

# Wellenausbreitung im Mikrowellenbereich

**Spectracomcorp (früher Pendulum Instruments) hat auf seiner Website einen sehr interessanten Grundlagenartikel veröffentlicht, der für alle, die sich mit Antennen und Problemen der Streckenplanung im GHz-Bereich befassen, sehr hilfreich sein dürfte. Wir geben ihn hier auszugsweise wieder. Komplett ist er auf [www.spectracomcorp.com](http://www.spectracomcorp.com) zu finden.**

## Freiraum-Verlust

Die Formel für die Freiraum-Wellenausbreitung von Friis wird gewöhnlich dazu verwendet, die Dämpfung eines Signals aufgrund der Ausbreitung der elektromagnetischen Welle zu bestimmen. Der Freiraumverlust ist gegeben durch:

$$\text{Dämpfung (dB)} = 92.467 + 20 \log_{10}(f_{\text{GHz}}) + 20 \log_{10}(D_{\text{km}}) \text{ oder}$$

$$\text{Dämpfung (dB)} = 96.6 + 20 \log_{10}(f_{\text{GHz}}) + 20 \log_{10}(D_{\text{mi}})$$

Darin sind:

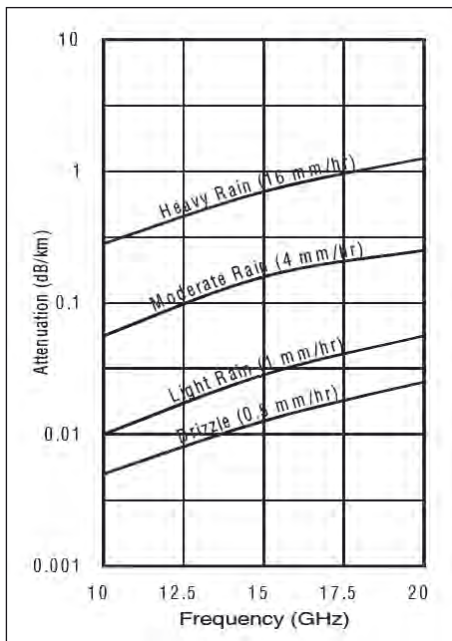
$f_{\text{GHz}}$  = Frequenz in GHz

$D_{\text{km}}$  = Distanz zwischen den Antennen (Link) in Kilometern oder

$D_{\text{mi}}$  = Distanz zwischen den Antennen (Link) in Meilen

## Frequenzen oberhalb von 10 GHz

Für Frequenzen oberhalb von 10 GHz gibt es noch mehrere zusätzliche Ursachen, welche die Ausbreitung beeinflussen:



**Bild 1: Spezifische Dämpfung in Abhängigkeit von der Frequenz für verschiedene Regenfall-Raten.**

- Absorption durch Gase oder Wasserdampf
- Dämpfung aufgrund von Dunst, Nebel oder Regen

Viele Gase und Verunreinigungen haben Absorptionslinien in den Millimeterbändern, aber aufgrund ihrer geringen Dichte ist ihr Effekt bei Mikrowellen- und Millimeterwellen-Frequenzen unter 30 GHz vernachlässigbar. Wasserdampf hat eine Absorptionslinie bei 22.235 GHz und kann Mikrowellen-Frequenzen oberhalb von 10 GHz beeinflussen. Die Menge des Wasserdampfs in der Atmosphäre auf Seehöhe kann zwischen 0.001 g pro Kubikmeter in einem kalten, trockenen Klima und 30 g pro Kubikmeter in heißem, feuchtem Klima schwanken. Zusätzlich kann die Auswirkung von Niederschlag bei Mikrowellen-Frequenzen oberhalb von 10 GHz signifikant werden. Die Dämpfung aufgrund des Regens ist abhängig von der Größe und Verteilung der Wassertropfen. Da die Schneefallraten allgemein niedriger als die Regen-Raten wird die Ausbreitung durch Schneefall weniger beeinflusst. Für Schnee und Nebel ist der Dämpfungsverlust eine Funktion der Temperatur und kann um den Faktor 3 zwischen 0 °C und 40 °C variieren. [1].

Die gesamte Übertragungsdämpfung für einen Mikrowellen/Millimeterwellen-Link wird von Freemann [2] wie folgt angegeben:

$$\text{Dämpfung (dB)} = 96.6 + 20 \log_{10}(f_{\text{GHz}}) + 20 \log_{10}(D_{\text{mi}}) + \text{zusätzliche Dämpfung (in dB) aufgrund von Wasserdampf, Dunst, Nebel und Regen}$$

Darin ist:

$f_{\text{GHz}}$  = Frequenz in GHz

$D_{\text{mi}}$  = Entfernung zwischen den Antennen (Link) in Meilen.

Das Diagramm in Bild 1 zeigt die spezifische Dämpfung in Abhängigkeit von der Frequenz für verschiedene Regenfall-Raten, einschließlich „Niesel“, leichtem Regen, mittlerem Regen und schwerem Regen [1].

## Gesamte Streckendämpfung

Die gesamte Streckendämpfung (dB) besteht aus dem addierten Gewinn beider Antennen (dB), abzüglich der Freiraumdämpfung (dB) und aller zusätzliche Verluste (Wasserdampf, Dunst, Nebel, Regen und Fresnel-Reflektions-Verlust).

## Fading

Fadings oder zeitliche Schwankungen der Streckendämpfung treten während unnormaler Ausbreitungsbedingungen auf. Die

gebräuchlichste Form von Fading ist auf Mehrwege-Übertragung zurückzuführen. Wenn sich nämlich die atmosphärischen Bedingungen ändern, variieren auch die Ausbreitungswege und Distanzen, was dazu führt, dass Signale mit unterschiedlichen Phasen und Amplituden im gleichen Moment an der Empfangsantenne auftreten. Mehrwege- oder Interferenzfading ist durch schnelle Schwankungen der empfangenen Trägerleistung gekennzeichnet.

## Fading-Grenze

Die Fading-Grenze ist die Tiefe des Fadings, ausgedrückt in dB, das ein Mikrowellen-Empfänger noch tolerieren kann, um einen akzeptable Verbindung aufrechtzuerhalten [4].

## Fresnel-Verlust

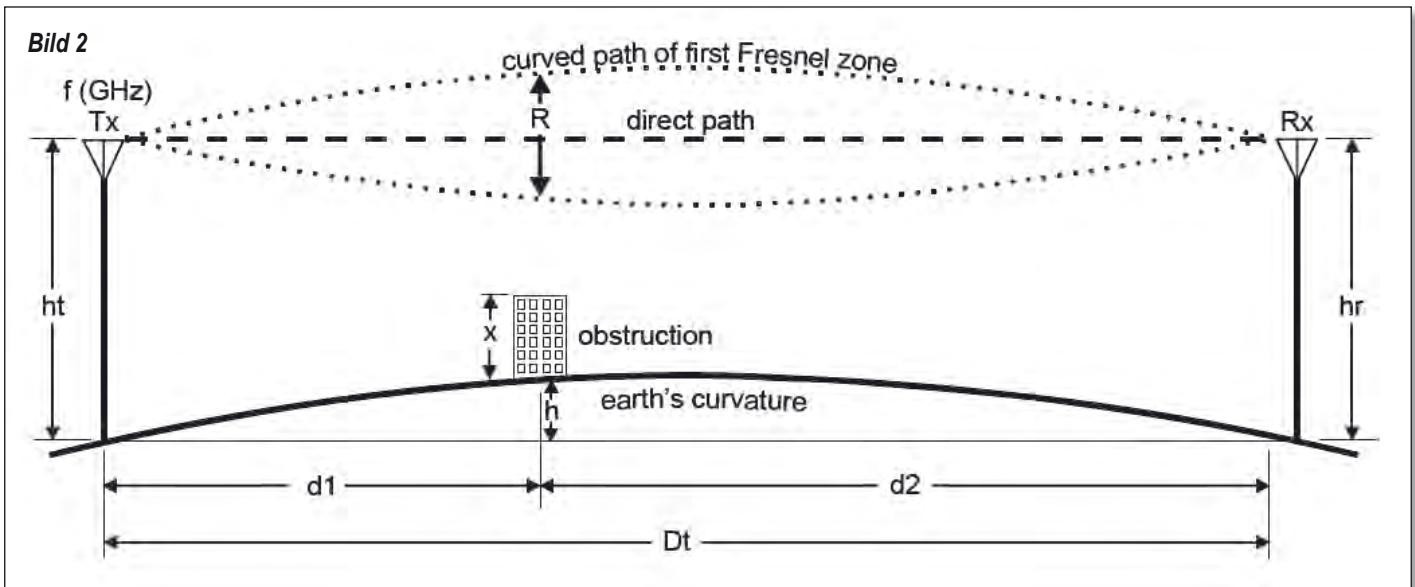
Die primäre Komponente der Streckendämpfung ist der Freiraum-Signalverlust von der Sende- zur Empfangsantenne. Zusätzliche Verluste können aber auch durch Mehrwegedämpfungen (manchmal auch als Fresnel-Reflektions-Verlust bezeichnet) aufgrund von reflektierenden Oberflächen wie Wasser in der Nähe der direkten Welle sowie im Ausbreitungsweg befindlichen Hindernissen wie Gebäude, Bergspitzen etc. in der Fresnel Zone verursacht werden.

## Fresnel-Zone

Jean Augustin Fresnel, 1788-1827, war ein französischer Physiker. Die nach ihm benannte Fresnel-Zone ist eine elliptisch geformte, konische Leistungszone, die sich von der Sende- zur Empfangsantenne ausbreitet. Wenn die gesamte Streckenlänge zwischen der Sendeantenne, der Bergspitze und der Empfangsantenne eine Wellenlänge größer ist als die direkte Distanz zwischen den Antennen, dann sagt man, die Streckenlänge beträgt zwei Fresnel-Zonen [4].

## Fresnel-Grenzen

Die äußere Grenze der ersten Fresnel-Zone ist definiert als die zusätzliche Streckenlänge aller Pfade, die eine halbe Wellenlänge der Übertragungsfrequenz größer sind als die direkte Sichtverbindung zwischen den Antennen. Wenn die gesamte Streckenlänge eine Wellenlänge größer ist als der direkte Pfad, dann sagt man, dass die äußere Grenze zwei Fresnel-Zonen beträgt. Es gibt eine unendliche Zahl von Fresnel-Zonen die sich coaxial um die Mitte des direkten Wellenausbreitungsweges legen.



Ungerade Anzahlen verstärken die direkte Welle, geradzahlig löschen sie aus.

**Abstand**

Aus Gründen der Zuverlässigkeit werden Punkt-zu-Punkt-Verbindungen so entworfen, dass sie zumindest im Bereich von 0,6 der ersten Fresnel-Zone genügend Abstand von allen Hindernissen haben (oben, unten, links und rechts der ersten Fresnel-Zone).

**Refraktion**

Die Erdkrümmung sowie die atmosphärischen Bedingungen (Temperatur, Druck und Wasserdampf) können eine Refraktion oder Biegung der elektromagnetischen Wellen entweder nach oben, weg von der Erdoberfläche oder nach unten bewirken. Diese Biegungen können sich häufig ändern, manchmal von Stunde zu Stunde, von der Nacht zum Tag, von Jahreszeit zu Jahreszeit und je nach Wetterlage.

Die Refraktion ist üblicherweise in der Nähe der Erdoberfläche am größten und wird kleiner, je höher man sich über der Oberfläche befindet. Um diesen Effekt zu kompensieren, wird ein Refraktions-Gradient oder "K"-Faktor verwendet, wenn Punkt-zu-Punkt-Verbindungen berechnet werden. Der ,K'-Faktor ist das Verhältnis des effektiven Erdradius zum tatsächlichen. Folgende Fälle sind zu unterscheiden:

- K =1: Keine Beugung des Signals
- K <1: Beugung weg von der Oberfläche
- K >1: Beugung in Richtung der Erdoberfläche

Der ,K'-Faktor, der gewöhnlich bei Mikrowellenstrecken unter normalen atmosphärischen Bedingungen verwendet wird, ist 1,333 (4/3), was bedeutet, dass der Radio-

Horizont weiter entfernt ist als der visuelle Horizont.

**Link-Design**

Links sollten unter Verwendung der obigen Informationen entworfen werden, bei Berücksichtigung von Hindernissen (Berge, Gebäude, Bäume) und der atmosphärischen Bedingungen. Die Graphik in Bild 2 zeigt einen typischen Mikrowellen-Punkt-zu-Punkt-Link und die grundlegenden Formeln für zuverlässiges Streckendesign.

Bedeutung der Abkürzungen:

- R = Curved path of the first Fresnel zone radius (at the obstruction)(in feet)
- ht = Height above the earth's surface at the transmitting antenna (in feet)
- hr = Height above the earth's surface at the receiving antenna (in feet)
- x = Height of obstruction (in feet)
- h = Earth's curvature, from a flat plane between antennas, at the obstruction (in feet)
- d1 = Distance from transmitting antenna to obstruction (in miles)
- d2 = Distance from receiving antenna to obstruction (in miles)
- Dt = Total path distance between antennas (in miles)
- f = Transmitted frequency (in GHz)

Ein Beispiel soll das Diagramm verdeutlichen::

- d1 = 1.6 miles
- d2 = 2.1 miles
- Dt = 3.7 miles
- x = 100 feet
- f = 0.880 GHz (880 MHz)

Die erste Fresnel-Zone ergibt sich zu:

$$R = 72 \sqrt{\frac{(d1)(d2)}{(Dt)(f)}}$$

$$R = 72 \sqrt{\frac{(1.6)(2.1)}{(3.7)(0.88)}}$$

$$R = 72 \sqrt{3.36 / 3.256}$$

$$R = 73.14 \text{ feet}$$

Für 0,6 Clearance von der ersten Fresnel zone = (73.14)(0.6) = 43.9 feet

Erdkrümmung  $h = ((d1)(d2) / (1.5)(K))$

Beim Hindernis  $h = ((1.6)(2.1) / (1.5)(4/3)) = 1.7 \text{ feet}$

Wenn sich die Sende- und Empfangantennen auf der gleichen Höhe über dem Meeresspiegel befinden:

- Erdkrümmung: 1.7 feet
- 0.6 Abstand zur ersten Fresnel-Zone bei 880 MHz: 43.9 feet
- Höhe des Hindernisses: 100.0 feet

Daraus folgt für die minimalen Höhen der Sende- und Empfangsantenne über Grund: 145,6 feet

Weitere Betrachtungen zur Strahlungskeule, der Antennenv Verstärkung, den Strahlungsfeldern etc. finden sich im erwähnten Originalbeitrag von Pendulum Instruments.

**Referenzen**

1. T. L. Frey, Jr., The Effects of the Atmosphere and Weather on the Performance of a mm-Wave Communication Link, Applied Microwave and Wireless Magazine, February, 1999, pg. 76-80.
2. R. L. Freeman, Telecommunication Transmission Handbook, Third Edition, John Wiley & Sons Inc., 1991, pg. 494.
3. A. M. Alevy, Antenna Fundamentals for Microcellular Applications, Base Station/Earth Station Magazine, January/February 1999, pg. 28, 33.
4. H. Newton, Newton's Telecom Dictionary, Fourteenth Edition, Telecom Books, 1998.