

**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:** 56 (1978)

**Heft:** 5

**Artikel:** Dämpfungen auf Richtfunkverbindungen unter besonderer Berücksichtigung der Mehrwegausbreitung = Affaiblissements sur les liaisons hertziennes compte tenu surtout de la propagation par trajets multiples

**Autor:** Liniger, Markus

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-875203>

### **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:** 30.04.2026

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

# Dämpfungen auf Richtfunkverbindungen unter besonderer Berücksichtigung der Mehrwegausbreitung

## Affaiblissements sur les liaisons hertziennes compte tenu surtout de la propagation par trajets multiples

Markus LINIGER, Bern

621.371.344.029.631/64.621.391.812.3.029.631/64.621.396.43.091.1

*Zusammenfassung. Der Autor untersucht die Ausbreitungsverhältnisse der heute in den Richtfunkssystemen verwendeten hohen Frequenzen. Nach einer kurzen Einleitung werden der Einfluss der Niederschläge, die Schwundereignisse, ihre mittlere Dauer und ihre statistische zeitliche Verteilung bei der Mehrwegausbreitung erläutert. Der zweite Teil des Beitrages ist den verschiedenen Möglichkeiten des Mehrfachempfangs, ebenfalls unter Berücksichtigung der statistisch erfassten Schwundverhältnisse, gewidmet.*

*Résumé. L'auteur examine les conditions de propagation des fréquences élevées utilisées de nos jours dans les systèmes de transmission par faisceaux dirigés. Après une brève introduction, il étudie l'influence des précipitations, les phénomènes d'affaiblissement et leur répartition statistique dans le temps, dans le cas d'une propagation par trajets multiples. La seconde partie de l'article est consacrée aux différentes possibilités de la réception en diversité, toujours compte tenu des conditions d'affaiblissement relevées statistiquement.*

### Affievolimenti sulle comunicazioni ponti radio tenuto conto soprattutto della propagazione per vie multiple

*Riassunto. L'autore esamina le condizioni di propagazione delle alte frequenze utilizzate ai giorni nostri nei sistemi di ponti radio. Dopo una breve introduzione, egli studia l'influsso delle precipitazioni, i fenomeni di affievolimento, la durata media, e la loro ripartizione statistica nel tempo in caso di una propagazione per vie multiple. La seconda parte dell'articolo è consacrata alle differenti possibilità di ricezione multipla, sempre tenendo conto delle condizioni di affievolimento rilevate statisticamente.*

### 1 Einleitung

Richtfunkssysteme arbeiten heute fast ausschliesslich mit Frequenzen von 1,7...15 GHz und, von wenigen Ausnahmen abgesehen, mit Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger. Unter diesen Voraussetzungen gehorcht die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen einfachen Gesetzen, die allerdings wegen der atmosphärischen Einflüsse gewisse Korrekturen erfordern. Bei ungestörter Ausbreitung im freien Raum berechnet sich die mittlere Empfangsleistung  $\bar{P}_{RX}$  nach

$$\bar{P}_{RX} = P_{TX} + G_A - D_Z - 20 \lg f - 20 \lg d - 92,5 \text{ dBW} \quad (1)$$

mit

- $P_{TX}$  Senderleistung in dBW
- $G_A$  Summe der Antennengewinne in dB
- $D_Z$  Dämpfung der Antennenzuleitungen in dB
- $f$  Frequenz in GHz
- $d$  Distanz in km

Die praktisch gemessene Empfangsleistung schwankt mehr oder weniger schnell um diesen mittleren Wert. Sie kann je nach Frequenz kurzzeitig bis zu 20 dB ansteigen oder während einiger Sekunden bei Mehrwegausbreitung beziehungsweise während mehrerer Minuten bei starken Gewittern um mehr als 60 dB absinken.

Für die Planung und Projektierung von Richtfunkverbindungen benötigt man Angaben über Dauer und Häufigkeit solcher Schwunderscheinungen in Abhängigkeit von der Länge und der Elevation der Strecke, von der Frequenz, der Jahreszeit usw.

Das Ausbreitungsverhalten wird am zweckmässigsten mit der Wahrscheinlichkeitsrechnung und der Statistik beschrieben, weil die meisten Einflussgrössen und ihre Wirkungen zufälligen Charakter haben. Zudem empfiehlt es sich, die verschiedenen Effekte, wie Dämpfung infolge Mehrwegausbreitung und Absorption durch

### 1 Introduction

Aujourd'hui, les systèmes à faisceaux hertziens opèrent presque tous sur les fréquences situées entre 1,7 et 15 GHz et, à peu d'exceptions près, en visibilité directe. Dans ces conditions, la propagation des ondes électromagnétiques est dictée par des lois simples, à l'application desquelles il convient cependant d'apporter certaines corrections, en raison des influences atmosphériques. Lorsque les ondes dirigées peuvent se propager sans entrave dans l'espace, la puissance moyenne de réception  $\bar{P}_{RX}$  s'exprime par

$$\bar{P}_{RX} = P_{TX} + G_A - D_Z - 20 \lg f - 20 \lg d - 92,5 \text{ dBW} \quad (1)$$

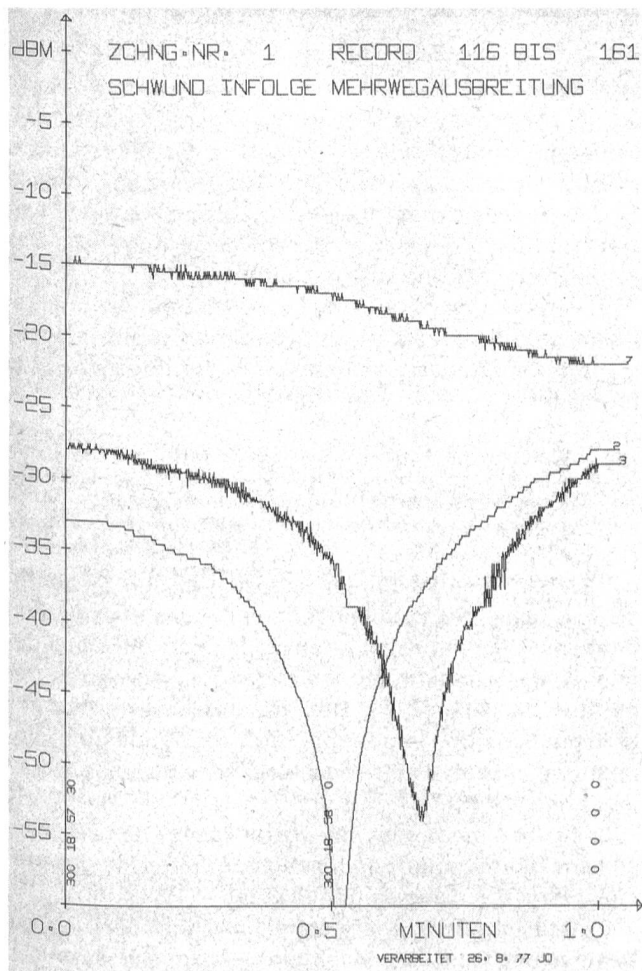
où

- $P_{TX}$  Puissance de l'émetteur en dBW
- $G_A$  Somme des gains d'antenne en dB
- $D_Z$  Atténuation des guides d'ondes d'antennes en dB
- $f$  Fréquence en GHz
- $d$  Distance en km

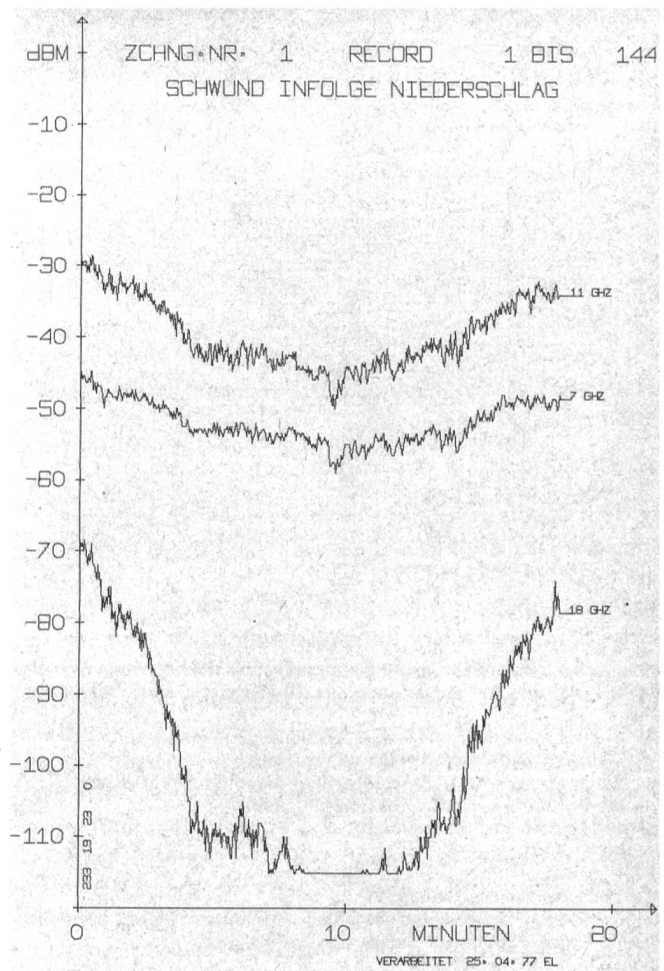
La puissance de réception mesurée oscille plus ou moins rapidement autour de cette valeur moyenne. Suivant la fréquence, elle peut monter brusquement jusqu'à 20 dB ou fléchir de plus de 60 dB pendant quelques secondes, en cas de propagation par trajets multiples, ou même pendant plusieurs minutes, au cours d'un violent orage.

Lorsqu'on planifie ou établit des projets de liaisons par faisceaux hertziens, il est nécessaire de connaître la durée et la fréquence de tels évanouissements en fonction de la longueur et de l'élévation du trajet, de la fréquence utilisée, de la saison, etc.

La manière la plus rationnelle de décrire les phénomènes de propagation consiste à recourir au calcul des probabilités et à la statistique, vu que la plupart des



**Fig. 1**  
**Schwund infolge Niederschlag — Affaiblissement dû aux précipitations**  
 Zchnng. Nr. 1 — Feuille de courbes N° 1  
 Record — Relevé  
 1 bis 144 — 1 à 144  
 Minuten — Minutes  
 Verarbeitet — Traité



**Fig. 2**  
**Schwund infolge Mehrwegausbreitung — Affaiblissement imputable aux trajets multiples**  
 Zchnng. Nr. 1 — Feuille de courbes N° 1  
 Record — Relevé  
 116 bis 161 — 116 à 161  
 Minuten — Minutes  
 Verarbeitet — Traité

Niederschlag, zu trennen. Dies ist leicht möglich, weil der zeitliche Verlauf dieser zwei Schwundtypen wesentlich verschieden ist. *Figur 1* zeigt die Wirkung eines heftigen Gewitters auf die Richtfunkverbindungen Bern—Rocheft (51,5 km), mit den Frequenzen 7, 11 und 18 GHz. Viel kürzere, aber häufigere Pegelbrüche zeigt die Registrierung auf derselben Strecke während Mehrwegausbreitung (*Fig. 2*) [1, 2].

Auch wenn die gemessenen Daten einmal zu einer Statistik (*Fig. 3*) verarbeitet sind, können die Dämpfungseffekte aufgrund zusätzlicher Informationen, wie Charakter der Summenhäufigkeit, noch getrennt werden. Die erwähnte Statistik — sie umfasst die Messwerte einer 11-GHz-Verbindung über ein Beobachtungsintervall von einem Jahr — lässt erkennen, dass während 97,78 % der Zeit das Signal nur wenig ändert. Mehrwegausbreitung tritt während 2,2 % und Niederschlagsschwund während 0,02 % der Zeit auf.

## 2 Absorption durch Niederschlag

Bereits bei Frequenzen von 3 GHz lassen sich geringe Abschwächungen des Empfangssignals als Folge von Absorptionserscheinungen durch Niederschlag beob-

grandeurs exerçant une influence et leurs effets sont de nature aléatoire. Il est, d'autre part, recommandable de tenir compte séparément des divers effets, tels que l'affaiblissement imputable aux trajets multiples et l'absorption provoquée par les précipitations, ce qui est facile, vu que l'allure dans le temps de ces deux genres d'évanouissement est très différente. La *figure 1* montre l'influence qu'exerce un violent orage sur la liaison hertzienne Berne—Rocheft (51,5 km), aux fréquences de 7, 11 et 18 GHz. Dans le cas de la propagation par trajets multiples sur le même tronçon, on observe des fléchissements de niveau plus brefs mais beaucoup plus fréquents (*fig. 2*) [1, 2].

Même si les données de mesure sont finalement traitées par une méthode statistique (*fig. 3*), les effets d'affaiblissement peuvent encore être séparés au vu d'informations supplémentaires, telles que le caractère de la fréquence cumulée. La statistique évoquée — elle comprend les valeurs de mesure d'une liaison à 11 GHz observée pendant une année — fait apparaître que le signal ne se modifie que très peu pendant 97,78 % de la durée d'observation. La propagation par trajets multiples se produit pendant 2,2 % de la durée et l'affaiblissement dû aux précipitations pendant 0,02 % de celle-ci.

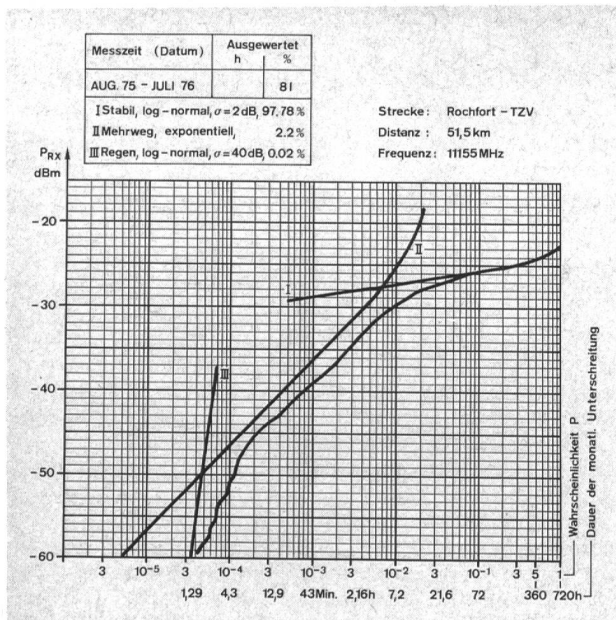


Fig. 3  
Messwerte auf der Strecke Rochfort - Technisches Zentrum Bern -  
Valeurs de mesure sur le parcours Rochfort - Centre technique  
Berne

I Stabil, log-normal - Stable, répartition logarithmique normale  
II Mehrweg, exponentiell - Par trajets multiples, exponentiel  
III Regen, log-normal - Pluie, répartition logarithmique normale  
Messzeit (Datum) - Période des mesures (date)  
Ausgewertet - Prise en considération  
August - Août  
Juli - Juillet  
Wahrscheinlichkeit - Probabilité  
Dauer der monatlichen Unterschreitung - Nombre d'heures par mois,  
durant lesquelles le niveau moyen n'est pas atteint  
Monat - Mois

achten. Wesentliche Schwunderscheinungen treten in Mitteleuropa erst oberhalb 7 GHz auf; bei Frequenzen grösser als 10 GHz ist die Zuverlässigkeit einer Funkverbindung stark vom Ausmass und der Häufigkeit von Niederschlagsdämpfungen bestimmt.

Bezeichnen wir mit  $\gamma$  die Niederschlagsdämpfung in dB/km (Fig. 4), so lässt sich deren Frequenzabhängigkeit näherungsweise durch die Formel

$$\gamma \approx \gamma_0 \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^\kappa \quad (2)$$

angeben. Dabei darf der Exponent  $\kappa \approx 1,6$  gesetzt werden. Der Koeffizient  $\gamma_0$  wie auch  $\kappa$  hängen von der Niederschlagsintensität R (in mm/h) und - was schwieriger zu bestimmen ist - von der statistischen Verteilung der Tropfendurchmesser ab [3, 4]. So ergeben sich einerseits bei starken Gewitterregen, andererseits bei Niederschlag von Nassschnee (bright band) sehr ausgeprägte Niederschlagsdämpfungen.

In Fig. 4 sind mittlere Werte der kilometrischen Dämpfung  $\gamma$  in Funktion der Regenintensität R für verschiedene Frequenzen angegeben.

Die Dämpfung A, die ein Richtfunksignal beim Durchqueren einer Niederschlagszone - auch Regenzelle ge-

## 2 Affaiblissemments dus aux précipitations

Djà aux fréquences de 3 GHz, on peut observer des affaiblissemments minimes du signal de réception, en raison de phénomènes d'absorption provoqués par les précipitations. Des affaiblissemments sensibles se produisent en Europe centrale au-delà de 7 GHz seulement; lorsque les fréquences dépassent 10 GHz, la fiabilité d'une liaison hertzienne dépend fortement de la fréquence des affaiblissemments dus aux précipitations.

Si l'on désigne par  $\gamma$  l'affaiblissement dû aux précipitations en dB/km (fig. 4), on peut définir approximativement la variation de  $\gamma$  en fonction de la fréquence par la formule

$$\gamma \approx \gamma_0 \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^\kappa \quad (2)$$

où l'on peut prendre comme exposant  $\kappa \approx 1,6$ . Le coefficient  $\gamma_0$ , ainsi que  $\kappa$ , dépendent de l'intensité des précipitations R (en mm/h) et - ce qui est plus difficile à définir - de la répartition statistique des diamètres des gouttes de pluie [3, 4]. Des affaiblissemments dus aux précipitations très importants résultent, d'une part, d'orages violents et, d'autre part, de chutes de neige mouillée (bright band).

La figure 4 montre les valeurs moyennes de l'affaiblissement kilométrique  $\gamma$  en fonction de l'intensité des précipitations R à diverses fréquences.

L'affaiblissement A affectant un signal hertzien qui traverse une zone de précipitations - appelée aussi cellule de pluie - peut être défini par la relation

$$A = \int_{s_1}^{s_2} \gamma(s) \cdot ds \quad (3)$$

Cette formule montre l'influence décisive qu'exerce la grandeur de la cellule de pluie ou sa structure générale

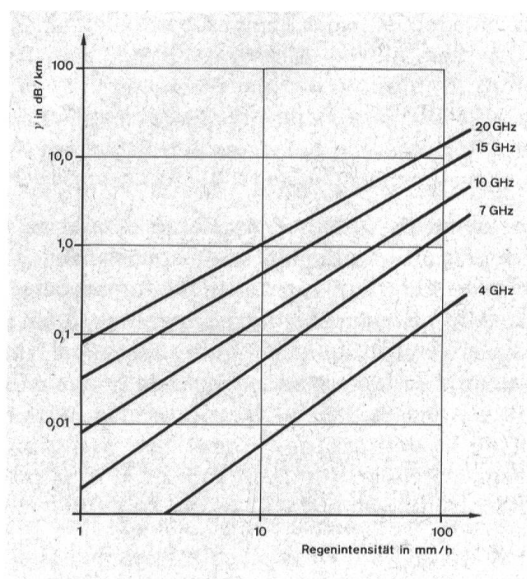


Fig. 4  
Dämpfungsfaktor  $\gamma$  als Funktion der Regenintensität und der Frequenz -  
Facteur d'affaiblissement  $\gamma$  en tant que fonction de l'intensité de la pluie et de la fréquence  
Regenintensität in mm/h - Intensité de la pluie en mm/h

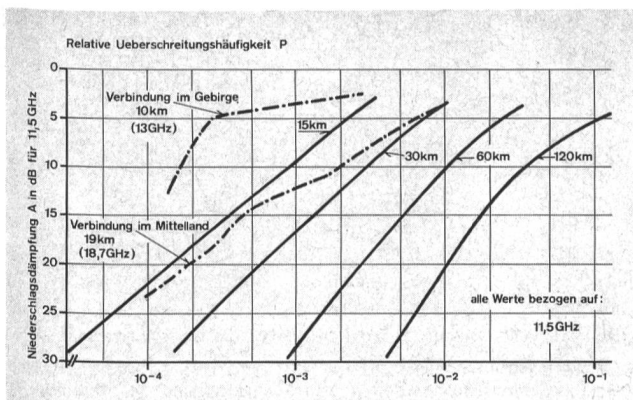


Fig. 5 Vergleich von Dämpfungsstatistiken und Prognosen für das schweizerische Mittelland, ohne Berücksichtigung orografischer Effekte — Comparaison de statistiques d'affaiblissement et de pronostics pour le Plateau suisse, compte non tenu des effets orographiques

— Prognose mittlerer Fälle Mittelland — Pronostics s'appliquant au Plateau suisse lors de chutes de pluie moyennes  
 - - - Umrechnung nach  $A \sim F^{1,6}$  — Conversion selon  $A \sim F^{1,6}$   
 Relative Überschreitungshäufigkeit — Fréquence relative des dépassements de niveau  
 Niederschlagsdämpfung A in dB für 11,5 GHz — Affaiblissement dû aux précipitations A en dB pour 11,5 GHz  
 Verbindung im Gebirge — Liaison en montagne  
 Verbindung im Mittelland — Liaison sur le Plateau suisse

Alle Werte bezogen auf 11,5 GHz — Toutes les valeurs rapportées à 11,5

nannt — erfährt, kann aufgrund folgender Beziehung bestimmt werden:

$$A = \int_{S_1}^{S_2} \gamma(s) \cdot ds \quad (3)$$

Diese Formel zeigt, welchen wesentlichen Einfluss die Grösse der «Regenzellen» — oder allgemeiner deren Struktur — auf die Dämpfung hat. Die Grösse einer «Regenzelle» kann gleich dem Gebiet gesetzt werden, in dem die Regenintensität R eine bestimmte Schwelle  $R_0$  überschreitet und führt zu einem mittleren Durchmesser  $D(R_0)$ . Dieser Wert ist nach [5] exponentiell verteilt.

Aufbauend auf der «Regenzelle», wurden theoretische Modelle entwickelt [5, 10], die es unter anderem erlauben, die Abhängigkeit der Dämpfung von der Streckenlänge herzuleiten. Quantitative Angaben, berechnet aufgrund eines Regenmodells, sind in Figur 5 den experimentell bestimmten Dämpfungen gegenübergestellt. Bei diesen handelt es sich um Werte, die auf einer Strecke im Gebirge beziehungsweise im Mittelland festgestellt wurden.

Die Häufigkeit des Auftretens von Niederschlagsdämpfungen entspricht der Häufigkeit, dass sich auf der Richtfunkverbindung eine «Regenzelle» befindet. Sie ist damit in erster Näherung proportional zur Streckenlänge. Es muss aber beachtet werden, dass wegen geländebedingter Staulagen die Niederschlagsdämpfungen bis zu zweimal häufiger auftreten können. Man spricht dann von orographischen Effekten [5, 6]. Das Ausmass der Niederschlagsdämpfung hängt, ausser von der Regenintensität und der Ausdehnung der «Regenzelle», auch von der topographischen Region ab [7, 8]. In hügeligem und gebirgigem Gelände sind die Regenzellen im allgemeinen kleiner ( $D(R=20 \text{ mm/h}) \approx 2 \text{ km}$ ) als im Flachland ( $D(R=20 \text{ mm/h}) \approx 3 \text{ km}$ ) [9, 10, 11].

sur l'affaiblissement. La grandeur d'une cellule de pluie peut être assimilée à la zone dans laquelle l'intensité de la pluie R dépasse un certain seuil  $R_0$ , ce qui conduit à un diamètre moyen de  $D(R_0)$ . Cette valeur est sujette à une répartition exponentielle selon [5].

En se fondant sur la notion de la «cellule de pluie», on a développé des modèles théoriques [5, 10], qui permettent notamment de déduire la relation qui existe entre l'affaiblissement et la longueur du trajet. La figure 5 montre une comparaison entre les affaiblissements déterminés par voie expérimentale et les indications quantitatives calculées d'après un modèle de pluie. La courbe supérieure se rapporte aux observations faites en montagne et la courbe inférieure à celles qui ont été effectuées sur le Plateau.

La fréquence des affaiblissements dus aux précipitations correspond à la fréquence de la présence d'une cellule de pluie sur un trajet à faisceaux hertziens. En première approximation, elle est proportionnelle à la longueur du trajet. Il faut toutefois tenir compte du fait qu'en raison des concentrations engendrées par le profil du terrain, les affaiblissements dus aux précipitations peuvent être deux fois plus fréquents. On parle alors d'effets orographiques [5, 6]. En plus de l'intensité de la pluie et de la dimension de la cellule de pluie, l'ampleur de l'affaiblissement dû aux précipitations dépend aussi de la région topographique considérée [7, 8]. Dans les terrains vallonnés et montagneux, les cellules de pluie sont en général plus petites ( $D(R=20 \text{ mm/h}) \approx 2 \text{ km}$ ) que sur le Plateau ( $D(R=20 \text{ mm/h}) \approx 3 \text{ km}$ ) [9, 10, 11].

Une autre variation importante dans le temps résulte du fait que les précipitations peuvent être très différentes d'une année à l'autre. Ainsi, la durée de défaillance d'une liaison a varié, par exemple, d'un facteur 7, à une fréquence de 18 GHz, pour une distance de 19 km et un seuil S de 40 dB [12].

### 3 Evanouissements imputables aux trajets multiples

#### 31 Généralités

L'évanouissement imputable aux trajets multiples se produit sous des conditions météorologiques bien définies (formation de couches par atmosphère relativement calme — mer de brouillard). Dans de tels cas, le rayonnement partant de l'émetteur peut parvenir au récepteur par plusieurs trajets radioélectriques de longueur différente. La superposition des signaux au lieu de réception engendre, suivant le déphasage provoqué, un accroissement du signal somme pouvant atteindre 20 dB ou une atténuation de l'ordre de 70 dB par rapport au niveau de réception moyen. Les emplacements de ces minimums, qui varient dans le temps et dans l'espace, dépendent en outre de la fréquence.

Bien connaître les mécanismes régissant la propagation par trajets multiples [13, 14, 15] permet de réduire l'influence qu'exercent les évanouissements sur la fiabilité des transmissions, par l'établissement d'installations de réception en diversité.

#### 32 Description des évanouissements se produisant sur une liaison simple

Les niveaux de réception en fonction du temps représentés à la figure 2 peuvent être exprimés mathématiquement

Eine weitere zeitliche Variation rührt davon her, dass die Niederschläge von Jahr zu Jahr stark verschieden sein können. So ändert sich beispielsweise bei einer Frequenz von 18 GHz, einer Distanz von 19 km und einer Schwelle S von 40 dB die Ausfallzeit um einen Faktor 7 [12].

### 3 Schwund infolge Mehrwegausbreitung

#### 31 Allgemeines

Mehrwegschwund tritt unter ganz bestimmten meteorologischen Bedingungen auf (Schichtenbildung bei verhältnismässig ruhiger Atmosphäre — Nebelmeere). Dann kann ein vom Sender ausgehender Strahl auf mehreren Wegen zum Empfänger gelangen. Die elektrischen Weglängen dieser Pfade sind ungleich. Bei Überlagerung der Signale am Empfangsort ergibt sich je nach Phasenlage eine Erhöhung des Summensignals bis zu 20 dB oder eine starke Abschwächung um 70 dB, bezogen auf den mittleren Empfangspegel. Die Orte dieser Minima sind zeitlich und räumlich variabel und hängen zudem von der Frequenz ab.

Die Kenntnis der Mechanismen der Mehrwegausbreitung [13, 14, 15] erlaubt es, durch geeignete Mehrfachempfangseinrichtungen den Schwundeinfluss auf die Übertragungssicherheit zu vermindern.

#### 32 Beschreibung der Schwundereignisse auf einer einfachen Verbindung

Die in Figur 2 dargestellten Zeitfunktionen von Empfangspegeln können mathematisch auf ganz verschiedene Weisen umschrieben werden, zum Beispiel durch die spektrale Darstellung, die mit ihr verknüpfte Autokorrelationsfunktion oder durch eine Statistik über die Zeitintervalle, während denen der Empfangspegel eine bestimmte Schwelle S unterschreitet. Diese hier gewählte Methode benötigt die in *Figur 6* erläuterten Begriffe.

#### 321 Summenhäufigkeit des Empfangspegels während Mehrwegausbreitung

*Figur 7* zeigt die empirisch ermittelte Unterschreitungswahrscheinlichkeit  $P(A < S)$  für die Frequenzen 7, 11 und 18 GHz. Zum Vergleich mit der nach der Theorie zu erwartenden Exponential-Verteilung ist deren Summenhäufigkeit eingetragen

$$P(A < S) = 1 - \exp\{-10^{S/10}\} \quad (4)$$

Der Empfangspegel ist also unabhängig von der Frequenz (7...18 GHz) exponentiell verteilt, wobei der gemessene mittlere Empfangspegel während der Schwundperiode etwa 2,5 dB unter dem Langzeitmittelwert  $\bar{P}_{RX}$  liegt.

Es ist nun zweckmässig, die Überlegungen und Ergebnisse der folgenden Kapitel auf Beobachtungsintervalle zu beziehen, die nur Mehrwegausbreitungseffekte, das heisst exponentiell verteilte Pegel aufweisen. Dann können die Ergebnisse dieser Untersuchung auch auf andere Strecken extrapoliert werden. Als Bindeglied benötigt man aber eine Beziehung, die die Abhängigkeit des Auftretens von Mehrwegausbreitung von der Distanz d,

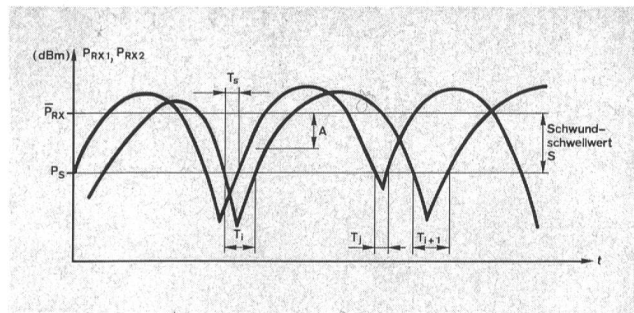


Fig. 6

#### Begriffe — Notions

- $P_{RX1}, P_{RX2}$  Empfangsleistung in dBm — Puissance de réception en dBm  
 $\bar{P}_{RX1}, \bar{P}_{RX2}$  Mittlere Empfangsleistung in dBm (im Beispiel ist  $\bar{P}_{RX1} = \bar{P}_{RX2} = \bar{P}_{RX}$ ) — Puissance moyenne de réception en dBm (dans l'exemple  $\bar{P}_{RX1} = \bar{P}_{RX2} = \bar{P}_{RX}$ )  
 $A, A_1, A_2$  Dämpfung des Empfangssignals — Affaiblissement du signal de réception  $A = R_{RX} - \bar{R}_{RX}, A_i = P_{RXi} - \bar{P}_{RXi}$   
 $S$  Schwundschwelle in dB — Valeur de seuil des évanouissements en dB  $S = P_S - \bar{P}_{RX}$   
 $T_i, T_j$  Dauer einer Pegelunterschreitung  $A < S$  in Sekunden — Durée en secondes pendant laquelle le niveau de réception moyen n'est pas atteint  $A < S$   
 $T_s$  Simultane Pegelunterschreitung  $A_1 < S$  und  $A_2 < S$  in Sekunden — Durée en secondes pendant laquelle les deux signaux tombent simultanément au-dessous du niveau moyen  $A_1 < S$  et  $A_2 < S$   
 $N$  Anzahl Pegelunterschreitungen während des Beobachtungsintervalls  $T_B$  — Nombre des fléchissements de niveau au-dessous du niveau moyen pendant l'intervalle d'observation  $T_B$   
 $\bar{T}$  Mittlere Dauer der Pegelunterschreitungen — Durée moyenne en secondes des instants où le niveau de réception moyen n'a pas été atteint  
 $\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i$  in/en s  
 $i = 1$   
 $T_u, T_{us}$  Totale Unterschreitungsdauer (s=simultan) — Durée totale du fléchissement au-dessous du niveau de réception moyen (s=simultané)  
 $T_u = \sum_{i=1}^N T_i$   
 $P(A < S)$  Unterschreitungswahrscheinlichkeit — Probabilité de fléchissement au-dessous du niveau de réception  
 $P(A < S) = T_u / T_B$   
 Schwundschwelle — Valeur de seuil des évanouissements

quement de manières très diverses, par exemple par une représentation spectrale, par la fonction d'autocorrelation qui lui est liée ou par une statistique des intervalles de temps pendant lesquels le niveau de réception n'atteint pas un seuil déterminé S. La méthode qui a été choisie ici repose sur des notions expliquées à la *figure 6*.

#### 321 Fréquence cumulée du niveau de réception pendant la propagation par trajets multiples

La *figure 7* montre la probabilité établie empiriquement où  $P(A < S)$  n'atteint pas la valeur de seuil pour les fréquences 7, 11 et 18 GHz. En comparaison avec la distribution exponentielle à prévoir selon la théorie, la fréquence cumulée se traduit par

$$P(A < S) = 1 - \exp\{-10^{S/10}\} \quad (4)$$

Le niveau de réception est donc réparti selon une loi exponentielle, indépendamment de la fréquence (7...18 GHz), étant entendu que le niveau de réception moyen mesuré pendant la période d'évanouissement se situe à environ 2,5 dB au-dessus de la valeur moyenne «longue durée»  $\bar{P}_{RX}$ .

der Elevation E und dem Klima beschreibt. Vergleiche mit weiteren, in der Schweiz durchgeführten Messungen [16, 17] legen die folgende Näherung nahe

$$P(A < S; d, E) \cong \cong P(A < S; d = d_0, E = E_0) \cdot \left(\frac{d}{d_0}\right)^\alpha \cdot 10^{\beta(E - E_0)} \quad (5)$$

Als erste Approximation, die durch gegenwärtig laufende Untersuchungen [18] verbessert werden soll, können folgende Werte angegeben werden:

$$\alpha \approx 5,4, \beta \approx -0,95 \text{ mit } d_0 = 50 \text{ km, } E_0 = 0,0043$$

Auf vergleichbare Ergebnisse kam *W. T. Barnett*. Er gibt in [19] den folgenden Zusammenhang an, der, anstelle des Einflusses der Elevation, eine von uns nicht

Il est donc rationnel de rapporter les considérations et les résultats qui suivent à des intervalles d'observation qui ne présentent que des effets de propagation par trajets multiples, c'est-à-dire des niveaux distribués exponentiellement. Les résultats de cette analyse pourront ensuite être extrapolés, c'est-à-dire rapportés à d'autres trajets. En tant que lien, il sera cependant nécessaire de posséder une relation qui décrive la dépendance de l'apparition de la propagation par trajets multiples de la distance d, de l'élévation E et du climat. Des comparaisons avec d'autres mesures réalisées en Suisse [16, 17] ont permis de considérer comme valable l'expression approchée

$$P(A < S; d, E) \cong \cong P(A < S; d = d_0, E = E_0) \cdot \left(\frac{d}{d_0}\right)^\alpha \cdot 10^{\beta(E - E_0)} \quad (5)$$

En première approximation, on peut indiquer les valeurs suivantes, susceptibles d'être améliorées par des essais en cours [18]

$$\alpha \approx 5,4, \beta \approx -0,95 \text{ avec } d_0 = 50 \text{ km, } E_0 = 0,0043$$

*W. T. Barnett* est parvenu à des résultats comparables. Dans [19], il indique la relation suivante, qui contient une dépendance de la fréquence que nous n'avons pu constater, au lieu de l'influence imputable à l'élévation. Des résultats semblables ont également été publiés [16]

$$P(A < S) \cong c \cdot f \cdot d^3 \cdot 10^{-5} \cdot (1 - \exp\{-10^{S/10}\}) \quad (6)$$

où

- d Distance en km
- f Fréquence en GHz
  - $\frac{1}{4}$  pour les trajets franchissant des lacs ou des cours d'eau
- c
  - $\frac{1}{16}$  pour les trajets normaux
  - $\frac{1}{64}$  pour un climat montagneux et sec

### 322 Nombre d'évanouissements N

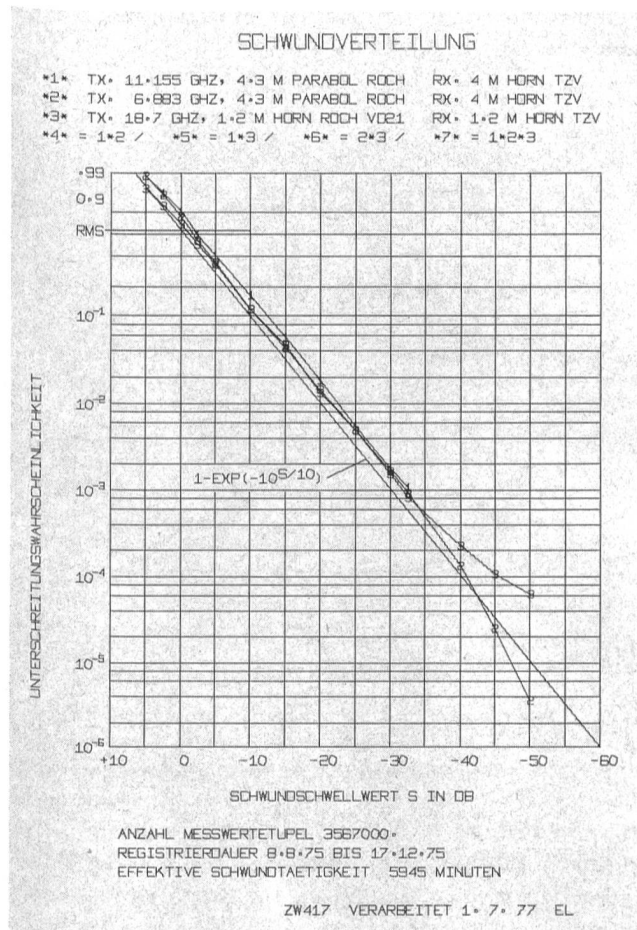
Des indications concernant le nombre des évanouissements ou «fadings» ne peuvent être faites qu'en rapport avec un intervalle d'observation d'une longueur déterminée et dans des conditions définies. En l'occurrence, on a choisi 100 heures, portant dans l'ensemble sur des puissances de réception réparties exponentiellement. Grâce à cette représentation, il est possible d'appliquer les résultats à d'autres trajets, en ce sens qu'on tient compte de la distribution dans le temps des composantes de la statistique globale réparties exponentiellement.

Au vu des analyses représentées à la *figure 8*, il est probable qu'on puisse admettre une approximation selon

$$\lg N = a + b \cdot \lg f + c \cdot S \quad (7)$$

Un calcul de compensation numérique a permis d'établir, pour l'intervalle  $S = -10 \dots -45$  dB, les coefficients

$$a = 1,94, b = 1,38, c = 0,041$$



**Fig. 7**  
**Schwundverteilung – Distribution des évanouissements**  
 Parabol – Parabole  
 Horn – Cornet  
 Unterschreitungswahrscheinlichkeit – Probabilité selon laquelle le niveau de réception moyen n'est pas atteint  
 Schwundschwewert S in dB – Valeur de seuil des évanouissements S en dB  
 Anzahl Messwerttupel (n-Tupel: mathematischer Begriff für n zusammengefasste Elemente, z. B. 3 Tupel = Tripel) – Nombre des valeurs de mesure significatives (en mathématiques, on appelle n-tuple un groupe de n éléments, un 3-tuple étant par ex. un triple)  
 Registrierdauer – Durée d'enregistrement  
 Effektive Schwundtätigkeit – Evanouissement effectif  
 Minuten – Minutes  
 Verarbeitet – Traité

festgestellte Abhängigkeit von der Frequenz enthält. Ähnliche Resultate sind auch in [16] publiziert.

$$P(A < S) \cong c \cdot f \cdot d^3 \cdot 10^{-5} \cdot (1 - \exp\{-10^{S/10}\}) \quad (6)$$

mit

- d Distanz in km
- f Frequenz in GHz
- c  $\begin{cases} 1/4 \text{ für Strecken über Gewässer} \\ 1/16 \text{ für normale Strecken} \\ 1/64 \text{ für gebirgiges und trockenes Klima} \end{cases}$

### 322 Anzahl Schwundereignisse N

Angaben über die Anzahl der Schwundereignisse oder Fadings können nur in bezug auf ein Beobachtungsintervall von bestimmter Länge und vorgegebenen Eigenschaften gemacht werden. Im vorliegenden Fall wurden 100 Stunden gewählt, die, gesamthaft betrachtet, exponentiell verteilte Empfangsleistungen umfassen. Diese Darstellung ermöglicht, die Ergebnisse auf andere Strecken anzuwenden, indem das zeitliche Verhältnis der exponentiell verteilten Anteile der Gesamtstatistik berücksichtigt wird.

Die Auswertungen, dargestellt in *Figur 8*, legen eine Approximation nach

$$\lg N = a + b \cdot \lg f + c \cdot S \quad (7)$$

nahe. Eine numerische Ausgleichsrechnung ergab für das Intervall  $S = -10 \dots -45$  dB die Koeffizienten

$$a = 1,94, b = 1,38, c = 0,041$$

und damit die Näherung

$$N(S, f, T_B = 100 \text{ h}) = 90 \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^{1,38} \cdot 10^{0,041 \cdot S} \quad (8)$$

mit  $f$  in GHz,  $f_0 = 1$  GHz.

### 323 Mittlere Schwunddauer $\bar{T}$

Die mittlere Schwunddauer  $\bar{T} = \frac{1}{N} \sum T_i$  kann auch als Quotient aus der Unterschreitungsdauer  $T = T_B \cdot P(A < S)$  und der Anzahl  $N(S, f)$  berechnet werden (*Fig. 9*).

$$\bar{T} = T_B \cdot \frac{P(A < S)}{N(S, f)} = 6400 \text{ s} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^{-1,38} \cdot 10^{0,059 \cdot S} \quad (9)$$

$f$  in GHz,  $f_0 = 1$  GHz,  $s =$  Sekunde

In der Konstanten 6400 s ist die Abweichung der Summenhäufigkeit des Empfangspegels von der Exponential-Verteilung schon berücksichtigt.

Wie im nächsten Abschnitt noch gezeigt wird, ist die Schwunddauer  $T$  logarithmisch-normal verteilt. Dann gilt zwischen dem Mittelwert  $\bar{T}$ , dem Medianwert  $T_{50}$  und der Streuung  $\sigma$  die Bezeichnung

$$\bar{T} = T_{50} \cdot 10^{1,15 \cdot \sigma^2} \quad (10)$$

Il en résulte la formule approchée

$$N(S, f, T_B = 100 \text{ h}) = 90 \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^{1,38} \cdot 10^{0,041 \cdot S} \quad (8)$$

où la fréquence  $f$  est exprimée en GHz et  $f_0 = 1$  GHz.

### 323 Durée moyenne d'évanouissement $\bar{T}$

La durée moyenne d'évanouissement  $\bar{T} = \frac{1}{N} \sum T_i$  peut aussi être calculée en tant que quotient à partir de la durée  $T = T_B \cdot P(A < S)$  où le seuil n'est pas atteint et du nombre  $N(S, f)$  (*fig. 9*)

$$\bar{T} = T_B \cdot \frac{P(A < S)}{N(S, f)} = 6400 \text{ s} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^{-1,38} \cdot 10^{0,059 \cdot S} \quad (9)$$

où  $f$  est exprimée en GHz et  $f_0 = 1$  GHz,  $s =$  seconde.

Il a déjà été tenu compte de l'écart entre la fréquence cumulée du niveau de réception et la répartition exponentielle dans la constante 6400 s.

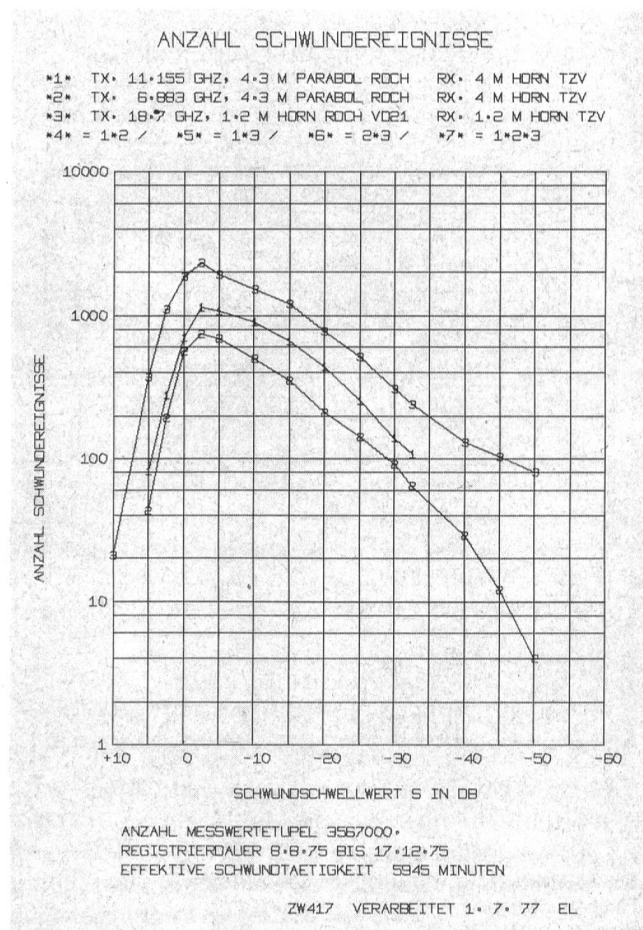
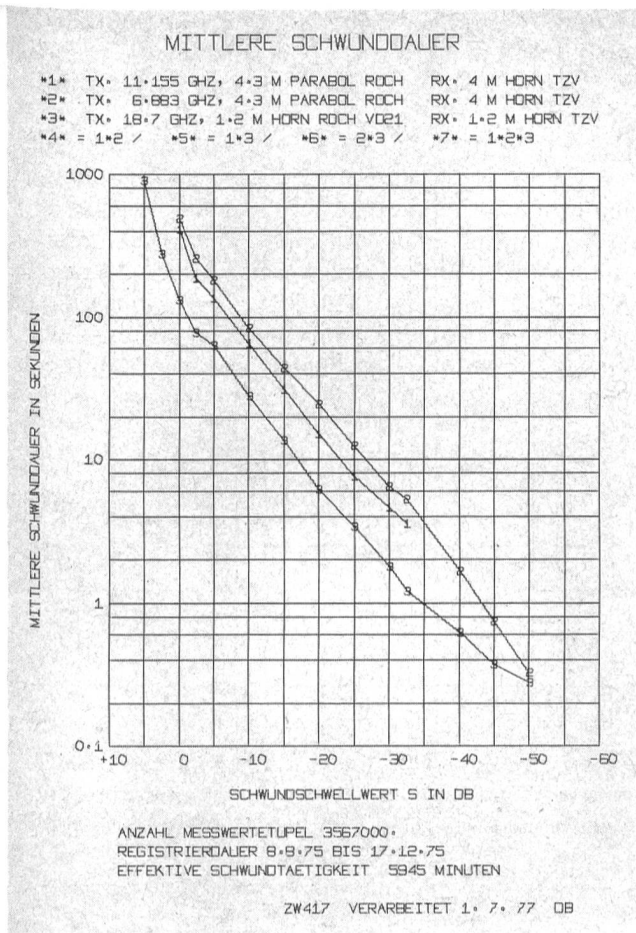


Fig. 8  
Anzahl Schwundereignisse — Nombre d'évanouissements  
Parabol — Parabole  
Horn — Cornet  
Schwundschwellwert  $S$  in dB — Valeur de seuil des évanouissements  $S$  en dB  
Anzahl Messwertetupel — Nombre des valeurs de mesure significatives  
Registrierdauer — Durée d'enregistrement  
Effektive Schwundtätigkeit — Evanouissement effectif  
Minuten — Minutes  
Verarbeitet — Traité



**Fig. 9**  
Mittlere Schwunddauer – Durée moyenne des évanouissements  
Parabol – Parabole  
Horn – Cornet  
Mittlere Schwunddauer in Sekunden – Durée moyenne des évanouissements en secondes  
Schwundschwellewert S in dB – Valeur de seuil des évanouissements S en dB  
Anzahl Messwerttupel – Nombre des valeurs de mesure significatives  
Registrierdauer – Durée d'enregistrement  
Effektive Schwundtätigkeit – Evanouissement effectif  
Minuten – Minutes  
Verarbeitet – Traité

Ein Vergleich zwischen den Werten nach (9) und (10) ergibt vernachlässigbare Unterschiede.

In erster Näherung scheint die mittlere Schwunddauer wenig von der Distanz d abzuhängen [13]. Aufgrund der Modellvorstellungen über den Mechanismus der Mehrwegausbreitung ist aber anzunehmen, dass die Schwunddauer mit zunehmender Distanz kürzer wird. Man kann von den zurzeit auf verschiedenen Strecken laufenden Untersuchungen erwarten, dass folgende Beziehung bestätigt wird

$$\bar{T} = 6400 \text{ s} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^{-1,38} \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right) \cdot 10^{0,059 \cdot S} \quad (11)$$

mit  $d_0 = 50 \text{ km}$ .

Ein Vergleich mit Untersuchungen auf einer 160 km langen Strecke bei einer Frequenz von 3 GHz [20] und auf zwei Strecken der Länge 111 und 125 km bei 4 GHz [21,22] bestätigt die Gültigkeit dieser Näherungsformel auch für tiefere Frequenzen.

Comme on le verra dans le prochain paragraphe, la durée d'évanouissement T est l'objet d'une répartition logarithmique normale. La relation suivante s'applique alors entre la valeur moyenne T, la valeur médiane  $T_{50}$  et la dispersion  $\sigma$

$$\bar{T} = T_{50} \cdot 10^{1,15 \cdot \sigma^2} \quad (10)$$

Une comparaison entre les valeurs selon (9) et (10) révèle des différences négligeables.

En première approximation, il semble que la durée moyenne d'évanouissement dépende peu de la distance d [13]. Au vu du modèle servant à représenter le mécanisme de la propagation par trajets multiples, on peut toutefois admettre que la durée d'évanouissement diminue en fonction de l'accroissement de la distance. On peut s'attendre que les essais effectués actuellement sur divers trajets confirment la relation suivante:

$$\bar{T} = 6400 \text{ s} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^{-1,38} \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right) \cdot 10^{0,059 \cdot S} \quad (11)$$

avec  $d_0 = 50 \text{ km}$ .

Une comparaison entre des essais faits sur un trajet de 160 km à une fréquence de 3 GHz [20] et deux trajets de 111 et 125 km à 4 GHz [21, 22] confirme également la validité de cette formule approchée aux fréquences basses.

On pourrait, par conséquent, modifier aussi la formule qui se rapporte au nombre des évanouissements

$$N(S, d, f, T_B = 100 \text{ h}) = 90 \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^{1,38} \cdot \left(\frac{d}{d_0}\right) \cdot 10^{0,041 \cdot S} \quad (12)$$

### 324 Distribution de la durée d'évanouissement T

Comme le montre la figure 10, la durée d'évanouissement T peut être décrite avec une bonne précision par une distribution logarithmique normale

$$P(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\lg T - \lg T_{50})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (13)$$

Si l'on tient compte de la valeur médiane  $T_{50}$

$$T_{50} = 1800 \text{ s} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^{-1,23} \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right) \cdot 10^{0,051 \cdot S} \quad (14)$$

avec  $d_0 = 50 \text{ km}$

et de la dispersion  $\sigma$  indépendante de la fréquence et de la profondeur d'évanouissement selon la première approximation

$$\sigma \approx 0,41 \pm 0,05 \quad (15)$$

Les petites différences dans les exposants des formules (11) et (14) proviennent du fait que les valeurs de mesure ne satisfont pas exactement à la loi distributive (13).

Damit könnte dann auch die Formel für die Anzahl Ereignisse modifiziert werden

$$N(S, d, f, T_B = 100 \text{ h}) = 90 \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^{1,38} \cdot \left(\frac{d}{d_0}\right)^2 \cdot 10^{0,041 \cdot S} \quad (12)$$

### 324 Verteilung der Schwunddauer T

Die Schwunddauer T kann, wie Figur 10 zeigt, mit guter Genauigkeit durch eine logarithmische Normalverteilung beschrieben werden.

$$P(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\lg T - \lg T_{50})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (13)$$

mit dem Medianwert  $T_{50}$

$$T_{50} = 1800 \text{ s} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^{-1,23} \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \cdot 10^{0,051 \cdot S} \quad (14)$$

$d_0 = 50 \text{ km}$

und der in erster Näherung von der Frequenz und der Schwundtiefe unabhängigen Streuung  $\sigma$

$$\sigma \approx 0,41 \pm 0,05 \quad (15)$$

Die kleinen Unterschiede in den Exponenten der Formeln (11) und (14) rühren davon her, dass das Verteilungsgesetz (13) von den Messwerten nicht exakt erfüllt wird.

Die Abweichung der mittleren Schwunddauer, berechnet nach (14) und (10), verglichen mit jener gemäss (11), ist beispielsweise für

$f = 10 \text{ GHz}$  und  $S = -25 \text{ dB}$  kleiner als 2 %

$$\bar{T} = T_{50} \cdot 10^{1,15\sigma^2} = 1800 \text{ s} \cdot 10^{-1,23} \cdot 10^{-25 \cdot 0,051} \cdot 10^{1,15 \cdot 0,41^2} = 8,78 \text{ s}$$

$$\bar{T} = 6400 \text{ s} \cdot 10^{-1,38} \cdot 10^{-25 \cdot 0,059} = 8,94 \text{ s}$$

### 325 Überpegel infolge Mehrwegausbreitung

Neben den Schwunderscheinungen während Mehrwegausbreitung kann auch eine Erhöhung des Empfangspegels beobachtet werden [23,24]. Der Pegel erweist sich für Werte über dem mittleren Empfangspegel, das heisst für  $S = P_{RX} - \bar{P}_{RX} > 0$  als normalverteilt (Fig. 11)

$$P(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(S+2,5)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (16)$$

Der Medianwert liegt, wie schon im Abschnitt 321 erwähnt, 2,5 dB unter dem Langzeitmittelwert  $\bar{P}_{RX}$ . Die Streuung  $\sigma$  nimmt mit steigender Frequenz leicht zu und wird

$$\sigma \approx 3,4 \dots 4 \text{ dB für } 7 \text{ und } 11 \text{ GHz} \quad (17)$$

$$\sigma \approx 4,7 \text{ dB für } 18,7 \text{ GHz}$$

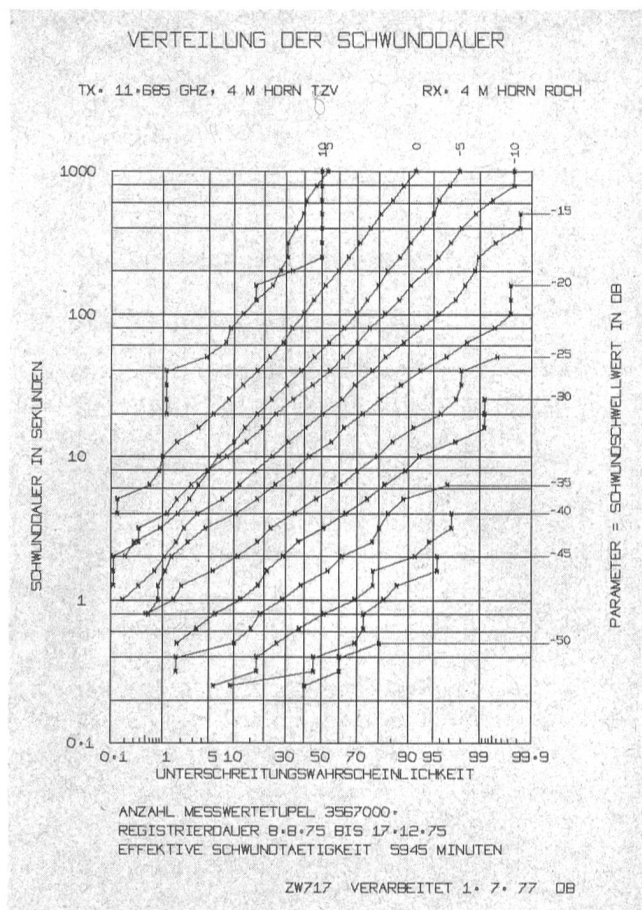


Fig. 10  
Verteilung der Schwunddauer – Distribution de la durée des évanouissements.  
Horn – Cornet  
Schwunddauer in Sekunden – Durée des évanouissements en secondes  
Parameter = Schwundschwellewert in dB – Paramètre = Valeur de seuil des évanouissements en dB  
Unterschreitungswahrscheinlichkeit – Probabilité selon laquelle le niveau de réception moyen n'est pas atteint  
Anzahl Messwerttupel – Nombre des valeurs de mesure significatives  
Registrierdauer – Durée d'enregistrement  
Effektive Schwundtätigkeit – Évanouissement effectif  
Minuten – Minutes  
Verarbeitet – Traité

L'écart par rapport à la durée d'évanouissement moyenne, calculé selon (14) et (10) et comparé à l'écart selon (11) est inférieur à 2 %, compte tenu de  $f = 10 \text{ GHz}$  et  $S = -25 \text{ dB}$

$$\bar{T} = T_{50} \cdot 10^{1,15\sigma^2} = 1800 \text{ s} \cdot 10^{-1,23} \cdot 10^{-25 \cdot 0,051} \cdot 10^{1,15 \cdot 0,41^2} = 8,78 \text{ s}$$

$$\bar{T} = 6400 \text{ s} \cdot 10^{-1,38} \cdot 10^{-25 \cdot 0,059} = 8,94 \text{ s}$$

### 325 Niveau dépassant la limite moyenne en raison de la propagation par trajets multiples

En plus des évanouissements imputables à la propagation par trajets multiples, on peut aussi observer des dépassements du niveau de réception moyen [23, 24]. Pour les valeurs dépassant le niveau de réception moyen, c'est-à-dire pour  $S = P_{RX} - \bar{P}_{RX} > 0$ , la répartition du niveau se révèle normale (fig. 11)

$$P(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(S+2,5)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (16)$$

Die Anzahl Ereignisse, die man während 100 h Mehrwegausbreitung beobachten kann, ist durch die folgende Approximation bestimmt

$$N(S, f, T_B = 100 \text{ h}) = 153 \cdot 1,2^{(f/f_0)} \cdot 10^{-0,23 \cdot S} \quad (18)$$

Es ist anzunehmen, dass auch die Anzahl der Überpegel je Zeiteinheit mit der Entfernung zunimmt. Zurzeit sind aber keine Ergebnisse, die eine Überprüfung zulassen, bekannt.

Die Verteilung der Pegelüberschreitungen kann ebenfalls durch eine logarithmische Normalverteilung mit den in *Tabelle I* aufgeführten Parametern beschrieben werden.

**Tabelle I.** Verteilung der Pegelüberschreitungen  
**Tableau I.** Répartition des dépassements de niveau

f	$T_{\bar{u}50}$	$\sigma$	$\bar{T}_{\bar{u}}$
6,883 GHz	102 ± 18 s	0,38 ± 0,09	220 s
11,155 GHz	49 ± 5 s	0,41 ± 0,06	100 s
18,7 GHz	31 ± 6 s	0,51 ± 0,02	70 s

Diese Werte gelten für eine 51 km lange Strecke. Für grössere Entfernungen  $d$  sind der Medianwert und der Mittelwert in erster Näherung mit (51 km/d) zu multiplizieren.

### 326 Scintillationen

Neben Perioden mit Tiefschwund können auch solche mit schnellen Pegelschwankungen kleiner Amplitude beobachtet werden. Die Auswertung von Messungen auf einer 116 km langen Strecke ergeben den folgenden Zusammenhang zwischen der Spitze-Spitze-Amplitude  $\Delta A$  in dB und der Periode  $\tau$

$$\bar{\tau} = \tau_0 \cdot \Delta A \quad [\text{s}] \quad (19)$$

mit

$$\tau_0 = 3,5 \text{ s/dB für } 7 \text{ GHz}$$

$$\tau_0 = 1,7 \text{ s/dB für } 11 \text{ GHz}$$

$$\Delta A \leq 10 \text{ dB}$$

Die Werte von  $\tau$  variieren zwischen  $\frac{1}{2} \bar{\tau}$  und  $2 \bar{\tau}$ .

### 4 Mehrfach- oder Diversity-Empfang

Bei Mehrwegausbreitung entsteht am Empfangsort ein in Funktion der Höhe stark variierendes Feld mit Minima, die vor allem von der Distanz, der Frequenz und der Schichtung der Atmosphäre abhängen. Dieser Umstand kann für die Verbesserung der Übertragungssicherheit ausgenutzt werden, wenn die Information auf zwei verschiedenen Radiofrequenzen parallel gesendet und am Empfangsort nur das stärkere Signal ausgewertet wird.

In der Richtfunktechnik sind die Frequenzen in verschiedene Bänder, wie 2, 4, 7 und 11 GHz eingeteilt, die ihrerseits mehrere Kanäle enthalten. Man spricht von Frequenz-Diversity-Empfang, wenn die zwei verwendeten Frequenzen zum selben Band gehören und von Frequenzband-Diversity-Empfang, wenn dies nicht der Fall ist.

Comme nous l'avons déjà vu au paragraphe 321, la valeur médiane est de 2,5 dB inférieure à la moyenne «longue durée»  $\bar{P}_{RX}$ . La dispersion  $\sigma$  augmente légèrement avec l'accroissement de la fréquence et devient

$$\sigma \approx 3,4 \dots 4 \text{ dB pour } 7 \text{ et } 11 \text{ GHz} \quad (17)$$

$$\sigma \approx 4,7 \text{ dB pour } 18,7 \text{ GHz}$$

L'approximation suivante détermine le nombre des phénomènes qui se produisent pendant 100 heures de propagation par trajets multiples

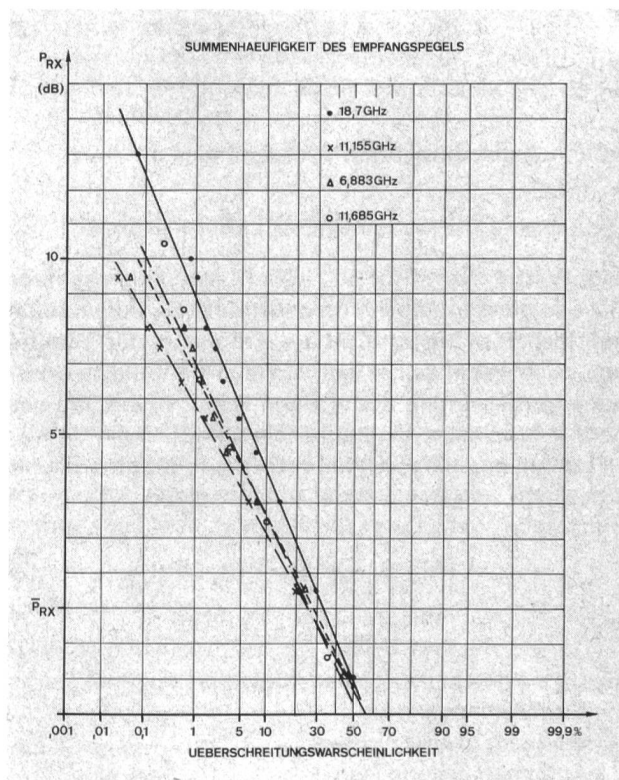
$$N(S, f, T_B = 100 \text{ h}) = 153 \cdot 1,2^{(f/f_0)} \cdot 10^{-0,23 \cdot S} \quad (18)$$

On peut admettre que le nombre des niveaux dépassant la limite moyenne augmente également par unité de temps et en fonction de la distance. A l'heure actuelle, on ne dispose cependant pas de résultats qui permettent de vérifier cette hypothèse. La répartition de ces dépassements peut également être décrite par une distribution logarithmique normale, au moyen des paramètres selon *tableau I*.

Ces valeurs s'appliquent à un trajet de 51 km. Pour les distances  $d$  supérieures, il y a lieu de multiplier, en première approximation, la valeur médiane et la valeur moyenne par (51 km/d).

### 326 Scintillements

En plus des périodes d'évanouissement profond, on peut aussi observer des fluctuations de niveau rapides de faible amplitude. L'analyse de mesures faites sur un



**Fig. 11**  
**Summenhäufigkeit des Empfangspegels —** Fréquence cumulée du niveau de réception  
**Überschreitungswahrscheinlichkeit —** Probabilité de dépassement du niveau de réception moyen

Nützt man die Ortsabhängigkeit der Empfangsfeldstärke aus, indem zum Beispiel zwei Antennen übereinander montiert und die zwei Empfangssignale phasenrichtig addiert werden, so bezeichnet man dies mit Raumvielfach- oder Raum-Diversity-Empfang.

Die erzielbare Verbesserung durch diese beiden Methoden, die man auch gemischt anwenden kann, wird in den nächsten Kapiteln behandelt.

#### 41 Raumvielfachempfang

##### 411 Allgemeines

Bei Raumvielfachempfang nützt man die starke Höhenabhängigkeit der Feldstärke am Empfangsort durch Verwenden von zwei, selten drei Antennen aus. Die Empfangsantennen sind möglichst so anzubringen, dass für eine bestimmte Frequenz die eine mit grosser Wahrscheinlichkeit ein starkes Signal empfängt, wenn die andere Schwund erleidet.

Nach *L. Fehlhaber* [14] beträgt der günstigste Höhenabstand  $\Delta h$

$$\frac{h_p}{4} \leq \Delta h \leq \frac{h_p}{2} \quad (20)$$

mit  $h_p$  = Höhenperiode des Empfangspegels. Leider ist  $h_p$ , wie schon aus Untersuchungen von *M. Fiechter* [25] 1964 hervorging, stark variabel, so dass die Ausnützung der negativen Korrelation von zwei Empfangssignalen schwerlich gelingt. Unterstützt wird diese Annahme dadurch, dass im allgemeinen die Verbesserung bei Diversity-Empfang kleiner ist, als man bei unkorrelierten Signalen erwarten könnte.

Für Korrelation  $r=0$  gilt allgemein

$$P(A_1 < S, A_2 < S) = (P(A_i < S))^2 \quad (21)$$

$i=1,2$

Bei negativ korrelierten Grössen müsste

$$P(A_1 < S, A_2 < S) < (P(A_i < S))^2$$

sein, Werte, die wir für  $S < -25$  dB feststellen konnten.

Die folgenden Abschnitte behandeln die durch Raum-mehrfachempfang erreichbare Erhöhung der Übertragungssicherheit. Es hat sich eingebürgert, die zu erwartende Verbesserung durch einen Faktor  $I$  (von improvement = Verbesserung) zu beschreiben.

Empfehlungen für Raum-Diversity-Konfigurationen findet man zum Beispiel bei *A. Vigants* [26, 27]

$$P(A_1 < S, A_2 < S) = P(A < S)/I \quad (22)$$

$$\text{mit } I = 1,2 \cdot 10^{-3} \frac{v^2 \cdot h^2 \cdot f}{d \cdot L^2}; h \leq 15 \text{ m} \quad (23)$$

$d$  Streckenlänge in km

$f$  Frequenz in GHz

$h$  Antennenabstand in m

$L$  Schwundschwellwert  $10^{S/10}$

$v^2$  Quotient der mittleren Empfangsleistungen

$v^2 = 10^{(\bar{P}_{RX2} - \bar{P}_{RX1})/10}$ ;  $\bar{P}_{RX1} > \bar{P}_{RX2}$

$v^2 \leq 1$ ; gleich 1, falls die Antennengewinne  $G_1 = G_2$

trajet de 116 km a permis d'établir les relations suivantes entre l'amplitude crête-à-crête  $\Delta A$  en dB et la période  $\tau$

$$\bar{\tau} = \tau_0 \cdot \Delta A \quad [s] \quad (19)$$

où

$\tau_0 = 3,5$  s/dB pour 7 GHz

$\tau_0 = 1,7$  s/dB pour 11 GHz

$\Delta A \leq 10$  dB

Les valeurs de  $\tau$  varient entre  $1/2 \bar{\tau}$  et  $2 \bar{\tau}$ .

#### 4 Réception multiple ou réception en diversité

Lorsque les faisceaux hertziens se propagent par trajets multiples, on observe au lieu de réception un champ qui varie fortement selon la hauteur et qui présente des minimums dépendant surtout de la distance, de la fréquence et des couches de l'atmosphère. Il est possible de tirer parti de ce phénomène pour améliorer la sûreté de la transmission. On peut, en effet, émettre l'information en parallèle sur deux fréquences radioélectriques différentes et ne traiter, au lieu de réception, que le signal le plus puissant.

Dans la technique des faisceaux hertziens, les fréquences sont réparties dans différentes bandes, à savoir 2, 4, 7 et 11 GHz, qui sont elles-mêmes subdivisées en plusieurs canaux. On parle de réception en diversité de fréquences lorsque les deux fréquences utilisées font partie de la même bande et de réception en diversité de bandes de fréquences lorsque les voies sont situées dans des bandes différentes.

Une méthode consiste à tirer parti du fait que le champ de réception n'est pas le même à tous les points du lieu considéré. On peut alors superposer deux antennes et additionner les signaux reçus, en phase correcte, méthode que l'on appelle réception en diversité d'espace.

Les chapitres suivants traitent des améliorations que ces deux systèmes permettent de réaliser, étant entendu qu'il est aussi possible de les utiliser conjointement.

#### 41 Réception en diversité d'espace

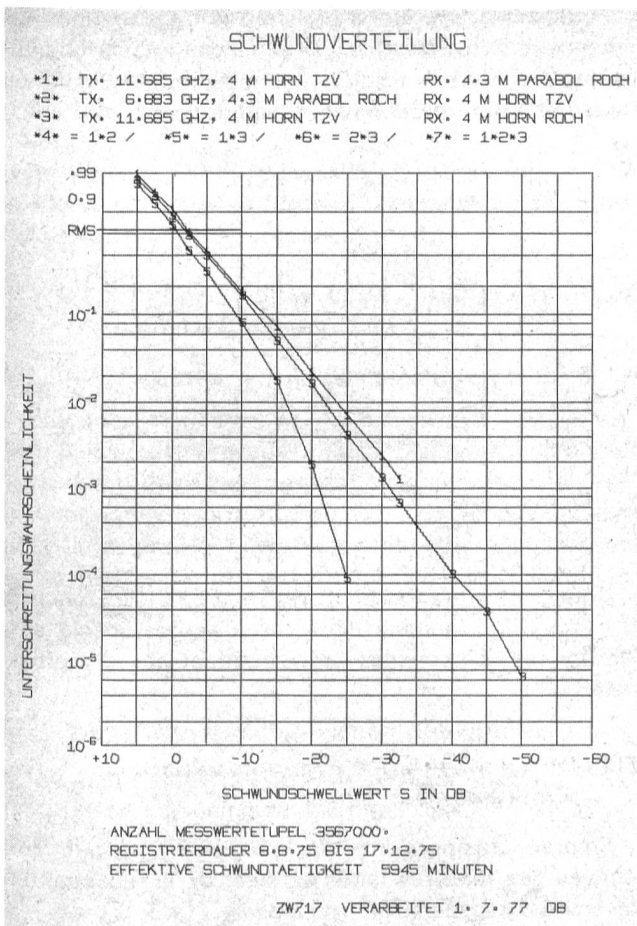
##### 411 Généralités

Dans la réception en diversité d'espace, on tire profit du fait que le champ dépend fortement de la hauteur au lieu de réception et on établit deux et même quelquefois trois antennes. Dans toute la mesure du possible, ces antennes sont placées de manière que l'une d'elles reçoive vraisemblablement un signal puissant pendant que l'autre, ou les autres, captent un signal affecté d'évanouissement.

Selon *L. Fehlhaber* [14], l'écart en hauteur  $\Delta h$  le plus favorable est

$$\frac{h_p}{4} \leq \Delta h \leq \frac{h_p}{2} \quad (20)$$

où  $h_p$  est la périodicité de variation du niveau du signal reçu en fonction de la hauteur. Malheureusement,  $h_p$  est sujet à de fortes variations, comme *M. Fiechter* [25] l'a déjà démontré en 1964, si bien qu'il est difficile de met-



**Fig. 12**  
Schwundverteilung – Distribution des évanouissements  
Parabol – Parabole  
Horn – Cornet  
Unterschreitungswahrscheinlichkeit – Probabilité selon laquelle le niveau de réception moyen n'est pas atteint  
Schwundschwellwert S in dB – Valeur de seuil des évanouissements S en dB  
Anzahl Messwertetupel – Nombre des valeurs de mesure significatives  
Registrierdauer – Durée d'enregistrement  
Effektive Schwundtätigkeit – Evanouissement effectif  
Minuten – Minutes  
Verarbeitet – Traité

#### 412 Verteilung des simultanen Schwundes

In der Versuchsanordnung Bern–Rochefort kommt folgende reine Raum-Diversity-Verbindung vor

$$f = 11,685 \text{ GHz}, \quad h = 10 \text{ m}, \quad d = 51 \text{ km}$$

Die Messergebnisse (Fig. 12), die daraus berechneten Werte des Faktors I und dessen mathematische Deutung legen es nahe, anstelle von

$$I \sim 10^{-S/10} \text{ (nach Vigants)} \quad (24)$$

die Approximation mit einer zweistufigen Exponentialfunktion zu versuchen.

Die Funktion  $I = 10^x$  mit  $x = 10 \frac{S_{10} - S}{20}$  und  $S_{10} = -20 \text{ dB}$  weicht nur unmerklich von den Messwerten ab [1].

$S_{10}$  Schwelle für die Verbesserung  $I = 10$

*Bemerkung:* Man könnte natürlich die Formeln auf Kosten zusätzlicher Symbole vereinfachen; darauf wird verzichtet

tre à profit la corrélation négative de deux signaux de réception. Cette hypothèse est renforcée par le fait que l'amélioration due à la réception en diversité est en général plus faible qu'on ne pourrait l'attendre de signaux ne présentant pas de corrélation.

Pour une corrélation  $r = 0$ , on peut généralement appliquer

$$P(A_1 < S, A_2 < S) = (P(A_i < S))^2 \quad (21)$$

$i = 1, 2$

Pour des grandeurs à corrélation négative, on devrait avoir

$$P(A_1 < S, A_2 < S) < (P(A_i < S))^2$$

à savoir des valeurs qu'il a été possible de constater pour  $S < -25 \text{ dB}$ .

Les paragraphes suivants traitent de l'augmentation de la sûreté de transmission que procure la réception en diversité d'espace. Il est devenu coutume de parler d'un facteur d'amélioration I pour l'amélioration supputée.

A. Vigants [26, 27] recommande, par exemple, certaines configurations pour la réception en diversité d'espace

$$P(A_1 < S, A_2 < S) = P(A < S)/I \quad (22)$$

$$\text{où } I = 1,2 \cdot 10^{-3} \frac{v^2 \cdot h^2 \cdot f}{d \cdot L^2}; \quad h \leq 15 \text{ m} \quad (23)$$

- d Longueur du trajet en km
- f Fréquence en GHz
- h Ecart entre les antennes en m
- L Valeur de seuil d'évanouissement  $10^{S/10}$
- $v^2$  Quotient des puissances de réception moyennes
- $v^2 = 10^{(\bar{P}_{RX2} - \bar{P}_{RX1})/10}$ ;  $\bar{P}_{RX1} > \bar{P}_{RX2}$
- $v^2 \leq 1$ ; égal à 1 si le gain d'antenne  $G_1 = G_2$

#### 412 Distribution de l'évanouissement simultané

La liaison en diversité d'espace pure suivante se présente dans le trajet d'essai Berne–Rochefort

$$f = 11,685 \text{ GHz}, \quad h = 10 \text{ m}, \quad d = 51 \text{ km}$$

Les résultats des mesures (fig. 12), les valeurs du facteur d'amélioration I qui en découlent par calcul et l'interprétation mathématique permettent de considérer comme valable la tentative de remplacer l'approximation

$$I \sim 10^{-S/10} \text{ (selon Vigants)} \quad (24)$$

par une fonction exponentielle itérative (à deux niveaux).

La fonction  $I = 10^x$  où  $x = 10 \frac{S_{10} - S}{20}$  et  $S_{10} = -20 \text{ dB}$  ne s'écarte qu'insensiblement des valeurs de mesure [1].  
 $S_{10}$  Seuil pour l'amélioration  $I = 10$

*Remarque:* On pourrait évidemment simplifier les formules en utilisant des symboles supplémentaires, mais on y a renoncé

Zur Berücksichtigung der Parameter  $h$  (Antennenabstand),  $d$  (Distanz) und  $f$  (Frequenz) haben wir neben unseren Ergebnissen die Messungen von Vigants und *Hutchinson-Jaasuna* [27] verwendet und fanden

$$I = 10^x, x = 10 \frac{S_{10} - S}{20} \quad (25)$$

$$S_{10} = -37 + 14 \cdot \lg \left( \frac{h}{h_0} \right) + 17 \cdot \lg \left( \frac{f}{f_0} \right) - 10 \cdot \lg \left( \frac{d}{d_0} \right)$$

$h$  - Antennenabstand in m  
 $h_0$  1 m  
 $d$  Streckenlänge in km  
 $d_0$  1 km  
 $f$  Frequenz in GHz  
 $f_0$  1 GHz

Darin wurde die in der Literatur angegebene Funktion  $S_{10}(d) \sim -\lg d$  übernommen, weil die vorhandenen Daten keine Approximation erlaubten.

#### 413 Mittlere simultane Schwunddauer $\bar{T}_S$

Aus unseren Messungen lässt sich für Raum- wie auch für Frequenz-Diversityempfang in erster Näherung die folgende Regel ableiten.

Die mittlere Schwunddauer wird durch Diversity-Empfangseinrichtungen nur unwesentlich verkürzt.

Damit wird nach Abschnitt 323

$$\bar{T}_S = \kappa \cdot 6400 \text{ s} \cdot \left( \frac{f}{f_0} \right)^{-1,38} \cdot 10^{0,059 \cdot S} \quad (26)$$

wobei der Schwundverkürzungsfaktor  $\kappa$  zwischen 0,5 und 1 variiert,  $\kappa=0,5$  gilt für die tiefsten erfassten simultanen Fadings.

#### 414 Anzahl simultane Ereignisse $N_S$

Aus 412 und 413 geht hervor, dass die Anzahl der simultanen Fadings  $N_S$  etwas stärker abnimmt als die gesamte Schwunddauer. Mit guter Näherung darf aber der für die Schwundverteilung gültige Verbesserungsfaktor verwendet werden

$$N_S = N / (\kappa \cdot I), 0,5 \leq \kappa \leq 1 \quad (27)$$

wobei  $I$  nach Formel (25) zu bestimmen ist.

Der Unterschied zwischen den nach (27) berechneten und den gemessenen Werten für  $N_S$  liegt innerhalb der Variabilität von  $\kappa$ .

#### 415 Verteilung der simultanen Schwunddauer $T_S$

Die Verteilung der Schwunddauer bei Raum-Diversity-Empfang kann wie bei den ungeschützten Verbindungen durch eine logarithmische Normalverteilung beschrieben werden

$$P(T_S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left( - \frac{(\lg T_S - \lg T_{S50})^2}{2\sigma^2} \right) \quad (28)$$

Pour tenir compte des paramètres  $h$  (écart entre les antennes),  $d$  (distance) et  $f$  (fréquence), nous avons utilisé en plus de nos résultats les mesures de Vigants et de *Hutchinson-Jaasuna* [27], ce qui a donné

$$I = 10^x, x = 10 \frac{S_{10} - S}{20} \quad (25)$$

$$S_{10} = -37 + 14 \cdot \lg \left( \frac{h}{h_0} \right) + 17 \cdot \lg \left( \frac{f}{f_0} \right) - 10 \cdot \lg \left( \frac{d}{d_0} \right)$$

$h$  Ecart entre les antennes en m  
 $h_0$  1 m  
 $d$  Longueur du trajet en km  
 $d_0$  1 km  
 $f$  Fréquence en GHz  
 $f_0$  1 GHz

Dans cette expression, on a repris la fonction  $S_{10}(d) \sim -\lg d$  indiquée dans les ouvrages spécialisés, les données disponibles ne permettant pas d'approximation.

#### 413 Durée moyenne d'évanouissements simultanés $\bar{T}_S$

En première approximation, la règle suivante peut être dérivée des mesures faites au sujet de la réception en diversité d'espace et de fréquences.

Les équipements de réception en diversité ne procurent qu'un raccourcissement négligeable de la durée moyenne d'évanouissement.

Ainsi, selon le paragraphe 323,

$$\bar{T}_S = \kappa \cdot 6400 \text{ s} \cdot \left( \frac{f}{f_0} \right)^{-1,38} \cdot 10^{0,059 \cdot S} \quad (26)$$

étant entendu que le facteur de raccourcissement d'évanouissement  $\kappa$  varie entre 0,5 et 1,  $\kappa=0,5$  s'appliquant aux évanouissements simultanés les plus profonds.

#### 414 Nombre des événements simultanés $N_S$

Les paragraphes 412 et 413 montrent que le nombre des évanouissements simultanés  $N_S$  décroît un peu plus fortement que la durée d'évanouissement globale. Il est cependant possible d'arriver à une bonne approximation, en utilisant le facteur d'amélioration applicable à la distribution des évanouissements.

$$N_S = N / (\kappa \cdot I), 0,5 \leq \kappa \leq 1 \quad (27)$$

où  $I$  doit être déterminé d'après la formule (25).

La différence entre les valeurs de  $N_S$  calculées selon (27) et les valeurs mesurées se situe dans les limites de la variabilité de  $\kappa$ .

#### 415 Distribution de la durée des évanouissements simultanés $T_S$

Comme dans le cas des liaisons non protégées, il est possible de décrire la distribution des évanouissements

wobei  $T_{S50}$  für simultane Fadings 1...0,5 (Schwundverkürzungsfaktor) mal den Wert  $T_{50}$  für ungeschützte Verbindungen beträgt.

Die Streuung  $\sigma_S$  ist bei kleinen Schwundwerten etwa  $1,5\sigma$ .

Bei Fadings tiefer oder gleich 20 dB gilt  $\sigma_S \approx \sigma$ . Die Werte von  $\sigma$  betragen gemäss 324 unabhängig von der Frequenz und der Schwundtiefe  $\sigma \approx 0,41$ .

## 42 Frequenzvielfachempfang

### 421 Allgemeines

Wie unter 4 erläutert wurde, können die Ausfälle wegen Schwundeinbrüchen infolge Mehrwegausbreitung auch durch den Einsatz zweier frequenzversetzter Verbindungen verringert werden. Die mögliche Verbesserung liegt gemäss Literaturangaben (Barnett [19], Vigants [28]) unter jener von Raum-Diversity-Empfang, eine Tatsache, die auch durch unsere Messungen bestätigt wird.

### 422 Verteilung des simultanen Schwundes

Die Schwundverteilung bei Frequenz-Diversity-Empfang lässt sich analog zu 412 durch die folgenden Formeln beschreiben

$$P(A_1 < S, A_2 < S) = P(A_1 < S) / I \quad (29)$$

$P(A_i < S)$  ist, wie schon festgestellt, für die Schwundperiode unabhängig von der Frequenz, eine Exponential-Verteilung (Fig. 13).

Für den Verbesserungsfaktor  $I$  sind verschiedene Angaben in der Literatur bekannt. So gilt nach Barnett [19] und Vigants [28] für Schwundwerte  $S > 20$  dB

$$I = V^2 \cdot 80 \cdot \frac{\Delta f}{f} \cdot \frac{1}{f \cdot d} \cdot 10^{-S/10}; \Delta f < 0,5 \text{ GHz} \quad (30)$$

$V^2 = 10^{(\bar{P}_{RX2} - \bar{P}_{RX1})/10}$  = Quotient der Antennengewinne wobei  $\bar{P}_{RX1} \geq \bar{P}_{RX2}$ , das heisst  $V^2 \leq 1$

$f, \Delta f$  Frequenz in GHz  
 $d$  Streckenlänge in km

Mit  $f = 11,685$  und  $11,155$  GHz,  $d = 51$  km und zwei gleichen Empfangsantennen, das heisst  $V = 1$ , wird

$$I = 6,4 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-S/10}$$

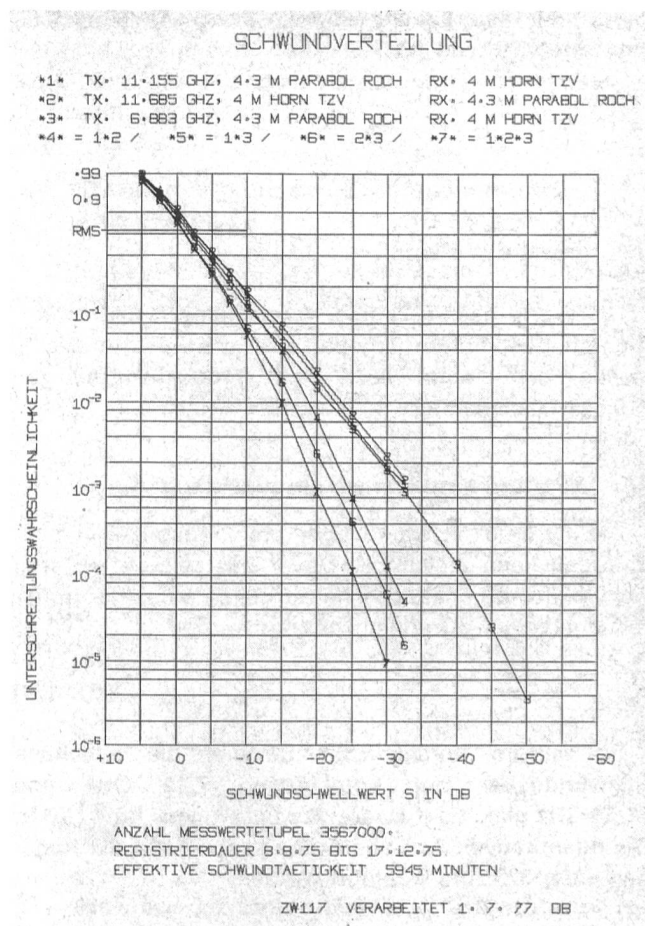
Bei der Verwendung des Ansatzes

$$\lg I = \frac{X}{2} + \sqrt{0,1 + \left(\frac{X}{2}\right)^2} \quad \text{mit} \quad (31)$$

$$x = \frac{S_{10} - S}{10} + 0,9 \text{ und}$$

$S_{10}$  = Schwellwert für  $I = 10$

fällt die Einschränkung an  $S$  weg. Dieser Vorteil und die bessere Beschreibung des Phänomens wiegt unseres Erachtens den Nachteil der komplizierteren Formel auf.



**Fig. 13**  
Schwundverteilung — Distribution des évanouissements  
Parabole — Parabol  
Horn — Cornet  
Unterschreitungswahrscheinlichkeit — Probabilité selon laquelle le niveau de réception moyen n'est pas atteint  
Schwundschwelligkeit  $S$  in dB — Valeur de seuil des évanouissements  $S$  en dB  
Anzahl Messwerttupel — Nombre des valeurs de mesure significatives  
Registrierdauer — Durée d'enregistrement  
Effektive Schwundtätigkeit — Évanouissement effectif  
Minuten — Minutes  
Verarbeitet — Traité

affectant la réception en diversité d'espace par une distribution logarithmique normale

$$P(T_S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\lg T_S - \lg T_{S50})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (28)$$

où  $T_{S50}$ , pour les évanouissements simultanés, s'élève à 1...0,5 fois (facteur de raccourcissement imputable aux évanouissements) la valeur de  $T_{50}$  dans le cas de liaisons non protégées.

Aux faibles valeurs d'évanouissement, la dispersion  $\sigma_S$  est d'environ  $1,5\sigma$ .  $\sigma_S \approx \sigma$  pour les évanouissements plus profonds ou égaux à 20 dB. Selon 324, les valeurs de  $\sigma$  s'élèvent à  $\sigma \approx 0,41$ , indépendamment de la fréquence et de la profondeur d'évanouissement.

## 42 Réception en diversité de fréquences

### 421 Généralités

Comme il a été expliqué sous 4, il est aussi possible de réduire le nombre des défaillances imputables aux

$S_{10}$  enthält die Frequenz- und die Streckenabhängigkeit und berechnet sich aus

$$S_{10} = \bar{P}_{RX2} - \bar{P}_{RX1} + 9 + 10 \left( \lg \frac{\Delta f}{f} - \lg \frac{f}{f_0} - \lg \frac{d}{d_0} \right) \quad (32)$$

$\Delta f, f$  in GHz,  $f_0 = 1$  GHz  
 $d$  in km,  $d_0 = 1$  km

Die Werte nach (32) sind, verglichen mit den experimentell bestimmten Ergebnissen, eher pessimistisch, lassen sich aber auch auf Frequenzdifferenzen  $> 0,5$  GHz anwenden.

#### 423 Mittlere simultane Schwunddauer $\bar{T}_S$

Die mittlere Schwunddauer bei Frequenz-Diversity-Empfang kann gleich der Dauer des zeitlich kürzeren Schwundeinbruches, das heisst gleich jener der höheren Übertragungsfrequenz gesetzt werden

$$\bar{T}_S = \text{Min}(\bar{T}_1, \bar{T}_2) \quad (33)$$

So ist im vorliegenden Beispiel die simultane Schwunddauer der Kombination 7/11 GHz und 11/11 GHz gleich der Dauer des Schwundes bei 11 GHz. Die quantitativen Aussagen können somit auf die Angaben unter 323 zurückgeführt werden.

$$\bar{T}_S = 6400 \text{ s} \cdot \left( \frac{f}{f_0} \right)^{-1,38} \cdot 10^{0,059 \cdot S} \quad (34)$$

$f = \text{Max}(f_1, f_2)$ ;  $f$  in GHz,  $f_0 = 1$  GHz

#### 424 Anzahl simultane Schwundereignisse $N_S$

Die Anzahl der Schwundereignisse kann einerseits aus der Unterschreitungswahrscheinlichkeit und der mittleren Schwunddauer, unter Berücksichtigung des Verbesserungsfaktors, berechnet werden, andererseits ist die Anzahl simultaner Fadings als Quotient  $N/I_N$  definiert ( $N =$  Anzahl Fadings der Verbindung mit der höheren Frequenz,  $I_N =$  Verbesserungsfaktor bezüglich der Anzahl Schwundereignisse)

$$N_S = \frac{T_{us}}{\bar{T}_S} \approx \frac{T_u}{I \cdot \bar{T}} = \frac{N}{I}$$

und nach Definition

$$N_S = \frac{N}{I_N}$$

mit

$$T_{us} = T_B \cdot P(A_1 < S, A_2 < S), \bar{T} = \text{Min}(\bar{T}_1, \bar{T}_2) \quad (35)$$

damit wird  $I_N \approx I$  und kann nach Formel (31) bestimmt werden.

#### 425 Verteilung der simultanen Schwunddauer $T_S$

Die Dauer der simultanen Schwundereignisse ist wiederum logarithmisch normal verteilt.

évanouissements dus à la propagation par trajets multiples, par l'emploi de deux liaisons opérant sur des fréquences différentes. Comme le montrent les ouvrages cités en bibliographie (Barnett [19] et Vigants [28]), l'amélioration possible se situe en dessous de celle que procure la réception en diversité d'espace, un fait qu'ont également confirmé nos propres mesures.

#### 422 Distribution des évanouissements simultanés

Par analogie à la méthode évoquée au paragraphe 412, la distribution des évanouissements affectant la réception en diversité de fréquences peut être décrite par les formules suivantes

$$P(A_1 < S, A_2 < S) = P(A_i < S) / I \quad (29)$$

Ainsi que nous l'avons déjà relevé,  $P(A_i < S)$  est, pour la période d'évanouissements, une distribution exponentielle (fig. 13) indépendante de la fréquence.

Les ouvrages spécialisés fournissent des indications diverses en ce qui concerne le facteur d'amélioration  $I$ . Ainsi, Barnett [19] et Vigants [28] indiquent pour des valeurs d'évanouissement  $S > 20$  dB

$$I = V^2 \cdot 80 \cdot \frac{\Delta f}{f} \cdot \frac{1}{f \cdot d} \cdot 10^{-S/10}; \Delta f < 0,5 \text{ GHz} \quad (30)$$

$V^2 = 10^{(\bar{P}_{RX2} - \bar{P}_{RX1})/10} =$  Quotient des gains d'antenne où  $\bar{P}_{RX1} \geq \bar{P}_{RX2}$ , c'est-à-dire  $V^2 \leq 1$

$f, \Delta f$  Fréquence en GHz  
 $d$  Longueur du trajet en km

Pour  $f = 11,685$  ou  $11,155$  GHz,  $d = 51$  km et deux antennes de réception semblables, c'est-à-dire  $V = 1$ ,  $I$  devient

$$I = 6,4 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-S/10}$$

Si l'on utilise l'expression

$$\lg I = \frac{X}{2} + \sqrt{0,1 + \left( \frac{X}{2} \right)^2} \quad (31)$$

où

$$x = \frac{S_{10} - S}{10} + 0,9 \text{ et}$$

$S_{10} =$  Valeur de seuil pour  $I = 10$

la limitation de  $S$  est supprimée. Cet avantage et la possibilité de mieux décrire le phénomène contrebalancent, à notre avis, l'inconvénient de la formule plus compliquée.  $S_{10}$  dépend de la fréquence, ainsi que de la longueur du trajet, et se calcule de la façon suivante:

$$S_{10} = \bar{P}_{RX2} - \bar{P}_{RX1} + 9 + 10 \left( \lg \frac{\Delta f}{f} - \lg \frac{f}{f_0} - \lg \frac{d}{d_0} \right) \quad (32)$$

$\Delta f, f$  en GHz,  $f_0 = 1$  GHz  
 $d$  en km,  $d_0 = 1$  km

Für die Mittelwerte  $\bar{T}$  fanden wir in 423

$$\bar{T}_S = \text{Min}(\bar{T}_1, \bar{T}_2)$$

für die Streuungen  $\sigma$  ergibt die Auswertung

$$\sigma_S \cong \sigma_1 \cong \sigma_2 \quad (36)$$

Damit ist auch für die Medianwerte  $T_{50}$

$$T_{50S} = \text{Min}(T_{501}, T_{502}) \quad (37)$$

und es gilt in erster Näherung, dass die Verteilung der Dauer von simultanem Schwund gleich der Verteilung der Schwunddauer der höheren der beteiligten Frequenzen ist.

Folglich drückt sich die durch den Diversity-Empfang erreichte Verbesserung praktisch nur in der Abnahme der Anzahl Ereignisse aus.

### 43 Kombierter Raum- und/oder Frequenzvielfachempfang

Im Versuch Bern—Rochefort sind verschiedene Kombinationen von Dreifachempfang untersucht worden:

- 3fach Frequenz-Diversity mit den Frequenzen 6,883, 11,155 und 11,685 GHz unter der Verwendung von je einer Antenne beim Sender und beim Empfänger
- Raum- und Frequenz-Diversity
  - $2 \times 11,685 \text{ GHz} + 11,155 \text{ GHz}$
  - $2 \times 11,685 \text{ GHz} + 6,883 \text{ GHz}$
- Mischung von Frequenz- und Raum-Diversity

### 431 Empfang auf drei Frequenzen

Bei der Schwundverteilung (Fig. 14) zeichnet sich nur noch eine geringe Verbesserung gegenüber Zweifachempfang mit den Frequenzen 11,155 und 6,883 GHz beziehungsweise 11,685 und 6,883 GHz ab. Der Verbesserungsfaktor darf bis zu einem Schwund von 20 dB gleich dem Produkt der einzelnen Verbesserungen gesetzt werden. Für grössere Schwundtiefen steigt die Verbesserung des Dreifachempfangs weniger stark als dieses Produkt an. Weil die mittlere Schwunddauer auch hier durch  $\text{Min}(\bar{T}_1, \bar{T}_2, \bar{T}_3)$  genähert werden kann, ergibt sich für die Anzahl der Unterbrüche dasselbe Bild wie für die Schwundverteilung.

### 432 Raum- und Frequenzvielfachempfang

In Figur 14 können die Verbesserungsfaktoren der verschiedenen Zweifach- und Dreifachempfangskombinationen miteinander verglichen werden.

Raum-Diversity dominiert eindeutig über Frequenz-Diversity, Dreifachempfang bringt nur noch eine geringe Verbesserung in der zulässigen Schwundtiefe.

Wohl nimmt der Verbesserungsfaktor  $I$  bei einem Schwund von  $S = -25 \text{ dB}$  noch stark zu; die Erhöhung der möglichen Schwundtiefe beträgt aber für kombinier-

Comparées aux résultats expérimentaux, les valeurs selon (32) sont plutôt pessimistes, mais elles peuvent également être appliquées à des écarts de fréquences inférieurs à 0,5 GHz.

### 423 Durée moyenne des évanouissements simultanés $\bar{T}_S$

Dans le cas de la réception en diversité de fréquences, la durée moyenne d'évanouissement peut être assimilée à la durée d'évanouissement la plus brève, c'est-à-dire aux durées d'évanouissement qui affectent la fréquence de transmission la plus élevée

$$\bar{T}_S = \text{min}(\bar{T}_1, \bar{T}_2) \quad (33)$$

Ainsi, dans l'exemple considéré, la durée des évanouissements simultanés de la combinaison 7/11 GHz et 11/11 GHz équivaut à la durée d'évanouissement à 11 GHz. De ce fait, les énoncés quantitatifs peuvent être reportés sur les indications du paragraphe 323

$$\bar{T}_S = 6400 \text{ s} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^{-1,38} \cdot 10^{0,059 \cdot S} \quad (34)$$

$f = \max(f_1, f_2)$  f en GHz,  $f_0 = 1 \text{ GHz}$

### 424 Nombre des évanouissements simultanés $N_S$

On peut calculer le nombre des évanouissements à partir de la probabilité selon laquelle le niveau de réception moyen n'est pas atteint et à partir de la durée moyenne d'évanouissement, en tenant compte du facteur d'amélioration; en outre, le nombre des évanouissements simultanés est défini par le quotient  $N/I_N$  ( $N$  = nombre d'évanouissements affectant la liaison sur la fréquence la plus élevée,  $I_N$  = facteur d'amélioration relatif au nombre des évanouissements)

$$N_S = \frac{T_{us}}{\bar{T}_S} \approx \frac{T_u}{I \cdot \bar{T}} = \frac{N}{I}$$

et, par définition,

$$N_S = \frac{N}{I_N}$$

où

$$T_{us} = T_B \cdot P(A_1 < S, A_2 < S), \bar{T} = \text{min}(\bar{T}_1, \bar{T}_2) \quad (35)$$

Ainsi,  $I_N \approx I$  et peut être déterminé selon la formule (31).

### 425 Distribution de la durée d'évanouissements simultanés $T_S$

La durée des évanouissements simultanés correspond à nouveau à une distribution logarithmique normale.

Selon 423, il a été trouvé pour les valeurs moyennes  $\bar{T}$

$$\bar{T}_S = \text{min}(\bar{T}_1, \bar{T}_2)$$

l'analyse donnant pour les dispersions  $\sigma$

$$\sigma_S \cong \sigma_1 \cong \sigma_2 \quad (36)$$

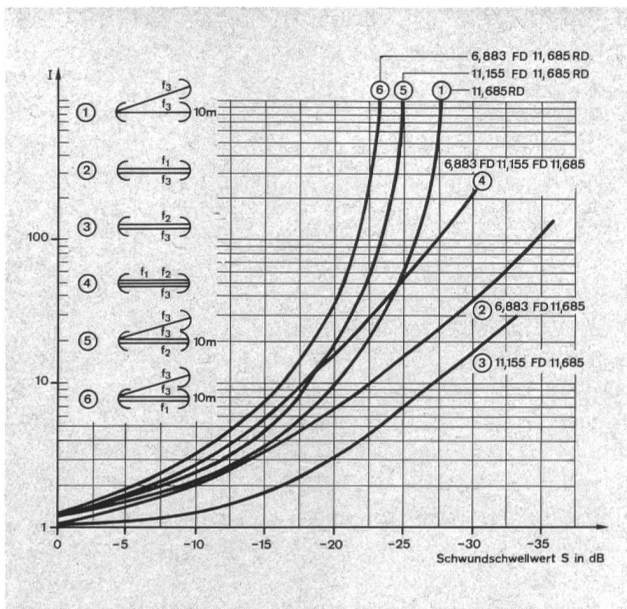


Fig. 14  
 Verbesserungsfaktor I für zwei- und dreifachen Frequenz- und Raumdiversityempfang — Facteur d'amélioration I pour la réception mixte en diversité de fréquences et en diversité d'espace  
 Schwundschwellwert S in dB — Valeur de seuil des évanouissements S en dB  
 f<sub>1</sub> 6,883 GHz  
 f<sub>2</sub> 11,155 GHz  
 f<sub>3</sub> 11,685 GHz  
 d 51 km

ten Raum-Frequenzvielfachempfang nur noch 2 beziehungsweise 4,5 dB.

Falsch kombinierter Mehrfachempfang kann sich negativ auswirken, wie dies *Figur 15* zeigt. Der Verbesserungsfaktor bei Raumvielfachempfang auf unterschiedlichen Frequenzen folgt bis zu Schwundtiefen von 20 bis 25 dB dem Verlauf für reine Raum-Diversity, verschlechtert sich dann aber um so stärker, je grösser die Frequenzdifferenz ist.

#### 44 Zeitabhängigkeit der Schwundparameter

Theoretische Untersuchungen verschiedener Autoren (*Rice* [29, 30] und *Fehlhaber* [31]) über Rayleigh-Verteilungen kamen zu Ergebnissen, die auf kleinere zeitliche Variationen der Schwunddauer schlossen, als sie unsere Messungen aufweisen ( $\sigma_{LIT} \approx 1,8$ ,  $\sigma_{MES} = 3..4$ ). *Bullington* [32] Angaben für 4 GHz ergeben mit  $\sigma = 3,6$  eine gute Übereinstimmung mit unseren Resultaten.

In der Praxis ist eine grössere Variation als nach der Theorie zu erwarten, weil die Ausbreitungsparameter (Ort der Reflexion, Aufwindgeschwindigkeit, Grösse des Gradienten des Brechungsindizes) ebenfalls von der Zeit abhängen. Um diese Abhängigkeit genauer untersuchen zu können, berechneten wir für drei verschiedene Zeitintervalle (100 h, 6 h und 1 h) die Unterschreitungswahrscheinlichkeit, die Anzahl und die Verteilung der Dauer der Schwundereignisse für die Frequenzen 7, 11 und 18 GHz. Unterschiede waren einzig bei der Unterschreitungsdauer signifikant: während starker Schwundtätigkeit sinkt der mittlere Pegel um 5 bis 10 dB; die Variabilität von T bleibt aber erhalten. Untersuchungen über kürzere Zeitintervalle, die eine uniformere Verteilung ergeben müssten, sind statistisch nicht mehr sinnvoll.

Il en résulte que la valeur médiane  $T_{50}$  devient

$$T_{50S} = \min(T_{50_1}, T_{50_2}) \quad (37)$$

et on peut dire, en première approximation, que la distribution de la durée des évanouissements simultanés correspond à la distribution de la durée d'évanouissements affectant les fréquences les plus élevées de la liaison en diversité.

Par conséquent, l'amélioration que procure la réception en diversité ne se manifeste pratiquement que par la diminution du nombre des évanouissements.

### 43 Réception en diversité combinée d'espace et/ou de fréquences

Au cours de l'expérience Berne—Rochefort, les essais ont porté sur diverses combinaisons de réception trimode, à savoir

- réception en diversité sur trois fréquences (6,883, 11,155 et 11,685 GHz) et utilisation d'une seule antenne à chaque extrémité de la liaison
- réception en diversité d'espace et en diversité de fréquences
  - $2 \times 11,685$  GHz + 11,155 GHz
  - $2 \times 11,685$  GHz + 6,883 GHz
- combinaison de la réception en diversité de fréquences et en diversité d'espace

#### 431 Réception sur trois fréquences

En ce qui concerne la distribution des évanouissements (*fig. 14*), on n'observe qu'une amélioration insensible par rapport à la réception sur deux voies avec les fréquences de 11,155 et 6,883 GHz ou 11,625 et 6,883 GHz. Jusqu'à un évanouissement de 20 dB, il est possible d'assimiler le facteur d'amélioration au produit des améliorations prises isolément. Pour des évanouissements plus prononcés, l'amélioration due à la réception trimode s'accroît moins fortement que ce produit. Vu que l'approximation de la durée moyenne d'évanouissement peut, ici également, être rendue par  $\min(\bar{T}_1, \bar{T}_2, \bar{T}_3)$ , la représentation du nombre des coupures correspond à celle de la distribution des évanouissements.

#### 432 Réception en diversité d'espace et en diversité de fréquences

La figure 14 permet de comparer les facteurs d'amélioration que procurent les diverses combinaisons de réception bimode et trimode.

Les résultats de la réception en diversité d'espace sont nettement supérieurs à ceux de la réception en diversité de fréquences, tandis que la réception trimode n'apporte plus qu'une amélioration insensible de la profondeur d'évanouissement admissible.

Bien que le facteur d'amélioration I croisse encore fortement à un évanouissement de  $S = -25$  dB, l'augmentation de la profondeur d'évanouissement possible n'atteint plus que 2 ou 4,5 dB pour la combinaison des modes de réception en diversité d'espace et de fréquences.

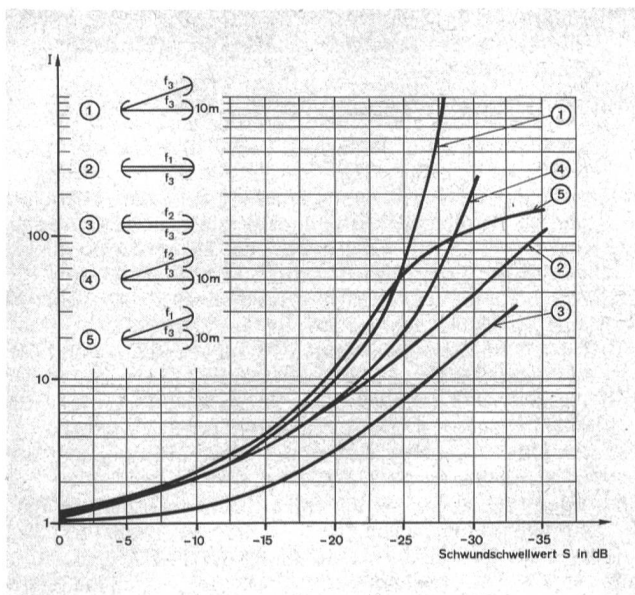


Fig. 15  
**Verbesserungsfaktor I für die Mischung von Frequenz- und Raumdiversitätsempfang** — Facteur d'amélioration I pour la réception mixte en diversité de fréquences et en diversité d'espace  
 Schwundschwelligkeit S in dB — Valeur de seuil des évanouissements S en dB  
 $f_1$  6,883 GHz  
 $f_2$  11,155 GHz  
 $f_3$  11,685 GHz  
 $d$  51 km

## 5 Schlussfolgerungen

Die statistische Beschreibung von Mehrwegausbreitungseffekten lässt sich in den folgenden Grundregeln zusammenfassen:

- während des Auftretens von Schwunderscheinungen ist der Empfangspegel unabhängig von der Frequenz exponentiell verteilt
- die mittlere Schwunddauer wird durch Mehrfachempfang (Raum- und/oder Frequenz-Diversity) nur unwesentlich verkürzt
- die Steigerung der Übertragungssicherheit bei Mehrfachempfang wird vor allem durch die Verminderung der Anzahl Unterbrüche verursacht
- Raum-Diversity bringt eine bedeutend grössere Verbesserung als Frequenz-Diversity
- betrachtet man in Figur 14 den Gewinn an Schwundtiefe, so stellt man fest, dass die Kombination von Raum- und Frequenzmehrfachempfang nur noch eine geringe Erhöhung der Übertragungssicherheit bewirkt. Sie kann bei falscher Anwendung sogar verschlechternd sein.

## Bibliographie

- [1] Liniger M. Untersuchung der Mehrwegausbreitung bei Richtfunkverbindungen. Bern, Generaldirektion PTT, Abt. Forschung und Entwicklung, Bericht VD35.013F, 28. 11. 1976.
- [2] Jordi P. Kurzbeschreibung der Richtstrahlversuchsstrecke Ostermündigen—Rochefort. Bern, Generaldirektion PTT, Abt. Forschung und Entwicklung, Bericht VD32.038A, 27. 6. 1974.
- [3] Waldteufel Ph. Atténuation des ondes hyperfréquences par la pluie. Issy-les-Moulineaux, Ann. Télécommunications 28 (1973). Nos 5 et 6, p. 255...272.
- [4] Morita K. and Higuti I. Statistical Studies on Electromagnetic Wave Attenuation due to Rain. Tokio, Review of the

Les effets d'une réception multiple mal combinée peuvent être négatifs, ce qui ressort de la figure 15. Le facteur d'amélioration procuré par la réception en diversité d'espace sur plusieurs fréquences suit l'allure de la courbe de la réception en diversité d'espace pure, jusqu'à des profondeurs d'évanouissement de 20 à 25 dB, mais se détériore ensuite d'autant plus fortement que l'écart en fréquence est grand.

## 44 Dépendance du temps des paramètres d'évanouissement

Par des études théoriques des distributions de Rayleigh, divers auteurs, notamment Rice [29, 30] et Fehlhaber [31], sont parvenus à des résultats où la variation dans le temps des durées d'évanouissement était inférieure à celle qu'ont révélée nos mesures ( $\sigma_{LIT} \approx 1,8$ ,  $\sigma_{MES} = 3...4$ ). Les indications que fournit Bullington [32] pour 4 GHz ( $\sigma = 3,6$ ) correspondent bien à nos résultats.

En pratique, il y a lieu de s'attendre à une variation plus importante qu'en théorie, étant donné que les paramètres de propagation (lieu de réflexion, vitesse du vent ascendant, gradient de l'indice de réfraction) dépendent également du temps.

Pour examiner cette dépendance de plus près, nous avons calculé la probabilité selon laquelle le niveau moyen n'était pas atteint, ainsi que le nombre et la distribution des durées d'évanouissement aux fréquences de 7, 11 et 18 GHz, pour trois intervalles de temps différents (100 h, 6 h et 1 h). Des différences significatives n'ont pu être observées que sous le rapport de la durée pendant laquelle le niveau moyen n'était pas atteint: lors d'évanouissements prononcés, le niveau moyen fléchit de 5 à 10 dB, cependant que la variabilité de T est maintenue. Du point de vue de la statistique, il n'aurait pas été judicieux d'examiner des intervalles de temps plus courts, bien que la distribution eût sans doute été plus uniforme.

## 5 Conclusions

Les règles suivantes résument le comportement statistique des effets de la propagation par trajets multiples:

- indépendamment de la fréquence, la distribution du niveau de réception obéit à une loi exponentielle lors de l'apparition d'évanouissements
- la réception en diversité d'espace et/ou de fréquences ne raccourcit qu'insensiblement la durée moyenne d'évanouissement
- l'accroissement de la sûreté de transmission, dans le cas de la réception multiple, est surtout dû à la diminution du nombre des coupures
- la réception en diversité d'espace apporte une amélioration nettement meilleure que la réception en diversité de fréquences
- en examinant la figure 14, on constate que le gain procuré par la combinaison de la réception en diversité d'espace et en diversité de fréquences, au point de la profondeur d'évanouissement, n'apporte qu'une augmentation minimale de la sûreté de transmission. Cette dernière peut même être diminuée en cas d'application incorrecte.

- Electrical Communication Laboratories 19 (1971). Nos 7 and 8, pp. 798...842.
- [5] *Debrunner W. E. und Liniger M.* Einfluss der Struktur von Regengebieten auf die Ausbreitung von Mikrowellen. Bern, Techn. Mitt. PTT 53 (1975) Nr. 8, S. 292...304.
- [6] *Henz J. F.* Colorado High Plains Thunderstorm Systems. Fort Collins, Colorado State University, June 1974.
- [7] *Drufuca G.* Rain Attenuation Studies. McGill University, Stormy Weather Group, Scientific Report MW 77, March 1973.
- [8] *Debrunner W. E.* Beschreibung des Mikroklimas einer Region im Hinblick auf Niederschlagsdämpfungen. Bern, Generaldirektion PTT, Abt. Forschung und Entwicklung, Bericht Nr. F-VD21-047, 29. 7. 1977.
- [9] — Mean Sizes of Rain Cells Derived from Rain-Rate Recordings in Different Topographical Regions of Switzerland. Genf, CCIR (1974—1978), Doc 5/231.
- [10] *Misme P. et Fimbel J.* Détermination théorique et expérimentale de l'affaiblissement par la pluie sur un trajet radioélectrique. Issy-les-Moulineaux, Ann. Télécommunications 30 (1975). Nos 5 et 6, p. 149—158.
- [11] *Lin S. H.* A Method for Calculating Rain Attenuation Distributions on Microwave Paths. Murray Hill, Bell System Technical Journal 54 (1975). No 6, pp. 1051...1086.
- [12] *Debrunner W. E.* Niederschlagsdämpfungs-Statistiken bei 18 GHz. Bern, Generaldirektion PTT, Abt. Forschung und Entwicklung, Bericht Nr. F-VD21-048, 5. 8. 1977.
- [13] *Ruthroff C. L.* Multiple-Path Fading on Line-of-Sight Microwave Radio Systems as a Function of Path Length and Frequency. Murray Hill, Bell System Technical Journal 50 (1971). No 7, pp. 2375...2398.
- [14] *Fehlhaber L.* Amplitudenschwund auf Richtfunkfeldern mit Sichtverbindung als Folge von Mehrwegausbreitung. Windsheim, Der Fernmeldeingenieur 29 (1975), Nr. 4, S. 1...31.
- [15] *Debrunner W. E.* Kolloquiumsvortrag an der ETH «Krieg im Äther». Wintersemester 74/75.
- [16] — Feldstärkeschwundstatistiken für die Planung von Richtfunkverbindungen. Bern, Generaldirektion PTT, Abt. Forschung und Entwicklung, Bericht Nr. VD 32.040, Juli 1974.
- [17] *Aebersold K.* Ausbreitungsmessungen im 4-GHz-Band auf 10 Richtstrahlstrecken. Bern, Generaldirektion PTT, Abt. Forschung und Entwicklung, Bericht VD32.039, 18. 9. 1974.
- [18] — Ausbreitungsmessungen auf Richtstrahlstrecken oberhalb 10 GHz. Bern, Generaldirektion PTT, Abt. Forschung und Entwicklung, Forschungsprojekt VD21 FP5.
- [19] *Barnett W. T.* Multipath Propagation at 4, 6 and 11 GHz. Murray Hill, Bell System Technical Journal 51 (1972). No 2, pp. 321...361.
- [20] *Klein W. et Libois L. J.* Essais de transmission par faisceaux hertziens sur un long parcours en visibilité optique entre la France et la Suisse. Berne, Bull. techn. PTT 31 (1953). No 11, p. 305...317.
- [21] *Jordi P.* Frequenz-Diversity-Empfang auf einer 111 km langen Richtstrahlstrecke mit direkter Sicht. Bern, Generaldirektion PTT, Abt. Forschung und Entwicklung, Bericht VD32.009F, 23. 5. 1973.
- [22] *Fiechter M.* Ausbreitungsmessungen 4000 MHz mit gekreuzter Wellenpolarisation auf der Strecke Chasseral—Genf. Bern, Generaldirektion PTT, Abt. Forschung und Entwicklung, Bericht 32.55.26, 15. 11. 1955.
- [23] *Fiechter M.* Extremwerte der Empfangsleistung auf einer 124 km langen 4-GHz-Strecke mit Raum-Diversity-Empfang. Bern, Generaldirektion PTT, Abt. Forschung und Entwicklung, Bericht VD32.105, 31. 5. 1977.
- [24] *Liniger M.* Pegelüberhöhungen bei Mehrwegausbreitung auf Richtfunkstrecken. Bern, Generaldirektion PTT, Abt. Forschung und Entwicklung, Bericht VD35.017, 21. 7. 1977.
- [25] *Fiechter M.* Auswertung der Diversity-Versuche Genf. Bern, Generaldirektion PTT, Abt. Forschung und Entwicklung, Bericht 32.104, 21. 4. 64.
- [26] *Vigants A.* Space-Diversity Engineering. Murray Hill, Bell System Technical Journal 54 (1975) No 1, pp. 103...142.
- [27] *Vigants A.* Space-Diversity Performance as a Function of Antenna Separation. New York, IEEE Transactions on Communication Technology, December 1968, COM-16 (1968). No 6, pp. 831...836.
- [28] *Vigants A.* Number and Duration of Fades at 6 and 4 GHz. Murray Hill, Bell System Technical Journal 50 (1971). No 3, pp. 815...841.
- [29] *Rice S. O.* Mathematical Analysis of Random Noise. Murray Hill, Bell System Technical Journal 23 (1944). No 3, p. 282...332; 24 (1945). No 1, pp. 46...156.
- [30] *Rice S. O.* Statistical Properties of a Sine Wave plus Random Noise. Murray Hill, Bell System Technical Journal 27 (1948). No 1, pp. 109...157.
- [31] *Fehlhaber L.* Diverse technische Berichte des Forschungsinstituts des FTZ (Fernmeldetechnisches Zentralamt) über Mehrwegausbreitung 1970...1976.
- [32] *Bullington K.* Phase and Amplitude Variations in Multipath Fading of Microwave Signals. Murray Hill, Bell System Technical Journal 50 (1971). No 6, pp. 2039...2053.