



Deutscher Amateur-Radio-Club e.V.
Bundesverband für Amateurfunk in Deutschland

OV Darmstadt F03

Wellenausbreitung auf UKW und Kurzwelle insbesondere mit den für Notfunk relevanten Ausbreitungswegen

OV-Abend am 3.6.16 in der Bessunger Knabenschule

Martin Ruhl, DJ3ZF

Freiraumausbreitung - beschränkte Reichweite durch Erdkrümmung

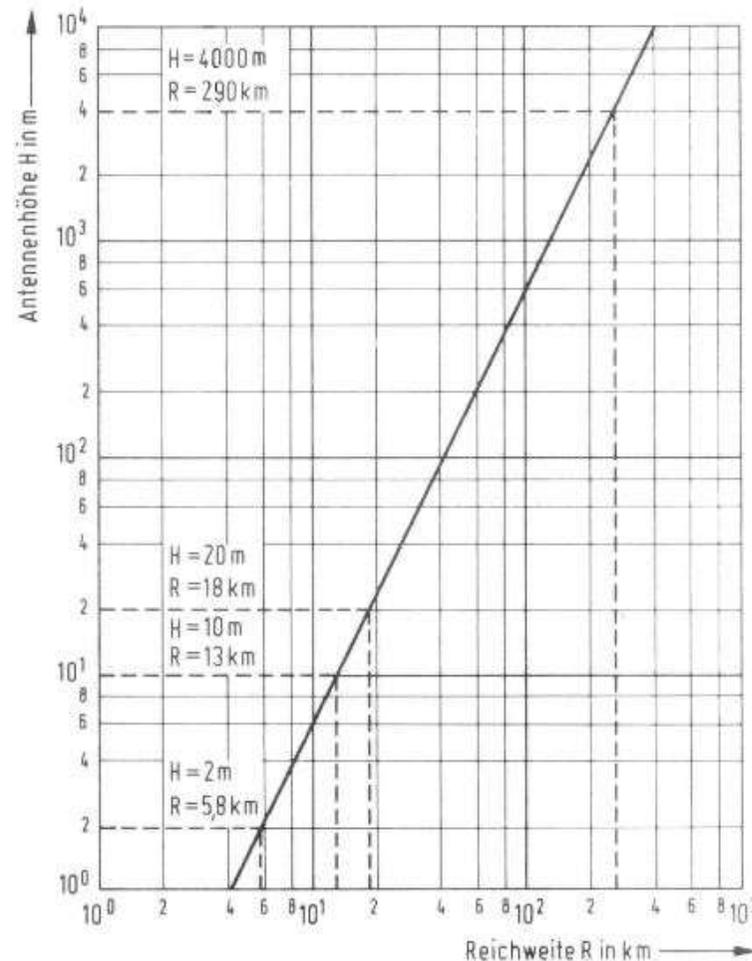
Elektromagnetische Wellen breiten sich **grundsätzlich** zunächst **geradlinig** aus.

Das Grundproblem von **terrestrischen Funkverbindungen über größere Entfernungen** ist daher die **Erdkrümmung**.

Dabei liegt der sog. „Radiohorizont“ im UKW-Bereich ca. 15% „hinter“ dem optischen Horizont (sog. quasi-optischer Horizont).

Die quasioptische Funkreichweite steigt mit zunehmender Antennenhöhe über der mittleren Geländehöhe zwischen den Funkpartnern.

Daher sind im **UKW-Bereich Relais** an **exponierten Standorten** zur Reichweitenerhöhung üblich.



7 Die quasioptische Funkreichweite in Abhängigkeit von der Antennenhöhe

Bei Nutzung dieses Diagramms sind die quasioptische Funkreichweite des Senders und des Empfängers zu addieren!

„echte“ Freiraumausbreitung benötigt freien Raum

Von „echter“ Freiraumausbreitung spricht man bei einem ungestörten sog. Fresnel-Ellipsoid 1. Ordnung; in diesem Raum finden ca. 90% der Energieübertragung zwischen den Funkpartnern statt.

Ragen Hindernisse (z.B. die Erdüberhöhung) in diesen Raum hinein, so liegt „unechte“ Freiraumausbreitung mit zusätzlicher Signaldämpfung vor. Steht nur der halbe Ellipsoidenquerschnitt zur

Verfügung, so beträgt diese ca. 6 dB, um bei weiterer Abdeckung stark anzusteigen.

Echte bzw. gering gestörte **Freiraumausbreitung** erfordert relativ **geringe Sendeleistung**, liegt aber ohne exponierten Standort für terrestrische Funkverbindungen i.d.R. nur **im Umkreis von ca. 30 km** vor, **im Mobilbetrieb** dagegen **kaum**.

Andererseits ergeben sich durch die Geländeoberfläche immer wieder (verlustbehaftete) Richtungsänderungen durch Streuungen und Beugungen, so dass bei **höheren Sendeleistungen Reichweiten deutlich über den quasioptischen Horizont hinaus** erzielt werden; dabei ist die Verwendung **horizontaler Polarisation** vorteilhaft.

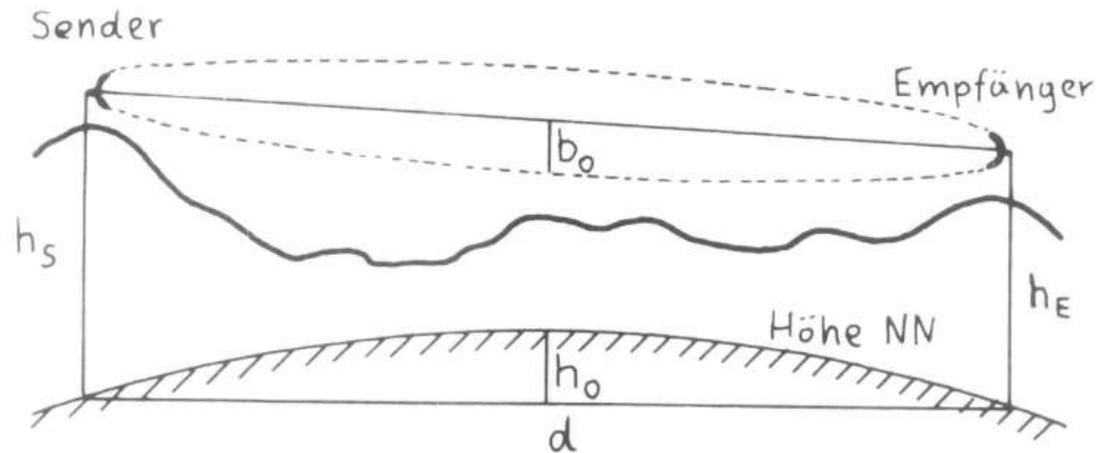


Abb. 3.1: Feststellen der Freiraumausbreitung mittels Fresnel-Ellipsoid und Erdüberhöhung

$$\frac{h_0}{\text{m}} = 0,02 \left(\frac{d}{\text{km}} \right)^2 \quad \frac{b_0}{\text{m}} = 8,7 \sqrt{\frac{\frac{d}{\text{km}}}{\frac{f}{\text{GHz}}}}$$

Beispiel Erdüberhöhung:

Aufgrund der Erdkrümmung verfügt der Bodensee in seiner Südost-Nordwest-Ausdehnung (65 km) über eine Aufwölbung der Oberfläche von rund 80 m. Aus menschlicher Perspektive ist es daher in Ufernähe auch bei bester Fernsicht nicht möglich, vom Westufer des Obersees aus (z. B. Konstanz) Objekte an seinem Ostufer (z. B. Bregenz; 46 km Luftlinie = 41 m Höhe der Aufwölbung) zu erblicken, die sich auf der Höhe des Ufers befinden.



Blick von Bregenz
über den Obersee

Quelle: Wikipedia

„unechte“ Freiraumausbreitung - typische Reichweiten

Freiraumausbreitung ist die Domäne der **UKW-Bereiche**, da erst ab einer Antennenhöhe von ca. 5λ die Freiraumbedingungen im Antennenumfeld näherungsweise erfüllt sind.

Durch den größeren Radius b_0 des Fresnel-Ellipsoids sind für „unechte“ Freiraumausbreitung die **niedrigeren UKW-Frequenzen (VHF)** besser geeignet.

Den beigefügten Diagramme (s.a. Folgeseite) zeigen typische Reichweiten bei Terrain mit mittlerer Geländerauigkeit zwischen den Funkpartnern.

Im Mobilbetrieb beträgt die Höhe der Sendeantenne h_S nur ca. 1,5m; dadurch ist von ca. 10 dB schwächeren Feldstärkepegeln auszugehen.

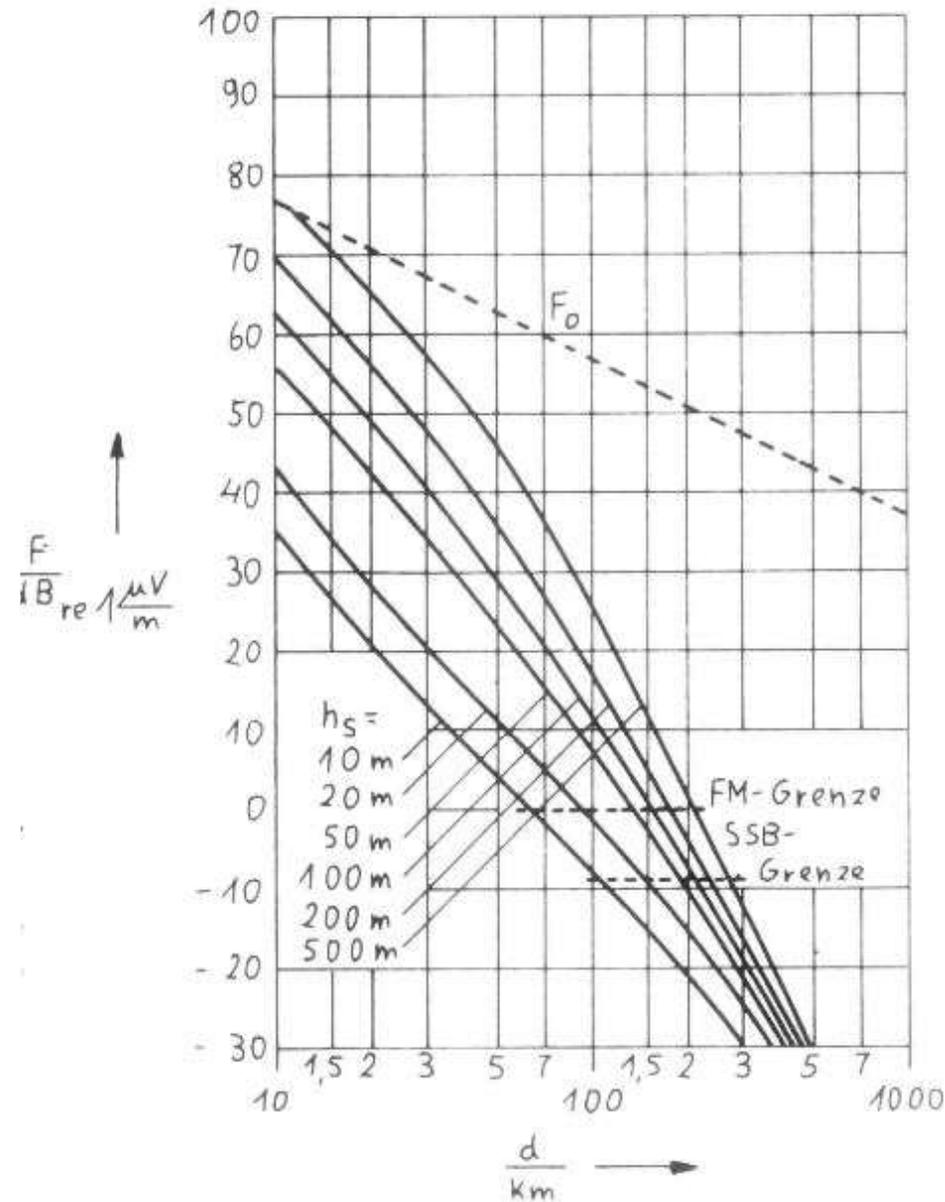


Abb. 3.7: Feldstärkepegel im Bereich $f = 144$ MHz, Sendeleistung $P_S = 100$ W, ERP Antennenhöhe $h_E = 10$ m (Empfangsantenne)

„unechte“ Freiraumausbreitung - typische Reichweiten

Bei Ausbreitung über ebenem Gelände (geringe Geländerauigkeit) ergibt sich tendenziell eine höhere, in stark zerklüftetem Terrain (hohe Geländerauigkeit) eine niedrigere Reichweite.

An die Zone der hier dargestellten Freiraumausbreitung schließt sich eine Zone mit Ausbreitung via **Troposcatter** an. Dabei handelt es sich um Rückstreuungen an ständig vorhanden Inhomogenitäten der Troposphäre in ca. 10 km Höhe, die bei mittlerer Stationsausrüstung UKW-Verbindungen **im Umkreis** von bis zu **ca. 300 km** erlauben.

Via Troposcatter können durch auf beiden Seiten sehr gut ausgestatteten Stationen mit hoher Sendeleistung max. ca. 800 km überbrückt werden.

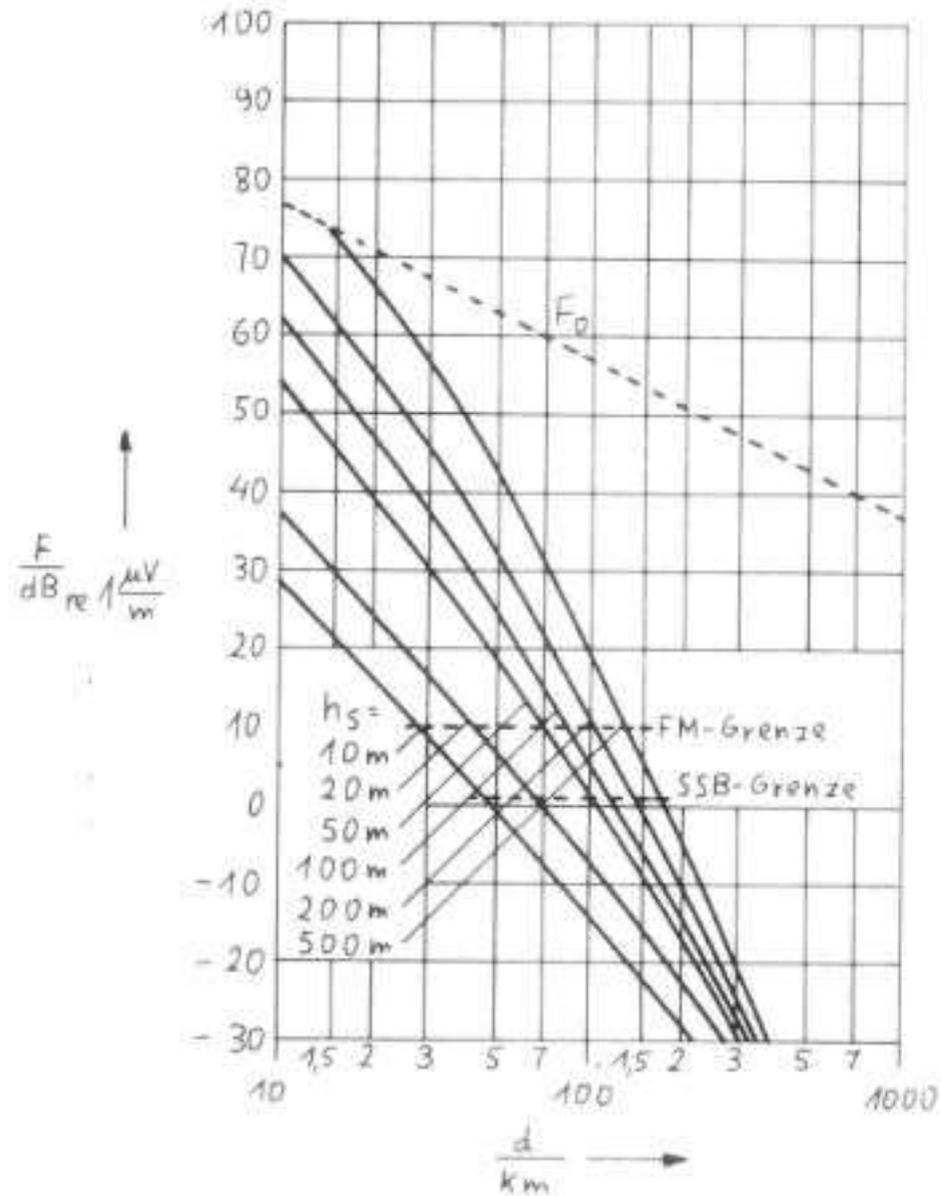


Abb. 3.9: Feldstärkepegel im Bereich $f = 430 \text{ MHz}$, Sendeleistung $P_S = 100 \text{ W ERP}$ Antennenhöhe $h_E = 10 \text{ m}$ (Empfangsantenne)

Bodenwelle - folgt der Erdkrümmung durch Bodenleitung

Für die Nutzung der Bodenwelle ist **vertikale Polarisation** erforderlich.

Tiefere Frequenzen haben größere Reichweite -> **160m-/80m-Band** (der Bereich von 1,6 - 4 MHz wird auch „Grenzwelle“ genannt).

Bei guter Bodenleitfähigkeit (Salzwasser!) sind die Reichweiten erheblich größer, bei schlechter (Fels, trockener Sandboden) gering; gute Vertikalantennen für die längeren Bänder sind an Land allerdings mit erheblichem Aufwand (Radiale) verbunden.

Bodenwellenausbreitung ist die Domäne der Längst-, Lang- und Mittelwellen und **spielt an Land auch im unteren Kurzwellen-Bereich keine große Rolle.**

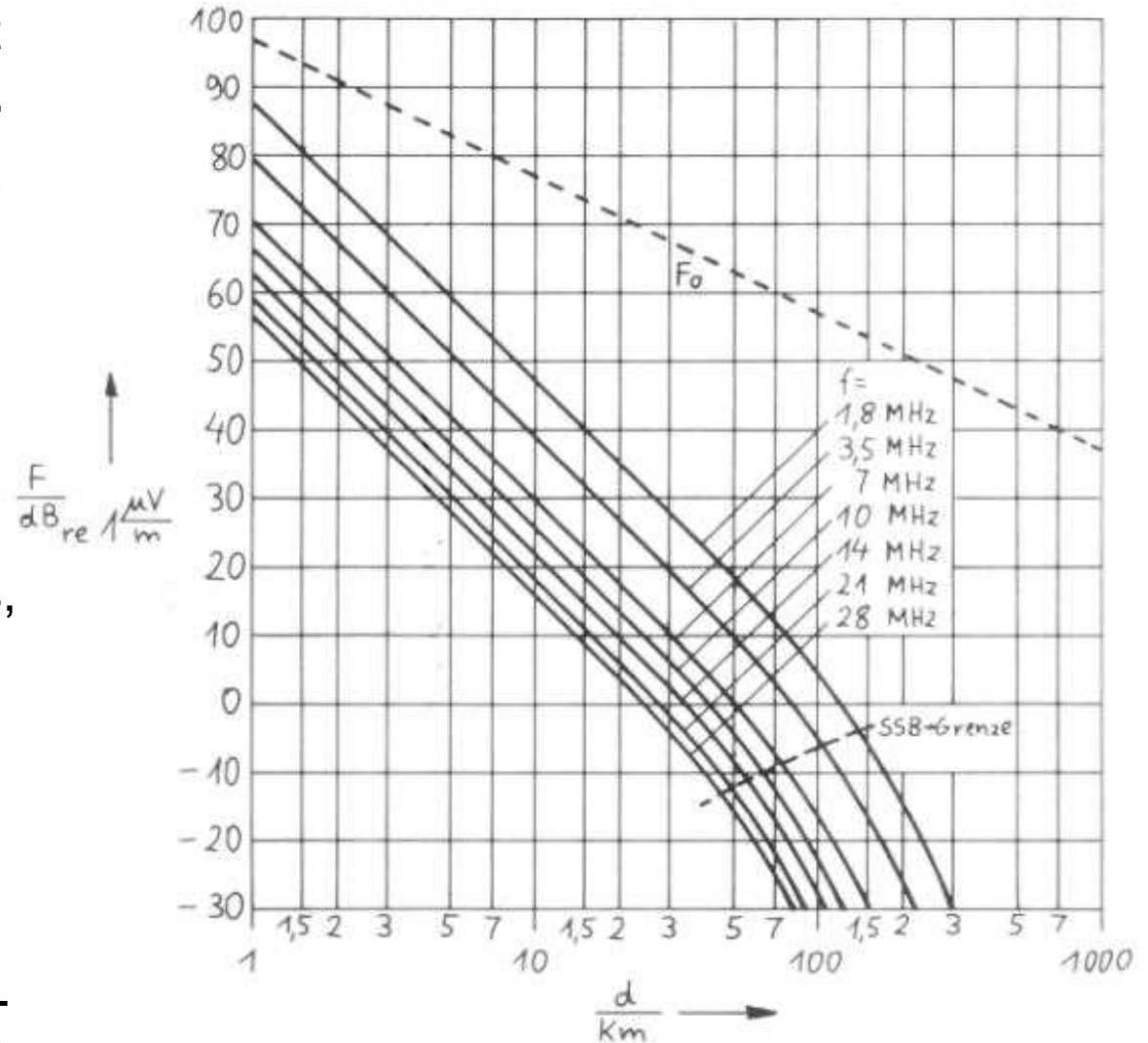
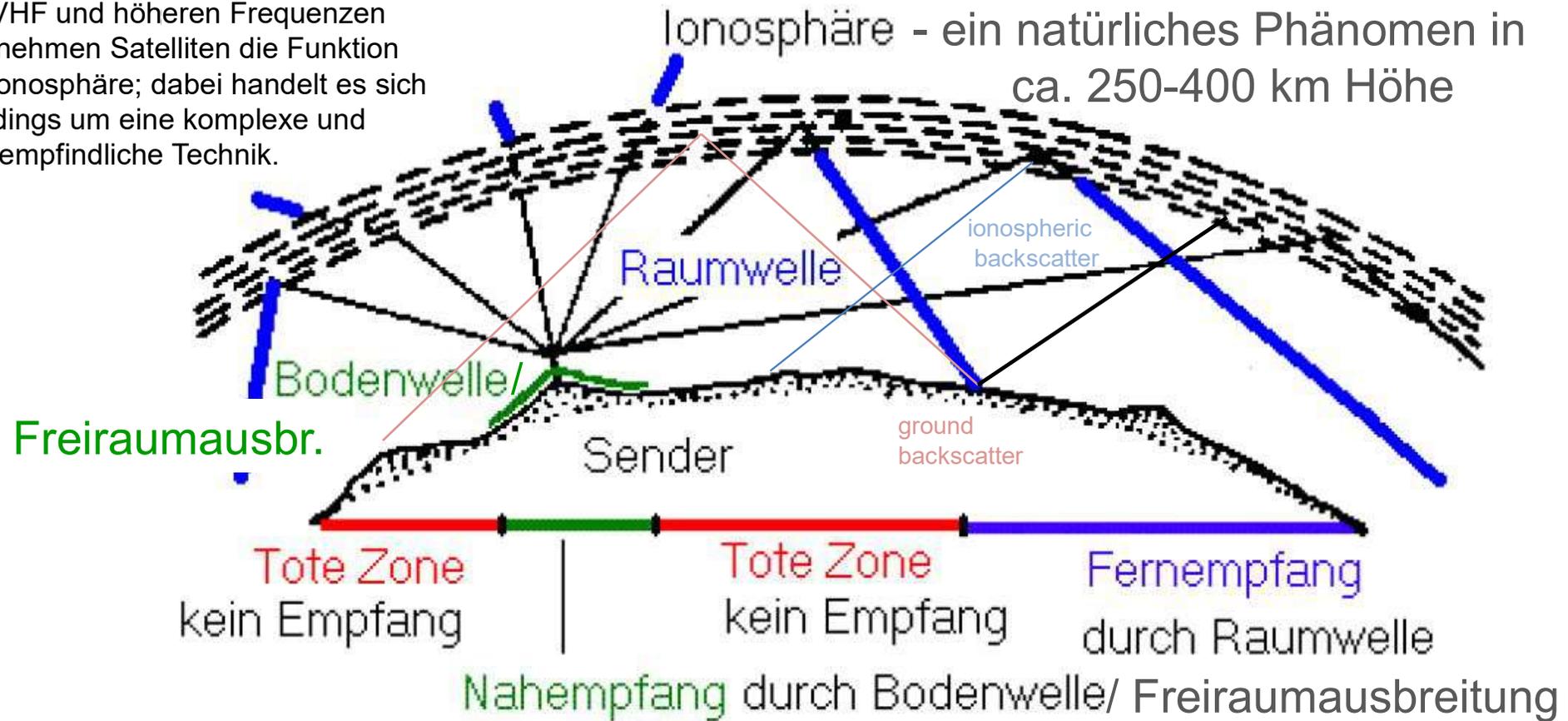


Abb. 2.1: Feldstärkepegel der Bodenwelle über mittlerem Boden, Sendeleistung $P_S = 100$ W, vertikale Polarisation

Kurzwellenausbreitung - Überwindung der Erdkrümmung durch Reflexion

Auf VHF und höheren Frequenzen übernehmen Satelliten die Funktion der Ionosphäre; dabei handelt es sich allerdings um eine komplexe und u.U. empfindliche Technik.



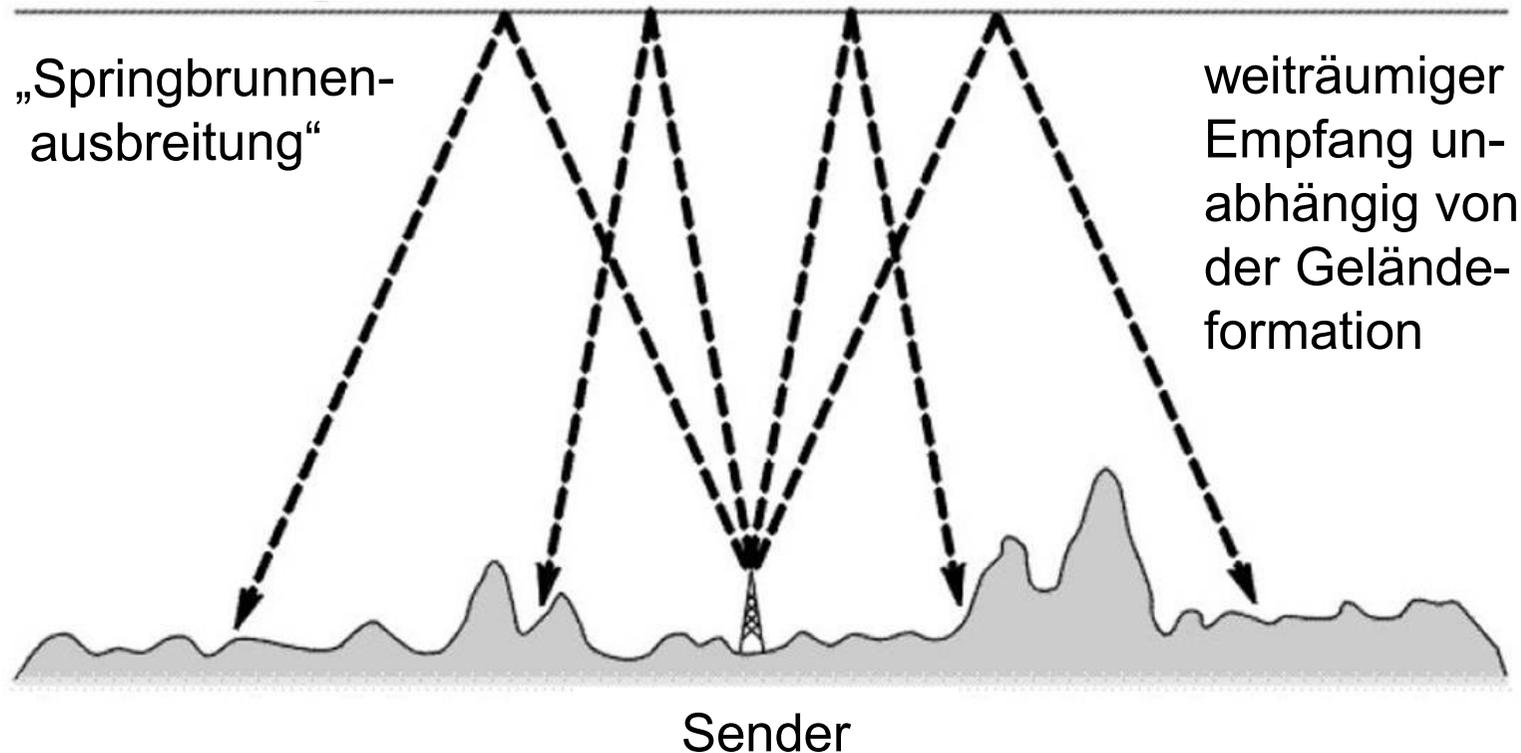
Die Domäne der **Kurzwelle** ist die Ausbreitung mittels (ggf. mehrfacher) **Reflexion der Raumwelle an Ionosphäre und Erdoberfläche**; v.a. für Verbindungen mit nur 1 Reflexion („Hop“) genügen bereits relativ geringe Sendeleistungen und einfache Antennen, die max. Reichweite beträgt hier ca. 3.000 km.

Die Ausdehnung der toten Zone hängt von den ionosphärischen Bedingungen ab und sinkt mit abnehmender Frequenz. Bei starken Sendern kommt es auf den höheren Bändern häufig zum „Auffüllen“ der eigentlich „toten Zone“ durch schwache Rückstreuungen an den Inhomogenitäten der Ionosphäre (**ionospheric backscatter**) und/oder Rückstreuungen an Unebenheiten des Erdbodens (sog. **ground backscatter** z.B. durch Gebirge, Seegang etc.); bei Letzterem wird die zurückgestreute Strahlung ihrerseits wieder an der Ionosphäre reflektiert. (→ Exkurs: **Sidescatter, Ionoscatter**)

Ohne tote Zone - Steilstrahlung (NVIS) unterhalb der kritischen Frequenz f_k

Ionosphäre

NVIS Near Vertical Incidence Skywave

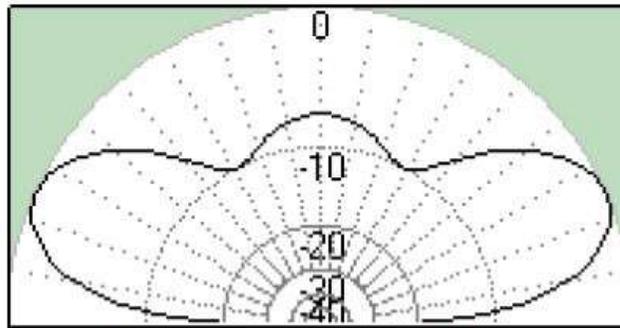


Mittels **NVIS** lassen sich bis zu **ca. 500 km ohne tote Zone** überbrücken, auch mit **Ausleuchtung** z.B. **tiefer Täler**. Optimal sind **horizontal polarisierte Antennen** in relativ **geringer Höhe**, zudem ist **nur geringe Sendeleistung** erforderlich.

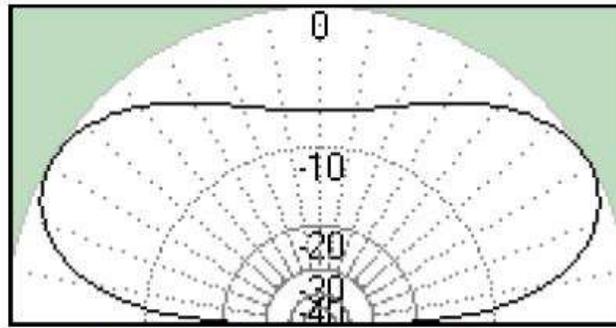
Es kommen das **160m-** (nachts), **80m-** (morgens/abends) und **40m-Band** (mittags, ggf. mit kleiner toter Zone) in Betracht; zu einigen Tageszeiten sind Frequenzen bei 5 MHz (**60m**) besonders geeignet. Auf der WRC 2015 wurden **ab 2017** dem Afu **15 kHz** (5.351,5 – 5.366,5 kHz) weltweit sekundär zugewiesen!

Steilstrahlung - niedrige Horizontalantennen im Vorteil

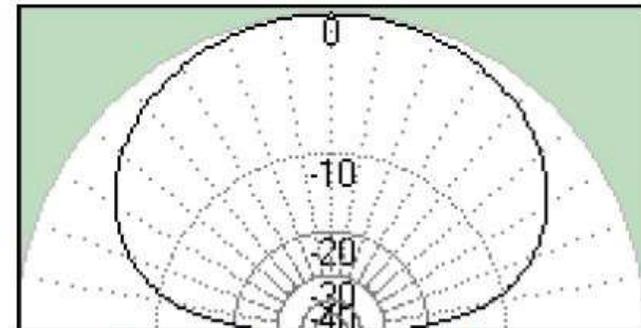
Elevationsdiagramme horizontal polarisierter Antennen (mäßiger Grund):



Abstrahleigenschaft bei
 $\lambda \times 0,5$ über Grund



Abstrahleigenschaft bei
 $\lambda \times 0,25$ über Grund



Abstrahleigenschaft bei
 $\lambda \times 0,12$ über Grund

Grundsätzlich strahlen horizontal polarisierte Antennen hoch montiert (in Relation zur Wellenlänge) eher flach
-> günstig für Fernverbindungen (DX), jedoch tote Zone
niedrig montiert (in Relation zur Wellenlänge) eher steil
-> günstig für Nahverbindungen/NVIS

Vertikal polarisierte Antennen sind für NVIS-Ausbreitung nicht geeignet, da sie nach oben nur geringe Abstrahlung aufweisen; eine Ausnahme bilden hier lediglich magnetische Antennen.