

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 75 (1984)

**Heft:** 11

**Artikel:** Wellenausbreitung bei 50 bis 1000 MHz

**Autor:** Debrunner, W. E.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-904413>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 14.01.2026

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

# Wellenausbreitung bei 50 bis 1000 MHz

W. E. Debrunner

Die für die Fernmeldepraxis im VHF/UHF-Bereich wichtigsten Ausbreitungserscheinungen werden besprochen. Die erwartbaren Verfügbarkeiten lassen sich aufgrund von Feldmessungen abschätzen. Einfache Zahlenbeispiele geben die Auswirkungen der Geräteeigenschaften an.

Les phénomènes de propagation les plus importants pour les télécommunications aux tranches VHF et UHF sont discutés. La disponibilité probable des liaisons peut être estimée sur la base de données récoltées pendant des essais de propagation. Des exemples numériques simples permettent de démontrer l'influence des caractéristiques des appareils.

## 1. Einleitung

Elektrische Erscheinungen sind bereits im 17. Jahrhundert durch Forscher wie Gilbert, Guericke, Leibniz und Galvani untersucht worden. Die Beobachtungen von Ampère, Ohm, Faraday und anderen hat James Clerk Maxwell 1873 in «A Treatise on Electricity and Magnetism» zusammengefasst. Bedeutsam ist, dass sich aus den Maxwell'schen Formeln die Wellengleichung für elektrische und magnetische Felder herleiten lässt. Den experimentellen Nachweis hat Heinrich Hertz im Herbst 1888 in Karlsruhe erbracht. Nach der Erfindung des Kohärrers durch Branly (1890) ist Popoff im Jahre 1895 der Bau einer Empfangsapparatur gelungen. Die Erfindung der Vakuumröhre durch Lieben und Lee de Forest im Jahre 1906 hat die Möglichkeiten der elektrischen Nachrichtentechnik enorm gesteigert und im besonderen die drahtlose Übertragung von Sprache möglich gemacht.

Die Entdeckung des Transistors (Bardeen, Bratain und Shockley 1948) erlaubt den Bau kleiner und stromsparender Funkgeräte. Die Verwendung integrierter Schaltkreise ergibt eine wesentliche Reduktion der Kosten und ermöglicht zugleich die Realisierung vieler Funktionen auf engem Raum. Damit hat die Ära des Jedermannsfunks begonnen. Die Euphorie und der Erfolgszwang haben zu grossen Erwartungen und zum Teil zu Fehleinschätzungen geführt. Optimale Lösungen können nur gefunden werden, wenn den einschränkenden Naturgesetzen die notwendige Aufmerksamkeit geschenkt wird.

## 2. Die elementaren Formeln

Elektromagnetische Wellen sind Transversalwellen [1]; die sich ausbreitende Feldstärke steht senkrecht zur

Fortpflanzungsrichtung. Die Art der Polarisation wird nach der Richtung der elektrischen Feldstärke  $E$  bezeichnet. In der Praxis darf für die verschiedenen Polarisationsmodi gleiches Ausbreitungsverhalten angenommen werden. Figur 1 zeigt das elektrische Feld  $E$  (in V/m) und das magnetische Feld  $H$  (in A/m) einer linear horizontal polarisierten Welle. Ob die Ankopplung mit einem Dipol an das  $E$ -Feld oder mit einer Rahmenantenne an das  $H$ -Feld erfolgt, ist nur bei stehenden Wellen von Bedeutung. Der Effektivwert der Leistungsdichte  $S$  in W/m<sup>2</sup> der in Figur 1 dargestellten Welle ist im leeren Raum

$$S = E \cdot H = E^2 \sqrt{\epsilon/\mu} \approx E^2/377 \Omega \quad (1)$$

Für die Frequenz  $f$  beträgt die Wellenlänge  $\lambda$

$$\lambda = \frac{1}{f \sqrt{\epsilon \cdot \mu}} \approx \frac{300 \text{ m}}{f/\text{MHz}} \quad (2)$$

Einfache Verhältnisse liegen vor, wenn bei Freiraumausbreitung die Senderleistung  $P_{TX}$  isotrop abgestrahlt wird. In der Entfernung  $D$  fängt eine Antenne mit der fiktiven Antennenfläche  $F$  die Leistung  $P_{RX}$  auf, wobei

$$P_{RX} = P_{TX} \frac{F}{4\pi D^2} \quad (3)$$

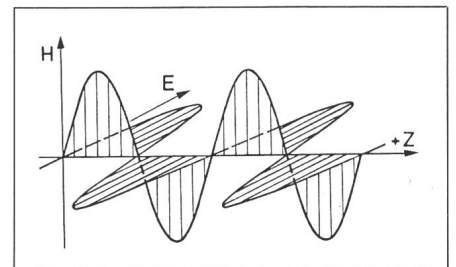


Fig. 1 Elektrisches und magnetisches Feld einer sich in Richtung von +Z fortplanzenden Welle

### Adresse des Autors

W. E. Debrunner, Generaldirektion PTT VD11, Technisches Zentrum, 3000 Bern 29.

Antennentyp	Fiktive Antennenfläche	Leistungsgewinn bezüglich Halbwelldipol	Richtwirkung, Vor-/Rückwärtsverhältnis
Isotroper Strahler	$\frac{\lambda^2}{4\pi}$	$0,61 \triangle -2,1 \text{ dB}$	0 dB
Hertzscher Dipol	$\frac{1,5 \lambda^2}{4\pi}$	$0,9 \triangle -0,4 \text{ dB}$	0 dB
Halbwellen-Dipol	$\frac{1,64 \lambda^2}{4\pi}$	$1 \triangle 0 \text{ dB}$	0 dB
$\lambda/4$ -Antenne auf leitendem Boden	$\frac{3,28 \lambda^2}{4\pi}$	$2 \triangle 3,0 \text{ dB}$	0 dB
Ganzwellen-Dipol	$\frac{2,4 \lambda^2}{4\pi}$	$1,5 \triangle 1,7 \text{ dB}$	0 dB
4-Element-Yagi	$\approx 0,7 \lambda^2$	$\approx 5,6 \triangle 7,5 \text{ dB}$	$\approx 18 \text{ dB}$
9-Element-Yagi	$\approx 0,9 \lambda^2$	$\approx 7,1 \triangle 8,5 \text{ dB}$	$\approx 22 \text{ dB}$

ist. Die Frequenzunabhängigkeit dieser Formel weist auf die naturgemässe Breitbandigkeit von Funkverbindungen hin.

Tabelle I zeigt die charakteristischen Grössen einiger Antennen. Im VHF/UHF-Bereich ist es üblich, den Halbwelldipol als Bezugsantenne zu benutzen. Ferner bezeichnet man mit ERP (effective radiated power) diejenige Senderleistung, die ein Halbwelldipol zur Erzeugung eines gleich starken Feldes, wie es die betrachtete Antenne hervorbringt, benötigt.

In der Praxis sind zusätzlich die Einflüsse des Geländes, der Meteorologie und der näheren Umgebung zu berücksichtigen. Im Frequenzbereich 50 bis 1000 MHz dürfen die Niederschlagsdämpfung und im allgemeinen auch die Ionosphäre vernachlässigt werden.

### 3. Die Wirkung der Topographie

Es lassen sich wohl Methoden beschreiben, mit denen man die Ausbreitungserscheinungen im Gelände direkt aufgrund der Maxwell'schen Gleichungen berechnen kann. Allein, die hierfür notwendige Anzahl von Datenspeichern und die erforderlichen Rechenzeiten sind zu gross. Ferner stehen die Angaben über Geländeformen und Bodenbeschaffenheit nur mit beschränkter Genauigkeit zur Verfü-

gung. So können beispielsweise Reflexionen auf einer Juraweide bei 60 MHz im Winter etwa 35% und im Sommer rund 60% betragen. Meteorologische Einflüsse ändern sich in derselben Grössenordnung. Deutliche Variationen sind auch durch die Vegetation, z.B. Wälder, bedingt. In Anbetracht dieser Sachverhalte sind in guter Ingenieurtradition sinnigere Näherungsverfahren zu suchen.

Der Einfluss des Geländes lässt sich durch Reflexionen [2] und Beugungsdämpfungen [3; 4] beschreiben. Reflexionen sind grösseren zeitlichen Variationen unterworfen und deshalb rechnerisch schwer zu berücksichtigen. Sie sind im allgemeinen nicht wesentlich grösser als das über Beugungskanten empfangene Signal und dürfen vorerst vernachlässigt werden. Verschiedene Verfahren zur Berechnung der Empfangsfeldstärken aufgrund topographischer Datenbanken sind in den letzten Jahren publiziert worden [5; 6].

Die Distanzabhängigkeit der Empfangsfeldstärke wird auch durch sogenannte Ausbreitungskurven, die auf Feldstärkemessungen bei verschiedenen Geländearten beruhen, angegeben. An Planungskonferenzen werden solche Daten mit Vorliebe verwendet. Auch wenn als Parameter die Antennenhöhen sowie Angaben zur Charakterisierung des Geländes Verwendung finden, handelt es sich doch nur um Mittel- oder Medianwerte. Dies bedeu-

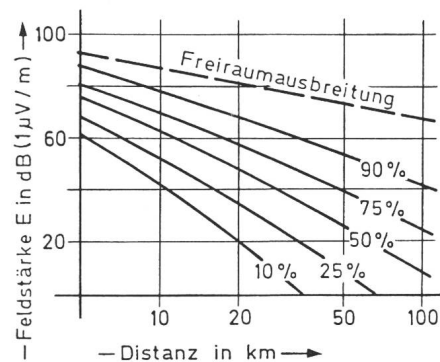


Fig. 2 Ausbreitungskurven für  $f = 100$  bis 300 MHz

Die Kurven basieren auf Dezibelmittelwerten, gemessen über eine Strecke von 1 km mit einer Empfangsantenne auf 3 m Höhe, und gelten in Ortschaften des Mittellandes mit mehr als 10 000 Einwohnern. Sie sind auf eine ERP von 1 kW bezogen. Die Kurven für die Unterschreitungshäufigkeiten von 10%, 25%, ..., 90% sind stilisiert gezeichnet.

tet, dass zur besseren Beschreibung auch die  $N'$ -til-Werte<sup>1)</sup> anzugeben sind. So zeigt Figur 2 die mit den Wahrscheinlichkeiten von 10, 25, 50, 75 und 90% unterschrittenen Feldstärken als Funktion der Distanz  $D$ . Die Grössenordnung des Geländeeinflusses ist damit aufgezeigt. Die quadratische Streuung dieser Daten beträgt etwa 15 dB [7; 8]. Im Vergleich dazu beträgt nach [6] der quadratische Fehler bei Berechnungen mit Hilfe einer topographischen Datenbank etwa 7 dB.

### 4. Meteorologische Bedingungen

Der troposphärische Brechungsindex  $n$  ist abhängig vom Luftdruck, dem Partialdruck des Wasserdampfes und der Temperatur [9]. In den VHF/UHF-Bändern darf der Gehalt an kondensiertem Wasser (Nebel, Regen, Schnee) vernachlässigt werden. Von speziellen Empfangslagen abgesehen sind für Distanzen  $D \leq 50$  km meteorologische Effekte unbedeutend.

Der Brechungsindex  $n$  nimmt im allgemeinen mit wachsender Höhe  $h$  ab. Deshalb verlaufen die Funkstrahlen gegen die Erde gekrümmt. Man berücksichtigt diesen Effekt durch die Einführung eines fiktiven Erdradius  $k \cdot R_0$ , wobei  $R_0 = 6380$  km den geometrischen Erdradius darstellt. Der Faktor  $k$  hängt vom Gradienten  $dn/dh$  ab; sein Medianwert beträgt  $k_{50} = 4/3$ .

<sup>1)</sup> beispielsweise sind  $1/4$  bzw.  $1/8$  der Daten kleiner als der untere Quartil- bzw. Octilwert.

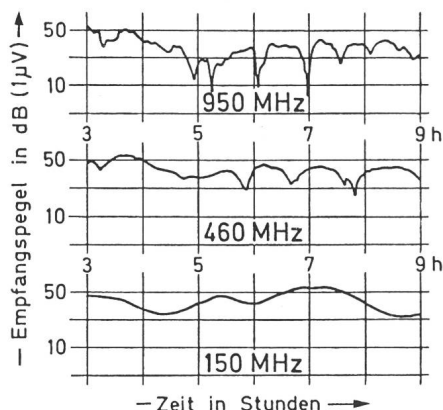


Fig. 3 Zeitliche Variation des Empfangssignals gemessen auf der Strecke Chasseral-Säntis in den Morgenstunden des 4. April 1982

Für die Schweiz darf angenommen werden, dass für 5% der Zeit  $k < 1$  und für weitere 5%  $k > 3$  ist. In vielen Fällen mag diese vereinfachende strahlenoptische Betrachtungsweise genügen.

Im östlichen Mittelmeer und am Golf von Oman werden während der Sommermonate ausserordentliche Ausbreitungserscheinungen beobachtet, die man durch Superrefraktion und Ducting erklärt; bei den Frequenzen 100 bis 500 MHz sind dann die Ausbreitungsbedingungen bis 400 km vergleichbar mit der Freiraumausbreitung. Interessante Phänomene sind zeitweilig auch auf der 173 km langen Strecke Chasseral-Säntis feststellbar (Fig. 3).

## 5. Einfluss der näheren Umgebung

Durch die Distanz (Freiraumausbreitung) und den Einfluss des Geländes ist die Grobstruktur des Feldes bestimmt. Zusätzlich treten noch Nahreflexionen mit beliebiger Phasenlage auf. Infolge naher Hindernisse, z.B. im Innern von Gebäuden oder in Wäldern, ergeben sich zusätzliche Dämpfungen. Zur Illustration ist in Figur 4

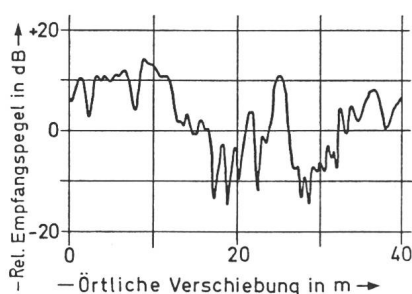


Fig. 4 Örtlicher Verlauf des Empfangspegels bei 96 MHz, in 3 m Höhe und innerhalb einer grösseren Ortschaft

Einfluss der näheren Umgebung des Empfangsortes (96 MHz)

Tabelle II

Typ der Umgebung	Höhe $h$	Medianwert der Dämpfung $A$	Quadratische Streuung $\sigma$	Zuschläge für Sicherheit $P$		
				$P = 65\%$	$P = 80\%$	$P = 90\%$
Ländliche Verhältnisse	10 m	2 dB	9 dB	6 dB	10 dB	14 dB
	6 m	6 dB	9 dB	10 dB	14 dB	18 dB
	2 m	14 dB	9 dB	18 dB	22 dB	26 dB
Strassen in grösseren Ortschaften	10 m	7 dB	9 dB	11 dB	15 dB	19 dB
	6 m	12 dB	9 dB	16 dB	20 dB	24 dB
	2 m	21 dB	9 dB	25 dB	29 dB	33 dB
Strassen in Städten	10 m	20 dB	9 dB	24 dB	28 dB	32 dB
	6 m	23 dB	9 dB	27 dB	31 dB	35 dB
	2 m	27 dB	9 dB	31 dB	35 dB	39 dB

die örtliche Variation des Empfangspegels in einer grösseren Siedlung dargestellt. Diese Feinstruktur kann nur statistisch beschrieben werden. Messungen zeigen, dass sich hierfür eine Log-Normal-Verteilung gut eignet. Wenn  $E_0$  die aufgrund der Distanz und der Topographie bestimmte Feldstärke ist, so kann die Wahrscheinlichkeitsdichte  $p = p(20 \log E)$  der beobachteten Feldstärke  $E$  approximiert werden durch

$$p = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left\{ -\frac{[20 \log |E/E_0| + A]^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (4)$$

wobei  $A$  den Medianwert der zusätzlichen Dämpfung und  $\sigma$  die quadratische Streuung bedeutet [7]. Für 96 MHz und horizontale Polarisation sind die in Tabelle II aufgeführten Werte gemessen worden [10]. In  $\sigma$  sollten auch Entscheidungsunsicherheiten des Planers mitberücksichtigt sein.

Die Summenhäufigkeit  $P(x)$  der Normalverteilung ist in Figur 5 dargestellt; damit lässt sich der mit der Wahrscheinlichkeit  $P$  überschrittene Feldstärkewert  $E$  abschätzen. Es sei

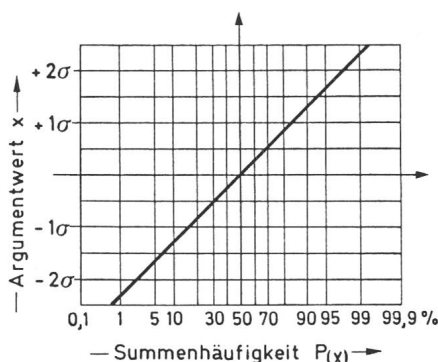


Fig. 5 Summenhäufigkeit  $P(x)$  der normierten Normalverteilung

beispielweise  $E_0 = 40 \text{ dB} (1 \mu\text{V/m})$ ,  $A = 23 \text{ dB}$ ,  $\sigma = 9 \text{ dB}$  und  $P = 80\%$ . Für die gegebene Wahrscheinlichkeit  $P$  liest man aus Figur 5 den Wert  $x = 0,84 \sigma$  und erhält für die angenommene Streuung von 9 dB für  $x$  den Wert 7,6 dB. Bei Verwendung von Dezibel-Einheiten ist die gesuchte Feldstärke  $E = E_0 - (A + x) = (40 - 30,6) \text{ dB} (1 \mu\text{V/m}) = 9,4 \text{ dB} (1 \mu\text{V/m})$ . Der Term  $(A + x)$  kann als Sicherheitszuschlag bezeichnet werden.

## 6. Die Verfügbarkeit von Funkverbindungen

Bei Verwendung einer Nachrichtenverbindung ist auch deren Verfügbarkeit zu beachten. Die Verfügbarkeit innerhalb eines Gebietes soll als die Wahrscheinlichkeit verstanden werden, mit welcher mit einem Punkte dieses Gebietes eine gute Verbindung möglich ist. Pannen sind nach Möglichkeit zu vermeiden, lassen sich jedoch nie ausschliessen, weshalb die Annahme einer zu hohen Zuverlässigkeit zu Fehlplanungen führt. Für eine befriedigende Funkverbindung müssen unter anderem die folgenden Bedingungen erfüllt sein:

- Pegel des Empfangssignales genügend hoch über Empfänger- und Umgebungsrauschen
- Geringe Ausbreitungsverzerrungen
- Keine Interferenzstörungen (brouillage) durch fremde Dienste
- Keine Desensibilisierung des Empfängers durch starke andere Signale
- Keine störenden Intermodulationsprodukte

Aufgrund von Angaben über die Wellenausbreitung kann man bei vorgegebenen Empfängereigenschaften beispielsweise die Erfüllung der ersten und vierten Forderung abschätzen.

Distanz	Art des Empfangsortes	Gelände- beugungs- dämpfung		Zusätzliche mediane Aus- breitungs- dämpfung $\Delta A$	Resultierende Streuung $\sigma_{\text{res}}$	Sicherheitsmarge			Örtliche Verfügbarkeit		
		$A_D$	<sup>1)</sup>			$M = 40 \text{ dB}$	$M = 60 \text{ dB}$	$M = 80 \text{ dB}$	$M = 40 \text{ dB}$	$M = 60 \text{ dB}$	$M = 80 \text{ dB}$
10 km	Strasse in Städten	0 dB		47 dB	9 dB	- 7 dB	+ 13 dB	33 dB	22%	93%	≥ 98%
10 km	Erdgeschoss in Stadtquartier	0 dB		62 dB	9 dB	- 22 dB	- 2 dB	18 dB	≤ 2%	41%	98%
10 km	4. Stockwerk (10 m), Stadtquartier	0 dB		55 dB	9 dB	- 15 dB	5 dB	25 dB	3%	71%	≥ 98%
16 km	Strasse in grosser Siedlung	0 dB		45 dB	9 dB	- 5 dB	15 dB	35 dB	29%	95%	≥ 98%
16 km	Erdgeschoss in grosser Siedlung	0 dB		60 dB	9 dB	- 20 dB	0 dB	20 dB	≤ 2%	50%	≥ 98%
16 km	2. Stockwerk (6 m), grosse Siedlung	0 dB		51 dB	9 dB	- 11 dB	9 dB	29 dB	11%	84%	≥ 98%
32 km	Ländliche Bedingungen, im Freien	0 dB		44 dB	9 dB	- 4 dB	16 dB	36 dB	33%	96%	≥ 98%
		18 dB	s	62 dB	17,5 dB	- 22 dB	- 2 dB	18 dB	10%	45%	85%
		18 dB	c	62 dB	11,4 dB	- 22 dB	- 2 dB	18 dB	≤ 2%	43%	94%
32 km	Ländliche Bedingungen, im Erdgeschoss	0 dB		59 dB	9 dB	- 19 dB	1 dB	21 dB	≤ 2%	54%	≥ 98%
		18 dB	s	77 dB	17,5 dB	- 37 dB	- 27 dB	+ 3 dB	≤ 2%	5%	57%
		18 dB	c	77 dB	11,4 dB	- 37 dB	- 27 dB	+ 3 dB	≤ 2%	≤ 2%	60%
100 km	Ländliche Bedingungen, im Freien	6 dB	c	46 dB	11,4 dB	- 6 dB	14 dB	34 dB	37%	79%	97%

<sup>1)</sup> s Statistische Betrachtungsweise; c Beugungsdämpfung berechnet

## 7. Geräteeigenschaften und Verfügbarkeit

Wenn nur ein Kanal zu übertragen und keine Rücksicht auf gegenseitige Störungen zu nehmen ist, so lässt sich die Verfügbarkeit leicht durch Erhöhung der Sendeleistung verbessern, denn bezüglich der Feldstärke  $E$  ist bloss die Bedingung  $E \geq E_{\min}$  zu erfüllen. Zur Vermeidung der Störung anderer Kanäle, z. B. durch Desensibilisierung oder zu starke Intermodulationsprodukte, muss auch die Bedingung  $E \leq E_{\max}$  berücksichtigt sein. Die Marge  $M = 20 \log(E_{\max}/E_{\min})$  ergibt sich zum Teil aus den Geräteeigenschaften und wird hier Gerätemarge genannt.

Die geplante Verfügbarkeit hängt damit teilweise von der voraussetzbaren Gerätemarge ab sowie davon, ob ein Empfang nur mit Dachantennen oder auch mit Antennen auf niedriger Höhe oder in Gebäuden zu berücksichtigen ist. Zur Vereinfachung wird vorausgesetzt, dass die Feldstärke  $E_{\max}$  bei Freiraumausbreitung in der Entfernung  $D_{\min} = 1 \text{ km}$  nicht überschritten wird. Überdies sind bei Verwendung von Dachantennen Reflexionen aus der näheren Umgebung vernachlässigbar. Die zusätzliche Dämpfung im Gebäudeinnern wird als 16 dB angenommen [11].

Zahlenbeispiele vermögen die verschiedenen Bedingungen wohl besser als Formeln zu illustrieren. So sind in Tabelle III die für einige Fälle berechneten Verfügbarkeiten aufgeführt. Die Dämpfung  $\Delta A$  bezieht sich auf die Freiraumausbreitung bei  $D = D_{\min}$  und gibt die zusätzliche mediane Ausbreitungsdämpfung an. Im Innern von Gebäuden soll die Streuung ebenfalls 9 dB betragen. Der mittlere quadratische Fehler der Berechnung der Geländebeugungsdämpfung  $A_D$  wird als 7 dB angenommen [6], während bei statistischer Betrachtung eine Streuung von 15 dB zu berücksichtigen ist. Die resultierende Streuung  $\sigma_{\text{res}}$  ist die quadratische Summe der einzelnen Streuungen und Fehler.

Tabelle III zeigt, in welchem Masse die Verfügbarkeit von der voraussetzbaren Gerätemarge abhängt. Die Art der näheren Umgebung ist in vielen Fällen von grösserer Bedeutung als die Wirkung des Geländes. Die Verwendung von Dachantennen ergibt wesentlich günstigere Bedingungen. Der Einfluss der Distanz (d.h. der Freiraumausbreitung) erweist sich nicht als entscheidend.

## 8. Gegenseitige Störungen

Störungen von Funkverbindung durch fremde Sender hängen auch von

der Art der Modulationen ab; sie sind durch die Frequenzkoordination nach Möglichkeit zu vermeiden. Für UKW-Hörfunk wird beispielsweise verlangt, dass bei Gleichkanalbetrieb das störende Signal um  $CCPR = 35$  bis  $45 \text{ dB}$  (Co-Channel Protection Ratio) geringer als der Träger des Nutzsignales ist [12]. Zur Bestimmung dieses Verhältnisses sind die Freiraumdämpfungen (Distanzen) und die Geländebeugungsdämpfungen zu betrachten. Der Medianwert der Dämpfung durch die Umgebung ist für Nutz- und Störsignal derselbe. Bei statistischer (Fig. 2) Betrachtungsweise ist hinsichtlich der Verwendung von Dachantennen die gesamte resultierende Streuung  $\sigma_{\text{res}} = 21 \text{ dB}$ , bei deterministischer Betrachtungsweise [5; 6] jedoch  $\sigma_{\text{res}} = 10 \text{ dB}$ . Müssen hingegen die Reflexionen der näheren Umgebung beachtet werden, so ist entsprechend  $\sigma_{\text{res}} = 25 \text{ dB}$  bzw.  $16 \text{ dB}$  zu wählen. Sollen nun gegenseitige Störungen mit einer Sicherheit (d.h. Wahrscheinlichkeit) von 90 oder 98% vermieden werden, so ist gemäss Figur 5 ein Sicherheitszuschlag von 1,3  $\sigma_{\text{res}}$  oder 2,1  $\sigma_{\text{res}}$  notwendig.

Entsprechend diesen Zahlen ist bei voller statistischer Betrachtungsweise der erforderliche Sicherheitszuschlag für dieselbe Planungssicherheit um 12 bis 18 dB höher als bei Abschätzung der Geländebeugungsdämpfung auf-



grund topographischer Daten. Die Notwendigkeit der deterministischen Bestimmung von Beugungsdämpfungen scheint damit erwiesen.

## 9. Schlussbemerkungen

Die Zahlenbeispiele zeigen, dass die ortsabhängige Verfügbarkeit im VHF/UHF-Bereich aus physikalisch-technischen Gründen begrenzt ist. Beschränkungen sind solange harmlos, als der Benutzer sich derer bewusst ist.

Die Bedingungen bei einem Betrieb mit Dachantennen, bei Benützung portabler Geräte im Freien und innerhalb von Gebäuden variieren offensichtlich stark. Die Planung wird wesentlich durch die bekannten Geräteeigenschaften beeinflusst. Betrachtungsweisen statistischer Art sind für *allgemeine* Untersuchungen geeignet. Für *konkrete* Planungen wird sich in Zukunft die Benützung topographischer Datenbanken als wünschbar erweisen.

Während der vergangenen Jahrzehnte haben nicht die Schulphysik, sondern die Wünsche der Benutzer bestimmt, welche Sachfragen zu untersuchen sind. Vorläufig stehen dabei noch der Rundfunkempfang mit portablen Geräten und der Sprech-Mobilfunk im Vordergrund. Im Zuge der Digitalisierung kommt aber den Ausbreitungsverzerrungen breitbandiger Signale grössere Bedeutung zu (Echos). So werden auch in Zukunft stets neue, ergänzende Unterlagen erforderlich sein. Die naturgegebenen Beschränkungen verhindern Maximallösungen, weshalb die Suche nach optimalen Lösungen eine ständige Herausforderung darstellt.

## Literatur

- [1] H.R. Reed and C.M. Russel: Ultra high frequency propagation. Second edition. London, Chapman & Hall, 1966.

- [2] P. Beckmann and A. Spizzichino: The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces. Oxford a.o., Pergamon Press, 1963.  
 [3] J. Deygout: Multiple knife-edge diffraction of microwaves. IEEE Trans. AP 14(1966)4, p. 480...489.  
 [4] L.E. Vogler: An attenuation function for multiple knife-edge diffraction. Radio Science 17(1982)6, p. 1541...1546.  
 [5] J.H. Causebrook and B. Davis: Tropospheric radio wave propagation over irregular terrain: The computation of field strength for UHF broadcasting. BBC Research Department Report No. 1971/43.  
 [6] K. Löw und R.W. Lorenz: Berechnung der Versorgung von Funkzonen für den Mobilfunk mit Hilfe einer topographischen Datenbank. Frequenz 36(1982)4/5, S. 116...121.  
 [7] E. Wey: Wellenausbreitung und Störbeeinflussung beim Mobilfunk. Bull. SEV/VSE 69(1978)16, S. 884...889.  
 [8] Unterlagen für die UKW-Frequenzplanung. Bericht Nr. VD25.005P vom 7.1.1983 der Abteilung F+E. Bern, Generaldirektion der PTT, 1983.  
 [9] B.R. Bean and E.J. Dutton: Radio meteorology. NBS monograph 92. Washington, National Bureau of Standards, 1966.  
 [10] Einfluss der Überbauung auf die Empfangspegel bei UKW. Bericht Nr. VD11.1028U der Abteilung F+E. Bern, Generaldirektion der PTT.  
 [11] Direktempfang von Fernsehsignalen im Innern von Gebäuden. Bericht Nr. VD13.1010A vom 3.4.1981 der Abteilung F+E. Bern, Generaldirektion der PTT, 1981.  
 [12] Recommendations and reports of the CCIR, 1982 (also questions, study programmes, resolutions, opinions and decisions). XVth plenary assembly, Geneva, 1982. Volume V: Propagation in non-ionized media. Volume X-part I: Broadcasting service (sound). Geneva, International Telecommunication Union, International Radio Consultative Committee, 1982.