

Raum- und Bodenwellen in einer Langzeit-Messung

WOLFGANG FRIESE – DG9WF

Die gegenseitige Überlagerung von Raum- und Bodenwellen führt am Empfangsort zu Schwunderscheinungen. Deren tages- und jahreszeitlicher Gang wurde im Rahmen von Langzeit-Feldstärkemessungen untersucht. Der Beitrag beschreibt verwendete Technik und Ergebnisse der im Langwellenbereich durchgeführten Messungen.

Die Ausbreitung langer Wellen erfolgt sowohl über die Bodenwelle als auch über die Raumwelle. Durch die gegenseitige Beeinflussung der Signale kommt es am Empfängereingang zu Schwunderscheinungen. Während die Bodenwelle über sehr stabile Eigenschaften verfügt, unterliegt die Raumwelle starken tages- und jah-

reszeitlichen Abhängigkeiten. Die Messwerte einer Langzeit-Pegelmessung sollten diese zeitlichen Beeinflussungen und ihre Auswirkungen deutlich machen. zulassen, ob eine korrekte Empfänger-Verstärkungsregelung zur Kompensation der Ionosphärenwirkung mit dem DCF77-Referenzsignal möglich ist. Ein solches, von mir in der Wirksamkeit angezweifeltes Verfahren wurde, angeblich mit gutem Erfolg, zur Sfericsregistrierung eingesetzt.

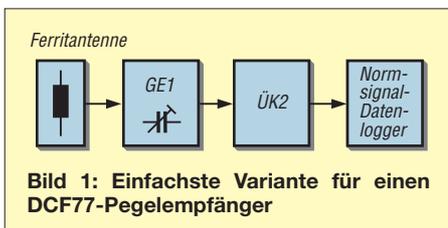


Bild 1: Einfachste Variante für einen DCF77-Pegelempfänger

reszeitlichen Abhängigkeiten. Die Messwerte einer Langzeit-Pegelmessung sollten diese zeitlichen Beeinflussungen und ihre Auswirkungen deutlich machen.

Ziel der Messung

Das besondere Interesse galt dabei dem Signalverhalten in einem näheren Umkreis des Senders, in dem die Bodenwelle noch eine ausgeprägte Dominanz zeigt. Unter anderem erhoffte ich mir Antworten auf die Fragen:

1. Wie sehen Tages- und Jahresgang des Empfangspegels aus?
2. Wie unterscheiden sich die Wirkungen verschiedener Antennen – reagieren bestimmte Typen besonders empfindlich oder unempfindlich auf Schwund?
3. Bis zu welcher Entfernung zweier Empfangsgeräte ist mit dem gleichen oder ähnlichem Erscheinungsbild des Amplitudenverlaufs zu rechnen?

Außerdem hoffte ich darauf, dass die gewonnenen Daten eine eindeutige Aussage

DCF77 als Referenzsender

Wesentliche Voraussetzung für eine solche Messung ist ein unterbrechungsfreies Sendesignal mit einer möglichst kontinuierlichen Verlaufsform. Der Zeitzeichensender DCF77 in Mainflingen, 25 km östlich von Frankfurt, bietet sich hervorragend als Referenzsender an.

tennenfeld befindet sich eine 200 m hohe Ersatzantenne. Deren Speisung erfolgt im Bedarfsfall, z.B. nach Abschaltung des Betriebssenders bei Störung, durch einen 50-kW-Röhrensender, den ehemaligen Betriebssender.

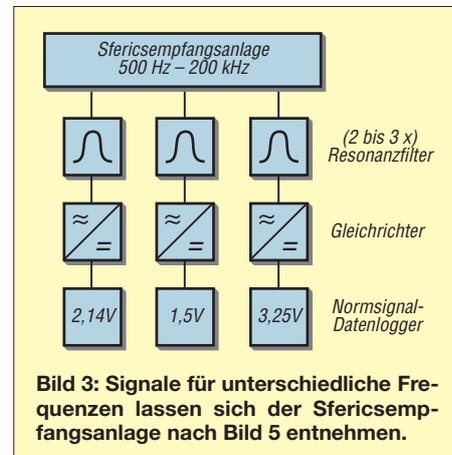


Bild 3: Signale für unterschiedliche Frequenzen lassen sich der Sfericsempfangsanlage nach Bild 5 entnehmen.

Das DCF77-Sendesignal wird mit Sekundärmarken phasensynchron zur Träger-schwingung amplitudenmoduliert. Dabei erfolgt eine Signalabsenkung auf 25 % während 0,1 bzw. 0,2 s. Für die Pegelmessung ist die Betrachtung der Zeitcodierung

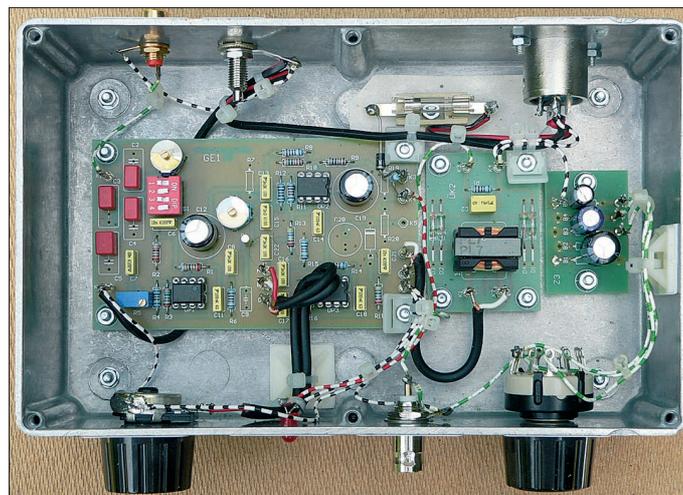


Bild 4: So ist der Pegelempfänger nach Bild 1 aufgebaut. Die Platine GE1 beinhaltet den gesamten Empfangsteil, ÜK2 (Mitte) dient zur Gleichrichtung, die kleine Platine rechts beinhaltet die umschaltbaren Elektrolytkondensatoren für den Integrationsanteil.

Seit 1998 arbeitet DCF77 als moderner luftgekühlter Halbleitersender. Der Endverstärker mit seinen 48 Leistungsmodulen gleicher Bauart, jedes verfügt über eine Ausgangsleistung von etwas über 1 kW, speist eine 150 m hohe Rundstrahlantenne mit Dachkapazität. Auf dem gleichen An-

ohne Belang, auch die zusätzliche Phasenmodulation spielt für die Anwendung keine Rolle. Allerdings gehe ich später noch auf das amplitudenmodulierte Rufzeichen DCF77 ein, welches bei meiner Pegelaufzeichnung eine besondere Beachtung erlangte.

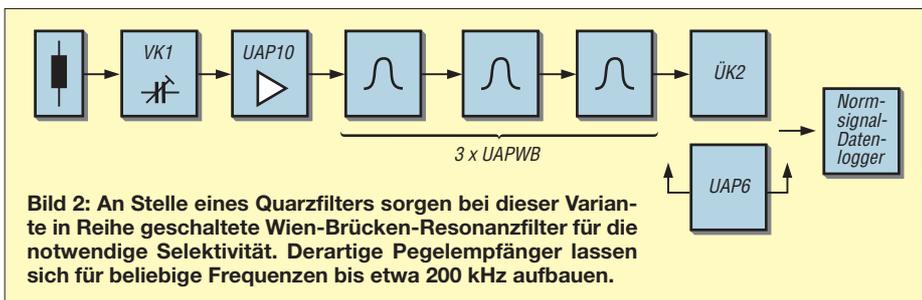


Bild 2: An Stelle eines Quarzfilters sorgen bei dieser Variante in Reihe geschaltete Wien-Brücken-Resonanzfilter für die notwendige Selektivität. Derartige Pegelempfänger lassen sich für beliebige Frequenzen bis etwa 200 kHz aufbauen.

Elektronik für Empfang und Registrierung

Die parallele Pegelmessung an verschiedenen Stellen, teilweise mit unterschiedlichen Antennen, erforderte den Einsatz einer Vielzahl von Empfangsgeräten und Auswerteeinrichtungen. Für Letztere eignete sich der Gebrauch von Normsignal-Datenlogger hervorragend. Die in [5] beschriebenen Geräte sind prädestiniert für



Bild 5: Nicht nur zur Ausgabe zusätzlicher Empfangssignale, auch für die Durchführung speziellerer Messungen eignen sich verschiedene Komponenten meiner Sferics-Empfangsanlage mit den entsprechenden Folgegeräten.

den wartungsfreien Dauereinsatz bei geringstem Stromverbrauch. Verwendung fanden einige Logger der Firma Greisinger [8] sowie ein Selbstbau-Vierkanal-Logger von Dirk Langenbach, DG3DA, und Dr. Karsten Hansky, DL3HRT [9]. Für den Empfang setzte ich unterschiedliche Geräte mit ähnlichem Schaltungskonzept ein. Die schmalbandigen Geradeempfänger (ohne Verstärkungsregelung) verfügen entweder über Quarz- oder Resonanzfilter, siehe Bilder 1 und 2. Solche



Empfangsschaltungen müssen über ausreichende Selektionseigenschaften verfügen, um Beeinflussungen anderer Aussendungen zu vermeiden.

Einige Vergleichssignale, wie z.B. das englische Zeitzeichensignal von Rugby auf 60 kHz, DLF (Donnebach) auf 153 kHz, DCF49 (Mainflingen) auf 129,1 kHz, sowie diverse Frequenzen im 20 kHz-Bereich habe ich über steiflankige Resonanzfilter meiner in Bild 5 gezeigten Sfericempfangsanlage entnommen.

Die gleichgerichteten Trägersignale erfahren eine Glättung mit hohem I-Anteil. Bei den DCF77-Empfangskanälen erfolgte die Einstellung so, dass der Sekundentakt gerade ausreichend für eine schwebungsfreie

Logger-Registrierung unterdrückt wurde. Dies ermöglicht nicht nur die Registrierung relativ langsamer Zustandsänderungen der Ionosphäre, sondern auch von schnelleren Pegelabweichungen, hervorgerufen durch unterschiedliche Beeinflussungen während der Übertragung.

Die Datenlogger-Abfragezykluszeit legte ich bei allen Geräten zunächst einheitlich auf 1 min fest. Bild 7 zeigt den typischen Sommer-Tagesgang des DCF77-Pegels, empfangen und aufgezeichnet mit der beschriebenen Schaltung. Die Messergebnisse möchte ich in eine Betrachtung der Wechselwirkung von Raum- und Bodenwellen einfließen lassen. Zum besseren Verständnis werden zunächst die wesentlichen Eigenschaften der beiden Akteure aufgezeigt.

■ **Bodenwelle**

Mit dem Begriff Bodenwelle bezeichnet man die von einem Sender abgestrahlte elektromagnetische Energie, die sich entlang der Erdoberfläche ausbreitet. In einem homogenen, nichtleitenden Medium breitet sich das Feld kugelförmig aus. Das magnetische und das elektrische Feld stehen senkrecht aufeinander, beide stehen wiederum senkrecht zur Ausbreitungsrichtung.

Bei einer parallel zur Erdoberfläche folgenden ebenen Welle zeigen sich andere Verhältnisse. Durch Induktion entsteht eine Umlaufspannung, die Ströme an der Erd-

sorbiert. Dadurch stellt die Bodenleitfähigkeit neben der Frequenz einen maßgebenden Faktor für die Bodenwellen-Reichweite der Aussendung dar. Einen wesentlichen Anteil für die elektrischen Eigenschaften des Geländes trägt die Bodenfeuchtigkeit bei. Die Reichweiten der Bodenwellen über dem Meer sind erheblich größer als über dem Land.

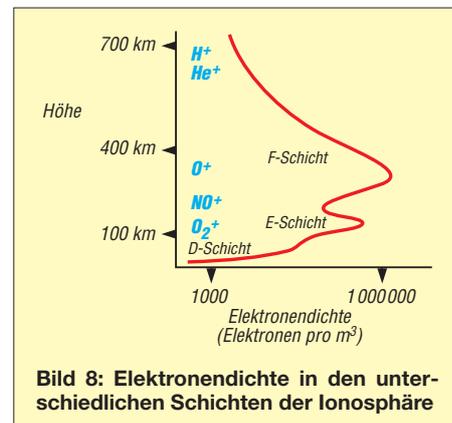


Bild 8: Elektronendichte in den unterschiedlichen Schichten der Ionosphäre

Bodenwellen im Lang- und Längstwellenbereich folgen der Erdkrümmung und verfügen über beträchtliche Reichweiten, siehe Bild 21.

■ **Die Raumwelle**

Die Wellen einer elektromagnetischen Aussendung, die nach Ein- oder Mehrfachreflexion an der Ionosphäre und dem Erdboden den Empfänger erreichen, bezeichnet man als Raumwellen. Das Verhalten der unteren Ionosphärenschichten ist maßgebend für die Ausbreitung der Raumwellen im LF-, VLF- und ELF-Bereich.

Bild 6: Dreikanaliger VLF-/LF-Messempfänger

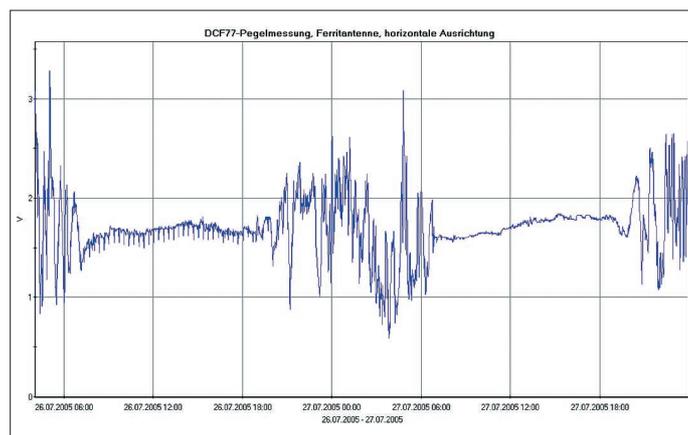
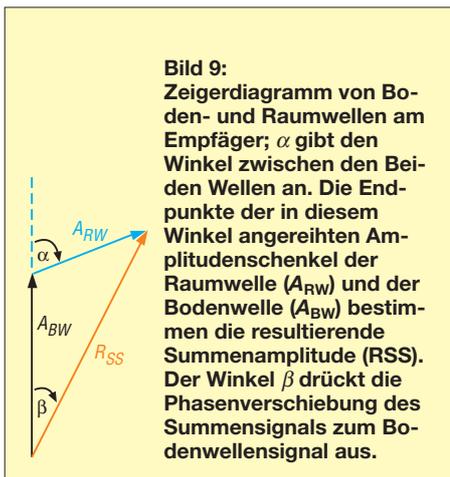


Bild 7: Typischer Sommer-Tagesgang des Pegels von DCF77 in einer Entfernung von 120 km; dabei erfolgte die Ausrichtung direkt zum Sender, horizontal.

oberfläche zur Folge hat. Zusammen mit der elektrischen Feldstärke resultiert daraus eine leicht in die Ausbreitungsrichtung geneigte Feldstärkenachse. Der Neigungswinkel hängt dabei von der Bodenleitfähigkeit ab. Je geringer diese ist, um so höher ist der Neigungswinkel.

Die horizontale Komponente wird vom Untergrund mehr oder weniger stark ab-

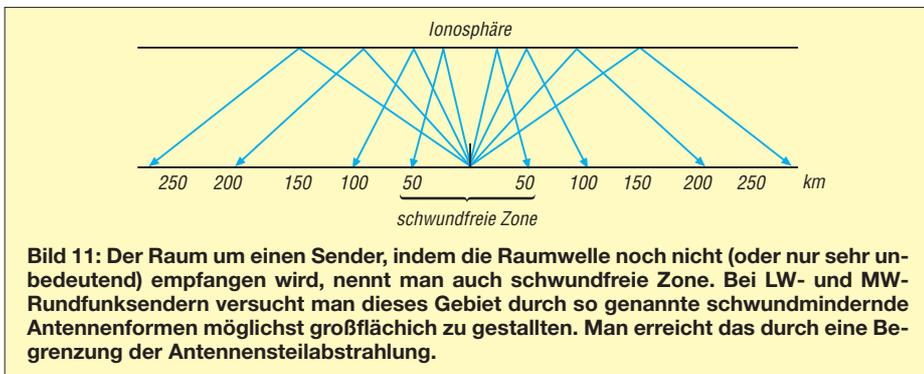
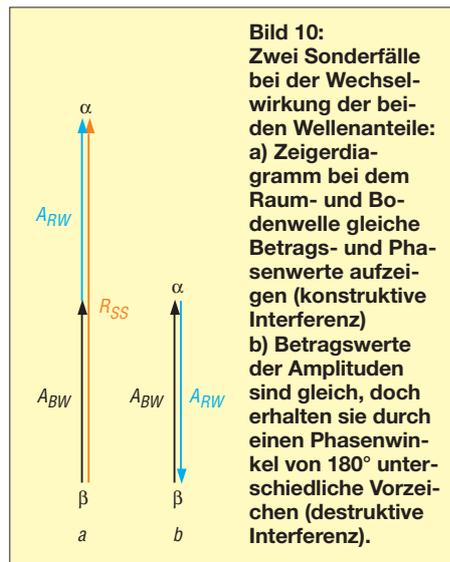
Die Erde wird von einer gasförmigen Hülle, der Atmosphäre, umgeben. Durch die Anziehungskraft ist diese an den Erdboden gebunden und nimmt auch an dessen Rotation teil. Die äußerste der verschiedenen Atmosphärenschichtungen, Exosphäre genannt, bildet in einer Höhe ab etwa 500 bis 1000 km den Übergang zum interplanetaren Raum.



Die Ionosphäre ist der Atmosphärenbereich, indem die Gase mehr oder weniger stark ionisiert sind. Man unterteilt sie in verschiedene Schichtungen mit unter-

mehreren Elektronen gibt die Zahl der fehlenden Elektronen den Ionisationsgrad an. Entfällt der äußere Strahlungsbeschuss, so finden die Elektronen nach und nach wieder zurück zu den Kernen. Dieser Vorgang, Rekombination genannt, neutralisiert das Gemisch wieder.

Je nachdem wie ausgeprägt die Ionisation in den verschiedenen Schichtungen ist, können sich für die unterschiedlichen Frequenzen elektromagnetischer Wellen verschiedene Reflexionseigenschaften ergeben. Die D-Region, in etwa 65 bis 80 km Höhe ist die unterste, aber für den Lang- und Längstwellenbereich maßgebende Ionosphärenschicht. In ihr nimmt tagsüber durch Sonneneinstrahlung die Elektronen- und Ionendichte zu, hervorgerufen wird sie zumeist aus sehr kurzwelliger UV-Strahlung mit Wellenlängen kleiner als $111,8 \mu\text{m}$.



schiedlichen Eigenschaften bezüglich der Ionisationsdichte und der Stabilität dieser Verhältnisse, Bild 8. Durch Einwirkung von UV- und Röntgenstrahlen werden den Gasatomen eines oder mehrere ihrer äußeren Elektronen entrissen. Es entstehen ein positiv geladener Atomrumpf (Restatom),

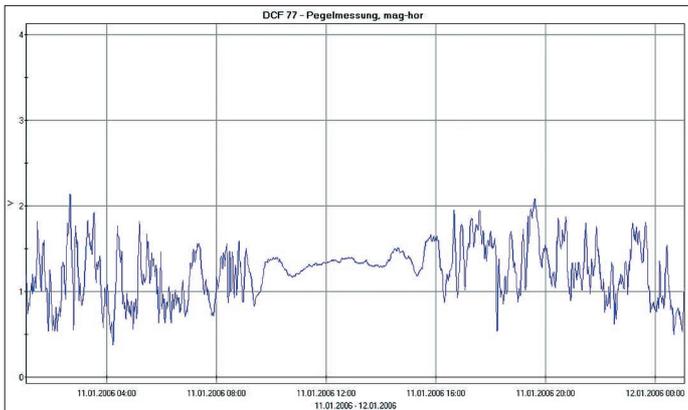
Dieser Zustand wirkt wie ein Spiegel auf die einfallenden Längstwellenstrahlen. Sie werden reflektiert. Der Raum zwischen der Erdoberfläche und der Unterkannte der Ionosphäre wirkt dabei wie ein Hohlleiter, indem sich die Raumwellen durch Reflexion mit relativ geringen Verlusten

ausbreiten. Durch die einsetzende Rekombination entfällt die Ionisation der D-Region nachts, die Reflexion der Längstwellen erfolgt nun mit noch weniger Verlusten vorwiegend an den Resten der darüber liegenden E-Schicht.

Während tagsüber für die Dämpfung bei der VLF-Raumwellenausbreitung die relativ schlecht leitende D-Schicht maßgebend ist, wird nachts die Wirkung des Erdbodens bestimmend. Die sehr gute Leitfähigkeit der E-Schichtreste kann dann bei einer Dämpfungsbeurteilung vernachlässigt werden.

Die Ausbreitung der Langwellen erfolgt während des Tages überwiegend durch die Bodenwelle. Die Dämpfung der D-Region für langwellige elektromagnetischen Wellen ist relativ hoch. Für sie ist der Absorptionsgrad teilweise größer als der Reflexionsgrad. Sowohl die von unten einfallenden, als auch die von höheren Ionosphärenschichten schon reflektierten Wellen werden stark gedämpft.

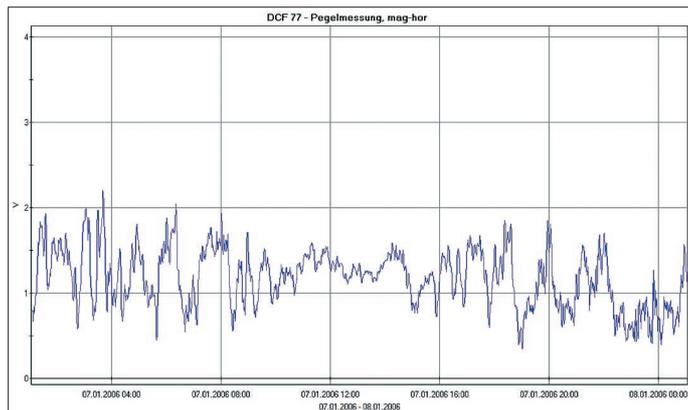
Ursache dafür ist die relativ hohe Gasdichte, in der die beschleunigten freien Ladungsträger wegen der kleinen freien Weglängen häufig mit neutralen Gasteilchen zusammenstoßen. Dabei erfolgt ein Energieentzug mit einer Umwandlung von



der jetzt als Ion bezeichnet wird, sowie ein oder mehrere negativ geladene Elektronen [2].

Das entstandene Gemisch aus Ionen, Elektronen und neutralen Teilchen nennt man Plasma. Den Vorgang des Entreißen von Elektronen bezeichnet man als Ionisation bzw. Stoßionisation. Bei Atomen mit

Bild 13: An manchen Tagen der Wintermessung erfolgt kein ruhiger Feldstärkeverlauf – auch nicht um die Mittagszeit.



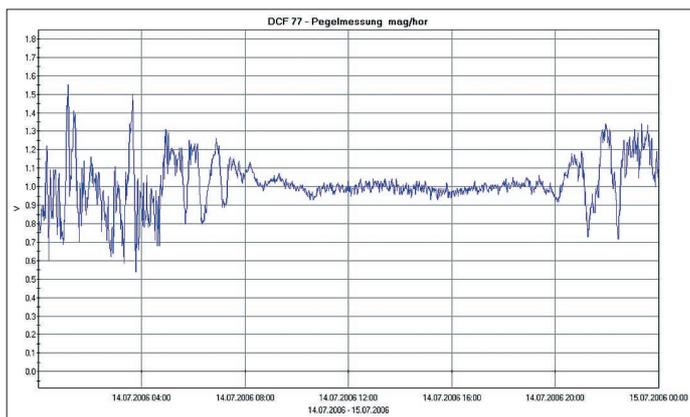


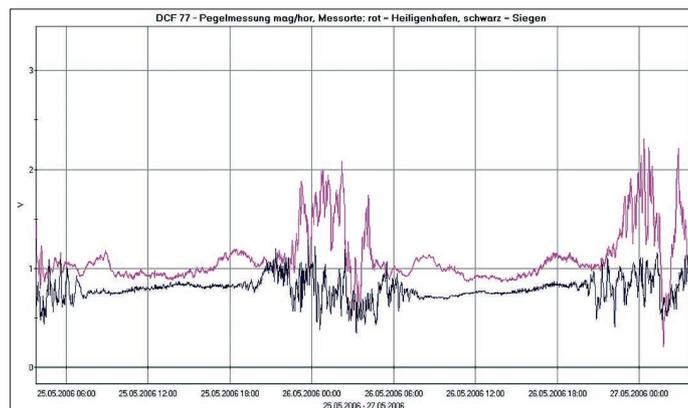
Bild 14: Sommermessungen mit ruhigen, aber „verbrummt“en Tagesphasen; dabei ist zu unterscheiden zwischen den Pegelgängen, die sich bei starker Sfericsaktivität (Gewitter) einstellen, und solchen (wie abgebildet), deren Ursache vielleicht in Erscheinungsformen in der D-Schicht zu suchen ist.

kinetischer Energie in Wärme. Nachdem sich nachts die D-Region aufgelöst hat, können die langen Wellen ungehindert die Reste der E-Schicht und die F2-Schicht erreichen. Hier erfolgt eine Reflexion mit sehr geringen Verlusten, die eine beachtliche Reichweitensteigerung ermöglicht. Aus diesem Grund strahlen Langwellensender ihre Aussendungen während der Nacht teils mit reduzierter Leistung ab. Neben dem Tagesgang unterliegen die Reflexionseigenschaften der Ionosphäre auch einer jahreszeitlichen Abhängigkeit. Zusätzlich überlagert die Aktivität der Sonne mit der im Zyklus von 11,1 Jahren schwankenden Sonnenfleckenhäufigkeit die Eigenschaften der Ionosphäre massiv. Darüber hinaus sind massive Beeinflussungen durch magnetische Stürme bzw. durch Sonneneruptionen, verbunden mit dem Hinausschleudern riesiger Materiemengen ins Weltall, möglich.

■ Schwund

Die Aussendung elektromagnetischer Längstwellensignale erfolgen sowohl über die Raum- als auch über die Bodenwelle

Bild 15: Parallel in Heiligenhafen und Siegen aufgezeichneten Pegelgänge mit unruhigerem Tagesverhalten in Heiligenhafen; die Entfernung zum Sender ist fünf mal größer, dadurch lässt die Abschwächung des Bodenwellensignals die langsamen Absorptionsschwunderscheinungen dominanter einwirken.



lichen Signale nun im Extremfall zu folgenden Pegelsituationen führen:

1. Die Signale erscheinen gleichphasig, es erfolgt eine Verstärkung des Empfangspegels – konstruktive Interferenz, Bild 10 a.
2. Die Signale erscheinen gegenphasig, es stellt sich eine Pegelabsenkung bis hin zur Auslöschung ein (bei Entfernungen zum Sender, in denen sich gleiche Pegelbetragswerte einstellen) – destruktive Interferenz, Bild 10 b.

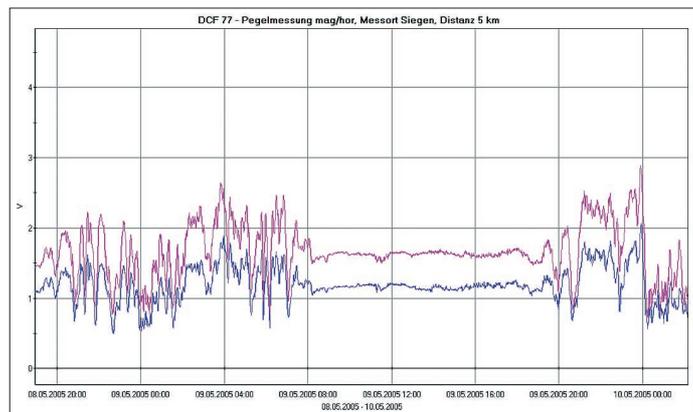
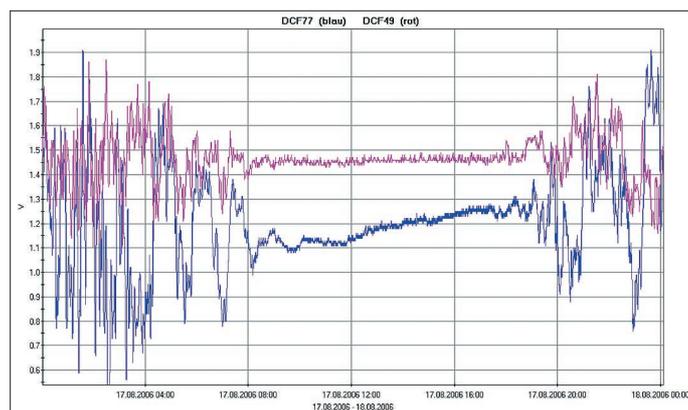


Bild 16: Aufzeichnung an unterschiedlichen Orten, Entfernungsdistanz 5 km; schon bei diesem geringen Abstand treten geringe Pegelverlaufsunterschiede auf.

(für den Langwellenbereich trifft das hauptsächlich nachts nach Wegfall der D-Region zu). Der Raumwellenweg vom Aussendeort bis zum Empfänger durch Ein- oder Mehrfachbrechung ist dabei länger als der der Erdkrümmung folgende Weg über die Bodenwelle. Am Empfangsort können die unterschied-

Bild 17: Vergleich des Feldstärkeverlaufs von DCF77 und DCF49 (ebenfalls in Mainflingen, 100 kW).



Phasenlagen zwischen 0° und 180° ergeben Zwischenstufen, wobei natürlich die einzelnen Signalpegel berücksichtigt werden müssen, siehe Bild 9. Die Reichweite der Bodenwelle ist frequenzabhängig, mit zunehmendem Abstand zum Sender verliert sie immer mehr an Gewichtung, auch als maßgebender Faktor für Schwunderscheinungen. Allerdings können auch Raumwellen, die unterschiedliche Wege vom Sender zum Empfänger zurückgelegt haben, zu oben genannten phasenabhängigen Erscheinungen führen. Die vorgenannte Betrachtungsweise gilt nur bedingt für Impulsübertragungen, und

zwar nur für Laufzeitunterschiede, die kleiner als die zu übertragende Impulsdauer sind. Das Zusammenwirken von Boden- und Raumwellen führt bei der Ausbreitung von Impulsstrahlungen, beispielsweise den Sfericssignalen (insbesondere bei unipolaren Erdblitzsferics) zu teilweise kompliziert zu deutenden Erscheinungsbildern. So ergibt sich mit wachsendem Abstand vom Quellort zunächst nicht etwa eine Verstärkung oder eine Abschwächung des Strokes durch Interferenz, sondern durch die zeitliche Verzögerung der Raumwellenausbreitung entsteht am Empfangsort nun ein Signal aus zwei, drei oder noch mehr aneinandergereihten Impulsen. Die durch Reflexion an der Ionosphäre nach der Bodenwelle am Empfangsort eintreffenden Signalübertragungen können

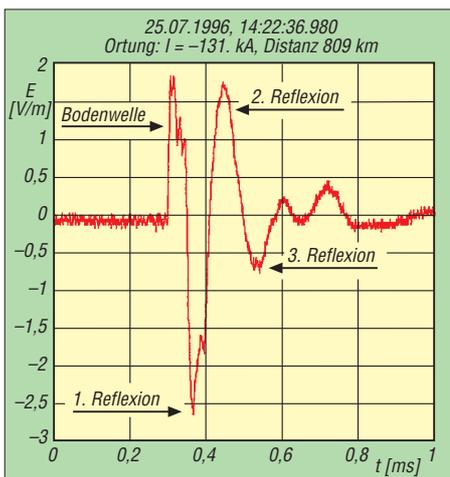


Bild 18: Empfangssignal eines negativen Erstblitzes mit Komponenten der verschiedenen Übertragungsstrecken, die sich deutlich voneinander absetzen; der Impuls wurde durch das ALDIS-Blitzortungssystem aufgezeichnet [11].

dabei in Abhängigkeit von der Reflexionsordnungszahl die gegenteilige Polarität des durch die Bodenwelle übertragenen Impulses annehmen, siehe Bilder 18 und 19. Für die sich ergebende Zeitdifferenz

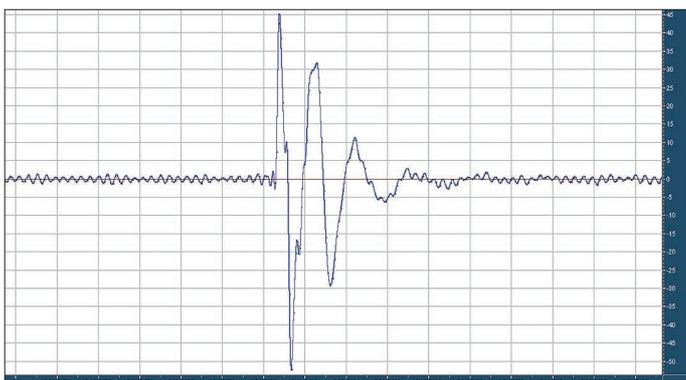


Bild 19: Aufzeichnungen von Blitz-Stroke mit einfachen Geräten, z.B. aus [7], in Verbindung mit einem PC und Audio-Programmen wie Audition oder Cool Edit; den Abstand zum Quellort kann man sogar überschlägig ermitteln oder berechnen, siehe Anhang 3 und Bild 31.

der unterschiedlichen Ausbreitungsarten spielen u.a. die Dämpfungsfaktoren, die Reflexionshöhe, sowie der zurückgelegte Weg der Bodenwelle eine Rolle.

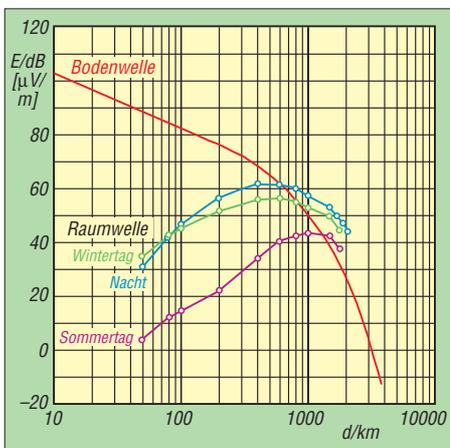


Bild 20: Feldstärken der DCF77-Boden- und Raumwellen als Funktion der Entfernung d vom Empfangsort [aus 10] – in einem breiten Entfernungsfenster können Boden- und Raumwelle gleiche Beträge annehmen.

Der erste Impuls stammt von der Bodenwelle, die Abbildung der Feinstruktur des Feldimpulses ist in nicht zu großer Entfernung noch gut erhalten. Die folgenden Signalanteile stammen von den Reflexionen an der Ionosphäre (und dem Erdboden).

Je mehr Reflexionen stattfinden, um so größer ist die benötigte Signallaufzeit und damit der Versatz zu dem über die Bodenwelle übertragenen (Erst-)Impuls. Die feine Signalstruktur wird bei der Raumwellenübertragung unscharf, nach einer Folge von mehreren Reflexionssprüngen ist sie nicht mehr zu erkennen.

Mit wachsendem Abstand steigen die Dämpfungsverluste der Bodenwelle mehr an als die der Raumwellenübertragung. Die Folge ist ein deutlich größerer Pegelverlust des Bodenwellenimpulses, dessen Amplitude dann am Empfangsort niedrigere Werte aufweist als die der ersten Reflexionsimpulse.

Die weite Bodenwellenausbreitung wird ebenfalls von einem, wenn auch geringeren, Feinstrukturverlust des Impulsabbildes begleitet. Diese feinen Strukturen be-

sitzen höherfrequente Frequenzanteile und zeichnen den Impuls mit wesentlichen Merkmalen zur Blitztypunterscheidung aus. Mit wachsendem Abstand vom Quell-

Bild 24: Ausfälle, wie auf dem Bild zu sehen, sind bei DCF77 äußerst selten. Nach der Installation von Kugelfunkstrecken in den Antennen-zuführungen muss die Aussendung selbst bei Gewittern am Sendort nicht für längere Zeit unterbrochen werden.

ort reduzieren sich die Laufzeitdifferenzen von Raum- und Bodenwelle, da das Verhältniss der Reflexionshöhe zur zurückgelegten Bodenwellenstrecke immer kleiner wird.

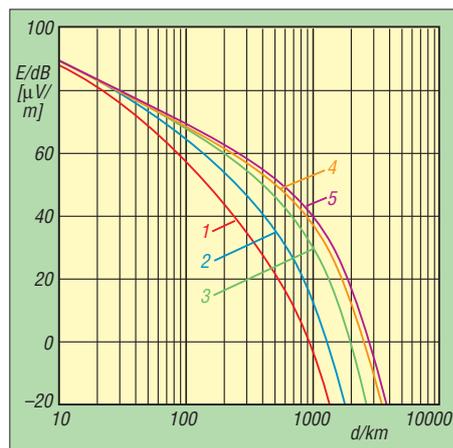
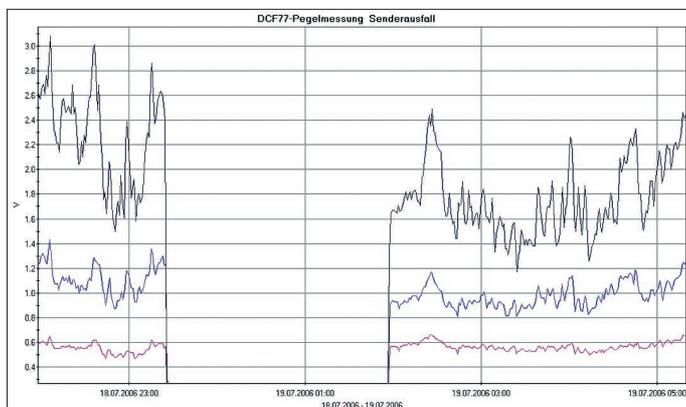


Bild 21: Abhängigkeit der Feldstärke E der Bodenwelle vom Abstand d zum Sender DCF77 sowie der Bodenleitfähigkeit. Für die Kurven gilt: 1 sehr trockener Boden, 2 trockener Boden, 3 mitteltrockener Boden, 4 Land mit durchschnittlichem Boden, 5 Seewasser mittleren Salzgehaltes; aus [10]

Für eine Impulsdauer von $100 \mu s$, wie sie negative Erstblitze im Mittel aufweisen, ergibt sich ab ungefähr 300 km Abstand zum Quellort eine Beeinflussung des über die Bodenwelle übertragenen Signals durch die (erste) Raumwelle, es kommt zu Interferenzen. Signale, die sowohl solche Wirkungen als auch die zuvor beschriebenen „Anreihwirkungen“ (durch weitere Reflexionen) erfahren, lassen sich oft sehr schwer zuordnen.

■ Tages- und Jahresgang der Reflexionseigenschaften

Die Auswertungen der Langzeitmessungen erfolgten nach den Kriterien der vorn angegebenen Fragestellungen. Zunächst bestätigte sich das schon in [1] aufgezeigte, sehr unruhige nächtliche Signalverhalten, das ich zumindest bei dem relativ geringen Abstand zum Sender so nicht erwartet hatte. Die Tagesgänge der Pegelwerte zeigen ein typisches Verhalten



und lassen sich nach bestimmten Merkmalen den Jahreszeiten zuordnen. Wesentlich bei der Zuordnung ist die Dynamik der Signale in Abhängigkeit der Tageszeit. So unterscheiden sich die Som-

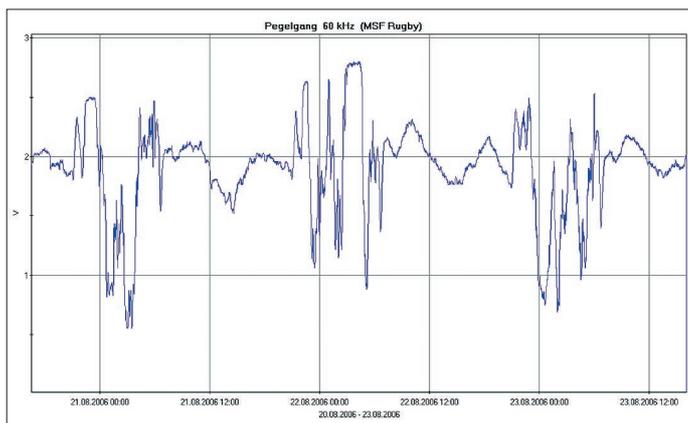
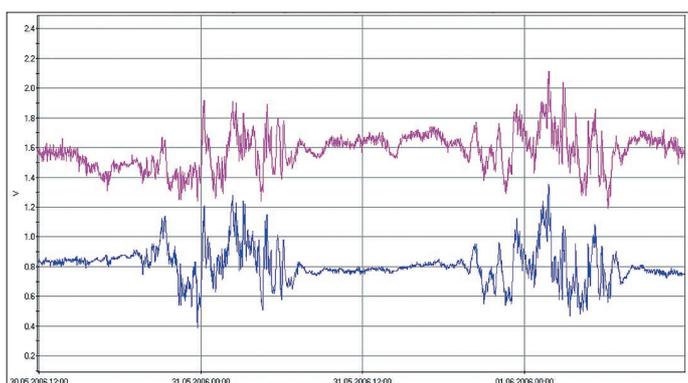


Bild 25: Die Pegelaufzeichnung des englischen Zeitzeichensenders (Distanz 650 km) unterscheidet sich deutlich von der Struktur der DCF77-Aufzeichnungen in 120 km Distanz.

Wintertagesgänge, Bild 7, durch eine lange ruhige Phase während der Tagesstunden und eine relativ kurze, sehr dynamische Phase in den Nachtstunden, von den Wintertagesgängen durch umgekehrte Verhältnisse, Bild 12.

Der ruhige Pegelgang der Tagesstunden zeugt von stabilen Ionisationsverhältnissen in der D-Schicht. Diese sind insbesondere von der Einwirkung der Sonne bestimmt. Durch die Neigung des Erdäquators gegen die Erdbahnebene entsteht eine sich jahreszeitlich ändernde Sonneneinstrahlung. Der im Winter flachere Einstrahlwinkel, verbunden mit einer kürzeren Einwirkdauer, ergibt eine geringere Ionisierung der D-Schicht, erkennbar an dem nur wenige Stunden dauernden ruhigen Pegelverlauf.

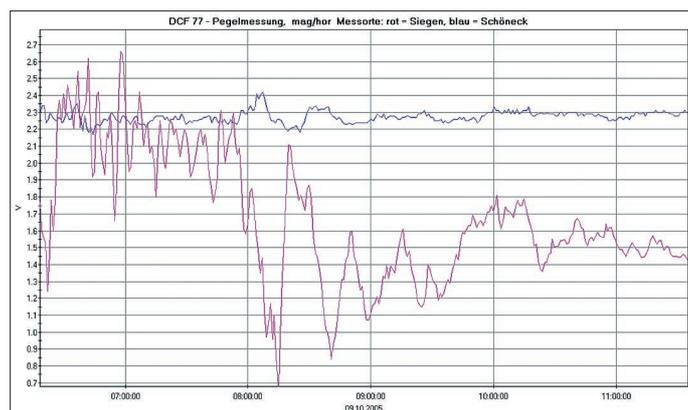
An manchen Wintertagen verläuft das dynamische Auf und Ab der Feldstärken sogar ganz ohne einen ruhigen Zeitabschnitt. Bis auf einige Ausnahmen lassen sich aber die Messungen durch das Verhältnis der ruhigen zu den unruhigen Zeitabschnitten



den jahreszeitlichen Tag- und Nachtverhältnissen zuordnen. Im Unterschied zu Aufzeichnungen mit größerer Entfernung zu einem Sender, Bild 25, zeigen die Nachtkurven der „Nahmessungen“ wenig prägnante wiederkehrende Verlaufsformen.

So gleichen sich zwar im allgemeinen die Übergangszeiten der Verlaufsformen (ruhig, bzw. dynamisch) von einem zum nächsten Tag, aber die Pegelstände zu ei-

Bild 26: Die in einem Abstand von nur 28 km zum Sender gewonnene Aufzeichnung zeugt von stabilen, bodenwellendominierten Verhältnissen selbst in der Reflexionshöhen-Übergangsphase.



ner bestimmten nächtlichen Uhrzeit können an beiden Tagen höchst unterschiedlich ausfallen.

■ **Parallele Messungen an unterschiedlichen Orten**

Überhaupt zeichnet sich in einem Bereich von wenigen 100 km Abstand zum Sender ein recht chaotisches Pegelverhalten ab. Bei einer kurzfristigen zeitgleichen Vergleichsmessung des Ionosphärengangs mit

Hilfe des DCF77-Signales, die ich vor einigen Jahren zusammen mit Patrick Vogt durchführte [1], zeigten die Aufzeichnungen aus Landau einen völlig anderen Feldstärkeverlauf als die meinigen aus Siegen. Zu einem Zeitpunkt, in dem es in Landau durch die Phasendifferenz von Raum- und Bodenwelle zu einer Signalerhöhung kam, konnte es in Siegen durchaus zu einer Abschwächung kommen. Lediglich die Tag-/Nachtübergangszeiten stimmten überein. Dieser Effekt zeichnete sich auch bei späteren Parallelmessungen an unterschiedlichen Empfangsorten, die

sich zwar in verschiedenen Richtungen zum Sender, aber ungefähr im gleichen Entfernungsbereich lagen, ab.

Parallelmessungen an Orten, die in gleicher Richtung, aber mit unterschiedlicher Distanz zum Sender lagen, ergaben ebenfalls stark unterschiedliche Feldstärkekurven. Lediglich die Messung in nur 28 km Senderentfernung, Bild 26, überzeugte auch durch einen stabilen Nachtpegel, aber selbst dort war der Raumwelleneinfluss noch schwach erkennbar, siehe auch dazu Bild 11.

Für die sich bei den Messungen einstellenden sehr unruhigen nächtlichen Pegelwerte sind unterschiedliche, sich überlagernde Effekte verantwortlich. Nach der Rückbildung der tagsüber recht stabilen D-Region erfolgt die Brechung während der Nachtstunden in den darüber liegenden Schichten. Diese sind aber keinesfalls

Bild 27: DCF77-Aufzeichnung mit Vertikalstab (oben) und horizontal optimal auf den Sender ausgerichteten Ferritantennen (unten)

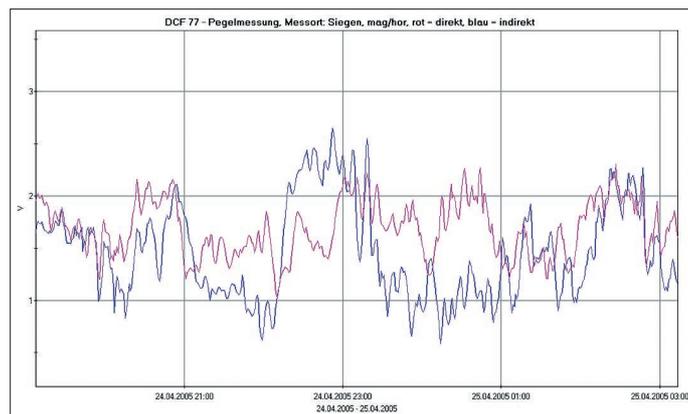


Bild 28: Aufzeichnung mit 90° versetzt angeordneten Ferritantennen – eine Antenne optimal auf den Sender ausgerichtet, die andere bezüglich der Bodenwelle in ungünstigster Position.

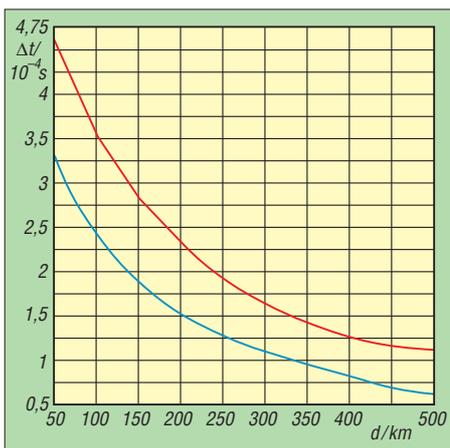


Bild 31: Zeitdifferenz Δt zwischen dem Eintreffen der ersten Bodenwelle und der Raumwelle in Abhängigkeit von der Entfernung d ; blau: 70 km und rot: 90 km Reflexionshöhe. Der Reflexionsfaktor hat negatives Vorzeichen, d.h. es erfolgt eine Signalinvertierung.

als homogen anzusehen. So führen beispielsweise lokale Variationen des Ionisationsgrades zu einem sich ändernden Übertragungsverhalten. Dabei kann auch die Reflexionshöhe schwanken. Die damit verbundenen Laufzeitänderungen bewirken am Empfänger eine Phasenverschiebung gegenüber der Bodenwelle, dessen Betrag frequenzabhängig ist.

Nach den zugehörigen Berechnungen in Anhang 1 und 2 lassen sich nun die Längen der Raumwellen-Übertragungsstrecken festlegen. Die Differenz aus Raum- und Bodenwellenstrecke ist maßgebend für den Laufzeitunterschied, also für die Zeit, die das Raumwellensignal später als das Bodenwellensignal den Empfänger erreicht.

Der sich durch Änderung einer bestimmten Reflexionshöhe einstellende Laufzeitunterschied und die damit verbundene Phasenverschiebung nimmt mit zunehmender Entfernung zum Sender ab. Neben

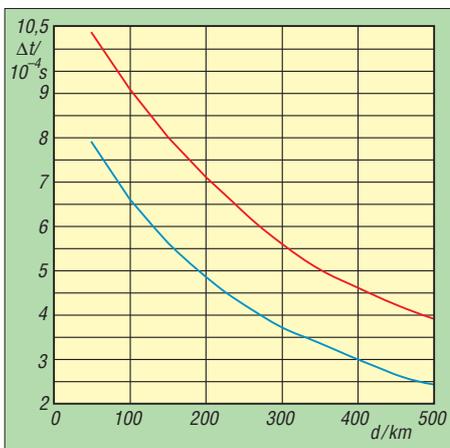


Bild 32: Zeitdifferenz Δt zwischen dem Eintreffen der Bodenwelle und der zweiten Raumwelle in Abhängigkeit von der Entfernung d ; blau: 70 km und rot: 90 km Reflexionshöhe. Der resultierende Reflexionskoeffizient hat positives Vorzeichen.

der Häufigkeit der Schwunderscheinungen ist natürlich der damit verbundene relative Pegelhub von Interesse. Dieser ist in einem Entfernungsfenster, in dem Boden- sowie Raumwelle gleiche Feldstärken besitzen können, am höchsten.

Hier ist sogar eine vollkommene Signalauslöschung durch destruktive Interferenz möglich, Bild 20. Für das DCF77-Signal gilt das für Senderentfernungen zwischen 600 und 1100 km [10]. Die große Schwankungsbreite resultiert aus den unterschiedlichen tages- und jahreszeitlich variablen maßgebenden Faktoren.

■ Einfluss der Empfangsantennen

Mit folgenden Antennen habe ich Vergleichsaufzeichnungen durchgeführt: Magnetische Rahmen- und Ferritantennen, Ferritantennen vertikal sowie horizontal in Senderrichtung und horizontal mit 90° Versatz zum Sender ausgerichtet, Langdrahtantennen, vertikale Stabantennen, Schleifenantennen, Erdantennen und Baumantennen. Jede Variante zeigte den Einfluss der Wechselwirkung von Raum-

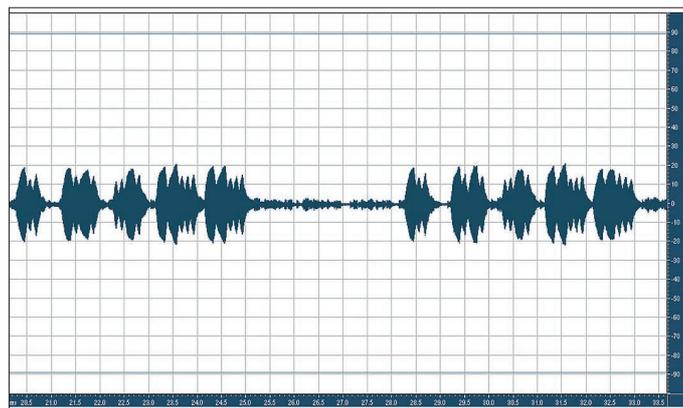
wellenbereich sowohl über Bodenwellen als auch über Raumwellen die wirkungsvollste Übertragungsart. Selbststrahlende Sendemasten für technische Sender und die senkrechten Erdblitzkanäle für die Aussendung der atmosphärischen Impulsstrahlung erfüllen diese Anforderungen optimal. Empfangsseitig bietet sich daher die Verwendung elektrisch vertikal angeordneter Stabantennen sowie magnetisch horizontal ausgerichteter Ferrit- oder Rahmenantennen an.

Insbesondere bei Rahmenantennen weist die symmetrische Anpassung Vorteile auf [13]. Die als Begleiteffekt deutlich wahrnehmbaren Störungen durch Ladungen sowie Gewittergeschehen traten besonders bei den elektrischen Antennen sowie bei der Erdantenne auf.

■ Das DCF77-Signal als Referenz zur „Ionosphärenregelung“ für Empfangsgeräte

Die Funktion eines derartigen Schaltungsprinzips soll die Überreichweiten, z.B. der Sferics im 30 kHz-Bereich, die bei dem

Bild 33: Über einen Resonanzfilter ausgekoppelte 250-Hz-Signal des Rufzeichens DCF77 (in den Minuten 19, 39 und 59 zweimal hintereinander während der Sekunden 20 bis 32 ausgestrahlt).



und Bodenwellen. Besonders ausgeprägt ist das Schwundverhalten bei vertikal und horizontal mit 90° Versatz zum Sender angeordneten Ferritantennen. Diese zeigten in Bezug auf den Pegelverlauf das ungünstigste Verhalten mit großen Pegelschwankungen.

Interessant stellt sich teilweise der Pegelverlauf der 90°-Variante im Vergleich zur optimal auf den Sender in horizontaler Position ausgerichteten Ferritantenne dar. Dabei erscheinen teilweise grobe Feldschwankungen zeitversetzt. Ein sehr gutes Verhalten zeigen die magnetisch horizontal auf den Sender ausgerichtete Ferritantenne sowie der Vertikalstab. Müsste man nicht der zweideutig richtungsempfindlichen Ferritantenne den Vorzug geben? Ich glaube, diesen verdient sie nur, wenn man die Empfindlichkeit auf statische Störungen mit einbezieht und lediglich den Schmalbandbetrieb betrachtet.

Die elektrisch vertikale Polarisierung ist für die Aussendungen im Lang- und Längst-

nächtlichen Rückgang der D-Schicht entstehen, kompensieren. Das DCF77-Referenzsignal dient als Sollwert für die Verstärkungsregelung. Nach den Ergebnissen meiner umfangreichen Messungen kann eine solche Regelung nicht korrekt funktionieren. Der Pegel des Referenzsignals bezieht sich nur auf die tatsächliche Übertragungsstrecke. Maßgebende Faktoren dabei sind:

- Arbeitsfrequenz;
 - Entfernung;
 - Reflexionshöhe;
 - die aus dem Streckenverhältnis von der BW zur RW entstehende Zeitdifferenz und der daraus, in Abhängigkeit von der Arbeitsfrequenz, resultierende Phasenhub zwischen Raum- und Bodenwelle am Empfangsort;
 - die bei dieser Übertragungsstrecke an den Reflexionsflächen vorliegenden Ionisations- bzw. Dämpfungsverhältnisse.
- Auch bei einer 90°-Ausrichtung der Antenne (d.h. in die ungünstigste Horizontal-

lage zum Sender) eignet sich das so gewonnene Referenzsignal nicht. Durch diese Ausrichtung wird zwar der Pegel der Bodenwelle reduziert. Doch selbst wenn durch entsprechende Maßnahmen, wie Schirmung oder symmetrische Anpassung, kein Antenneneffekt vorhanden wäre, so werden doch trotzdem Bodenwellenteile aufgenommen.

Neben Streueffekten sind hier auch Sekundärstrahler zu berücksichtigen. Das dabei entstehende Signal hat jedoch nach den oben aufgeführten Gesetzmäßigkeiten in der Wechselwirkung mit den empfangenen Raumwellen wieder einen vollständig eigenständigen Charakter.

Aus diesem Grund kann auch die von mir in [1] vorgeschlagene Versuchs-Schaltung zur Phasenmessung zwischen Raum- und Bodenwelle nicht korrekt funktionieren.

■ Fehlerhafte Registrierung des Rufzeichens DCF77

In den ersten Wochen der Dauermessung irritierte zunächst das sporadische Auftreten einer alle 20 min erscheinenden minimalen Pegelabsenkung der Feldstärke, Bild 7, links. Nun sendet DCF77 sein Rufzeichen in den Minuten 19, 29, und 59 aus. Die Modulation findet in Form von 250-Hz-Rechteckabsenkungen des Trägersignals von 100 % auf 85 % statt. Die Ausgabe erfolgt in den angegebenen Minuten jeweils zweimal. Das Signal wurde bei mei-

nen Aufzeichnungen aber nicht immer registriert, für Verwirrung sorgte dann das unterschiedliche Verhalten der verschiedenen Messkanäle.

Es zeigte sich ein Bild, wobei scheinbar willkürlich die einzelnen Registrierungen ohne eine gegenseitige Zuordnung mit oder ohne den „Rufzeichenhaken“ erfolgten. Intensive Messungen führten dann zu dem recht banalen Grund der Erscheinung: Mit einem zusätzlichen Filter ließ sich die 250-Hz-Modulation separieren und aufzeichnen. Das Signal war stets vorhanden und stabil. Durch die knappe Einstellung des I-Anteils zur Integration des Sekundärstrahlers erfolgte aber bei dem Empfang des Rufzeichens eine minimale Pegelabsenkung.

Die einminütige Logger-Abtastrate sorgte nun für die merkwürdige Erscheinung. Tatsächlich weicht die Wiederholzeit, wenn auch äußerst minimal, etwas ab. Dadurch wandert der Abtastpunkt mit einer Zeitkonstante von teilweise über einer Woche durch die DCF77-Minutenzeitcodierung. Erfolgte nun das Einlesen während der Sekunden 20 bis 32, so wurde aller 20 min eine Pegelabsenkung geloggt.

■ Nachbemerkung

Bei den Berechnungen sind die Auswirkungen der Erdkrümmung sowie einige andere Faktoren nicht mit einbezogen, die Lichtgeschwindigkeit c wurde aufgerun-

det und die Reflexionshöhe mit 70 bzw. 90 km angenommen. Für Frequenzen bis 10 kHz und Entfernungen bis zu 500 km sind die überschlägigen Berechnungen aber ausreichend genau.

wolfgangfrieese@t-online.de

Literatur

- [1] Vogt, P., Frieese, W., DG9WF: Versuch einer Messung des Tagesgang der D-Schicht. AATIS Praxisheft 13 (2003), S. 105–109
- [2] Klawitter, G.: Ionosphäre und Wellenausbreitung. Siebel Verlag, Meckenheim 2000
- [3] Klawitter, G., Herold, K.: Langwellen- und Längstwellenfunk. Siebel Verlag, Meckenheim 1995
- [4] Volland, H.: Die Ausbreitung langer Wellen, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig 1967
- [5] Frieese, W., DG9WF: Messwertregistrierung mit Datenloggern. FUNKAMATEUR 54 (2005) H. 10, S.1022–1024
- [6] Frieese, W., DG9WF: Sfericempfang Band 1. Wilhelm Herbst Verlag, Dessau 2004
- [7] Frieese, W., DG9WF.: Sfericempfang Band 2. Wilhelm Herbst Verlag, Dessau 2006
- [8] Greisinger electronic GmbH: Messen Steuern Regeln. www.greisinger.de
- [9] Langenbach, D., Hansky, K.: "My Personal Logger", Ein universelles Datenloggersystem. AATIS Praxisheft 16 (2006) S. 10–15
- [10] Piester, D.; Hetzel, P.; Bauch, A.: Zeit- und Normalfrequenzverbreitung mit DCF77, PTB-Mitteilungen Heft 4 (2004) S. 345–368
- [11] Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB): www.ptb.de
- [12] Austrian Lightning Detection & Information System (ALDIS): www.aldis.at
- [13] Frieese, W., DG9WF: OPV-Platine UAP INAw zur Antennenanpassung. FUNKAMATEUR 55 (2006) H. 9, S. 1018–1021

Anhang 1: Berechnung der Laufzeitdifferenz zwischen Bodenwelle und erster Raumwelle

Raumwellenordnungszahl: 1
(Einfachsprung)

Anmerkung: Bis zu einer Entfernung von 500 km kann die Erdkrümmung vernachlässigt werden.

Als Beispiel wird eine (Tages-)Reflexionshöhe von 70 km angenommen, siehe Bild A1-1 sowie Daten in Tabelle A1-1 und -2.

1. Berechnung des Abstrahlwinkels

$$\tan \alpha = \frac{h_{RW}}{0,5 \cdot s_{BW}} = \frac{70 \text{ km}}{60 \text{ km}} = 1,17$$

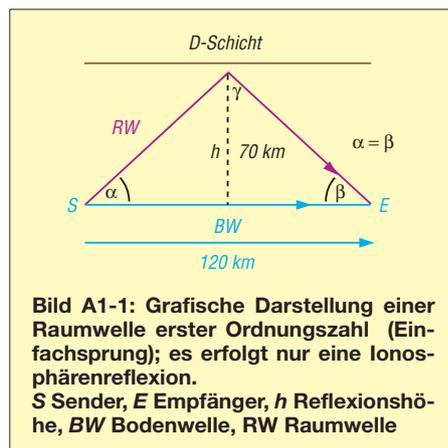
$$\alpha = 49,4^\circ$$

2. Berechnung der Raumwellenstrecke

$$\sin \alpha = 0,76$$

$$0,5 \cdot s_{RW} = \frac{h_{RW}}{\sin \alpha} = \frac{70 \text{ km}}{0,76} = 92,10 \text{ km}$$

$$s_{RW} = 184 \text{ km}$$



3. Berechnung der Laufzeitdifferenz

Streckendifferenz $\Delta d = s_{RW} - s_{BW}$
 $= 184 \text{ km} - 120 \text{ km} = 64 \text{ km}$;

Laufzeitdifferenz $\Delta t = \Delta d / c$

$$\Delta t = \frac{64 \cdot 10^3 \text{ m}}{300 \cdot 10^6 \text{ ms}^{-1}} = 2,13 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

Tabelle A1-1:

Einfachsprung, Reflexionshöhe 70 km

Entfernung/km	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
$\alpha / ^\circ$	70,4	54,5	42,9	35	29,2	25	21,8	19,3	17,3	15,6
0,5 sRW/km	74,3	86	103	123	143	167	189	212	235	259
sRW/km	148,6	172	206	246	286	334	378	424	470	518
sRW - sBW/km	98,6	72	56	46	36	34	28	24	20	18
Laufzeitdifferenz/ 10^{-4} s	3,29	2,4	1,86	1,53	1,2	1,13	0,93	0,8	0,67	0,6

Tabelle A1-2:

Einfachsprung, Reflexionshöhe 90 km

Entfernung/km	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
$\alpha / ^\circ$	74,5	61	50,2	42	35,8	31	27,2	24,2	21,8	19,8
0,5 sRW/km	93,7	103	117	135	154	175	197	219	242	266
sRW/km	187	206	234	270	308	350	394	439	485	532
RW - BW/km	137	106	84	70	58	50	43	39	35	32
Laufzeitdifferenz/ 10^{-4} s	4,6	3,5	2,8	2,3	1,9	1,7	1,4	1,3	1,2	1,1

Anhang 2: Berechnung der Laufzeitdifferenz zwischen Bodenwelle und zweiter Raumwelle

Raumwellenordnungszahl: 2
(Zweifachsprung)

Anmerkung: Bis zu einer Entfernung von 500 km kann die Erdkrümmung vernachlässigt werden.

Als Beispiel wird eine (Tages-) Reflexionshöhe von 70 km angenommen, siehe Bild A2-1 sowie die Daten in den Tabellen A2-1 und -2.

1. Berechnung des Abstrahlwinkels

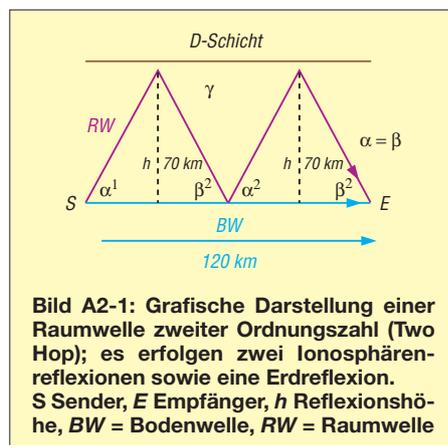
Achtung! Zur Winkelberechnung wird ein Viertel des Betrags der Bodenwellenstrecke eingesetzt.

$$\tan \alpha = \frac{h_{RW}}{0,25 \cdot s_{BW}} = \frac{70 \text{ km}}{30 \text{ km}} = 2,33$$

$$\alpha = 66,8^\circ$$

2. Berechnung der Raumwellenstrecke

$$\sin \alpha = 0,92$$



$$0,5 \cdot s_{RW} = \frac{h_{RW}}{\sin \alpha} = \frac{70 \text{ km}}{0,92} = 76,10 \text{ km}$$

$$s_{RW} = 304 \text{ km}$$

3. Berechnung der Laufzeitdifferenz

Streckendifferenz $\Delta d = s_{RW} - s_{BW}$
 $= 304 \text{ km} - 120 \text{ km} = 184 \text{ km}$;

Laufzeitdifferenz $\Delta t = \Delta d / c$

$$\Delta t = \frac{184 \cdot 10^3 \text{ m}}{300 \cdot 10^6 \text{ ms}^{-1}} = 6,13 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

Tabelle A2-1: Zweifachsprung, Reflexionshöhe 70 km

Entfernung/km	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
α (Grad)	79,9	70,3	61,8	54,5	48,2	43	38,7	35	31,9	29,2
0,25 sRW/km	71,4	74,5	79,5	86,4	93,3	103	113	123	132	143
sRW/km	286	298	318	346	373	412	452	491	528	572
RW - BW/km	236	198	168	146	123	112	102	91	78	72
Laufzeitdifferenz/ 10^{-4} s	7,9	6,6	5,6	4,9	4,1	3,7	3,4	3,0	2,6	2,4

Tabelle A2-2: Zweifachsprung, Reflexionshöhe 90 km

Entfernung/km	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
α (Grad)	82	74,5	67,9	61	55,2	50,2	46	42	38,7	35,8
0,25 RW/km	90,9	93,4	97,5	103	110	117	125	135	144	154
RW/km	363	374	390	412	440	468	500	540	576	616
RW - BW/km	313	274	240	212	190	168	150	140	126	116
Laufzeitdifferenz/ 10^{-4} s	10,4	9,1	8	7,1	6,3	5,6	5	4,7	4,2	3,9

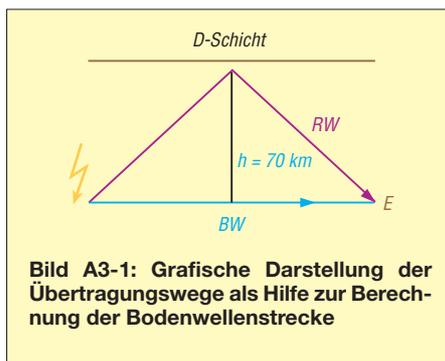
■ **Anhang 3: Berechnung der Distanz des Empfangsortes vom Quellort der Aussendung**

Insbesondere bei dem Empfang von Impulsaussendungen, wie sie bei Sferics- und Blitzsignalen vorliegen, kann man aus der Zeitdifferenz Δt zwischen Boden- und Raumwelle den Abstand zum Quellort ermitteln.

Als Beispiel soll das in Bild A3-2 aufgezeigte Ereignis dienen. Dabei wird eine (Tages-)Reflexionshöhe von 70 km angenommen. Die Begrenzung der zeitlichen Differenz erfolgt durch die Anstiegsflanken des Bodenwellen- und des folgenden negativen Raumwellenimpulses (etwa 0,06 ms). Aus Bild A3-1 lässt sich der zugehörige Bodenwellenabstand entnehmen. Die mathematische Lösung ergibt sich wie folgt:

1. Ermittlung der Streckendifferenz aus der Laufzeitdifferenz

$$\begin{aligned} \Delta s &= \Delta t \cdot c \\ \Delta s &= 0,061 \text{ ms} \cdot 300000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \\ \Delta s &= 18,3 \text{ km} \end{aligned}$$



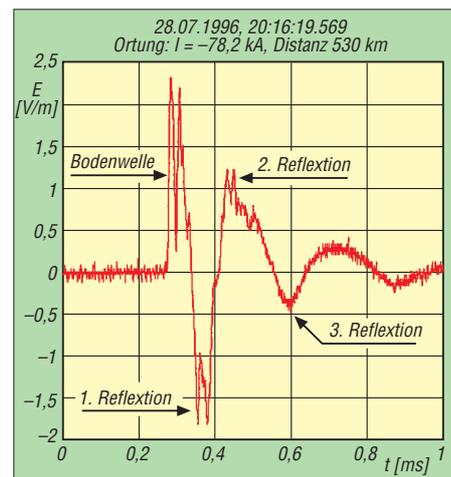
2. Ermittlung der Raumwellenlänge

$$(0,5 s_{RW})^2 = (70 \text{ km})^2 + (0,5 s_{RW} - 9,15 \text{ km})^2 ;$$

$$\begin{aligned} 0,25 s_{RW}^2 &= 4900 \text{ km}^2 + 0,25 s_{RW}^2 - 9,15 \text{ km} \cdot s_{RW} + 84 \text{ km}^2 ; \end{aligned}$$

$$9,15 \text{ km} \cdot s_{RW} = 4984 \text{ km}^2$$

$$s_{RW} \approx 544 \text{ km}$$



3. Ermittlung der Bodenwellenlänge

$$\begin{aligned} s_{BW} &= s_{RW} - 18,3 \text{ km} \\ s_{BW} &= 544 \text{ km} - 18,3 \text{ km} \\ s_{BW} &= 525,7 \text{ km} \end{aligned}$$