

# Absorption von atmosphärischen ELF-Impulsen

Steven Golden

Institut für Meteorologie und Geophysik,  
Universität Frankfurt  
Feldbergstr. 47 / 60323 Frankfurt am Main

Email: golden@geophysik.uni-frankfurt.de  
Web: <http://www.geophysik.uni-frankfurt.de/~golden>

## Einleitung

Die elektrisch schlecht leitende untere Atmosphäre bildet zwischen der gut leitenden Erdoberfläche und der unteren Ionosphäre einen Hohlleiter für niederfrequente elektromagnetische Wellen. Insbesondere Wellen im ELF (Extremely Low Frequency) Bereich von 10Hz-3kHz [1] können sich innerhalb dieses Hohlleiters besonders gut entlang der Erdoberfläche ausbreiten.

Blitze strahlen elektromagnetische Wellen (Sferics) mit einem sehr breiten Frequenzspektrum ab, das u.a. auch den ELF-Bereich überdeckt. Während höherfrequente Anteile, die sich als höhere Hohlleitermoden ausbreiten, stark absorbiert werden, erfahren die Wellen der nullten Mode nur eine schwache Absorption und können sich so rund um den Globus ausbreiten.

Doch auch ELF-Wellen erfahren auf Grund ohmscher Verluste Absorption<sup>1</sup>, mit einem Absorptionsparameter, der Information über die Leitfähigkeitsstruktur des Hohlleiters enthält. Im folgenden wird eine Methode beschrieben, um diesen Absorptionsparameter aus Aufzeichnungen von Sferics an verschiedenen Messstationen zu bestimmen.

Dazu werden Übertragungsfunktionen zwischen den an verschiedenen Messorten aufgezeichneten ELF-Impulsen des gleichen Sferics bestimmt. Kennt man den Quellort des verursachenden Blitzes, so kann man aus einem Modell für die Absorption von ELF-Impulsen diese Übertragungsfunktionen modellieren. Als Modell wird hierbei das Produkt aus einem exponentiellen absorptionsbedingten und einem geometrischen Abfall angenommen. Es interessieren insbesondere zeitliche Veränderungen des Absorptionsparameters (z.B. Tag/Nacht-Unterschied), die Informationen über den jeweiligen Zustand der Ionosphäre enthalten.

## Das Modell

Es wird hier davon ausgegangen, dass ab einer Entfernung von der Quelle, die mehrere Vielfache der Höhe der D-Schicht beträgt (Entfernung > ~500km), alle höheren Hohlleitermoden der ELF-Welle soweit absorbiert sind, dass es genügt, nur die nullte (reine TEM-) Mode zu betrachten.

Die Wellenfronten beschreiben dann Kreise auf der Erdoberfläche, deren Umfang mit der Laufzeit zunimmt. Die in der Wellenfront gespeicherte Energie muss sich also auf einem Kreis mit wachsendem Umfang verteilen, was einem Intensitätsabfall durch geometrisches Abklingen entspricht. Sei der Laufweg längs der Erdoberfläche  $x$ , dann ist der zugehörige Kreisumfang  $2\pi R_E \sin(x/R_E)$ . Man beobachtet also einen Intensitätsabfall  $\sim 1/\sin(x/R_E)$  bzw. einen Amplitudenabfall  $\sim 1/\sqrt{\sin(x/R_E)}$ . Nimmt man nun ohmsche Verluste zu dieser Betrachtung hinzu, so wird ein Teil der mitgeführten Energie absorbiert, was zu einem zusätzlichen exponentiellen Energie- bzw. Amplitudenabfall  $\sim \exp(-\alpha x)$  führt. Fasst man dies zusammen, ergibt sich folgendes Modell<sup>2</sup> für die Amplitude  $A_i$  an einem Ort in der Quellentfernung  $x_i$ :

$$A_i = A_0 Z_i \frac{1}{\sqrt{\sin x_i / R_E}} \exp(-\alpha x_i) \quad (1)$$

Dabei ist  $A_0$  die Amplitude an der Quelle und  $Z_i$  ein lokaler ionosphärischer Ankopplungsfaktor, der lokale Abweichungen, z.B. durch Einflüsse der Geologie oder der Ionosphärenhöhe, am Messort ausdrückt. Es war zunächst nicht sicher, inwieweit dieser Faktor für die folgenden Betrachtungen von Bedeutung sein würde.

- 1 In der Literatur werden an Stelle von Absorption und Absorptionsparameter häufig auch die Begriffe Dämpfung und Dämpfungsparameter verwendet.
- 2 Eine empirische Formel, die dem Grenzfall entspricht, dass man bei (1) die Erdkrümmung vernachlässigt, ist als sogenannte AUSTIN-COHEN-Formel bekannt [2, S.152]. Die Formel (1) wird verschiedentlich verwendet (so bei [2],[4]), scheint jedoch keinen eigenen Namen zu haben.

Nun wird eine Methode beschrieben, wie man aus Messungen von Signalamplituden  $A_i$  an verschiedenen Stationen den Absorptionsparameter  $\alpha$  bestimmen kann: Neben den gemessenen Amplituden am Empfänger seien noch der Ort von Quelle und Empfänger bekannt, nicht aber die Quellamplitude  $A_0$ .

Möchte man Formel (1) zur Bestimmung des Absorptionsparameters  $\alpha$  aus solchen Daten verwenden, so scheidet man an der unbekanntem Quellamplitude  $A_0$ . Statt dessen muss man zunächst  $A_0$  durch die Bildung relativer Übertragungsfunktionen zwischen Stationspaaren eliminieren:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{Z_1 \sqrt{\sin x_2 / R_E}}{Z_2 \sqrt{\sin x_1 / R_E}} \exp(-\alpha(x_1 - x_2)) \quad (2)$$

Umsortieren und logarithmieren ergibt einen linearen Zusammenhang in  $\alpha$ :

$$\ln \left[ \frac{A_1 \sqrt{\sin x_1 / R_E}}{A_2 \sqrt{\sin x_2 / R_E}} \right] = \ln \frac{Z_1}{Z_2} - \alpha(x_1 - x_2) \quad (3)$$

Es gilt also Amplitudenverhältnisse  $A_1/A_2$  aus den Messwerten an Stationspaaren zu bilden, diese mit einer geometrischen Korrektur zu versehen und logarithmisch gegen die Laufwegdifferenz zwischen den Stationen aufzutragen. Führt man nun eine lineare Regressionsanalyse durch, so liefert die Steigung der Ausgleichgeraden den Absorptionsparameter  $\alpha$  und der Achsenabschnitt das Verhältnis  $Z_1/Z_2$ . Letzterer lag bei den durchgeführten Auswertungen immer nahe bei 1 - auf eine nähere Interpretation wird im folgenden verzichtet.

## Datenmaterial

Vom 11. Juli - 17. August 1998 wurden an 3 Stationen im Westen der USA (siehe Abbildung 2) horizontale Magnetfelder mittels Metronix MFS-05 Induktionsspulen gemessen und auf SPAM MkIII-Datenloggern mit 2048Hz kontinuierlich aufgezeichnet.

Des weiteren standen NLDN (National Lightning Detection Network) - Daten für den betreffenden Zeitraum zur Verfügung. Diese liefern sehr genaue räumliche ( $\pm 0,5\text{km}$ ) und zeitliche ( $\pm 1\text{ms}$ ) Angaben über das Auftreten von Blitzen in den USA [3].

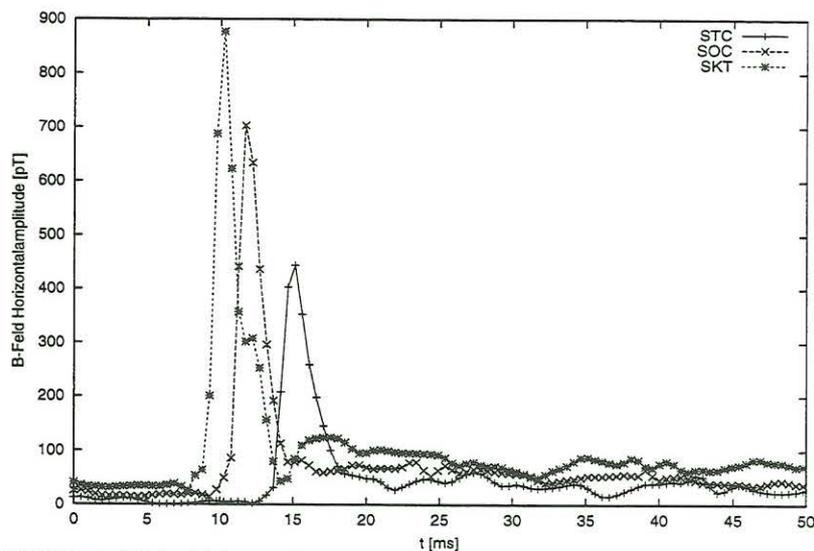


Abbildung 1 Beispiel für einen an drei Stationen in unterschiedlicher Quellentfernung gemessenen Sferic. Unterschiedliche Einsatzzeiten und Amplituden sind deutlich sichtbar.

Abbildung 1 zeigt ein Beispiel für einen an allen drei Stationen gemessenen Sferic. Der Einsatzzeitversatz der Signale resultiert aus den unterschiedlich langen Laufwegen und ist zu diesen proportional. Man erkennt deutlich die Abnahme der Amplituden mit wachsender Entfernung und kann bereits qualitativ auf ihren exponentiellen Charakter schließen.

## Analysemethode

Anhand der NLDN-Daten wurde eine Vorauswahl an Blitzen getroffen, die für die Analyse herangezogen wurden. Verwendete Auswahlkriterien waren:

- Zeitpunkt und Ort des Blitzes innerhalb eines vorgegebenen Zeit- und Raumfensters, so dass alle Signallaufwege nur auf der Tag bzw. Nachtseite der Erde lagen. Blitze am Rand des NLDN-Netzwerkes wurden nicht ausgewertet.

- Mindeststärke oder Polarität des Blitzes (hier:  $>89.7$  kA, beide Polaritäten), um sich zunächst auf die Analyse von besonders starken Signalen zu beschränken.
- Mindestabstand von den Stationen (hier:  $>500$ km), um sicherzustellen, dass die Entfernung von der Quelle sehr viel größer ist als die Ionosphärenhöhe.

Waren alle Kriterien erfüllt, wurden passende Zeitreihenausschnitte aus den Original-Messdaten ausgewählt und folgender Vorverarbeitung unterzogen:

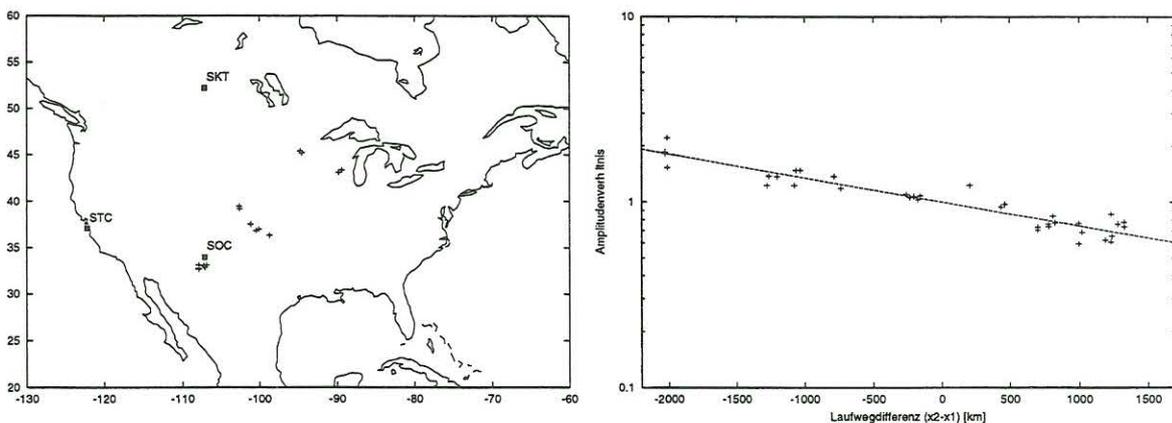
- Instrumentenkalibrierung: Rückrechnung der Spulenübertragungsfunktionen.
- Bandpassfilterung von 10 Hz bis 470 Hz mittels eines Rechteckfilters.
- Unterdrückung von Netzsignalen bei 60Hz und harmonischen mittels Rechteckfilter.
- Bildung der Horizontalintensität  $B_h$  aus den beiden horizontalen Magnetfeldkomponenten  $B_x, B_y$  gemäß der Gleichung  $B_h = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$ .
- Ausschneiden eines kürzeren Zeitabschnitts von 31,25ms (64 Samples) Länge ab dem Zeitpunkt des Blitzes.
- Suche des absoluten Maximums innerhalb dieses Zeitabschnitts und Feststellung seines Wertes  $A_i$ .
- Test auf zeitliche Isoliertheit des Blitzes: Ausserhalb eines Fensters von  $\pm 4$  Samples rings um das gefundene Maximum mussten alle Horizontalintensitätswerte unterhalb eines Grenzwertes (hier:  $1/4$  des Maximums) bleiben, andernfalls wurde dieser Blitz für die Analyse verworfen. Dieser Schritt war notwendig, um die falsche Zuweisung von Signalen unterschiedlicher Blitze zu vermeiden.

Aus den an einzelnen Stationen festgestellten Amplituden  $A_i$  wurden für alle Kombinationen von Stationspaaren Amplitudenverhältnisse gebildet. Diese wurden in den nachfolgenden Abbildungen logarithmisch gegen die Laufwegdifferenzen zwischen den Stationen aufgetragen, um so wie oben beschrieben über (3) auf den Absorptionsparameter  $\alpha$  schließen zu können.

## Analyse Teil 1: Überprüfung an wenigen ausgewählten Blitzen

Da zunächst nicht klar war, wie gut die Methode mit beliebigen Blitzen zurecht kommt, wurde sie zunächst auf 16 ausgewählte Blitze angewendet, deren Signalform zuvor einzeln gesichtet wurde um sicherzustellen, dass es sich um Beispiele mit gutem Signal-Rausch-Verhältnis und einfacher, impulsförmiger Wellenform handelt (siehe das Beispiel in Abbildung 1).

Es handelte sich um besonders starke Blitze positiver Polarität (+CG's). Alle Blitze fanden nachts statt, allerdings zu unterschiedlichen Nächten und in unterschiedlichen Gewitterzentren. Insbesondere befanden sich einige der Blitze sehr dicht an einer der Stationen (Die Bedingung Entfernung  $>500$ km wurde *nicht* erfüllt). Trotz dieser Unterschiede ergab sich ein sehr einheitliches Verhalten des Amplitudenabfalls mit der Entfernungsdifferenz.



**Abbildung 2** Die Karte links zeigt die Lage der drei Stationen, sowie die Lage von 16 ausgewählten Blitzen. Im Graphen rechts sind für diese Blitze die Amplitudenverhältnisse gegen die Entfernungsdifferenz aufgetragen.

## Analyse Teil 2: Viele Blitze

Hauptanliegen dieser Untersuchung ist die Anwendung der vorgestellten Analyse­methode auf möglichst viele Blitze, nicht auf einzelne ausgewählte Effekte. Es wurde vorerst das Datenmaterial von 3 Tagen und 3 Nächten ausgewertet. Davon ist in den folgenden Abbildungen jeweils ein Beispiel mit Tag- bzw. Nachtdaten zu sehen.

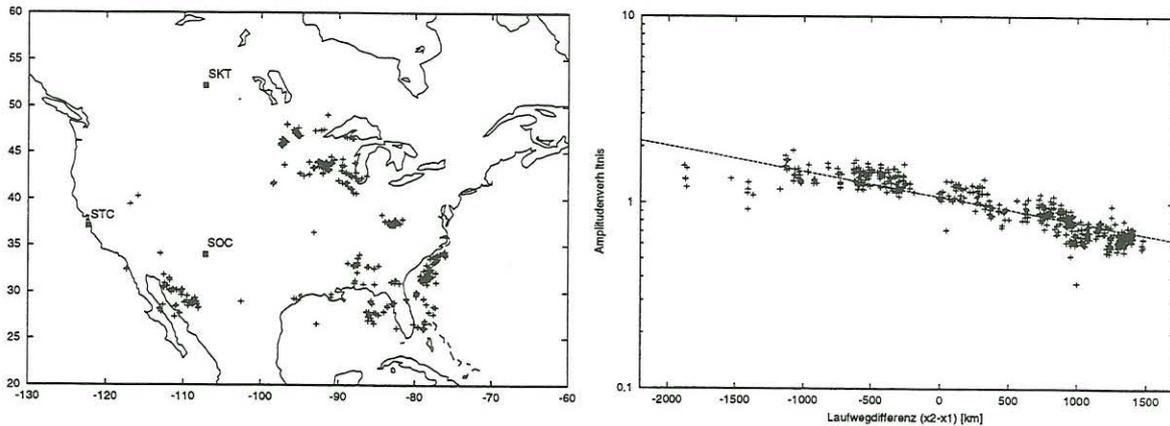


Abbildung 3 Blitze im Zeitraum: 19. Juli 1998 6:00-12:00 UT (Nachts)

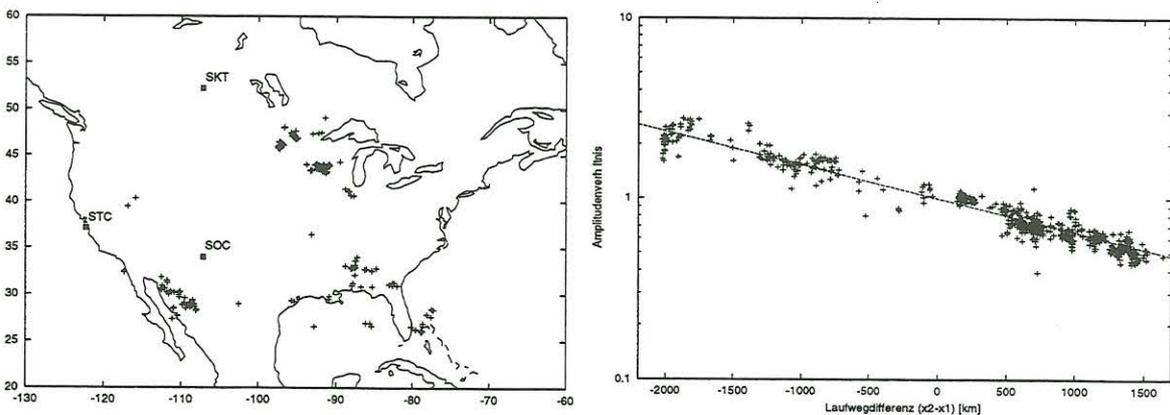


Abbildung 4 Blitze im Zeitraum: 20. Juli 1998 19:00 - 23:00 UT (Tags)

## Vergleich der Tag- und Nacht-Analyseintervalle

In Abbildung 5 wurden die über Ausgleichsgeraden bestimmten Werte für alle 7 bisher erfolgten Analysen zusammengestellt. Die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung der bestimmten Ausgleichsgeradensteigung. Um Vergleiche mit Literaturangaben zu erleichtern wurde die Einheit von  $\alpha$  auf Dezibel pro 1000km (dB/Mm) umgerechnet<sup>3</sup>.

Man sieht, dass die Dämpfung an unterschiedlichen Tagen oder Nächten nur geringfügig variiert, dafür aber ein deutlicher Unterschied zwischen den Tag- und Nachtwerten besteht. Dies spiegelt den unterschiedlichen Aufbau der Ionosphäre auf der Tag- und Nachtseite wieder: Nachts fehlt die D-Schicht, die am Tag für eine höhere Absorption sorgt.

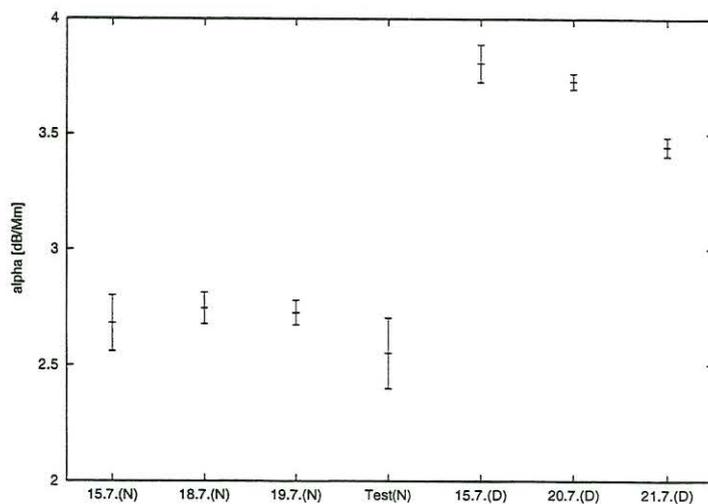


Abbildung 5 Mittlerer Dämpfungsparameter für verschiedene Teildatensätze. Die mit (D) markierten Sätze beinhalten nur Tagdaten, die mit (N) markierten Sätze nur Nachtdaten. „Test“ bezieht sich auf den in gezeigten Datensatz.

3 Umrechnung:  $\alpha[\text{dB/Mm}] = 20/\ln(10) 10^3 \alpha[\text{km}^{-1}] = 8685,89 \alpha[\text{km}^{-1}]$

## Ergebnis

Die bisherigen Analysen bestätigen, dass das verwendete Modell (1) den Amplitudenabfall in erster Näherung gut beschreibt, und dass das verwendete Analyseverfahren zur Bestimmung des darin auftretenden Absorptionsparameters  $\alpha$  geeignet ist.

Die hier bestimmten Werte stehen in Übereinstimmung mit Werten, die 1974 von HUGHES UND GALLENBERGER [4] über eine vergleichbare Methode im Frequenzbereich bestimmt wurden. Tag- und Nachtunterschiede treten deutlich hervor.

Die Streuung der Dämpfung bei Einzeleffekten ist zwar zu einem Teil statistischer, zum anderen aber auch systematischer Natur: So zeigen sich z.B. Krümmungen der Kurve, wie in dem Beispiel vom 19.7. zu sehen, in einigen Datensätzen, in anderen nicht. Dies ist ein Hinweis auf zeitliche Variationen oder laterale Inhomogenitäten des Absorptionsparameters  $\alpha$ , die von entsprechenden Variationen oder Inhomogenitäten der D-Schicht herrühren könnten. Solche Inhomogenitäten aufzuspüren ist ein nächstes Ziel bei diesen Untersuchungen.

## Literatur

- [1] D.L.BOOK: *NRL Plasma Formulary* - Naval Research Laboratory, Washington, 1990.
- [2] K.G.BUDDEN: *The Wave-Guide Mode Theory of Wave Propagation* - Logos Press Ltd., London, 1961.
- [3] V.P.IDONE ET AL: *Performance evaluation of the U.S. National Lightning Detection Network in eastern New York, 2. Location accuracy* - Journal of Geophysical Research, Vol. 103, pp. 9057-9069, 1998.
- [4] H.G.HUGHES UND R.J.GALLENBERGER: *Propagation of extremely low-frequency (ELF) atmospherics over a mixed day-night path* - Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, Vol. 36, pp. 1643-1661, 1974.