

Wellenausbreitung

Die Kenntnis der Faktoren, die die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen beeinflussen, ist wichtig für das Verständnis von Erscheinungen und Maßnahmen, die im Funkverkehr und bei der Radarüberwachung auftreten.

Es handelt sich um Wellenausbreitungseigenschaften, die bei verschiedenen Frequenzen im freien Raum, in der Erdatmosphäre und in den anderen Medien in Abhängigkeit von Tageszeit, Jahreszeit und Wettereinflüssen auftreten.

Es wird sich hier auf die relativ einfachen Verhältnisse der ebenen Wellenfronten im Fernfeld der Antenne beschränkt.

Die Inhalte des Kapitels „Wellenausbreitung“ werden bei einem Lehrgang „Radargrundlagen“ vorausgesetzt. Dieses Kapitel ist eine Wiederholung von bekannten Themen aus dem Physikunterricht.

Inhaltsverzeichnis

Frequenz- und Wellenbereiche	3
Leistungsdichte (Feldstärke)	4
Die Brechung.....	5
Dispersion.....	5
Beugung (Diffraktion).....	5
Totalreflexion.....	6
Spiegelreflexion.....	6
Diffuse Reflexion.....	6
Streuung.....	6
Absorption.....	7
Aufbau der Erdatmosphäre	7
Troposphäre.....	8
Stratosphäre.....	8
Ionosphäre.....	8
Ausbreitungsarten elektromagnetischer Wellen	9
Bodenwelle.....	9
Raumwelle.....	9
Brechung in der Troposphäre.....	9
Reflexion an der Ionosphäre.....	9
Direkte Welle.....	10
Radarhorizont	10
Anomale Wellenausbreitung	10
Superrefraktion.....	10
Überreichweiten.....	11
Ducting.....	11
Subrefraktion.....	11
Fresnel-Zone	12
Fresnel-Zone bei Radargeräten.....	12
Zusammenfassung	13

Frequenz- und Wellenbereiche

Das Spektrum der elektromagnetischen Wellen weist Frequenzen bis zu 10^{24} Hz auf. Dieser sehr große Gesamtbereich wird wegen unterschiedlicher physikalischer Eigenschaften in verschiedene Teilbereiche gegliedert.

Die Einteilung der Frequenzen in die verschiedenen Bereiche wurde vormals an Kriterien gemessen, die historisch entstanden und mittlerweile überholt sind und so entstand eine neue Einteilung der Frequenzbänder, die international verwendet wird. Teilweise wird aber in der Literatur noch die traditionelle Frequenzbandbezeichnung benutzt. Eine Übersicht zeigt das Bild 1.

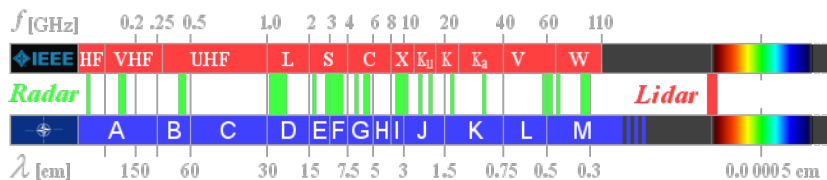


Bild 1: verschiedene Frequenzbandbezeichnungen im Vergleich

Derzeit gibt es zwei gültige Bezeichnungssysteme für Frequenzbänder. Die IEEE favorisiert ein Bezeichnungssystem, das historisch entstanden ist und dessen gewollt unsystematische Verteilung der Buchstaben zur Bandbezeichnung teilweise aus der Zeit des 2. Weltkrieges stammt, deren Auswahl anfänglich der besseren Geheimhaltung genutzter Frequenzen dienen sollte.

Innerhalb der NATO wird eine neuere Frequenzbandtabelle genutzt, deren Bandbegrenzungen an die Technologien und Messmöglichkeiten in den verschiedenen Frequenzbereichen angepasst ist. Die Bandgrenzen sind annähernd logarithmisch verteilt und das System ist nach oben hin offen, es können also leicht weitere Bänder definiert werden. Dieses Bezeichnungssystem hat ebenfalls militärischen Ursprung und ist eine Bändeinteilung für den elektronischen Kampf, in welchem Radargeräte schließlich einen wesentlichen Platz einnehmen.

Die Frequenzen von Radargeräten reichen von etwa 30 Megahertz bis zu etwa 98 Gigahertz (98.000.000.000 Schwingungen pro Sekunde!). Für bestimmte Radaranwendungen werden aber auch bestimmte Frequenzen bevorzugt. Sehr weitreichende Radaranlagen arbeiten meist mit niedrigeren Frequenzen unterhalb bis einschließlich des D-Bandes. Flugsicherungsradargeräte arbeiten teils knapp unter 3 GHz (Aufklärungsradar) bzw. knapp unter 10 GHz (Präzisionsanflugradar). Je höher die Frequenz ist, desto besser ist die Genauigkeit, aber desto geringer auch die Reichweite.

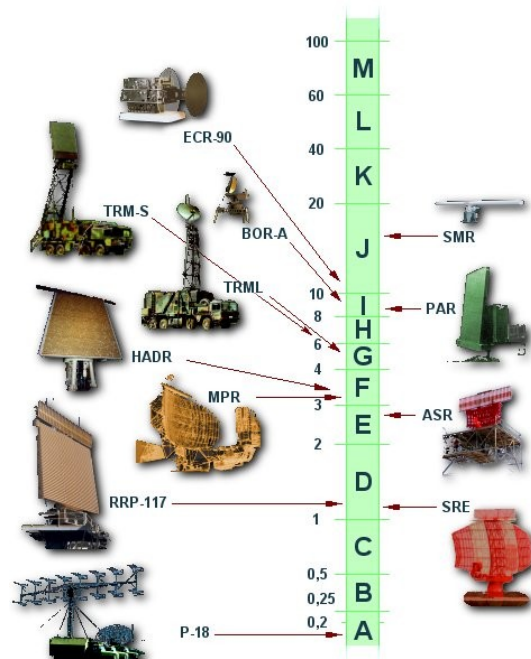


Bild 2: einige Radargeräte mit ihrem Frequenzband

Leistungsdichte (Feldstärke)

Fließt durch einen Leiter ein periodischer Wechselstrom, so baut sich ein elektromagnetisches Wechselfeld auf. Ist der Leiter endlich und wird von einem Generator ständig elektrische Energie nachgeliefert, kann sich das Feld vom Ende des Leiters ablösen und als elektromagnetische Welle in den freien Raum treten. (Siehe Buch 3 „Antennentechnik“ vom Radartutorial.)

Um die in einem elektromagnetischen Feld enthaltene Energie auch zahlenmäßig zu erfassen, wäre eigentlich stets die Angabe der elektrischen und der magnetischen Feldstärke erforderlich. Beide Größen sind jedoch Vektoren, also im Raum ausgerichtete Größen, die zusätzlich noch von der Zeit abhängig sind.

Die mit der Wellenausbreitung in z-Richtung verbundene Energieübertragung wird mit Hilfe des Vektors \vec{S} beschrieben, der Poyntingvektor heißt (benannt nach dem britischen Physiker John Henry Poynting) und senkrecht auf den Vektoren \vec{E} und \vec{H} steht. Er gibt die Strahlungsleistung pro Flächeneinheit an, also die Energiemenge des elektromagnetischen Feldes, die pro Sekunde durch eine senkrecht zur Ausbreitungsrichtung z stehende Fläche von 1 m^2 strömt. Mathematisch wird dies durch das Vektorprodukt von \vec{E} und \vec{H} beschrieben:

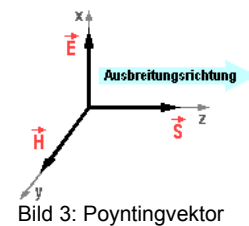


Bild 3: Poyntingvektor

$$\vec{S} = \vec{E} \cdot \vec{H}$$

\vec{E} = elektrischer Feldvektor in V/m

\vec{H} = magnetischer Feldvektor in A/m

\vec{S} = Poyntingvektor in VA/m²

Weil die Feldstärken \vec{E} und \vec{H} die Einheiten V/m und A/m haben, folgt für den Poyntingvektor \vec{S} die Einheit VA/m², was tatsächlich einer Leistung pro Flächeneinheit entspricht.

Wird von einem *isotropen Kugelstrahler* hochfrequente Energie abgestrahlt, so verteilt sich diese gleichmäßig nach allen Richtungen. Demzufolge bilden Flächen gleicher Leistungsdichte Kugeln um den Strahler. Bei größer werdendem Kugelradius verteilt sich die Energie auf eine größere Fläche ($A = 4 \pi R^2$) um den Strahler. Oder anders ausgedrückt: bezogen auf eine angenommene Fläche wird die Leistungsdichte an der Fläche mit steigendem Abstand durch die Strahlungsdivergenz geringer.

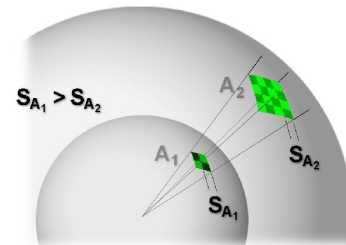


Bild 4: Ungerichtete Leistungsdichte

Die Abnahme der Strahlungsintensität bzw. der Leistungsdichte erfolgt im freien Raum mit dem Quadrat der Entfernung, die Abnahme der zugehörigen \vec{E} - und \vec{H} -Felder jedoch linear. Die Abnahme der Leistungsdichte ergibt sich somit aus dem Faktor $1/d^2$ und die Abnahme der \vec{E} - und \vec{H} -Feldstärke mit dem Faktor $1/d$.

$$P = P_0 \cdot \frac{1}{d^2} \quad E = E_0 \cdot \frac{1}{d}$$

E_0 = Feldstärke im freien Raum (keine Hindernisse: auch Freiraumfeldstärke genannt)

P_0 = Leistungsdichte

Ist absorbierende Materie in irgendeiner Form im Bereich der Strahlung vorhanden, so tritt eine zusätzliche Dämpfung und eine Beeinflussung der Ausbreitungsrichtung auf.

Die Brechung

Brechung ist die Richtungsänderung einer Welle aufgrund einer lokalen Änderung ihrer Ausbreitungsgeschwindigkeit, die durch die bei Brechzahl n beschrieben wird. Trifft eine Welle schräg auf die Grenzfläche zweier Medien unterschiedlicher Dichte, in denen die Welle verschiedene Ausbreitungsgeschwindigkeiten hat, tritt beim Übergang in das zweite Medium eine Änderung der Geschwindigkeit auf.

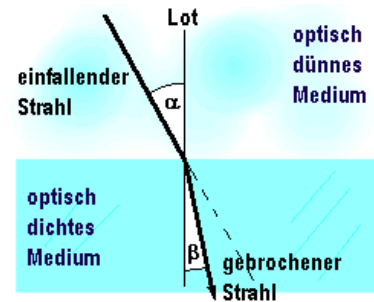


Bild 5: Brechung

Dies wiederum führt zu einer Richtungsänderung der Welle, man sagt auch, sie wird an der Grenzfläche gebrochen. Die Brechung einer elektromagnetischen Welle erfolgt beim Eintritt in ein optisch dichteres Medium stets zum Lot hin.

Bezeichnet man den Winkel im optisch dünneren Medium mit α und den im optisch dichteren Medium mit β , so liegen einfallender Strahl, gebrochener Strahl und Lot stets so in einer Ebene, dass die folgende Gesetzmäßigkeit, das **Brechungsgesetz**, gilt:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

Der Quotient n ist für jedes Stoffpaar unabhängig vom Winkel α des einfallenden Strahles und heißt **Brechungszahl**. Sie entspricht dem Verhältnis der beiden Ausbreitungsgeschwindigkeiten.

Die Brechung an dichteren und dünneren Medien kann unter bestimmtem Einfallswinkel auch zur Reflexion führen. Bei Radargeräten wird das als anormale Wellenausbreitung bezeichnet, welche Überreichweiten und sogar unerwünschte Echosignale, sogenannte „Engelechos“ verursachen kann.

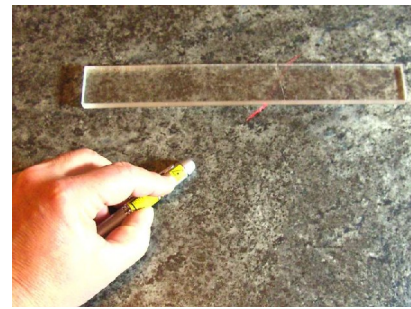


Bild 6: ein Laserpointer und eine Acrylscheibe

Dispersion

Unter Dispersion versteht man die Abhängigkeit der Brechungszahl von der Wellenlänge. Da die Wellenlänge selbst von der Fortpflanzungsgeschwindigkeit abhängt, ergeben sich bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten unterschiedliche Brechungszahlen.

Der Geschwindigkeitsunterschied von Wellen unterschiedlicher Frequenz äußert sich in manchen Stoffen besonders deutlich, wie z.B. bei einem Prisma aus Flintglas, in dem weißes Sonnenlicht in seine Spektralfarben zerlegt wird.

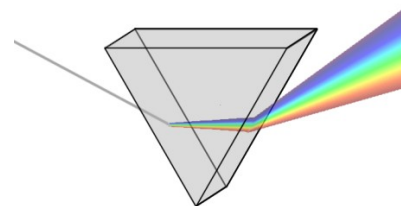


Bild 7: Dispersion an einem Prisma

Diese Erscheinung führt durch Wassertröpfchen in der Atmosphäre zur Entstehung des Regenbogens. Bei Radargeräten ist die Dispersion eine Ursache für Messfehler bei der Richtungsmessung.

Beugung (Diffraktion)

Unter Beugung versteht man die bei Wellen mögliche Abweichung von der geradlinigen Ausbreitung, wenn Hindernisse oder Begrenzungen im Wege stehen. Diese Abweichung vom geraden Strahlenverlauf ist umso stärker, je größer die Wellenlänge gegenüber den Abmessungen der Hindernisse ist.

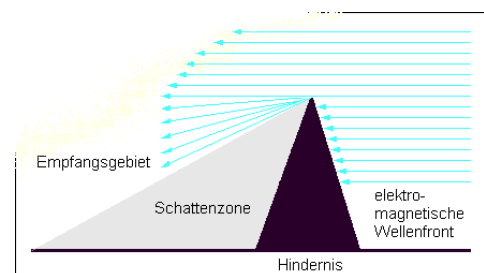


Bild 8: Diffraktion Elektromagnetischer Wellen

Durch diesen Effekt des Herumgreifens der elektromagnetischen Wellen um ein Hindernis ist auch ein Empfang in Schattenzonen möglich. Das führt allgemein dazu, dass die elektromagnetischen Wellen in ihrer Ausbreitungsrichtung um die Erdkugel gebeugt werden. Damit ist es theoretisch möglich, Ziele auch hinter dem Horizont zu orten.

Das Gebiet hinter dem Funkhorizont, in dem die Ortung von Zielen noch möglich ist, bezeichnet man als Diffraktionsgebiet oder Halbschatten. Rechnerisch lässt sich dieses Gebiet nicht bzw. nur näherungsweise durch *transzendente Gleichungen* erfassen.

Totalreflexion

Trifft ein Energiestrahл unter einem Winkel α größer als ein bestimmter Winkel auf eine Mediengrenze, so wird er total reflektiert. Der Winkel, ab dem eine solche Totalreflexion auftritt, wird Grenzwinkel θ_s genannt.

In der nebenstehenden Grafik wird das Entstehen des Grenzwinkels und somit einer Totalreflexion beim Durchlaufen einer elektromagnetischen Wellenfront vom optisch dichteren in ein optisch dünneres Medium dargestellt. Das optisch dichtere Medium sei durch die dunkelblaue Farbe gekennzeichnet und durch die (größere) Brechzahl n_1 charakterisiert, das dünnere Medium durch die Hintergrundfarbe und eine kleinere Brechzahl n_2 .

Der Grenzwinkel θ_s wird nach der Formel berechnet:

$$\theta_s = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

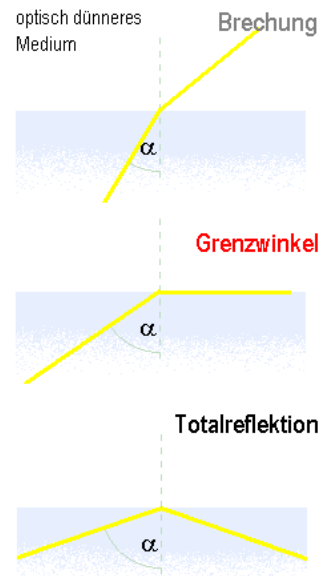


Bild 9: Der Grenzwinkel

Die Totalreflexion ist Ursache für Naturerscheinungen wie die Fata Morgana oder wie scheinbar nasse Asphaltstraßen in der Sommerhitze. Bei der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen ist sie die Ursache für Anomalitäten wie Suprarefraktion und Ducting. Praktische Anwendung findet die Totalreflexion in den Glasfaserleitungen.

Spiegelreflexion

Eine Spiegelreflexion tritt an einer glatten Oberfläche eines strahlungsundurchlässigen Mediums auf. Die Unebenheiten kleiner als $1/32$ der Wellenlänge λ können vernachlässigt werden. Die Spiegelreflexion geschieht unter dem Gesetz Einfallswinkel gleich Ausfallwinkel. Am Reflexionspunkt wird das Signal in seiner Phasenlage um 180° gedreht.

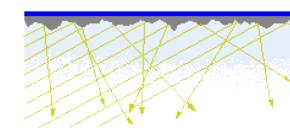


Bild 10: Diffuse Reflexion

Diffuse Reflexion

Diffuse Reflexion tritt an rauen Oberflächen (rau im Vergleich zur Wellenlänge λ) strahlungsundurchlässiger Medien auf. Die reflektierten Strahlen werden in verschiedene Richtungen abgelenkt und somit zerstreut.

Streuung

Streuung tritt auf, wenn eine Strahlung auf kleinste, reflektierende Teilchen trifft, die frei im Raum schweben, wie z.B. Staubwolken oder eine Regenfront. Die Gesamtheit der Teilchen verursacht diffuse Reflexion, die keinen größeren festen Körper voraussetzt.

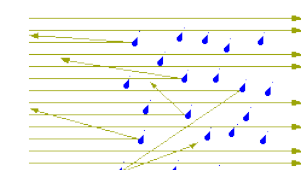


Bild 11: Diffuse Streuung

Wolken, Nebel und Regengebiete können bei Wellenlängen unterhalb von 10 cm ein ausgedehntes Echosignal (Wetter-Clutter) erzeugen. Die das Wettergebiet durchdringenden Wellen erfahren eine relativ starke Dämpfung.

Absorption

Wird in einem Medium, bedingt durch seine Beschaffenheit, elektromagnetische Energie teilweise oder vollständig verbraucht (verschluckt), so spricht man von Absorption. (Physikalisch wird die elektromagnetische Energie in eine andere Energieform, meist Wärme, umgeformt.)

Die Absorption der elektromagnetischen Wellen ist in der niederschlagsfreien Atmosphäre bis zum mm-Wellenbereich zu vernachlässigen. Erst im mm-Wellenbereich tritt durch Resonanzeffekte (im Bild: molekulare Streuung genannt) der neutralen Sauerstoffmoleküle und der Moleküle des nichtkondensierten Wasserdampfes eine merkliche Absorption ein, die sich durch eine zusätzliche Dämpfung bemerkbar macht.

Diese Absorption ist abhängig von Frequenz und von der Weglänge, die von der Welle zurückgelegt wird.

Nichtkondensierter Wasserdampf wird angegeben in „relative Luftfeuchte“ in Abhängigkeit von der Temperatur: warme Luft kann mehr Wasserdampf aufnehmen als kalte Luft. Demzufolge ist die Absorption der elektromagnetischen Welle in der Atmosphäre auch noch von der Temperatur und der relativen Luftfeuchte abhängig.

Aufbau der Erdatmosphäre

Als Erdatmosphäre bezeichnet man die Gashölle der Erde, die in eine Höhe von etwa 2000 ... 3000 km reicht. Der für die Wellenausbreitung wichtige Teil der Atmosphäre erstreckt sich bis in eine Höhe bis ca. 500 km und ist eingeteilt in:

- Troposphäre,
- Stratosphäre und
- Ionosphäre.

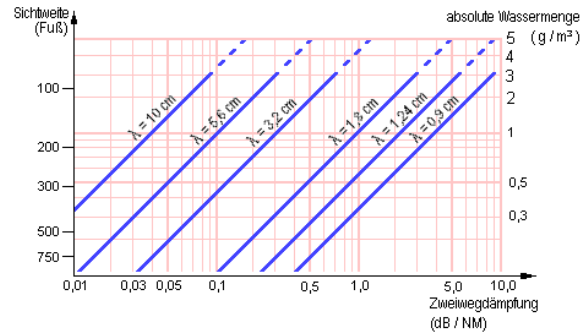


Bild 12: Zweiwegdämpfung an diffus streuenden Objekten

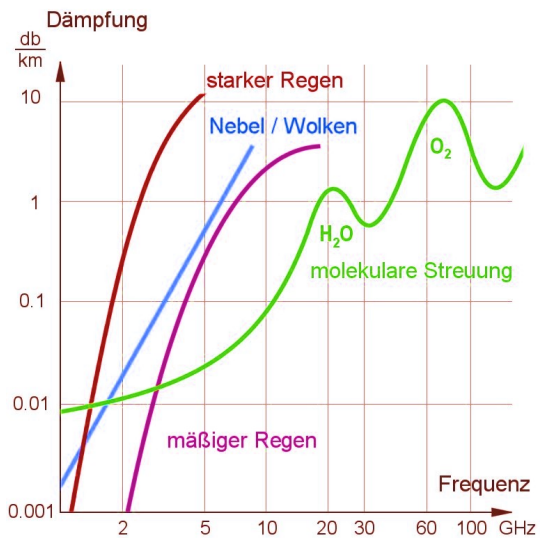


Bild 13: Atmosphärische Dämpfungsverluste

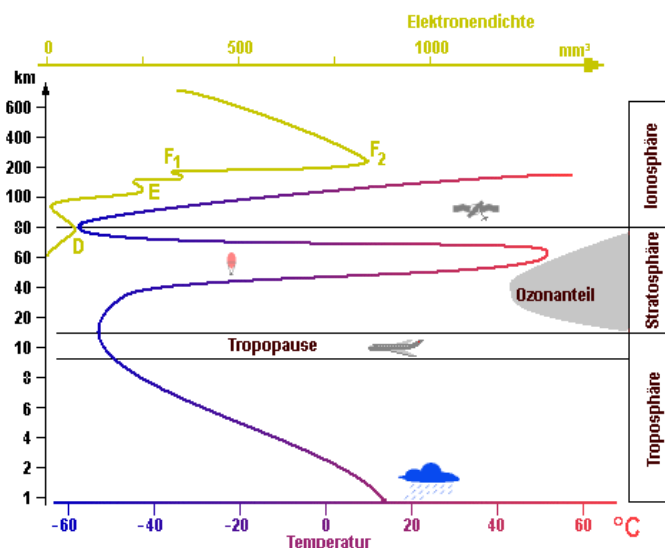


Bild 14: Aufbau der Erdatmosphäre

Troposphäre

Die Troposphäre ist der unterste Teil der Erdatmosphäre zwischen Erdoberfläche und ca. 11 km (7 Nautische Meilen) Höhe. Dieser Bereich ist dadurch gekennzeichnet, dass in ihm die Temperatur etwa linear mit der Höhe bis auf durchschnittlich -50°C abnimmt. In der Troposphäre finden alle Wettererscheinungen statt.

Die **Tropopause** ist eine Grenzschicht zwischen Troposphäre und Stratosphäre und liegt in den mittleren Breiten durchschnittlich zehn bis zwölf Kilometer hoch. Sie trennt die vom Wetter geprägte Troposphäre von der darüber liegenden ruhigeren Stratosphäre. In der Tropopause herrschen weitgehend starke Winde, Jet Streams genannt, welche oft Windgeschwindigkeiten bis 400 km/h erreichen können. In dieser Schicht kann der Langstreckenverkehr sehr ökonomisch durchgeführt werden.

Stratosphäre

Die zwischen 11 und 80 km definierte Stratosphäre weist im unteren Gebiet ein Teil mit konstanter Temperatur zwischen -40 und -50°C auf. In diesem Bereich bildet sich der Ozongürtel aus, dessen maximale Ozondichte sich bei ca. 25 km befindet und bis zum Temperaturmaximum von etwa $+50^{\circ}\text{C}$ in 60 km Höhe reicht.

Der Ozongürtel ist verantwortlich für die Absorption eines großen Teils der von der Sonne ausgehenden und gesundheitsschädlichen ultravioletten Strahlung.

Ionosphäre

Die maximale Temperatur in 60 km Höhe nimmt im obersten Teil der Stratosphäre wiederum stark ab und durchläuft in etwa 80 km Höhe ein Minimum. Hier liegt der Beginn der Ionosphäre, die bis etwa 600 km reicht.

In diesem obersten Teil der Erdatmosphäre wird durch energiereiche Sonneneinstrahlung (UV- und Gammastrahlung) ein großer Teil der neutralen Luftmoleküle ständig ionisiert, daher auch die Bezeichnung Ionosphäre. Das heißt, es werden durch diese Strahlen Elektronen aus den Atomverbänden gelöst, so dass die Ionosphäre in weiten Bereichen aus freien Elektronen (negative Ladungen) und positiv geladenen Atomrümpfen, den Ionen besteht. Die erkennbare Schichtung der Elektronendichte wird mit den Buchstaben D, E, F_1 und F_2 gekennzeichnet.

Die größte Ionisationsdichte stellt sich in der F_2 -Schicht in etwa 300 km Höhe ein. Die Elektronendichten der ionisierten Schichten in der Ionosphäre schwanken tages- und jahreszeitlich und sind von der Aktivität der Sonnenflecken abhängig. Bei Sonneneinstrahlung bilden sich alle vier Schichten D, E, F_1 und F_2 mehr oder weniger stark aus, wobei sie die ultravioletten Sonnenstrahlen weitgehend absorbieren. Der noch hindurchtretende Rest an UV-Strahlung wird vom Ozongürtel in der Stratosphäre festgehalten. Nacht verschwinden die Schichten D, E und F_1 fast vollständig. Von der tagsüber stark ionisierten Schicht F_2 bleiben auch nachts noch Reste bestehen.

Die **D-Schicht** reflektiert elektromagnetische Wellen im Längstwellenbereich um 50 kHz. Kürzere Wellenlängen werden durch die D-Schicht gedämpft.

Die **E-Schicht** bildet sich bei Sonnenaufgang und erreicht mittags ein Maximum an Elektronendichte, verschwindet aber nachts nicht ganz. Oft kann über ihr eine E_2 -Schicht festgestellt werden.

Die **E_s -Schicht** (sporadische E-Schicht) tritt nachts im Zusammenhang mit Polarlichtern unregelmäßig in Form wandernder Ionenwolken auf. Sie ermöglicht oft unerwartete und eventuell ungewollte Funkverbindungen.

Die **F_2 -Schicht** hat besondere praktische Bedeutung, da sie sich in Folge der sehr langsamen Wiedervereinigung der Elektronen und der positiv geladenen Ionen auch während der Nacht aufrecht hält. Sie hängt stark von der Sonnenaktivität ab.

Ausbreitungsarten elektromagnetischer Wellen

Man unterscheidet bei der Übertragung von elektromagnetischen Wellen im Bereich der Erdatmosphäre drei Arten der Ausbreitung

- die Bodenwelle,
- die Raumwelle und
- die direkte Welle.

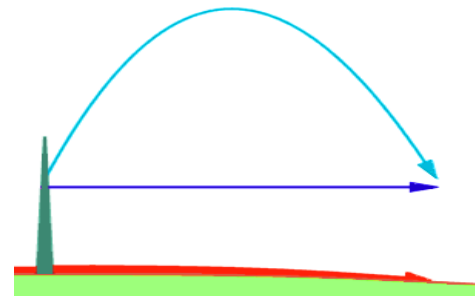


Bild 15: Raumwelle, Bodenwelle und direkte Welle

Bodenwelle

Verlaufen abgestrahlte Wellen parallel zur Erdoberfläche, bezeichnet man sie als Bodenwelle.

Bodenwellen breiten sich mit zunehmendem Halbkugelradius in alle Richtungen aus. Da jedoch die Erdoberfläche keine unendlich gute Leitfähigkeit besitzt, entzieht der Boden dem Strahlungsfeld Energie (Erdverluste). Damit ist die Reichweite von Bodenwellen umso kleiner, je geringer die Leitfähigkeit der Erdoberfläche ist.

Über dem Meerwasser ist die Reichweite der Bodenwelle erheblich größer über dem Erdboden, was aus der größeren spezifischen Leitfähigkeit des Meerwassers resultiert.

Ein weiterer wesentlicher Faktor für die Reichweite der Bodenwelle ist ihr Frequenzbereich. Mit steigender Frequenz nimmt die Eindringtiefe des elektrischen Feldes in den Erdboden ab, wodurch der für die Stromleitung zur Verfügung stehende effektive Querschnitt geringer wird. Deshalb verringert sich mit steigender Frequenz die Reichweite. Somit spielt die Bodenwelle in dem Frequenzbereich, der für Radargeräte in Frage kommt, keine Rolle.

Raumwelle

Als Raumwelle bezeichnet man den Teil der von der Antenne abgestrahlten Energie, der in den freien Raum abwandert und durch die Dämpfung und Krümmung des Erdbodens nicht beeinflusst wird. In einem Medium, das völlig gleichmäßig und störungsfrei aufgebaut ist (homogenes Medium), breiten sich Raumwellen geradlinig aus. In der weiteren Betrachtung sollen diejenigen Raumwellen behandelt werden, die durch Brechung oder Reflexion in der Erdatmosphäre zur Empfangsantenne gelangen. Dabei sind zu unterscheiden:

Brechung in der Troposphäre

Durch meteorologische Vorgänge kann es zu sprunghaften Änderungen der Luftfeuchte und der Temperatur kommen. Die bedeutet auch gleichzeitig eine abrupte Änderung der Luftdichte. Da warme Luft optisch dünner als Kaltluft ist, bildet sich eine Inversionsschicht aus.

Dieser Effekt ist die Ursache für eine mögliche Reflexion der Wellen. Da eine Warmluft-schicht in großer Höhe ein optisch dünneres Medium darstellt, wird bei hinreichend flachem Einfall die Welle zur Erde zurückgestrahlt.

Inversionsschichten können in unterschiedlichen Höhen auftreten, so dass unterschiedliche Überreichweiten entstehen.

Reflexion an der Ionosphäre

Für Frequenzen von 3 MHz bis 30 MHz („Kurzwellen“) wirkt die Ionosphäre wie ein großer Reflektor. Höhere Frequenzen durchdringen die Ionosphäre, tiefere Frequenzen werden durch die D- und E-Schicht so gedämpft, dass sie nur zeitweise (überwiegend nachts) reflektiert werden.

Da die Übergänge der einzelnen Schichten fließend sind, trifft die Gesetzmäßigkeit „Einfallswinkel gleich Ausfallwinkel“ nur bedingt zu. Außerdem sind die Schichten in Bewegung und schwanken in ihrer Intensität, so dass sich die Reflexionsbedingungen ständig ändern. Da die Raumwelle auch von der Erde reflektiert wird, ergeben sich durch Mehrfachreflexion für Kurzwellenfrequenzen sehr große Reichweiten. Für Radarverwen-

dungen sind diese Frequenzen allerdings nicht verwendbar mit Ausnahme von wenigen sogenannten Over The Horizon Backscatter (OTH-B) Radaren.

Durch die bei Brechung und Reflexion auftretenden Gesetzmäßigkeiten kommt es zu Überreichweiten, bei denen sich die elektromagnetische Strahlung weiter ausbreitet, als durch normale Raumwellenausbreitung zu erwarten wäre.

Direkte Welle

Bei elektromagnetischen Wellen über 100 MHz tritt im Normalfall keine Reflexion mehr an der Ionosphäre auf. Es ist deshalb nur noch die direkte Welle von Interesse. Da sich Wellen ab dieser Wellenlänge relativ geradlinig ausbreiten und somit ein ähnliches Verhalten wie Lichtstrahlen aufweisen, werden sie als quasioptische Wellen bezeichnet. Theoretisch kann also nur eine geradlinige Verbindung zwischen Sender und Empfänger überbrückt werden. Auf Grund der Erdkrümmung ist die mögliche Reichweite auch von der Höhe der Antennen von Sender und Empfänger abhängig. Theoretisch ist die Reichweite auf die sogenannte Radiosichtweite (Radiohorizont) begrenzt.

Radarhorizont

Elektromagnetische Wellen in dem Frequenzbereich oberhalb von 100 MHz folgen in ihrer Ausbreitung den Gesetzmäßigkeiten der Optik. Da fast ausnahmslos alle Radargerätesysteme in diesem Frequenzbereich arbeiten, breiten sich also auch deren Wellenfronten nach quasioptischen Gesetzmäßigkeiten aus.

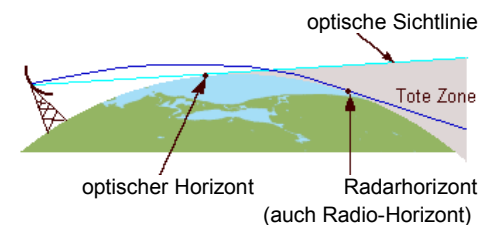


Bild 16: Radarhorizont

Demzufolge ist es dem Radarstrahl erst einmal theoretisch nicht möglich, über den optischen Horizont zu blicken. Es ergibt sich für jedes Radarsystem eine tote Zone, in der keine Ziele erfasst werden können.

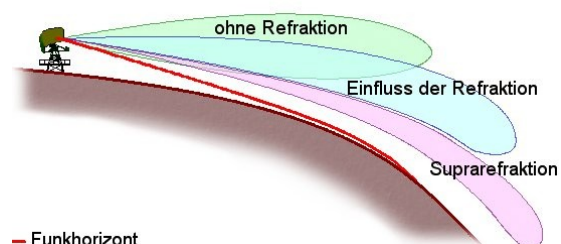
In Wirklichkeit wird aber der radarfrequente Sendeimpuls an den verschiedenen Luftschichten unterschiedlicher Dichte gebrochen, wodurch der Radarstrahl hinter dem optischen Horizont die Erdoberfläche berühren kann. Dies führt zur Verkleinerung der „Toten Zone“, allerdings auch zu Fehlern in der Entfernung- und Höhenermittlung. Diese Rechenfehler werden dadurch kompensiert, dass ein effektiver Erdradius mit $8,5 \cdot 10^6 \text{m}$ (real etwa $6,4 \cdot 10^6 \text{m}$) angenommen wird.

Anomale Wellenausbreitung

Das Ausbreitungsmedium Luft ist nicht gleichförmig. Die Veränderung der dielektrischen Durchlassfähigkeit der Erdatmosphäre beeinflusst den Brechungskoeffizienten der einzelnen Luftschichten. Das führt zu einer Veränderung der Ausbreitungsrichtung - zur Refraktion. Der Brechungskoeffizient ist hier eine Funktion der Lufttemperatur, des Luftdruckes und der Luftfeuchtigkeit.

Superrefraktion

Unter besonderen Bedingungen, vor allem über dem Meer, wenn wärmere Landluft über das kältere Wasser gedrückt wird, kommt es zur Superrefraktion. So sind Beispiele bekannt, dass Überreichweiten bis zu 600% der theoretischen Reichweite erzielt wurde.

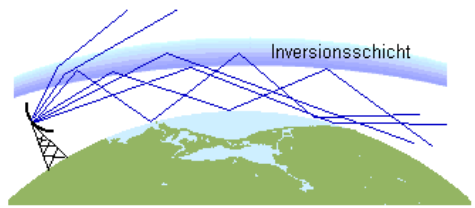


— Funkhorizont
Bild 17: Der Einfluss der Refraktion auf die Entfernung des Funkhorizontes

Tabelle 1: Klassifizierung der atmosphärischen Refraktion

Überreichweiten

Durch die Suprarefraktion wird die Reichweite stark vergrößert. Das Echo eines abgestrahlten Impulses erscheint eine oder zwei Impulsperioden später und somit das Target an einer Stelle auf dem Sichtgerät, wo sich in Wirklichkeit gar kein Flugkörper befindet.



Bil

d 18: Bodeninversion

Ducting

In der Praxis ergeben sich bei der Wellenausbreitung oberhalb des Meterwellenbereiches Reichweiten, die erheblich über dem theoretischen Wert liegen. Man spricht auch in diesem Fall von Überreichweiten. Diese treten dann auf, wenn sich eine tiefliegende und sehr weit reichende Inversionsschicht ausgebildet hat (Bodeninversion). Es kommt dann zu einer Ausbreitung zwischen der Bodeninversionsschicht in der Erdoberfläche. Dieser Vorgang wird auch „troposphärische Schlauchübertragung“ genannt. Darüberhinaus kann eine Schlauchübertragung auch zwischen übereinanderliegenden Inversionsschichten auftreten.

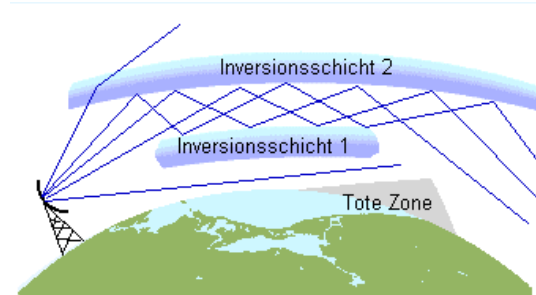


Bild 19: troposphärische Schlauchübertragung (Ducting)

Bei dieser Ausbreitungsart entstehen tote Zonen, in denen keine Ortung möglich ist. Gelangt dagegen die zwischen zwei solchen Inversionsschichten geführte Welle zu einem Empfänger (Transponder), können dadurch Entfernungen von mehr als 1000 km überbrückt werden, auch wenn die Reichweite unter normalen Bedingungen nur ca. 100 km beträgt.

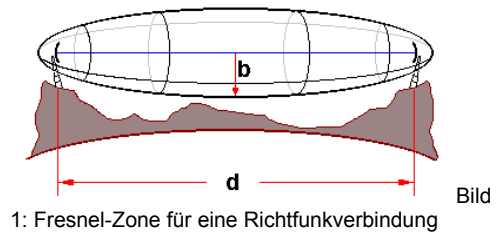
Subrefraktion

Eine Umkehrung der Wirkung ist ebenfalls möglich. Unterreichweiten durch Ablenkung des Sendestrahls nach oben wirken sich jedoch nicht so störend aus, wie eine Überreichweite. Ein Reichweitenverlust wird auch seltener bemerkt.

Refraktion	Gradient des Brechungsindex $\frac{dn}{dh}$ in m^{-1}	schematische Darstellung	Entstehungsbedingungen
Negativ (Subrefraktion)	>0		Schneefall, wenn sich die Temperatur mit der Höhe wesentlich schneller, die Feuchtigkeit wesentlich langsamer verringert als in der normalen Atmosphäre
Keine	0		wenn sich der Brechungsindex N in einigen Höhenintervallen nicht ändert
Positiv, niedrig	von 0 bis $-4 \cdot 10^{-8}$		regnerisches, trübes Wetter, wenn sich die Temperatur mit der Höhe schneller, die Feuchtigkeit langsamer verringert als in der normalen Atmosphäre
Positiv, normal	$-4 \cdot 10^{-8}$		Trübes Wetter, wenn die Luftschichten gut gemischt sind. Entspricht der normalen Atmosphäre, wenn sich die Lufttemperatur um $6,5^\circ C$ je Kilometer Höhe und der Druck des Wasserdampfes um $3,5 \text{ mBar}$ je Kilometer Höhe verringert
Positiv, erhöht	von $-4 \cdot 10^{-8}$ bis $-17,5 \cdot 10^{-8}$		Klares Wetter nach Sonnenuntergang, wenn sich die Lufttemperatur mit der Höhe wenig verringert, d.h. bei einsetzender Temperaturinversion
Positiv, kritisch	$-17,5 \cdot 10^{-8}$		Klares Wetter nach Sonnenuntergang bei ausgebildeter Temperaturinversion
Super- oder Suprarefraktion	über $-17,5 \cdot 10^{-8}$		Hochdruck und bedeutende Temperaturinversion sowie verringerte Luftfeuchtigkeit. Über dem Festland in Nacht- und Morgenstunden von Bedeutung, über dem Meer bei klarem Wetter oft ganze Tage, wenn die Luft an der Meeresoberfläche weniger erwärmt und feuchter als in höher gelegenen Schichten ist

Fresnel-Zone

Für eine ungestörte Übertragung muss ein bestimmter Raum zwischen Sender und Empfänger frei von Hindernissen aller Art sein, da sich sonst Interferenzen der direkten Welle mit den von den Hindernissen reflektierten Wellen ergeben. Der Raum um den direkten Funkstrahl, der hier besonders interessant ist, ist der Bereich bis zu einem Umweg von der halben Wellenlänge für die elektromagnetische Welle. Dieser Raum wird nach dem französischen Ingenieur Augustine Jean Fresnel, der dazu Versuche mit Lichtwellen gemacht hat, „1. Fresnelsche Zone“ genannt.



Bei dieser 1. Fresnelschen Zone handelt es sich um ein gedachtes Rotationsellipsoid, in dessen Brennpunkten die beiden Antennen stehen und über dessen Rand der Umweg für das reflektierte Signal eine halbe Wellenlänge beträgt. Die Abmessungen der 1. Fresnelschen Zone werden durch die Länge des Funkfeldes und die Wellenlänge bestimmt. Die kleine Halbachse b des Rotationsellipsoides ergibt sich aus:

$$b = 0,5 \cdot \sqrt{\lambda \cdot d}$$

Ragen in diese Zone Hindernisse hinein, so führen die Reflexionen an diesen zur Abschwächung des Signales am Empfangsort.

Fresnel-Zone bei Radargeräten

Bei Radargeräten muss zusätzlich zu dem oben beschriebenen Rotationsellipsoid noch die Antennendrehung betrachtet werden. Die hier oft ebenfalls „Fresnelsche Zonen“ genannten Abschnitte auf der Erdoberfläche haben die Ausmaße, dass sich die Phasen der Wellen, die vom Ursprung durch den Anfang bzw. durch das Ende der Zone gehen, um 180° unterscheiden.

Die „1. Fresnelsche Zone“ ist also ein Kreis mit dem Standort des Radargerätes im Zentrum. Die weiteren Fresnelschen Zonen sind kreisförmige Streifen um das Radargerät herum. Mit ausreichender Genauigkeit kann die Größe der Radien nach folgenden Formeln bestimmt werden:

$$R_1 \approx 0,72 \frac{h^2}{\lambda}, \quad R_2 \approx 23,3 \frac{h^2}{\lambda}$$

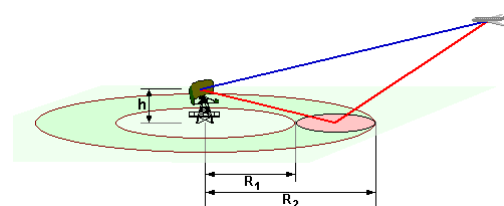


Bild 2: Fresnel-Zone bei Radargeräten

h = Antennenhöhe über der Erdoberfläche
 λ = Wellenlänge des Radargerätes

Auf die Reflexion der elektromagnetischen Wellen hat jeweils nur ein begrenzter Teil der Erdoberfläche Einfluss. Dieser Teil umfasst nur einige der Fresnelschen Zonen und hat die Form einer Ellipse in der Ausbreitungsrichtung der elektromagnetischen Wellen. Wenn diese Ellipse genügend eben, glatt und physikalisch gleichartig ist, dann kann man die gesamte Oberfläche in dieser Richtung als gleichartige Ebene betrachten. Je weiter der Reflexionsbereich von der Antenne entfernt ist, desto größer die zulässige Höhe der Unebenheiten.

Zusammenfassung

- Das **Spektrum der elektromagnetischen Wellen** umfasst den kompletten Frequenzbereich von etwa 3 kHz bis 10^{24} Hz.
- Eine **Beugung** (oder Diffraktion) ist die Ablenkung der elektromagnetischen Strahlung an den Kanten von Hindernissen.
- Die **Brechung** (oder Refraktion) ist die Ablenkung einer Welle von ihrer ursprünglichen Richtung, wenn diese die Grenze zwischen zwei Medien mit verschiedener Dichte passiert.
- Eine **Reflexion** tritt auf, wenn eine elektromagnetische Welle auf ein elektrisch leitendes Hindernis auftrifft und zurückgeworfen wird. Der Teil der hinlaufende Welle, der zurück zur Sendeantenne reflektiert wird, wird „**Backscatter**“ genannt.
- Die **Atmosphäre der Erde** wird grob in drei verschiedene Schichten eingeteilt: Die Troposphäre, Stratosphäre und die Ionosphäre.
 - Die *Troposphäre* ist der Bereich der Atmosphäre, in welcher alle Wettererscheinungen stattfinden. Die elektromagnetischen Wellen werden hier relativ stark beeinflusst.
 - Die *Stratosphäre* hat eine relativ konstante Temperatur, eine geringe Dichte und nur geringen Einfluss auf die elektromagnetischen Wellen.
 - Die *Ionosphäre* enthält vier verschiedene Schichten mit ionisierten Gasen, die für weitreichende Funkverbindungen eine große Bedeutung haben.
- Der **Radar Horizont** ist etwa ein Drittel größer als der optisch visuelle Horizont.
- Durch **Inversion** genannte Temperaturanomalien entstehen Grenzschichten, an denen elektromagnetische Wellen mehrfach reflektiert werden können. Durch dieses **Ducting** werden Überreichweiten erzielt, die beim Radar zu Messfehlern führen.