

Funkausbreitung

Grundlegendes

Funkübertragungssystem:

- Der Funkkanal (als Ressource) ist nur begrenzt verfügbar.
- Jeder Funkkanal ist - als offenes System - hochgradig stör anfällig.

Das idealisierte Funkübertragungssystem



Eine wichtige Größe eines Funkübertragungssystems ist die am Empfänger verfügbare Leistung P_e , welche für eine gute Übertragungsqualität über der Summe der Störleistungen liegen muss. Andererseits soll die Sendeleistung nicht unnötig hoch sein, um gegenseitige Störungen zu vermeiden und das verfügbare Frequenzband möglichst effektiv zu nutzen.

Das ideale Funkfeld

Die Funkfelddämpfung beschreibt die Differenz zwischen der der Sendeantenne zugeführten Sendeleistung P_s und der von der Empfangsantenne an den Empfänger weitergeleiteten Empfangsleistung P_e .

$$a = P_s - P_e = a_0 - G_s - G_e = 20 * \log \frac{4 * \pi * l}{\lambda} - G_s - G_e$$

a_0 Freiraumdämpfung (Ausbreitungsdämpfung zw. den Antennen)

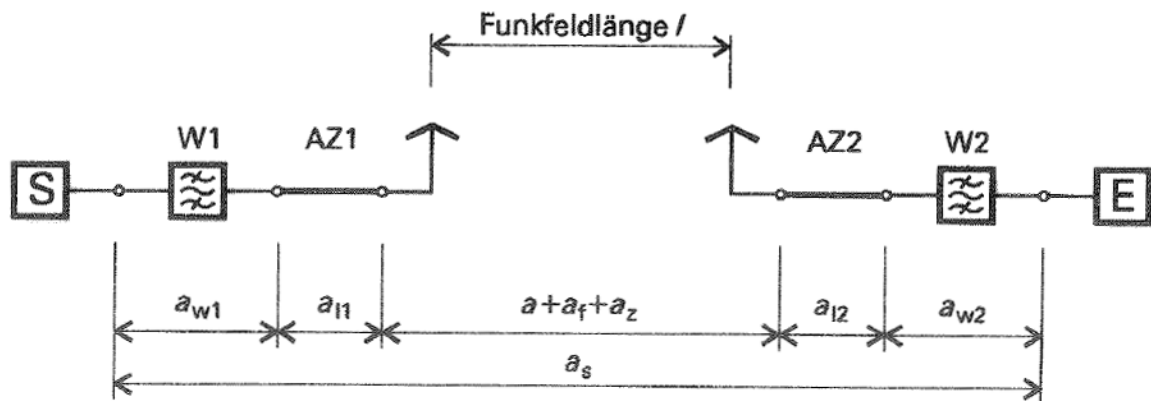
G_sGewinn der Sendeantenne

G_eGewinn der Empfangsantenne

Das reale Funkübertragungssystem

Das Funkübertragungssystem beeinflussende Faktoren:

- Atmosphärische Dämpfung / Regendämpfung
- Abschattung ("Fresnel-Zone") -> Übertragung wird durch Hindernisse gedämpft (Bäume)
- Schwund durch Mehrwegausbreitung



Die Systemdämpfung a_s des realen Funkübertragungssystems setzt sich aus folgenden Dämpfungsanteilen zusammen:

- a Funkfelddämpfung
- a_z Zusatzdämpfung durch Abschattung
- a_f Schwundreserve
- a_{Atmos} Atmosphärische Dämpfung
- a_{Regen} Dämpfung durch Regen oder Nebel
- a_{l1}, a_{l2} Leitungsdämpfung (zwischen Antenne und Sender bzw. Empfänger)
- a_{w1}, a_{w2} Weichendämpfung (beim Sender bzw. Empfänger)

Die Systemdämpfung eines realen Funkübertragungssystem (in logarithmischer Schreibweise):

$$a_s = P_s - P_e = a + a_z + a_f + a_{Atmos} + a_{Regen} + (a_{l1} + a_{w1}) + (a_{l2} + a_{w2})$$

Die Systemdämpfung tritt beim realen System an die Stelle der Funkfelddämpfung beim idealen System, da beim idealen System sonst keine Dämpfungen auftreten.

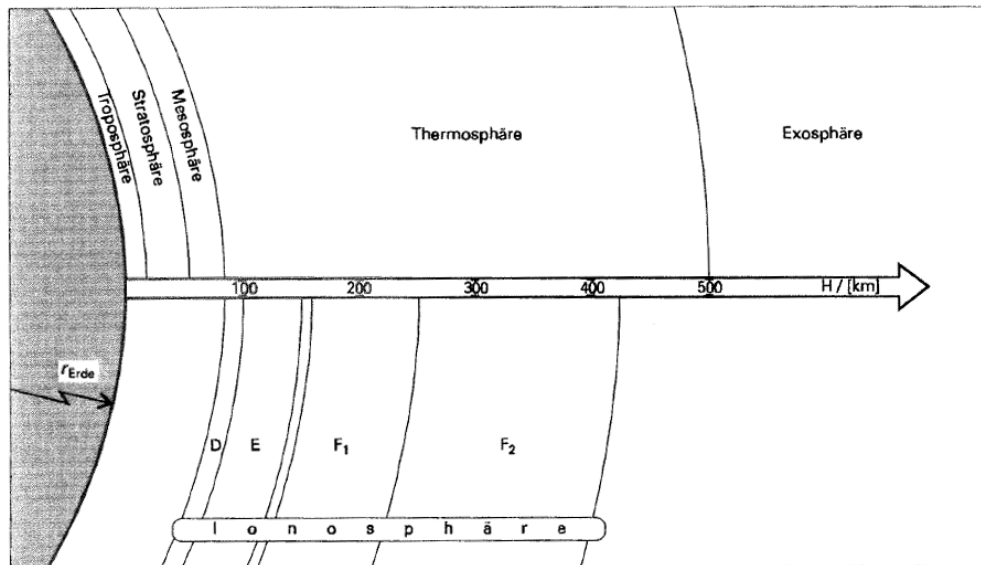
Einfluss der Atmosphäre

Die Wellenausbreitung in einem Funkübertragungssystem, das über den Horizont hinausreicht, hängt nicht nur von der geometrischen Anordnung von Sender und Empfänger ab, sondern auch von den Eigenschaften der Atmosphäre.

Einflussgrößen, von denen die Eigenschaften der Atmosphäre abhängen:

- Frequenz
- geographischen Lage
- Tages- und Jahreszeit
- Sonnenfleckenaktivität
- Erdmagnetfeld

Da eine so große Anzahl an Abhängigkeiten besteht, können lediglich statistische Angaben gemacht werden. Diese Angaben beruhen auf einer Vielzahl von Messungen.



Die wichtigen Schichten für Funkverbindungen sind die Troposphäre und die Ionosphäre (quasi in Thermosphäre). Die Ionosphäre befindet sich auf einer Höhe von 80 km bis 1200 km und in ihr werden durch solare Strahlung in den sehr dünnen Gasen Elektronen freigesetzt.

Durch diese Ionisation wird eine elektrische Leitfähigkeit dieser Gase hervorgerufen, die für die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen von Bedeutung ist.

Die Ionosphäre selbst besteht auch aus einer Vielzahl von Schichten, durch die der Funkfernverkehr unterschiedlich beeinflusst wird.

Die unterschiedlichen Ausbreitungseigenschaften der einzelnen Schichten werden in einigen Funkbänder auch gezielt ausgenutzt.

Die wichtigste Schicht der Ionosphäre ist die F-Schicht (Appletonschicht). Diese mäßig stabile Schicht ist ganztägig verfügbar und teilt sich im Sommer in die F₁- und in die F₂-Schicht auf (Grenze zw. Schichten bei ca. 250km Höhe). Dabei ist die F₂-Schicht die attraktivste für den Funkfernverkehr und nutzbar bis ca. 30 MHz.

Bodenwellen und Raumwellen

Die von einem Sender ausgestrahlte Leistung teilt sich im allgemeinen in zwei Wellenarten auf:

- Bodenwellen
- Raumwellen

Die Bodenwelle ist jener Teil der Strahlung, der sich entlang der Erdoberfläche ausbreitet. Ihre Reichweite sinkt mit der Wellenlänge und hängt auch von der Leitfähigkeit, sowie der Dielektrizitätskonstanten des Bodens ab. Darum ist die über Wasser auch größer als über Land.

Die Raumwelle ist der Teil der Strahlung, der so ausgestrahlt wird, dass der Boden keinen direkten Einfluss auf die Ausbreitung hat. Das bedeutet, dass sich die Raumwelle nährungsweise geradlinig ausbreitet.

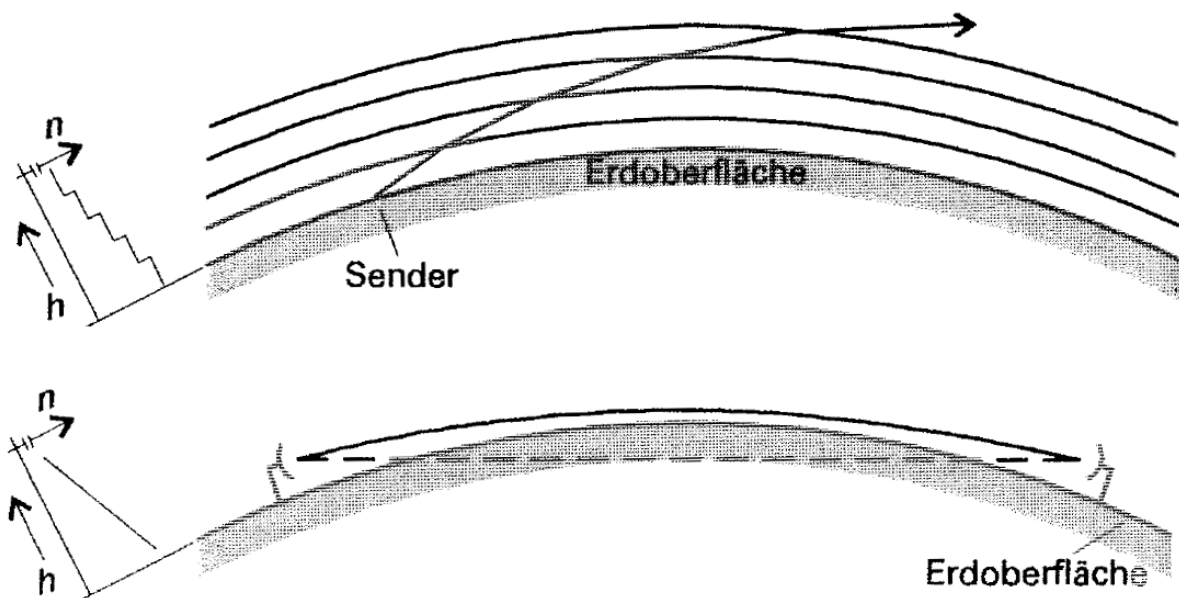
Je nach Frequenzbereich wird der größere Anteil als Bodenwelle, oder als Raumwelle übertragen.

Bezeichnung	Frequenzbereich	Ausbreitung vorwiegend als	Reichweite
Langwellen	30 kHz ... 300 kHz 10 km ... 1 km	Bodenwelle	nachts bis 1000 km tags bis 500 km
Mittelwellen	0,3 MHz ... 3 MHz 1 km ... 0,1 km	tags Bodenwelle nachts reflektierte Raumwellen	tags bis 100 km nachts bis 1000 km
Kurzwellen	3 MHz ... 30 MHz 100 m ... 10 m	Raumwelle	bei einmaliger Reflexion 3000 km ... 4000 km (tageszeitabhängig), bei mehrmaliger Reflexion weltweit
Ultrakurzwellen	30 MHz ... 300 MHz 10 m ... 1 m	Raumwelle	optische Sicht
Dezimeterwellen	0,3 GHz ... 3 GHz 1 m ... 0,1 m		
Zentimeterwellen	3 GHz ... 30 GHz 10 cm ... 1 cm		
Millimeterwellen	30 GHz ... 300 GHz 10 mm ... 1 mm		

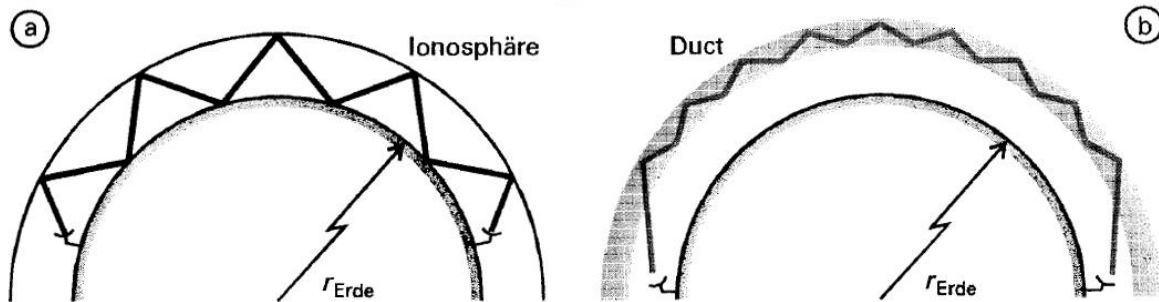
Ionosphäre

Wie bereits erwähnt befindet sich in der Ionosphäre wegen der Sonneneinstrahlung ein gewisser Ionisationsgrad, der gewisse Periodizitäten aufweist. Da die Ionosphäre eine Elektronendichte mit komplizierter Höhenabhängigkeit besitzt, die dazu führt, dass unter bestimmten Voraussetzungen eine Reflexion von Funkwellen stattfindet, können große Reichweiten erzielt werden (maximale $f=30\text{MHz}$).

Das Brechungsverhalten der Troposphäre ist für die Strahlablenkung von Funkwellen vom geradlinigen Verlauf verantwortlich, wodurch eine Reichweitenvergrößerung erzielt werden kann. Dies liegt daran, da der Funkstrahl bei flachem Einfall nach oben abgelenkt wird, wenn der Brechungsindex mit der Höhe zunimmt.



Im Kurzwellenbereich findet die Wellenausbreitung vorwiegend über Raumwellen statt (die Bodenwelle ist bei einer Reichweite von bis zu 10 km praktisch bedeutungslos).



In Abbildung a kann man die Ausbreitung der Raumwelle im Kurzwellenbereich mit den charakteristischen Reflexionen an der Ionosphäre, welche vorwiegend an der F-Schicht stattfinden sehen.

Außerdem erkennt man, dass Raumwellen, die unter einem bestimmten Winkel von der Antenne abgestrahlt werden, wegen der Reflexion an der Ionosphäre wieder zur Erdoberfläche gelangen. Man spricht dabei von einem "Sprung", wobei die Entfernung zwischen Sendeantenne und dem Auftreffen der reflektierten Raumwelle auf der Erdoberfläche als Sprungentfernung bezeichnet wird. Dieser Bereich, der einige 100 km bis 1000 km lang ist, wird auch als tote Zone bezeichnet, da in ihm kein Funkempfang möglich ist.

Wie auch zu sehen ist, erfolgt an der Erdoberfläche eine weitere Reflexion, wodurch mehrere Sprünge aufeinanderfolgen können. Prinzipiell besteht so die Möglichkeit des weltweiten Kurzwellenfunkts, jedoch ist das Verhalten der Ionosphäre stark von der Tageszeit abhängig (1 Programm -> mehrere Frequenzen).

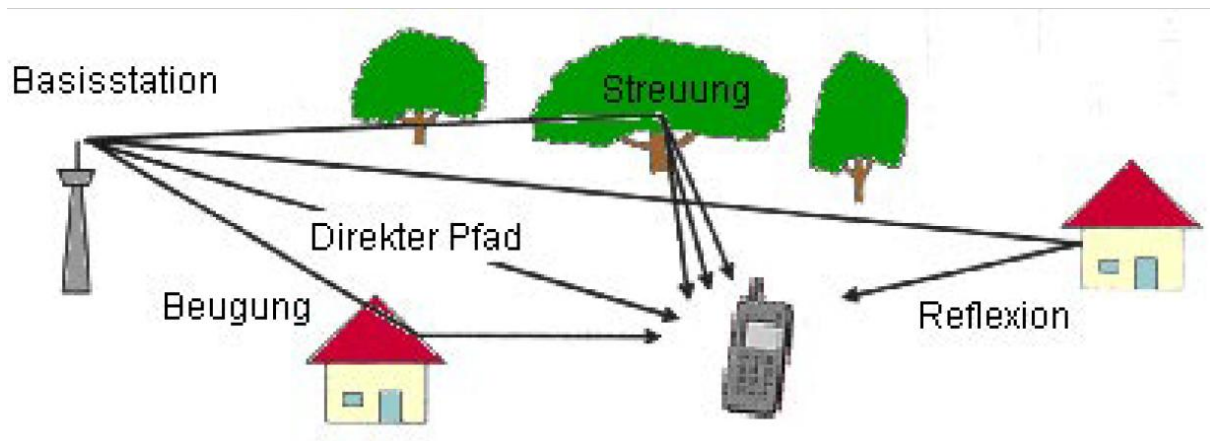
Ein weiterer Effekt, der für große Reichweiten ausgenutzt werden kann, wird durch Ducts hervorgerufen. Dabei entsteht in der Ionosphäre ein Wellenleiter, in dem Funkwellen sehr große Entfernungen überbrücken können.

Mehrwegausbreitung

Elektromagnetische Wellen können die Entfernung zwischen Sender und Empfänger auf verschiedenen Wegen zurücklegen (aufgrund von Beugung, Brechung, Streuung,...). Die Teilwellen, die dann am Empfänger ankommen, überlagern sich bzw. interferieren.

Da die einzelnen Wege unterschiedliche Längen aufweisen, liegen auch unterschiedliche Laufzeiten für die einzelnen Teilwellen vor.

Zur Erfassung der Mehrwegausbreitung werden verschiedene Modelle betrachtet. Da die Berechnung für eine höhere Anzahl von Teilwellen jedoch relativ aufwendig ist, werden meist das Zweiwege- oder das Dreiwegemodell verwendet. Man berücksichtigt also nur zwei oder drei mögliche Wege vom Sender zum Empfänger.



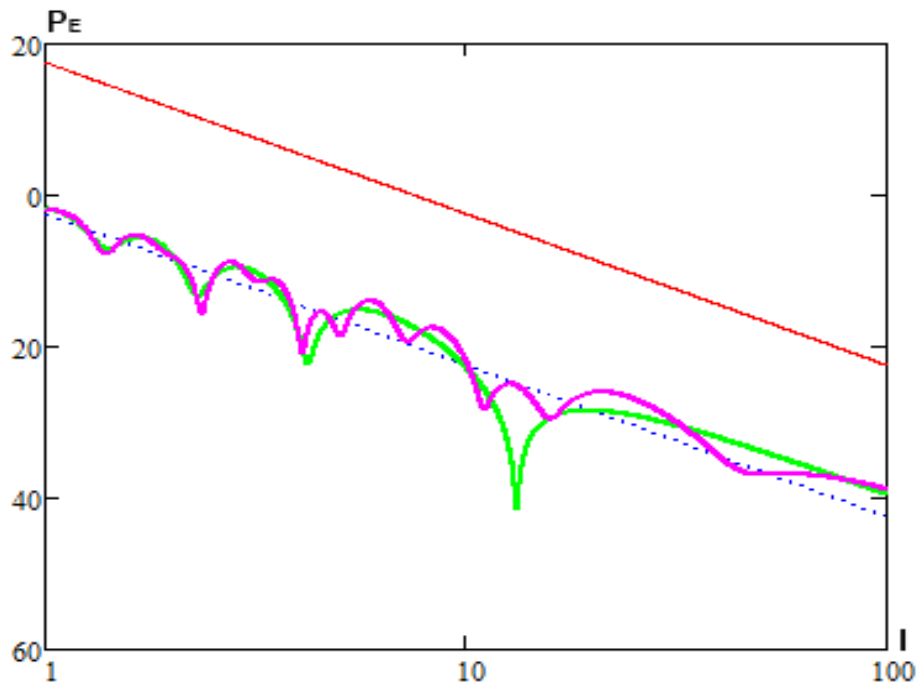
Durch Mehrwegausbreitung kann in Extremfall, bei 180° Phasenverschiebung, eine Auslöschung des Empfangssignal bewirkt werden. Andererseits kann es bei phasenrichtigen Teilwellen zu Überreichweiten kommen, was jedoch bei vielen Systemen störend ist.

Das Auftreten von Mehrwegausbreitung hängt nicht nur von den Bedingungen in der Atmosphäre ab, sondern auch vom Winkel, unter dem die Strahlen die Sendeantenne verlassen bzw. bei der Empfangsantenne eintreffen. Das ist vor allem von der Länge des Funkfeldes und der Höhe der Antennen abhängig.

Durch diese Interferenz des direkten Strahls mit dem indirekten bewirkt eine frequenzselektive, schnelle Schwankung der resultierenden Empfangsfeldstärke.

Wenn der Winkel bei der Empfangsantenne zwischen dem direkten Strahl und dem Umwegstrahl ausreichend groß ist, kann durch einen entsprechend geringen Öffnungswinkel der Antenne der Effekt der Mehrwegausbreitung vermindert werden.

Unerwünschte Reflexionen an der Erdoberfläche können durch eine geeignete Standortwahl und ausreichende Antennenhöhe unterdrückt werden.



Diversity-Verfahren

Zur Verringerung der Auswirkungen der Mehrwegausbreitung werden verschiedene Arten von Diversity (Mehrfachempfang) verwendet, bei denen zwei oder mehr Kanäle zur Übertragung genutzt werden.

Dabei werden die von verschiedenen Übertragungswegen stammenden Signale so kombiniert, dass der Einfluss der Mehrwegausbreitung auf das Empfangssignal möglichst gering ist.

Beispiele:

- Antennen-Diversity
- Frequenz-Diversity
- Raum-Diversity

Antennen-Diversity: Hier werden voneinander unabhängige, räumlich getrennte Antennen verwendet. Die Auswirkungen des schnellen Schwundes können vermindert werden. Abstand der übereinander angeordneten Antennen hängt von der verwendeten Wellenlänge ab.