

LUFTSPIEGELUNGEN.

Die Ausbreitung ultrakurzer Wellen in der Troposphäre.

Einführung.

Die Troposphäre ist die unterste Schicht in der Atmosphäre. Sie hat eine Dicke von etwa 12 km und ist nicht nur der Schauplatz des gesamten Wettergeschehens, sondern beeinflusst auch die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen. Diese Luftschicht ist für einen großen Teil der UKW- und TV-Überreichweiten verantwortlich. Das lässt es angemessen erscheinen, sich näher mit der UKW-Ausbreitung in der Troposphäre zu befassen, denn wer erfolgreich Weitempfang im UKW- und FS-Bereich betreiben möchte, braucht diese Grundkenntnisse. Anders als beim Hören deutschsprachiger Auslandsdienste auf Kurzwelle haben bloße Knopfdreher auf UKW kaum eine Chance. Erst das Begreifen der Zusammenhänge führt zum Erfolg!

Wellen und Reichweiten.

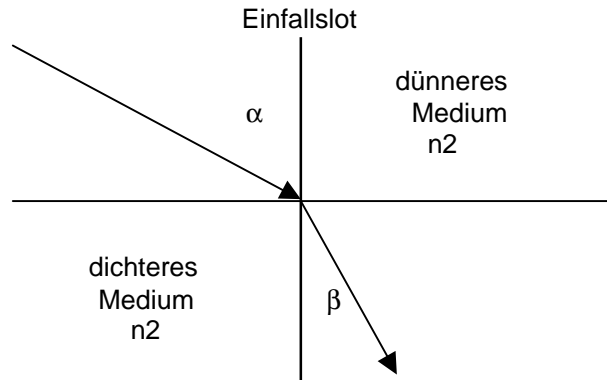
Ultrakurze Wellen von 40 bis 900 MHz (7,5 m bis 33 cm) breiten sich bei normalen Bedingungen nahezu geradlinig aus und werden nicht durch die Ionosphäre reflektiert. Deshalb ist die Reichweite von Sendern auf VHF und UHF relativ gering. Zufriedenstellender Empfang ist nur möglich, wenn zwischen Sender und Empfänger annähernd Sichtverbindung besteht, man spricht von einer quasi optischen Wellenausbreitung. Damit ist die Reichweite eines Senders nicht nur von der Sendeleistung abhängig sondern auch von der Höhe des Senderstandortes, die Höhe der Empfangsantenne sowie der Topografie des dazwischen liegenden Geländes. Je größer die Wellenlänge des zu übertragenden Funk-signales ist, desto stärker wird es entlang der Erdkrümmung gebeugt, je weiter reicht es also über den optischen Horizont hinaus.

Der Versorgungsradius eines UKW-Senders beträgt rund 100 bis 150 km, der eines Senders im UHF-Bereich etwa 50 bis 100 km. Auch darüber hinaus ist in günstigen Lagen und mit größeren Antennen-aufwand noch brauchbarer Empfang möglich, sofern kein näher gelegener Sender den gleichen Kanal belegt. Untersuchungen haben ergeben, dass die Feldstärke von Sendern im UKW-Bereich bis zu einer Entfernung von 250 bis 400 km ständig sinkt, dann aber für mehrere weitere 100 km annähernd konstant bleibt. Das ist vor allem auf Streustrahlung (Scatter) zurückzuführen, die in der hohen Troposphäre bei 10 km Höhe entsteht.

Die Brechung der Wellen in der Troposphäre.

Bei der Brechung der Radiowellen handelt es sich um das gleiche Phänomen wie bei der allseits bekannten Lichtbrechung. Ein gerader Gegenstand

erscheint geknickt, wenn er teilweise ins Wasser gehalten wird. Die Brechung aller elektromagnetischen Wellen beruht auf ihrer unterschiedlichen Ausbreitung in verschiedenen Materialien.



Elektromagnetische Wellen (C_0) breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus, die im Vakuum 300 000 km in der Sekunde beträgt. In anderen Medien ist sie geringer. Entscheidend für die Brechung ist, wie sich der Brechungsindex (n) entlang des Ausbreitungsweges der Welle ändert. Für (n) gilt:

$$n = \frac{C_0}{C_1}$$

Dabei ist C_1 die Lichtgeschwindigkeit im betreffenden Material. Bei dem Beispiel des Übergangs von Luft in Wasser haben wir es mit einer beträchtlichen Änderung des Brechungsindex von $n_1 = 1,0028$ (Luft) auf $n_2 = 1,333$ (Wasser) zu tun, die zu einer deutlichen Brechung führt. Für Physiker: Diese Änderung der Ausbreitungsrichtung der Welle wird durch das Brechungsgesetz beschrieben, mit α als Einfallswinkel und β als Ausfallswinkel.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_1}{n_2}$$

Genau betrachtet, ist der Brechungsindex in der Praxis in jedem Medium von Ort zu Ort verschieden, weil die stoffliche Zusammensetzung und Dichte variiert. So ist es auch bei den Luftschichten der Atmosphäre. Der Brechungsindex der Luft hängt vor allem von ihrem Wasserdampfgehalt ab, aber auch von der Temperatur und dem Luftdruck. Alle diese Faktoren sind wiederum Folgen der Wittersituation. Der Brechungsindex der Luft ist mit 1,00028 nur wenig größer als der des Vakuums und auch seine örtlichen und wetterbedingten Änderungen sind sehr gering.

Arten der Brechung.


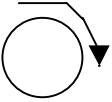
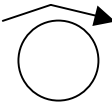
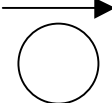
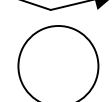
Das Brechungsgesetz besagt, dass eine elektromagnetische Welle immer dann einer gekrümmten Bahn folgt, wenn sich der Brechungsindex entlang des Ausbreitungsweges verändert. Vor allem die

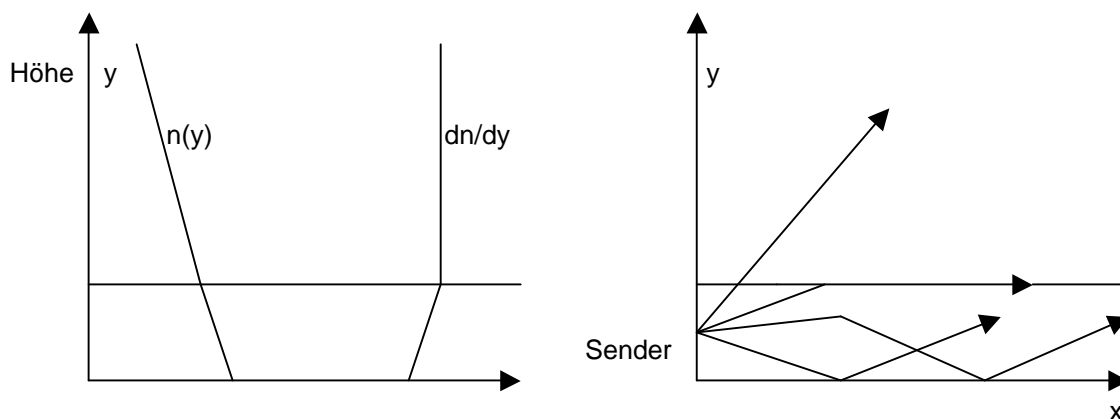
Veränderung des Brechungsindex mit der Höhe ist von Bedeutung.

Der Brechungsindex nimmt in guter Näherung pro Kilometer Höhe um 0.000039 ab. Diese Situation nennt man Standard-Brechung bzw. Standard-Atmosphäre. Die Tabelle verdeutlicht alle möglichen Brechungsarten bzw. Ausbreitungsbahnen. Der Gradient dn/dy kann in einem bestimmten mittleren Höhenbereich stark negativ sein (kleiner als $-1,57 \times 10^{-7}$ pro Meter), während er im übrigen konstant bleibt. Dann liegt ein angehobener Wellenleiterkanal vor. Die Wellen erfahren im Wellenleiterkanal eine Bündelung, deren Stärke vom Betrag des Gradienten dn/dy

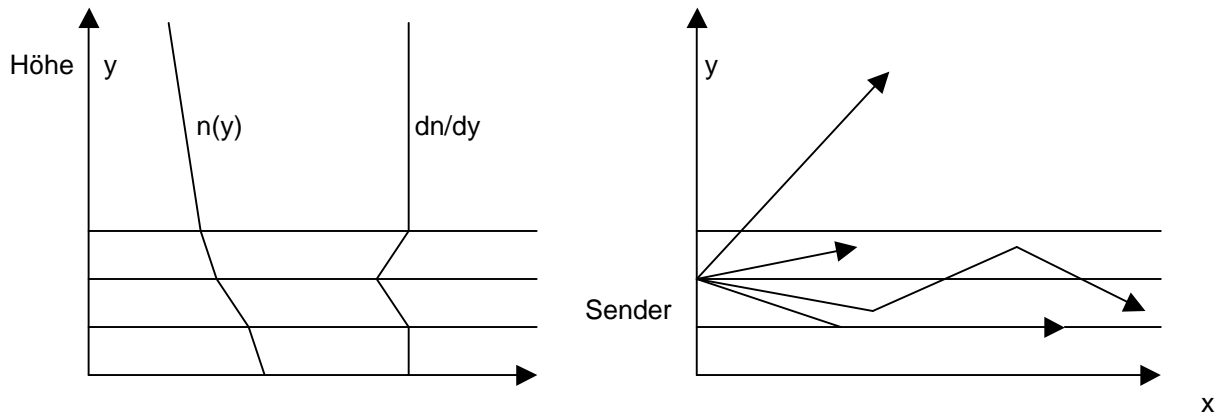
abhängt. Diese Bündelung (Scheinwerferprinzip) bewirkt, dass die Wellen, die unter sehr flachen Winkeln von ca. 1 bis 1.5° in den Kanal gelangen und mit sehr geringen Verlusten transportiert werden. Allerdings bedeutet diese Bündelung auch, dass die Signale erst dort wieder austreten können, wo eine Störung des Kanals vorliegt. Es kommen also empfangstote Zonen vor.

In einem Wellenleiterkanal ist die Ausbreitung frequenzabhängig. Es können sich nur Wellen ausbreiten, deren Frequenz über einer bestimmten Grenzfrequenz liegt (fast immer > 80 MHz), die von der Dicke des Kanals abhängt.

dn/dy	Brechungsart	Stichwort	Ausbreitungsbahn	Reichweite
< 0	konvex (positive Brechung)	Wellenleiterkanal (duct)		ground duct: stark vergrößert elevated duct: erheblich vergrößert/ empfangstote Zonen
< 0	konvex (positive Brechung)	kritische Brechung		etwas vergrößert
< 0	konvex (positive Brechung)	Überstandart Standart Unterstandart		normal
0	gerade	keine Brechung		etwas verringert
> 0	konkav	negative Brechung		stark verringert



Verlauf von n , dn/dy und Ausbreitungsbahnen in einer Bodeninversion (ground duct)



Verlauf von n , dn/dy und Ausbreitungsbahnen in einem Wellenleiter (elevated duct).

Fernempfang nach der Wetterkarte.

Günstige Brechungsverhältnisse, die zu Überreichweiten von Sendern auf ultrakurzen Wellen führen, haben ihre Ursache fast immer in einer abnormen Temperaturverteilung in der unteren Atmosphäre, die man Inversion nennt. Gewöhnlich nimmt die Temperatur mit steigender Höhe über dem Erdboden ab. Bei einer Inversion ist jedoch in einem bestimmten Höhenbereich ein Temperaturanstieg zu verzeichnen. Damit fällt der Brechungsindex stark ab.

Eine Temperaturinversion kann sich aus verschiedenen Wetterlagen heraus entwickeln. In Mitteleuropa ist die häufigste Ursache eine stabile Hochdruckwetterlage. Besonders im Herbst setzen sich umfangreiche Hochdruckgebiete über dem Kontinent fest. Es kommt für einige Tage (selten länger als eine Woche) zu einer austauscharmen Wetterlage, die durch anhaltende Windstille, Hochnebel und Abkühlung des Bodens und der bodennahen Luftschichten charakterisiert ist. Die Sonnenstrahlen besitzen wegen des flachen Einfallswinkels nicht die Energie, den Dunst zu durchdringen und die Erdoberfläche zu erwärmen. In Ballungsräumen besteht außerdem noch Smoggefahr.

Noch etwas Wetterkunde: Auf der Nordhalbkugel der Erde werden Hochdruckgebiete im Uhrzeigersinn von Windströmungen umkreist. Am West- und Nordwestrand eines Hochs werden wärmere Luftmassen nach Norden gelenkt, die der geringen Dichte wegen, die kalten Bodenluftmassen des Hochs teilweise überströmen. Der westliche (bzw. nordwestliche) Rand eines ortsfesten Hochdruckgebietes weist deshalb besonders starke Inversion auf. Die günstigste Ausbreitung besteht entlang der Isobaren (Linien gleichen Luftdrucks), weil hier die Brechungsverhältnisse ziemlich konstant sind.

Auch im Sommer können im Zentrum von Hochdruckgebieten Inversionen entstehen. Durch starken Sonnenschein nimmt der Erdboden tagsüber viel Wärme auf, die er Nachts wieder ausstrahlt. Dadurch bilden sich, wenn es windstill ist, bis in die Morgendämmerung kleinere Bodeninversionen, die die Sonne aber rasch wieder auflöst. Ein Zeichen für die Wärmeabgabe des Bodens und der unteren Luftschichten ist die Kondensation des Wasserdampfes in Form von Tau und Bodennebel.

Die Verhältnisse über dem Meer sind etwas anders. Das Wasser erwärmt sich langsamer und speichert die Wärme länger. Besonders im Frühjahr kommt es häufig vor, dass über dem Land erwärmte Luftmassen über die noch winterkalte Meeresoberfläche geführt werden. Sie entzieht den unteren Luftschichten ihre Wärme und verursacht - nur geringe vertikale Luftdurchmischung vorausgesetzt - eine Inversion, die sehr lange andauern kann. Derartige Inversionen treten nicht nur über ausgesprochen kalten Wasserflächen wie der Nord- und Ostsee auf, sondern auch über subtropischen oder tropischen Meeren, wie dem Mittelmeer oder dem Indischen Ozean.

Fadingerscheinungen.

Beim Empfang ultrakurzer Wellen treten ab einem Abstand von etwa 100 km vom Sender Feldstärke-schwankungen auf. Man unterscheidet dabei vor allem schnelles Fading (Scintillation) mit Perioden im Sekundenbereich und tageszeitabhängige Feldstärkeveränderungen. Das schnelle Fading deutet auf eine instabile Wettersituation ohne Inversion hin. Es ist charakteristisch für den Normalempfang am Rande des Versorgungsbereiches eines Senders.

Bei einer Wetterlage mit guter Luftdurchmischung (Wind) und Bewölkung, bleiben auch die Feldstärkeunterschiede zwischen Tag und Nacht gering.

Dagegen verursacht ein sogenanntes Strahlungswetter mit klarem Himmel und wenig Luftbewegung, einen stärkeren Tag- Nacht-Feldstärkegang. Die im Laufe der Nacht entstehende stabile Temperaturschichtung in der Bodeninversion, löst sich tags bei einsetzender Erwärmung des Erdbodens durch die Sonnenstrahlung wieder auf. Bereits einige Stunden nach Sonnenaufgang wird daher in den bodennahen Schichten wieder eine normale Temperatur abnahme mit der Höhe beobachtet. Die täglichen Feldstärkechwankungen können Beträge bis zu 40 dB (100fach) erreichen.

Im Monatsdurchschnitt werden in Mitteleuropa während des Sommers Tagesschwankungen von etwa 10 dB verzeichnet, im Winter dagegen nur 3 bis 6 dB. Über dem Meer gibt es wegen den ausgeglicheneren Temperaturverhältnissen keinen nennenswerten Tagesgang. Lediglich in Küstennähe macht sich (stark abgeschwächt) der Einfluss der Temperaturschwankungen des Festlandes bemerkbar.

INDIKATOREN, ERKENNTNISSE und MERMALE für wetterbedingte Überreichweiten.

Hochdruckgebiet:
1. Langsam abwandernd, allmählich abbauend.
2. Kleines Hochdruckgebiet, schnellziehend, kurzzeitig gute Bedingungen möglich.
Isobaren:
1. Fläche der 1015 mb Isobaren auf der Wetterkarte grenzt die Verbindungsmöglichkeiten Zwischen den Stationen ein.
2. Gute Verbindungsmöglichk. zwischen Stationen auf der gleichen Isobare über Höheninversion.
3. Verbindungen quer zu den Isobaren ebenfalls möglich, meistens in Verbindung mit Bodeninversion; Reichweite geringer.
Luftdruck:
1. Langsam und stetiger Anstieg, Aufbau eines Hochdruckgebiets.
2. Konstanter Luftdruck.
3. Kleine, tagesbedingte Schwankungen bei hohem Druck (stabile Schönwetterlage).
4. Sprunghafter Luftdruckanstieg; Durchzug einer Kaltfront mit Niederschlag, kurzzeitig gute Bedingungen möglich.
Luftbewegung.
1. Windstille
2. Schwachwindig, am Abend windstill, gute Nachtbedingungen.
Horizont.
1. Fahlblau bis grau
2. Wolkenauflösung zum Abend, gute Nachtbeding.
3. Cirruswolken, langsam von Ost nach West Ziehend.
Sicht.
1. Schlechte Sicht durch Dunst.
Kaltfront.
1. Frontal zu einer Kaltfront.

Empfangspraxis und Reichweiten.

Die tägliche Beobachtung des Wettergeschehens in natura, auf Wetterkarten und in den Zeitungen oder im Fernsehen ermöglicht meistens sehr zuverlässige Rückschlüsse auf die Empfangsbedingungen. Trotzdem sollte der Überreichweiten-DXer auch die Empfangsqualität einiger ausgewählter Sender regelmäßig prüfen, am besten spätabends, wenn sich Inversionen auszubilden beginnen. Sehr vorteilhaft ist es, sich eine Liste der Ortssender und einiger weiter entfernter Stationen anzulegen, um jederzeit leicht einen Überblick über die Bedingungen zu gewinnen und im Falle von Überreichweiten, die DX-Sender zu erkennen. Die in der Praxis erzielbaren Reichweiten hängen vor allem von vier Gesichtspunkten ab:

Handelt es sich um einen Wellenleiterkanal oder um eine Bodeninversion?

Im Falle von Bodeninversionen liegen die Reichweiten meistens bei 300 bis 400 km, in Wellenleiterkanälen werden mitunter über 1000 km überbrückt.

Land- oder Seestrecke?

Ob es sich um eine Land- oder Seestrecke handelt, ist nicht nur aus ausbreitungstechnischen Gründen wichtig, sondern auch wegen der Doppelbelegung der Frequenzen. Diese macht es zum Beispiel schwierig, innerhalb des mitteleuropäischen Festlandes im UKW-Band (87.5 bis 108 MHz) mehr als 500 km zu überbrücken, weil jeder Kanal mit einer größeren Anzahl starker Sender belegt ist. Größere Reichweiten über Land sind fast immer auf Wellenleiterkanäle zurückzuführen, bei denen störende Sender für den Beobachter in einer toten Zone liegen. Bei Seestrecken, z.B. nach Großbritannien oder Norwegen, werden regelmäßig Überreichweiten von 600 bis 900 km gemeldet. Natürlich ist auch der geringe Tagesgang der Feldstärken von Bedeutung.

Empfindlichkeit und Richtwirkung der Empfangsanlage.

Während von ionosphärischen Überreichweiten immer nur eine kleine Anzahl weit entfernter Stationen betroffen ist, wirken sich günstige Brechungsverhältnisse in der Troposphäre auf fast alle Sender des betroffenen Gebietes aus. Das ganze Band ist voller Sender und wer dann eine z.B. 800 km entfernte DX-Station hören oder sehen will, wird nicht nur durch die bekannten und ständig zu empfangenen Ortssender gestört, sondern auch durch weniger interessante DX-Stationen, in Abständen von etwa 300 oder 400 km, die jetzt mit Ortssenderfeldstärken einfallen. Eine Richtantenne mit hohem Gewinn und starker Bündelung leistet in solchen Fällen gute Dienste. Dennoch ist es häufig nicht zu umgehen, den Sendeschluss störender Stationen abzuwarten.

Topografische Hindernisse.

Inversionen entstehen vorwiegend in Höhen unter 2000 m. Höhere Gebirge wie die Alpen bilden wirksame Sperr-Riegel für troposphärische Überreichweiten. Nur in seltenen Fällen werden Signale so günstig zwischen den Bergen reflektiert, dass sie am Rand in eine Inversionsschicht eintauchen können und weitertransportiert werden.

Schlusswort.

Die Beobachtung troposphärischer Überreichweiten stellt ein attraktives Betätigungsfeld dar, wenn man

etwas Interesse für die physikalischen Gesetzmäßigkeiten aufbringt. Über die Empfangspraxis könnte noch sehr viel geschrieben werden, aber die Erfahrungen muss jeder für sich machen. Sehr hilfreich kann auch der Erfahrungsaustausch mit anderen UKW/TV-DX'ern sein, z.B. im Rahmen des UKW/TV Arbeitskreises.

Frank Helmbold

im Januar 1982

PC-Überarbeitung Jan Lüschen, im März 1999. Auf eine Literaturangabe wurde verzichtet. Erstausgabe in der Fachzeitschrift weltweit hören Nr.2/1982.