

**Zeitschrift:** Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

**Herausgeber:** Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

**Band:** 70 (1992)

**Heft:** 7

**Artikel:** Der Einfluss beugender Kanten auf die Richtfunkausbreitung

**Autor:** Kühn, Udo

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-873996>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 29.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Der Einfluss beugender Kanten auf die Richtfunkausbreitung

Udo KÜHN, Baden-Baden

## 1 Einleitung

Für viele Anwendungsbereiche der Nachrichtentechnik ist es wichtig, den Dämpfungsverlauf im Schatten von Hindernissen ausreichend genau zu kennen. Während man sich sowohl beim UKW-Rundfunk und Fernsehen wie auch beim Mobilfunk häufig statistischer Methoden bedient, muss die Dämpfung an Richtfunkstrecken, besonders wenn keine ausreichenden Antennenhöhen gegeben sind, in jedem Fall berechnet werden.

Bei der Bestimmung der Zusatzdämpfung an Richtfunkverbindungen kann man ein im CCIR-Bericht Nr. 338-5 enthaltenes Diagramm benützen, mit dem es möglich wird, den Einfluss von Hindernissen in Abhängigkeit vom Abschattungsgrad und der Frequenz zu ermitteln [1]. Es wird unterschieden zwischen Beugung an einer scharfen Kante und an hindernisfreier sphärischer Erde. Meist handelt es sich, sieht man von Ausbreitung über eine Wasseroberfläche ab, um Fälle, denen man weder mit der einen noch mit der anderen Bedingung gerecht wird. Im Diagramm findet sich daher eine dritte Kurve, die aus Messungen in den USA hervorgegangen ist, für durchschnittliches Terrain gilt und die der Praxis in vielen Fällen besser entsprechen soll. Eine ausreichend genaue Lösung erhält man im konkreten Fall eigentlich nur durch Messung. Auf die Zweckmäßigkeit derartiger Untersuchungen der Höhenabhängigkeit der Dämpfung an terrestrischen Richtfunkstrecken hat *Campbell* bereits 1953 anlässlich von Messungen im Osten der USA hingewiesen [2]. Auf diese Weise ist man auch in der Lage, Aussagen über die Reflexionseigenschaften des Untergrundes zu machen [3, 4, 5].

Auch in Europa wurde anfangs der 60er Jahre über derartige Untersuchungen berichtet [6, 7]. Als Messeinrichtung wurden dabei bewegliche Sende- und Empfangsgeräte verwendet, die mit einem Schlitten an einem Mast auf- und abgefahren werden können, wobei der Dämpfungsverlauf kontinuierlich und synchron zur jeweiligen Messhöhe aufgezeichnet wird [8]. In den folgenden Jahren wurden verschiedene Richtfunkstrecken in Deutschland mit dieser Methode untersucht [9, 10].

Auch in Ungarn wurden derartige Experimente bei 3,5 GHz mit dem Ziel durchgeführt, die zeitlichen Veränderungen bei verschiedenen troposphärischen Bedingungen zu ermitteln [11]. *Giloi* hat an einer 43 km langen 9,3-GHz-Strecke die Änderung der Dämpfung in Abhängigkeit von der Höhe mit 14 übereinander montierten Antennen aufgezeichnet [2], um die Gültigkeit verschie-

dener Ausbreitungsmodelle zu testen. Dabei war es möglich, durch schnelle Antennenumschaltung die zeitlichen Gänge an allen Antennen nahezu synchron aufzuzeichnen.

1982 wurden weitere Ergebnisse von einer 23 km langen Strecke in den USA bekannt, die bei 9,6, 11,4 und 28,8 GHz betrieben wurde. Gemessen wurde bis 300 m Höhe bei gleichzeitiger Aufzeichnung der Refraktivität im jeweiligen Höhenbereich [13].

In diesem Zusammenhang ist auch auf neuere Messungen aus China hinzuweisen, wo an 60 m hohen Türmen bei durchschnittlichen Ausbreitungsbedingungen der Einfluss von Hindernissen untersucht wurde [14]. In Übereinstimmung mit früher in Europa durchgeführten Messungen entsprach der Dämpfungsverlauf für Strecken im Gebirge und über Hindernisse in Stadtgebieten recht gut der Beugung an scharfen Kanten.

Ein weiterer Aspekt derartiger Arbeiten ist die Ermittlung der ausreichenden Freiheit einer Strecke und die Berücksichtigung von Bodenreflexionen. Über Land finden sich dabei meist Reflexionskoeffizienten, die weit unterhalb von 1 liegen. Daher zeigt sich z.B. im Bereich ungerader Fresnelzonen meist nicht die erwartete Feldstärkeerhöhung um bis zu 6 dB, und in geraden Fresnelzonen sinkt die Feldstärke nur um Werte von Null bis etwa 12 dB unter die Freiraumausbreitung. Weiterhin muss man berücksichtigen, dass auch die Berechnung der Höhe der jeweiligen Fresnelzonen auf der Empfangsseite mit massgeblichen Unsicherheiten behaftet sein kann, da es wegen der Wirkung der Vegetation und Bebauung in vielen Fällen schwerfällt, die genaue Höhe des Reflexionsgebietes festzulegen. All dies führt dazu, dass bei der Berechnung beträchtliche Abweichungen auftreten können.

## 2 Abschattung im Nahbereich von Hindernissen

An einer Richtfunkstrecke im Norden Deutschlands wurden im hügeligen Gelände Messungen im Einflussbereich eines Hindernisses für zwei verschiedene Höhen der Sendeantenne durchgeführt (*Fig. 1*).

Wie aus dem Profil hervorgeht, ist im Höhenbereich oberhalb 16 m im wesentlichen das Waldstück am km 21...22 von Bedeutung. Unterhalb dieser Höhe wirken sich einige unmittelbar vor der Empfangsstelle befindli-

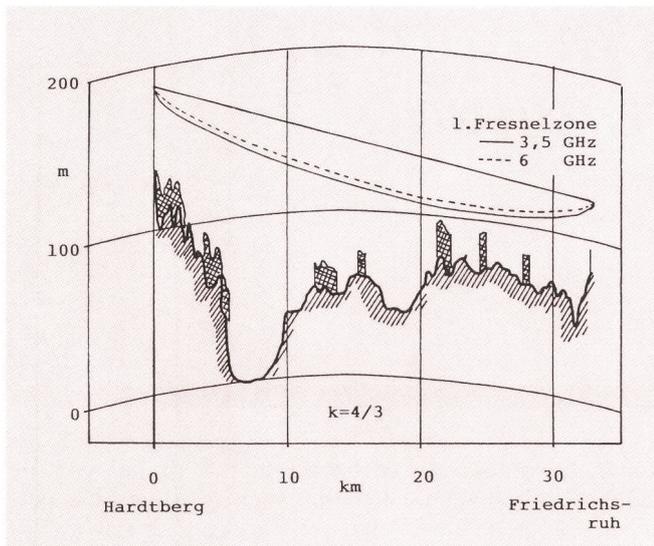


Fig. 1 Profil einer Richtfunkstrecke

Es wurde bei 3,5 GHz und 6 GHz sowie mit  $h_s = 50$  m und  $h_s = 36$  m gemessen  
 $k$  Erdkrümmungsfaktor (fiktiver Erdradius =  $k \cdot$  Erdradius)

che einzelne Bäume und kleine Gebäude aus. Nach den an vielen anderen Funkfeldern vorliegenden Erfahrungen würde man aus dem Profil auf nur geringe Bodenreflexionen schliessen. Dies wird durch die Messungen auch bestätigt. Für die Freiheit der ersten Fresnelzone bei einem fiktiven Erdkrümmungsfaktor von  $k = 4/3$  errechnen sich die Höhen bei 3,5 GHz empfangsseitig für

$h_s = 50$  m zu etwa 20 m und bei 6 GHz zu 29 m. Ein Vergleich zwischen Rechnung und Messung findet sich in den Figuren 2a und b.

Gemessen wurde an drei bzw. vier Tagen mit jeweils insgesamt 16 und 21 Messreihen für beide Höhen. Ein Einfluss möglicher Refraktivitätsänderungen liess sich nicht erkennen. Die Abweichungen betragen weniger als 1 dB.

Die Dämpfung nimmt unterhalb 16 m für beide Sendeantennenhöhen sehr schnell zu und erreicht innerhalb weniger Meter 30 dB. Diese Höhe ist bei beiden Frequenzen nahezu gleich, was als Beweis dafür gilt, dass es sich um den Einfluss eines nahe vor der Empfangsstelle befindlichen Hindernisses handelt.

Die Lage des ersten Maximums entsprechend der ersten Fresnelzone ist auch nicht annähernd erkennbar. Bei 3,5 GHz werden die geringsten Dämpfungswerte erst 12 m oberhalb der ersten Fresnelzone erreicht. Bei 6 GHz liegen diese bei etwa 34 m und damit ebenfalls erheblich höher als berechnet. Insgesamt verändert sich die Dämpfung in Abhängigkeit der Höhe bei beiden Frequenzen ausserhalb des nahe gelegenen Hindernisses um etwa 4 dB. Mit einer solchen Abweichung gegenüber der Vorhersage muss man bei der Feldstärkebestimmung rechnen, auch wenn ausreichende Information über das Geländeprofil vorhanden ist.

Grundsätzlich wurden alle Messungen bei horizontaler und vertikaler Polarisation durchgeführt. Nennenswerte Unterschiede wurden dabei in keinem der hier beschriebenen Fälle gefunden; es ist aber zu beachten, dass im

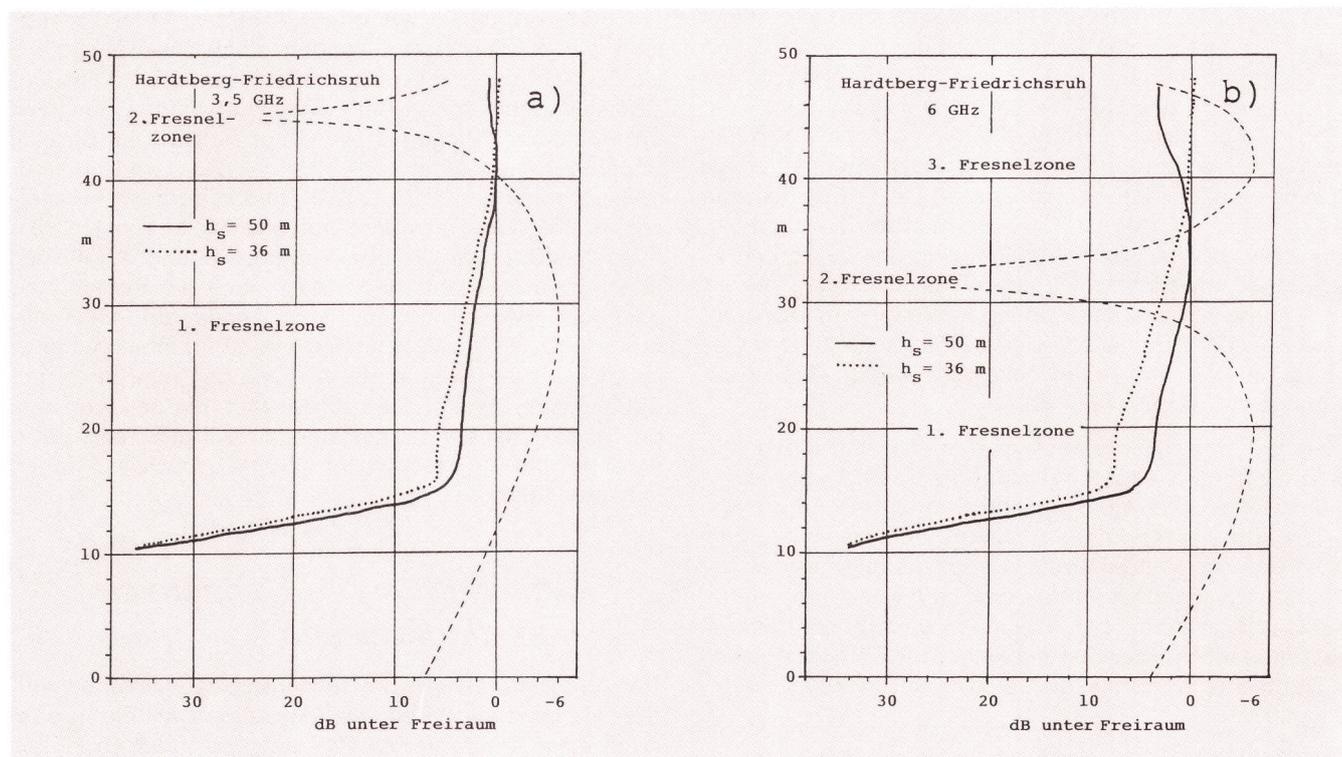


Fig. 2 Dämpfungsverlauf bei 3,5 GHz und 6 GHz am Funkfeld gemäss Figur 1

$h_s = 50$  m (ausgezogene Kurve)  
 $h_s = 36$  m (gepunktete Kurve)  
 die berechnete Kurve (gestrichelt) gilt für  $h_s = 50$  m  
 a) bei 3,5 GHz  
 b) bei 6 GHz

unmittelbaren Nahbereich, wenn die Bedingung flacher Einfallswinkel nicht mehr gilt, ein Einfluss der Polarisierung vorhanden ist, wie auch Messungen in der Schweiz gezeigt haben [16].

### 3 Hindernis im Entfernungsbereich um 1 km

An einem weiteren, gleichfalls im Norden Deutschlands gelegenen Funkfeld wurde in stark hügeligem Gelände die Wirkung der Abschattung durch ein Hindernis, bestehend aus einem mit Kiefernwald bestandenen Hügel 1,1...1,6 km vor der Empfangsstelle, untersucht (Fig. 3).

Die Messergebnisse mit bis zu 16 Messreihen in drei Tagen sind in Figur 4 dargestellt.

Freiraumwerte werden erwartungsgemäss bei 3,5 GHz in etwa 38 m und bei 6 GHz in etwa 35 m über Grund erreicht. Darüber sind die Gänge gering und liegen bei höchstens 3 dB. Die Sichtgrenze, durch die Wirkung des Waldstückes bestimmt, befindet sich in 28 m Höhe. Zwischen beugender Kante und Empfangsantenne herrscht Hindernisfreiheit.

Bei 3,5 GHz zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit der Berechnung nach Beugung an scharfer Kante bis zu 20 m. So wird auch der bei streifender Sicht erwartete Wert von 6 dB erreicht. Unterhalb 20 m nimmt dann die Dämpfung stärker zu und wird eher durch eine Berechnung mit abgerundeter Kante,  $\rho = 0,3$  angenähert [17], dies auch in guter Übereinstimmung mit der experimentellen Kurve gemäss CCIR-Bericht 338-5 [1].

Bei 6 GHz findet sich die Übereinstimmung mit der Berechnung nach einer abgerundeten Kante mit  $\rho = 0,3$  allgemein, d.h. auch im Bereich oberhalb der Sichtlinie. Die in der Schattenzone festgestellten Gänge traten bei allen Wiederholungsmessungen auf und waren jederzeit reproduzierbar. Sie sind eine Folge von Bodenreflexionen zwischen beugender Kante und der Empfangsstelle.

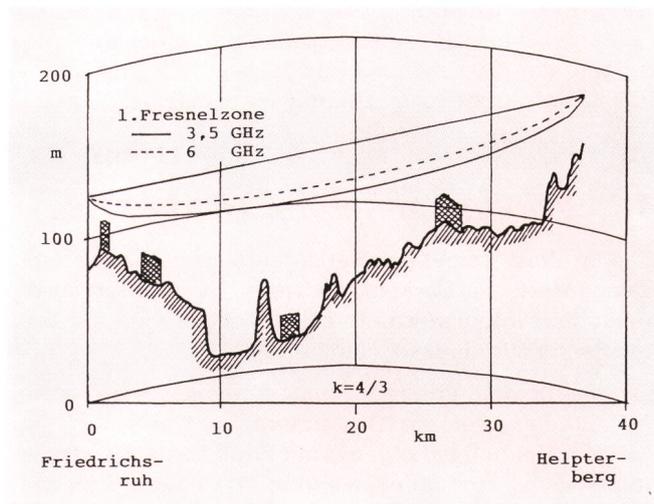


Fig. 3 Profil einer Strecke, an der der Einfluss eines 1,1...1,6 km vor der Empfangsstelle befindlichen bewaldeten Hügels gemessen wurde

Dadurch können, wie im vorliegenden Falle, Abweichungen bis zu 10 dB auftreten.

In diesem Zusammenhang ist auf interessante Ergebnisse hinzuweisen, die aus Höhenabhängigkeitsmessungen hinter einer 0,64...0,95 km entfernten Kante hervorgehen, über die Giloi berichtet hat [18]. Es wurden bis weit in den Schattenbereich hinein bei 9,3 GHz an einer 39,7 km langen Strecke im Höhenintervall 2,5...38,6 m gemessen. Es fand sich eine annähernd gute Übereinstimmung mit der Berechnung nach Beugung an einer scharfen Kante. Die im Winter geringere Abschattungs-dämpfung wird daraus erklärbar, dass es sich um Beugung an Laubbäumen handelte.

Ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit den Bedingungen für eine scharfe Kante ergab sich nach Messungen an einer 8,3 km langen 11-GHz-Strecke im Thüringer

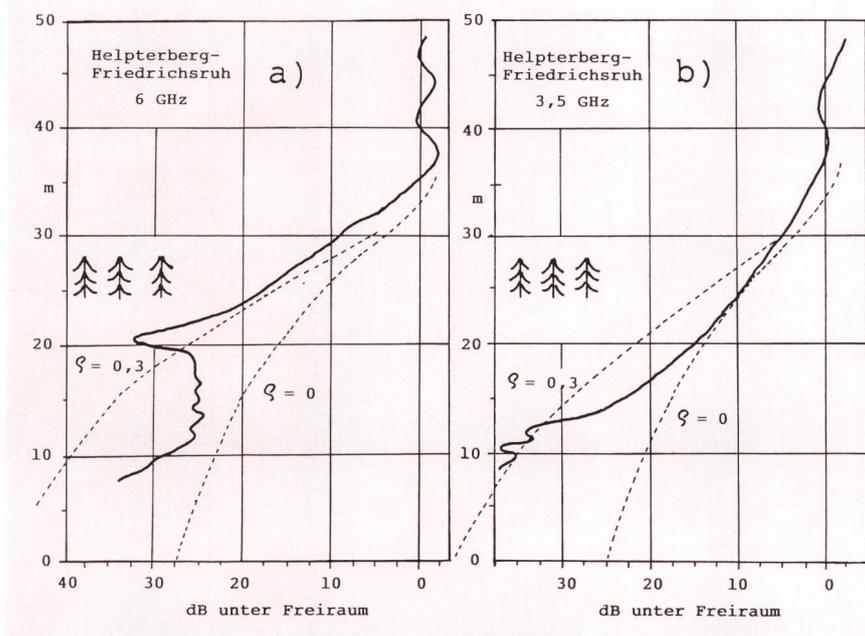


Fig. 4 Einfluss eines 1,1...1,6 km vor der Empfangsstation befindlichen bewaldeten Hügels bei 3,5 GHz und 6 GHz auf den Höhenverlauf der Dämpfung

Profil gemäss Figur 3  
 $\rho$  Streufaktor (Diffraction)

Wald. Die Abschattung wurde durch eine mit dichtem Fichtenwald bestandene Bergkante hervorgerufen. Messungen, die Meeks über einen Hügel mit Nadelwald bei 1090 MHz durchführte, zeigten ein ähnliches Ergebnis [19].

#### 4 Wirkung mehrerer Hindernisse

Eine im West-Erzgebirge verlaufende Schrägstrecke bot Gelegenheit, die Wirkung mehrerer Hindernisse zu untersuchen, wobei vier unterschiedliche Höhen der Sendeantenne zum Einsatz kamen (Fig. 5).

Für die beiden unteren Sendeantennenhöhen wirken drei Hindernisse: die Bewaldung im Nahbereich mit dichtem Fichtenbestand, ein mit Wald bestandenes Hindernis nach 5 km und ein weiterer bewaldeter Berg nach 9 km. Vor allem letzterer ist für alle Sendeantennenhöhen von Bedeutung, wie die Messungen zeigen. Empfangsseitig wurde zwischen 5...70 m über Grund gemessen. Einflüsse durch Veränderungen der Refraktivität konnten im Messzeitraum nicht beobachtet werden. Da die Bedingungen für die beiden Sendeantennenhöhen von 47 m und 54,5 m noch ziemlich übersichtlich sind, wurden die Berechnungen zunächst dafür vorgenommen (Fig. 6 und 7).

Für die oberste Sendeantenne zeigt sich bei 3,5 GHz eine gute Übereinstimmung der Messung mit der berechneten Beugung an scharfer Kante. Bei 6 GHz ist die Verlagerung des ersten Maximums entsprechend der ersten Fresnelzone in geringere Höhe deutlich erkennbar. Das nachfolgende erste Minimum, entsprechend der zweiten Fresnelzone, ist 3 dB niedriger. Die Kurve für

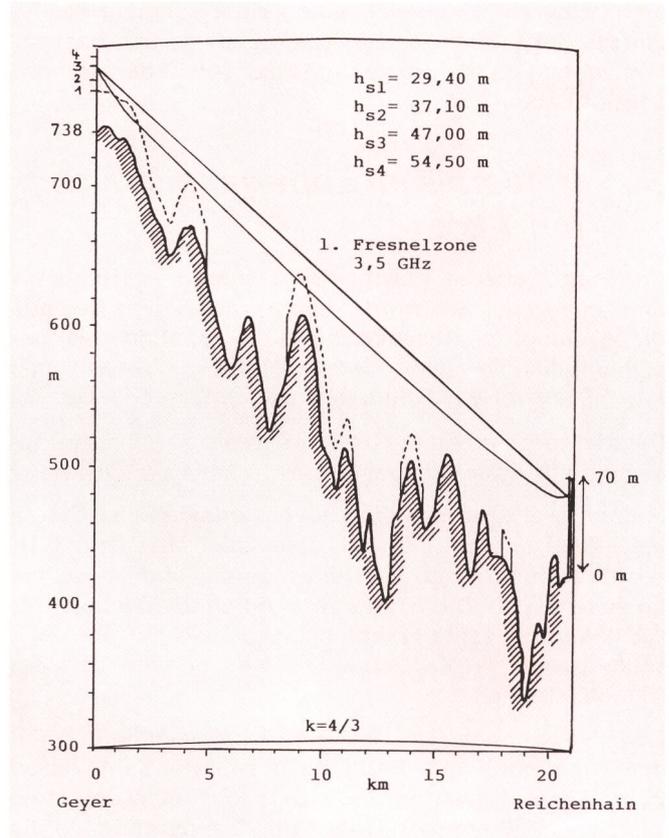


Fig. 5 Profil einer Strecke im Bergland zur Messung der Dämpfung in Abhängigkeit der Höhe der Sende- und Empfangsantenne

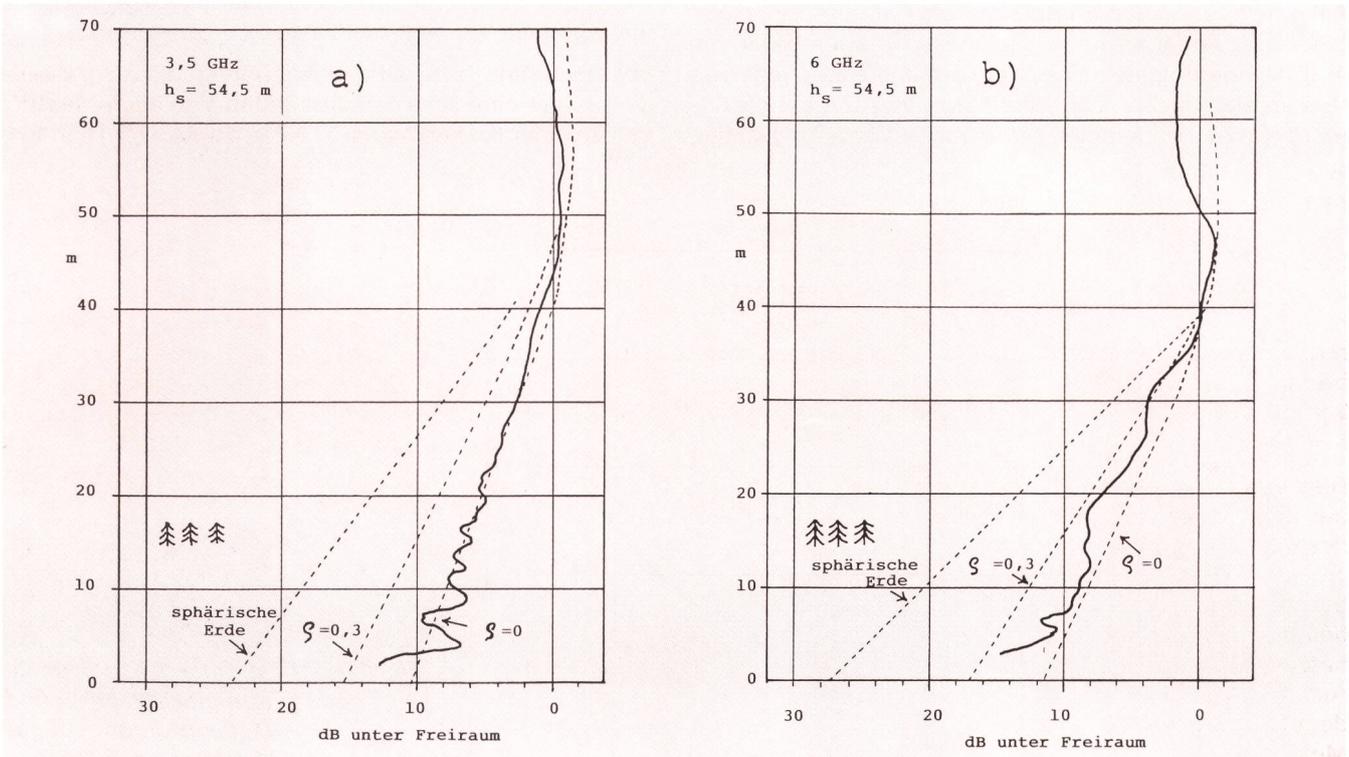


Fig. 6 Dämpfungsverlauf für  $h_s = 54,5$  m  
Streckenprofil entsprechend Figur 5  
a) bei 3,5 GHz  
b) bei 6 GHz

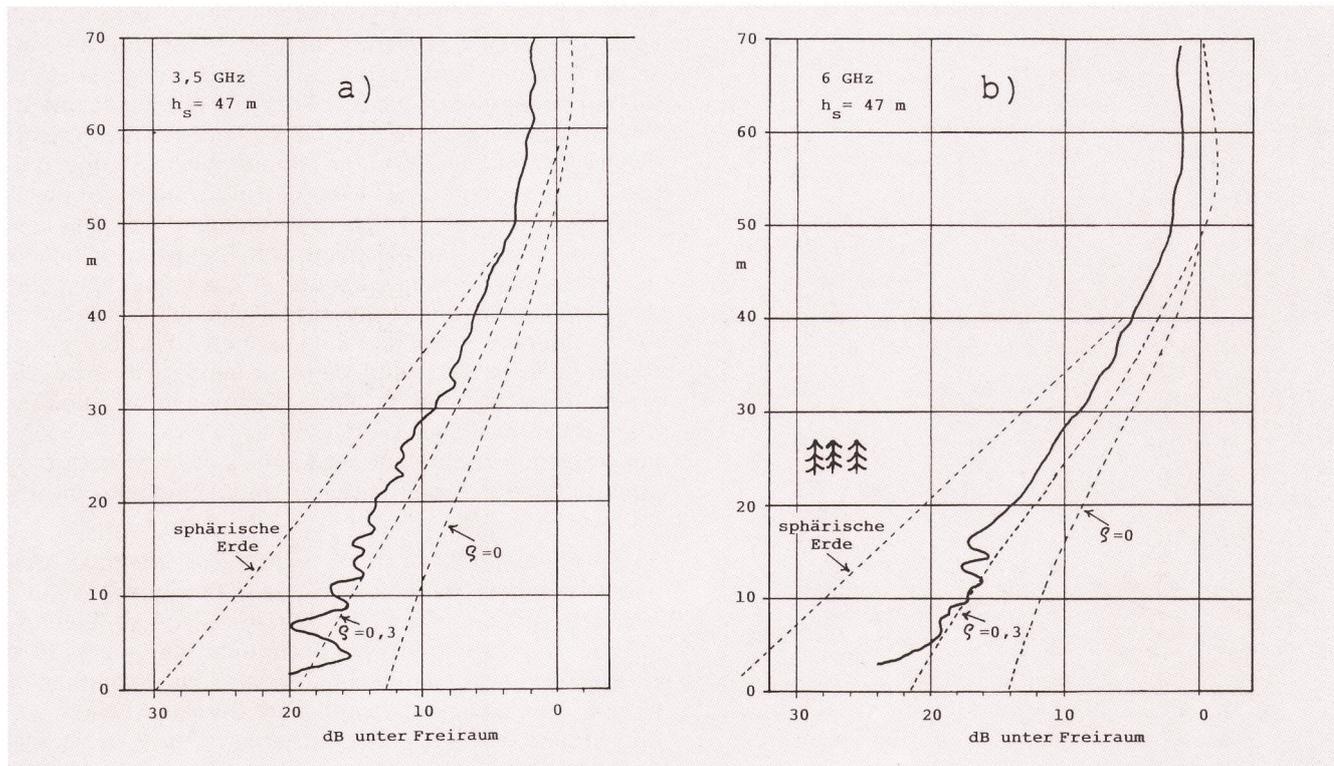


Fig. 7 Höhenabhängigkeit der Dämpfung für  $h_s = 47$  m

Profil entsprechend Figur 5

a) bei 3,5 GHz

b) bei 6 GHz

6 GHz bewegt sich zwischen jenen berechnet nach scharfer Kante und abgerundeter Kante mit  $\rho = 0,3$ . Je nachdem mit welcher Bedingung gearbeitet wird, muss mit einem Fehler bis zu 4 dB gerechnet werden. Für die nach hindernisfreier sphärischer Erde berechnete Kurve ergeben sich erwartungsgemäss grosse Unterschiede zu den Messwerten.

Figur 7 zeigt die Ergebnisse für eine um 7,5 m geringere Höhe der Sendeantenne. Dabei rückt die Sichtlinie um fast 10 m nach oben, und gleichzeitig steigt die Dämpfung in allen Höhen unterhalb 70 m an. Eine zusätzliche Beeinträchtigung durch die Bewaldung im Entfernungsbereich bis 1,7 km vor der Sendestelle ist oberhalb  $h_E = 55$  m nicht zu erwarten. Dies gilt auch für die anderen Hindernisse. Die Freiheit für den Abstand  $d = 9$  km beträgt  $H = 13$  m. Beim Radius der ersten Fresnelzone von  $r_1 = 20,9$  m bei 3,5 GHz wird  $H/r_1 = 0,62$  und für  $r_1 = 15,9$  m bei 6 GHz wird  $H/r_1 = 0,8$ .

Dies ergibt noch keine Zusatzdämpfung. Man muss daher davon ausgehen, dass die Bewaldung vor der Sendestelle einen etwas grösseren Einfluss ausübt, als dies aus dem Streckenschnitt hervorgeht. Abgesehen von der Abweichung bei grösseren Empfangsantennenhöhen folgt die gemessene Kurve der für  $\rho = 0,3$  berechneten recht gut. Die Unterschiede liegen unterhalb 3 dB. Aus dem Kurvenverlauf geht auch hervor, dass die nach dem CCIR-Bericht 338-5 berechneten Werte gut mit den Messungen übereinstimmen. Die Werte für hindernisfreie sphärische Erde sind auch in diesem Fall zu pessimistisch. Bei einer weiteren Verringerung der Höhe der Sendeantenne wird die Berechnung kompliziert, da nicht nur mehrere Hindernisse im Streckenbereich ein-

zubeziehen sind, sondern auch der ausgedehnte Waldbestand vor der Sendestelle berücksichtigt werden muss. Versucht man die Einflüsse der Hindernisse durch Tangentialstrahlen zusammensetzen und danach die Zusatzdämpfung zu berechnen, so verschiebt sich mit zunehmender Höhe der Empfangsantenne der Schnittpunkt der Tangentialstrahlen in Richtung auf die Sendestelle, wodurch der Radius der Fresnelzone sich verringert. So erhält man letztlich einen Kurvenverlauf, der nur noch eine geringe Änderung der Dämpfung in Abhängigkeit der Höhe erkennen lässt, was mit den Messwerten nicht mehr übereinstimmt.

Dagegen verspricht eine andere Methode bessere Ergebnisse. Es wird zunächst ohne Berücksichtigung der vorgelagerten bewaldeten Bergkante gerechnet. Deren Wirkung wird in erster Näherung für alle Empfangsantennenhöhen als einheitlich angenommen und gesondert betrachtet. Der verursachte Dämpfungsanteil beträgt 14 dB. Die weitere Berechnung wird dann für das Haupthindernis am km 9 durchgeführt. Die für verschiedene Empfangsantennenhöhen berechneten Dämpfungen sind zu addieren. Im Ergebnis dieser Betrachtung zeigt sich eine Abweichung zwischen Berechnung und Messung von weniger als 3 dB für alle Höhen.

In Figur 8 ist zusammenfassend der Verlauf der Dämpfung für alle vier Antennenhöhen wiedergegeben. Die Gänge im Bereich geringer Höhen der Empfangsantenne sind auf Reflexionen im Nahbereich zurückzuführen. Wie aus dem Geländeprofil hervorgeht, befindet sich etwa 0,5 km vor der Empfangsstation ein unbewaldeter Hügel, der wahrscheinlich zu einer zusätzlichen Beeinflussung bei geringen Antennenhöhen führt.

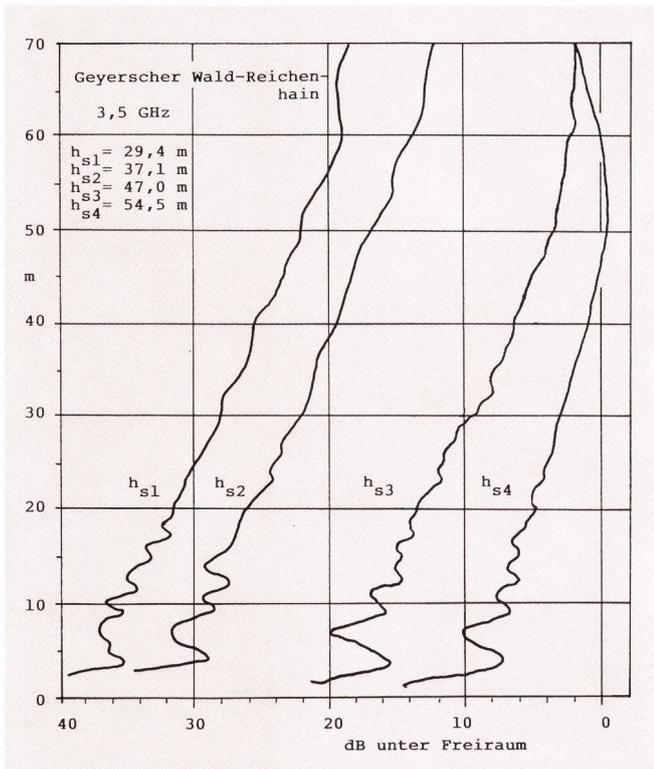


Fig. 8 Dämpfungsverlauf bei 3,5 GHz in Abhängigkeit der Höhe der Empfangsantenne (5...70 m) für vier verschiedene Höhen der Sendeantenne Profil gemäss Figur 5

## 5 Zeitliche Schwankungen im Schattengebiet

Richtfunkstrecken mit optischer Sicht zeigen eine Tendenz zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit zeitlicher Feldstärkeschwankungen als Folge verstärkter Mehrwegeausbreitung bei zu grosser Freiheit. Auf diesen Zusammenhang hat *Fehlhaber* bereits 1976 aufmerksam gemacht [20]. Bei geringer Freiheit, oder bei Abschattung, wurde auch bei eigenen Messungen weniger häufig tiefer Schwund beobachtet. Dies konnte z.B. an einer 56 km langen Strecke südöstlich von Berlin bei 2 GHz nachgewiesen werden [9]. Während die obere Empfangsantenne ausreichende Freiheit hatte (erste Fresnelzone frei), war die untere Antenne durch einen bewaldeten Hügel 5 km vor der Station abgeschattet. Die verursachte Zusatzdämpfung wurde mit 14 dB gemessen. Wie einjährige Messungen zeigten, ergab sich an der unteren Antenne eine deutlich verringerte Schwundwahrscheinlichkeit. *Figur 9* zeigt dies in einem schwundreichen Monat.

Trotz der Zusatzdämpfung für die abgeschattete Antenne ist die Unterschreitungshäufigkeit der Dämpfung für 0,01 % der Zeit für beide Antennen nahezu gleich. Daraus geht hervor, dass nicht ausreichend freie oder sogar abgeschattete Funkfelder noch ein durchaus zufriedenstellendes Betriebsverhalten zeigen können.

Dies liess sich auch an einem 11-GHz-Funkfeld zwischen Berlin und Potsdam mit der Länge  $d = 27,5 \text{ km}$ , das über mehrere Jahre als Telefonieverbindung betrieben wurde, beobachten. Wegen eines mit Mischwald bestandenen,

5 km vor der Station in Potsdam befindlichen Hügels liess sich keine Sichtverbindung erreichen. Aus technischen Gründen kam auch eine Vergrösserung der Höhe des Antennenträgers nicht in Betracht. Die Zusatzdämpfung wurde für  $k = 4/3$  mit 21 dB gemessen. Langperiodische Veränderungen oder jahreszeitliche Gänge dieses Wertes konnten nicht festgestellt werden. Abgesehen von dem bei 11 GHz auftretenden Absorptionsschwund durch Niederschläge trat Mehrwegeschwund nur selten auf. Auch dies muss in Zusammenhang mit der Abschattung gebracht werden. Vor allem im Sommer während der Nachtstunden waren aber häufig und regelmässig Feldstärkeanstiege zu beobachten, die oft Freiraumwerte erreichten. Über mehrere Jahre arbeitete die Strecke mit einer Verfügbarkeit besser als 99,99 %, nur in einem Sommermonat kam es bei einem extrem starken Gewitterregen zu einer Unterschreitung dieses Wertes.

Eine weitere 11-GHz-Strecke wurde über mehrere Monate zwischen dem Kamm des Thüringer Waldes (Schneekopf) und der Stadt Suhl in Tallage als Schrägstrecke mit sehr starker Abschattung betrieben. Die beugende Kante bestand aus einem mit dichtem und hohem Fichtenwald bestandenen Bergzug 1,6 km vor der Station auf dem Gebirgskamm. Die Berechnung zeigte, dass bei der kurzen Entfernung von 8,3 km auch bei einer so hohen Frequenz noch eine ausreichende Betriebssicherheit zu erwarten wäre. Vorgängige Versuchsmessungen mit einer mobilen Messanlage und 1-m-Parabolantennen, ergaben eine Abschattungsdämpfung von 42 dB. Dies entsprach dem auf der Grundlage der Beugung an scharfen Kanten berechneten Wert. Anfangs wurde befürchtet, dass mit den vorgesehenen 2-m-Parabolantennen mit einer Halbwertsbreite von  $0,67^\circ$  eine Veränderung dieses Wertes auftreten könnte. Dies wurde nicht beobachtet, und es konnte auch zwischen Sommer und Winter keine massgebliche Schwankung der Abschattungsdämpfung festgestellt werden.

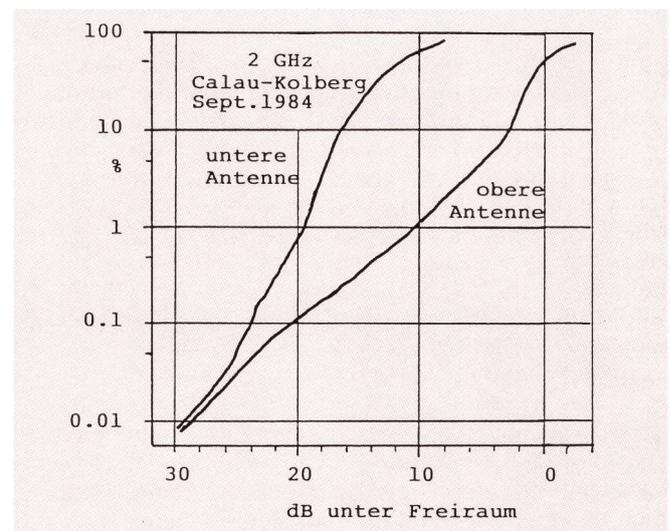


Fig. 9 Schwundwahrscheinlichkeit an einer 2-GHz-Richtfunkstrecke

südöstlich von Berlin, bei ausreichender Freiheit (obere Antenne) und bei leichter Abschattung (untere Antenne)  $d = 56 \text{ km}$   
 Abschattungsdämpfung = 14 dB für  $k = 4/3$

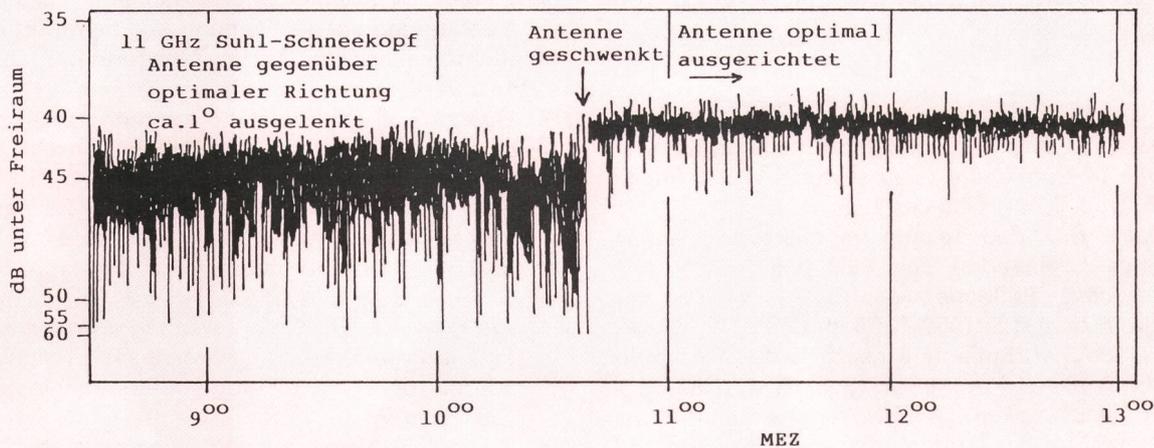


Fig. 10 Kurzperiodische Feldstärkeschwankungen bei optimaler Ausrichtung der Antennen und bei horizontaler Auslenkung einer Antenne um  $1^\circ$ , 11-GHz-Strecke,  $d = 8,3$  km, Beugung an Bergkante mit dichtem Fichtenwald, Zusatzdämpfung 42 dB

Mehrwegeschwund gab es sehr selten und mit geringen Amplituden. Er wurde vereinzelt beobachtet, als sich scharfe Inversionen im Kammbereich des Gebirges befanden. Zu Betriebsausfällen kam es während dieser Erscheinungen nicht.

Allerdings machte sich ein anderer Effekt sehr störend bemerkbar. Bereits kurz nach Installation der Geräte kam es zeitweise zu kurzperiodischen Feldstärkeschwankungen mit Amplituden von mehr als 20 dB. Dadurch wurde ein einwandfreies Arbeiten der Strecke verhindert. Die recht aufwendige Suche nach den Ursachen ergab, dass diese schnellen Schwankungen immer dann auftraten, wenn die Antennen nicht exakt aufeinander ausgerichtet waren. Man konnte durch manuelles Nachrichten der Antenne auf der Bergstation um etwa  $1^\circ$  stets die schnellen Signalfuktationen wieder auf den normalen Wert von einigen wenigen dB senken (Fig. 10).

Diese Erscheinung trat auch nach manueller Optimierung der Antennenausrichtung so oft auf, dass ein praktischer Betrieb der Strecke nicht möglich war. Ein Ausbreitungseffekt konnte für ein solches Verhalten nicht in Betracht gezogen werden. Nachdem durch die Herstellerfirma der Radom demontiert und einige defekte Heizkörper ausgetauscht worden waren, wurde die ursprünglich vorhergesagte Verfügbarkeit erreicht.

Bei optimaler Ausrichtung der Antennen traten auch bei Windgeschwindigkeiten bis 115 km/h keine grösseren schnellen Feldstärkeschwankungen auf, obschon die Bäume im Bereich der beugenden Kante grössere Horizontalbewegungen ihrer Äste und Stämme aufwiesen. Dieses Betriebsverhalten gilt im wesentlichen nur für dicht bewaldete Kanten, bei einzelnen Bäumen auf der Kante sind durch Phasengänge hervorgerufene Feldstärkeschwankungen nicht auszuschliessen.

Auch eine Schneebedeckung der Bäume im Kantenbereich führte zu keiner Dämpfungszunahme. Der Beugungsvorgang blieb auch bei schmelzendem Schnee unbeeinflusst. Dämpfungen traten jedoch immer dann auf, wenn es zu Ablagerungen nassen Schnees am Radom der Antenne kam, was bei extremen Witterungsbedingungen trotz Heizung nicht immer zu vermeiden ist. Wegen der durch die Abschattungsdämpfung erheblich

verringerten Schwundreserve können bei sehr intensiven Regenereignissen kurzzeitige Ausfälle auftreten. Es zeigte sich aber, dass die Häufigkeit derartiger Ausfälle unter Verwendung der Niederschlagsintensitätsverteilungen mit guter Näherung vorhergesagt werden können.

Wie diese Versuche gezeigt haben, lassen sich Richtfunkstrecken auch bei einer so grossen Zusatzdämpfung durch ein Hindernis noch mit ausreichender Verfügbarkeit betreiben. Voraussetzung ist allerdings, dass die Planung sorgfältig durchgeführt wurde und die vorher berechneten Werte der Abschattungsdämpfung messtechnisch überprüft wurden. In der Praxis wird man derartige Streckenführungen nur in Sonderfällen verwirklichen.

## 6 Schlussfolgerungen

Bei Richtfunkverbindungen im hügeligen oder bergigen Gelände kann man die im Schattenbereich auftretenden Zusatzdämpfungen unter Anwendung der im CCIR-Bericht 338-5 enthaltenen Kurve berechnen, die aus Messungen in den USA hervorgegangen ist. Auch die Berechnungsmethode mit leicht abgerundeten Hindernissen, entsprechend  $\rho = 0,3$ , führt zu recht guten Ergebnissen. In vielen Fällen findet sich hinter einem Hindernis mit dichtem Nadel- oder auch Mischwald eine befriedigende Übereinstimmung mit der Beugung an scharfer Kante.

An Strecken mit eingeschränkter Freiheit oder mit Abschattung tritt eine deutliche Verringerung der Schwundwahrscheinlichkeit auf. An einem Funkfeld im Bergland mit sehr grosser Zusatzdämpfung (42 dB), verursacht durch eine mit dichtem Fichtenwald bestandene Bergkante, konnte auch bei Windgeschwindigkeiten von 115 km/h und Schneebedeckung der Bäume keine massgebliche Veränderung im Beugungsfeld beobachtet werden. Allerdings ist dies in hohem Grade von der exakten Ausrichtung der Antennen abhängig, wie Versuche mit scharfen Richtantennen bei 11 GHz gezeigt haben. Bereits eine horizontale Auslenkung um weniger als  $1^\circ$  führt zum Auftreten kurzperiodischer Schwankungen mit Amplituden von mehr als 20 dB.

### Bibliographie

- [1] Propagation data and prediction methods required for line-of-sight radio-relay systems. CCIR Report 338-5, Doc. 5/401, Oktober 1989.
- [2] Campbell R.D. Path testing for microwave routes. Electrical Engineering, July 1953, p. 571.
- [3] Bullington K. Reflection coefficients of irregular terrain. Proc. I.R.E. 1954, Nr. 8, p. 1258.
- [4] Sherwood E.M. Reflection coefficients of irregular terrain at 10 cm. Proc. I.R.E. 1955, Nr. 7, p. 877.
- [5] Carl H. and Lupke G. 4-GHz-Weiterverkehrs-Richtfunknetz Mexiko-Nordamerika. SEL Nachrichten, 10, 1962, 3, S. 147.
- [6] Kühn U. Raumdiversity-Messungen an einer Richtfunkstrecke mit optischer Sicht. Nachrichtentechnik, 10, 1960, 10, S. 430.
- [7] Wolff A.W. und Strehl H. Streckenplanung und Funkausbreitungsmessungen für die neue Richtfunkverbindung Malmö-Stockholm. Frequenz 15, 1961, 6, S. 188.
- [8] Kühn U. Bestimmung der optimalen Antennenhöhen an Richtfunkstrecken. Radio, Fernsehen, Elektronik, 23, 1974, 18, S. 582.
- [9] Kühn U. Einfluss eines Hindernisses auf die Ausbreitungsbedingungen an einer 11-GHz-Richtfunkstrecke. Techn. Mitt. des RFZ, 27, 1983, 4, S. 86.
- [10] Kühn U. und Käbe J. Verbesserung der troposphärisch bedingten Verfügbarkeit von Richtfunkstrecken durch optimierte Antennenhöhen. Techn. Mitt. des RFZ, 24, 1980, 1, S. 7.
- [11] Czigany S., Kühn U. und Reissmann H. Über einige Erfahrungen bei der Planung und beim Betrieb von Richtfunkstrecken. Techn. Mitt. des RFZ, 20, 1976, 1, S. 7.
- [12] Giloi H.G. A study of field strength height profiles caused by multipath fading. IEEE Transact. on Ant. and Prop. Vol. AP-33, Nr. 12, 1985, p. 1378.
- [13] Allen K.C., Ott R.H., Violette E.J. and Espeland R.H. Height-gain study for 23 km links at 9.6, 11.4 and 28.8 GHz. IEEE Transact. on Ant. and Prop. Vol. AP-30, Nr. 4, July 1982, P. 734.
- [14] Xie Y. and Guo C. Experiments of diffraction propagation on terrestrial microwave line-of-sight paths. Journal of China Institute of Communications, 9, 1988, 6, p. 7.
- [15] Kühn U. Ausbreitungsuntersuchungen bei 11 GHz im Bereich des Radiohorizontes. Techn. Mitt. des RFZ, 16, 1972, 4, S. 114.
- [16] Debrunner W.E. Bestimmung naher, starker Beugungsdämpfung. Bericht der PTT-Generaldirektion, Techn. Zentrum Bern, Dezember 1990. VA.028.
- [17] Dougherty H.T. and Maloney L.J. Application of diffractions by convex surfaces to irregular terrain situations. Radio Science, 1964, 68D, p. 239.
- [18] Giloi H.G. Diffraction phenomena during multipath fading. AGARD Conf. Proc. 269, Dec. 1979, p. 32-1...14.
- [19] Meeks M.L. A propagation experiment combining reflection and diffraction. IEEE Transact. on Ant. and Prop. Vol. AP-30, Nr. 2, March 1982, p. 318.
- [20] Fehlhaber L. Einfluss der Streckengeometrie auf den Schwund auf Richtfunkfelder mit Sichtverbindung. Deutsche Bundespost, FTZ Darmstadt, 455 TBr. 49, Febr. 1976.

## Zusammenfassung *Résumé*

*Der Einfluss beugender Kanten auf die Richtfunkausbreitung*

Bei der Planung von Richtfunkstrecken ist man auf zuverlässige Dämpfungsrechnungen angewiesen, da oft die Bauwerke zur Aufnahme der Antennen noch nicht bestehen, also keine aussagekräftigen Messungen durchgeführt werden können. Dies gilt besonders da, wo Hindernisse die freie Strahlenausbreitung beeinträchtigen. Der Autor untersucht anhand der Literatur und eigener Messungen die Möglichkeiten, die zur rechnerischen Bestimmung des Einflusses von Hindernissen auf die Streckendämpfung zur Verfügung stehen.

*Influence des arêtes diffractives sur la propagation des faisceaux hertziens*

Lors de la planification des trajets hertziens, on doit disposer de calculs d'atténuation fiables, vu que les ouvrages recevant les antennes ne sont généralement pas encore construits et qu'ainsi on ne peut pas effectuer des mesures concrètes. Cette constatation se vérifie particulièrement là où des obstacles entravent le rayonnement du faisceau. L'auteur examine à partir de la bibliographie spécifique et de ses propres mesures les possibilités permettant de déterminer par calcul l'influence des obstacles sur l'affaiblissement des trajets de transmission.

## Riassunto

*L'influsso di angoli di diffrazione sulla diffusione per ponte radio*

La pianificazione di tratte in ponte radio richiede che si calcoli in modo preciso l'attenuazione, poiché molto spesso le costruzioni sulle quali vengono installate le antenne non esistono ancora e non è quindi possibile effettuare misure attendibili. Ciò vale soprattutto nei posti in cui gli ostacoli pregiudicano la libera diffusione dei raggi. L'autore esamina, in base alla letteratura tecnica e a misure da lui eseguite, quali possibilità sono a disposizione per determinare mediante calcoli l'influsso di ostacoli sull'attenuazione lungo la tratta.

## Summary

*Influence of Diffracting Crests on the Microwave Radio Propagation*

The planning of microwave radio links is dependent on reliable attenuation calculations because often the antenna support structure does not yet exist. Therefore no reliable measurements can be carried out. This applies particularly where obstructions influence the free propagation. Based on the literature and on his own measurements, the author examines the possibilities available for the mathematical evaluation of the influence of obstruction on the path attenuation.