text{ kHz} \cdot 2\pi$. Die Gewichtungsfunktion und die Phasengeschwindigkeit für dieses Beispiel zeigt Abbildung 2.3.

Die Zeit- und Ortsabhängigkeit des angenommenen Modellimpulses kann so als Summe über 15 Kosinuswellen mit unterschiedlichem Gewicht beschrieben werden (Gleichung 2.15). Die Feldstärke $B(t, r)$ ist in diesem Beispiel eine relative Amplitude und damit dimensionslos. Die Form und Größe des Impulses wird nur von der Gewichtungsfunktion $A(\omega)$ und der Phase $\phi(\omega)$ festgelegt.

$$B(t, r) = \sum_{\omega} A(\omega) \cos(\phi(\omega)) \quad (2.15)$$

Die Phase $\phi(\omega)$ in Gleichung 2.15 ist orts- und zeitabhängig. Am Ursprung ($t = 0$, $r = 0$) hat sie den Wert ϕ_0 , den man in diesem Beispiel Null setzen kann. Die Wellenzahl k kann man ersetzen durch Winkel- und Phasengeschwindigkeit (siehe Gleichung 2.13).

$$\phi(\omega) = \omega t - k(\omega) r + \phi_0 = \omega t - \frac{\omega r}{v_p} + \phi_0 \quad (2.16)$$

Mit Hilfe der Gleichungen 2.15 und 2.16 kann die Ausbreitung eines Wellenzuges im Erd-Ionosphären-Wellenleiter auf der Grundlage der Wellentheorie simuliert werden. Die Abbildung 2.4 zeigt den Impuls in vier verschiedenen Abständen zum Entstehungsort ($r = 0$). Jedes Bild stellt jeweils ein Zeitfenster von $700 \mu\text{s}$ dar. Der Zeitachsennullpunkt bewegt sich virtuell mit Lichtgeschwindigkeit vorwärts, da von der vergangenen Zeit jeweils die Entfernung zum Blitzort geteilt durch die Lichtgeschwindigkeit abgezogen ist.

Der Ausgangsimpuls wird auch „Mexikanischer Hut“ genannt. Seine Form legt man im Wesentlichen durch die Gewichtsfunktion $A(\omega)$ fest. Dieser Impuls „zerfließt“ aufgrund der Dispersion während der Ausbreitung, d.h. seine markante Form ändert sich. Nach einigem Abstand ist nicht mehr der mittlere Impuls am größten, sondern das „Gewicht“ des Impulses verlagert sich, so dass die vorderen Peaks kleiner werden und nachfolgende Peaks an Amplitude gewinnen. Auf der linken Seite des Nullpunktes ist bei jedem Impuls der Abbildung 2.4 der Peak markiert, der im Ausgangsimpuls die Spitze des Hutes und damit den größten Peak darstellt. Durch die Verfolgung dieses Peaks wird bestätigt, dass die mittlere Phasengeschwindigkeit größer als die Lichtgeschwindigkeit ist, da der Peak immer negative Zeiten hat, also schneller als der Zeitnullpunkt ankommt.

Eine Voraussetzung für die in Kapitel 4 genauer beschriebene Peilung der Herkunftsorte ist, an jedem Messort einen charakteristischen Zeitpunkt im Wellenzug zu bestimmen. Unter Annahme einer konstanten Geschwindigkeit wird so indirekt die Entfernung zum Blitzort ermittelt. Da bei großen Entfernungen Dispersionseffekte zu erwarten sind, schlagen Dowden u. a. [2002] vor, die mittlere Gruppengeschwindigkeit TOGA (*time of group arrival*) der Welle zu berechnen. Dieser Zeitpunkt ist dadurch gekennzeichnet, dass die Ableitung der Phase ϕ nach der Winkelgeschwindigkeit ω einen Nulldurchgang hat. Dafür wird Gleichung 2.16 nach ω abgeleitet, wobei die Definition der Gruppengeschwindigkeit $v_g(\omega) = \frac{d\omega}{dk}$ eingesetzt wird.

$$\frac{d\phi}{d\omega} = t - r \frac{dk}{d\omega} = t - \frac{r}{v_g(\omega)} \quad (2.17)$$

Bei $\frac{d\phi}{d\omega} = 0$ ist $t = t_g$ der Zeitpunkt, an dem der „Schwerpunkt“ der Welle eintrifft. In Abbildung 2.5 ist am Beispiel von $r = 1.000 \text{ km}$ der Phasenverlauf $\phi(\omega)$ zur Zeit $t = r/c$ und $t = r/v_g$ dargestellt. Man sieht, dass die Phase für $t = r/v_g$ nicht für alle ω Null ist, sondern nur die Regressionsgerade durch alle Punkte den Anstieg Null hat. In der Abbildung 2.4 ist zusätzlich zu den Wellenformen der Anstieg der Regressionsgeraden zu allen Zeiten eingezeichnet. Den jeweiligen Nulldurchgang und damit die Gruppenlaufzeit markiert die rechte senkrechte Linie. Diese Linie befindet sich jeweils rechts vom Zeitnullpunkt als Hinweis dafür, dass die Gruppengeschwindigkeit kleiner als die Lichtgeschwindigkeit ist.

Die Phase eines Wellenzuges kann aus der Fourier-Analyse des gemessenen Zeitsignals der Welle ermittelt werden. Dabei sind die Phasenwerte für alle Frequenzen auf den ersten Zeitwert bezogen. Um die Phase für die nachfolgenden Zeitpunkte zu bestimmen, ist eine Multiplikation mit $e^{-i\omega t}$ erforderlich.

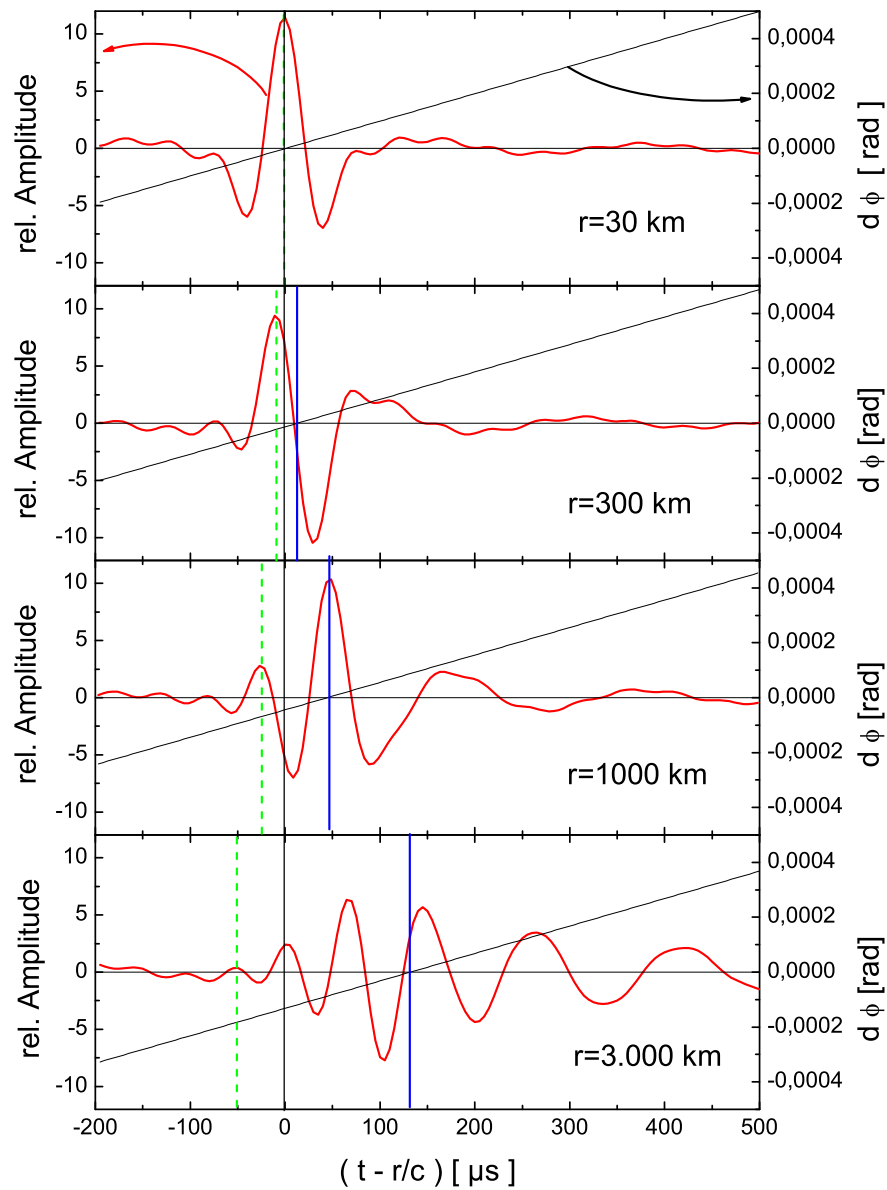


Abbildung 2.4: Modellimpuls bei verschiedenen Abständen zum Erzeugungsort zur Verdeutlichung des Dispersionseinflusses. Zusätzlich ist der Anstieg der im Text beschriebenen Regressionsgeraden für alle Zeiten eingezeichnet (rechte Y-Achse). Der Nulldurchgang dieser Geraden legt die TOGA-Zeit des Impulses fest.

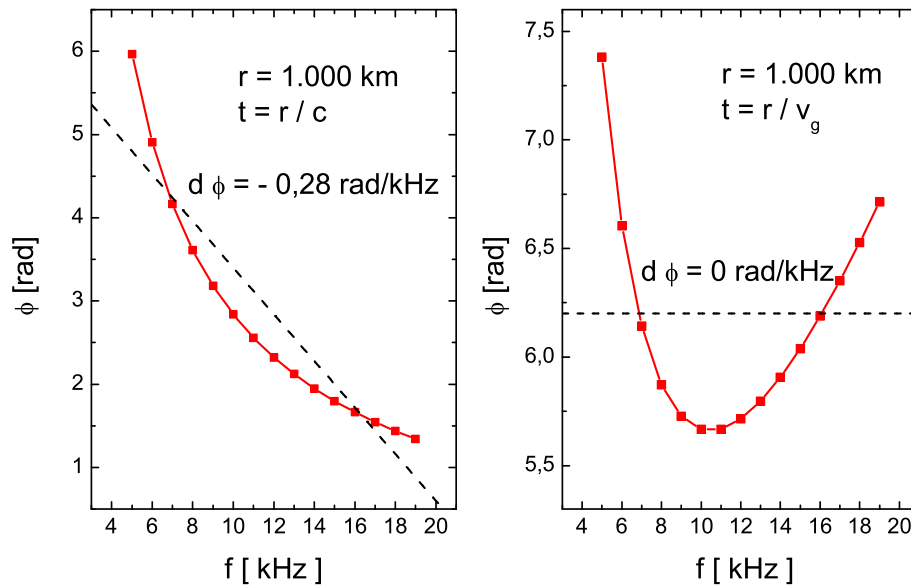


Abbildung 2.5: Phasenbeziehung mit Regressionsgeraden an zwei Stellen des Modellimpulses im Abstand $r = 1.000$ km.

- Zeitpunkt $t = r/c$, der Zeitnullpunkt des Modellimpulses in Abbildung 2.4.
- Zeitpunkt $t = r/v_g$, wobei v_g die mittlere Gruppengeschwindigkeit ist.

Im Kapitel 6.2.3 werden Vergleiche mit dem globalen Blitzmesssystem WWLLN vorgestellt, das die Zeitmarkierung jedes Signals als Gruppenlaufzeit aus der hier vorgestellten TOGA-Methode gewinnt. Die Messorte dieses Systems liegen mehrere tausend Kilometer auseinander. Jede Sensorstation digitalisiert das gemessene Signal und unterzieht es einer Fourier-Analyse, deren Koeffizienten die Phasenlage ϕ als Funktion der Frequenz ω ergeben. Die Steigung $d\phi / d\omega$ erlaubt somit die Bestimmung der Gruppengeschwindigkeit. Die letztlich zu ermittelnde TOGA-Zeit ist derjenige Zeitpunkt, zu welchem sich die mit Gruppengeschwindigkeit einlaufende Welle so verhält, dass $d\phi / d\omega$ minimal, im besten Fall Null wird. Auf diese Weise wird es möglich, das Fortschreiten der Welle zeitlich präzise zu beschreiben, obwohl die Impulsform nach langen Ausbreitungswegen eher sinusförmig wird und aus ihrem bloßen Aussehen keine zuverlässige „Triggerzeit“ ermittelt werden kann.

In dieser Arbeit wurde das Verfahren nachgestellt und hinsichtlich seiner Genauigkeit bestätigt. Die mit TOGA-Zeiten ermittelten Blitzorte unterscheiden sich nicht signifikant von den Orten, die mit der in dieser Arbeit verwendeten TOA-Methode berechnet wurden. Allerdings ist einschränkend festzustellen, dass die Fourier-Analyse nur dann befriedigende TOGA-Werte liefert, wenn das Signal hinreichend groß und wenig verrauscht ist. Bei schwachen Signalen konnten keine eindeutigen TOGA-Zeiten errechnet werden.

2.2.3 Amplitudendämpfung auf dem Ausbreitungsweg

Für die Dämpfung der Amplituden auf dem Ausbreitungsweg ist in erster Linie die Dispersion verantwortlich. Diese ist in der Praxis weder zeitlich noch örtlich konstant.

Abhängigkeit der Dämpfung von der Bodenleitfähigkeit

In den Kapiteln 2.2.1 und 2.2.2 wurde davon ausgegangen, dass die Erde und die Ionosphäre zwei perfekt leitende Oberflächen bilden. In der Praxis gibt es auf der Erde Gebiete mit unterschiedlichen Leitfähigkeiten: So hat z.B. Meerwasser eine relativ hohe Leitfähigkeit mit ca. 5 S/m, wohingegen die des Erdbodens im Mittel nur ca. 0,001 S/m beträgt.

Aus dieser Tatsache ergeben sich unterschiedliche Dämpfungseigenschaften von elektromagnetischen Wellen. Untersucht wurden diese Ausbreitungseffekte beispielsweise von Honma u. a. [1998] oder von Cooray und Ming [1994]. Angenommen wird dabei, dass die höherfrequenten Anteile des Feldes bei der Ausbreitung über eine endlich leitende Oberfläche gedämpft werden und sich so die Gesamtamplitude verringert.

Cooray und Ming [1994] stellen theoretische Berechnungen vor, in denen der Strahlungsterm des E-Feldes untersucht wird (dritter Term aus Gleichung 2.2). Das Besondere an dieser Rechnung ist die Berücksichtigung einer frequenzabhängigen Dämpfungsfunktion $W(\omega)$. Die Gültigkeit der theoretischen Berechnungen konnten mit existierenden Messergebnissen belegt werden, bei denen Signale verschiedener Frequenzen über möglichst homogene Ausbreitungswege empfangen wurden.

Abhängigkeit der Dämpfung von der Ausbreitungsrichtung

Aus Messungen der Amplitude und der Phase von VLF-Sendern mit konstanter Frequenz ist bekannt, dass das Ausbreitungsverhalten auch von der Einfallrichtung abhängt [Al'pert und Fligel', 1970]. Demnach werden Signalamplituden von West nach Ost viel stärker gedämpft als bei Wellen, die sich in der Gegenrichtung bewegen. In der Nord-Süd-Achse dagegen zeigen die Dämpfungsfaktoren keine Unterschiede. Dieses Phänomen wird auf die Wirkung des Erdmagnetfeldes zurückgeführt.

Der Stand der Sonne hat ebenfalls Einfluss auf die Ausbreitung der VLF-Wellen. Je nach Tages- bzw. Nachtzeit stellt sich die Elektronenkonzentration in der Ionosphäre ein. Effektiv ergibt sich in der Nacht eine höhere Reflexionshöhe für VLF-Wellen als tagsüber. Impulse, die während ihrer Ausbreitung die Tag-Nacht-Grenze überqueren, werden somit von letzterer beeinflusst.

Bei Übertragungen von VLF-Signalen über große Entfernungen wurden Schwankungen der Amplitude festgestellt [Helliwell u. a., 1973]. Diese als *Trimpi*-Effekt bekannte Erscheinung wird von temporären Inhomogenitäten der Elektronenkonzentration in der Ionosphäre verursacht. In vielen Fällen stehen die Schwankungen im Zusammenhang mit lokalen Ionisationsüberhöhungen, die von Blitzen hervorgerufen wurden. Clilverd u. a. [1999] stellten fest, dass die Auswirkungen des Trimpi-Effekts von der geographischen Breite abhängen.

Kapitel 3

Messsystem zur Erfassung von VLF-Atmospherics

Eine möglichst exakte Messung des elektromagnetischen Feldes und eine geeignete Interpretation der Messdaten sind die Voraussetzungen für eine akkurate Blitzpeilung. Deshalb wird in diesem Kapitel das Messsystem in seinen Einzelheiten vorgestellt und Ergebnisse verschiedener Untersuchungen präsentiert, die die Qualität des Systems widerspiegeln.

3.1 Messaufbau

In der Abbildung 3.1 ist die Messanordnung schematisch dargestellt. Sie besteht aus der magnetischen Feldantenne, der GPS-Antenne zur Ermittlung einer absoluten Zeitbasis und der Messeinheit, die in einem handelsüblichen PC integriert ist. Ein Messprogramm sammelt und analysiert den gewonnenen Datenstrom und schickt die Ergebnisse an einen zentralen Rechner zur Auswertung. Die genaue Funktion der Messeinheit wird in Kapitel 3.2 näher beschrieben. Bei der Entwicklung der Messanordnung konnte auf umfangreiche Vorarbeiten zurückgegriffen werden ([Kulzer u. a., 1996], [Oettinger u. a., 2000]).

Die Magnetfeldantenne besteht aus zwei gekreuzten Kupferringen (vgl. Abbildung 3.2), welche so mit der nachfolgenden Messeinheit verschaltet sind, dass der zeitliche Verlauf der magnetischen Induktion direkt gemessen wird. Bei herkömmlichen Systemen hingegen (z.B. bei Krider und Noggle [1975]) werden Leiterschleifen mit einem festen Messwiderstand verwendet, so dass die zeitlichen Ableitungen des B-Feldes über die induzierte Spannung gemessen werden. Mit Hilfe von elektronischen Integriergliedern ermittelt man in diesem Verfahren erst im Nachhinein den Verlauf des magnetischen Feldes, wodurch es bei schwachen Signalen zu Schwierigkeiten aufgrund von Integrationsfehlern kommen kann.

Für eine möglichst genaue Erfassung des magnetischen Feldverlaufs ist eine breitbandige Messung wünschenswert. Dadurch wird aber der Einfluss von Störsignalen beispielsweise durch Radiosender begünstigt, die sich an verschiedenen Messorten unterschiedlich stark auswirken. Daher muss ein Kompromiss gefunden werden, der es erlaubt, die Signale möglichst unverfälscht abzubilden zu können, ohne auf lokale Störer empfindlich zu sein. Zur

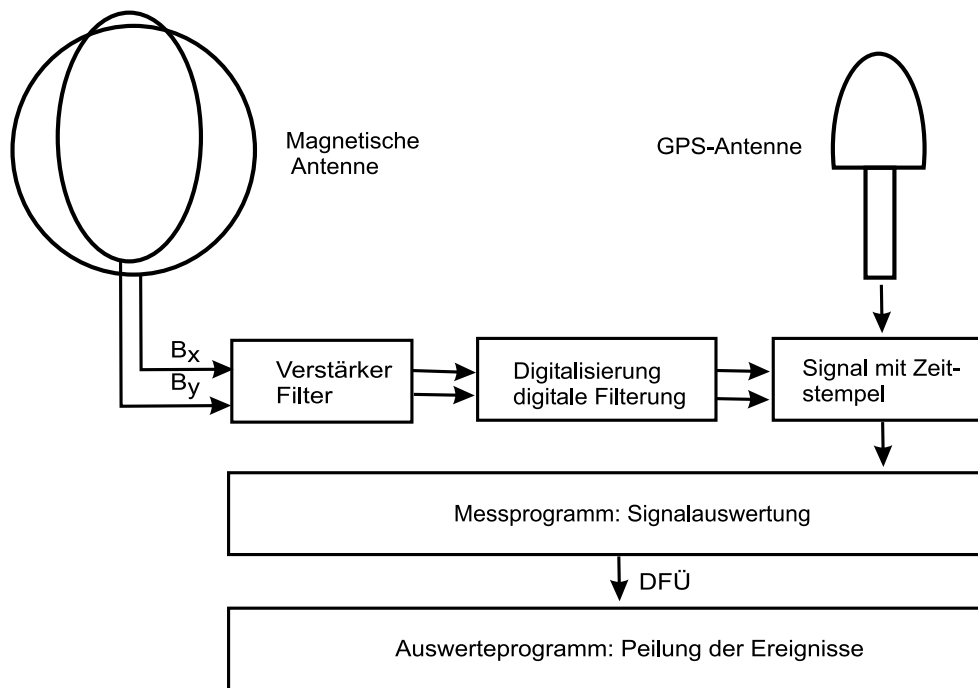


Abbildung 3.1: Schema des Messaufbaus

Lösung ist ein ausgewogener Einsatz von digitalen und analogen Filtern notwendig. Durch analoge Filter wird prinzipiell – weil sie einen nichtlinearen Phasengang aufweisen – ein unterschiedliches Zeitverhalten bei verschiedenen Frequenzen hervorgerufen. Das wirkt sich nachteilig auf die Zeitermittlung der Signalankunft aus. Bei digitalen Filtern lässt sich dies vermeiden, allerdings kann ein solcher Filter wegen möglicher störender Oberschwingungen infolge der Digitalisierung erst bei Frequenzen unterhalb der Nyquist-Frequenz eingesetzt werden.

3.2 Prinzip der Datenerfassung

Der Signalverlauf der beiden Sensoreingänge und die Zeitinformation werden in einer Messkarte verarbeitet. Diese ist über den USB-Port mit einem Messrechner verbunden. Der 10 MHz-Takt des GPS-Empfängers wird als Grundfrequenz für die Messkarte bereitgestellt. Damit ist eine präzise zeitliche Synchronisation der aufgenommenen Messwerte möglich. In regelmäßigen Abständen (ca. 1 s) wird über das Messprogramm ein Zeitstempel ausgelöst, der als eingefrorene Uhrzeit aus der GPS-Karte und als Bitsprung im Datenstrom (Markerbit) ausgelesen werden kann. Der Vergleich der Differenzen zwischen den eingefrorenen Uhrzeiten und der Sampleabstand der zugehörigen Markerbits dient als Sicherheitsprüfung für das korrekte Arbeiten des Messprogramms. Dieses kann so den ankommenden Datenstrom kontinuierlich, also ohne jegliche Totzeit, verarbeiten.



Abbildung 3.2: In dieser Arbeit verwendete magnetische Feldantenne zur Erfassung der atmosphärischen Impulsstrahlung

Zur Erkennung eines auswertbaren Signals wird ein Schwellwert gesetzt. Dieser kann an jedem Messrechner individuell eingestellt werden, sodass kleine örtliche Störquellen eliminiert werden können. Überschreitet einer der beiden Kanäle den Schwellwert, wird ein Zeitfenster mit 512 Werten (entspricht $512 \mu\text{s}$) der internen Auswertung übergeben. Dieses Zeitfenster enthält einen Pretrigger von $50 \mu\text{s}$ Länge vor dem auslösenden Messwert, sodass das Signal möglichst vollständig analysiert werden kann.

In der Regel reicht es aus, während der Auswertungsprozedur 100 Signale pro Sekunde zu verarbeiten, zu speichern und an den Zentralrechner zu verschicken. Treten höhere Signalraten auf, handelt es sich meist um lokale Störer, nicht um reale Blitzereignisse.

Für die Peilalgorithmen am Zentralrechner sind nur bestimmte Informationen aus dem gemessenen Zeitintervall notwendig und zwar

- die Zeitinformation an einem markanten Punkt im Signal,
- der Einfallswinkel der eingetroffenen Welle und
- die Amplitude des gemessenen Signals.

Zeitinformation

Um den Ausgangsort der elektromagnetischen Welle möglichst exakt berechnen zu können, ist es notwendig, den Zeitfehler des Einzelsignals so klein wie möglich zu halten. Durch die Synchronisierung des Datenstroms mit der GPS-Uhr ist der Zeitfehler jedes einzelnen Samplewertes genauso groß wie der Fehler der sekundlich gemessenen GPS-Zeit (nach Herstellerangaben: 100 ns). Allerdings beträgt der Abstand zwischen zwei Messpunkten $1 \mu\text{s}$.

Um den Zeitpunkt des Maximums der eintreffenden Welle möglichst genau bestimmen zu können, wird die Summe der Amplitudenquadrate aus den Messwerten beider Kanäle (B_x und B_y) gebildet und eine Gauß-Funktion an die so entstandene Kurve angepasst. Als Zeitwert für die Ortspeilung verwendet man dann den Abszissenwert des Maximums der Gauß-Kurve. Auf die Gewinnung der Zeitinformation aus den gemessenen Signalverläufen wird ausführlicher in Kapitel 3.4 eingegangen.

Einfallswinkel

Der Einfallswinkel α ergibt sich aus dem Verhältnis der beiden gemessenen Magnetfeldkomponenten.

$$\tan \alpha = \frac{B_x}{B_y} \quad (3.1)$$

Um auch hier einen möglichst genauen Wert zu bekommen, mittelt man über eine größere Anzahl von Messwerten um das Maximum.

Amplitude

Ebenfalls aus den Magnetfeldkomponenten wird die Amplitude des Signals an der Stelle des Maximums berechnet:

$$B_{max} = \sqrt{B_x^2(t_{B_{max}}) + B_y^2(t_{B_{max}})} \quad (3.2)$$

Dieser Wert wird herangezogen, um auf den im Blitzkanal geflossenen Maximalstrom zu schließen (vgl. Kapitel 6.1).

3.3 Prüfung der Parameter

Die wichtigste Bedingung für den Einsatz eines Messsystems zur effektiven Blitzmessung ist die Stationsunabhängigkeit der ermittelten Signalankunftszeit. Das bedeutet, dass einerseits die Zeitbasis an jeder Station innerhalb der Messtoleranz liegen muss und andererseits das Messsystem möglichst geringe Laufzeitverschiebungen und damit möglichst konstante Gruppenlaufzeiten im notwendigen Frequenzband besitzt. Diese beiden Parameter wurden mit verschiedenen Tests und Simulationen geprüft.

3.3.1 Absolute Zeitbasis

Da die Messrechner untereinander keine Informationen austauschen, muss die Zeit an jedem Standort absolut gemessen werden. Dafür ist an jedem Messrechner eine GPS-Einheit eingebaut. Zur Überprüfung der vom Hersteller angegebenen Zeitgenauigkeit von etwa 100 ns wurde eine Reihe von Zeitstempeln der Messstationen untereinander verglichen.

Dafür legt man ein TTL-Puls aus einem Signalgenerator in regelmäßigen Abständen (typischerweise 1 Hz) zeitgleich an zwei Stationen an. Abbildung 3.3 zeigt das Ergebnis einer statistischen Auswertung über zwei Stunden. Der Messfehler, der sich aus den zeitlichen Abweichungen (dt) zweier unabhängiger Systeme ergibt, beträgt danach ca. 100 ns und wird ausschließlich durch die Fehlertoleranz der GPS-Zeitmessung vorgegeben.

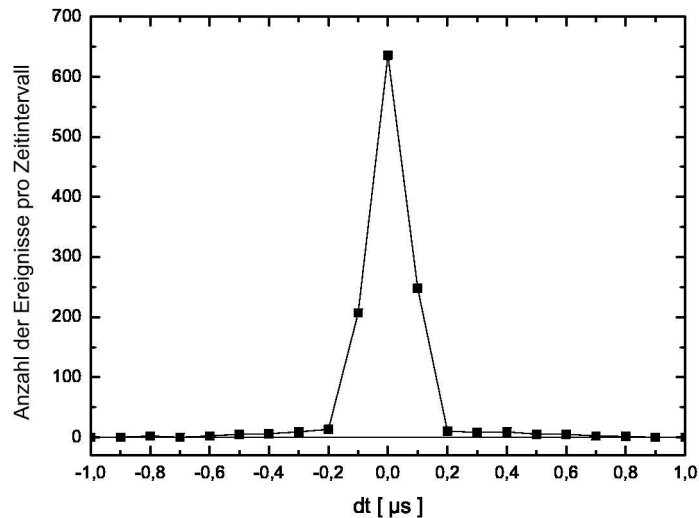


Abbildung 3.3: Test der Zeitkonsistenz zweier GPS-Systeme

3.3.2 Simulierte Auswirkungen von verschiedenen Filtern auf die Wellenform

Die Filter in der Messkette haben einen direkten Einfluss auf die Form des Signalverlaufes. Da in dem beschriebenen Messsystem – wie in Kapitel 3.1 erwähnt – verschiedene Filter wirken, soll an dieser Stelle eine Simulation demonstrieren, welche Auswirkungen die einzelnen Filtertypen haben. Als Ausgangsfunktion wird die Stromfunktion aus Gleichung 2.1 herangezogen. Damit die Kurvenform in etwa den Signalen entspricht, die mit dem Messsystem aufgenommen werden, ist die Stromfunktion zeitlich abgeleitet und mit folgenden Parametern versehen: Stirnzeit $\tau_1 = 8 \cdot 10^{-6}$ s, Rückenzeit $\tau_2 = 8 \cdot 10^{-6}$ s, Stromscheitelwert $I_0 = 4.000$ A, Steilheitsexponent $n = 1$ und Scheitelkorrekturfaktor $\eta = 1$.

Die Simulation wurde mit Hilfe von Matlab durchgeführt, jeweils unter Einsatz von *Butterworth*-Filtern. Die Auswirkung folgender Filtertypen auf den Verlauf der Wellenform wurde geprüft:

- Tiefpässe mit einer oberen Grenzfrequenz von 100 bzw. 300 kHz,

- Hochpässe mit einer unteren Grenzfrequenz von 5 bzw. 10 kHz und
- Bandpässe mit einem Durchlassbereich von 5 bis 300 kHz bzw. von 10 bis 100 kHz.

Die Ergebnisse der Simulation sind in den Abbildungen 3.4 bis 3.6 dargestellt. Jede Abbildung besteht aus einem Diagramm mit dem zeitlichen Verlauf der gefilterten Funktionen im Vergleich zur Ausgangsfunktion und einem Diagramm der jeweiligen Frequenzinhalte.

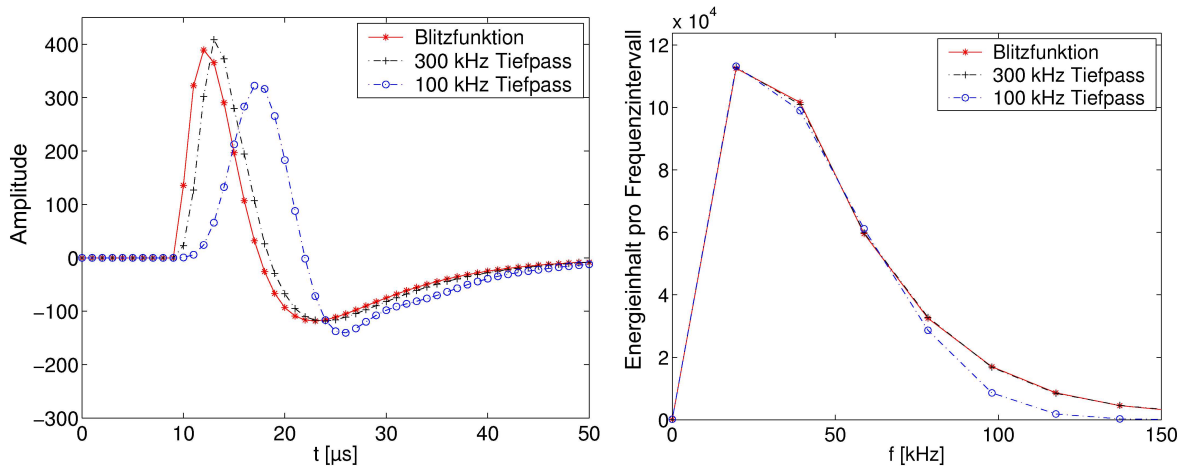


Abbildung 3.4: Simulation des Tiefpasses

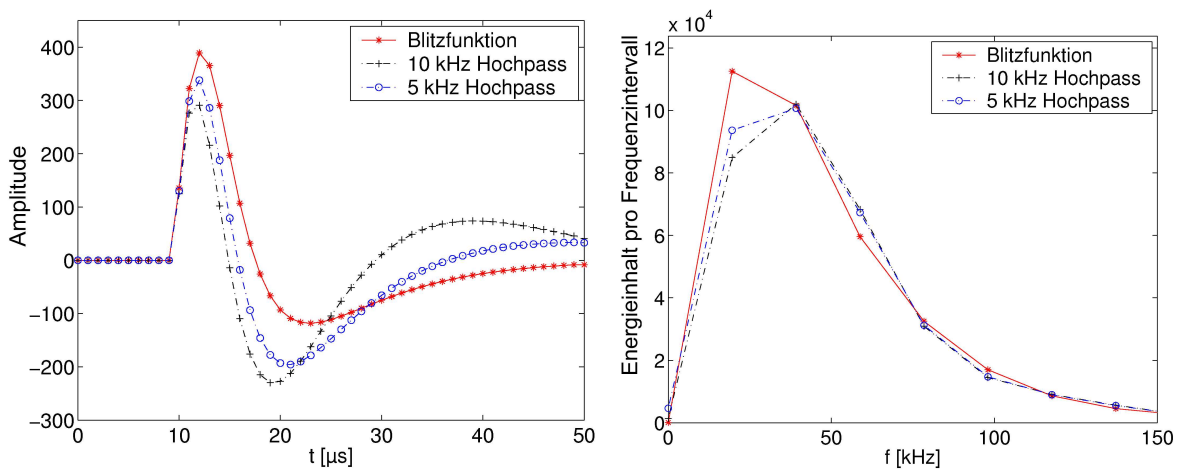


Abbildung 3.5: Simulation des Hochpasses

Tiefpassfilter (wie in Abbildung 3.4) zeigen prinzipiell integrierendes Verhalten. Wenn die obere Grenzfrequenz des Tiefpasses im Ausgangssignal einen nicht zu vernachlässigenden Anteil im Frequenzspektrum besitzt, werden schnelle Signaländerungen durch die Fil-

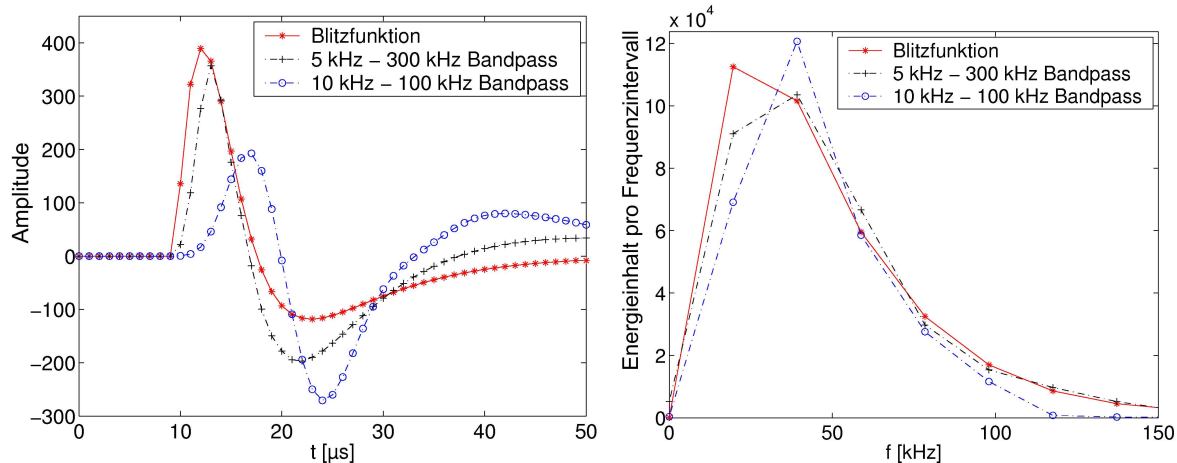


Abbildung 3.6: Simulation des Bandpasses

terung nicht instantan nachvollzogen. Der zeitliche Gesamtverlauf wird dabei zu späteren Zeiten hin verschoben.

Die Anwendung von Hochpassfiltern hingegen ruft differentielles Verhalten hervor. Abbildung 3.5 zeigt, dass deutliche Auswirkungen auf den Signalverlauf zu erwarten sind, wenn die untere Grenzfrequenz des Filters im Frequenzband des Ausgangssignals einen nicht unbedeutenden Anteil besitzt. Die Wellenform wirkt gestaucht, die Peakbreiten sind kleiner als beim Ausgangssignal. Markante Punkte wie Maxima oder Nulldurchgänge erscheinen in den gefilterten Kurven zeitlich früher, und es kommt zu Überschwingern.

In Bandpassfiltern sind beide Filtertypen vereint. Sie besitzen Eigenschaften sowohl der Tiefpass- als auch der Hochpassfilter. Das Messsystem zur Erfassung des magnetischen Feldes hat als Ganzes Bandpasseigenschaften. Wie in den nachfolgenden Kapiteln näher beschrieben wird, wirkt dabei der magnetische Sensor hauptsächlich als Hochpass, die Filtereinheit der Signalaufnahme als Tiefpass. Das bedeutet, dass die aufgenommenen Impulse weder das magnetische Feld noch die zeitliche Ableitung desselben exakt darstellen können.

3.3.3 Frequenz- und Zeitverhalten der Messkette

Im Bereich der Nachrichtentechnik ist es üblich, Übertragungsfunktionen zur Darstellung des Frequenzganges in sogenannten Bode-Diagrammen darzustellen. Diese enthalten den Amplituden- und Phasengang der untersuchten Komponenten. Da es bei der in dieser Arbeit entwickelten Messeinheit vor allem auf die Laufzeitunterschiede der Signalverläufe ankommt, wurde anstatt des Phasenganges die Gruppenlaufzeit (τ_g) aufgetragen, die sich als negative Ableitung der Phase ϕ nach der Kreisfrequenz ω ergibt:

$$\tau_g = -\frac{d\phi}{d\omega}. \quad (3.3)$$

Zunächst ist in der Abbildung 3.7 das Frequenz- und Zeitverhalten des magnetischen Sensors aufgezeigt. Praktisch konnten diese Kurven ermittelt werden, indem sinusförmige Ströme verschiedener Frequenzen in einem durch den Sensor geführten Leiter erzeugt wurden. Durch den direkten Vergleich der in der Sensorspule induzierten Spannungen mit den Ausgangsspannungen auf einem Zweikanaloszilloskop ist es möglich, die Dämpfung der Amplituden (V) und die Gruppenlaufzeit (τ_g) zu bestimmen.

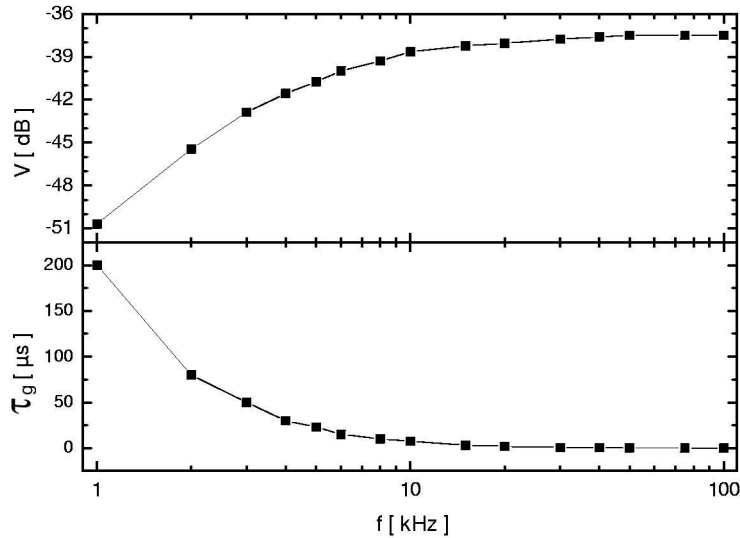


Abbildung 3.7: Bestimmung des Frequenzverhaltens des magnetischen Sensors, Amplitudendämpfung V und Gruppenlaufzeit τ_g

Durch die Induktivität der verwendeten Spule wirkt die Antenne für die ankommenden elektromagnetischen Impulse als Hochpass, das heißt, dass tiefe Frequenzen ab einer unteren Grenzfrequenz einer starken Dämpfung unterliegen. Dieser Grenzwert ist definitionsgemäß die Frequenz, bei dem die Ausgangsgröße 3 dB unter den Bezugswert – in diesem Fall den Maximalwert – gefallen ist. Aus der Abbildung 3.7 lässt sich die untere Grenzfrequenz des magnetischen Sensors mit 6 kHz bestimmen.

Neben der magnetischen Antenne sind die eingesetzten Filter der Messeinheit für das Zeit- und Frequenzverhalten des Gesamtsystems verantwortlich. Zur Ermittlung ihres Einflusses wurden anstatt der Antennenspannung an beiden Eingängen Sinussignale aus einem Signalgenerator eingespeist. Als Referenz diente der zweite Kanal, aus dem man alle Filterelemente entfernte. Aus dem direkten Vergleich der digitalisierten Impulse beider Kanäle lassen sich Dämpfung und Gruppenlaufzeit jeder eingestellten Frequenz ermitteln.

Für eine Analyse der gesamten Messkette ist auch die Berücksichtigung der Induktivität des Sensors notwendig. Dieser wurde in einem parallelem Test als passives Element in des Messzweig integriert. Die Auswertung der beschriebenen Messungen sind in Abbildung 3.8 gezeigt. In ihr lässt sich erkennen, dass die Filtereinheit des Messsystems für die

Tiefpass- und die Antenne für die Hochpasseigenschaften des Systems verantwortlich sind. Der Durchlassbereich und somit der Messbereich der gesamten Messanordnung beginnt bei dieser Konfiguration bei ca. 5 kHz.

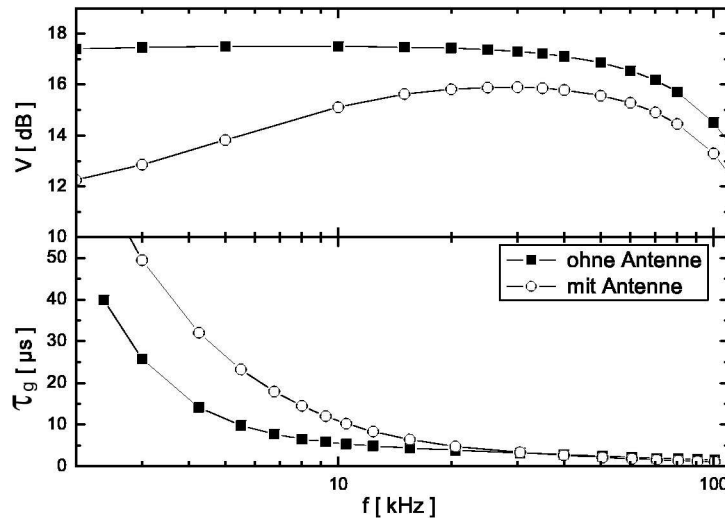


Abbildung 3.8: Verstärkung V und Gruppenlaufzeit τ_g des gesamten Messsystems (analoge und digitale Komponenten) mit bzw. ohne Antenne als passives Element

Zur weiteren Prüfung des Zeitverhaltens der gesamten Messkette wurden ein synthetisch erstelltes Probesignal mit einer variablen Wiederholungsfrequenz auf den Messeingang verschiedener PCs gegeben und die ermittelten Ankunftszeiten miteinander verglichen. Der Signalverlauf wurde durch eine entsprechende Kombination von R-L-Gliedern so gestaltet, dass er natürlichen Wellenformen aus Blitzentladungen ähnelt (vgl. z.B. Abbildungen aus dem Kapitel 3.4.2). In einem Zeitfenster von $512 \mu\text{s}$ sind dabei die jeweils 512 Amplitudenwerte der beiden Kanäle (B_x und B_y) in dimensionslosen, digitalen Einheiten (engl. *digital units*, kurz d.u.) dargestellt.

Anders als in Kapitel 3.3.1 gehen in diese Untersuchung nicht nur der Zeitfehler der GPS-Messung, sondern die Messunsicherheiten des gesamten Systems ein. Zwar beträgt der zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messwerten $1 \mu\text{s}$, aber dieser Wert wirkt sich – wegen des in Kapitel 3.2 beschriebenen Verfahrens zur Gewinnung der Zeitinformation – nicht vollständig auf den Messfehler des Gesamtsystems aus. Die statistische Auswertung der Differenzzeiten (dt) zweier unabhängiger Systeme ist in der Abbildung 3.10 dargestellt. Dabei sind die Messpunkte um den Nullpunkt gaußverteilt mit einer Breite von ca. 300 ns . Diese Verteilung kann als Referenz herangezogen werden und direkt mit den Ergebnissen blitzinduzierter Signale aus Kapitel 5.2.1 verglichen werden. Dabei entspricht die Kurve in der Abbildung 3.10 dem Idealfall, da bei diesem Test exakt gleiche Wellenformen ohne jegliche atmosphärische Einflüsse vorliegen.

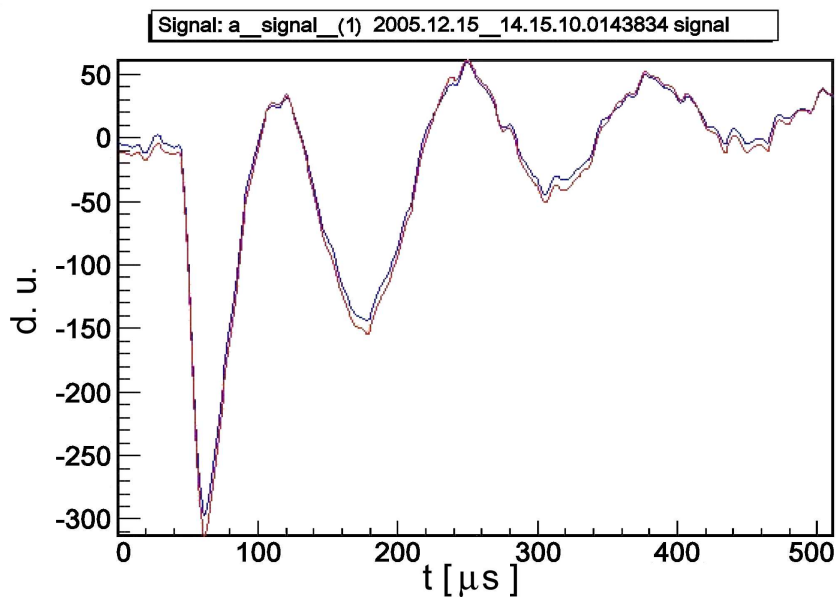


Abbildung 3.9: Impulsform des synthetischen Probesignals, das gleichzeitig an beiden Kanälen der Messeingänge (B_x , B_y) angelegt wird.

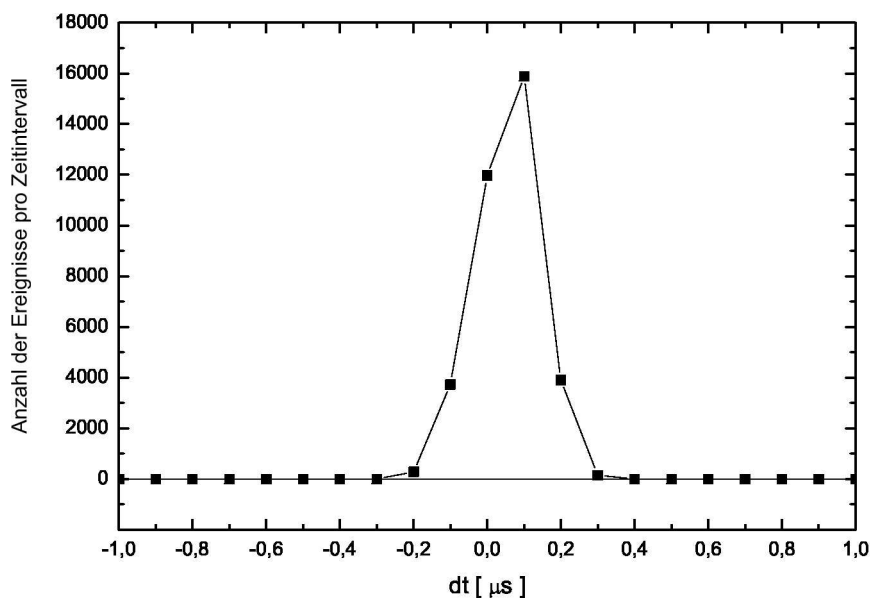


Abbildung 3.10: Statistische Verteilung der Differenzzeiten zwischen verschiedenen Messsystemen unter Verwendung des Probesignals

3.4 Beispiele für gemessene VLF-Sferics

3.4.1 Zuordnung der Zeitinformation zum gemessenen Signalverlauf

Die wichtigste Information aus dem Signalverlauf, die für die Peilung des Ereignisses mittels der TOA-Methode benötigt wird, ist die Ankunftszeit der Welle. Dabei spielt es keine Rolle, ob diese Zeit wirklich den Beginn der Welle repräsentiert, wichtig ist nur, ein charakteristisches Merkmal im Signalverlauf zu finden und zu markieren, das an allen Messorten in gleicher Weise ermittelt werden kann.

Für dieses Verfahren wurden verschiedene Vorgehensweisen vorgeschlagen. Die Tauglichkeit richtet sich hauptsächlich nach dem Entfernungsbereich der Messsysteme zum Ereignisort. Thomson u. a. [1994] erhalten die Ankunftszeit jedes Peaks aus der Mittelung folgender drei Parameter: die Zeit an der halben Peakhöhe der steigenden Flanke, an der vollen Peakhöhe und an der halben Peakhöhe der fallenden Flanke. Wood [2004] nimmt als charakteristischen Zeitpunkt neben dem Maximalpeak auch den ersten Wendepunkt am Start des Signals. Er argumentiert, dass dieser Punkt im Gegensatz zum Maximalpeak bei Messungen über weite Entfernungen nicht so sehr Dispersionseffekten ausgesetzt ist. Allerdings leidet dabei die Genauigkeit, da vor dem Peak meist das lokale Rauschen die Wellenform bestimmt.

Die bisher genannten Verfahren nutzen eine Phaseninformation der Welle, weshalb bei einer Bestimmung der Distanzen zur Ermittlung des Quellortes auch die Phasengeschwindigkeit der Welle herangezogen werden sollte. Eine alternative Methode, die von Dowden u. a. [2002] veröffentlicht und in Kapitel 2.2.2 näher vorgestellt wurde, ist die Bestimmung der Gruppenlaufzeit der Welle. Dieses Verfahren lässt sich aber nur auf bestimmte Signaltypen anwenden und kommt meist nur bei Systemen mit Stationsabständen im Bereich von 1.000 km zum Einsatz.

Für das in dieser Arbeit vorgestellte Messsystem findet ein Verfahren Verwendung, das anhand der Abbildungen 3.11 und 3.12 erläutert werden soll. Diese Abbildungen zeigen den Signalverlauf des gleichen Ereignisses an zwei verschiedenen Stationen. Auf die Lage des Ereignisortes und aller an der Peilung beteiligten Stationen wird in Kapitel 3.4.2 näher eingegangen.

Wie in der Abbildung 3.11 demonstriert wird, werden im Signalverlauf mehrere charakteristische Maxima bestimmt. Um die Richtungsunabhängigkeit zu gewährleisten, findet die Maximabestimmung nicht an den zwei Kanälen einzeln, sondern im Amplitudenquadrat der beiden Kanäle statt. Durch eine entsprechende Parameterwahl bei der Analyse wurde sichergestellt, dass lokale Maxima erst ab einer gewissen Ausbildungsgröße herangezogen werden. Als zusätzliche Zeitinformation bestimmt man den Nulldurchgang des größeren der beiden Kanäle, sofern er zwischen dem größten und zweitgrößten Amplitudenausschlag dieses Kanals liegt und es dazwischen keine weiteren Nulldurchgänge gibt. Diese Informationen werden von allen Stationen an die Zentrale geschickt. Dort wertet man aus, welche Peaks zueinander passen, um diese dann für die Peilung des Ereignisortes zu nutzen.

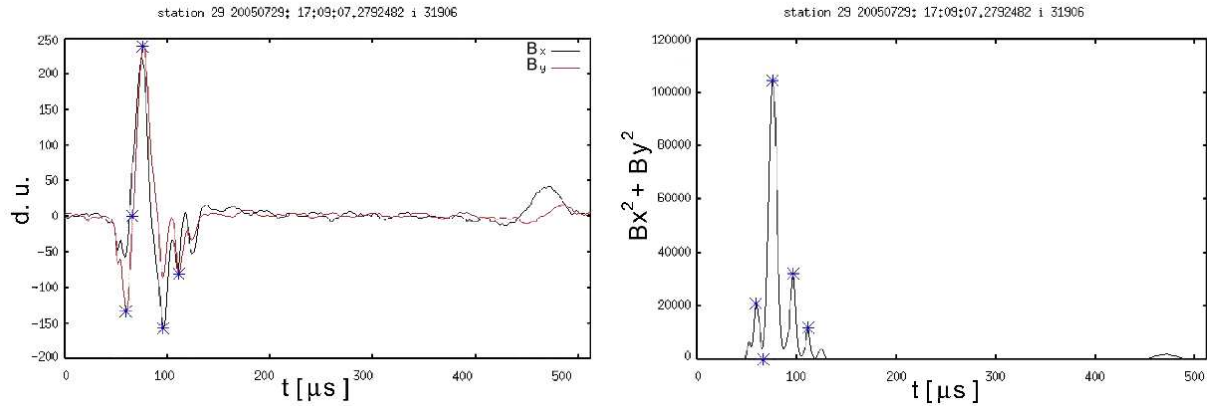


Abbildung 3.11: Extrahierung der Zeitinformation aus dem Signalverlauf beider Kanäle (links) bzw. dem Amplitudenquadrat (rechts) an der Station in Garching

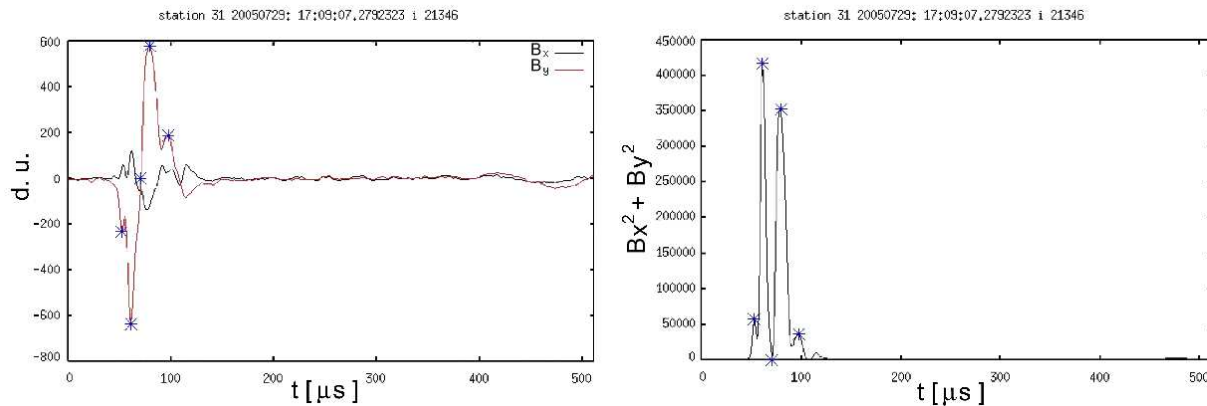


Abbildung 3.12: Extrahierung der Zeitinformation desselben Ereignisses wie in Abbildung 3.11 an der Station in Peißenberg

3.4.2 Zuordnung des gleichen Ereignisses an verschiedenen Stationen

Das folgende Beispiel soll die Schwierigkeiten beim Zuordnen der Zeitinformation zum gemessenen Signalverlauf verdeutlichen. Das Blitzereignis wurde am 29. Juli 2005 um 17:09:07.279 UTC an acht Stationen registriert. Die Ortspeilung, welche ausführlich in Kapitel 4 vorgestellt wird, lieferte einen Ereignisort bei $48,0471^\circ$ n.B. und $11,2794^\circ$ ö.L. sowie eine Blitzstärke von 4,2 kA. In der Abbildung 3.13 sind zur Verdeutlichung der Geometrie der Ort des Blitzereignisses sowie die Stationen in einer Karte eingezeichnet. Bei den Stationen sind jeweils der theoretische Einfallswinkel und die Entfernung zum Blitzort angegeben.



Abbildung 3.13: Registriertes Blitzereignis (Stern) an acht Stationen (Kreuze) mit der jeweiligen Einfallsrichtung und der Entfernung zum Blitzort

Die gemessenen Signalverläufe an den verschiedenen Stationen sind in den Abbildungen 3.14 und 3.15 dargestellt. Die Amplituden aller Signale wurden unter Berücksichtigung der jeweiligen Einfallsrichtung auf 100 km normiert. Beim Vergleich der Verläufe ist zu erkennen, dass die Wellenformen sich ändern, vermutlich aufgrund des Dispersionseinflusses der Atmosphäre. Allerdings scheint sich die Dispersion stärker richtungsabhängig als entfernungsabhängig auszuwirken. Eine andere mögliche Erklärung wäre, dass der Kanal dieses Blitzes nicht senkrecht, sondern unter einem nicht vernachlässigbaren Winkel schräg verläuft. Für die Abbildung 3.15 wurde der obere Peak bei allen Stationen auf den gleichen Zeitpunkt geschoben und damit die größte Abweichung zwischen den vorderen, unteren Peaks auf $4 \mu\text{s}$ bestimmt. Das könnte bei einer Kanalgeschwindigkeit von ca. $c/2$ als ein horizontaler Endpunktabstand des Blitzkanals von 600 m interpretiert werden. Zu dieser Erklärung passt, dass der Blitz von unserem System als Wolkenblitz mit einer Höhe von 11 km erkannt wurde. Eine genauere, statistische Auswertung von Ereignissen mit potentiell horizontalen Blitzkanälen sollte in zukünftigen Forschungen vorgenommen werden.

Wie schon in Kapitel 2.2.2 anhand der Simulation gezeigt, kann es durch Dispersionseinwirkungen Änderungen in der Wellenform geben. Deshalb ist es nicht zweckmäßig, als repräsentativen Punkt im Wellenzug ausschließlich den Zeitpunkt am größten Maximum auszuwählen. Für eine erfolgreiche Blitzpeilung ist es maßgeblich, in allen Wellenzügen die

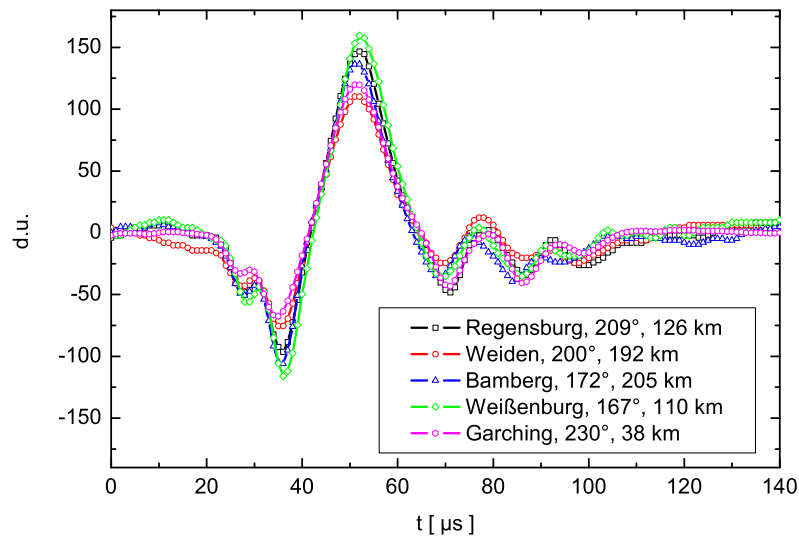


Abbildung 3.14: Vergleich der Wellenformen an den fünf nördlichen Stationen mit verschiedenen Entfernungen zum Blitz

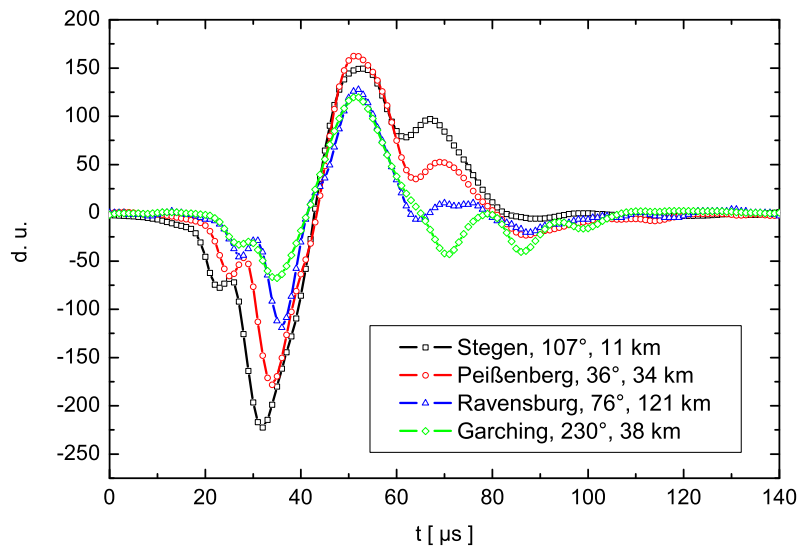


Abbildung 3.15: Vergleich der Wellenformen an Stationen mit verschiedenen Einfallsrichtungen des Blitzes

gleiche Phase, d.h. den gleichen charakteristischen Punkt zu markieren und dessen genauen Zeitpunkt zu bestimmen.

Um außerdem einen möglichst schnellen Datentransfer von den Stationen zum Zentralrechner zu gewährleisten, ist ein kompakter Aufbau des Dateiformats nötig. Alle erforderlichen Informationen sind dahingehend optimiert, dass die notwendige Genauigkeit eingehalten wird, aber keine überflüssigen Bits verschwendet werden. Für jede Messgröße wurde deshalb zur Übertragung ein eigener Datentyp eingerichtet und aus der Summe ein Transferpaket zusammengestellt. Jede Datei besteht aus einem *Header*, der stationsrelevante Daten enthält und einem *Body*, in dem nur die ausgewerteten Daten der Messergebnisse stehen. In Anhang A findet sich eine genaue Auflistung der Datenstruktur, sowohl des *Headers* als auch des *Bodys*.

Kapitel 4

Blitzortung

Elektromagnetische Strahlung, die in Blitzentladungen ihre Ursache hat, wird in einem breiten Spektrum emittiert. Dieses geht von sehr langwelliger Strahlung im ELF-Bereich, über den Radiofrequenzbereich bis hin zu optischer Strahlung. Sogar Röntgenstrahlung wurde im Zusammenhang mit Blitzentladungen gemessen [Dwyer, 2005].

Es existieren unterschiedliche Verfahren, die aus der Messung des elektromagnetischen Feldes eine Rückverfolgung zum Entstehungsort zulassen. Vornehmlich verwendet man dabei die Einfallswinkel, die Ankunftszeiten oder die Amplituden der Signale. Die Wahl des Blitzortungsverfahrens ist in der Regel abhängig vom Frequenzgang des verwendeten Messsystems und der Anzahl der zur Verfügung stehenden Stationen.

Ausgehend von der Beschreibung der verschiedenen herkömmlichen Methoden wird ausführlich das Verfahren vorgestellt, das für diese Arbeit neu entwickelt wurde. Die verwendeten Methoden kommen zum großen Teil aus der Ausgleichsrechnung, doch werden auch analytische Verfahren angewendet, die im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelt wurden.

4.1 Übersicht der meist benutzten Verfahren zur Blitzortung im Radiowellenbereich

Für die Ortung von Blitzereignissen werden bei allen hier vorgestellten Methoden aus dem aufgenommenen, zeitlichen Verlauf des gemessenen, elektrischen oder magnetischen Feldes bestimmte Kenngrößen wie Einfallswinkel oder Ankunftszeit extrahiert. Bei den meisten Verfahren kann ein Blitzereignis erst gepeilt werden, wenn es von mehreren Stationen registriert worden ist.

Auf Schiffen oder in Flugzeugen werden beispielsweise portable Einheiten eingesetzt, die mit Verfahren arbeiten, bei denen eine Station genügt. Um eine gute Messgenauigkeit über ein größeres Gebiet zu gewährleisten, ist aber ein Mehrstationennetz notwendig. Das in dieser Arbeit entwickelte System ist ein Messnetz, welches mit mindestens vier Stationen betrieben wird. Die genaue Anzahl und die Positionen während der jeweiligen Messzyklen werden in Kapitel 5.1 näher vorgestellt.

4.1.1 Winkelpeilung

Das Prinzip der Winkelpeilung beruht auf der Annahme, dass die Messung der elektromagnetischen Strahlung im Fernfeld ohne äußere Störungen erfolgt. Im Idealfall ist also das ausgestrahlte elektrische Feld vertikal und das zugehörige Magnetfeld horizontal orientiert, wobei beide Komponenten jeweils senkrecht zur Ausbreitungsrichtung stehen.

Typischerweise wird für diese Messung ein Paar orthogonal ausgerichteter Rahmenantennen verwendet, welche die magnetischen Impulse registrieren [Krider und Noggle, 1975]. Mit Hilfe von nachgeschalteter Auswertungs elektronik wird der Einfallswinkel ermittelt. Im einfachsten Fall lässt sich dieser aus dem Verhältnis der Maximalamplituden des Impulses bestimmen [Krider und Noggle, 1976]. Stationen, die ausschließlich auf Winkelpeilung ausgerichtet sind, werden in der Literatur häufig als *Magnetic Direction Finder* oder kurz MDF bezeichnet.

Das Prinzip der Winkelpeilung ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Für dieses Verfahren sind mindestens zwei Stationen notwendig. Der Blitzort ergibt sich dabei aus dem Schnittpunkt der Peilgeraden, die in der sphärischen Rechnung Großkreise auf der Erdkugel sind. Bei der exakten sphärischen Rechnung ergeben sich mathematisch zwei Schnittpunkte, die auf der Kugel einander genau gegenüberliegen. Physikalisch sinnvoll ist aber meist nur der den Stationen näher gelegene Lösungspunkt.

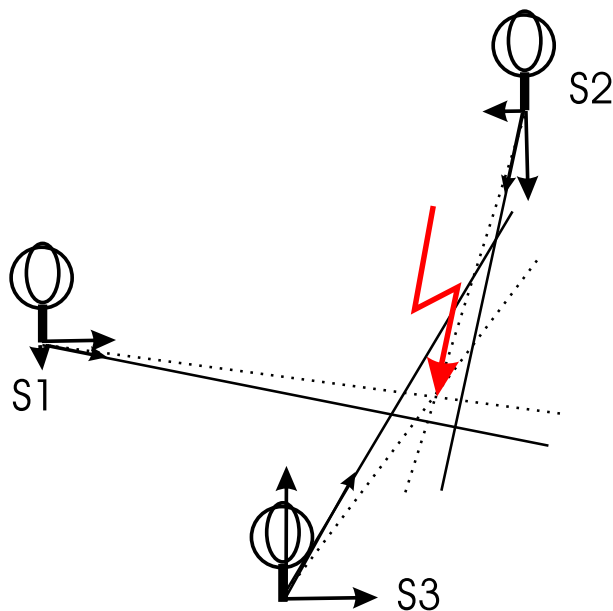


Abbildung 4.1: Prinzip der Winkelpeilung mit drei Stationen. Die Peilstrahlen aus den gemessenen Winkeln ergeben eine Fläche der möglichen Peilorte

Bei einer Messung mit zwei Stationen ist die Peilung nicht in jede Richtung gleich gut. Wenn der Peilort sich beispielsweise genau auf der Strecke zwischen zwei MDFs befindet, kann er überhaupt nicht bestimmt werden. Der sogenannte *Baseline Error* wirkt sich umso weniger aus, je weiter der Blitz von dieser Verbindungslinie entfernt liegt.

Beim Einsatz von mindestens drei Stationen N kann der Ort über Fitverfahren mittels χ^2 -Minimierung berechnet werden (Gleichung 4.1). Die theoretischen Winkel, die sich aus dem angenommenen Blitzort ergeben, werden dabei als Θ_i , die gemessenen Peilwinkel als Θ_{mi} bezeichnet. Die Winkelfehler σ_{Θ_i} sind in den meisten Messnetzen stationspezifisch.

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\Theta_{mi} - \Theta_i}{\sigma_{\Theta_i}} \right)^2 \quad (4.1)$$

Die möglichen Fehlerquellen bei Winkelpeilungen, die sogenannten „site errors“, werden beispielsweise von Mach u. a. [1986] diskutiert. Als Ursachen werden folgende Gründe genannt:

- nicht-vertikale Blitzkanäle,
- Hintergrundrauschen,
- Fluktuationen in der Messelektronik,
- falsch ausgerichtete Antennen,
- reflektierte Signale von der Ionosphäre und
- Standortanomalien.

Krider und Noggle [1976] zeigen, dass die zufälligen Fehler aus den drei erstgenannten Gründen bei 1 bis 2° liegen, wobei nur Blitze mit einem Stationsabstand von 10 bis 100 km herangezogen wurden. Der systematische Fehler, der durch falsch ausgerichtete Antennen entsteht, kann in Testläufen ermittelt und bei zukünftigen Rechnungen berücksichtigt werden. Von der Ionosphäre reflektierte Signale werden laut Mach u. a. [1986] bei der Messung gar nicht erst berücksichtigt, da das System angeblich nur die Bodenwelle detektiert.

Der größte Fehler entsteht durch Standortanomalien, wobei nicht nur das umgebende Gelände, sondern auch nahestehende Gebäude, Überlandleitungen und andere stromführende Kabel eine Rolle spielen. Dieser Fehler ist in den meisten Fällen abhängig von der Einfallsrichtung. Von Mach u. a. [1986] wurde er bei drei Stationen mit 5°, bei einer ungünstiger gelegenen Station mit 11° bestimmt. Da dies ebenfalls ein systematischer Fehler ist, kann er über einen größeren Zeitraum richtungsabhängig bestimmt und anschließend korrigiert werden.

4.1.2 Peilung mittels Ankunftszeiten

Das Prinzip der Bestimmung der Quellorte von Blitzereignissen über die Messung der Ankunftszeiten (engl. *time of arrival*, kurz: TOA) ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Dabei wird angenommen, dass sich der elektromagnetische Impuls – ausgehend vom Blitzort – allseitig mit einer konstanten Geschwindigkeit ausbreitet. An den Stationen werden jeweils die Ankunftszeiten der Impulse bestimmt. Üblicherweise ermittelt man die Differenzzeiten

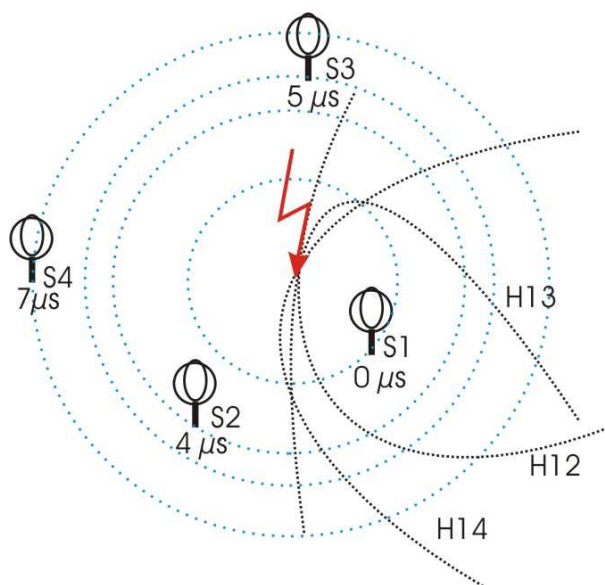


Abbildung 4.2: Prinzip der Peilung mit der TOA-Methode am Beispiel von vier Stationen. Eingezeichnet sind die drei Hyperbeln (H12, H13, H14), die sich jeweils mit der Station S1 mit der frühesten Ankunftszeit ergeben.

bezüglich einer Referenz, für welche in den meisten Fällen die Station mit der frühesten Ankunftszeit gewählt wird.

Bei einer Auswahl von zwei Stationen kann genau eine Differenzzeit ermittelt werden. Alle in Frage kommenden Quellorte des Ereignisses liegen dann auf einer Hyperbel, die sich um den Ort der blitznächsten Station krümmt. Bei der Benutzung von drei Stationen ergeben sich zwei unabhängige Differenzzeiten. Die zwei resultierenden Hyperbeln schneiden sich gewöhnlich in zwei Punkten, die beide als Blitzorte in Frage kommen. Eindeutig kann die Quellortbestimmung mit Hilfe des TOA-Verfahrens innerhalb des Messnetzes demnach erst mit vier Stationen gelöst werden. Außerhalb des Netzes gibt es auch mit mehr als drei Stationen ungünstige Standortkonstellationen, die die Ermittlung des Peilortes erschweren.

Zur Ermittlung des Peilortes kommen verschiedene Fitverfahren in Frage. Man unterscheidet prinzipiell zwischen

- Laufzeitdifferenzverfahren (engl. *arrival time difference*, kurz ATD), bei denen die variierenden Größen nur der Längen- und Breitengrad des Quellortes sind und
- reinen Laufzeitverfahren, die zusätzlich noch die Blitzzeit als variablen Parameter nutzen.

Beim ATD-Verfahren werden die einzelnen Summanden der Fitsumme zusammengesetzt, indem man die jeweiligen gemessenen Differenzzeiten zweier Stationen $dt_{i,j}$ und die theoretischen Werte voneinander subtrahiert ([Lee, 1986a], [Lee, 1986b]). Die theoretischen Differenzlaufzeiten sind dabei der Quotient aus dem Gangunterschied zwischen den beiden Stationen ($s_{i,BL} - s_{j,BL}$) und der konstanten Ausbreitungsgeschwindigkeit v_w . Der Weg

$s_{i, BL}$ stellt die Entfernung zwischen der Station i und dem hypothetischen Blitzort dar. In der ausführlichen Variante (Gleichung 4.2) sind alle möglichen Stationskombinationen berücksichtigt [Thomson u. a., 1994].

Da bei dem in dieser Arbeit vorgestellten Messsystem an allen Stationen mit dem gleichen Equipment und in gleicher Art und Weise gemessen wird, ist der Zeitfehler σ_t konstant und kann aus der Summe herausgezogen werden. Die genaue Bestimmung des Zeitfehlers wird in Kapitel 5.2.1 vorgenommen.

$$\chi^2 = \frac{1}{\sigma_t^2} \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(dt_{i, j} - \frac{1}{v_w} (s_{i, BL} - s_{j, BL}) \right)^2 \quad (4.2)$$

Durch die Aufsummierung aller Kombinationen werden Differenzzeiten teilweise doppelt aufgelistet. Beispielsweise ist der Summand der Indizes $i = 2, j = 3$ eine Linearkombination aus den Summanden $i = 1, j = 2$ und $i = 1, j = 3$. Für die Blitzpeilung reicht es aus, nur die jeweiligen Nachbarn in einer zeitsortierten Liste zu verwenden (Gleichung 4.3). Diese Variante wurde mit dem hier vorgestellten Messsystem erfolgreich getestet.

$$\chi^2 = \frac{1}{\sigma_t^2} \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \left(dt_{i, i+1} - \frac{1}{v_w} (s_{i, BL} - s_{i+1, BL}) \right)^2 \quad (4.3)$$

Die alternative Möglichkeit, den Blitzort anhand der Ankunftszeiten mittels Fitverfahren zu bestimmen, benutzt zusätzlich zu Länge und Breite des Quellortes auch die Blitzzeit t_{BL} als Fitparameter. Dieses Verfahren wird in einer Vielzahl von Arbeiten vorgestellt, beispielsweise in Koshak und Solakiewicz [1996], Koshak u. a. [2004] oder Thomas u. a. [2004]. Gleichung 4.4 zeigt die Aufstellung der Fitsumme:

$$\chi^2 = \frac{1}{\sigma_t^2} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - t_{BL})^2 \quad (4.4)$$

Die TOA-Methode wird sowohl im VLF-Bereich [Cummins u. a., 1998] als auch im VHF-Bereich [Thomas u. a., 2004] eingesetzt. Im Gegensatz zur Winkelpeilung funktioniert sie sowohl mit B- als auch mit E-Feldantennen. Anwendungsbedingt ist man aber auf eine möglichst genaue Zeitmessung angewiesen. In älteren Publikationen findet man die Angabe, dass dafür externe Pulsgeber eingesetzt wurden [Lewis u. a., 1960], in neueren wird meist mit GPS-Empfängern gearbeitet, die jeweils die Absolutzeit an der Station messen.

4.1.3 Interferometrie im VHF-Bereich

Für die erfolgreiche Anwendung der TOA-Methode ist es entscheidend, einen markanten Punkt im Zeitverlauf herauszufinden, der dann als repräsentativ für den gesamten Impuls gilt. Bei Pulsfolgen, die aus einer lang anhaltenden Zahl von ähnlich starken Amplituden

bestehen, kann dies zu Schwierigkeiten führen. Solche Pulsfolgen nennt man *Bursts*. Sie markieren in vielen Fällen *Leader*-Prozesse oder werden als Begleiterscheinung bei ICs beobachtet [Mardiana u. a., 2002]. Die Quellorte dieser Signaltypen können am besten mit Interferometrie-Methoden bestimmt werden.

Das allgemeine Prinzip dieses Verfahrens ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Dabei wird über die Ermittlung der Phasendifferenz zwischen zwei Stationen der Gangunterschied und damit die Laufzeitdifferenz dt der einlaufenden Welle ermittelt. Aus dieser Information wird über die Beziehung $dt = (d/c) \cdot \cos \phi$ auf den Einfallswinkel ϕ geschlossen [Oetzel und Pierce, 1969].

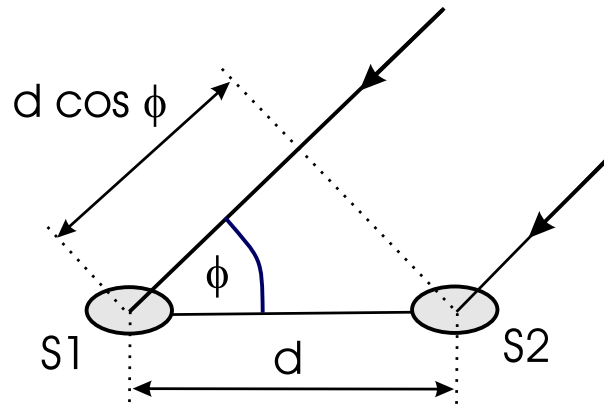


Abbildung 4.3: Vereinfachtes Prinzip der Radiointerferometrie, entnommen aus Morimoto u. a. [2004]

Mit Hilfe eines Systems aus drei Antennen, die üblicherweise als Eckpunkte eines gleichschenkligen, rechteckigen Dreiecks angeordnet werden, kann man aus den Laufzeitdifferenzen sowohl den horizontalen als auch den vertikalen Einfallswinkel bestimmen. Die Seitenlängen der Dreiecke variieren bei den einzelnen Systemen. So gibt es *Baselines* von 1 m [Richard u. a., 1986], 10 m [Morimoto u. a., 2005] bis hin zu 300 m [Oetzel und Pierce, 1969].

Eine echte 3D-Peilung ist aber erst mit mindestens zwei solcher Systeme möglich. Dafür wird, ähnlich wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, der passendste „Schnittpunkt“ aller Peilgeraden gesucht, mit dem Unterschied, dass dieser außer der Länge und der Breite auch die Emissionshöhe als Parameter hat [Morimoto u. a., 2005].

Die Radiointerferometriemethoden wurden zur Blitzortung bisher vornehmlich im höherfrequenten Bereich, namentlich im VHF- und UHF-Bereich, angewendet. Typisch sind dabei Frequenzen zwischen 10 und 300 MHz. Aus diesem Grund müssen hohe Sampleraten je nach System von beispielsweise 200 oder 500 MHz verwendet werden [Morimoto u. a., 2004], die Datenreduktion und Systemtotzeiten nach sich ziehen.

4.2 Analytische Lösungen zur Ermittlung der Blitzquellorte

Außer durch Fitverfahren können die Entstehungsorte der Blitze auch durch analytische Methoden ermittelt werden. Der Hauptvorteil ist dabei die Zeitersparnis bei der Berechnung, da man im Gegensatz zu den iterativen Verfahren keine Rechenschleifen zur Annäherung an die optimale Lösung benötigt. In diesem Kapitel werden zwei Methoden vorgestellt, die in unserer Auswertungssoftware zur Ermittlung möglicher Ausgangspunkte für die anschließend folgenden Fitalgorithmen erprobt wurden. Die erste berücksichtigt ausschließlich die Peilwinkel aller Stationen, die zweite nur die Ankunftszeiten von drei ausgewählten Stationen, wobei im Regelfall die drei blitznächsten herangezogen werden. Die beiden vorgestellten Lösungen berücksichtigen eine sphärische Oberfläche.

4.2.1 Analytische Winkelpeilung

Das hier vorgestellte Verfahren ist Orville Jr [1987] entnommen. Den Quellort des Blitzes ermittelt man aus den gegebenen Koordinaten von mindestens vier Stationen und den jeweiligen, gemessenen Einfallswinkeln des Signals. Die Peilgeraden, die sich an jeder Station einzeichnen lassen, verlaufen, wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, in den seltensten Fällen genau durch den Blitzort. Für die Lösung des Problems wird daher der kürzeste, sphärische Abstand zwischen der jeweiligen Peilgeraden und dem Quellort herangezogen und die Summe über alle Abstandsquadrate minimiert. Der wichtigste Schritt ist aber die anschließende Überführung in ein gleichwertiges Eigenwertproblem, das analytisch gelöst wird. Die daraus erhaltenen Blitzkoordinaten entsprechen dem globalen Minimum, wohingegen Lösungen aus iterativen Verfahren auch ein lokales Minimum erreichen können.

An dieser Stelle soll nicht die gesamte Herleitung des Verfahrens, sondern aus Platzgründen nur die Endlösung vorgestellt werden. Dafür werden jeweils die Stationsorte (Länge: λ_i , Breite: ϕ_i) und der dazugehörige Einfallswinkel θ_i zu einem (x_i, y_i, z_i) -Tripel zusammengefasst:

$$\begin{aligned} x_i &= \sin \lambda_i \cos \theta_i & - \sin \phi_i \cos \lambda_i \sin \theta_i \\ y_i &= -\sin \lambda_i \sin \theta_i & - \cos \lambda_i \cos \theta_i \\ z_i &= \sin \phi_i \sin \theta_i \end{aligned} \quad (4.5)$$

Dadurch entsteht ein Vektor der Größe N (Anzahl der Stationen). Aus diesem werden die folgenden sechs Hilfsgrößen ermittelt.

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sigma_{yy} &= \sum_{i=1}^N y_i^2 & \sigma_{zz} &= \sum_{i=1}^N z_i^2 \\ \sigma_{xy} &= \sum_{i=1}^N x_i y_i & \sigma_{xz} &= \sum_{i=1}^N x_i z_i & \sigma_{yz} &= \sum_{i=1}^N y_i z_i \end{aligned} \quad (4.6)$$

Unter Zuhilfenahme dieser Größen werden die Komponenten e_x , e_y , e_z und e_r erzeugt, die letztendlich den Blitzpunkt (Λ, Φ) festlegen.

$$\begin{aligned} e_x &= \frac{\sigma_{xy}\sigma_{yz}}{\sqrt{e_x^2 e_y^2 e_z^2}} & - & \sigma_{xz}(\sigma_{yy} - \lambda^*) \\ e_y &= \frac{\sigma_{xy}\sigma_{xz}}{\sqrt{e_x^2 e_y^2 e_z^2}} & - & \sigma_{yz}(\sigma_{xx} - \lambda^*) \\ e_z &= \frac{(\sigma_{xx} - \lambda^*)(\sigma_{yy} - \lambda^*)}{\sqrt{e_x^2 e_y^2 e_z^2}} & - & \sigma_{xy}\sigma_{xy} \\ e_r &= \sqrt{e_x^2 e_y^2 e_z^2} \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\Lambda = a \sin\left(\frac{e_z}{e_r}\right), \quad \Phi = a \tan\left(\frac{e_y}{e_x}\right) \quad (4.8)$$

Das in Gleichung 4.7 benutzte λ^* ist das kleinste λ_i der drei Eigenwerte der in Orville Jr [1987] aufgestellten Eigenwertgleichung. Wie dort im Anhang gezeigt, ist dies immer der Eigenwert für $i = 2$. Die anderen beiden Eigenwerte sind die Standardabweichung für Länge und Breite des ermittelten Blitzpunktes:

$$\lambda_i = 2d \cos\left[\frac{\gamma}{3} + \frac{2(i-1)\pi}{3}\right] - \frac{a}{3} \quad i = 1, 2, 3 \quad (4.9)$$

Die benötigten Größen sind dabei wie folgt festgelegt:

$$d = \sqrt{-p/3} \quad \cos \gamma = -q/(2d^3) \quad (4.10)$$

$$p = b - a^2/3 \quad q = 2(a/3)^3 - (ab)/3 + c$$

mit

$$\begin{aligned} a &= -\sigma_{xx} - \sigma_{yy} - \sigma_{zz} \\ b &= \sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{xx}\sigma_{zz} + \sigma_{yy}\sigma_{zz} - \sigma_{xy}^2 - \sigma_{xz}^2 - \sigma_{yz}^2 \\ c &= -(\sigma_{xx}\sigma_{yy}\sigma_{zz}) - (2\sigma_{xy}\sigma_{xz}\sigma_{yz}) + (\sigma_{xx}\sigma_{yz}^2) + (\sigma_{yy}\sigma_{xz}^2) + (\sigma_{zz}\sigma_{xy}^2) \end{aligned} \quad (4.11)$$

Im Gegensatz zu dem nachfolgenden TOA-Verfahren kann diese Berechnungsvorschrift die in Kapitel 4.1.1 vorgestellte iterative Minimierungsmethode vollständig ersetzen.

4.2.2 Analytische Startpunktbestimmung mit Laufzeiten

Wie in Kapitel 4.1.2 erläutert, erhält man aus den Ankunftszeiten von drei Stationen im Regelfall zwei Hyperbelschnittpunkte. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Berechnungsmethode entwickelt, mit der man diese Punkte analytisch ermitteln kann. Diese werden genutzt, um für die Peilung der Blitzorte mittels χ^2 -Minimierung nach der TOA-Methode möglichst gute Startpunkte zu erhalten. Ist der Ausgangspunkt in der Nähe vom globalen Minimum, wird die Fitroutine schnell konvergieren und nur wenig Rechenzeit in Anspruch

nehmen. Die genaue Herleitung findet sich in Anhang B. An dieser Stelle ist nur der verwendete Algorithmus aufgezeigt, wobei die sphärische Oberfläche der Erde berücksichtigt wurde.

Ausgehend von einer sortierten Liste der Ankunftszeiten kann ermittelt werden, welche Station den kleinsten Abstand zum Blitzereignis hat. Die blitznächste Station mit der kürzesten Ankunftszeit ist die Basisstation $S1$, die Station mit der mittleren Ankunftszeit $S2$, die mit der spätesten Zeit $S3$. Der Abstand zwischen $S1$ und $S2$ wird als $G1$ und der Abstand zwischen $S1$ und $S3$ als $G2$ bezeichnet. Die jeweiligen Differenzzeiten zwischen diesen Stationen werden in Differenzabstände $D1$ und $D2$ umgerechnet, wobei von einer konstanten Ausbreitungsgeschwindigkeit ausgegangen wird.

Zur Vereinfachung der weiteren Rechnung werden folgende Hilfsgrößen benutzt:

$$\begin{aligned} x_{01} &= \frac{1}{2}(G1 - D1) \\ x_{02} &= \frac{1}{2}(G2 - D2) \end{aligned} \quad (4.12)$$

und

$$\begin{aligned} m &= \frac{G1 D2}{G2 D1} \\ n &= x_{02} + \frac{D2}{G2}(x_{02} - x_{01}) - \frac{G1 D2}{G2 D1} x_{01} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Aus der Stationskonstellation werden die beiden Winkel α_1 und α_2 ermittelt. Der Winkel α_1 ist der hypothetische Peilwinkel, den man an der Basisstation $S1$ misst, wenn das Signal von $S2$ ankommt. Analog ist α_2 der Peilwinkel eines Signals, das aus Richtung der Station $S3$ eintrifft, wiederum von $S1$ aus betrachtet. Der Winkel α wird aus der Differenz dieser beiden Winkel gebildet.

$$\alpha = \alpha_1 - \alpha_2 \quad (4.14)$$

Aus der Herleitung in Anhang B werden die Lösungsgleichungen B.22 und B.23 übernommen.

$$\begin{aligned} z &= \left[\left(\frac{G1}{D1} \right)^2 - 1 \right] - \left(\frac{m - \cos \alpha}{\sin \alpha} \right)^2 \\ p &= -2x_{01} \left[\left(\frac{G1}{D1} \right)^2 + \frac{G1}{D1} \right] - \frac{2n}{\sin^2 \alpha} (m - \cos \alpha) \\ q &= \left[x_{01} \left(\frac{G1}{D1} + 1 \right) \right]^2 - \frac{n^2}{\sin^2 \alpha} \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} a_1^{L1/L2} &= -\frac{p}{2z} \pm \frac{\sqrt{p^2 - 4zq}}{2z} \\ b_1^{L1/L2} &= \frac{m a_1^{L1/L2} + n}{\sin \alpha} - a_1^{L1/L2} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Die Unterscheidung der beiden Hyperbelschnittpunkte ist durch $L1$ und $L2$ gegeben. a_1 und b_1 sind die x- bzw. y-Komponente eines fiktiven Koordinatensystems mit dem Ursprung in $S1$ und der x-Achse in Richtung $S2$.

Die Herleitung in Anhang B erfolgte in einem kartesischen Koordinatensystem. Um den Übergang auf ein sphärisches Koordinatensystem zu bewerkstelligen, werden Abstand und Richtung der beiden Lösungspunkte von der Basisstation aus ermittelt. Als Analogie kann man sich eine Ebene vorstellen, die die Kugel genau im Punkt der Basisstation berührt. Betrachtet wird nur die obere Hälfte der Kugel, da von wesentlich kleineren Stationsabständen als $1/4$ des Erdumfangs ausgegangen werden kann. In diesem Gebiet besteht zwischen der Ebene und der Kugel für Winkel, die vom Koordinatenursprung aus ermittelt werden, Winkeltreue. Abstände auf der ebenen Fläche werden auf die Kugel übertragen.

Der Abstand von der Basisstation $S1$ zu den beiden Lösungspunkten beträgt:

$$\begin{aligned} R^{L1} &= \sqrt{(a_1^{L1})^2 + (b_1^{L1})^2} \\ R^{L2} &= \sqrt{(a_1^{L2})^2 + (b_1^{L2})^2}. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Der Winkel, unter dem die beiden Lösungspunkte von der Basisstation aus gesehen werden, kann unter Berücksichtigung der ursprünglichen Koordinatensystemdrehung absolut angegeben werden.

$$\begin{aligned} \beta^{L1} &= \arctan\left(\frac{b_1^{L1}}{a_1^{L1}}\right) + \alpha_1 \\ \beta^{L2} &= \arctan\left(\frac{b_1^{L2}}{a_1^{L2}}\right) + \alpha_1 \end{aligned} \quad (4.18)$$

In sphärischen Koordinaten lautet das Endergebnis für die Lösungspunkte:

$$\begin{aligned} \Lambda^{L1} &= \lambda_{S1} + R^{L1} \sin \beta^{L1} \quad , \quad \Phi^{L1} = \phi_{S1} + R^{L1} \cos \beta^{L1} \\ \Lambda^{L2} &= \lambda_{S1} + R^{L2} \sin \beta^{L2} \quad , \quad \Phi^{L2} = \phi_{S1} + R^{L2} \cos \beta^{L2} \end{aligned} \quad (4.19)$$

Die beiden vorgestellten analytischen Verfahren wurden in dem hier präsentierten System zur Ermittlung eines möglichst guten Anfangspunktes erprobt. Dies hängt damit zusammen, dass einerseits die gemessenen Winkel zu ungenau sind, um den Quellort des Blitzes ausschließlich über Winkelpeilung zu bestimmen. Andererseits kann das vorgestellte Verfahren der analytischen TOA-Methode nur bei drei beteiligten Stationen angewendet werden und liefert zudem meist zwei gleichwertige Lösungen. Aus diesem Grund sind die analytisch ermittelten Koordinaten nur Ausgangspunkt für das iterative Verfahren, welches im nächsten Kapitel genauer vorgestellt wird.

4.3 Blitzortung im VLF-Bereich mittels 3D-Verfahren

Das Kernstück des Ortungsprinzips zur Auswertung der gesammelten Messdaten ist das Verfahren zur Blitzhöhenbestimmung, welches Gegenstand dieses Kapitels sein soll. Nach aktuellem Erkenntnisstand kommt es bei VLF-Systemen erstmalig zur Anwendung. Das Verfahren baut dabei grundsätzlich auf den in Kapitel 4.1.2 vorgestellten Prinzipien der χ^2 -Minimierung auf. Das 3D-Verfahren und die ersten Ortungsergebnisse, die aufgrund des in dieser Arbeit beschriebenen Messsystems erzielt werden konnten, sind detailliert in Betz u. a. [2004] erläutert.

4.3.1 Prinzip des 3D-Verfahrens

Die Unterscheidung zwischen 2D- und 3D-Verfahren wird durch eine unterschiedliche Berechnung der Abstände zwischen Emissionsort und Stationsort erreicht. Bisher benutzte man bei VLF-Messnetzen ausschließlich 2D-Verfahren ([Lee, 1989], [Koshak und Solakiewicz, 2001]). Der Abstand zwischen Blitz und Station berechnet sich in diesen Fällen als Bogenmaß des Großkreises zwischen diesen Punkten, multipliziert mit dem Erdradius. Dies entspricht dem Laufweg der Bodenwelle, die sich nicht geradlinig ausbreitet, sondern der Erdkrümmung folgt.

Dagegen werden in VHF-Systemen nur direkt einlaufende Wellen gemessen. Bei solchen Messnetzen werden 3D-Verfahren eingesetzt, die zusätzlich zur Länge und Breite auch die Höhe der Emissionsquelle berücksichtigen [Thomas u. a., 2004]. Direkt einlaufende Wellen können auch bei flachem Gelände nur bis zu einem bestimmten Stationsabstand gemessen werden. Bei einem Erdradius von 6.370 km würde aus 100 km Entfernung noch eine Strahlungsquelle in 800 m Höhe direkt gemessen werden. In 200 km Entfernung müsste sie schon aus mindestens 3,1 km, bei 500 km sogar aus 19,5 km Höhe strahlen.

In dem in dieser Arbeit vorgestellten VLF-Messsystem werden die Emissionshöhen aus einer Kombination der beiden Laufwegsermittlungen gewonnen. Der Abstand zwischen zwei Punkten auf der Erdoberfläche s_{2D} wird dabei weiterhin als das Produkt zwischen Bogenmaß und Erdradius ermittelt. Der verlängerte Laufweg, der sich aus einer nicht zu vernachlässigenden Emissionshöhe h_{BL} ergibt, wird in folgender Form berücksichtigt:

$$s_{3D} = \sqrt{s_{2D}^2 + h_{BL}^2} \quad (4.20)$$

Diese Berechnungsvorschrift impliziert einen kontinuierlichen Übergang zwischen 2D- und 3D-Methode. Für die χ^2 -Minimierung werden die in Kapitel 4.1.2 aufgestellten Gleichungen herangezogen, wobei die Blitzhöhe einen zusätzlichen Parameter darstellt. Für einen Wolkenblitz wird sich also die χ^2 -Summe bei der 3D-Peilung, anders als bei der 2D-Peilung, verringern.

Die Berechnung nach dem hier vorgestellten 3D-Verfahren ist aber nicht unter allen Voraussetzungen sinnvoll. Optimalerweise befindet sich der Peilort innerhalb des Messnetzes mit Stationsabständen zwischen 80 und 100 km und nicht exakt symmetrischer Sensor-konfiguration. Es gilt zu beachten, dass ein Ereignis, welches beispielsweise exakt gleich

weit von allen Stationen entfernt liegt, überhaupt nicht höhengepeilt werden könnte, da an diesem Ort für jede Höhe – inklusive Höhe Null (Bodenblitz) – die gleiche Fitsumme ermittelt würde.

Bei ungünstiger Netzgeometrie kann durch die Einführung des zusätzlichen Höhenparameters auch das Ergebnis von Länge und Breite des Blitzortes verfälscht werden. Aus diesem Grund wird bei jeder Blitzpeilung unabhängig voneinander ein Ergebnis mit dem 2D- und dem 3D-Verfahren erstellt und je nach Qualität des Resultates das eine oder das andere bevorzugt. In Tabelle 4.1 sind die möglichen Statuskennungen einer erfolgreichen Blitzortbestimmung zusammengestellt.

Tabelle 4.1: Liste aller Statuskennungen einer erfolgreichen Blitzortbestimmung

Status	Bezeichnung	Bemerkung
2	IC	3D-Verfahren, Blitzhöhe liegt zwischen 2 und 21 km
1 oder -1	CG	3D-Verfahren, Blitzhöhe liegt unter 1 km oder Ergebnis des 2D-Verfahrens wurde gegenüber dem des 3D-Verfahrens bevorzugt.
0	Blitztyp unbestimmt	3D-Verfahren, Blitzhöhe nicht sinnvoll (zwischen 1 und 2 km oder über 21 km)
-2	Blitztyp nicht bestimmbar	blitznächste Station weiter als 100 km entfernt, Anwendung des 3D-Verfahrens nicht sinnvoll

Die physikalische Interpretation zur Unterscheidung von Wolken- und Bodenblitzen stützt sich auf die Annahme, dass die Strahlungsquelle bei der Blitzentladung als Punktquelle angesehen werden kann. Prinzipiell wird die elektromagnetische Welle von dem Punkt aus abgestrahlt, an dem die größte Beschleunigung der Ladungsträger – in diesem Fall der Elektronen – vorliegt. Wie in Kapitel 2.1.3 beschrieben, wurden aus Videoaufzeichnungen die höchsten Geschwindigkeiten bei *Return Strokes* nahe dem Erdboden gemessen. Dies lässt darauf schließen, dass bei Bodenblitzen die größte Ladungsträgerbeschleunigung nahe dem Boden stattfindet, vermutlich an dem Punkt, an dem der *Attachment Leader* auf den *Stepped* bzw. *Dart Leader* trifft. Bei Wolkenblitzen sollte dieser Punkt dementsprechend in der Nähe der positiven bzw. der negativen Raumladungszone sein.

Aufgrund der Antennengeometrie ist eine Detektion von horizontalen Wolkenblitzen nur möglich, wenn diese auch vertikale Kanalelemente besitzen. Ob eine Ortung derselben sinnvoll ist, muss Thema zukünftiger Forschungen sein und kann nur im Vergleich mit anderen Blitzerfassungssystemen wie Videoaufzeichnungen oder VHF-Messungen untersucht werden.

Wie die statistischen Auswertungen in Kapitel 5.2 belegen, wird durch die Verwendung der 3D-Peilung anstatt einer 2D-Rechnung die Qualität der Ergebnisse verbessert. Das bedeutet, dass eine Einführung der Blitzhöhe als zusätzlicher Parameter eine gewinnbringende Erweiterung der bisherigen Vorgehensweise darstellt. Die ermittelten Blitzhöhen werden ausführlicher in Kapitel 5.2.3 und 5.2.4 diskutiert und darüber hinaus mit denen verglichen, die mittels anderer Systeme berechnet worden sind.

4.3.2 Simulation von Blitzhöhen an einem Ort

Zum Test des im vorangegangenen Kapitels vorgestellten Blitzpeilungsverfahrens wurden Simulationen durchgeführt, die aufzeigen, wie zuverlässig die ermittelten Blitzhöhen bei verschiedenen angenommenen Zeitfehlern des Messsignals sind. Dafür wurden einige Stationen des realen Messnetzes herangezogen. An diesen wurden in Süddeutschland im Rahmen dieser Arbeit ab Mai 2004 Blitzdaten gesammelt und ausgewertet. Die genaue Auflistung aller durchgeführten Messkampagnen ist in Kapitel 5.1 zusammengestellt.

Anhand eines angenommenen Blitzortes mit fester Länge und Breite wird bei Variation der Emissionshöhe und des Zeitfehlers an der Einzelstation statistisch das Peilergebnis untersucht. Der Blitzort wurde zentral im Netz bei $48,1^\circ$ n.B. und $11,4^\circ$ ö.L. platziert, die Höhen wurden mit 4, 6, 8 und 10 km und die gaußverteilten Zeitfehler mit 0,2 und $0,4 \mu\text{s}$ vorgegeben. Jede Parameterkombination wurde mit 2.000 Ereignissen geprüft, um eine sichere Statistik zu erhalten. Zur Verdeutlichung ist die Anordnung des Blitzes und der Stationen in Abbildung 4.4 dargestellt.



Abbildung 4.4: Blitzort und Stationsnetz für die Blitzhöhensimulation

Die Ergebnisse der Simulation sind in Tabelle 4.2 und Abbildung 4.5 zusammengefasst. Die Standardabweichung der zurückgerechneten Höhen und damit der Peilfehler fällt bei niedrigen Emissionshöhen viel stärker ins Gewicht als bei größeren Höhen. Im ungünstigsten Fall mit einem angenommenen Zeitfehler von $0,4 \mu\text{s}$ bei einer Blitzhöhe von 4 km wird ein prozentualer Höhenfehler von 26 % ermittelt.

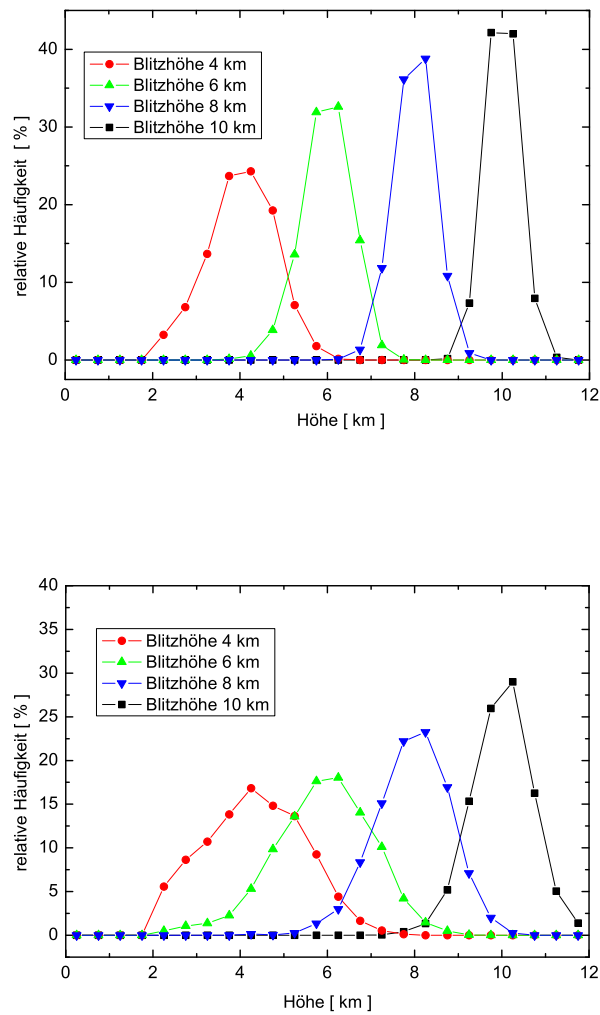


Abbildung 4.5: Simulation statistischer Höhenprofile an einem Ort mit einem angenommenen Zeitfehler von $0,2 \mu\text{s}$ (oben) und $0,4 \mu\text{s}$ (unten)

Tabelle 4.2: Mittlere Höhe \bar{h} und Standardabweichung σ der je 2.000 simulierten Ereignisse in verschiedenen Höhen und bei verschiedenen vorgegebenen Zeitfehlern dt

vorgegebene Blitzhöhe [km]	$dt = 0,2 \mu\text{s}$		$dt = 0,4 \mu\text{s}$	
	\bar{h} [km]	σ [km]	\bar{h} [km]	σ [km]
4	4,020	0,762	4,335	1,124
6	5,982	0,548	5,889	1,130
8	7,996	0,438	7,946	0,846
10	10,001	0,358	9,999	0,686

Kapitel 5

Statistische Auswertung der Blitzereignisse

Nach der Theorie der Blitzortung soll nun auf die Messdaten des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Blitzerfassungssystems eingegangen werden. Diese wurden zwischen 2003 und 2006 mit unterschiedlichen Standortkonfigurationen erfasst. Im ersten Abschnitt sind die Regionen und Zeiträume der Messkampagnen zusammengestellt, für die Blitzdaten gesammelt und ausgewertet werden konnten. Anschließend werden statistische Ergebnisse gezeigt, die veranschaulichen, mit welcher Genauigkeit die Blitzorte ermittelt werden konnten.

5.1 Messkampagnen

Im Verlauf dieser Arbeit wurde das Blitzmesssystem, welches in seinen Einzelheiten in Kapitel 3 näher vorgestellt wurde, entwickelt und erprobt. Die Standorte der Messrechner blieben dabei nicht über den gesamten Zeitraum bestehen. Vielmehr gab es verschiedene Netzkonfigurationen, die in den jeweiligen Messkampagnen zum Einsatz kamen. Die Installation der Messausrüstung an den verschiedenen Standorten konnte nur durch die Unterstützung von anderen wissenschaftlichen Institutionen und Privatpersonen durchgeführt werden. Durch den praktischen Einsatz wurden Hard- und Software der Messstationen, aber auch die Algorithmen zur Ortung der Ereignisse ausführlich getestet und sukzessive verbessert. In diesem Kapitel sind die einzelnen Ausbaustufen des deutschen Stationsnetzes und die Orte des mobilen Einsatzes dokumentiert.

5.1.1 Südbayern 2003

Im Frühjahr 2003 wurde das erste Messnetz dieser Art mit sechs Stationen in Betrieb genommen (vgl. Tabelle 5.1). Mit diesem System war noch keine zeitnahe Auswertung der Blitzdaten möglich. Vielmehr wurden nach starken Gewittertagen die erforderlichen Messdaten über eine Remote-Einwahl per ISDN abgeholt und anschließend verarbeitet.

Tabelle 5.1: Stationsnetz in Südbayern während der Messsaison 2003

Nr.	Ort	n.B. [°]	ö.L. [°]
10	Garmisch	47,476	11,063
20	Chieming	47,884	12,541
30	Ravensburg	47,801	9,695
40	Garching	48,268	11,673
50	Regensburg	49,043	12,103
60	Weißenburg	49,019	10,960

In der Messsaison 2003 wurde anstatt der in Kapitel 3.2 vorgestellten Methode zur Datenerfassung eine Messkarte der Firma Datel eingesetzt, die man später aus Kostengründen ersetzte. Von April 2003 bis August 2003 waren die Messrechner mit einem Windows-2000-Betriebssystem ausgestattet. Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde die Messsoftware auf Linux konvertiert und eine eigene Hardware zur Datenaufnahme entwickelt [Wirz, 2003].

Mit diesem System war ab Oktober 2003 eine kontinuierliche Datenübertragung zu einem zentralen Auswertungsrechner gewährleistet. Besonders starke Gewittertage in dieser Saison waren am 8., 19. und 31. Mai 2003. Anhand der Daten dieser Tage konnten erstmals die in Kapitel 4.3.1 vorgestellten Algorithmen getestet werden. Die Ergebnisse zur Peilgenauigkeit mit dieser Netzkonfiguration sowie die verwendeten Mess- und Auswertungsmethoden sind in Betz u. a. [2004] und Schmidt u. a. [2004] publiziert.

5.1.2 Süddeutschland 2004

Für die Messkampagne im Jahr 2004 wurde erstmals das in Kapitel 3.2 vorgestellte System eingesetzt, bei dem die Datenaufnahme durch das eigens dafür entwickelte USB-Gerät erfolgt. Mit dieser Messausrüstung wurden probeweise fünf Stationen in Süddeutschland ausgestattet, die parallel zu den sechs Messrechnern mit der bewährten Hardwarekonfiguration von 2003 arbeiteten (vgl. Tabelle 5.2). Aufgrund von unterschiedlichen Filtereinheiten konnten die Daten der beiden Teilnetze zunächst nicht zu einer Gesamtauswertung zusammengefasst werden, sodass im Jahr 2004 faktisch zwei unabhängige Systeme betrieben wurden. Wegen zu hoher lokaler Störeinflüsse mussten zwei Standorte des Vorjahres veretzt werden. So wurde eine Station von Chieming nach Berchtesgaden verlegt sowie der Garmischer Messrechner in Peißenberg neu installiert.

Gewittertage mit besonders hoher Blitzaktivität waren in dieser Saison der 8., 20. und 23. Juli sowie der 7. und 12. August 2004. Daten von diesen Tagen konnten für Vergleiche mit dem Blitzerefassungssystemen von Siemens herangezogen werden. Die Resultate dieser Gegenüberstellung werden in Kapitel 6.2.1 vorgestellt.

Tabelle 5.2: Zwei unabhängige Stationsnetze mit unterschiedlicher Hardware in Süddeutschland während der Messsaison 2004. Die Station in Garching wurde mit beiden Systemen ausgerüstet.

Messnetz mit Hardware von 2003				Messnetz mit neuer Hardware			
Nr.	Ort	n.B. [°]	ö.L. [°]	Nr.	Ort	n.B. [°]	ö.L. [°]
30	Ravensburg	47,801	9,695	11	Lahr	48,365	7,828
40	Garching	48,268	11,673	12	Karlsruhe	49,093	8,426
50	Regensburg	49,043	12,103	13	Basel	47,561	7,970
51	Berchtesgaden	47,884	12,541	15	Weiden	49,667	12,184
60	Weißenburg	49,019	10,960	29	Garching	48,268	11,673
70	Peißenberg	47,476	11,063				

5.1.3 Süddeutschland 2005

Ab 2005 konnte mit einem einheitlichen Netz von insgesamt 20 Stationen gearbeitet werden, welches sich über den gesamten süddeutschen Raum erstreckte (vgl. Tabelle 5.3). Dabei wurden im Großraum München verstärkt Stationen aufgestellt, die es erlaubten, gezielt nach Höhenereignissen zu suchen und den in Kapitel 4.3 vorgestellten Algorithmus zu prüfen. Wie auch in der Messsaison 2004 war eine Vielzahl von Stationsrechnern über das Internet mit einem Auswertungsrechner verbunden, so dass Gewitterzellen zeitnah erkannt werden konnten. Diese Daten wurden dem Deutschen Wetterdienst online zur Verfügung gestellt und von diesem in der Regionalzentrale München zur Unwetterprognose genutzt.

Tabelle 5.3: Stationsnetz Süddeutschland Messsaison 2005

Nr.	Ort	n.B. [°]	ö.L. [°]	online	Nr.	Ort	n.B. [°]	ö.L. [°]	online
11	Lahr	48,365	7,828	+	32	Geretsried	47,870	11,476	+
12	Karlsruhe	49,093	8,426	+	33	Buchloe	48,037	10,728	-
13	Basel	47,561	7,970	+	34	Stadtbergen	48,349	10,850	-
14	Bamberg	49,879	10,914	+	50	Regensburg	49,043	12,103	+
15	Weiden	49,667	12,184	+	51	Berchtesgaden	47,884	12,541	+
16	Stegen	48,076	11,139	+	60	Weißenburg	49,019	10,960	+
17	Passau	48,572	13,424	+	21	Lichtenau	47,881	11,079	-
29	Garching	48,268	11,673	+	22	Lagerlechfeld	48,180	10,839	-
30	Ravensburg	47,801	9,695	+	24	O-Pfaffenhofen	48,087	11,279	-
31	Peißenberg	47,476	11,063	+	26	München	48,1478	11,573	-

Einige Stationen des verdichteten Netzes wurden ohne Netzanbindung ausgerüstet. Diese Daten standen erst zu einer späteren Nachanalyse zur Verfügung. Die blitzreichsten Tage in diesem Messzyklus waren der 14., 24. und 29. Juni sowie der 4., 15., 16., 18. und 29. Juli 2005. Der zuletzt genannte Tag ist mit ca. 500.000 registrierten Ereignissen im süddeutschen Raum der mit Abstand datenreichste Tag. Deshalb wurden die statistischen Auswertungen der nächsten Kapitel bevorzugt für diesen Tag erstellt.

Für das Jahr 2006 ist eine Ausdehnung des süddeutschen Netzes auf Gesamtdeutschland geplant. Außerdem sollen gleichzeitig weitere 15 Stationen in Europa mit geringer Dichte aufgestellt werden.

5.1.4 Feldkampagnen in Brasilien und Australien 2005/2006

Das Institut für Physik der Atmosphäre vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen untersucht in einer Vielzahl von Projekten die NO_x -Produktion in der Atmosphäre ([Höller und Schumann, 2000], [Fehr u. a., 2004]). Im Besonderen interessiert man sich für den Anteil von Stickoxiden, die in natürlicher Weise durch Blitzentladung entstehen. Bei Kampagnen in verschiedenen Tropenregionen der Erde werden mit Messinstrumenten ausgerüstete Kleinflugzeuge durch Gebiete mit Gewitteraktivität geflogen, um den NO_x -Gehalt der Luft zu bestimmen. Für eine genaue Analyse ist es notwendig, auch die Blitzaktivität möglichst exakt quantitativ zu bestimmen. Aus diesem Grund wurden im Rahmen der TROCCINOX-Kampagne 2005 in Brasilien und der SCOUT-Kampagne 2006 in Australien jeweils sechs unserer Feldstationen und ein Auswertungsrechner zur Blitzerfassung eingesetzt.

Das Messgebiet während der Brasilienkampagne befand sich im Bundesstaat São Paulo in einem Umkreis von ca. 150 km rund um Bauru. Die Koordinaten aller sechs Stationen sind in Tabelle 5.4 zusammengefasst. Das Netzwerk wurde operativ vom 20. Januar 2005 bis zum 27. Februar 2005 betrieben, wobei vier der sechs Stationen online mit dem Auswertungsrechner verbunden waren. An den anderen beiden Stationen wurden die Daten mit einer externen Festplatte abgeholt.

Tabelle 5.4: Stationsnetz in Brasilien Januar/Februar 2005

Nr.	Ort	s.B. [°]	w.L. [°]	online
21	Marilia	22,235	49,965	+
22	Novo Horizonte	21,466	49,226	-
23	Bauru	22,358	49,027	+
24	Ourinhos	22.951	49.896	-
25	Araraquara	21.813	48.199	+
26	Botucatu	22.848	48.432	+

Starke Blitztage waren vom 21. bis 25. Januar, am 4. und 5. Februar sowie vom 24.–27. Februar 2005. Besonders interessant ist die Auswertung vom 4. Februar 2005, da an diesem Tag die beiden Messflugzeuge *Falcon* und *Geophysica* über einen längeren Zeitraum Stickoxidmessungen in der Nähe der Gewitterwolken durchführen konnten. In der Abbildung 5.1 sind die gesamten Blitzereignisse dieses Tages zusammen mit zurückgelegten Strecken der Messflugzeuge eingezeichnet. Erste Vergleiche der gemessenen Blitzdaten mit denen des brasilianischen Blitzerfassungssystem RINDAT sowie Gegenüberstellungen mit Radardaten aus Bauru und Blitzdaten vom satellitengestützten LIS-System sind in Schmidt u. a.

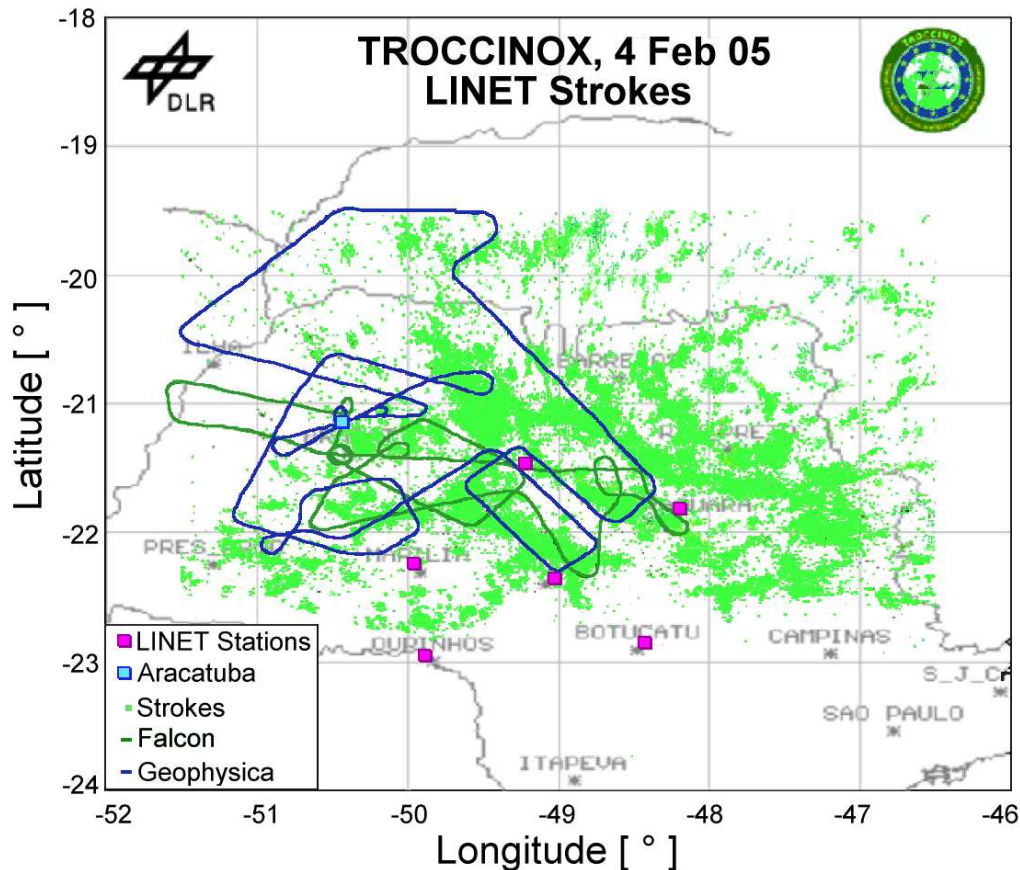


Abbildung 5.1: Blitzmuster und Flugrouten am 4. Februar 2005 in Brasilien

[2005] veröffentlicht. Weitere Auswertungen zur Peilgenauigkeit und Vergleiche mit anderen Systemen finden sich in den Kapiteln 6.2.2, 6.2.3 und 6.3.

Das beobachtete Gebiet bei der SCOUT-Kampagne lag im australischen *Northern Territory* ca. 150 km rund um die Stadt Darwin. Hier waren die gleichen sechs Messstationen wie in Brasilien im Einsatz. Die Stationsgeometrie ist in Tabelle 5.5 dokumentiert. Insgesamt dauerte der Messzeitraum vom 5. November 2005 bis zum 23. Februar 2006. Alle sechs Stationen wurden im Laufe der Mission mit einem Internetzugang ausgerüstet, sodass eine zeitnahe Auswertung installiert und betrieben werden konnte, die jeweils aktuelle Blitzkarten lieferte.

Im November und Dezember 2005 gab es fast täglich sehr starke Gewitter über dem beobachteten Gebiet. Am 19. November 2005 waren die beiden Forschungsflüge zu Messzwecken unterwegs, sodass die Auswertung für diesen Tag für Vergleiche mit gemessenen Stickoxiden herangezogen werden kann. Die Abbildung 5.2 zeigt eine Karte mit den Stationsorten während des Einsatzes in Australien. Zusätzlich sind alle aufgezeichneten Blitzereignisse vom 19. November 2005 dargestellt, unterteilt in Boden (CG)- und Wolkenblitze (IC) sowie in unbestimmte Ereignisse (UK) aufgrund zu großer Stationsentfernungen

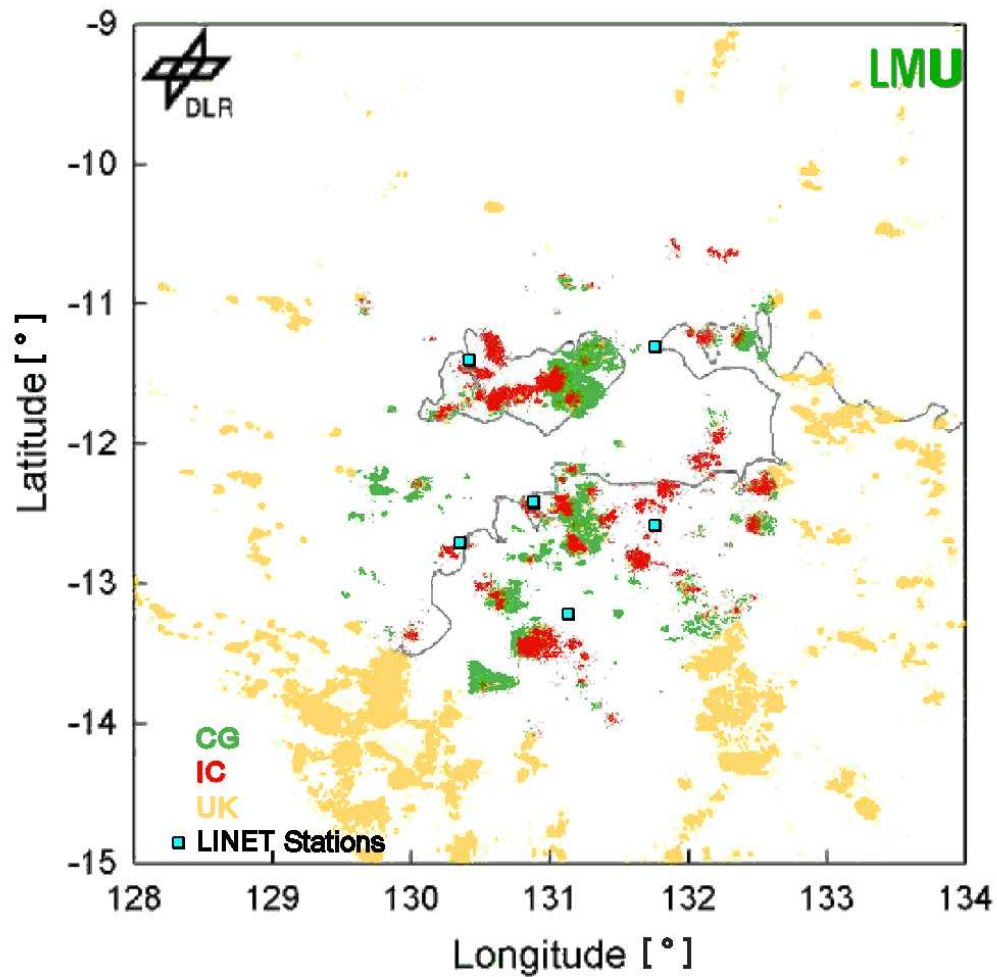


Abbildung 5.2: Stationsorte und Blitzmuster am 19. November 2005 in Australien

zum Blitzort. Veröffentlichungen, die die gemessenen Blitzdaten mit regionalen Radar- und Blitzdaten vergleichen, sind in Vorbereitung.

Tabelle 5.5: Stationsnetz in Australien November 2005 bis Februar 2006

Nr.	Ort	s.B. [°]	ö.L. [°]	online
21	Point Stuart	12,586	131,760	+
22	Cape Don	11,307	131,765	+
23	Garden Point	11,409	130,417	+
24	Darwin	12,428	130,886	+
25	Dundee Beach	12,718	130,350	+
26	Mount Bunday	13,226	131,133	+

5.2 Statistik über gemessene Ergebnisse

Die Qualität der Peilergebnisse konnte anhand verschiedener Statistiken geprüft werden. Die Daten vom 29. Juli 2005 wurden dafür innerhalb des dichten Messnetzes von $10,0^\circ$ – $12,5^\circ$ ö.L. und $47,5^\circ$ – $49,5^\circ$ n.B. ausgewertet. In der Abbildung 5.3 sind die beteiligten Stationen und alle registrierten Blitze des Auswertungsgebietes eingezeichnet. An diesem Tag war ein Großteil des selektierten Gebietes mit Blitzdaten bedeckt. Deutlich zu erkennen sind abgegrenzte Zellstrukturen, welche den Verlauf der Gewittertätigkeit markieren.

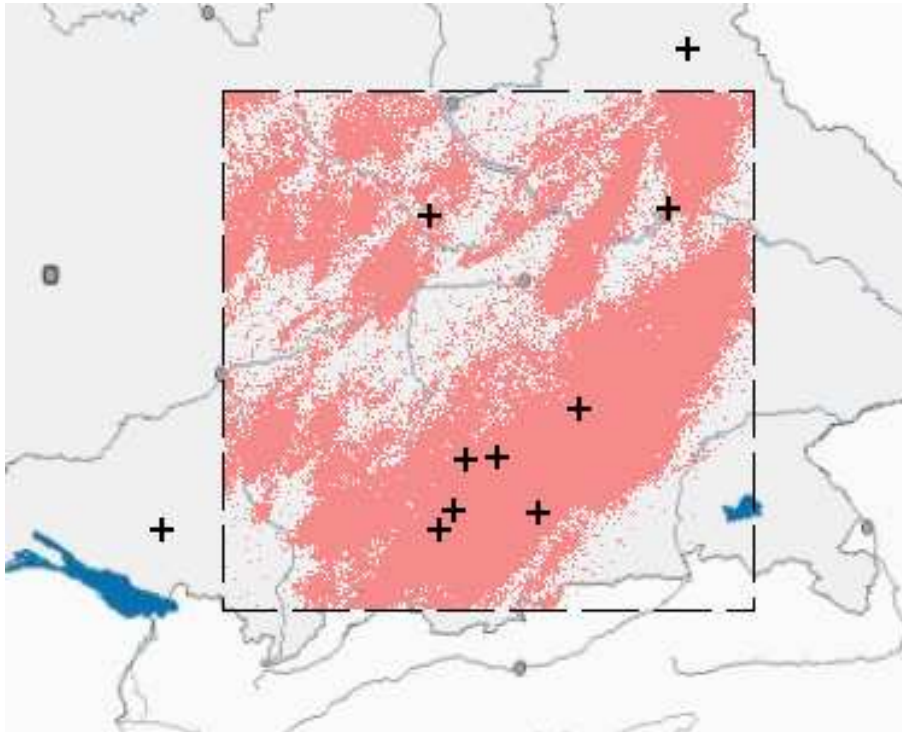


Abbildung 5.3: Blitzkarte vom 29. Juli 2005

5.2.1 Laufzeitdifferenzen

Ein gutes Merkmal für die Qualität eines gepeilten Ereignisses ist die Verteilung der Differenzlaufzeiten. Bei bekannten Blitzankunftszeiten an den Stationen und dem ermittelten Blitzort sowie der ermittelten Blitzzeit wird dabei für jede Station die Differenz zwischen der theoretischen Laufzeit zwischen Blitz- und Stationsort und der Differenzzeit zwischen errechneter Blitzzeit t_{BL} und der tatsächlich gemessenen Stationszeit t_{mess} angegeben.

$$dt = s_{BL\ Station} / v - (t_{mess} - t_{BL}) \quad (5.1)$$

Zum Vergleich wurden dieselben Ausgangsdaten zuerst nur mit dem 2D-Algorithmus ohne Höhenparameter und anschließend mit dem in Kapitel 4.3.1 beschriebenen 3D-

Verfahren ausgewertet. In der Tabelle 5.6 sind jeweils die Mittelwerte und Standardabweichungen der Laufzeitdifferenzen für sieben Stationen des Messnetzes zusammengestellt.

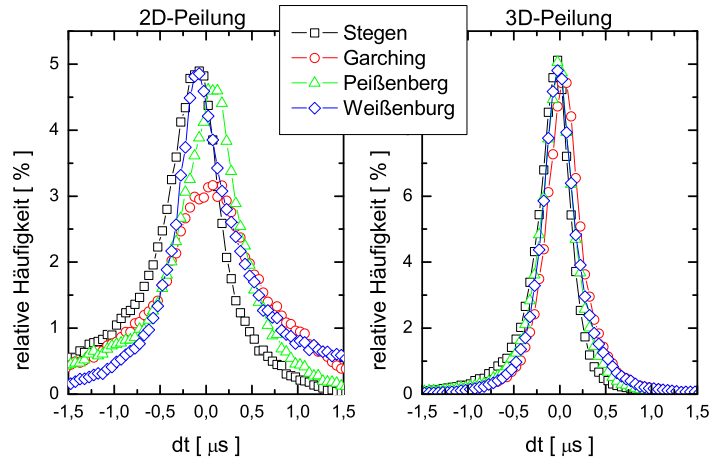


Abbildung 5.4: Verteilung der Differenzzeiten bei 2D- und 3D-Peilung
Tabelle 5.6: Differenzzeiten bei der 2D- bzw. der 3D-Peilung

Station	2D-Peilung			3D-Peilung		
	\overline{dt} [μs]	σ [μs]	Anzahl	\overline{dt} [μs]	σ [μs]	Anzahl
Garching	-0,081	0,950	86.329	0,030	0,358	112.943
Ravensburg	0,409	0,659	59.135	0,004	0,367	70.441
Stegen	-0,391	0,754	91.427	-0,111	0,359	118.343
Peißenberg	-0,214	0,838	80.038	-0,058	0,358	101.215
Weißenburg	0,160	0,770	95.091	0,013	0,349	109.184
Lichtenau	-0,322	0,731	100.736	-0,101	0,352	127.266
Regensburg	0,110	0,955	87.314	0,035	0,374	97.464

In der Abbildung 5.4 sind die Verteilungen für vier der benutzten Stationen grafisch aufgetragen. Bei der 2D-Peilung weist die unterschiedliche Ausprägung der Glockenkurven bei den verschiedenen Stationen und die Verschiebungen der Maxima um bis zu $4 \mu\text{s}$ auf inkonsistente Peilerggebnisse hin. Im Gegensatz dazu besitzen die Grafen bei der 3D-Rechnung scharfe Maxima ohne signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Stationen.

Aus der Tabelle 5.6 kann abgelesen werden, dass die Restlaufzeiten bei der 2D-Methode fast drei Mal so hoch sind wie bei der 3D-Variante. Da zu schlechte Resultate bei der Rechnung verworfen werden, ist es nicht verwunderlich, dass der 3D-Algorithmus insgesamt auch mehr Ereignisse erzeugt. Die kleineren Differenzzeiten in der 3D-Rechnung weisen auf kleinere Fehler bei der Ortsbestimmung hin. Insgesamt wurde in 60 % der 3D-Fälle eine Blitzhöhe ermittelt und diese somit als IC eingestuft. Die restlichen 40 % werden definitionsgemäß von beiden Rechenalgorithmen gleich behandelt. Der Mittelwert aus den Standardabweichungen der 3D-Peilung aller Stationen aus Tabelle 5.6 beträgt $0,36 \mu\text{s}$. Bei der in Abbildung 5.4 gezeigten Symmetrie ergibt sich so ein mittlerer Laufzeitfehler von $\pm 0,18 \mu\text{s}$.

5.2.2 Fitsumme

Für die Bestimmung des Peilortes greift man auf ein mathematisches Standardverfahren der Ausgleichsrechnung zurück, das als die Methode der kleinsten Quadrate bekannt ist. Innerhalb eines Iterationsprozesses wird dafür das in Kapitel 4.1.2 vorgestellte χ^2 minimiert. Aus Laufzeitgründen bricht man jedoch in der Praxis die Berechnung ab, wenn ein ausreichendes Konvergenzkriterium erreicht ist. Trotzdem stellt das χ^2 , welches sich aus dem Endergebnis in einem überbestimmten System ergibt, ein Gütemaß dar, das Aussagen über die Qualität der Messdaten zulässt.

Da bei der Ermittlung des χ^2 -Wertes nach Gleichung 4.3 die Zeitfehler der Einzelstationen zunächst unbekannt sind, ist die Aufstellung einer Fitsumme f_s nach Gleichung 5.2 sinnvoll, bei der diese Zeitfehler nicht berücksichtigt werden.

$$f_s = \chi^2 * \sigma_t^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \left(dt_{i, i+1} - \frac{1}{v_w} (s_{i, BL} - s_{i+1, BL}) \right)^2 \quad (5.2)$$

In der Abbildung 5.5 sind alle Fitsummen aus der 2D- und 3D-Peilung vom 29. Juli 2005 aus dem ausgewählten Gebiet statistisch zusammengetragen. Da definitionsgemäß die χ^2 -Kurve ihr statistisches Maximum bei eins hat, kann man auf diese Weise für den quadratischen Zeitfehler σ_t^2 einen Wert von $0,03 \mu s^2$ ermitteln. Die Wurzel aus diesem Zahlenwert ergibt den schon im vorangegangenen Kapitel ermittelten Zeitfehler von $0,18 \mu s$. Wie in der Abbildung 5.5 zu sehen ist, kommen kleine Fitsummen viel häufiger bei der 3D-Peilung vor als bei der 2D-Peilung, was auf einen kleineren Restzeitfehler der 3D-Rechnung schließen lässt.

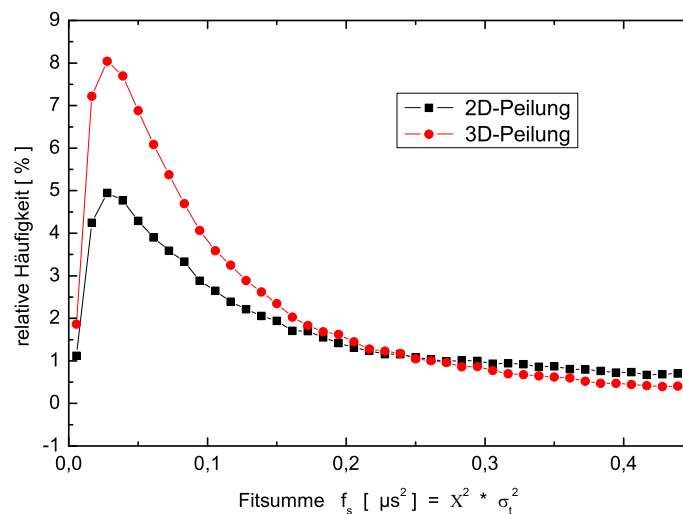


Abbildung 5.5: Vergleich der Fitsummen bei der 2D- und 3D-Peilung

5.2.3 Amplitudenverteilung

Durch die Analyse der Amplitudenverteilungen kann man ebenfalls auf die Qualität des Messnetzes schließen. Über den Vergleich mit anderen Blitzortungssystemen (vgl. Kapitel 6.2) ist es möglich, Aussagen über die Ortungseffizienz des Netzwerkes zu erhalten. Dabei geht man davon aus, dass sich die Blitzstromstärke direkt auf die Amplitude des erzeugten, elektromagnetischen Impulses auswirkt und dieser während seiner Ausbreitung entfernungsabhängig gedämpft wird (vgl. Kapitel 2.2).

Die beschränkenden Faktoren für die Ortung schwacher Blitze sind demnach die Abstände zwischen den Stationen und die Sensitivität der Einzelsensoren. In der Messsaison 2005 wurden im Raum München mehrere Stationen mit geringen Abständen (kleiner als 30 km) aufgestellt, um die messtechnische Grenze zu überwinden und möglichst die natürliche Verteilung der Blitzamplituden zu ermitteln.

In Abbildung 5.6 sind die Verteilungen vom 29. Juli 2005 aufgetragen, die sich auf das in der Abbildung 5.3 gezeigte Gebiet beschränken. Dabei wurde nach der ermittelten Blitzart in CG und IC getrennt und die jeweilige Polarität der Ereignisse berücksichtigt.

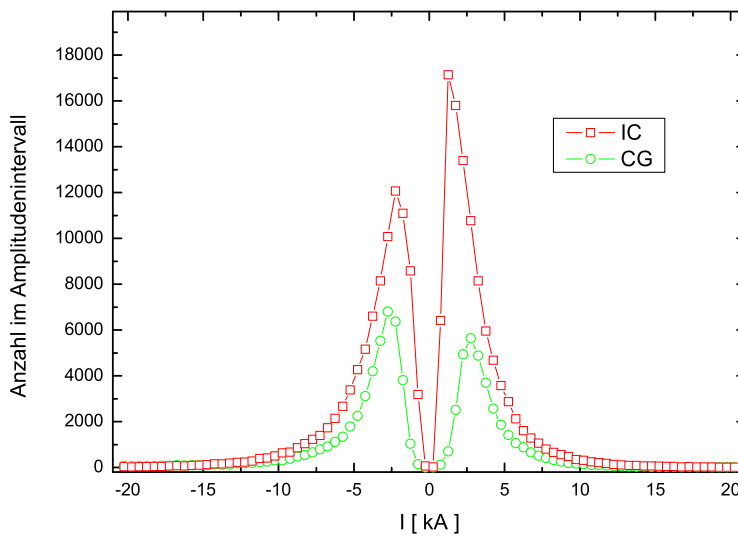


Abbildung 5.6: Verteilung der Amplitudenwerte bei CGs und ICs am 29. Juli 2005

Bei positiven wie auch bei negativen CGs liegen die meisten Blitze im Intervall von 2,5 bis 3,0 kA. Dabei scheinen die messtechnischen Faktoren keine einschränkende Rolle mehr zu spielen, da sich die Maxima der IC-Verteilungen bei noch kleineren Amplituden befinden. Die meisten negativen ICs wurden demnach im Intervall von 2,0 bis 2,5 kA registriert. Positive ICs waren nicht nur die am häufigsten vertretene Gruppe, sondern auch diejenige, die im Intervall von 1,0 bis 1,5 kA das Maximum bei den kleinsten Amplituden besitzt.

Diese Verteilung scheint aber durch messtechnische Parameter beschränkt zu sein, da der Abfall zum nächstkleineren Intervall sehr stark ist.

Die Ladungsverteilungen in der Gewitterwolke, die für die entsprechenden Blitzarten notwendig sind, zeigt schematisch die Abbildung 5.7. Die Polarität von CGs wird dabei, wie in Kapitel 1.1.3 beschrieben, durch die Ladung in der Wolke bestimmt. Diese Festlegung bedingt auch die Polaritätsbestimmung für ICs. Da das negative Ladungszentrum meist viel stärker ausgeprägt ist als das untere, positive Ladungsgebiet, lässt sich nachvollziehen, dass negative CGs und positive ICs häufiger auftreten als ihre jeweiligen Partner.

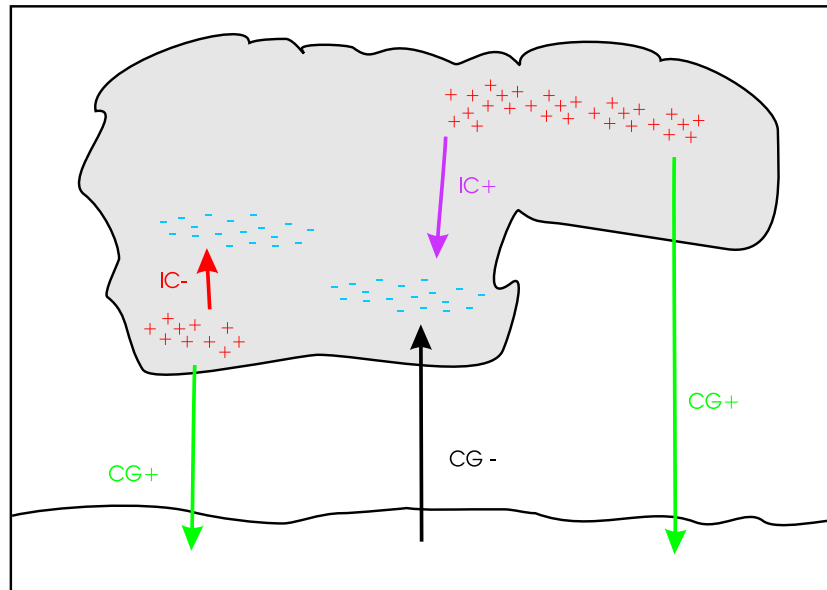


Abbildung 5.7: Anordnung der Ladungszentren bei der Entladung von CGs und ICs mit unterschiedlicher Polarität

Amplitudenverteilungen, vergleichbar mit den in der Abbildung 5.6 zusammengestellten Messergebnissen, sind bei anderen Blitzmesssystemen selten zu finden. Eine Ausnahme bildet die Untersuchung von Orville und Huffines [2001], die das Verhältnis von positiven zu negativen CGs im amerikanischen Blitzmesssystem NLDN ermitteln. Von 1995 bis 1998 beträgt der Anteil der positiven CGs ca. 8 %. Allerdings muss beachtet werden, dass dabei der durchschnittliche Blitzstromwert bei ca. 20 kA liegt. Ob die natürlichen Blitzamplituden derart ortsabhängig sind oder das NLDN umso viel uneffektiver arbeitet, kann aber nur durch direkte Vergleiche ermittelt werden.

Das Verhältnis von positiven zu negativen ICs wird von Smith u. a. [2002] anhand der in Kapitel 1.3.5 vorgestellten NBE-Typen bestimmt. Positive ICs sind dort etwa drei Mal so häufig vertreten wie negative. Dies ist gut vergleichbar mit den in der Abbildung 5.6 gezeigten Ergebnissen, wo die positiven ICs ebenfalls überwiegen.

5.2.4 Höhenprofil

Statistische Verteilungen der ermittelten Blitzhöhen können ebenfalls herangezogen werden, um die Ergebnisse der 3D-Berechnung zu prüfen. Da sich die Ladungszentren in den Wolken befinden, sind auch Emissionshöhen zu erwarten, die mit beobachteten Wolkenhöhen, beispielsweise aus Radarmessungen, übereinstimmen. Ein oberes Limit der Wolken ist durch die Tropopause gegeben, die sich in den mittleren Breiten in einer Höhe von 10 bis 12 km befindet.

In der Abbildung 5.8 ist die Verteilung der Blitzhöhen aller gepeilten ICs aus der 3D-Rechnung aufgetragen. Der Mittelwert liegt bei 9,7 km; es kommen kaum Höhen unter 5 km oder über 15 km vor. Diese Werte sind in guter Übereinstimmung mit Wolkenhöhen bei Gewittern in Südbayern, wie sie beispielsweise von Höller u. a. [2000] beschrieben werden.

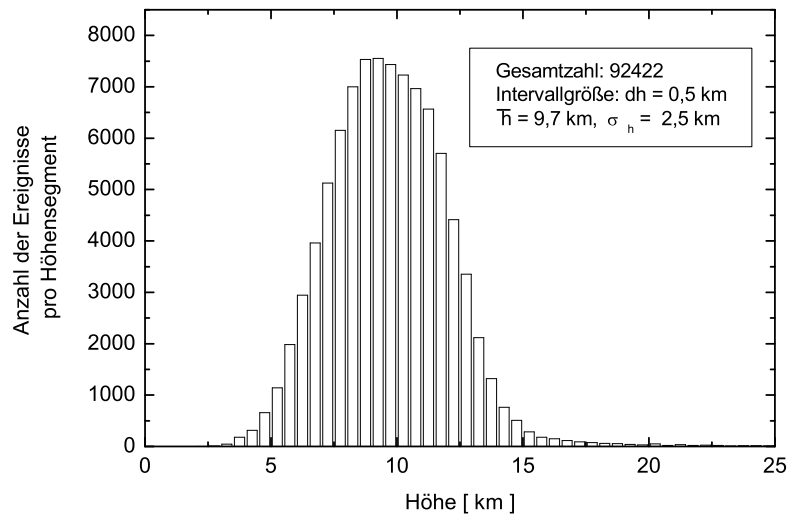


Abbildung 5.8: Verteilung der Blitzhöhen im ausgewählten Gebiet am 29. Juli 2005

Eine mit Abbildung 5.8 vergleichbare Studie wurde von Jacobson und Heavner [2005] ebenfalls mit einem VLF-Messsystem durchgeführt. Die Blitzhöhen ermittelte man über Vermessungen der Reflexionsimpulse an Erde und Ionosphäre, wie sie in Kapitel 2.2.1 beschrieben sind. Es gilt zu beachten, dass diese Untersuchungsmethode nicht bei allen ICs angewendet werden kann, sondern nur ein bestimmter Typ von Blitzentladungen erfasst wird. Aufgrund ihrer kurzen Pulslänge können nur die Emissionshöhen von strahlungsintensiven *Narrow Bipolar Events* (NBEs) auf diese Art bestimmt werden. Trotz dieser Einschränkungen sind die Ergebnisse ähnlich: 80 % der Blitze liegen unter 15 km, wobei die meisten Höhen zwischen 13 und 14 km registriert wurden.

5.2.5 Radardaten von Gewitterzellen

Für die Analyse von Gewitterzellen, insbesondere bei Unwettersituationen, werden in der Praxis häufig Radar- und Blitzdaten kombiniert. Anhand aufwendiger Untersuchungen verschiedener Einzelbeispiele stellte man zeitliche und örtliche Zusammenhänge zwischen hoher Radarreflektivität, starkem Niederschlag und erhöhter Blitzaktivität fest ([Wang und Liao, 2006], [Dotzek u. a., 2005]). Überlagerungen von Radarbildern mit Blitzereignissen zur visuellen Veranschaulichung sind in diesen Fällen aber nur als Horizontalschnitte ohne Höheninformation verfügbar.

Zur direkten Validierung der ermittelten Blitzhöhen konnten Radaraufnahmen des „Poldirads“, des polarimetrischen Radars der DLR, genutzt werden. Im Gegensatz zu den sonst üblichen Horizontalschnitten zeigen Vertikalschnitte höhenabhängige Zellstrukturen der beobachteten Gewitterwolke. In den Abbildungen 5.9 und 5.10 sind zwei zeitlich und örtlich getrennte Wolkenformationen vom 29. Juni 2006 zu sehen, wobei die Radar-Vertikalschnitten mit zeitgleichen Blitzdaten überlagert wurden. In diesen Bildern sind die Wolkenblitze in der entsprechenden Höhe rot eingezeichnet, zusätzlich ist jeweils die ermittelte Blitzstromstärke angegeben. Alle grün markierten Bodenblitze befinden sich am unteren Bildrand.

Man erkennt, dass sich die Entladungspunkte der ICs – bis auf ein paar Ausreißer – in Gebieten mit starker Reflexivität befinden. Dies ist ein weiterer Hinweis dafür, dass die ermittelte Blitzhöhe eine sinnvolle physikalische Größe ist. In den weiteren Kapiteln wird die Qualität der Ortungsgenauigkeit auch im Hinblick auf die Blitzhöhe näher untersucht.

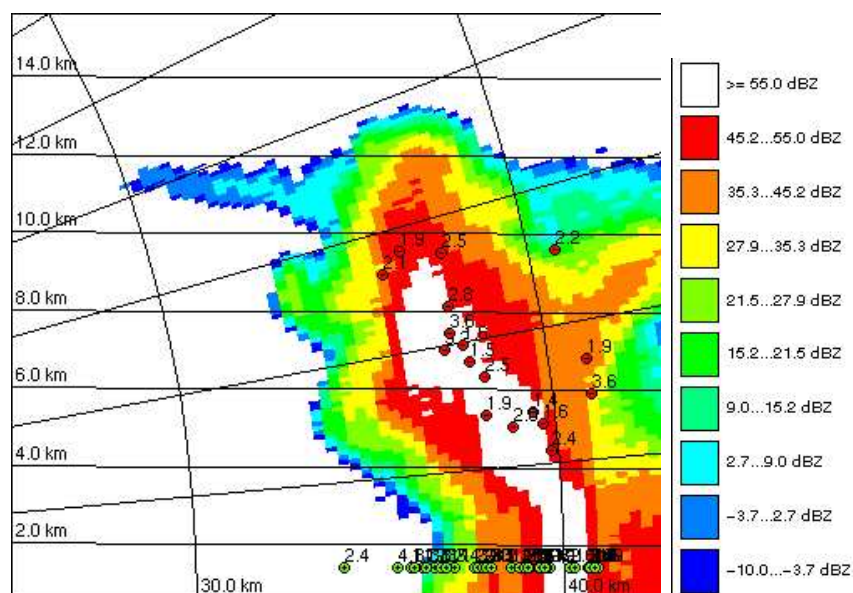


Abbildung 5.9: Radarbild mit überlagerten Blitzereignissen vom 29.06.2005, 13:57 UTC, Richtung: 289°

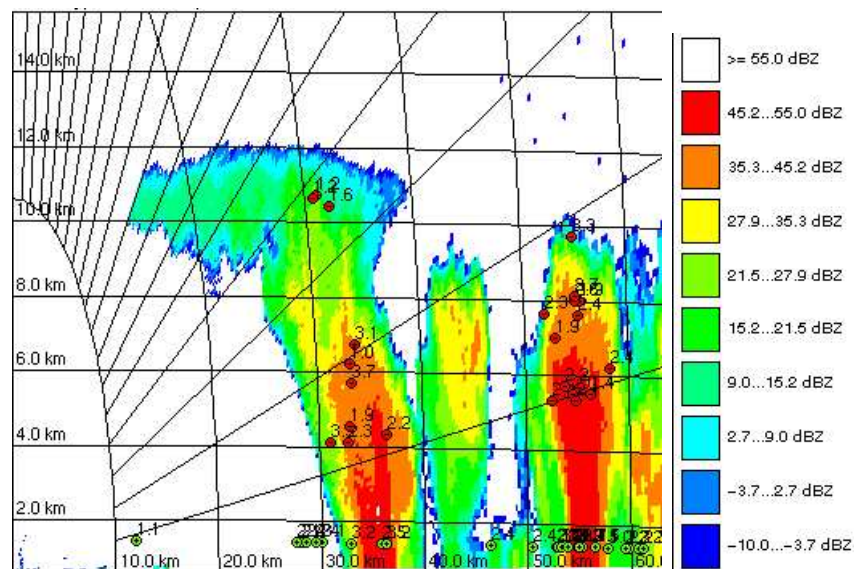


Abbildung 5.10: Radarbild mit überlagerten Blitzereignissen vom 29.06.2005, 13:36 UTC, Richtung: 120°

Kapitel 6

Vergleiche mit anderen Blitzerfassungssystemen

Um die Qualität der gewonnenen Daten richtig einschätzen und interpretieren zu können, wurden diese mit einer Reihe von anderen Blitzerfassungssystemen verglichen. Dabei ging es im Wesentlichen um die Ortungsgenauigkeit der ermittelten Blitzereignisse, aber auch um Vergleiche von Blitzstärken, Polarität und Blitztyp.

Im Kapitel 6.1 werden die Peilorte und Amplituden mit einer Reihe von registrierten Turmeinschlägen verglichen. Am aussagekräftigsten sind jedoch Gegenüberstellungen mit ähnlich arbeitenden VLF-Blitzortungssystemen. Das Kapitel 6.2 zeigt Auswertungen von insgesamt vier regional oder auch weltweit agierenden VLF-Messnetzen, die mit Messdaten aus Deutschland und Brasilien verglichen wurden. Sogar mit den vom Satelliten aus aufgenommenen Blitzdaten des LIS-Systems konnten interessante Gemeinsamkeiten festgestellt werden, die das Kapitel 6.3 präsentiert.

6.1 Turmeinschläge am Gaisberg

In der Regel ist es schwierig, präzise Zeitangaben und die genauen Ortskoordinaten eines gesicherten Blitzschlages zu erhalten. Dies ist in der Praxis nur möglich, wenn, wie in Kapitel 1.3.1 beschrieben, Raketenexperimente durchgeführt werden oder Blitzmesseinrichtungen an Türmen installiert wurden.

Solch eine Messeinrichtung wurde während der Messkampagne 2003 im Rahmen eines Forschungsprojekts von der TU-Wien am Gaisbergturm in der Nähe von Salzburg betrieben. Leider liegt dieser Punkt außerhalb des Stationsnetzes und weiter als 100 km von der blitznächsten Station entfernt, so dass nur sinnvolle Vergleiche mit gepeilten Ereignissen aus der 2D-Methode angestellt werden konnten. Trotzdem kann damit auf die Ortsgenauigkeit der Peilergebnisse und die Zuverlässigkeit der ermittelten Blitzströme geschlossen werden. Über Blitzeinschläge am Gaisbergturm gibt es eine Vielzahl von Publikationen, in denen meist über die Qualität der regionalen Blitzortungssysteme berichtet wird ([Diendorfer u. a., 2003], [Pichler u. a., 2004], [Schulz und Diendorfer, 2004]).

Von den 40 Stromimpulsen, die am 15.12.2003 innerhalb von fünf Minuten am Gaisbergturm registriert wurden, konnten 22 von mehr als vier Blitzmessstationen aufgezeichnet werden (vgl. Tabelle 6.1). Das hängt mit der eingestellten Empfindlichkeitsschwelle zusammen, da diese Ereignisse, bis auf Nummer 10, mindestens Peakstromstärke von 7 kA aufwiesen. Die Ortungsgenauigkeit liegt im Mittel bei 580 m und wenn lediglich Ereignisse mit mehr als vier Stationen betrachtet werden, sogar bei nur 400 m.

Die Stromstärke des gepeilten Blitzes wird aus der Mittelung der Feldstärken an den beteiligten Einzelstationen berechnet. Dabei wird auf den in Kapitel 2.1.2 beschriebenen linearen Zusammenhang zwischen magnetischer Feldstärke und Spitzenstromstärke zurückgegriffen.

Da die magnetische Feldstärke an den Sensoren nicht explizit, sondern dimensionslos als digitaler Messwert ermittelt wird, lässt sich ein Faktor f_{Strom} bestimmen, mit dessen Hilfe man die Blitzstromstärke errechnet.

$$I[kA] = f_{Strom} * \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i R_i) \quad (6.1)$$

Summiert wird dabei über alle Stationen das Produkt des dimensionslosen Amplitudenwertes A und der Abstand der Station zum Blitz R in km. Der Faktor f_{Strom} kann statistisch aus einem Vergleich mit Blitzstromstärken aus dem österreichischen Blitznetz ALDIS ermittelt werden.

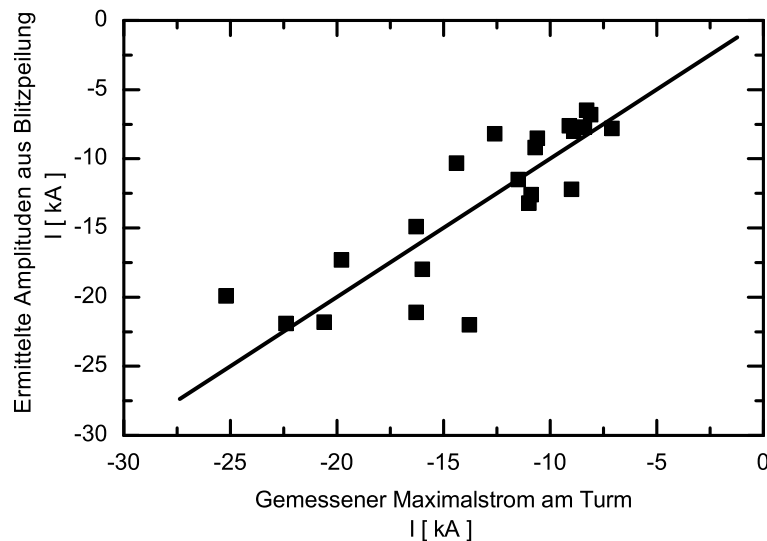


Abbildung 6.1: Amplitudenvergleich der Stromstärken der gemessenen Blitzströme am Gaisberg mit den ermittelten Amplituden aus der Blitzpeilung vom 15.12.2003

Tabelle 6.1: Registrierte Turmeinschläge am Gaisberg im Vergleich zu orts- und zeitgleichen Sensormeldungen des Südbayernnetzes am 15.12.2003 (siehe auch Tabelle 5.1)

Nr.	Zeitpunkt des Einschlags am Turm	I [kA] gemessen am Turm	Anzahl meldender Stationen	Abweichung des ge- peilten Ereignisses vom Turm [km]	I [kA] ermittelt aus Peilung
1	06:29:01.8221	-8,1	4	0,87	-6,8
2	06:29:01.8395	-3,4	2		
3	06:29:01.8777	-8,4	4	0,77	-7,7
4	06:29:01.9250	-4,2	3		
5	06:29:01.9591	-3,5	2		
6	06:29:39.6145	-8,3	4	1,03	-6,5
7	06:29:39.6443	-4,2	1		
8	06:29:39.7229	-10,7	5	0,62	-9,2
9	06:29:39.9428	-25,2	5	0,80	-19,9
10	06:29:39.9683	-8,3	3		
11	06:30:03.5243	-9,1	4	1,77	-7,6
12	06:30:03.5490	-6,7	1		
13	06:30:03.5789	-4,4	1		
14	06:30:31.5475	-16,0	5	0,57	-18,0
15	06:30:31.5803	-16,3	5	0,48	-14,9
16	06:31:09.8318	-4,7	1		
17	06:31:09.8554	-8,9	4	1,43	-8,0
18	06:31:09.8674	-3,7	1		
19	06:31:51.9555	-5,1	3		
20	06:31:51.9704	-13,8	5	0,29	-22,0
21	06:31:52.0047	-11,0	5	0,41	-13,2
22	06:31:52.0235	-4,6	3		
23	06:31:52.0362	-4,6	3		
24	06:31:52.0770	-19,8	5	0,30	-17,3
25	06:31:52.1046	-10,6	5	0,34	-8,5
26	06:31:52.1163	-7,1	5	0,35	-7,8
27	06:32:22.4898	-9,0	5	0,36	-12,2
28	06:32:22.5240	-10,9	5	0,32	-12,6
29	06:32:22.5982	-22,4	5	0,30	-21,9
30	06:32:22.6177	-5,2	2		
31	06:32:22.6411	-11,5	5	0,35	-11,5
32	06:32:22.6522	-6,1	3		
33	06:32:22.6683	-14,4	5	0,36	-10,3
34	06:32:22.6818	-12,6	5	0,33	-8,2
35	06:32:22.7225	-20,6	5	0,30	-21,8
36	06:33:19.2822	-16,3	5	0,33	-21,1
37	06:33:49.2643	-5,0	3		
38	06:34:31.2234	-4,2	0		
39	06:34:31.2704	-5,3	3		
40	06:34:31.3258	-4,8	2		

In der Abbildung 6.1 zeigt der Vergleich mit den gemessenen Maximalstromwerten am Gaisbergturm, dass mit diesem Faktor im Durchschnitt die ermittelten Stromwerte nachvollzogen werden können. Die starke Streuung ist wohl darauf zurückzuführen, dass beim Blitzortungssystem nur ein relativ schmaler Frequenzbereich zur Messung herangezogen wird. Im Gegensatz dazu kann man bei der Stromwertaufnahme am Gaisbergturm auch stationäre Ströme messen. Der hier ermittelte Stromfaktor wurde bei allen Auswertungen in dieser Arbeit verwendet.

6.2 Blitzortungssysteme im VLF-Bereich

Der derzeit weltweit bekannteste Hersteller und Betreiber von Blitzortungssystemen im VLF-Bereich ist die Firma Vaisala Inc. in Helsinki, Finnland; die ihren Sitz ursprünglich in Tucson, Arizona hatte. Von ihr wird unter anderem das amerikanische Blitzmessnetz NLDN betreut. Blitzortungssysteme mit Sensoren und Auswertungssoftware von Vaisala betreibt man in vielen Teilen der Erde, beispielsweise in Südamerika, Europa und Australien. Vaisala Inc. übernahm diesen Geschäftsbereich von der *Global Atmospheric*-Gruppe, die wiederum ein Zusammenschluss von verschiedenen Blitzortungssystemen in den USA war, namentlich *GeoMet Data Services* (GDS), *Lightning Location and Protection* (LLP) und *Atmospheric Research Systems* (ARS) ([Cummins u. a., 1998], [Wacker und Orville, 1999]). So kommt es, dass Blitzortungssysteme der Firma Vaisala z.T. noch aus verschiedenen Blitzsensortypen bestehen.

In Europa haben sich verschiedene Betreiber von Vaisala-Systemen zu einem Verbund zusammengeschlossen, der *European Cooperation for Lightning Detection*, kurz Euclid genannt (<http://www.euclid.org>). Euclid verfügt insgesamt über 75 Sensoren, die über 13 Länder verteilt sind und sich aus 5 verschiedenen Sensortypen zusammensetzen (vgl. Abbildung 6.2). Einzelne Betreiber sind beispielsweise der *Blitz Informationsdienst von Siemens* (BLIDS), der Sensoren in Deutschland und der Schweiz unterhält, oder das in Österreich agierende *Austrian Lightning Detection and Information System*, kurz ALDIS. Im Kapitel 6.2.1 werden Vergleiche von BLIDS mit dem in dieser Arbeit vorgestellten LINET-Messnetz präsentiert. Kapitel 6.2.2 zeigt im Anschluss Vergleiche aus der LINET-Brasilienmission mit dem ebenfalls aus Vaisala-Sensoren bestehenden brasilianischen Messnetz RINDAT.

Außer den Blitzmesssystemen von Vaisala gibt es auch eine Reihe anderer, unabhängiger VLF-Netze. Erwähnenswert sind an dieser Stelle das Blitzortungssystem des Britischen Wetterdienstes, das weltweit operierende *WorldWide Lightning Location Network* (WWLLN) und das in Europa betriebene ZEUS-System. Das Netz des britischen *Met Office* umfasst europaweit sieben Stationen; zwei befinden sich in Großbritannien selbst, die anderen in Island, Finnland, Deutschland, Gibraltar und auf Zypern (<http://www.metoffice.gov.uk>). In der von Lee [1986a] beschriebenen Methode werden die Sferics-Impulse an den Stationen in einem engen Band um 10 kHz aufgezeichnet, die gemessenen Impulsformen an eine Zentrale gesandt und dort der jeweilige Zeitversatz zwischen

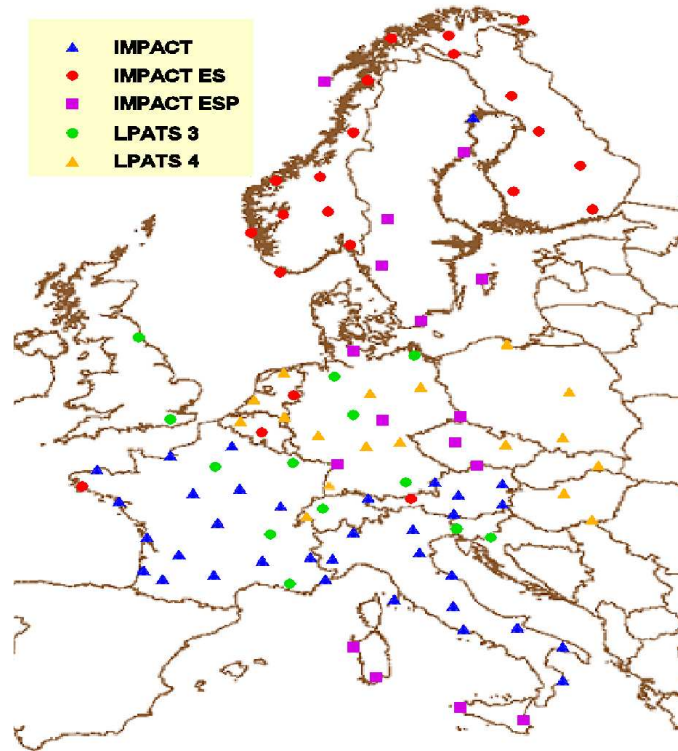


Abbildung 6.2: Sensorstandorte von Euclid-Betreibern, Quelle: <http://www.euclid.org>

den Impulsen durch Kreuzkorrelation ermittelt. Zur Blitzlokalisierung wird das in Kapitel 4.1.2 beschriebene ATD-Verfahren angewendet.

Die Schwierigkeiten bei der Betreibung von Systemen mit Stationsabständen im Bereich von tausend Kilometern betreffen primär die Ausbreitung bzw. die Ermittlung des zurückgelegten Weges und der tatsächlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit. Wie in Kapitel 2.2 dargelegt, müssen dabei sowohl Bodenwellen als auch Reflexionen an der Ionosphäre berücksichtigt werden. Somit spielen Distanz zwischen Blitz und Sensor, Reflexionswinkel, Reflexivität und Tag-Nacht-Unterschiede eine erhebliche Rolle.

6.2.1 BLIDS in Süddeutschland

Die Ergebnisse der Süddeutschlandkampagnen konnten mit Daten des Peilsystems von BLIDS verglichen werden. Dieses Messnetz ist seit 1992 in Betrieb und umfasst in Deutschland insgesamt 14 Sensoren, von denen vier IMPACT- und die restlichen zehn LPATS-Sensoren [Schulz und Diendorfer, 2004] sind. LPATS-Sensoren erfassen grundsätzlich nur die Ankunftszeit eines Signals, IMPACT-Sensoren messen dagegen Einfallswinkel und Ankunftszeit der einlaufenden Welle [Loboda und Thern, 2004]. Genaue Auswertungen und Vergleiche von BLIDS mit anderen Blitzortungssystemen gibt es relativ wenige. Gewöhnlich wird bei Angaben über die Qualität der Ortungsgenauigkeit und -effizienz nur auf

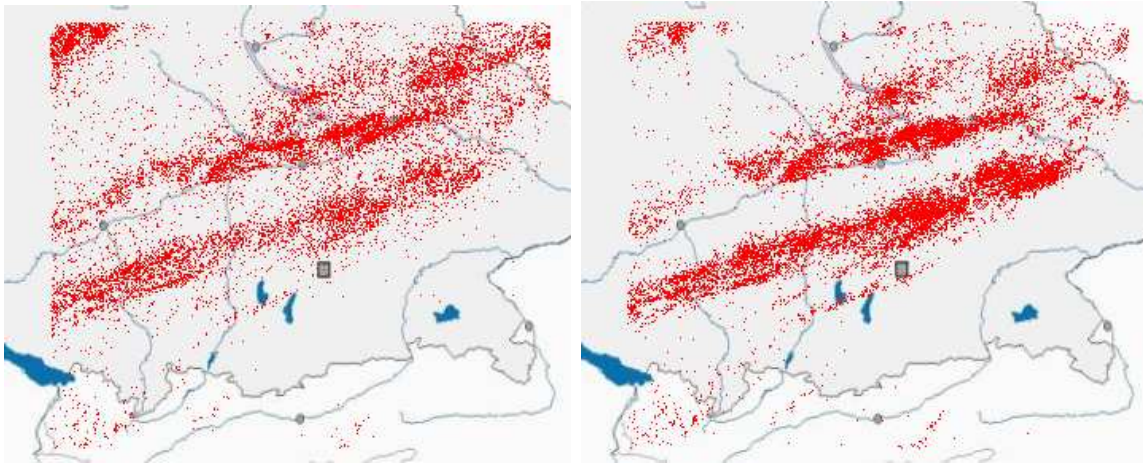


Abbildung 6.3: Blitzkarten vom 7. August 2004 mit Daten von BLIDS (links) und LINET (rechts)

Ergebnisse des amerikanischen NLDN-Systems verwiesen, die ausführlich von Idone u. a. [1998a], Idone u. a. [1998b] und Cummins u. a. [1998] beschrieben werden. Die Qualität eines Messnetzes wird aber nicht nur durch die Eigenschaften der Einzelsensoren bestimmt, sondern auch durch Anordnung und Abstände der Stationsorte, weshalb die Ergebnisse des amerikanischen Netzes nicht voll übernommen werden können.

Der Vergleich mit den in dieser Arbeit gesammelten LINET-Daten wurde für einzelne, ausgesuchte Tage durchgeführt. In der Abbildung 6.3 sind stellvertretend die Blitzereignisse im südbayerischen Raum vom 7. August 2004 dargestellt. Das linke Bild zeigt ca. 14.000 Ereignisse, die von BLIDS registriert wurden; die rechte Karte enthält etwa 17.800 LINET-Blitze im selben Beobachtungsgebiet. Die Zellen im rechten Bild wirken kompakter, und es gibt weniger Streupunkte. Dadurch treten die zwei parallelen Hauptzugbahnen der Gewittertätigkeit klarer hervor. Für die in diesem Kapitel durchgeführten statistischen Vergleiche wurden alle passenden Ereignisse unabhängig vom ermittelten Blitztyp herangezogen. Eine Auswertung gleicher und unterschiedlicher Typeinstufungen zwischen zeitgleichen BLIDS- und LINET-Ereignissen befindet sich in Kapitel 7.1.

Für eine Prüfung der Ortsgenauigkeit wurde jedem BLIDS-Datensatz ein möglichst passender LINET-Satz in einem Zeitintervall von 1 ms und einem Umkreis von 30 km zugeordnet. Die Analyse ergab ca. 7.400 korrespondierende Fälle, die im Folgenden als zeitgleich bezeichnet werden. Gab es zu einem Ereignis von BLIDS mehrere zeitgleiche LINET-Blitze, wurde derjenige mit der am geringsten abweichenden Amplitude ausgewählt.

Die Verteilung der zeitgleichen Ereignisse bis zu Abständen von 5 km ist in der Abbildung 6.4 dargestellt. Die am häufigsten auftretenden Abstandsintervalle liegen im Bereich von 500 bis 700 m. Es gibt aber auch relativ viele Fälle mit größeren Abständen, Cummins u. a. [1998] berichten zum Vergleich von einer mittleren Ortsabweichung von 500 m bei NLDN.

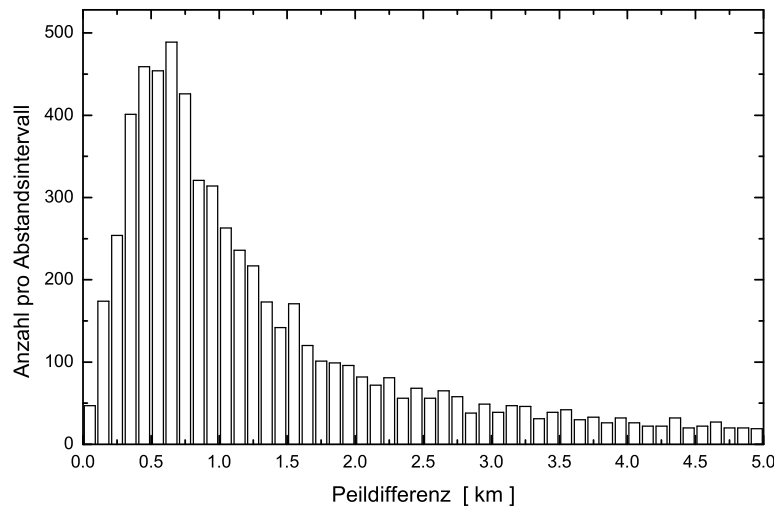


Abbildung 6.4: Peildifferenzen zwischen zeitgleichen Ereignissen von BLIDS und LINET

Des Weiteren wurden die Amplituden der übereinstimmenden Ereignisse miteinander verglichen. In der Abbildung 6.5 sind diese Fälle aufgetragen und die Referenzlinie

$$I_{LINET} / I_{BLIDS} = 1 \quad (6.2)$$

ingezeichnet. Innerhalb des Intervalls von

$$0,5 \leq | I_{LINET} / I_{BLIDS} | \leq 2,0 \quad (6.3)$$

liegen ca. 95 % der zeitgleichen Blitze. Bei etwa einem Viertel der zeitgleichen Ereignisse sind die Vorzeichen der Amplitude der LINET-, anders als bei den korrespondierenden BLIDS-Daten, genau umgekehrt. Dies ist möglicherweise auf die unterschiedliche Ermittlung der Amplitude an der Einzelstation zurückzuführen. Im LINET-System wird die Amplitude aus dem größten Peak ermittelt. Bei bipolaren Peaks kann dies zu einer unklaren Situation führen, die das in Kapitel 4.3.1 vorgestellte Fitprogramm zur Zeit durch eine Mehrheitsentscheidung löst.

Eine genauere Statistik für dieses Intervall ist in der Abbildung 6.6 dargestellt. Bis auf eine geringe Schwankungsbreite sind die ermittelten Absolutwerte der Amplituden mit denen des BLIDS-Ortungssystems identisch. Dieses Ergebnis steht in guter Übereinstimmung zu den in Kapitel 6.1 ermittelten Blitzstromstärken der Turmeinschläge.

In der Abbildung 6.7 sind die Amplitudenverteilungen der beiden Systeme zusammengefasst. Beide Verteilungen haben das Maximum bei fast gleichen Stromstärken: LINET im Intervall von 4,5 bis 5,0 kA, BLIDS im Intervall von 5,0 bis 5,5 kA. Für den gesamten Amplitudenbereich ergibt sich ein fast konstantes Verhältnis der Ereigniszahlen von ca. 60 %. Im Vergleich berichten Cummins u. a. [1998] von einer Nachweisempfindlichkeit bei

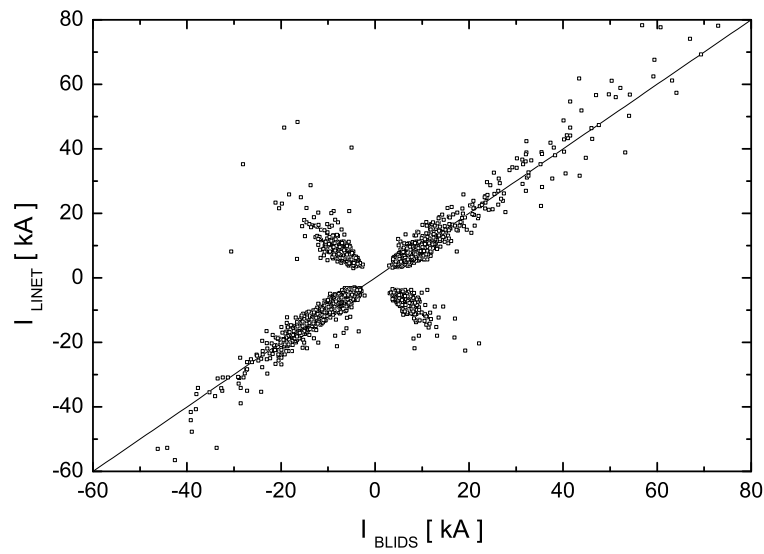


Abbildung 6.5: Amplitudenvergleich zeitgleicher Ereignisse von BLIDS und LINET

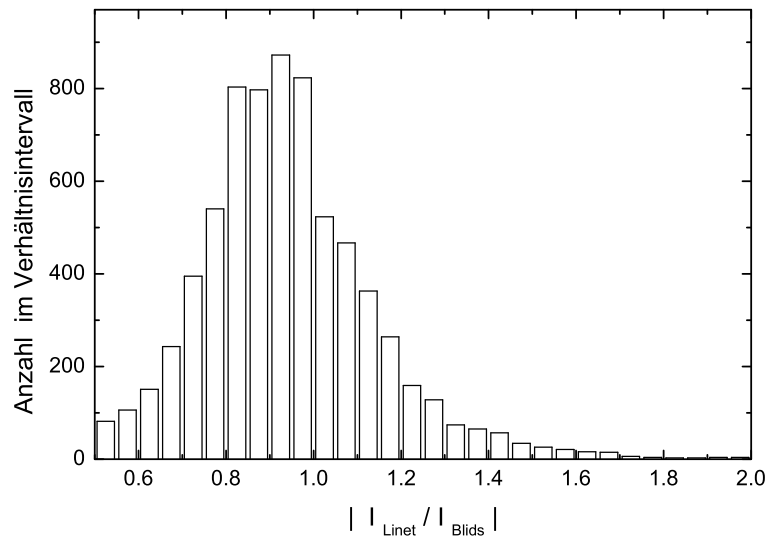


Abbildung 6.6: Verhältnis der Absolutamplituden der zeitgleichen Ereignissen von BLIDS und LINET

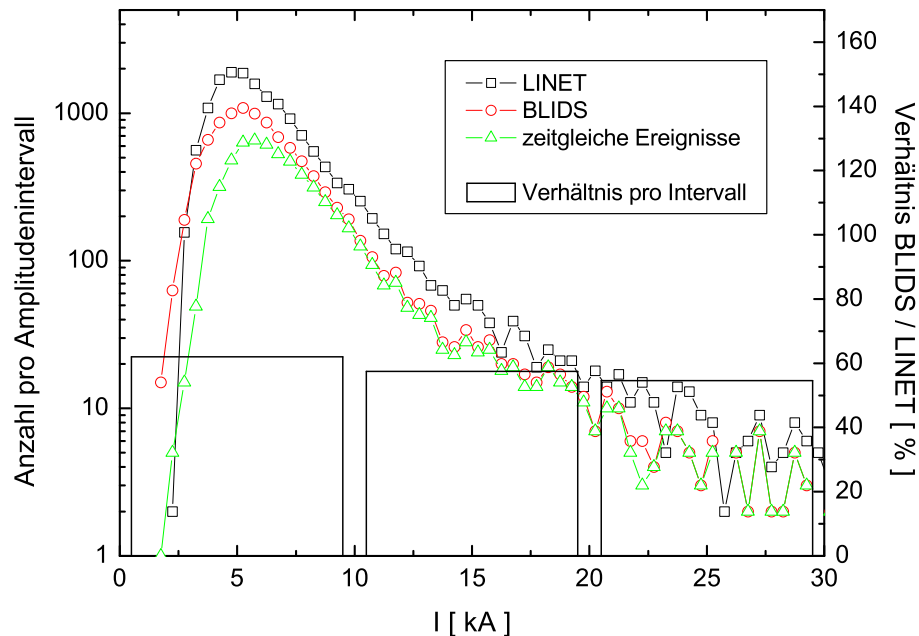


Abbildung 6.7: Verteilungen der Amplituden bei BLIDS und LINET

Vaisala-Sensoren, die ab einer Blitzamplitude von 5 kA allgemein zwischen 80 bis 90 % liegt.

Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, wurde das Messnetz in Süddeutschland im Jahr 2005 gegenüber 2004 erheblich verdichtet. Stellt man die Amplitudenverteilungen der Abbildung 6.7 aus dem Jahr 2004 den Ergebnissen der Abbildung 5.6 aus 2005 gegenüber, ist zu erkennen, dass die Ortungseffizienz bei Amplituden unter 5 kA deutlich verbessert wurde. Leider standen aber für das Jahr 2005 keine Daten von BLIDS mehr zur Verfügung, sodass weitere, direkte Vergleiche nicht vorgenommen werden konnten.

6.2.2 RINDAT in Brasilien

Zum Vergleich der Peilerggebnisse während der Brasilienkampagne 2005 konnten Blitzdaten des dortigen Messnetzes *Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas*, kurz RINDAT, herangezogen werden. Dieses System ist ebenfalls aus Komponenten der Firma Vaisala zusammengesetzt. Es besteht zur Zeit aus 24 Sensoren, von denen 8 vom Typ IMPACT und 16 aus der LPATS-Reihe stammen. Pinto Jr. u. a. [2006] zeigen aktuelle Karten mit den jeweiligen Stationsorten.

Im Gegensatz zum BLIDS-Netz gibt es von RINDAT eine Reihe von Publikationen mit Vergleichen mit anderen VLF-Netzen, beispielweise mit WWLLN, ZEUS und LINET ([Lay

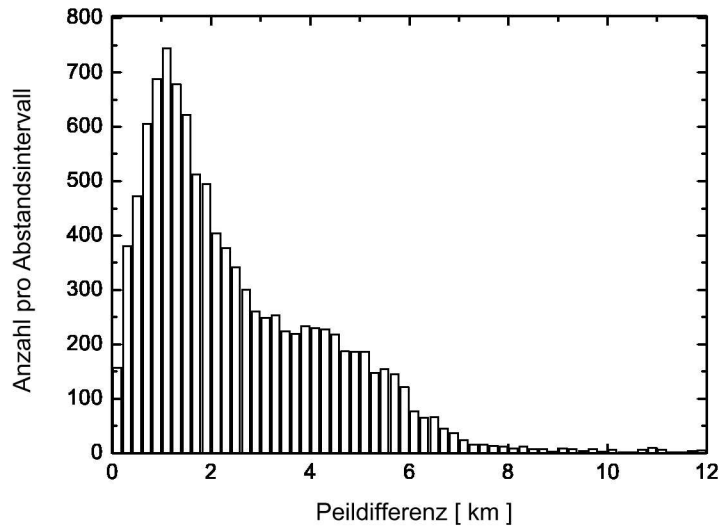


Abbildung 6.8: Peildifferenzen zeitgleicher Ereignisse von RINDAT und LINET

u. a., 2004], [Morales und Anagnostou, 2005], [da Silva Ferro u. a., 2005], [Schmidt u. a., 2005]), aber auch mit getriggerten Blitzen aus Raketenexperimenten [Pinto Jr. u. a., 2005] und Videoaufzeichnungen [Saba u. a., 2005].

Der nun folgende Vergleich zwischen RINDAT und LINET beschränkt sich auf das Gebiet von $20,5\text{--}23,0^\circ$ s.B. und $47,0\text{--}51,0^\circ$ w.L.. Innerhalb dieses Bereiches wurden am 4. Februar 2005 von LINET ca. 130.000 Blitzereignisse registriert, davon wurden etwa 51.000 eindeutig als IC und ungefähr 44.000 als CG identifiziert. Bei den restlichen Ereignissen war keine eindeutige Zuordnung möglich, da sich diese weiter als 100 km von der blitznächsten Station befanden.

Vom brasilianischen RINDAT-Netz wurde im selben Gebiet und Zeitraum nur ein Bruchteil, insgesamt rund 11.700 Blitzereignisse, erfasst. Innerhalb eines Zeitfensters von 1 ms und einer Ortsunschärfe von 30 km gibt es ca. 11.000 gemeinsame Ereignisse, die im Folgenden wieder als zeitgleich bezeichnet werden. Das bedeutet, dass ca. 91 % der RINDAT-Ereignisse in den LINET-Daten auftauchen, die dem gleichen Blitz zugehörig sind, wobei beachtet werden muss, dass RINDAT nur 9 % des Datenvolumens von LINET aufweist.

Eine statistische Auswertung der örtlichen Abweichungen aller gemeinsamen Blitze der beiden Messsysteme ist in der Abbildung 6.8 dargestellt. Die meisten Ereignisse wurden im Abstandsintervall von 1,1 bis 1,3 km registriert. Bei 50 % der gemeinsam registrierten Daten sind diese weniger als 2 km voneinander entfernt, bei 90 % der Fälle sind die Abstände kleiner als 5 km.

Der Vergleich der Amplituden der gemeinsamen Ereignisse gibt ebenfalls Aufschluss über die Qualität der Daten. In der Abbildung 6.9 sind alle Amplituden der zeitgleichen

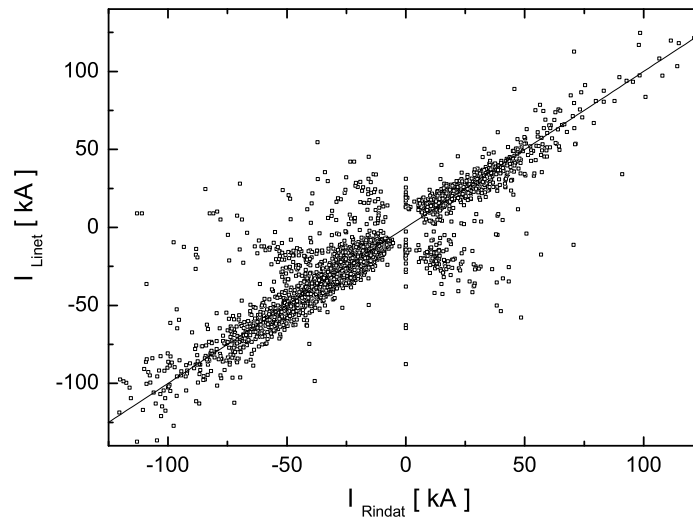


Abbildung 6.9: Amplitudenvergleich zeitgleicher Ereignisse von RINDAT und LINET

Ereignisse aufgetragen. Von den 11.000 als gemeinsam erkannten Ereignissen liegen 10.000 innerhalb des Toleranzintervalls

$$0,5 \leq I_{Linet}/I_{Rindat} \leq 2. \quad (6.4)$$

Eine genaue Auswertung über die Amplitudenverhältnisse dieser Auswahl zeigt die Abbildung 6.10. Die Amplituden des LINET-Systems sind im Durchschnitt ein wenig höher als die von RINDAT. Dies ist auf eine unterschiedliche Eichung der Systeme, aber auch auf verschiedene Frequenzbereiche der Messantennen zurückzuführen. Da beim LINET-System in Deutschland und Brasilien die gleichen Komponenten verwendet wurden, zeigt ein direkter Vergleich der Abbildungen 6.6 und 6.10, dass BLIDS und RINDAT nicht mit identischen Eichfaktoren der Amplituden konfiguriert sind, obwohl beide aus Vaisala-Komponenten bestehen.

Lay u. a. [2004] geben für das RINDAT-Netz eine Nachweiswahrscheinlichkeit von 80 % für alle Bodenblitze an, unabhängig von der Stärke. Blitze über 50 kA werden zu 90 % mit einer Ortungsgenauigkeit unter einem Kilometer erkannt; Blitze, die schwächer als 10 kA sind, sollen zu 30 % mit 5 km Ortsfehler registriert werden.

In der Abbildung 6.11 sind die Amplitudenverteilungen von RINDAT und LINET einander gegenübergestellt. Unter 15 kA nimmt offensichtlich die Empfindlichkeit des RINDAT-Systems in dem untersuchten Gebiet rapide ab. Da die Eichfaktoren für BLIDS und RINDAT nicht identisch sind, können auch die Absolutwerte, der in der Abbildung 6.7 und 6.11 angegebenen Verhältnisse nicht direkt miteinander verglichen werden. Das konstante Verhältnis auch bei geringen Amplituden in der Abbildung 6.7 lässt die Schlussfolgerung zu, dass BLIDS gegenüber RINDAT für kleine Amplituden eine höhere Nachweiswahrscheinlichkeit besitzt.

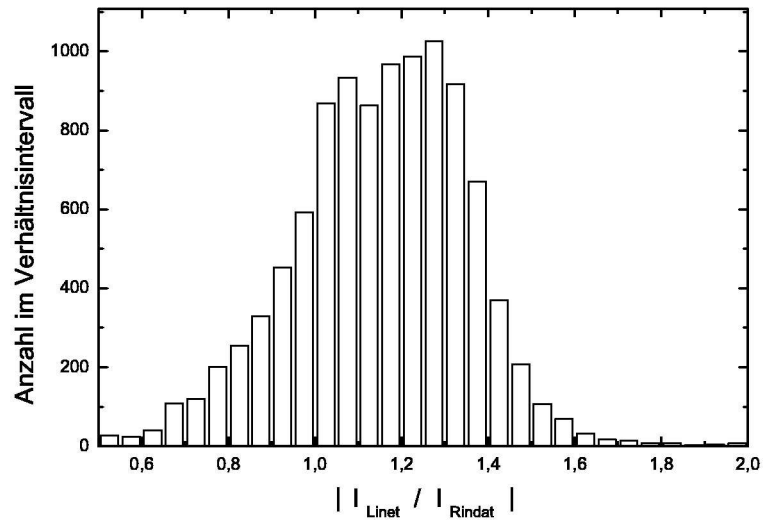


Abbildung 6.10: Verhältnis der Absolutamplituden der zeitgleichen Ereignisse von RINDAT und LINET

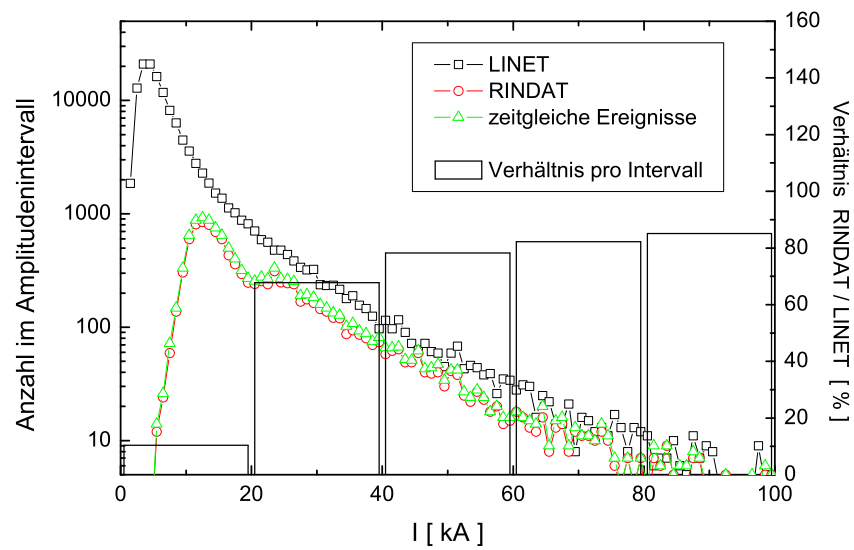


Abbildung 6.11: Verteilungen der Amplituden bei RINDAT und LINET

6.2.3 Weltweites Blitzmesssystem – WWLLN

In einer Gemeinschaftsaktion des *Low Frequency Electromagnetics Institutes* in Dunedin, Neuseeland, und der Universität von Seattle im US-amerikanischen Bundesstaat Washington wurde ein weltumspannendes Blitzortungssystem mit derzeit 25 Stationen aufgebaut [Rodger u. a., 2005].

Aktuelle Blitzkarten sind im Internet unter <http://webflash.ess.washington.edu> frei zugänglich. Da offenbar eine kommerzielle Nutzung angestrebt wird, sind Details zum Verfahren nicht ausreichend publiziert. Ursprünglich wurde die in Kapitel 4.1.2 vorgestellte Laufzeitmethode (TOA) mittels Triggerzeiten der Sferics angewandt [Dowden und Adams, 1993]. Seit einigen Jahren wird das Netz jedoch auf das in Kapitel 2.2.2 vorgestellte TOGA-Verfahren umgestellt, welches eine erheblich bessere Zeitgenauigkeit ermöglicht ([Dowden u. a., 2002], [Rodger u. a., 2004]).

Jede Blitzortung bei WWLLN erfordert eine Sferics-Registrierung an mindestens vier Stationen, die durchaus mehrere tausend Kilometer vom Blitz entfernt liegen dürfen. Die von den Betreibern gelieferten Blitzdaten beinhalten Zeit und Ort, ermöglichen aber keine Aussage über den Typ (CG, IC), sowie über Vorzeichen oder Stärke der Entladung. Die Nachweiswahrscheinlichkeit wird mit mindestens 50 %, die Ortungsgenauigkeit mit 10 km angegeben [Rodger u. a., 2005]. Diese Werte konnten im nun folgenden Vergleich allerdings nicht nachvollzogen werden.

Eigene LINET-Messungen wurden im Rahmen dieser Arbeit mit WWLLN-Daten für Brasilien und Süddeutschland verglichen. Die Abweichungen der gepeilten Orte zwischen den beiden Systemen sind in der Abbildung 6.12 dargestellt. Die Auswertung in Süddeutschland beschränkt sich auf das Gebiet von $9,0^{\circ}$ – $14,0^{\circ}$ ö.L. und $47,0^{\circ}$ – $50,5^{\circ}$ n.B.. Am 12. August 2004 wurden vom WWLLN-System in diesem Bereich 407 Blitze registriert, LINET meldete etwa 85.000 Ereignisse. Mit einem Toleranzbereich von 10 ms und 100 km wurden 273 Sätze als zeitgleich eingestuft.

Der Vergleich in Brasilien basiert auf Daten vom 4. Februar 2005 im Bereich von $20,5^{\circ}$ – $23,0^{\circ}$ s.B. und $47,0^{\circ}$ – $51,0^{\circ}$ w.L.. Aus 130.000 LINET-Blitzen und 155 WWLLN-Ereignissen wurden unter den gleichen Toleranzvoraussetzungen, wie sie bei der deutschen Auswertung herrschten, 136 zeitgleiche ermittelt. Der mittlere Abstand über alle 409 übereinstimmenden Ereignisse liegt bei 21 km, von denen die meisten im Intervall von 10 bis 15 km zu finden sind.

Für den Vergleich der Nachweiswahrscheinlichkeit wurden die Amplitudenwerte der zeitgleichen Signale herangezogen, was 73 % des WWLLN-Datenbestandes entspricht. In der Abbildung 6.13 sind pro 5 kA-Amplitudenintervall jeweils die LINET- und WWLLN-Werte aufgetragen. Das Verhältnis wurde in 20 kA-Schritten zusammengefasst. Damit erreicht die Ausbeute der WWLLN-Blitze nur höchstens 10 % des LINET-Ergebnisses. Natürlich gilt es zu bedenken, dass aufgrund der wenigen WWLLN-Daten eine statistische Auswertung recht unsichere Ergebnisse liefert.

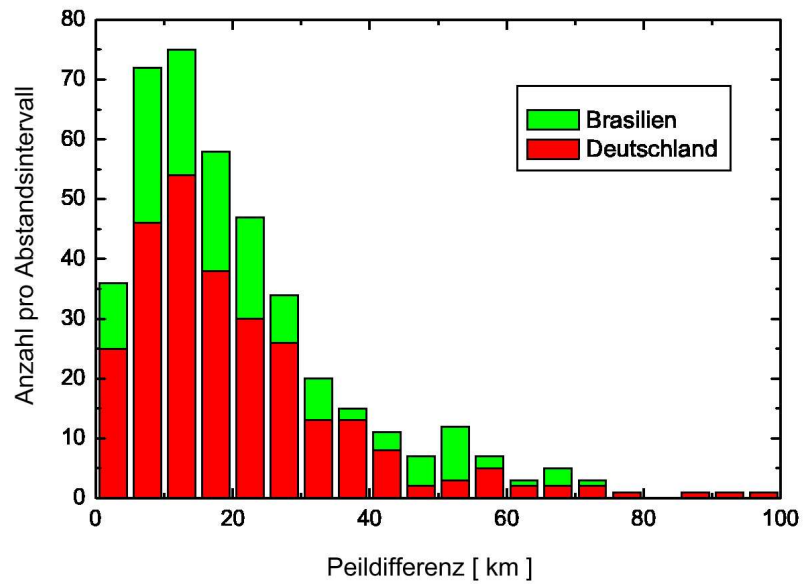


Abbildung 6.12: Peildifferenzen zwischen zeitgleichen Ereignissen von WWLLN und LINET in Brasilien und Deutschland

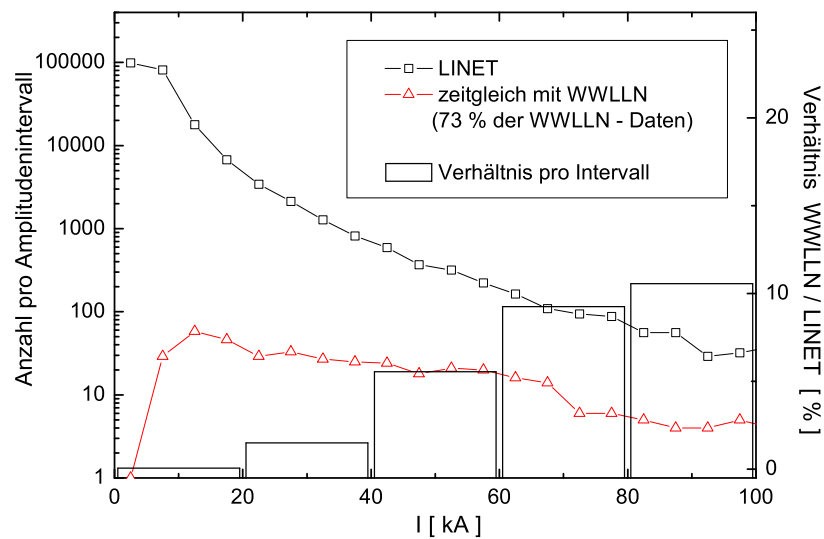


Abbildung 6.13: Verteilungen der Amplituden bei WWLLN und LINET

6.2.4 Blitzmesssystem – ZEUS

Das neueste Blitzortungssystem ZEUS wurde mit EU-Unterstützung in den USA unter dem Namen *Starnet* entwickelt und anschließend in Europa und Afrika aufgebaut. Derzeit wird es vom Observatorium in Athen, Griechenland, betrieben und umfasst zehn Sensoren, davon je fünf in Europa und in Afrika. Auch hier ist vermutlich eine kommerzielle Nutzung anvisiert, denn es gibt nur relativ allgemeine, aber keine umfassende wissenschaftliche Publikation zu den detaillierten Systemfunktionen. Aus den vorliegenden Informationen ergibt sich folgendes Funktionsschema:

Das elektrische Feld wird mit Stabantenne im Frequenzbereich von 5 bis 15 kHz gemessen. In Zeitfenstern zu je 13 ms digitalisiert man die Impulse und überträgt sie in komprimierter Form zusammen mit einer 1 μ s-genauen GPS-Zeitmarke zur Zentrale. Dort werden der zeitliche Verlauf des Impulses rekonstruiert und die zum Blitz eintreffenden Signale einander zugeordnet. Sodann erfolgt eine Kreuzkorrelation paarweise zugeordneter Impulse zur Ermittlung der Laufzeitdifferenzen, mit welchen letztlich die Ortspeilung stattfindet.

Mit ZEUS-Daten konnten ebenfalls Vergleiche über Ortsunschärfe und Nachweisempfindlichkeit angestellt werden. Dafür wurden Daten in Süddeutschland im Bereich von 6° bis 14° ö.L. und 47° bis 51° n.B. vom 29. Juli 2005 ausgewählt. In diesem Zeit- und Ortsfenster stehen ca. 34.000 gepeilte ZEUS-Blitze etwa 540.000 Ereignissen aus der LINET-Auswertung gegenüber. Mit einem Toleranzkriterium von 1 ms und 30 km wurden 28.000 Sätze als zeitgleich eingestuft. Bei mehreren in Frage kommenden LINET-Sätzen wurde jeweils derjenige mit der größten Amplitude gewählt. Die Distanzen aller zeitgleichen Ereignisse sind in der Abbildung 6.14 dargestellt. Im Intervall von 3,5 bis 4 km liegen die meisten Ereignisse, der mittlere Abstand beträgt 7,1 km.

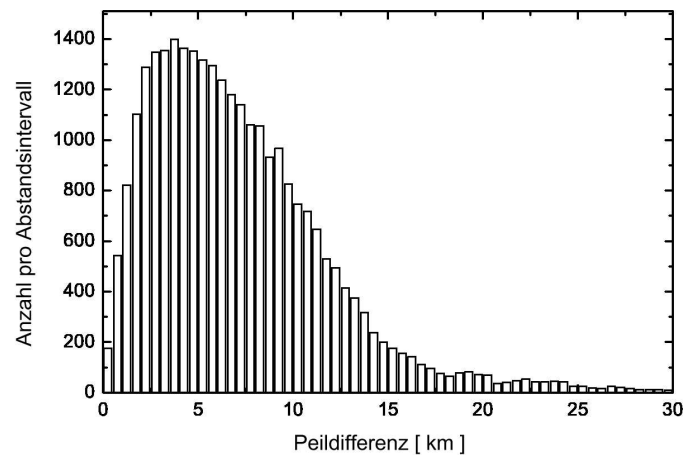


Abbildung 6.14: Peildifferenzen zwischen zeitgleichen Ereignissen von ZEUS und LINET

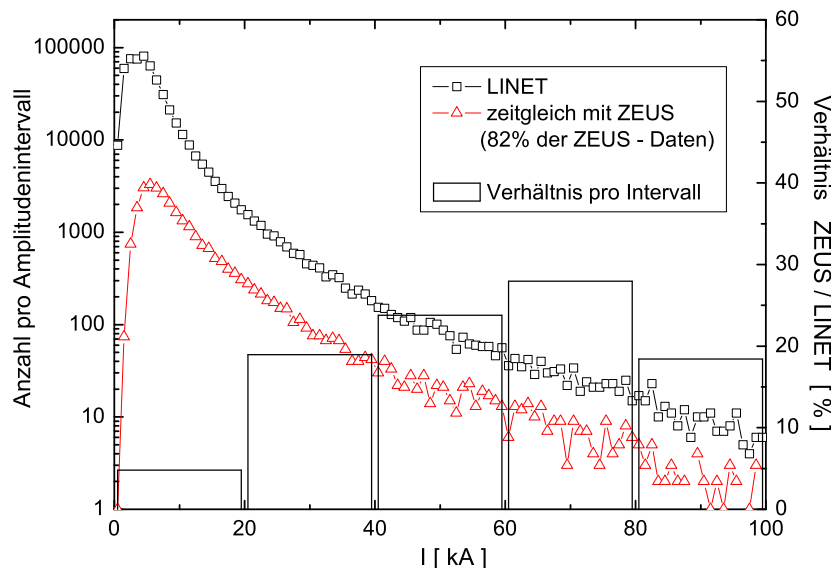


Abbildung 6.15: Verteilungen der Amplituden bei ZEUS und LINET

Genau wie bei WWLLN konnten bei ZEUS nur die Orte und Zeiten direkt miteinander verglichen werden. Ein Vergleich der Amplitudenverteilungen ist nur indirekt möglich, indem alle Zeitgleichen als ZEUS-Ereignisse gewertet werden. Daraus kann man zumindest Trendaussagen herleiten, da 82 % der ZEUS-Daten in der Gruppe der Zeitgleichen vertreten sind. Die Amplituden der zeitgleichen Ereignisse sind jeweils die korrespondierenden LINET-Werte. Die Abbildung 6.15 zeigt unter diesen Voraussetzungen den Amplitudenverlauf und einen Vergleich der Nachweiswahrscheinlichkeiten zwischen LINET und ZEUS. Danach liegt die Nachweiswahrscheinlichkeit der ZEUS-Daten ab 20 kA bei 20 bis 30 %, der Maximalwert liegt erstaunlicherweise im Intervall von 5 bis 6 kA.

6.3 Optische Satellitendaten – LIS

Die gesammelten Blitzdaten aus der Brasilienkampagne konnten außer mit RINDAT und WWLLN auch mit Satellitenaufnahmen des in Kapitel 1.3.2 beschriebenen *Lightning Imaging Sensors* (LIS) verglichen werden. Insgesamt gab es während der Kampagne zwei auswertbare Überflüge des Satelliten über dem Beobachtungsgebiet von 47° – 51° w.L. und $20,5^{\circ}$ – $23,0^{\circ}$ s.B.. Innerhalb dieses Bereiches wurden insgesamt 100 Flashes vom LIS gemeldet, davon 80 am 4. Februar 2005 und 20 Ereignisse am 26. Februar 2005. Anhand eines Beispiels soll der Vergleich zwischen LIS- und LINET-Daten exemplarisch dargestellt werden.

Die vom LIS detektierten Einzelereignisse, *Events* genannt, werden bei der LIS-internen Auswertung zu *Groups* und anschließend zu *Flashes* zusammengefasst. Da LIS keine Höhenangaben liefert, konnten nur Ereigniszeit und -ort in die Auswertung einbezogen werden. In der Abbildung 6.16 unten ist ein LIS-*Flash* mit allen dazugehörigen *Events* dargestellt. Dieser Blitz wurde am 4. Februar 2005 um 21:24:41.5702 UTC bei $22,131^\circ$ s.B. und $49,206^\circ$ w.L. geortet. In den LINET-Daten lassen sich 12 korrespondierende Ereignisse finden, aufgeteilt in 3 CGs und 9 ICs, die innerhalb von ± 300 ms und in einem Umkreis von 30 km auftraten. Wie in der Abbildung 6.16 zu sehen ist, unterteilen sich diese in zwei getrennte Entladungszentren, die ca. 28 km auseinander liegen. Als LIS-*Flash* wurde nur das rechte dieser Zentren ermittelt, man erkennt aus der Verteilung der LIS-*Events* auch eine Tendenz zur Detektion des anderen Entladungsgebietes. Möglicherweise sind diese beiden Zentren durch vertikale Blitzkanäle miteinander verbunden.

In der Abbildung 6.16 oben sind die entsprechenden LINET-Ereignisse im Höhenprofil aufgetragen. Mit dem LIS-*Flash* als Referenzzeit sind zu jedem *Stroke* aus dem LINET-Satz die Differenzzeit und die ermittelte Amplitude angegeben. Auffällig ist, dass in der linken Zelle die Ereignisse sowohl kurz vor als auch kurz nach dem LIS-*Flash* stattfanden.

Den 100 gemeldeten LIS-Blitzereignissen konnten so in 88 Fällen LINET-Daten zugeordnet werden, die innerhalb des Toleranzbereiches von ± 300 ms und 30 km lagen. Dabei entfallen 72 *Flashes* auf den 4. Februar 2006 und 16 auf den 26. Februar 2006. Die Abstandsverteilung dieser als zeitgleich zu bezeichnenden Ereignisse ist in der Abbildung 6.17 dargestellt. Bei mehreren in Frage kommenden LINET-Fällen zu einem LIS-*Flash* wurde für diese Statistik das jeweils örtlich am nächsten gelegene LINET-Ereignis herangezogen. Die meisten Ereignisse befinden sich im Intervallabstand von 4 bis 5 km, 80 % der Fälle liegen innerhalb von 7 km.

Bemerkenswert ist, dass LIS und LINET grundsätzlich unterschiedliche physikalische Abläufe detektieren: LIS erfasst Ereignisse im Bereich des sichtbaren Lichtes, während LINET im Radiowellenbereich misst. Die jeweiligen Messgrößen stammen von Prozessen, welche zwar korreliert, aber physikalisch verschieden sind.

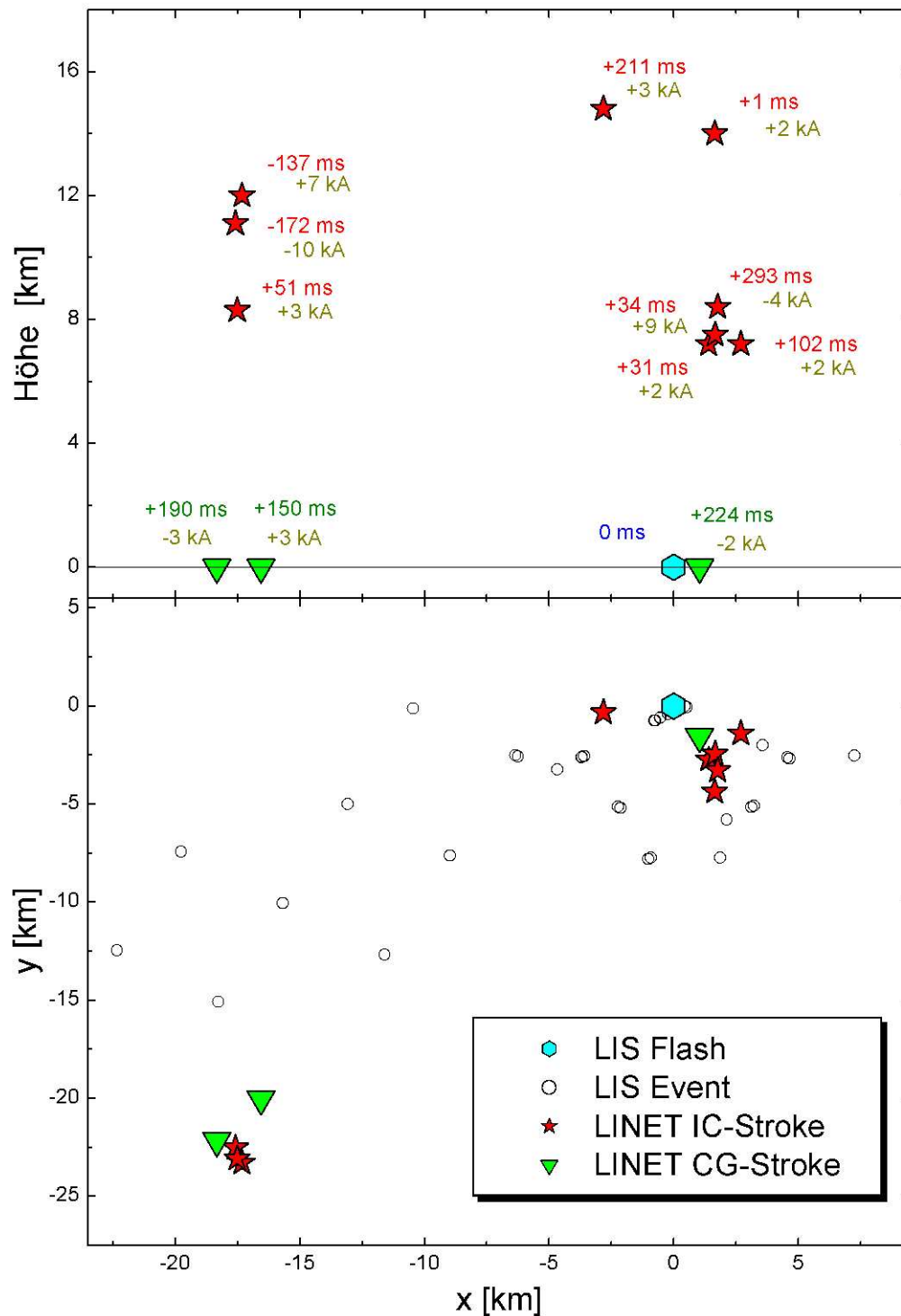


Abbildung 6.16: LIS-Flash am 4. Februar 2005 (21:24:41.5702 UTC, 22,131° s.B., 49,206° w.L.) mit 12 korrespondierenden LINET--strokes in einem Zeitfenster von 300 ms und einem Radius von 30 km als Höhenprofil (oben) und Aufsicht (unten)

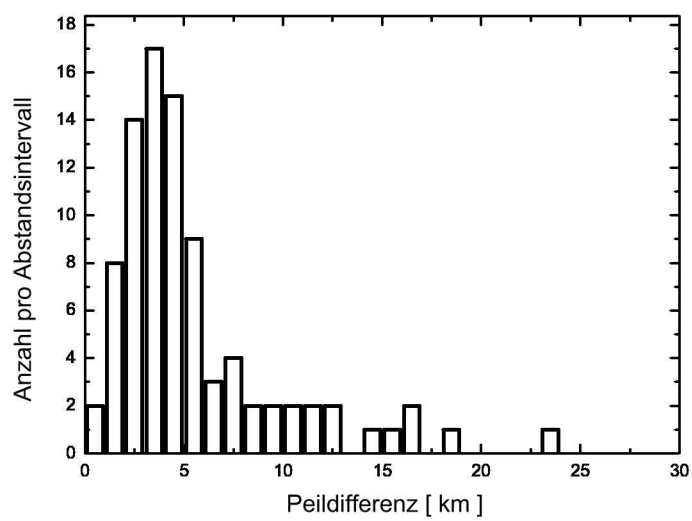


Abbildung 6.17: Peildifferenzen zwischen zeitgleichen Ereignissen von LIS und LINET

Kapitel 7

Eigenschaften verschiedener Blitztypen

Bei der genauen Analyse der Impulsformen von gemessenen Blitzentladungen fällt auf, dass es unterschiedliche Typen gibt, so dass eine umfassende Klassifizierung generell sinnvoll ist. Vor allem ist eine Unterscheidung zwischen Wolken- und Erdblitz interessant, die auch weiteren Aufschluss über die Zuverlässigkeit der Höheninformation liefern könnte. Eine umfassende Klärung mit exakten Kriterien konnte bisher von keiner wissenschaftlichen Untersuchung geliefert werden. Dies ist aber u.a. darauf zurückzuführen, dass in den meisten Fällen eigens entwickelte Systeme mit individuellem Filterverhalten auch spezifische Auswirkungen auf die Wellenformen haben, wie in Kapitel 3.3.2 demonstriert wurde.

Hamer [1998] argumentiert beispielsweise, dass die Stromstärken und damit auch die gemessenen Signalamplituden von Wolkenblitzen viel schwächer sein müssen als von Erdblitzen, da das erforderliche Spannungspotential wegen kürzerer Distanzen viel geringer ausfällt. Ausgehend von dieser These ordnet eine Reihe von Autoren die detektierten Impulse je nach Stärke als CG oder IC ein ([Arnold und Pierce, 1964], [Richard u. a., 1986], [de Miranda u. a., 2003]). Beim genaueren Betrachten der Wellenformen in diesen Arbeiten fällt jedoch auf, dass diese Einteilung recht willkürlich ist und die Übergänge zwischen CGs und ICs fließend sind.

Anhand der in dieser Arbeit gesammelten Daten wird im Folgenden eine Klassifizierung vorgenommen, welche die Struktur und die Komplexität der Wellenformen berücksichtigt. Zur Untermauerung und zum Vergleich werden jeweils Beispiele aus Veröffentlichungen herangezogen.

Endgültigen Aufschluss über die Klassifizierung von Impulstypen könnte eine umfassende physikalische Theorie über Blitzentladungen liefern. Aus der Literatur ist eine Reihe von Simulationen von Blitzentladungsprozessen bekannt ([Tan u. a., 2006], [Mansell u. a., 2005]). Die Inputparameter und die Simulationsergebnisse sind aber bisher ausschließlich auf VHF-Systeme zugeschnitten.

7.1 Erdblitz

Hamer [1998] behauptet, dass mit VLF-Systemen ausschließlich Erdblitzdetektoren werden können. Dies wird mit der Kanallänge begründet, die der Antennenlänge entspricht und bei VLF-Strahlungen im Bereich von 3 bis 30 km liegen sollte.

Dennoch gibt es VLF-Systeme, die Unterscheidungen zwischen Wolken- und Erdblitz durchföhren. Bei Vaisala wird beispielsweise die sogenannte *Waveform Discrimination* angewendet. Danach werden Blitze als CG eingestuft, wenn der Nulldurchgang nach dem ersten Peak erst nach einem bestimmten Zeitpunkt eintritt [Cummins u. a., 1998]. Wenn dieses Kriterium nicht erfüllt ist, wird die Entladung von der Messstation als IC gewertet. Bei der Ortsbestimmung wird dem gepeilten Ereignis durch Mehrheitsentscheidung der beteiligten Stationen der CG/IC-Status zugewiesen.

Die physikalische Basis für diese Methode ist darin begründet, dass *CG-Return Strokes* Feldsprünge bei statischen E-Feldmessungen verursachen ([Krider u. a., 1977], [Brook u. a., 1982]). Aufgrund der differentiellen Eigenschaften der verwendeten Messsysteme werden diese Feldsprünge aber automatisch ausgeglichen, sodass sie nur noch einen verspäteten Nulldurchgang hinterlassen, dessen Wert system- und amplitudenabhängig ist.

Dieses Kriterium kann bei unseren LINET-Daten nicht in dieser Weise angewendet werden. Der Grund dafür ist vermutlich die starke Dämpfung niedrigerer Frequenzen, die genauer in Kapitel 2.2.3 untersucht wurde. Damit wird der Nulldurchgang meist schon bei der ersten oder zweiten Schwingung erreicht, was zu kurz ist, um einen prägnanten Unterschied zu ICs zu erhalten. Ein Beispiel für solch eine Wellenform ist in der Abbildung 7.1 dargestellt. Der dort gezeigte Signalverlauf an der Station Garching entspricht zeitlich exakt einem Ereignis, das auch von BLIDS als CG eingestuft wurde.

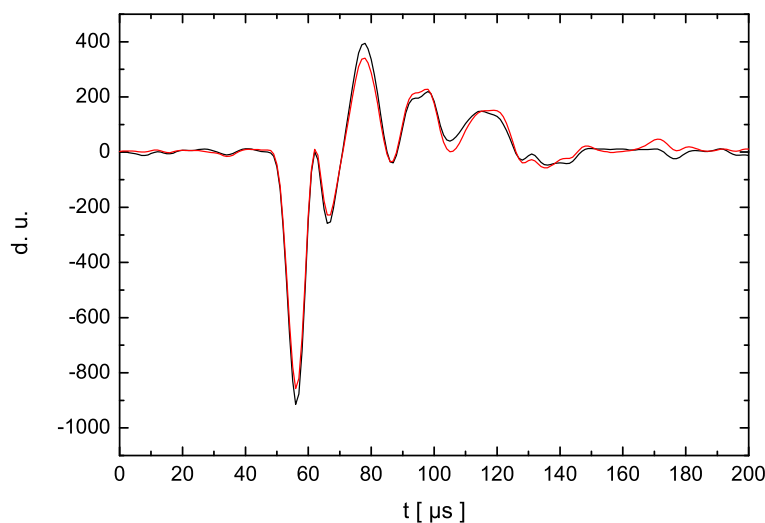


Abbildung 7.1: Wellenform eines Ereignisses, das von LINET und BLIDS als CG identifiziert wurde

Tabelle 7.1: Vergleich der IC/CG-Typisierung von zeitgleichen Ereignissen bei BLIDS und LINET

	BLIDS	LINET
Zeitgleiche Ereignisse insgesamt	7.400	
CG-Ereignisse	67 %	44 %
IC-Ereignisse	33 %	56 %
Gemeinsame Einstufung	55 %	
Gegenteilige Einstufung	45 %	

Um die Ergebnisse der IC- und CG-Typen-Einstufungen nach dem in Kapitel 4.3 beschriebenen Verfahren zu prüfen, soll an dieser Stelle ein statistischer Vergleich zwischen BLIDS und den in dieser Arbeit gewonnenen Daten erfolgen. Dabei wurden das Ausgangsmaterial verwendet, das schon im Kapitel 6.2.1 für mehrere Vergleiche herangezogen wurden. Die Ergebnisse werden in der Tabelle 7.1 präsentiert. Der Anteil der gemeinsamen Einstufungen liegt bei nur 55 %. Diese relativ schlechte Übereinstimmung könnte durch folgende Annahmen erklärt werden:

- Die ermittelte Höhe und somit die IC-Einstufung im LINET-System ist nicht immer korrekt.
- Das von den Vaisala-Sensoren verwendete Kriterium zur *Waveform Discrimination* ist nicht immer anwendbar.
- Bei den ausgewählten zeitgleichen Ereignissen handelt es sich nicht immer um identische Ereignisse.

Eine endgültige Klärung kann nur durch weitere Untersuchungen erfolgen. Dafür sollten die aufgezeichneten Wellenformen näher analysiert werden, um Kriterien für verschiedene Impulstypen festzulegen, die aufgrund ihres Erscheinungsbildes eindeutig als IC oder CG eingeordnet werden können. Nachdem die Impulstypen auf diese Weise bestimmt worden sind, sollte eine neue statistische Auswertung eine sichere Einordnung der gepeilten Ergebnisse gewährleisten.

7.2 Wolkenblitze

In dieser Arbeit werden Wolkenblitze generell in zwei Klassen eingeteilt, die sich auffällig in ihrer Signalform unterscheiden:

- IC als *Stroke*- Prozesse und
- IC als *Leader*- oder Vorentladungsprozesse.

In den folgenden Kapiteln werden von diesen Formen Einzelbeispiele untersucht. Dazu gehören die Sichtung der Wellenform und die Auswertung der Peilerggebnisse. Für jede Kategorie konnten aus der Literatur bekannte Beispiele gefunden werden; eine umfassende Einteilung der ICs auf diese Art wurde bisher aber noch nie vorgenommen.

7.2.1 Wolkenblitze als Strokeprozesse

Diese Klasse von Wolkenentladungen zeichnet sich durch eine Reihe spezifischer Eigenschaften aus. Auffällig ist die starke, breitbandige Strahlung im gesamten HF/VHF-Bereich, die als singuläres Ereignis über einige Mikrosekunden anhält [Le Vine, 1980]. Diese von Willett u. a. [1989] als „ungewöhnlich“ eingestuften Wellenformen besitzen im VLF-Bereich ausnahmslos große Amplituden. Die Impulse treten isoliert auf und dauern für gewöhnlich ca. 20 μ s, wobei sie jeweils kurze Anstiegs- und Abfallzeiten aufweisen. Smith u. a. [1999] zeigen, dass alle diese Ereignisse zu einer gemeinsamen Klasse von Blitzereignissen gehören und nennen diese *Narrow Bipolar Events*, kurz NBEs.

Aufgrund der auffällig starken Amplituden ist diese Kategorie von Blitzen dazu geeignet, nicht nur die direkte Welle zur Auswertung heranzuziehen, sondern auch indirekte Strahlung, die von der Ionosphäre bzw. Erdoberfläche reflektiert wurde. Die Techniken, die es erlauben, aus den Ankunftszeiten der direkt und indirekt einfallenden Wellen auf die Emissionshöhe des Blitzereignisses zu schließen, sind in Kapitel 2.2.1 detailliert dargelegt worden.

Auch bei den Daten dieser Arbeit traten isolierte IC-Blitzereignisse auf, die Eigenschaften der NBEs aufweisen. In der Abbildung 7.2 sind die Wellenformen von vier Stationen dargestellt, die dasselbe Ereignis aus unterschiedlicher Entfernung detektierten. Diese Blitzentladung trat am 16. Juli 2005 um 01:33:46.496 UTC bei 48,9588° n.B. und 12,1926° ö.L. auf und wurde insgesamt von 13 Sensoren erfasst. Die routinemäßige Analyse nach der in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Methode ergab eine Blitzhöhe von 7,8 km und eine Blitzstromstärke von +17,4 kA.

Mit Hilfe der in Kapitel 2.2.1 vorgestellten Formeln bei Reflexionsmodellen und unter der Annahme einer Nachtionosphärenhöhe von 90 km kann man die Differenzlaufzeiten zwischen den direkten und indirekten Wellen errechnen. Diese Ankunftszeiten sind in der Abbildung 7.2 für jede Station eingezeichnet, wobei der Nulldurchgang der ersten, direkten Welle als Referenzzeitpunkt gilt. Berücksichtigt wurde dabei die von der 3D-Methode ermittelte Emissionshöhe von 7,8 km. Es gilt zu beachten, dass es bei einem CG keinen Zeitunterschied zwischen den beiden reflektierten Wellen geben wird. Die gute Übereinstimmung zwischen den aus dem Reflexionsmodell errechneten und den wirklichen Ankunftszeiten zeigt, dass auch mit alternativen Methoden die Blitzhöhenermittlung aus Kapitel 4.3.1 bestätigt werden kann.

Aufgrund der isoliert auftretenden Impulse, deren Wellenformen im Gegensatz zu CGs eher bipolar sind, werden NBEs zu den Strokeprozessen gezählt. Das bedeutet, dass durch solch einen Prozess ein weitgehend vollständiger Ladungsausgleich im großräumigen Maßstab vonstattengeht und nicht wie bei Vorentladungs- oder *Leader*-Prozessen eine Entladung nur vorbereitet wird.

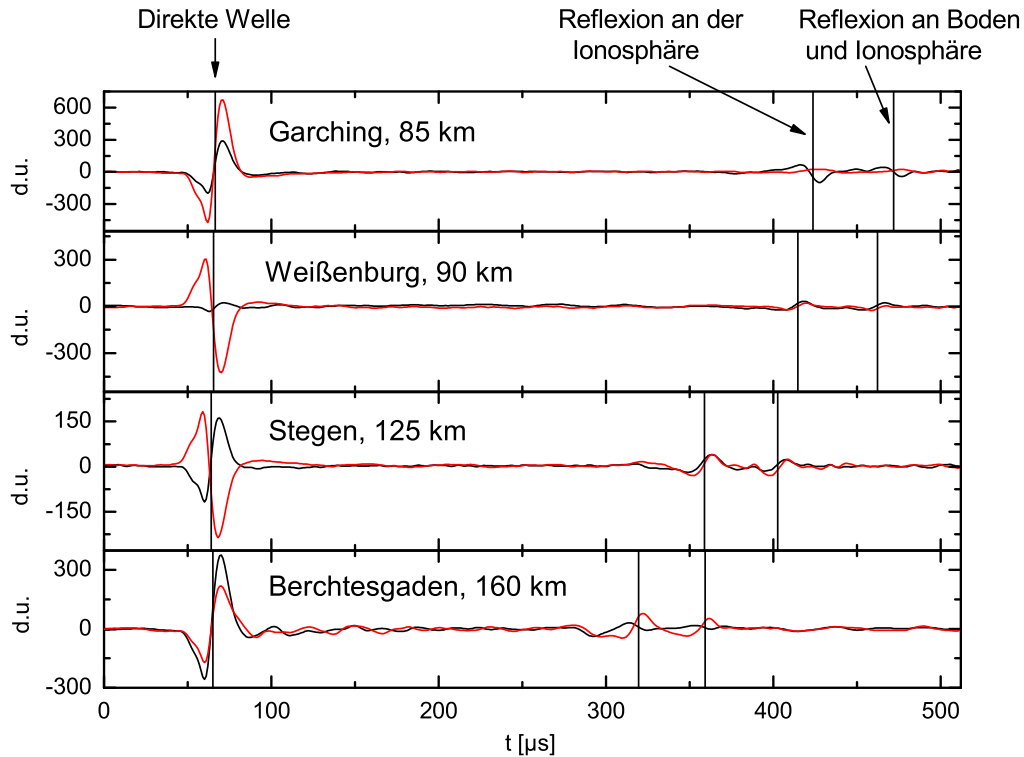


Abbildung 7.2: Isoliertes IC-Blitzereignis mit je zwei Reflexionsimpulsen, geordnet nach Blitzentfernung

Als Bestätigung dafür, dass NBEs den Strokeprozessen zugehörig sind, können die Untersuchungen von Eack [2004] herangezogen werden. Durch Vergleiche der Dipolmomente aus Nah- und Fernfeldern einzelner NBEs ermittelte Eack eine mittlere Entladungsstrecke von 3,2 km, bei einer mittleren Stromstärke von 16 kA. Die errechnete durchschnittliche Entladungsgeschwindigkeit von $1,5 \cdot 10^8$ m/s ist gut mit *Return Stroke*-Geschwindigkeiten bei CGs vergleichbar. Allerdings beruhen diese Angaben nur auf Auswertungen von insgesamt sechs Ereignissen und bedürfen daher noch einer statistischen Verifizierung.

7.2.2 Wolkenblitze als Leader- und Vorentladungsprozesse

Ein großer Anteil der beobachteten Wellenformen bei Blitzentladungen im VLF-Bereich besteht aus kurzen Paketen bis zu 1 ms Dauer mit mehreren Einzelpeaks. Diese Klasse wurde in einer Reihe von Studien in der Literatur untersucht; Gomes u. a. [2004] bezeichnen diese Pakete als *Pulse Trains*, was im Folgenden beibehalten werden soll.

Die Ursache für die Entstehung solcher Wellenzüge ist bei Entladungsprozessen in der Wolke zu suchen. Untersucht wurden Fälle, die kurz vor einem CG auftreten, also *Stepped*

und *Dart Leader Pulse Trains* ([Weidman und Krider, 1978], [Beasley u. a., 1982]) sowie *Preliminary Breakdown Pulses* ([Clarence und Malan, 1957], [Ushio u. a., 1998]). Es gibt aber auch *Pulse Trains*, die nur mit Wolkenentladungen im Zusammenhang stehen [Bils u. a., 1988].

Wolkenblitze im Zusammenhang oder als Teil von Erdblitzten

Wie in Kapitel 1.2.1 ausführlich dargelegt, sind Erdblitzte keine isolierten Einzelereignisse, sondern werden in der Regel von einer Reihe von Wolkenentladungsprozessen begleitet. Die Erkenntnisse, die zu der heutigen Sicht des Blitzvorganges geführt haben, wurden aus vielen Einzelmessungen mit den unterschiedlichsten Messinstrumenten gewonnen. Die Untersuchungen von Wolkenprozessen wurden bis jetzt fast ausschließlich mit VHF-Messsystemen durchgeführt ([Shao und Krehbiel, 1996], [Proctor, 1997]). Welche Wolkenentladungsprozesse von VLF-Systemen detektiert werden können, ist bis dato unzureichend geklärt.

Bei den Daten, die für diese Arbeit ausgewertet wurden, gab es eine Reihe von Beispielen, in denen Erdblitzte und Wolkenblitze in auffälligem Zusammenhang standen. Abbildung 7.3 zeigt einen ca. $700 \mu\text{s}$ langen *Pulse Train*, der ungefähr 1 ms vor dem nachfolgenden CG endet. Dieser Blitz stammt vom 13. Juni 2005 und wurde um 03:35:19.296 UTC bei $48,372^\circ$ n.B. und $12,826^\circ$ ö.L. von insgesamt 14 Stationen detektiert. Die Standardauswertung lieferte zwei Ereignisse: einen $+20$ kA starken IC in einer Höhe von 5,0 km und einen nachfolgenden CG mit einer Amplitude von -90 kA.

Die Frage, welchem *Pulse Train* das Beispiel in der Abbildung 7.3 zuzuordnen ist, kann nicht eindeutig beantwortet werden. Hamer [1998] beispielsweise behauptet, dass *Stepped* und *Dart Leader*-Pulse von VLF-Systemen nicht geortet werden könnten. Die Argumentation stützt sich darauf, dass mit Antennen im VLF-Bereich nur Entladungsstrecken ab mindestens einem Kilometer detektierbar sind, *Leader*-Prozesse aber nur Kanäle mit höchstens 200 m Länge aufweisen. Dagegen spricht, dass *Leader*-Entladungen wie *Return Strokes* sicher breitbandiger strahlen, so dass man auch im VLF-Bereich noch nachweisbare Wellenzüge messen kann. Dies belegen zeitgleiche Beobachtungen derselben Ereignisse von VLF- und VHF-Messungen, die von Heavner u. a. [2002] durchgeführt wurden.

Der Wellenzug vor dem Erdblitz in der Abbildung 7.3 könnte alternativ auch von einem *Initial Breakdown*-Prozess stammen, der, wie in Kapitel 1.2.1 beschrieben, den Auslöser für Erdblitzte darstellt. Dieser Entladungstyp wurde von einer Reihe von Autoren untersucht ([Clarence und Malan, 1957], [Ogawa, 1995], [Ushio u. a., 1998]). Die dort gezeigten Wellenformen, die auch im VLF-Bereich zu sehen sind, werden als *Preliminary Breakdown Last Stages* – sogenannte PBLs – bezeichnet und ähneln vom Aussehen dem Wellenzug in Abbildung 7.3. Allerdings liegen die aus der Literatur bekannten Ereignisse ca. 2 bis 5 ms vor dem anschließenden Erdblitz, wohingegen in dem hier vorgestellten Beispiel dieser Abstand nur 1 ms beträgt. Trotz dieser Differenzen kann man aber davon ausgehen, dass vor dem in der Abbildung 7.3 gezeigten Erdblitz eine Wolkenentladung stattgefunden hat, womit die Einstufung des gepeilten Ereignisses als IC bestätigt wäre.

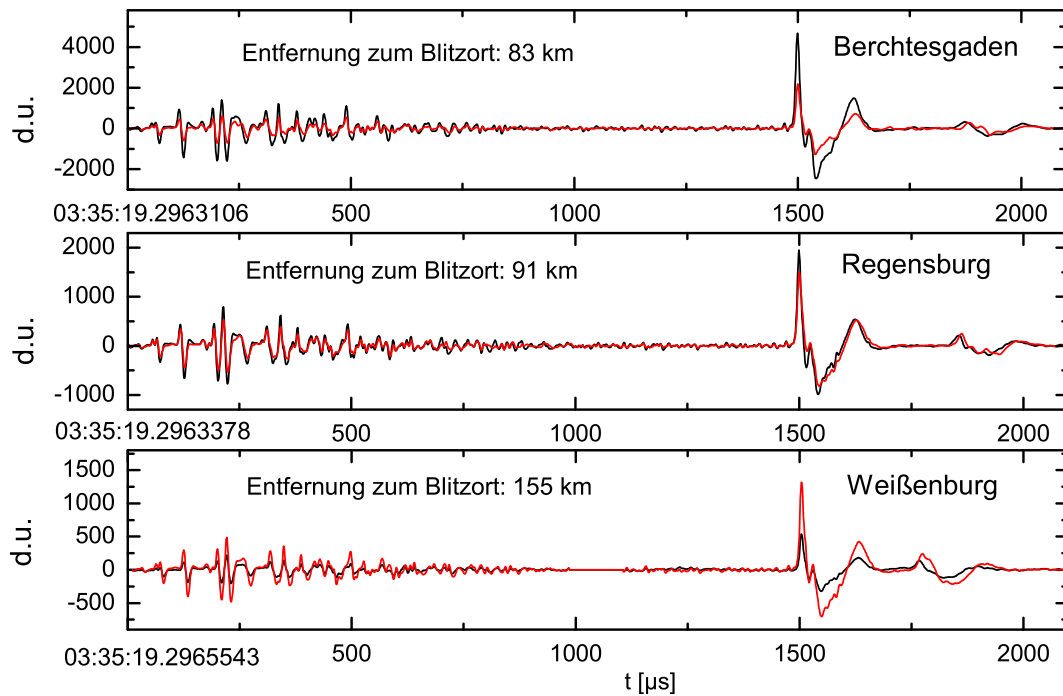


Abbildung 7.3: Wolkenentladung im Zusammenhang mit einem Erdblitz

Reine Wolkenblitze

Entladungen, die sich ausschließlich in Wolkenregionen abspielen, sind in der Literatur viel seltener zu finden als mit Erdblitzten gekoppelte *Pulse Trains*. Das liegt zum einen wohl daran, dass die physikalischen Prozesse in der Wolke noch nicht vollständig verstanden sind, aber auch an den bisher eingesetzten Messmethoden, mit denen vor allem Erdblitzte detektiert wurden.

Die veröffentlichten Wellenformen von reinen Wolkenblitzen stammen meist von Systemen mit schnellen, elektrischen Antennen ([Weidman und Krider, 1979], [Bils u. a., 1988], [Villanueva u. a., 1994], [Sharma u. a., 2005]). Darstellungen, die eine höhenaufgelöste, örtliche und zeitliche Entwicklung der Wolkenentladungen zeigen, gibt es bisher ausschließlich von Messsystemen, die im VHF-Bereich operieren. Der eindrucksvollste Fall von Thomas u. a. [2004] wurde in Kapitel 1.3.5 vorgestellt. Dementsprechend basieren Vergleiche – beispielsweise mit statischen E-Feldern aus Ballonaufstiegen – bisher auch nur auf Messungen mit VHF-Systemen [Marshall u. a., 2005].

Mit den Daten aus der hier vorliegenden Arbeit konnten erstmalig aus einem VLF-System gewonnene Wellenformen auch einem höhenabhängigen Emissionsort zugeordnet

Tabelle 7.2: Gepeilte IC-Stroke innerhalb von 200 ms am 29.07.2005

Nr.	Zeit in UTC	n.B. [°]	ö.L. [°]	Höhe [km]	Amplitude [kA]
1	17:05:38.2513429	48,0441	11,2245	9,2	1,7
2	17:05:38.2544226	48,0426	11,2262	8,4	2,2
3	17:05:38.2597872	48,0443	11,2256	8,7	1,7
4	17:05:38.2717659	48,0519	11,2006	8,6	-1,4
5	17:05:38.3058732	48,0570	11,1673	9,6	1,5
6	17:05:38.3615560	47,9508	11,2516	7,8	4,1
7	17:05:38.3629526	47,9521	11,2482	8,5	6,1
8	17:05:38.3634283	47,9558	11,2468	8,9	7,3
9	17:05:38.3647462	47,9577	11,2442	9,1	3,2
10	17:05:38.3669666	47,9651	11,2454	10,0	2,2
11	17:05:38.3732637	47,9541	11,2437	10,9	1,2
12	17:05:38.3923065	47,9647	11,2424	10,4	-4,3
13	17:05:38.3972430	48,0615	11,2183	9,6	-1,2
14	17:05:38.3991900	48,0593	11,2196	9,5	-1,4
15	17:05:38.4032591	47,9508	11,2669	8,1	1,3
16	17:05:38.4346114	48,0401	11,2290	6,6	4,6

werden. So wird es möglich, zeit- und höhenaufgelöste Bilder von VLF-Entladungsstrecken darzustellen. In der Abbildung 7.4 ist die Wellenform eines 200 ms andauernden IC-Ereignisses dargestellt, das an der Station Stegen gemessen wurde. Zur besseren Übersicht sind die Ausschnitte von 7 und 1 ms jeweils vergrößert abgebildet. Die Wellenformen im Fenster mit 1 ms Länge weisen die gleichen, unipolaren Strukturen auf, wie sie beispielsweise auch von Sharma u. a. [2005] gezeigt werden.

Tabelle 7.2 zeigt die Auswertung der insgesamt 16 im Wellenzug markierten IC-*Strokes*, die am 29. Juli 2005 von mindestens vier Stationen detektiert wurden. Zu den genauen Emissionszeiten sind die höhenaufgelösten Koordinaten und die rückgerechneten Amplituden aller Einzelereignisse angegeben. Vor und nach dem hier aufgelisteten Vorgang wurde in diesem Gebiet für einige zehn Sekunden keine Entladung mehr festgestellt, so dass dieses Beispiel einem reinen Wolkenereignis zugerechnet werden kann.

Zur besseren Übersicht zeigt die Abbildung 7.5 die Daten der Tabelle 7.2 als einen 3D-Plot. Der linke, untere Bereich bildet die Draufsicht. Grob können die Einzelereignisse aus der Vogelperspektive in einen nördlichen (I) und einen südlichen Bereich (II) gegliedert werden. Der obere und der rechte Teil der Abbildung zeigen die Höhenabhängigkeit der Ereignisse in West-Ost- bzw. Nord-Süd-Richtung als Vertikalschnitt. In der rechten Abbildung ist eine stetige Aufwärtsbewegung der Einzelentladungsquellen von Nummer 6 bis 11 über eine Strecke von 3 km in der südlichen Zelle zu erkennen.

Ortsaufgelöste Entladungsstrecken einzelner Blitzereignisse, wie in Abbildung 7.5 gezeigt, sind aus der Literatur bisher nur von VHF-Systemen als sogenannte *Radio Pictures* bekannt ([Proctor, 1981], [Proctor u. a., 1988], [Thomas u. a., 2004]). Mit ihrer Hilfe können beispielsweise Einzelprozesse genauer analysiert, aber auch der Gesamtverlauf des Blitzprozesses übersichtlich dargestellt werden. Für weitere Erkenntnisse über die physi-

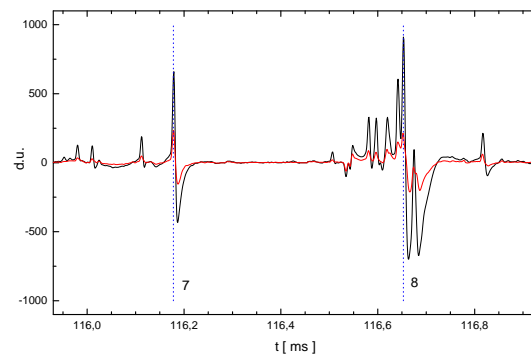
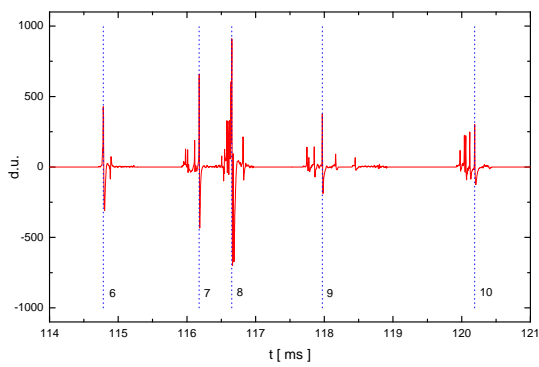
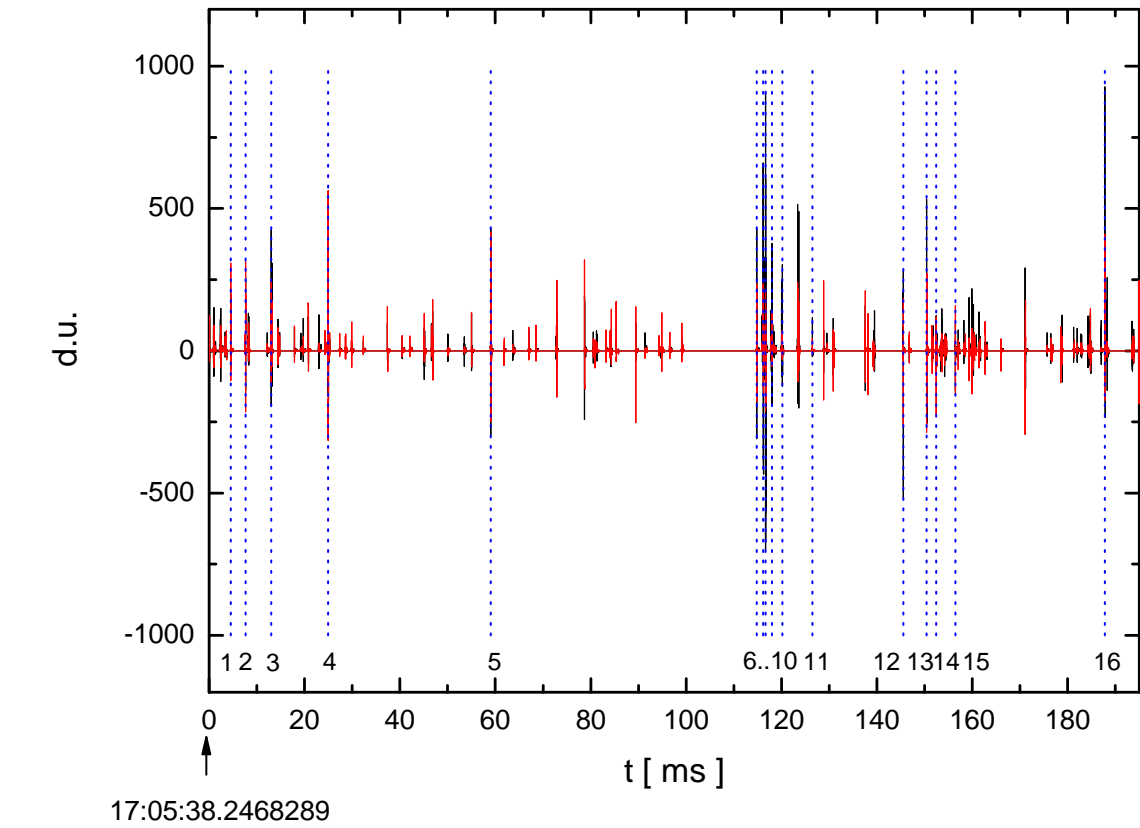


Abbildung 7.4: Wellenform der IC-Stroke innerhalb von 200 ms (oben) mit Ausschnitten von 10 ms (unten links) und 1 ms (unten rechts)

kalischen Vorgänge von Blitzentladungen müssten zeitgleiche Messungen von VLF- und VHF-Systemen korreliert werden. Insbesondere sind solche Untersuchungen für Wolkenblitze interessant, da sie – wie in Kapitel 1.2.2 erwähnt – im Gegensatz zu Erdblitzten nur unzureichend erforscht sind.

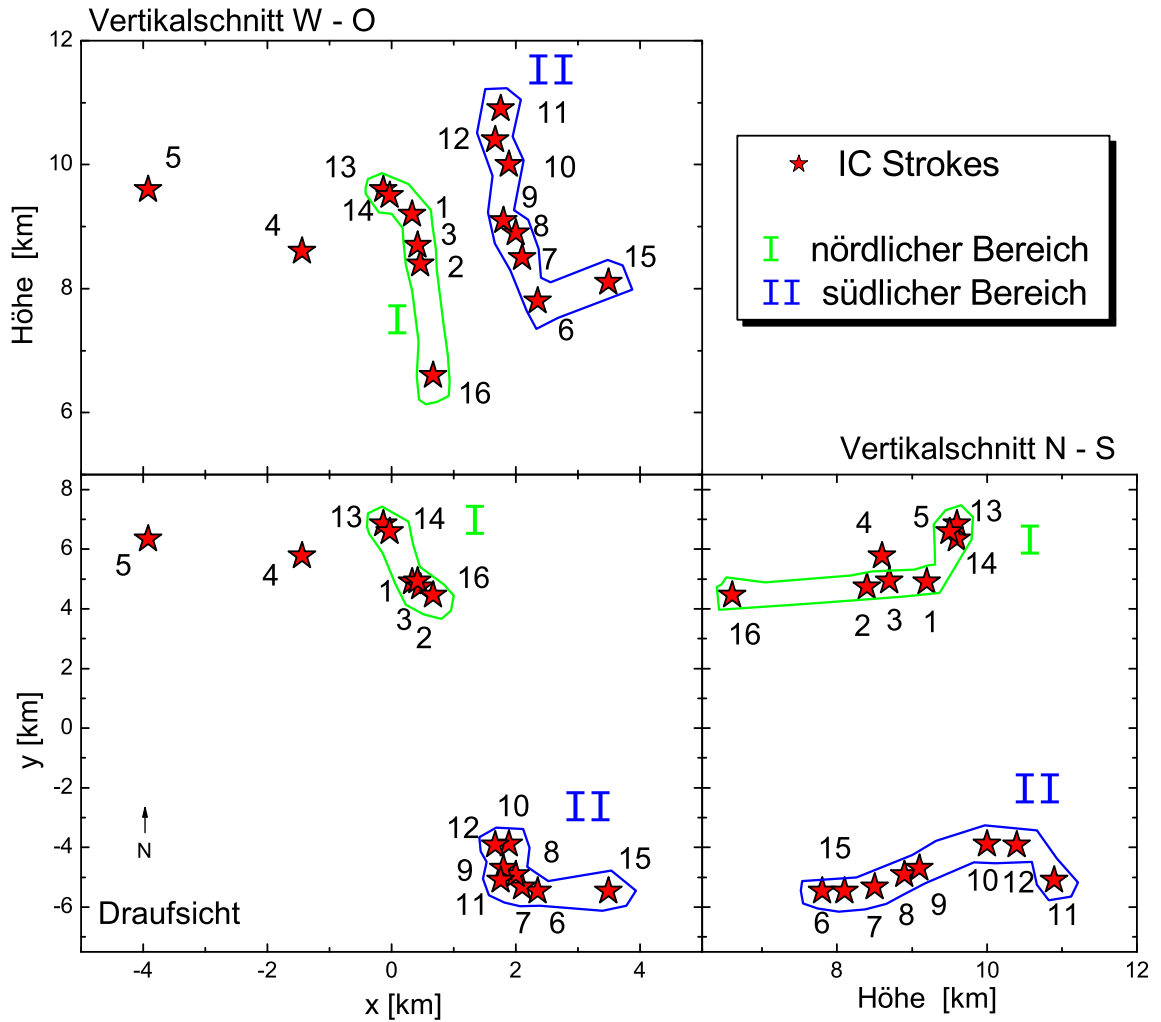


Abbildung 7.5: Gesamtdarstellung der Entladungsstrecken von insgesamt 16 gepeilten IC-Strokes. Der Koordinatenursprung im linken, unteren Bild liegt bei 11.22° ö.L. und 48.0° n.B.. Das 200 ms andauernde Blitzereignis lässt sich auf zwei Regionen (I und II) lokalisieren.

Schlussbemerkungen und Ausblick

Innerhalb der hier vorliegenden Arbeit wurde ein effizientes Blitzerfassungssystem entwickelt und erprobt. Die Blitzentladungen können aufgrund der abgestrahlten elektromagnetischen Wellen detektiert werden. Die Erfassung dieser als *Atmospherics* oder kurz *Sferics* bekannten Pulse erfolgt mit magnetischen Sensoren in einem begrenzten Frequenzband, dessen Durchlassbereich im VLF-Band ist.

Die Ortung der Blitze basiert auf dem Laufzeitdifferenzenverfahren. Dieses wurde so modifiziert, dass neben der sonst bei VLF-Systemen üblichen 2D Ortung auch die Blitzhöhe bestimmt wird. Die Qualität der gepeilten Ereignisse wurden mit einer Reihe von Tests geprüft. Dabei konnten die Restlaufzeitfehler von den an der Peilung beteiligten Stationen durch den Einsatz der 3D-Methode auf $0,2 \mu\text{s}$ reduziert werden. Eine notwendige Voraussetzung dafür ist die Auswahl des gleichen charakteristischen Punktes im Wellenzug eines Signals an allen beteiligten Einzelstationen. Über statistische Vergleiche mit anderen Blitzerfassungssystemen von identischen Blitzereignissen konnten mittlere Ortsabweichungen im Bereich von 0,5 bis 2,0 km bestimmt werden. Die ermittelten Blitzstromstärken sowie deren Polarität zeigten eine gute statistische Übereinstimmung.

Durch die Ermittlung des Höhenparameters in der 3D-Rechnung ist es möglich, Wolken- und Erdblitz auf einfache Weise voneinander zu unterscheiden. Eine Verifizierung der Blitztypen erfolgte in Einzelbeispielen über den Vergleich der Ergebnisdaten mit den dazugehörigen Wellenformen. Dafür wurde eine Klassifizierung der aus der Literatur bekannten Signaltypen von IC-Prozessen vorgenommen und die Wellenformen den hier gemessenen gegenüber gestellt. Alternativ konnten von kurzen, isoliert auftretenden Impulsen die Blitzhöhen bestimmt werden, da sich aus den Laufzeiten der an Boden- und Ionosphäre reflektierten Wellen auswertbare Differenzen ermitteln ließen. Trotzdem gibt es beim Vergleich der Einstufung der ermittelten Blitztypen mit anderen Blitzerfassungssystemen starke Diskrepanzen. Deshalb sollten weitere Untersuchungen durchgeführt werden, die statistisch eine Korrelation zwischen dem ermittelten Blitztyp aus der 3D-Rechnung und der Typisierung aus der Wellenformanalyse herstellen.

Die Unterscheidung von Wolken- und Erdblitzten aufgrund des ermittelten Höhenparameters ermöglichte Auswertungen der Amplitudenverteilungen getrennt nach Blitztyp und Polarität. Hierbei konnten die aus verschiedenen Publikationen bekannten Ergebnisse bestätigt werden, wonach ICs im Allgemeinen häufiger und statistisch mit kleineren Amplitudenwerten auftreten als CGs. Dass, wie ermittelt wurde, die negativen CGs die positiven und die positiven ICs ihre negativen Partner numerisch überwiegen, bestätigt die Resultate

aus anderen Publikationen. Die statistische Verteilung der Blitzhöhen mit einem Mittelwert von 10 km weist eine gute Übereinstimmung mit veröffentlichten Wolkenhöhen auf. Auch die anhand von Einzelbeispielen durchgeführten Überlagerungen von vertikalen Radarbildern der Gewitterwolken mit den zeitgleichen Blitzereignissen zeigen stimmige Ergebnisse hinsichtlich der Emissionshöhe.

Radardaten werden zur Zeit aber nicht nur für die soeben erwähnte Höhen-Validierung benutzt, sondern vor allem für Algorithmen zur frühen Unwetterwarnung, mit denen sich Gewitterzellen erkennen und verfolgen lassen. Geplant ist, diese Verfahren auf der Basis von Blitzdaten zu betreiben oder sogar ein kombiniertes Verfahren zu entwickeln, welches sowohl Blitz-, als auch Radardaten nutzt. Ein lokales, sehr genaues Unwetterwarnsystem könnte beispielsweise Flughafenbetreiber dabei unterstützen, vorausschauend mit 1 bis 3 Stunden Vorlaufzeit die Landebahnen entsprechend zu präparieren. Dabei wird sicherlich auch das Verhältnis CGs zu ICs eine Rolle bei der Kategorisierung der Gewitterstärke eine Rolle spielen, wobei wiederum die hier vorgestellte Blitztyperkennung wichtig ist.

Dreidimensionale Blitzentladungsprozesse konnten in der vorliegenden Arbeit erstmals mit Hilfe eines VLF-Messsystems dargestellt werden. Vorher waren solche *Radio Pictures* nur mit VHF-Systemen möglich. Da es bis heute noch weitestgehend unbekannt ist, welche Prozesse im Detail von VLF- und VHF-Systemen detektiert werden, ist es immer noch schwierig, ein Gesamtbild über Blitzabläufe zu rekonstruieren. Weitere Arbeiten sollten sich mit diesem Thema auseinandersetzen. Dafür ist es vor allem notwendig, VLF- und VHF-Systeme gemeinsam einzusetzen und die Ergebnisse, wenn möglich, auch mit optischen Aufzeichnungen und Feldmühlmessungen zu vergleichen.

Zunächst wurden jedoch im Jahr 2006 das bestehende, süddeutsche VLF-Netzwerk ausgeweitet und Stationen in Norddeutschland und an ausgewählten europäischen Standorten aufgebaut. Die nächsten Untersuchungen sollen ergeben, ob sich die in dieser Arbeit gezeigten Ergebnisse auch in einem größeren Gesamtnetz erzielen lassen. Insbesondere muss sich zeigen, ob die ermittelten Zeitfehler nur in speziellen Regionen gelten oder allgemein gültig sind.

Da die Blitzmessungen mit den gleichen Komponenten aber auch in verschiedenen Teilen der Erde vorgenommen wurden, namentlich in Deutschland, Brasilien und Australien, können auch regionale Unterschiede, beispielsweise statistische Blitzhöhenverteilungen, gut untersucht werden. Außerdem ist ein Vergleich der Amplitudenstärken sowie der Verhältnisse zwischen Wolken- und Bodenblitzen interessant. Solche Vergleiche sind in parallelen Arbeiten schon in Vorbereitung.

Im Zusammenhang mit den NO_x -Messungen in Flugzeugen wäre dann noch die Entwicklung von mobilen, dynamischen Messstationen zu überlegen, die in Flugzeugen eingesetzt werden könnten. Bisher sind die Messstationen ausschließlich am Boden installiert. Zusammen mit den dort gesammelten Daten würden sich sicherlich neue Erkenntnisse über die physikalischen Prozesse während der Blitzentladung ergeben.

Anhang A

Datenformatdefinition der Stationsdateien

Tabelle A.1: Datenformatdefinition der Stationsdateien – Header

Name	Bedeutung	größter Wert	kleinster Wert	Abstufung	Anzahl Werte	Anzahl Bits	Struktur
stationNr	Stationsnummer	65535	0	1	65536	16 (int)	1..16
fileFormat	Datenformat 6: short File	255	0	1	256	8 (char)	17..24
fileDatum	Aktuelles Datum YYYYMMDD	65535	0	1	65536	16 (int)	25..40

Tabelle A.2: Datenformatdefinition der Stationsdateien – Body

Name	Bedeutung	größter Wert	kleinster Wert	Abstufung	Anzahl Werte	Anzahl Bits	Struktur
ref_time	Referenzzeit in 100ns, Diagrammnullpunkt	$8640 \cdot 10^8$	0	1	$8640 \cdot 10^8$	40	1..40
rel_time1	Zeitabstand (in μs) von ref_time zum größten Maximum	512	0	512/4095 ($\sim 0,125\mu\text{s}$)	4096	12	41..52
rel_time2	Abstand (in μs) zum zweiten Amplituden- maximum	512	0	512/4095 ($\sim 0,125\mu\text{s}$)	4096	12	53..64
rel_time3	Abstand (in μs) zum dritten Amplituden- maximum	512	0	512/4095 ($\sim 0,125\mu\text{s}$)	4096	12	65..76
rel_time4	Abstand (in μs) zum vierten Amplituden- maximum	512	0	512/4095 ($\sim 0,125\mu\text{s}$)	4096	12	77..88

Tabelle A.2: Datenformatdefinition der Stationsdateien – Body (Fortsetzung)

Name	Bedeutung	größter Wert	kleinster Wert	Abstufung	Anzahl Werte	Anzahl Bits	Struktur
hx	Wert Kanal hx am Amplitudenmaximum	8192	-8192	1	16384	14	89..102
hy	Wert Kanal hy am Amplitudenmaximum	8192	-8192	1	16384	14	103..116
angle	Gemittelter Winkel über die Breite des größten Maximums	360 (359,648= 0x3FE)	0	360/1023 ($\sim 0,352$)	1024	10	117..126
type	Erkannter Peaktyp	16	0	1	16	4	127..130
rel_type_time	Abstand zum Nulldurchgang bei entsprechender Peakerkennung	512	0	512/4095	4096	12	131..142
fit_sigma	Sigma aus Gaussfit des größten Amplitudenmaximums	25,5	0	0,1	256	8	143..150
fft_sum0	FFT-Summierung 0-20 kHz	100	0	1	100	7	151..157
fft_sum1	FFT-Summierung 20-40 kHz	100	0	1	100	7	158..164
fft_sum2	FFT-Summierung 40-60 kHz	100	0	1	100	7	165..171
fft_sum3	FFT-Summierung 60-80 kHz	100	0	1	100	7	172..178

Anhang B

Analytische Startpunktermittlung mit Zeiten von drei Stationen

B.1 Parametrisierte Form einer Hyperbel mit einem Brennpunkt als Koordinatenursprung

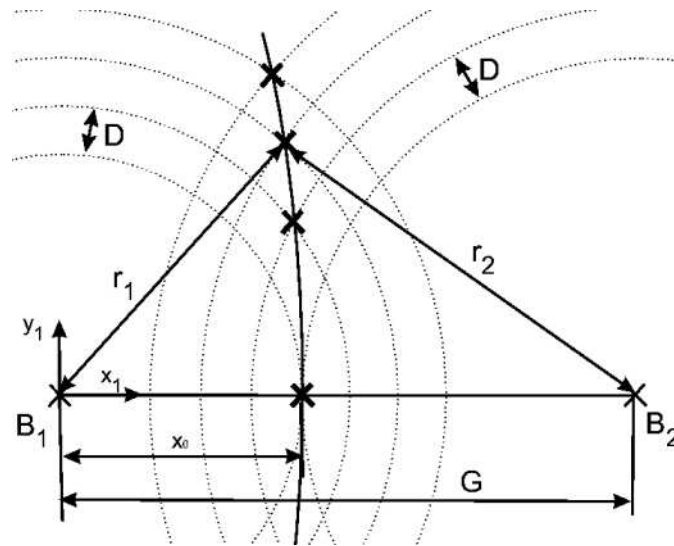


Abbildung B.1: Darstellung zur Herleitung der parametrisierten Gleichung für alle Punkte auf dem Ast der Hyperbel. Der Koordinatenursprung liegt in B_1 der blitznächsten Station.

Die Hyperbel ist der geometrische Ort aller Punkte, bei denen die Differenz r_1 und r_2 von zwei Brennpunkten B_1 und B_2 konstant ist. Sei B_1 (o.B.d.A.) die Station mit der kleineren Ankunftszeit, so bleibt nur der Hyperbelast zu betrachten, der näher an B_1 liegt. Des Weiteren sei die Gesamtstrecke

$$G = \overline{B_1 B_2} \quad (\text{B.1})$$

und

$$D = r_2 - r_1 \quad (\text{B.2})$$

die konstante Differenz der beiden Strecken von einem beliebigen Aufpunkt P der Hyperbel zu den beiden Brennpunkten B_1 und B_2 .

Der Koordinatenursprung liege in B_1 , der Einheitsvektor der x-Achse zeige in Richtung B_2 . Die zu untersuchende Hyperbel schneidet die x-Achse bei

$$x_0 = \frac{1}{2} (G - D) \quad (\text{B.3})$$

Zeichnet man um B_1 und B_2 Kreispaaire mit einer konstanten Radiendifferenz D , so ergibt sich per definitionem die Hyperbel aus der Menge aller Schnittpunkte. Der kleinste Kreis um B_1 hat somit den Radius $r_1 = x_0$.

Sei $dr \in R[0, \infty)$ ein Parameter der Hyperbel, so dass

$$r_1 = x_0 + dr. \quad (\text{B.4})$$

Nach Aufstellung der Kreisgleichungen für Kreispaaire um B_1 (I) und B_2 (II)

$$\begin{aligned} I: \quad x^2 + y^2 &= (x_0 + dr)^2 \\ II: \quad (G - x)^2 + y^2 &= (G - x_0 + dr)^2 \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

erhält man nach der Differenzbildung ($I - II$) folgenden linearen Zusammenhang:

$$dr = (x_0 - x) \frac{G}{D}. \quad (\text{B.6})$$

B.2 Linearer Zusammenhang der Darstellung eines Punktes aus zwei Koordinatensystemen mit gleichem Ursprungsort

Sei $K1$ das kartesische Koordinatensystem mit Ursprung in B_1 , der Einheitsvektor \vec{x}_1 zeige in Richtung B_2 , \vec{y}_1 stehe entsprechend senkrecht dazu. Weiterhin sei $K2$ das kartesische Koordinatensystem ebenfalls mit Ursprung in B_1 , der Einheitsvektor \vec{x}_2 in Richtung B_3 zeigend. $K2$ geht demnach aus $K1$ durch eine Drehung um

$$\alpha = \angle(B_2, B_1, B_3) \quad (\text{B.7})$$

hervor.

Sei BL ein Aufpunkt, der in $K1$ und $K2$ ausgedrückt werden soll, als (a_1, b_1) in $K1$ und (a_2, b_2) in $K2$ mit $R = \overline{B_1 BL}$.

Es seien $\phi_1 = \angle(B_2, B_1, BL)$ und $\phi_2 = \angle(B_3, B_1, BL)$, so dass $\alpha = \phi_1 - \phi_2$ ist.

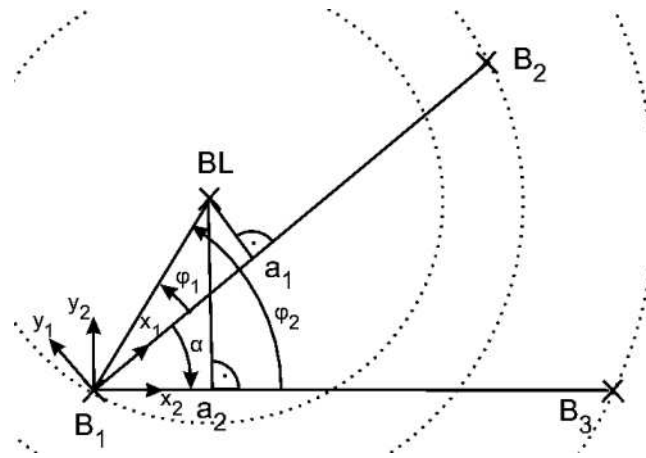


Abbildung B.2: Darstellung des Lösungspunktes BL in zwei Koordinatensystemen $K1, K2$.

Es ergibt sich

$$a_1 = R \cos \phi_1 b_1 = R \sin \phi_1 \quad (\text{B.8})$$

$$a_2 = R \cos \phi_2 b_2 = R \sin \phi_2 \quad (\text{B.9})$$

$$(\text{B.10})$$

Aus der Addition von a_1 und a_2 sowie dem Einsetzen von $\alpha = \phi_1 - \phi_2$ folgt:

$$a_2 = a_1 \cos \alpha + b_1 \sin \alpha \quad (\text{B.11})$$

Aufgelöst nach b_1 erhält man einen linearen Zusammenhang des Punktes BL , der beide Koordinatensysteme miteinander verknüpft.

$$b_1 = \frac{a_2 - a_1 \cos \alpha}{\sin \alpha} \quad (\text{B.12})$$

Sei BL ein möglicher Schnittpunkt zweier Hyperbeläste in $K1$ und $K2$ mit jeweils B_1 als hyperbelnächsten Brennpunkt. Gleichung B.4 gilt dann in $K1$ und $K2$

$$R = x_{01} + dr_1 = x_{02} + dr_2 \quad (\text{B.13})$$

wobei der Index 1 für $K1$ und der Index 2 für $K2$ gilt.

Gleichung B.6 für $K1$ und $K2$ lautet dann:

$$dr_1 = (x_{01} - a_1) \frac{G1}{D1}; \quad dr_2 = (x_{02} - a_2) \frac{G2}{D2}. \quad (\text{B.14})$$

Daraus ergibt sich mit Gleichung B.13:

$$x_{01} + (x_{01} - a_1) \frac{G1}{D1} = x_{02} + (x_{02} - a_2) \frac{G2}{D2} \quad (\text{B.15})$$

Bringt man Gleichung B.15 in die lineare Form

$$a_2 = m a_1 + n \quad (\text{B.16})$$

ergibt sich für m und n

$$\begin{aligned} m &= \frac{G_1 D_1}{G_2 D_2} \\ n &= x_{02} + \frac{D_2}{G_2} (x_{02} - x_{01}) - \frac{G_1 D_2}{G_2 D_1} x_{01}. \end{aligned} \quad (\text{B.17})$$

B.3 Ermittlung der Schnittpunkte zweier Hyperbeläste

Die in Kapitel B.2 vorgestellten Hyperbeläste schneiden sich im Allgemeinen in zwei Schnittpunkten BL_1 und BL_2 . Zur Berechnung dieser Schnittpunkte werden b_1 auf zwei Arten als $b_1 = f(a_1)$ dargestellt und die nachfolgenden Gleichungssysteme A und B voneinander abgezogen. Anschließend wird so umgestellt, dass a_1 in der Form

$$0 = z a_1^2 + p a_1 + q \quad (\text{B.18})$$

aufgestellt werden kann.

$$\begin{aligned} A: b_1^2 &= R^2 - a_1^2 \\ B: b_1^2 &= \left(\frac{a_2 - a_1 \cos \alpha}{\sin \alpha} \right)^2 \end{aligned} \quad (\text{B.19})$$

Die Umformung von A erfolgt mit Gleichung B.4 und Gleichung B.6

$$\begin{aligned} A: b_1^2 &= (x_{01} + dr_1)^2 - a_1^2 \\ &= \left(x_{01} + \frac{G_1}{D_1} (x_{01} - a_1) \right)^2 - a_1^2 \\ &\dots \\ &= \left[\left(\frac{G_1}{D_1} \right)^2 - 1 \right] a_1^2 - 2x_{01} \left[\left(\frac{G_1}{D_1} \right)^2 + \frac{G_1}{D_1} \right] a_1 + x_{01}^2 \left(\frac{G_1}{D_1} + 1 \right)^2 \end{aligned} \quad (\text{B.20})$$

Die Umformung von B erfolgt mit Hilfe von Gleichung B.16:

$$\begin{aligned} B: b_1^2 &= \left(\frac{a_2 - a_1 \cos \alpha}{\sin \alpha} \right)^2 \\ &= \frac{1}{\sin^2 \alpha} (m a_1 + n - a_1 \cos \alpha)^2 \\ &\dots \\ &= \frac{1}{\sin^2 \alpha} \left((m - \cos \alpha)^2 a_1^2 + 2n(m - \cos \alpha) a_1 + n^2 \right) \end{aligned} \quad (\text{B.21})$$

Durch Koeffizientenvergleich folgt für z , p und q

$$\begin{aligned}
 z &= \left[\left(\frac{G1}{D1} \right)^2 - 1 \right] - \left(\frac{m - \cos \alpha}{\sin \alpha} \right)^2 \\
 p &= -2x_{01} \left[\left(\frac{G1}{D1} \right)^2 + \frac{G1}{D1} \right] - \frac{2n}{\sin^2 \alpha} (m - \cos \alpha) \\
 q &= \left[x_{01} \left(\frac{G1}{D1} + 1 \right) \right]^2 - \frac{n^2}{\sin^2 \alpha}
 \end{aligned} \tag{B.22}$$

Damit ergeben sich die beiden Lösungen für $K1$

$$\begin{aligned}
 a_1^{L1/L2} &= -\frac{p}{2z} \pm \frac{\sqrt{p^2 - 4zq}}{2z} \\
 b_1^{L1/L2} &= \frac{m a_1^{L1/L2} + n}{\sin \alpha} - a_1^{L1/L2}
 \end{aligned} \tag{B.23}$$

Literaturverzeichnis

- [Al'pert und Fligel' 1970] AL'PERT, Y.L. ; FLIGEL', D.S.: *Propagation of ELF and VLF waves near the earth*, Consultants Bureau, New York - London, 1970
- [Arnold und Pierce 1964] ARNOLD, H.R. ; PIERCE, E.T.: Leader and junction processes in the lightning discharge as a source of VLF atmospherics. In: *Radio Science* 68 (D) (1964), S. 771–776
- [Beasley u. a. 1982] BEASLEY, W. ; UMAN, M.A. ; RUSTANJR., P.L.: Electric fields preceding cloud-to-ground lightning flashes. In: *J. Geophys. Res.* 87 (1982), S. 4883–4902
- [Betz u. a. 2004] BETZ, H.-D. ; SCHMIDT, K. ; OETTINGER, P. ; WIRZ, M.: Lightning detection with 3-D discrimination of intracloud and cloud-to-ground discharges. In: *Geophys. Res. Lett.* 31, L11108 (2004)
- [Bils u. a. 1988] BILS, J.R. ; THOMSON, E.M. ; UMAN, M.A.: Electric field pulses in close lightning cloud flashes. In: *J. Geophys. Res.* 93 (1988), S. 15933–15940
- [Brook u. a. 1982] BROOK, M. ; NAKANO, M. ; KREHBIEL, P.: The Electrical Structure of the Hokuriku Winter Thunderstorms. In: *J. Geophys. Res.* 87 (1982), S. 1207–1215
- [Christian u. a. 1999] CHRISTIAN, H.J. ; BLAKESLEE, R.J. ; GOODMAN, S.J. ; MACH, D.A. ; STEWART, M.F. ; BUECHLER, D.E. ; KOSHAK, W.J. ; HALL, J.M. ; BOECK, W.L. ; DRISCOLL, K.T. ; BOCIPPIO, D.J.: The Lightning Imaging Sensor. In: *11th International Conference on Atmospheric Electricity*. Guntersville, Alabama, 1999
- [Clarence und Malan 1957] CLARENCE, N.D. ; MALAN, D.J.: Preliminary discharge processes in lightning flashes to ground. In: *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* 83 (1957), S. 161–172
- [Clilverd u. a. 1999] CLILVERD, M.A. ; YEO, R.F. ; NUNN, D.: Latitudinally dependent Trimpf effects: Modeling and observations. In: *J. Geophys. Res.* 104 (1999), S. 19881–19887
- [Cooray 1997] COORAY, V.: Electric field at the discharge tip couples the speed and currents of dart leaders, return strokes and M-components. In: *J. Electrostat.* 40-41 (1997), S. 85–90

- [Cooray und Gomes 1998] COORAY, V. ; GOMES, C.: Estimation of peak return stroke currents, current time derivatives and return stroke velocities from measured fields. In: *J. Electrostat.* 43 (1998), S. 163–172
- [Cooray und Ming 1994] COORAY, V. ; MING, Y.: Propagation effects on the lightning-generated electromagnetic fields for homogeneous and mixed sea-land paths. In: *J. Geophys. Res.* 99 (1994), S. 10641–10652
- [Cummins u. a. 1998] CUMMINS, K.L. ; MURPHY, M.J. ; BARDO, E.A. ; HISCOX, W.L. ; PIFER, A.E.: A Combined TOA/MDF Technology Upgrade of the U. S. National Lightning Detection Network. In: *J. Geophys. Res.* 103 (1998), S. 9035–9044
- [da Silva Ferro u. a. 2005] DA SILVA FERRO, M.A. ; PINTO JR., O. ; SABA, M.M.F. ; SCHULZ, W. ; DIENDORFER, G. ; HOLZWORTH, R.H. ; BETZ, H.-D. ; HOELLER, H. ; FEHR, T.: Comparison among lightning data obtained by different lightning location systems and a fast electric field antenna in southeastern Brazil. In: *8th International Symposium on Lightning Protection (SIPDA)*. Sao Paulo, Brazil, 2005
- [de Miranda u. a. 2003] DE MIRANDA, F.J. ; PINTO JR., O. ; SABA, M.M.F.: A study of the time interval between return strokes and K-changes of negative cloud-to-ground lightning flashes in Brazil. In: *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.* 65 (2003), S. 293–297
- [Diendorfer u. a. 2002] DIENDORFER, G. ; HADRIAN, W. ; HOFBAUER, F. ; MAIR, M. ; SCHULZ, W.: Evaluation of lightning location data employing measurements of direct strikes to a radio tower. In: *39th CIGRE Session*. Paris, France, 2002
- [Diendorfer u. a. 2003] DIENDORFER, G. ; VIEHBERGER, M. ; MAIR, M. ; SCHULZ, W.: An attempt to determine currents in lightning channel branches from optical data of a high speed video system. In: *Int. Conference on Lightning and Static Electricity*. Blackpool, UK, 2003
- [Dotzek u. a. 2005] DOTZEK, N. ; RABIN, R.M. ; CAREY, L.D. ; MACGORMAN, D.R. ; MCCORMICK, T.L. ; DEMETRIADES, N.W. ; MURPHY, M.J. ; HOLLE, R.L.: Lightning Activity Related to Satellite and Radar Observations of a Mesoscale Convective System over Texas on 7-8 April 2002. In: *Atmos. Res.* 76 (2005), S. 127–166
- [Dowden und Adams 1993] DOWDEN, R.L. ; ADAMS, C.D.D.: Size and location of lightning-induced ionisation enhancements from measurement of VLF phase and amplitude perturbations on multiple antennas. In: *J. Atmos. Terr. Phys.* 55 (1993), S. 1335–1359
- [Dowden u. a. 2002] DOWDEN, R.L. ; BRUNDELL, J.B. ; RODGER, C.J.: VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites. In: *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.* 64 (2002), S. 817–830

- [Dwyer 2005] DWYER, J.R.: Vom Blitz getroffen. In: *Spektrum der Wissenschaft* 11 (2005), S. 39–46
- [Dwyer u. a. 2004a] DWYER, J.R. ; RASSOUL, H.K. ; AL-DAYEH, M. ; CARAWAY, L. ; WRIGHT, B. ; CREST, A.: Measurements of x-ray emission from rocket-triggered lightning. In: *Geophys. Res. Lett.* 31, L05118 (2004)
- [Dwyer u. a. 2004b] DWYER, J.R. ; RASSOUL, H.K. ; AL-DAYEH, M. ; CARAWAY, L. ; WRIGHT, B. ; UMAN, M.A. ; RAKOV, V.A. ; RAMBO, K.J. ; JORDAN, D.M. ; JERAULD, J. ; SMITH, C.: A ground level gamma-ray burst observed in association with rocket-triggered lightning. In: *Geophys. Res. Lett.* 31, L05119 (2004)
- [Eack 2004] EACK, K.B.: Electrical characteristics of narrow bipolar events. In: *Geophys. Res. Lett.* 31, L20102 (2004)
- [Fehr u. a. 2004] FEHR, T. ; HÖLLER, H. ; HUNTRIESER, H.: Model study on production and transport of lightning produced NO_x in a EULINOX supercell storm. In: *J. Geophys. Res.* 109, D09102 (2004)
- [Gomes u. a. 2004] GOMES, C. ; COORAY, V. ; FERNANDO, M. ; MONTANO, R. ; SONNADARA, U.: Characteristics of chaotic pulse trains generated by lightning flashes. In: *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.* 66 (2004), S. 1733–1743
- [Hamer 1998] HAMER, G.L.: The Met office's upgraded lightning location system. In: *Phys. Chem. Earth* 23 (5-6) (1998), S. 619–622
- [Heavner u. a. 2002] HEAVNER, M.J. ; SMITH, D.A. ; JACOBSON, A.R. ; SHELDON, R.J.: LF/VLF and VHF lightning fast-stepped leader observations. In: *J. Geophys. Res.* 107 (D24) (2002)
- [Heavner u. a. 2003] HEAVNER, M.J. ; SUSZCYNKY, D.M. ; SMITH, D.A.: LF/VLF Intracloud Waveform Classification. In: *International Conference on Atmospheric Electricity*. Versailles, France, 2003
- [Heidler 1987] HEIDLER, F.: *Lightning electromagnetic impulse – Theorie und Messungen*, Universität der Bundeswehr, Dissertation, 1987
- [Heidler u. a. 1996] HEIDLER, F. ; HOPF, Ch. ; ZUNDL, T. ; MONTANDON, E. ; RUBINSTEIN, M. ; STEINBIGLER, H.: Lightning location and direct current measurement. In: *23rd International Conference on Lightning Protection*. Florence, Italy, 1996
- [Helliwell u. a. 1973] HELLIWELL, R.A. ; KATSUFRAKIS, J.P. ; TRIMPI, M.L.: Whistler-induced amplitude perturbation in VLF propagation. In: *J. Geophys. Res.* 78 (1973), S. 4679–4688

- [Höller u. a. 2000] HÖLLER, H. ; FEHR, T. ; THERY, C. ; SELTMAN, J. ; HUNTRIESER, H.: Radar, lightning, airborne observations and modelling of a supercell storm during EULINOX. In: *Phys. Chem. Earth(B)* 25 (10-12) (2000), S. 1281–1284
- [Höller und Schumann 2000] HÖLLER, H. ; SCHUMANN, U.(Eds.): EULINOX – The European Lightning Nitrogen Oxides Experiment / Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Köln, Germany, 2000 (2000-28). – Forschungsbericht
- [Honma u. a. 1998] HONMA, N. ; SUZUKI, F. ; MIYAKE, Y. ; ISHII, M. ; HIDAYAT, S.: Propagation effect on field waveforms in relation to time-of-arrival technique in lightning location. In: *J. Geophys. Res.* 103 (1998), S. 14141–14145
- [Idone u. a. 1998a] IDONE, V.P. ; DAVIS, D.A. ; MOORE, P.K. ; HENDERSON, Y. Wang R.: Performance evaluation of the U.S. National Lightning Detection Network in eastern New York, 1. Detection efficiency. In: *J. Geophys. Res.* 103 (1998), S. 9045–9055
- [Idone u. a. 1998b] IDONE, V.P. ; DAVIS, D.A. ; MOORE, P.K. ; HENDERSON, Y. Wang R.: Performance evaluation of the U.S. National Lightning Detection Network in eastern New York, 2. Location accuracy. In: *J. Geophys. Res.* 103 (1998), S. 9057–9069
- [Idone und Orville 1982] IDONE, V.P. ; ORVILLE, R.E.: Lightning return stroke velocities in the Thunderstorm Research International Program (TRIP). In: *J. Geophys. Res.* 87 (1982), S. 4903–4915
- [Iribarne und Cho 1980] IRIBARNE, J.V. ; CHO, H.-R.: *Atmospheric Physics*. 1980
- [Jacobson und Heavner 2005] JACOBSON, A.R. ; HEAVNER, M.J.: Comparison of narrow bipolar events with ordinary lightning as proxies for severe convection. In: *Mon. Wea. Rev.* 133 (2005), S. 1144–1154
- [Jerauld u. a. 2004] JERAULD, J. ; UMAN, M.A. ; RAKOV, V.A. ; RAMBO, K.J. ; JORDAN, D.M.: A triggered lightning flash containing both negative and positive strokes. In: *Geophys. Res. Lett.* 31, L08104 (2004)
- [Kitagawa und Brook 1960] KITAGAWA, N. ; BROOK, M.: A Comparison of Intracloud and Cloud-to-Ground Lightning Discharges. In: *J. Geophys. Res.* 65 (1960), S. 1189–1201
- [Koshak und Krider 1989] KOSHAK, W.J. ; KRIDER, E.P.: Analysis of lightning changes during active Florida thunderstorms. In: *J. Geophys. Res.* 94 (1989), S. 1165–1186
- [Koshak und Solakiewicz 1996] KOSHAK, W.J. ; SOLAKIEWICZ, R.J.: On the retrieval of lightning radio sources from time-of-arrival. In: *J. Geophys. Res.* 101 (1996), S. 26631–26639
- [Koshak und Solakiewicz 2001] KOSHAK, W.J. ; SOLAKIEWICZ, R.J.: TOA Lightning location retrieval on spherical and oblate spheroidal earth geometries. In: *J. Atmos. Ocean. Technol.* 18 (2001), S. 187–199

- [Koshak u. a. 2004] KOSHAK, W.J. ; SOLAKIEWICZ, R.J. ; BLAKESLEE, R.J. ; GOODMAN, S.J. ; CHRISTIAN, H.J. ; HALL, J.M. ; BAILEY, J.C. ; KRIDER, E.P. ; BATEMAN, M.G. ; BOCCIPPIO, D.J. ; MACH, D.M. ; MCCAUL, E.W. ; STEWART, M.F. ; BUECHLER, D.E. ; PETERSEN, W.A. ; CECIL, D.J.: Nort Alabama Lightning Mapping Array (LMA): VHF Source Retrieval Algorithm and Error Analyses. In: *J. Atmos. Ocean. Technol.* 21 (2004), S. 543–558
- [Krehbiel u. a. 1979] KREHBIEL, P.R. ; BROOK, M. ; MCCRORY, R.A.: An Analysis of the Charge Structure of the Lightning Discharges to Ground. In: *J. Geophys. Res.* 84 (1979), S. 2432–2456
- [Krider 1975] KRIDER, E.P.: An all-sky camera for time-resolved lightning photography. In: *J. Appl. Met.* 14 (1975), S. 249–252
- [Krider und Noggle 1975] KRIDER, E.P. ; NOGGLE, R.C.: Broadband antenna systems for lightning magnetic fields. In: *J. Appl. Met.* 14 (1975), S. 252–256
- [Krider und Noggle 1976] KRIDER, E.P. ; NOGGLE, R.C.: A gated, wideband magnetic direction finder for lightning return strokes. In: *J. Appl. Met.* 15 (1976), S. 301–306
- [Krider u. a. 1977] KRIDER, E.P. ; WEIDMAN, C.D. ; NOGGLE, R.C.: The electric fields produced by lightning stepped leaders. In: *J. Geophys. Res.* 82 (1977), S. 951–960
- [Krider 2003] KRIDER, P.E.: Deciphering the energetics of lightning. In: *Science* 299 (2003), S. 669–670
- [Kulzer u. a. 1996] KULZER, R. ; BETZ, H.D. ; OETTINGER, W.P. ; EISERT, B.: Simultane Registrierung von VLF-Atmospherics (Sferics) an verschiedenen Orten. In: *Kleinheubacher Berichte (ed. Deutsche Telekom)* 40 (1996), S. 277–285
- [Lay u. a. 2004] LAY, E.H. ; HOLZWORTH, R.H. ; RODGER, C.J. ; THOMAS, J.N. ; PINTO JR., O. ; DOWDEN, R.L.: WWLL global lightning detection system: Regional validation study in Brazil. In: *Geophys. Res. Lett.* 31, L03102 (2004)
- [Le Vine 1980] LE VINE, D.M.: Sources of the Strongest RF Radiation From Lightning. In: *J. Geophys. Res.* 85 (1980), S. 4091–4095
- [Lee 1986a] LEE, A.C.L.: An experimental study of the remote location of lightning flashes using a VLF arrival time difference technique. In: *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* 112 (1986), S. 203–229
- [Lee 1986b] LEE, A.C.L.: An operational system for the remote location of lightning flashes using a VLF arrival time difference technique. In: *J. Atmos. Ocean. Technol.* 3 (1986), S. 630–642

- [Lee 1989] LEE, A.C.L.: Ground truth confirmation and theoretical limits of an experimental VLF arrival time difference lightning flash locating system. In: *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* 115 (1989), S. 1147–1166
- [Lewis u. a. 1960] LEWIS, E.A. ; HARVEY, R.B. ; RASMUSSEN, J.E.: Hyperbolic direction finding with sferics of transatlantic origin. In: *J. Geophys. Res.* 65 (1960), S. 1879–1905
- [Light und Jacobson 2002] LIGHT, T.E.L. ; JACOBSON, A.R.: Characteristics of impulsive VHF lightning signals observed by the FORTE satellite. In: *J. Geophys. Res.* 107 (D24) (2002)
- [Loboda und Thern 2004] LOBODA, M. ; THERN, S.: Lightning activity data over Poland detected by CELDN (Central European Lightning Detection Network). In: *18th International Lightning Detection Conference (ILDC)*. Helsinki, Finland, 2004
- [Mach u. a. 1986] MACH, D.M. ; MACGORMAN, D.R. ; RUST, W.D. ; ARNOLD, R.T.: Site errors and detection efficiency in a magnetic direction-finder network for locating lightning strikes to ground. In: *J. Atmos. Ocean. Technol.* 3 (1986), S. 67–74
- [Mansell u. a. 2005] MANSELL, E. ; MACGORMAN, D.R. ; ZIEGLER, C.L.: Charge structure and lightning sensitivity in a simulated multicell thunderstorm. In: *J. Geophys. Res.* 110, D12101 (2005), S. 5141–5150
- [Mardiana u. a. 2002] MARDIANA, R. ; KAWASAKI, Z.-I. ; MORIMOTO, T.: Three-dimensional lightning observations of cloud-to-ground flashes using broadband interferometers. In: *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.* 64 (2002), S. 91–103
- [Marshall u. a. 2005] MARSHALL, T.C. ; STOLZENBURG, M. ; MAGGIO, C.R. ; COLEMAN, L.M. ; KREHBIEL, P.R. ; HAMLIN, T. ; THOMAS, R.J. ; RISON, W.: Observed electric fields associated with lightning initiation. In: *Geophys. Res. Lett.* 32, L03813 (2005)
- [McDonald u. a. 1979] MCDONALD, T.B. ; UMAN, M.A. ; TILLER, J.A. ; BEASLEY, W.H.: Lightning location and lower-ionospheric height determination from two-station magnetic field measurement. In: *J. Geophys. Res.* 84 (1979), S. 1727–1734
- [Morales und Anagnostou 2005] MORALES, C.A. ; ANAGNOSTOU, E.E.: Evaluation of the peak current polarity retrieved by the ZEUS Long Range Lightning Monitoring. In: *8th International Symposium on Lightning Protection (SIPDA)*. Sao Paulo, Brazil, 2005
- [Morimoto u. a. 2004] MORIMOTO, T. ; HIRATA, A. ; KAWASAKI, Z. ; USHIDO, T. ; MATSUMOTO, Akinori ; HO, L.J.: An operational VHF broadband digital interferometer for lightning monitoring. In: *IEEJ Trans. FM* 124 (2004), Nr. 12
- [Morimoto u. a. 2005] MORIMOTO, T. ; KAWASAKI, Z. ; USHIDO, T.: Lightning observations and consideration of positive charge distribution inside thunderclouds using VHF broadband digital interferometry. In: *Atmos. Res.* 76 (2005), S. 445–454

- [Neubert u. a. 2005] NEUBERT, T. ; ALLIN, T.H. ; BLANC, E. ; FARGES, T. ; HALDOUPIS, C. ; MIKA, A. ; SOULA, S. ; KNUTSON, L. ; VANDERVELDE, O. ; MARSHALL, R.A. ; INAN, U. ; SATORI, G. ; BOR, J. ; HUGHES, A. ; CILLIER, A. ; LAURSEN, S. ; RASMUSSEN, I.L.: Co-ordinated observations of transient luminous events during the EuroSprite2003 campaign. In: *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.* 67 (2005), S. 807–820
- [Nguyen und Michnowski 1996] NGUYEN, M.D. ; MICHNOWSKI, S.: On the initiation of lightning discharge in a cloud 1. The high field regions in a thundercloud. In: *J. Geophys. Res.* 101 (1996), S. 26669–26673
- [Nucci u. a. 1990] NUCCI, C.A. ; DIENDORFER, G. ; UMAN, M.A. ; RACHIDI, F. ; IANDOZ, M. ; MAZZETTI, C.: Lightning return stroke current models with specified channel-base current: A review and comparison. In: *J. Geophys. Res.* 95 (1990), S. 20395–20408
- [Oettinger u. a. 2000] OETTINGER, W.P. ; EISERT, B. ; GERL, A. ; BETZ, H.D.: Blitz-Registrierung mittels VLF-Messungen – Ein automatisches Gewitter-Warnsystem. In: *Kleinheubacher Berichte (ed. Deutsche Telekom)* 43 (2000), S. 162–167
- [Oetzel und Pierce 1969] OETZEL, G.N. ; PIERCE, E.T.: VHF technique for locating lightning. In: *Radio Science* 4 (1969), S. 199–202
- [Ogawa 1995] OGAWA, T.: *Lightning currents*. S. 93–136. In: VOLLAND, H. (Hrsg.): *Handbook of Atmospheric*, Vol. I, Boca Raton, FL: CRC Press, 1995
- [Olsen u. a. 2004] OLSEN, R.C.III ; JORDAN, D.M. ; RAKOV, V.A. ; UMAN, M.A. ; GRIMES, N.: Observed one-dimensional return stroke propagation speeds in the bottom 170 m of a rocket-triggered lightning channel. In: *Geophys. Res. Lett.* 31, L16107 (2004)
- [Orville 1991] ORVILLE, R.E.: Calibration of a magnetic direction finding network using measured triggered lightning return stroke peak currents. In: *J. Geophys. Res.* 96 (1991), S. 17135–17142
- [Orville und Huffines 2001] ORVILLE, R.E. ; HUFFINES, G.R.: Cloud-to-Ground Lightning in the United States: NLDN Results in the First Decade, 1989-98. In: *Mon. Wea. Rev.* 129 (2001), S. 1179–1193
- [Orville Jr 1987] ORVILLE JR, R.E.: An analytic solution to obtain the optimum source location using multiple direction finders on a spherical surface. In: *J. Geophys. Res.* 92 (1987), S. 10877–10866
- [Pichler u. a. 2004] PICHLER, H. ; DIENDORFER, G. ; MAIER, M.: Statistics of lightning current parameters measured at the Gaisberg tower. In: *18th International Lightning Detection Conference (ILDC)*. Helsinki, Finland, 2004
- [Pinto Jr. u. a. 2006] PINTO JR., O. ; NACCARATO, K.P. ; PINTO, I.R.C.A. ; FERNANDES, W.A. ; PINTO NETO, O.: Monthly distribution of cloud-to-ground lightning flashes as observed by lightning location systems. In: *Geophys. Res. Lett.* 33, L09811 (2006)

- [Pinto Jr. u. a. 2005] PINTO JR., O. ; PINTO, I.R.C.A. ; SABA, M.M.F. ; SOLORZANO, N.N. ; GUEDES, D.: Return stroke peak current observations of negative natural and triggered lightning in Brazil. In: *Atmos. Res.* 76 (2005), S. 493–502
- [Proctor 1981] PROCTOR, D.E.: VHF radio pictures of cloud flashes. In: *J. Geophys. Res.* 86 (1981), S. 4041–4071
- [Proctor 1997] PROCTOR, D.E.: Lightning with high origins. In: *J. Geophys. Res.* 102 (1997), S. 1693–1706
- [Proctor u. a. 1988] PROCTOR, D.E. ; UYTENBOGAARDT, R. ; MEREDITH, B.M.: VHF radio pictures of lightning flashes to ground. In: *J. Geophys. Res.* 93 (1988), S. 12683–12727
- [Qie u. a. 2005a] QIE, X. ; KONG, X. ; ZHANG, G. ; ZANG, T. ; YUAN, T. ; ZHOU, Y. ; ZANG, Y. ; WANG, H. ; SUN, A.: The possible charge structure of thunderstorm and lightning discharges in northeastern verge of Qinghai-Tibetan Plateau. In: *Atmos. Res.* 76 (2005), S. 231–246
- [Qie u. a. 2005b] QIE, X. ; ZANG, T. ; CHEN, C. ; ZHANG, G. ; ZHANG, T. ; WEI, W.: The lower positive charge center and its effect on lightning discharges on the Tibetan Plateau. In: *Geophys. Res. Lett.* 32, L05814 (2005)
- [Rachidi u. a. 2004] RACHIDI, F. ; BERMUDEZ, J.L. ; RUBINSTEIN, M. ; RAKOV, V.A.: On the estimation of lightning peak currents from measured fields using lightning location systems. In: *J. Electrostat.* 60 (2004), S. 121–129
- [Rakov und Uman 2003] RAKOV, V.A. ; UMAN, M.A.: *Lightning: physics and effects.* University Press, Cambridge, 2003
- [Rakov u. a. 1998] RAKOV, V.A. ; UMAN, M.A. ; RAMBO, K.J. ; FERNANDEZ, M.I. ; FISHER, R.J. ; SCHNETZER, G.H. ; THOTTAPPILLIL, R. ; EYBERT-BERARD, A. ; BERLANDIS, J.P. ; LALANDE, P. ; BONAMY, A. ; LAROCHE, P. ; BONDIU-CLERGERIE, A.: New insights into lightning processes gained from triggered-lightning experiments in Florida and Alabama. In: *J. Geophys. Res.* 103 (1998), S. 14117–14130
- [Richard u. a. 1986] RICHARD, P. ; DELANNOY, A. ; LABAUNE, G. ; LAROCHE, P.: Results of spatial and temporal characterization of the VHF-UHF radiation of lightning. In: *Geophys. Res. Lett.* 91 (1986), S. 1248–1260
- [Rodger u. a. 2004] RODGER, C.J. ; BRUNDELL, J.B. ; DOWDEN, R.L. ; THOMSON, N.R.: Location accuracy of long distance VLF lightning location network. In: *Annales Geophysicae* 22 (2004), S. 747–758

- [Rodger u. a. 2005] RODGER, C.J. ; LAY, E.H. ; WERNER, S.M. ; HOLZWORTH, R.H. ; DOWDEN, R.L. ; BRUNDELL, J.B. ; THOMSON, N.R.: The World Wide Lightning Location Network (WWLLN): Real-time global lightning detection and location. In: *28th URSI General Assembly*. New Delhi, India, 2005
- [Saba u. a. 2005] SABA, M.M.F. ; PINTO JR., O. ; SOLORZANO, N.N. ; EYBERT-BERARD, A.: Lightning current observation of an altitude-triggered flash. In: *Atmos. Res.* 76 (2005), S. 402–411
- [Schmidt u. a. 2004] SCHMIDT, K. ; BETZ, H.-D. ; OETTINGER, W.P. ; WIRZ, M. ; DIENDORFER, G.: A New Lightning Detection Network in Southern Germany. In: *27th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. Avignon, France, 2004
- [Schmidt u. a. 2005] SCHMIDT, K. ; BETZ, H.-D. ; OETTINGER, W.P. ; WIRZ, M. ; HÖLLER, H. ; FEHR, Th. ; PINTO, O. ; NACCARATO, K.P. ; HELD, G.: A comparative analysis of lightning data during the EU-Brazil TROCCINOX / TroCCiBras Campaign. In: *8th International Symposium on Lightning Protection (SIPDA)*. Sao Paulo, Brazil, 2005
- [Schoene u. a. 2003] SCHOENE, J. ; UMAN, M.A. ; RAKOV, V.A. ; RAMBO, K.J. ; JERAULD, J. ; SCHNETZER, G.H.: Test of the transmission line model and the traveling current source model with triggered lightning return strokes at very close range. In: *J. Geophys. Res.* 108 (D23) (2003)
- [Schulz und Diendorfer 2004] SCHULZ, W. ; DIENDORFER, G.: Lightning field peaks radiated by lightning to tall towers. In: *International Conference on Grounding and Earthing (GROUND)*. Belo Horizonte, Brazil, 2004
- [Shao und Krehbiel 1996] SHAO, X.M. ; KREHBIEL, P.R.: The spatial and temporal development of intracloud lightning. In: *J. Geophys. Res.* 101 (1996), S. 26641–26668
- [Sharma u. a. 2005] SHARMA, S.R. ; FERNANDO, M. ; GOMES, C.: Signatures of electric field pulses generated by cloud flashes. In: *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.* 67 (2005), S. 413–422
- [Smith u. a. 2002] SMITH, D.A. ; EACK, K.B. ; HARLIN, J. ; HEAVNER, M.J. ; JACOBSON, A.R. ; MASSEY, R.S. ; SHAO, X.M. ; WIENS, K.C.: The Los Alamos Sferic Array: A research tool for lightning investigations. In: *J. Geophys. Res.* 107 (D13) (2002)
- [Smith u. a. 2004] SMITH, D.A. ; HEAVNER, M.J. ; JACOBSON, A.R. ; SHAO, X.M. ; MASSEY, R.S. ; SHELDON, R.J. ; WIENS, K.C.: A method for determining intracloud lightning and ionospheric heights from VLF/LF electric field records. In: *Radio Science* 39, RS1010 (2004)
- [Smith u. a. 1999] SMITH, D.A. ; SHAO, X.M. ; HOLDEN, D.N. ; RHODES, C.T.: A distinct class of isolated intracloud lightning discharges. In: *J. Geophys. Res.* 104 (1999), S. 4189–4212

- [Solomon u. a. 2001] SOLOMON, R. ; SCHROEDER, V. ; BAKER, M.B.: Lightning initiation – conventional and runaway-breakdown hypothesis. In: *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* 127 (2001), S. 2683–2704
- [Stolzenburg u. a. 1998a] STOLZENBURG, M. ; RUST, W.D. ; MARSHALL, T.C.: Electrical structure in thunderstorm convective regions 2. Isolated storms. In: *J. Geophys. Res.* 103 (1998), S. 14079–14096
- [Stolzenburg u. a. 1998b] STOLZENBURG, M. ; RUST, W.D. ; MARSHALL, T.C.: Electrical structure in thunderstorm convective regions 3. Synthesis. In: *J. Geophys. Res.* 103 (1998), S. 14097–14108
- [Stolzenburg u. a. 1998c] STOLZENBURG, M. ; RUST, W.D. ; SMULL, B.F.: Electrical structure in thunderstorm convective regions 1. Mesoscale convective systems. In: *J. Geophys. Res.* 103 (1998), S. 14059–14078
- [Takeuti und Nakano 1978] TAKEUTI, T. ; NAKANO, M.: The anomalous winter thunderstorms of the Hokuriku coast. In: *J. Geophys. Res.* 83 (1978), S. 2385–2394
- [Tan u. a. 2006] TAN, Y. ; TAO, S. ; ZHU, B.: Fine-resolution simulation of the channel structures and propagation features of intracloud lightning. In: *Geophys. Res. Lett.* 33, L09809 (2006)
- [Thomas u. a. 2004] THOMAS, R.J. ; KREHBIEL, P.R. ; RISON, W. ; HUNYADY, S.J. ; WINN, W.P. ; HAMLIN, T. ; HARLIN, J.: Accuracy of the Lightning Mapping Array. In: *J. Geophys. Res.* 109, D14207 (2004)
- [Thomson u. a. 1994] THOMSON, E.M. ; MEDELIUS, P.J. ; DAVIS, S.: System for locating the sources of wideband dE/dt from lightning. In: *J. Geophys. Res.* 99 (1994), S. 22793–22802
- [Thottappillil u. a. 1997] THOTTAPPILLIL, R. ; RAKOV, V.A. ; UMAN, M.A.: Distribution of charge along the lightning channel: Relation to remote electric and magnetic fields and to return-stroke models. In: *J. Geophys. Res.* 102 (1997), S. 6987–7006
- [Thottappillil und Uman 1993] THOTTAPPILLIL, R. ; UMAN, M.A.: Comparison of lightning return stroke models. In: *J. Geophys. Res.* 98 (1993), S. 22903–22914
- [Uman u. a. 2002] UMAN, M.A. ; SCHOENE, J. ; RAKOV, V.A. ; RAMBO, K.J. ; SCHNETZER, G.H.: Correlated time derivatives of current, electric field intensity, and magnetic flux density for triggered lightning at 15 m. In: *J. Geophys. Res.* 107 (D13) (2002)
- [Ushio u. a. 1998] USHIO, T. ; KAWASAKI, Z.-I. ; MATSU-URA, K. ; WANG, D.: Electric fields of initial breakdown in positive ground flash. In: *J. Geophys. Res.* 103 (1998), S. 14135–14139

- [Villanueva u. a. 1994] VILLANUEVA, Y. ; RAKOV, V.A. ; UMAN, M.A.: Microsecond-scale electric field pulses in cloud lightning discharges. In: *J. Geophys. Res.* 99 (1994), S. 14353–14360
- [Visacro und Silveira 2004] VISACRO, S. ; SILVEIRA, F.H.: Evaluation of current distribution along the lightning discharge channel by a hybrid electromagnetic model. In: *J. Electrostat.* 60 (2004), S. 111–120
- [Volland 1995] VOLLAND, H.: *Longwave sferics propagation within the atmospheric waveguide.* S. 65–93. In: VOLLAND, H. (Hrsg.): *Handbook of Atmospheric Physics, Vol. II*, Boca Raton, FL: CRC Press, 1995
- [Wacker und Orville 1999] WACKER, R.S. ; ORVILLE, R.E.: Changes in measured lightning flash count and return stroke peak current after the 1994 U.S. National Lightning Detection Network upgrade, 1. Observations. In: *J. Geophys. Res.* 104 (1999), S. 2151–2157
- [Wang u. a. 1999] WANG, D. ; TAKAGI, N. ; WATANABE, T. ; RAKOV, V.A. ; UMAN, M.A.: Observed leader and return-stroke propagation characteristics in the bottom 400 m of a rocket-triggered lightning channel. In: *J. Geophys. Res.* 104 (1999), S. 14369–14376
- [Wang und Liao 2006] WANG, K.-Y. ; LIAO, S.-A.: Lightning, radar reflectivity, infrared brightness temperature, and surface rainfall during the 2–4 July 2004 severe convective system over Taiwan area. In: *J. Geophys. Res.* 111, D05206 (2006)
- [Weidman und Krider 1978] WEIDMAN, C.D. ; KRIDER, E.P.: The fine structure of lightning return stroke wave forms. In: *J. Geophys. Res.* 83 (1978), S. 6239–6247
- [Weidman und Krider 1979] WEIDMAN, C.D. ; KRIDER, E.P.: The radiation field wave forms produced by intracloud lightning discharge process. In: *J. Geophys. Res.* 84 (1979), S. 3159–3164
- [Willett u. a. 1989] WILLETT, J.C. ; BAILEY, J.C. ; KRIDER, E.P.: A class of unusual lightning electric field waveforms with very strong high-frequency radiation. In: *J. Geophys. Res.* 94 (1989), S. 16255–16267
- [Wirz 2003] WIRZ, M.: *Linux-basiertes A/D- Wandlersystem für große Datenraten und hohe Zeitauflösung*, Technische Universität Darmstadt, Diplomarbeit, 2003
- [Wood 2004] WOOD, T.G.: *Geo-Location of individual lightning discharges using impulsive VLF electromagnetic waveforms*, Stanford University, Dissertation, 2004
- [Yair u. a. 2004] YAIR, Y. ; ISRAELEVICH, P. ; DEVIR, A.D. ; MOALEM, M. ; PRICE, C. ; JOSEPH, J.H. ; LEVIN, Z. ; ZIV, B. ; STERNLIEB, A. ; TELLER, A.: New observations of sprites from the space shuttle. In: *J. Geophys. Res.* 109, D15201 (2004)

Danksagung

Am Ende dieser Arbeit möchte ich all jenen danken, ohne deren Hilfe und Unterstützung diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre, insbesondere:

Herrn Prof. Dr. H.-D. Betz für die Vergabe des interessanten und vielseitigen Themas sowie die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit,

Frau Prof. Dr. S. Crewell für die Übernahme der Zweitkorrektur und die Möglichkeit, die Zwischenergebnisse in ihrem Kolloquium präsentieren zu dürfen,

allen beteiligten Mitarbeitern des DLR in Oberpfaffenhofen, vor allem Herrn Dr. H. Höller für die vielen wertvollen Hinweise, zahlreichen Diskussionen und neuen Ideen in der Anwendung der gemessenen Blitzdaten,

Herrn Dr. G. Diendorfer und Herrn S. Thern für die Überlassung von BLIDS/ALDIS-Daten, die für wissenschaftliche Vergleichszwecke herangezogen werden konnten,

Herrn Dr. E. Defer für die Zusammenarbeit und die Bereitstellung der ZEUS-Daten,

Herrn Dr. A. Mugnai und Frau Dr. C. Adamo vom *Istituto di Fisica dell' Atmosfera* am CNR in Frascati, Italien, für das Überlassen der WWLLN-Daten,

Frau B. Fuchs und Frau L. Pfeiffer für unzählige Hilfen und engagiertes Korrekturlesen,

Herrn M. Wirz, Herrn P. Oettinger und Herrn M. Zich für ihre Mitarbeit in der Arbeitsgruppe und zahlreiche, fachliche Diskussionen,

den Mitarbeitern der mechanischen Werkstatt und der Elektronikwerkstatt für alle erledigten Aufträge.

Abschließend möchte ich meiner Frau Maria für den Ansporn und die Unterstützung danken.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Kersten Schmidt
Geburtsdaten: 10.11.1972 in Görlitz
Familienstand: verheiratet
Nationalität: deutsch

Schulbildung

09/1979 – 08/1989 Polytechnische Oberschule in Görlitz
09/1989 – 08/1992 Abitur mit Ausbildung zum Elektronikfacharbeiter
an der Berufsschule in Radeberg

Studium

09/1992 – 03/1996 Physikstudium an der TU-Dresden,
Vordiplomsabschluss
04/1996 – 02/1998 Physikstudium an der Universität in Freiburg im Breisgau,
Abschluss als Diplom-Physiker
06/2002 – 05/2007 Promotion im Bereich Atmosphärenphysik
an der LMU in München

Berufserfahrung

09/1999 – 03/2001 DBV-Winterthur Versicherungen
Anwendungsentwicklung im Bereich Lebens- und Restschuld-
versicherung
04/2001 – 05/2002 CENIS Consulting GmbH, Entwicklungsingenieur für BMW,
Entwicklung von Software für Getriebe- und Motorensteuerungen

Zivildienst

05/1998 – 05/1999 Goetheinstitut in Prien am Chiemsee