

**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:** 53 (1975)

**Heft:** 8

**Artikel:** Einfluss der Struktur von Regengebieten auf die Ausbreitung von Mikrowellen

**Autor:** Debrunner, Walter E. / Liniger, Markus

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-875610>

### **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:** 05.04.2026

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

# Einfluss der Struktur von Regengebieten auf die Ausbreitung von Mikrowellen

Walter E. DEBRUNNER und Markus LINIGER, Bern

621.391.812.61.029.64::551.57

Zusammenfassung. Die Zuverlässigkeit von Funkverbindungen auf Frequenzen über 10 GHz werden durch Niederschlagsdämpfungen wesentlich beeinträchtigt. Die auf einer einzelnen Strecke gemessenen Dämpfungsstatistiken sowie die punktweise ermittelten Überschreitungswahrscheinlichkeiten von Regenintensitäten können in dem Masse für die Planung verwendet werden, als Angaben über die Strukturen von Regengebieten vorliegen. Zur Beschaffung dieser Informationen sind auf einer 70 km langen, über das Mittelland und die Voralpen führenden Strecke die Regenstrukturen mit Wetterradar untersucht worden. Wie die statistische Beschreibung der Regengebiete zeigt, beträgt die mittlere Ausdehnung von Regenzellen 4,5 km, deren mittlerer Abstand ungefähr 10 km. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens mehrerer Regenzellen ist nur bedingt vernachlässigbar. Die Überschreitungswahrscheinlichkeiten der Dämpfung je Regenzelle wird angegeben.

## Influence de la structure des zones de pluie sur la propagation des micro-ondes

Résumé. Aux fréquences supérieures à 10 GHz, les précipitations atmosphériques déterminent principalement la fiabilité des transmissions par faisceaux hertziens. Afin de pouvoir utiliser les statistiques d'affaiblissement mesurées sur un trajet expérimental, ainsi que les distributions cumulatives des intensités des précipitations ponctuelles à des buts de planification, il importe de connaître la structure spatiale des zones de précipitations. C'est pourquoi on a mis en service un radar météorologique passif, scrutant l'horizon sur une distance de 70 km s'étendant du Plateau aux Préalpes suisses, et qui nous a livré de l'information sur la structure des zones de précipitations. La description statistique des domaines de précipitations a montré que l'étendue moyenne des cellules de pluie est de 4,5 km et que leur espacement moyen se situe aux environs de 10 km. Dans de nombreux cas, on a enregistré la présence de plusieurs cellules de pluie simultanément sur le même trajet. Ce travail contient des données sur la distribution cumulative des affaiblissements dus à une, deux ou trois cellules de pluie.

## L'influenza della morfologia delle regioni piovose sulla propagazione delle microonde

Riassunto. La sicurezza di comunicazioni su onde hertziane a frequenze di oltre 10 GHz è sensibilmente compromessa dalle attenuazioni dovute a precipitazioni. Le rilevazioni statistiche delle attenuazioni allestite su singoli percorsi, nonché le probabilità di oltrepassare certe intensità di precipitazioni, determinanti per singoli punti, possono essere applicate alla pianificazione nei limiti in cui si dispongono di dati sulle morfologie delle regioni piovose. Per ottenere queste informazioni sono state analizzate mediante radar meteorologico le strutture delle precipitazioni su un percorso dell'Altipiano e delle Prealpi lungo 70 km. Come si può rilevare dalla descrizione statistica delle regioni piovose, l'estensione media di zone piovose è di 4,5 km e la distanza media tra di loro è di 10 km. La probabilità della presenza di parecchie zone piovose può essere trascurata solo con riserva. Si indica la probabilità di sorpasso dell'attenuazione per singola zona piovosa.

## 1 Einleitung

Die Nachfrage nach Fernmeldekanälen verlangt den Weiterausbau der sich gegenseitig ergänzenden leitungsgebundenen und drahtlosen Verbindungen. Eine Vermehrung der drahtlosen Kanäle bedingt die Erschliessung neuer Frequenzbänder oberhalb 10 GHz. Damit sind einerseits neue technische Anlagen zu entwickeln, andererseits deren möglicher Einsatz durch Ausbreitungsversuche abzuklären.

Von wesentlicher Wirkung auf das Ausbreitungsverhalten von Wellen kleiner als 1 m sind die Einflüsse des Geländes und der meteorologischen Bedingungen, wobei letztere wiederum merklich von den Geländeformen abhängen können. Die rein topografischen Einflüsse bestehen vorwiegend im Auftreten von Beugungsdämpfungen bei ungenügender Sichtfreiheit zwischen Sender und Empfänger. Mikrowellenverbindungen werden deshalb der Geländestruktur entsprechend geplant.

Die meteorologischen Einflüsse auf das Ausbreitungsverhalten von Wellenlängen kleiner als 1 m sind zweifacher Art: Einerseits können an Volumen oder Schichten mit unterschiedlichem Brechungsindex Reflexionen auftreten, welche die Ursachen des bekannten Mehrwegschwundes darstellen. Andererseits werden infolge der dämpfenden Wirkung von Regenzellen Absorptionerscheinungen beobachtet. Welchem dieser beiden Einflüsse die grössere Bedeutung zukommt, ist von der Streckenlänge und der Frequenz abhängig. Die durch Starkregen verursachten Dämpfungen nehmen ungefähr quadratisch mit der Frequenz zu. Sie sind auf Betriebsstrecken schon bei 6 GHz

feststellbar und gelten für Frequenzen über 10 GHz als die für die Planung massgebende Grösse. Bei der Erschliessung höherer Frequenzbänder ist deshalb der dämpfenden Wirkung von Regenzellen besondere Beachtung zu schenken.

Starkregen sind von kurzer Dauer und begrenzter Ausdehnung. Man spricht daher von Regenzellen. Die Kenntnis der Struktur von Regenzellen ist für die Planung von Mikrowellenverbindungen von ähnlicher Bedeutung wie die Kenntnis der Geländeformen. Die Struktur von Regenzellen muss statistisch beschrieben werden, wobei unter anderem die mittlere Grösse der Zellen besonders interessiert. Für die Wahl der Strecken sollen die Gebiete mit häufigem Auftreten grosser Dämpfungen bekannt sein.

## 2 Problemstellung

Mit dem Ziel, Hinweise für die Planung von Versuchs- oder Betriebsstrecken zu erhalten, waren die charakteristischen Grössen von Regengebieten entlang einer typischen schweizerischen Richtstrahlstrecke zu bestimmen.

Diese Aufgabenstellung verlangt somit, nebst einer Beschreibung der Struktur von Regengebieten, die Ermittlung der Regendämpfung in Abhängigkeit der Streckenlänge und Angaben über den möglichen Einfluss der Mikroklimas. Den für Richtstrahlverbindungen geforderten Betriebssicherheiten entsprechend, sind vor allem die mit Wahrscheinlichkeiten von  $P < 1\%$  auftretenden Fälle starker Dämpfungen zu diskutieren.

Ausbreitungsmessungen zwischen zwei festen Punkten liefern quantitativ genaue Resultate nur für diese Strecke.

Will man von den erhaltenen Ergebnissen auf die Ausbreitungsverhältnisse auf anderen Strecken schliessen, ergeben sich Unsicherheiten quantitativer und qualitativer Art. Dauerregistrierungen auf mehreren Strecken führen zu einem hohen Aufwand. Zur Lösung der vorliegenden Aufgabe war daher eine Methode zu benützen, die mit kleinerem Aufwand die Einflüsse der Streckenlänge und des Mikroklimas auf die bei Richtstrahlverbindungen zu erwartenden Regendämpfungen qualitativ gut zu bestimmen erlaubt.

### 3 Zusammenhänge zwischen atmosphärischer Dämpfung und anderen meteorologischen Grössen

Wegen der ausgeprägten Abhängigkeit der atmosphärischen Dämpfung von Wetterbedingungen sowie der starken Unterschiedlichkeit der verschiedenen Makro- und Mikroklimas sind die Zusammenhänge zwischen der atmosphärischen Dämpfung und anderen meteorologischen Grössen von besonderem Interesse: Die für eine Strecke ermittelte Dämpfungsstatistik sollte es ermöglichen, auf die an andern Orten zu erwartenden Ausbreitungsverhältnisse zu schliessen. Die Kenntnis des Tropfenspektrums, das heisst die Häufigkeit der verschiedenen Tropfengrössen je Volumen, erlaubt eine Berechnung der am Ort dieses Volumens auftretenden Dämpfungen. Leider lässt sich aber das Tropfenspektrum gerade in den Fällen grosser Dämpfung, also bei Gewitterstürmen und Aufwinden, nicht genau bestimmen.

Da für viele Gebiete bereits langjährige Statistiken der Regenintensität bestehen, liegt es nahe, einen Zusammenhang zwischen der Dämpfung  $\gamma_r$  (in dB/km) und der Regenintensität  $R$  (in mm/h) zu suchen. Als Beschreibung dieser Beziehung eignet sich eine Formel folgender Art

$$\gamma_r = K \cdot R^\alpha \quad (1)$$

$K$  und  $\alpha$  sind frequenzabhängige Grössen, wobei für den Frequenzbereich  $F = 6 \dots 20$  GHz  $\alpha$  zwischen 1,36 und 1,06 variiert [1] (Fig. 1).

Die auf kurzen Strecken und unter Einsatz mehrerer Regenmesser durchgeführten Ausbreitungsversuche zeigten, dass die Abhängigkeit der Dämpfung  $\gamma_r$  von der augenblicklichen Regenintensität  $R$  bloss auf einen Faktor 2 genau angegeben werden kann [2]. Gesamtdämpfungen von über 15 dB sollten daher nicht mehr aufgrund der Regenmessungen berechnet werden.

Die Streuung der bei gleicher Regenintensität gemessenen Dämpfungswerte hat zwei miteinander in einem Zusammenhang stehende Ursachen: Einerseits können

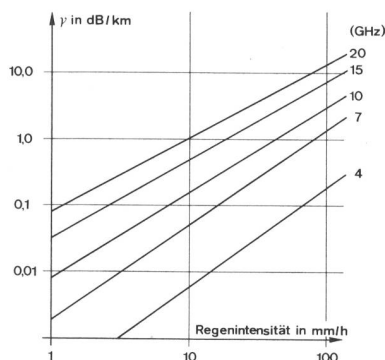


Fig. 1  
Dämpfungsfaktor  $\gamma$  als Funktion der Regenintensität und der Frequenz

die Tropfenspektren bei gleicher Regenintensität verschieden sein [3], andererseits ist beim Vorhandensein vertikaler Luftströmungen die Regenintensität kein genaues Mass für den Volumenanteil des kondensierten – das heisst die Dämpfung verursachenden – Wassers in der Atmosphäre. Wäre  $R_0$  die ohne vertikale Strömung gemessene Regenintensität, so wird bei einem Aufwind  $v$  und demselben Wassergehalt eine Regenintensität  $R' < R_0$  gemessen; denn die Tropfenfallgeschwindigkeit ist um den Betrag  $v$  geringer. Zur Abschätzung mag folgende Formel verwendet werden

$$R' \approx R_0 \left[ 1 - \frac{v}{v_0} \right] \quad (2)$$

wobei der Nenner  $v_0$  vom Regentropfenspektrum abhängt und die Grössenordnung von 3 m/s aufweist. Hangwinde mit einer Vertikalkomponente dieser Grösse sind keine Seltenheit, und in Gewittern treten Aufwinde bis zu 30 m/s auf, womit der wesentliche Einfluss von Vertikalströmungen verständlich wird. Eine Abschätzung des Gehaltes an kondensiertem Wasser in der Atmosphäre ist jedoch auch aufgrund von Wetterradarbeobachtungen möglich. Feststellbar ist dabei der durch die untenstehende Formel definierte Reflektivitätskoeffizient

$$Z = \frac{1}{\tau} \sum d_i^6 \quad (3)$$

dabei bedeutet  $d_i$  der Durchmesser des  $i$ -ten Tropfens im Volumen  $\tau$ .

Der Zusammenhang zwischen dem Reflektivitätskoeffizienten  $Z$  und der Regenintensität  $R$  ist für die Meteorologie von Wichtigkeit und ist eingehend untersucht worden. Als Beziehung zwischen  $R$  und  $Z$  wird angegeben

$$Z \approx Z_r \left( \frac{R}{\text{mm/h}} \right)^{1,5} \quad (4)$$

wobei  $Z_r = 250 \text{ (mm}^6/\text{m}^3)$

Auch diese Formel ist wegen der Verschiedenartigkeit der Tropfenspektren und des Einflusses vertikaler Luftströmungen mit einem Unsicherheitsfaktor behaftet [4], [5]. Wesentlich höhere  $Z$ -Werte als aufgrund der Regenintensität berechnet, beobachtet man deshalb während Wettersituationen, bei denen ebenfalls bezüglich der Formel (1) erhöhte Dämpfungen  $\gamma_r$  festgestellt worden sind.

Es liegt deshalb nahe, nach einer Beziehung zwischen der Dämpfung  $\gamma_r$  und des als meteorologischen Grösse beobachtbaren Reflektivitätskoeffizienten  $Z$  zu suchen. Zur Beschreibung eignet sich eine Formel der nachstehenden Art

$$\gamma_r = a_z \cdot Z^q \quad (5)$$

wobei  $a_z$  und  $q$  von der Frequenz abhängig sein müssen. Aus Formel (1) und (4) ergibt sich

$$\left. \begin{aligned} a_z &= K/Z_r^q \\ q &= \alpha/1.5 \end{aligned} \right\} \quad (5a)$$

Im Gebiet der Nullgradgrenze, das heisst der Schmelzzone, treten höhere Dämpfungen auf; für diese Volumina ist in Formel (5) ein Korrekturfaktor einzufügen.

Vertikale Luftströmungen sind schwer messbar und müssen deshalb in solchen Formeln unberücksichtigt bleiben. Sie beeinflussen die Beziehung zwischen der Dämpfung  $\gamma_r$  und dem Reflektivitätskoeffizienten  $Z$ , aber

wohl in geringerem Masse als diese zwischen  $\gamma_r$  und der Regenintensität R.

Für die auf einer Richtstrahlstrecke auftretenden Dämpfungen ist der Wassergehalt in dem durch die ersten Fresnelzonen bestimmten Volumen von Bedeutung, während Wetterradarmessungen nur den Mittelwert des Reflektivitätskoeffizienten über die ganze Antennenstrahlbreite zu bestimmen erlauben. Gemäss einer Auswertung der von J. Joss in Locarno-Monti (Meteorologische Zentralanstalt) durchgeführten Vertikalsondierungen kann sich der über ein Höhenintervall von rund 1500 m gemessene Mittelwert um den Faktor 2 von dem an einem einzelnen Punkt innerhalb dieses Höhenbereiches vorhandenen Z-Wert unterscheiden. Zieht man in Betracht, dass die Achsen schweizerischer Richtstrahlverbindungen 100 bis 1000 m oder mehr über dem Erdboden verlaufen, so müssen auch beim Fehlen störender Aufwinde die in der Höhe der Strahlachse vorhandenen und die am Boden gemessenen Regenintensitäten ähnliche Unterschiede aufweisen. Die Frage, ob sich der Gehalt an kondensiertem Wasser in der Höhe der Strahlachse von Richtstrahlverbindungen genauer aufgrund von Regenmessungen oder Wetterradarbeobachtungen bestimmen lässt, kann nicht allgemein gültig beantwortet werden.

Es liegt in der Natur der Sache, dass sich zwischen den beobachtbaren Grössen der Regenintensität R, der Dämpfung  $\gamma_r$  und des Reflektivitätskoeffizienten Z nur Gesetze mit einem Ungenauigkeitsfaktor von bestenfalls 1,5...2,0 angeben lassen. Solche quantitativen Unsicherheiten erlauben bei zweckmässiger Wahl der Auswerteverfahren immer noch die Bestimmung der Grössenordnungen (Faktor 3...10) sowie die Herleitung qualitativer Beziehungen. Die Bedeutung, die den genannten Ungenauigkeitsfaktoren jedoch zukommt, hängt wesentlich von den ermittelten Grössenordnungen und qualitativen Zusammenhängen ab. Wie aus der Diskussion der Messresultate hervorgeht, erlauben deshalb die Radarbeobachtungen die Formulierung begründeter Schlussfolgerungen.

## 4 Die Messmethode

### 4.1 Messanordnung

Der Problemstellung gemäss muss mit dem Wetterradar das für Richtstrahlverbindungen wesentliche Volumen der Troposphäre erfasst werden. Die Reichweite soll daher mindestens 50 km und die Elevation höchstens  $2^\circ$  betragen. Bei tiefen Messfrequenzen F ist die an Hydrometeoriten gestreute Leistung gering, während bei hohen Messfrequenzen die nicht genau erfassbaren Absorptionsdämpfungen an Einfluss gewinnen. Unter Berücksichtigung messtechnischer Grössen wird als optimaler Wert  $3 \text{ GHz} \leq F \leq 5 \text{ GHz}$  angegeben. Der Durchmesser der verwendeten Antenne sollte 5 m nicht übersteigen. Der erreichbare Antennengewinn beträgt dann 40...45 dB. Soll nun in einem Abstand von 50 km ein Regengebiet von der Intensität  $R = 10 \text{ mm/h}$  mit einem örtlichen Auflösungsvermögen von 1 km erfasst werden können, so bedeutet dies, dass ein um 140...150 dB unterhalb der Senderleistung liegendes Empfangssignal detektiert werden muss. Wegen der niedrigen Elevation und des Strahlöffnungswinkels von rund 0,04 Radian können dabei Streureflexionen des Geländes störend wirken.

Im Abstand von 30 km beträgt die Strahlbreite somit etwa 1000 m. Grosse Regentropfen von 5 mm Durchmesser

weisen eine Fallgeschwindigkeit von 9 m/s auf und benötigen damit rund 2 Minuten, um in diesem Abstand den Strahl zu durchqueren. Eine Messung alle 2 bis 3 Minuten mag daher genügen.

Die Versuchsanordnung ist aufgrund der obigen Forderungen und mit dem Bestreben nach begrenztem Aufwand gewählt worden. Wir haben deshalb die folgende Messmethode benützt: Ein vertikal polarisierter Richtstrahl wird von der Seite her durch eine in Azimut drehbare Richtantenne über eine Strecke von mehr als 70 km abgetastet. Die durch die drehbare Antenne empfangenen Streusignale erlauben unter Berücksichtigung der Antennenstrahlungsdiagramme die Berechnung des Reflektivitätskoeffizienten in Funktion des Ortes. Eine solche Messanordnung kann als passives Wetterradar bezeichnet werden.

Die geometrische Anordnung ist in *Figur 2* dargestellt. Der Sender befindet sich auf der Richtstrahlstation St. Chrischona bei Basel; die feste Sendeantenne weist gegen das Jungfraujoch. Damit handelt es sich um eine für schweizerische Verhältnisse typische Strecke des Mittellandes und Voralpengebietes. Infolge der Abschirmwirkung durch die südlichste Jurakette sind auf dem untersuchten Abschnitt Geländestreureflexionen vernachlässigbar. Die Empfangsstation ist auf dem Längenberg bei Niedermuhlern erstellt worden. Zwischen Sender und Empfänger beträgt die Summe von Freiraum- und Beugungsdämpfung mehr als 170 dB. Der Empfang der Streusignale wird durch keine Hindernisse gestört. Wie rechnerische und experimentelle Untersuchungen zeigten, sind Nahreflexionen bei der Empfangsstation von untergeordneter Bedeutung. Die Empfangsantenne bewegt sich nach vorgegebenem Programm in der durch die Messstrecke und den Empfangsort bestimmten Ebene. Um Unfälle von Drittpersonen auszuschliessen, werden die Messungen bewacht durchgeführt.

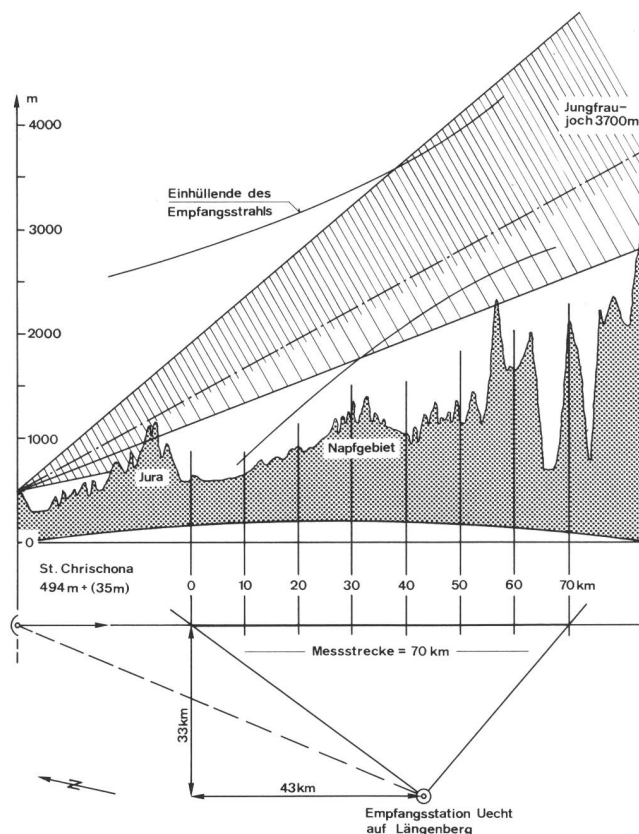


Fig. 2  
Messung von Streureflexionen mit passivem Radar

Mitbestimmend für die Wahl der Richtstrahlverbindung St. Chrischona–Jungfrauoch als Messstrecke für diese Streureflexionsmessungen war die auf St. Chrischona vorhandene Infrastruktur und der Umstand, dass auf dieser Verbindung gleichzeitig durch eine andere Arbeitsgruppe Ausbreitungsmessungen auf 7 und 11 GHz durchgeführt werden. Durch die auf der Richtstrahlstation St. Chrischona wegen möglichen Störungen höchstzulässige Senderleistung ergab sich das Problem, eine entsprechend hohe Empfängerempfindlichkeit zu erreichen. Als zweckmässigste Lösung bot sich die unter dem Namen Radiometer bekannte kohärente Demodulation an. Im vorliegenden Versuch wird von der Empfangsstation aus über Fernmeldeleitung der Sender in St. Chrischona mit einer Frequenz von 10 Hz im Verhältnis 1:1 ausgetastet. Damit ist bei einer HF-Bandbreite von 2 MHz und einer Integrationszeit von 2 Sekunden eine Empfängerempfindlichkeit von  $-140\dots-135$  dBm erzielt worden. Das Blockschema der gesamten Messschaltung ist in *Figur 3* dargestellt. Die wichtigsten technischen Daten sind in *Tabelle 1* aufgeführt.

Tabelle 1. Technische Daten

|   |                       |
|---|-----------------------|
| Messfrequenz                            | 3998,5 MHz            |
| Senderleistung                          | +37 dBm               |
| Sendeanenne                             | 4,28-m-Parabolantenne |
| Empfangsantenne                         | 3-m-Cassegrainantenne |
| Drehgeschwindigkeit der Empfangsantenne | 0,6 oder 0,3 °/s      |
| Rauschzahl des Empfängers               | 6 dB                  |
| Empfindlichkeit                         | $-140$ dBm            |

Nach der kohärenten Demodulation erfolgt eine Mittelwertbildung über 1,8 Grad in Azimut, was ungefähr der Strahlbreite der Empfangsantenne und einer Auflösung von 1 km in der Mitte der Messstrecke und von 2...3 km an deren Enden gleichkommt. Für eine Abtastung werden 3,2 Minuten oder 6,3 Minuten benötigt. Die Ergebnisse aufeinanderfolgender Beobachtungen unterscheiden sich nicht wesentlich, so dass auch eine Messung alle 6 Minuten noch als genügend bezeichnet werden darf.

Messresultate und Eichungen werden mit Linienschreibern und Lochstreifenstanzern registriert. Die Berechnung der Reflektivitätskoeffizienten als Funktion des Ortes

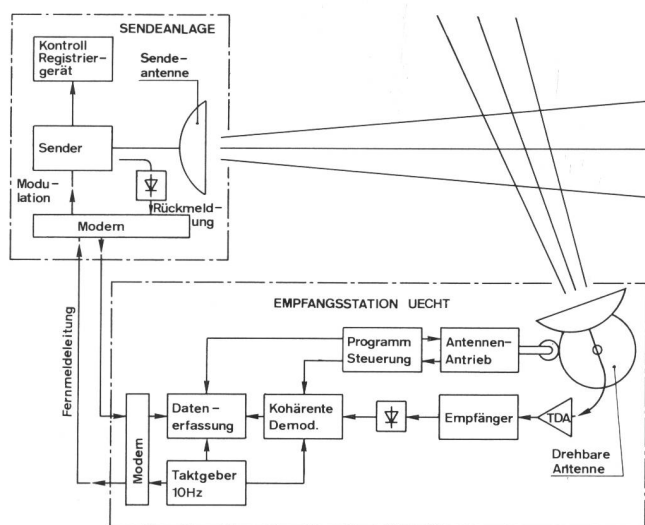


Fig. 3  
Messanordnung für Scatterbeobachtungen

geschieht durch Rechenautomaten. Vor und nach dieser Umrechnung werden die Daten Plausibilitätstests unterzogen.

#### 42 Diskussion der Messfehler

Im folgenden geben wir einerseits Art und Grösse der möglichen Messfehler an und diskutieren andererseits, wie diese die Zuverlässigkeit der Aussagen beeinflussen können. Ferner interessiert auch, als wie repräsentativ die Messungen zu betrachten sind.

Die Bestimmungen der Senderleistung, der Antennengewinne, der Verluste und der Empfängerempfindlichkeit sind je mit einem Fehler von ungefähr 0,4 dB behaftet, was bedeutet, dass der Reflektivitätskoeffizient  $Z$  im günstigsten Fall auf  $-37\%/+60\%$  oder mit einem Ungenauigkeitsfaktor von 1,6 ( $\leq 2$  dB) bekannt sein kann. Optimistische beziehungsweise pessimistische Fehlerschätzungen haben im vorliegenden Fall Ungenauigkeitsfaktoren von 2,4 oder 4,3 ( $\leq 3,8$  beziehungsweise 6,3 dB) ergeben, und es darf mit einem mittleren Wert von 3,3 ( $\leq 5,2$  dB) gerechnet werden. Wenn jedoch bei der Untersuchung der Struktur von Regengebieten nur relative Werte interessieren, sind in der Fehlerschätzung nur die Variationen infolge Alterung und Abnutzung zu berücksichtigen, wodurch sich ein mittlerer Ungenauigkeitsfaktor von ungefähr 2 ( $\leq 3$  dB) ergeben hat. Handelt es sich ferner bei den Endresultaten um einen Vergleich von über dieselben Zeitintervalle gebildeten Mittelwerte, so ergibt sich damit eine weitere Reduktion des Ungenauigkeitsfaktors.

Der Berechnung des Reflektivitätskoeffizienten aufgrund der empfangenen Streusignale muss besondere Beachtung geschenkt werden. Zu berücksichtigen sind dabei die Formen der beiden Hauptstrahlungskeulen und die wegen der teilweisen Abschirmung durch die Jurakette entstehenden Strahlungsverluste. Bei dieser Umrechnung und der nachfolgenden Datenverarbeitung beträgt der Unsicherheitsfaktor gesamthaft 1,5 ( $\leq 1,8$  dB). Zu einem guten Teil handelt es sich dabei um systematische Fehler. Solche Fehler verlieren bei Vergleichen an Bedeutung. Für Aussagen über die relativen Werte der Reflektivitätskoeffizienten  $Z$  ist der von Umrechnung und Datenverarbeitung herührende Fehler nur noch auf etwa 1,2 ( $\leq 0,8$  dB) zu veranschlagen. Da der messtechnische Fehler geringer als 2 ist, ergibt sich im gesamten ein Unsicherheitsfaktor von weniger als 2,4 ( $\leq 3,8$  dB).

Von rund 5000 Abtastungen konnten für die Datenverarbeitung 2000 auf einer Disk gespeichert werden. Hiefür sind die Messreihen mit den grössten Empfangssignalen ausgewählt worden. Dabei handelt es sich um Daten von 31 verschiedenen Tagen und einer gesamten Registrierdauer von 119,8 Stunden. Im Vergleich dazu treten im Mittelland und Voralpengebiet je regenreichen Monat im Mittel 15 Regentage auf, und ebenfalls im Monat wird während gesamthaft rund 60 Stunden eine Regenintensität von etwa 2 mm/h überschritten.

Damit sind die für Fernmeldeverbindungen ungünstigen Zeiten von zwei regenreichen Monaten berücksichtigt. Während aus betrieblichen Gründen Dauerregistrierungen unmöglich waren und deshalb einige seltene Ereignisse nicht erfasst werden konnten, haben andererseits durch die Auswahl der verarbeiteten Werte die verhältnismässig starken Regenfälle ein höheres Gewicht erhalten, was sich in den Statistiken wiederum kompensierend auswirkt. Über Jahre variieren die Niederschlagsmenge und die

Anzahl der Regentage für einen bestimmten Monat im Verhältnis 1:2. Damit ist bei den Versuchen, die sich über 1½ Jahre erstreckten, die Frage der möglichen Vernachlässigung seltener Ereignisse gegenstandslos.

## 5 Messergebnisse und deren Interpretation

### 51 Allgemeines

Die Resultate erlauben einmal phänomenologische Betrachtungen. *Figur 4* zeigt in perspektivischer Darstellung entlang der Messstrecke festgestellte Reflektivitätskoeffizienten als Funktion des Ortes und der Zeit. Die Regenzellen treten dabei als einzelne «Hügel» in Erscheinung. Ansammlungen solcher Regenzellen nennt man Regengebiete. Entlang einer Richtstrahlstrecke lässt sich häufig mehr als eine Regenzelle beobachten. Wie dieses Beispiel ferner zeigt, sind Modelle von Regenzellen und Regengebieten durch statistische Auswertungen zu erarbeiten.

### 52 Mittlere Ausdehnung von Regenzellen und Regengebieten

Regenzellen sind durch ihre Lebensdauer, ihre räumliche Ausdehnung und durch die Grösse der Regenintensität  $R$  oder des Reflektivitätskoeffizienten  $Z$  beschreibbar. In *Figur 4* ist die mittlere Lebensdauer einer Regenzelle auf einer Strecke erkennbar; sie liegt in der Grössenordnung von 10 Minuten.

Die Ausdehnungen der Regenzellen entlang der Strecke lassen sich mit Hilfe der folgenden Wahrscheinlichkeitsfunktion herleiten

$$P = P(Z \geq Z_0 | l \geq l_0) \quad (6)$$

$P$  ist die Wahrscheinlichkeit, eine Regenzelle beobachten zu können, bei der über eine Länge von mindestens  $l_0$  der Reflektivitätskoeffizient  $Z$  einen vorgegebenen Wert  $Z_0$  dauernd überschreitet.

Je länger die Versuchsstrecke  $D_0$ , desto höher die Wahrscheinlichkeit, solche Regenzellen anzutreffen;  $P$  ist also proportional zu  $D_0$ . Aufgrund der Messergebnisse erscheint die folgende Näherungsformel zur Beschreibung von  $P$  als zweckmässig

$$P(Z \geq Z_0 | l \geq l_0) = D_0 \cdot P_0(Z_0) \cdot \exp\left\{-\frac{l_0}{l_r}\right\} \quad (7)$$

wobei  $D_0$  die Länge der Beobachtungsstrecke  
 $P_0(Z_0)$  ein von  $Z_0$  abhängiger Faktor  
 $l$  die Länge, über welche  $Z$  den Wert  $Z_0$  überschreitet

Die Grösse  $l_r$  kann als mittlere Ausdehnung von Regenzellen mit  $Z \geq Z_0$  bezeichnet werden. Mit zunehmendem  $Z_0$  nimmt  $l_r$  ab. Der Zusammenhang zwischen  $l_r$  und  $Z_0$  lässt sich durch die folgende Näherung beschreiben

$$l_r = \{4,5 - 1,75 \cdot \lg(Z_0/Z_1)\} \text{ km} \quad (7.1)$$

Die Messungen haben für die Konstante einen Wert von  $Z_1 \approx 10^4 \text{ mm}^6/\text{m}^3$  ergeben. Unter Berücksichtigung der Abschätzung (4) kann der Zusammenhang zwischen  $l_r$  und der Regenintensität  $R$  bestimmt werden.

Ist  $P_1(Z \geq Z_0)$  die Wahrscheinlichkeit, dass an einem vorgegebenen Punkt  $Z \geq Z_0$ , so folgt aus (7) die Beziehung

$$l_r \cdot P_0(Z_0) = P_1(Z \geq Z_0) \quad (7.2)$$

Die Formel (4) erlaubt von Regenstatistiken auf  $P_1(Z \geq Z_0)$  und damit auf  $P_0(Z_0)$  zu schliessen.

Aufgrund der Messungen lässt sich die Abhängigkeit des Faktors  $P_0(Z_0)$  von  $Z_0$  näherungsweise beschreiben durch

$$P_0(Z_0) = P_{00} \left( \frac{Z_0}{\text{mm}^6/\text{m}^3} \right)^s \quad (8)$$

Für den Bereich  $3 \cdot 10^3 \text{ mm}^6/\text{m}^3 \leq Z_0 \leq 3 \cdot 10^4 \text{ mm}^6/\text{m}^3$  und  $l_0 \leq 10 \text{ km}$  ergeben sich gute Approximationen durch

$$P_{00} = 5,5 \text{ km}^{-1} \text{ und } s = -1,2 \text{ für mittlere Werte von } Z_0$$

oder  $P_{00} = 0,87 \text{ km}^{-1}$  und  $s = -1,0$  als eher pessimistische Abschätzung für grössere Werte von  $Z_0$ .

Von gleicher Bedeutung wie die mittlere Ausdehnung einer Regenzelle ist die mittlere Ausdehnung eines Regengebieten. Auch diese Grösse lässt sich aufgrund berechneter Wahrscheinlichkeitsfunktionen angeben.

Es seien  $Z_1$  beziehungsweise  $Z_2$ , die zur gleichen Zeit an den Orten  $x_1$  oder  $x_2$  beobachtbaren Reflektivitätskoeffizienten. Wir interessieren uns nun für die Wahrscheinlichkeit  $P_G$ , dass sowohl  $Z_1$  wie  $Z_2$  gleich oder grösser als ein vorgegebener Wert  $Z_0$  sei,

$$P_G = P_G(Z_1 \geq Z_0 | Z_2 \geq Z_0) \quad (9)$$

Diese Wahrscheinlichkeit hängt ausser von  $Z_0$  auch von  $x_1$  und  $x_2$  ab. Setzen wir jedoch  $x_2 = x_1 + \Delta x$ , so ist die über alle möglichen  $x_1$ -Werte gemittelte Wahrscheinlichkeit  $\bar{P}_G$  nur noch eine Funktion von  $Z_0$  und  $\Delta x$ , also

$$\bar{P}_G = \bar{P}_G(Z_0, \Delta x)$$

Die aufgrund der Wetterradarmessungen berechneten Wahrscheinlichkeiten  $\bar{P}_G$  sind in *Figur 5* in Funktion von  $\Delta x$  für verschiedene Werte von  $\xi_0 = 10 \cdot \lg(Z_0/\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3})$  aufgezeichnet. Dabei entspricht gemäss Formel (4) ein  $\xi_0 = 32$  einer Regenintensität  $R \approx 3,5 \text{ mm/h}$ , also einem Landregen, während Werte von  $\xi_0 \geq 40$  bei Regenstärken von über  $10 \text{ mm/h}$  auftreten.

Je kürzer die Entfernung  $\Delta x$  zwischen den beiden Punkten  $x_1$  und  $x_2$ , desto besser ist die Korrelation der Reflektivitätskoeffizienten  $Z_1(x_1)$  und  $Z_2(x_2)$  und um so höher daher die Wahrscheinlichkeit, dass  $Z_1(x_1)$  und  $Z_2(x_2)$  gleichzeitig den Wert  $Z_0$  überschreiten. Die grössten  $\bar{P}_G(Z_0, \Delta x)$  treten

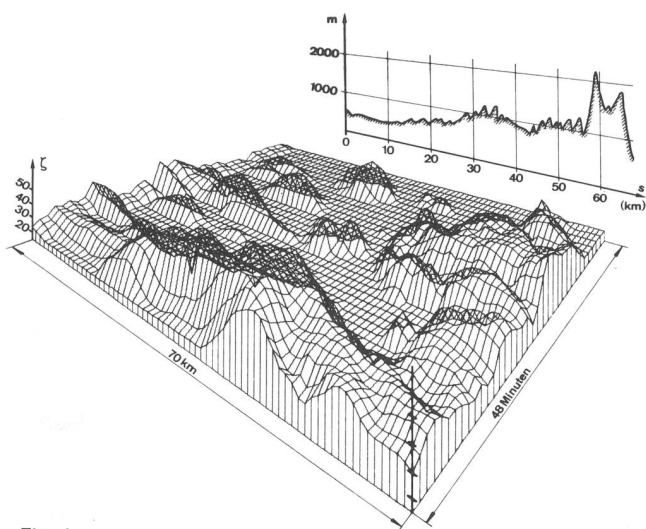


Fig. 4  
 $Z$  als Funktion des Ortes und der Zeit

$$\zeta = 10 \cdot \lg \left( \frac{Z}{\text{mm}^6/\text{m}^3} \right)$$

Datum: 09 09 73 19 02

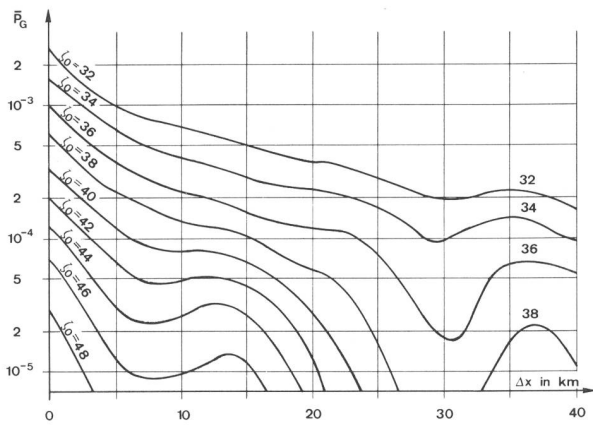


Fig. 5  
 $P_G(Z_0, \Delta x)$  in Funktion von  $\Delta x$

$$\xi_{z_0} = 10 \cdot \lg \left\{ \frac{Z_0}{\text{mm}^6/\text{m}^3} \right\}$$

daher bei  $\Delta x = 0$  auf. Ist die Entfernung zwischen den beiden Orten  $x_1$  und  $x_2$  jedoch grösser als die mittlere Ausdehnung eines Regengebietes, ist es weniger wahrscheinlich, dass sich sowohl über  $x_1$ , wie über  $x_2$  eine Regenzone befindet. Dementsprechend wird für solche Abstände  $\Delta x$  die Wahrscheinlichkeitsfunktion  $\bar{P}_G(Z_0, \Delta x)$  geringere Werte aufweisen.

Wie aus Fig. 5 hervorgeht, weist im besonderen bei stärkerem Regen die Wahrscheinlichkeitsfunktion  $\bar{P}_G(Z_0, \Delta x)$  für  $\Delta x = 8$  km ein erstes schwaches und für  $\Delta x = 25 \dots 30$  km ein zweites ausgeprägtes Minimum auf. Die Länge von 25...30 km ist als die mittlere Ausdehnung der auf der Messstrecke festgestellten Regengebiete zu bezeichnen. Zur Abschätzung, inwiefern diese Grösse von den konkreten topografischen und klimatischen Bedingungen abhängt, ist zu erwähnen, dass durch A.E. Freeny in flachem Gelände das erste Minimum bei  $\Delta x = 12$  km festgestellt worden ist [6].

Die Minima und Maxima von  $\bar{P}_G$  weisen auf das Vorhandensein eines mittleren Abstandes  $d$  der Regenstellen hin (Analogon: Karmansche Wirbelstrasse). Bezeichnen wir mit  $d_{25}$  den oberen Quartilwert, mit  $d_{50}$  den Medianwert und mit  $d_{75}$  den unteren Quartilwert der Abstände  $d$  der Mittelpunkte (nicht Schwerpunkte!) zweier Regenstellen, so können folgende Anhaltspunkte für die Statistik von  $d$  angegeben werden.

Für  $10^3 \text{ mm}^6/\text{m}^3 \leq Z_0 \leq 10^4 \text{ mm}^6/\text{m}^3$ :

$$\begin{aligned} d_{25} &\approx 20 \text{ km} \\ d_{50} &\approx 12 \text{ km} \\ d_{75} &\approx 8 \text{ km} \end{aligned}$$

Für  $10^4 \text{ mm}^6/\text{m}^3 \leq Z_0 \leq 10^5 \text{ mm}^6/\text{m}^3$ :

$$\begin{aligned} d_{25} &\approx \left( \frac{10^4 \text{ mm}^6/\text{m}^3}{Z_0} \right)^{0,5} \cdot 20 \text{ km} \\ d_{50} &\approx \left( \frac{10^4 \text{ mm}^6/\text{m}^3}{Z_0} \right)^{0,5} \cdot 12 \text{ km} \\ d_{75} &\approx \left( \frac{10^4 \text{ mm}^6/\text{m}^3}{Z_0} \right)^{0,5} \cdot 8 \text{ km} \end{aligned}$$

Somit nehmen mit wachsendem  $Z_0$  nicht bloss die Ausdehnungen der Regenstellen, sondern auch ihre gegenseitigen Abstände ab.

Für die Abschätzung möglicher Regendämpfungen müssen unter anderem die Wahrscheinlichkeiten  $P_2$  beziehungsweise  $P_3$ , dass bei Vorhandensein einer ersten Regenzone auf der Strecke zwischen Sender und Empfänger zugleich eine zweite oder eine dritte Zelle beobachtet werden kann, bekannt sein. Fig. 5 erlaubt die Grössenordnung von  $P_2$  anzugeben. Es ist  $P_2 \approx P_G(\Delta x > 10 \text{ km}) / P_G(\Delta x = 0) \approx 0,1 \dots 0,2$ . Solche Wahrscheinlichkeiten sind bei Dämpfungsberechnungen nur bedingt vernachlässigbar.

Die Wahrscheinlichkeit  $P_2$  für das Auftreten einer zweiten Regenzone ist abhängig von der Streckenlänge, dem Reflektivitätsfaktor  $Z_0$ , der innerhalb der Zelle überschritten wird, sowie vom Orte, das heisst vom Gelände. Für  $10^{3,7} \text{ mm}^6/\text{m}^3 \leq Z_0 \leq 10^5 \text{ mm}^6/\text{m}^3$  gilt näherungsweise

$$P_2 \approx P_{20} \cdot \left( \frac{Z_0}{10^4 \text{ mm}^6/\text{m}^3} \right)^\chi \quad ; \quad P_3 \approx P_2^2 \quad (10)$$

wobei  $P_{20}$  ein von der Streckenlänge und vom Gelände abhängiger Faktor,  $\chi$  ein Exponent, der je nach Streckenlänge und Gelände zwischen 0,5 und 1,0...1,5 variiert; er nimmt mit zunehmender Streckenlänge ab. Je höher  $Z_0$ , das heisst je höher die Regenintensität, umso grösser auch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer zweiten Regenzone. Für  $Z_0 = 5 \cdot 10^4 \text{ mm}^6/\text{m}^3$  können Werte von  $P_2 = 0,5$  festgestellt werden. Die Zunahme von  $P_2$  mit wachsendem  $Z_0$  steht mit der Erfahrung, dass Unwetter nur über topografisch beschränkten Gebieten auftreten, nicht im Widerspruch; denn Zellen mit höherem  $Z_0$  sind im Mittel weniger voneinander entfernt. Wenn  $P_2$  mit wachsendem  $Z_0$  zunimmt, so bedeutet dies nur, dass sich innerhalb einer Regenzone mit  $Z_0 = Z_1$  mehr als eine Zelle mit  $Z_0 = Z_2 > Z_1$  befinden kann.

Für Werte von  $Z_0 < 10^4 \text{ mm}^6/\text{m}^3$  ändert  $P_2$  weniger mit  $Z_0$ ; es scheint hier kein ausgeprägter Zusammenhang zwischen  $P_2$  und  $Z_0$  zu bestehen.

### 53 Einfluss des Geländes

Die Messstrecke führt über Gebiete unterschiedlicher monatlicher Niederschlagsmengen. Es ist daher eine Ortsabhängigkeit des Reflektivitätskoeffizienten  $Z$  zu erwarten. Zur Untersuchung dieses Sachverhaltes haben wir für die verschiedenen Punkte die Summenhäufigkeiten von  $Z$  berechnet (Fig. 6a). Die Summenhäufigkeiten der entlang der Messstrecke festgestellten Regenmengen der Tage, an welchen Radarbeobachtungen durchgeführt worden sind, lassen sich aus Fig. 6c ablesen.

Über dem Napfgebiet treten grössere Reflektivitätskoeffizienten  $Z$  und Niederschlagshöhen  $H$  als über dem Mittelland auf. Entgegen den ersten Erwartungen stimmen jedoch die Orte der Maxima von  $Z$  nicht mit denen von  $H$  überein. Dies kann teilweise damit erklärt werden, dass die momentanen Regenintensitäten  $R$  bessere Anhaltspunkte für die zu erwartenden Reflektivitätskoeffizienten  $Z$  darstellten als die täglichen Niederschlagshöhen  $H$ .

Wie ein Vergleich mit dem Geländeprofil (Fig. 6b) zeigt, treten die grösseren Niederschlagsmengen auf den höheren Gebirgen auf, während die Maximalwerte von  $Z$  über dem Nord- und dem Südhang des Napfgebietes beobachtet worden sind. Ebenfalls ist eine Zunahme von  $Z$  gegen die Jurakette hin feststellbar.

Dass über Geländeanstiegen Zonen mit höheren Reflektivitätskoeffizienten  $Z$ , das heisst grösserer Dämpfung  $\gamma_r$  beobachtet worden sind, kann durch die folgenden Plausibilitätsbetrachtungen erklärt werden: Bewegen sich Luft-

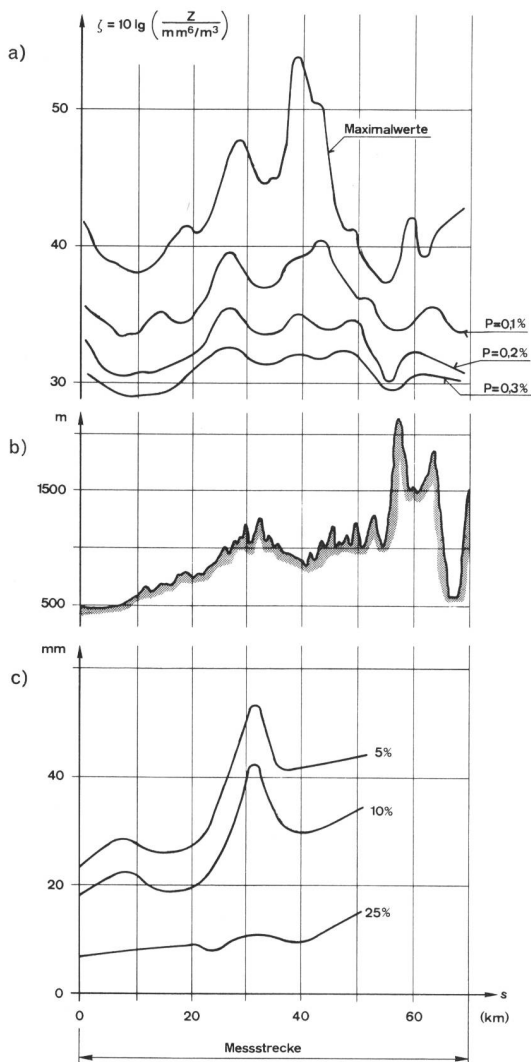


Fig. 6a  
Summenhäufigkeiten des Reflektivitätsfaktors Z als Funktion des Ortes

P = Überschreitungswahrscheinlichkeit pro regenreichen Monat

Fig. 6b  
Geländeprofil

Fig. 6c  
Summenhäufigkeit der täglichen Niederschlagshöhen

massen auf ein ansteigendes Gelände zu, so müssen sie zugleich in höhere Lagen verschoben werden. Dadurch kühlen sie sich ab, was eine (weitere) Kondensation des in ihnen gelösten Wassers zur Folge hat. Wegen des vorhandenen Aufwindes fallen die Tropfen mit geringerer absoluter Fallgeschwindigkeit, was eine weitere Erhöhung des Reflektivitätskoeffizienten zur Folge hat. Durch den beschriebenen Mechanismus können sich also orografische, das heisst durch die Geländeform bedingte Zonen höherer Dämpfung  $\gamma_r$  bilden. Diese Arbeitshypothese erscheint hier als zweckmässig und ist durch weitere Messungen besser zu überprüfen.

#### 54 Berechnete und gemessene Dämpfungen

Formel (5) erlaubt von den Reflektivitätskoeffizienten Z auf die gesamte über einer Strecke auftretende Regendämpfung  $A_r$  zu schliessen. Es gilt

$$A_{rc} = \int_{x_1}^{x_2} \gamma_r(x) \cdot dx = a_z \int_{x_1}^{x_2} Z^q(x) \cdot dx \quad (11)$$

wobei  $A_{rc}$  die gesamte berechnete Regendämpfung,  $x_1$  und  $x_2$  die Endpunkte der Strecke.

Auf Fig. 7 sind die zwischen St. Chrischona und Jungfrauoch bei 7 GHz gemessene Regendämpfung  $A_{rm}$  und die für die 70 km lange Messstrecke berechnete Dämpfung  $A_{rc}$  einander gegenübergestellt, wobei für  $a_z = 0,2 \cdot 10^{-4}$  dB/km und für  $q = 0,905$  eingesetzt worden sind\*. Die Unterschiede zwischen der gemessenen Dämpfung  $A_{rm}$  und der berechneten  $A_{rc}$  können damit erklärt werden, dass sich einerseits  $A_{rc}$  nur für einen Teil der Richtstrahlstrecke St. Chrischona–Jungfrau bestimmen lässt und andererseits die mit Wetterradar gemessenen Mittelwerte der Reflektivitätskoeffizienten Z bis um den Faktor 2 von den Z-Werten innerhalb der Fresnelzone abweichen können (vgl. Abschnitt 3).

In den bisher beobachteten Fällen von starker Regendämpfung stimmten die auf 7 GHz und 11 GHz direkt gemessenen Werte mit den aufgrund der Radarbeobachtungen berechneten qualitativ gut überein. Das Verhältnis zwischen dem Reflektivitätskoeffizienten Z in der Fresnelzone und dem beobachtbaren Mittelwert von Z ist eine zufällig schwankende Grösse. Bei einem Vergleich der Summenhäufigkeiten der gemessenen Dämpfungen  $A_{rm}$  und der berechneten Werte  $A_{rc}$  müssen sich daher geringere Abweichungen als bei der Gegenüberstellung einzelner Beobachtungen ergeben.

#### 55 Die gesamte Regendämpfung als Funktion der Streckenlänge

Der Zusammenhang zwischen der Dämpfungsstatistik und der Streckenlänge wird ebenfalls in Abschnitt 64 diskutiert. Während die dort angegebenen Formeln für «klimatisch homogene» Gebiete gültig sind, werden hier – entsprechend der Definition von  $\hat{A}$  – die ungünstigsten

\* vergl. Formeln (1), (5), (5a) und Bibl. [1]

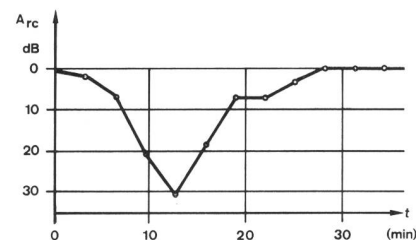
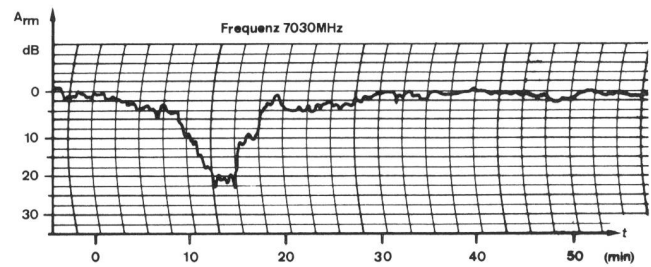


Fig. 7  
Vergleich zwischen gemessener Dämpfung  $A_{rm}$  und berechneter Dämpfung  $A_{rc}$

$$A_{rc} = \int a_z \cdot Z^q dx$$

wobei

$a_z = 0,2 \cdot 10^{-4}$  dB/km

$q = 0,905$

Z in  $(mm^6/m^3)$

Datum: 09 09 73 19 02

Fälle eines topografischen Gebietes mit orografisch bedingten Zonen hoher Dämpfung betrachtet.

Die starken, über einer Strecke auftretenden Niederschlagsdämpfungen  $A_r$  dürfen wegen der ausgeprägten Ungleichförmigkeit der Regenverteilung nicht als proportional zur Streckenlänge  $\Delta x$  vorausgesetzt werden. Ein Vorteil der Wetterradarmessungen besteht nun darin, für die Diskussion des Zusammenhangs zwischen  $A_r$  und  $\Delta x$  geeignete Resultate zu liefern. Es ist zweckmässig, bei diesen Untersuchungen die nachstehend definierten Mittelwerte  $\bar{Z}_q$  der Reflektivitätskoeffizienten  $Z$  zu verwenden.

$$\bar{Z}_q(x_o, \Delta x) = \left\{ \frac{1}{\Delta x} \int_{x_o - \frac{\Delta x}{2}}^{x_o + \frac{\Delta x}{2}} Z^q(x) \cdot dx \right\}^{1/q} \quad (12)$$

dabei ist  $x_o$  der Mittelpunkt und  $\Delta x$  die Länge des Streckenstückes, über das dieser Mittelwert gebildet wird.

$\bar{Z}_q$  ist der für Dämpfungsberechnungen äquivalente Mittelwert von  $Z$ , denn aus den Gleichungen (11) und (12) folgt die zu Formel (5) analoge Beziehung

$$\frac{A_{rc}}{\Delta x} = a_z \cdot (\bar{Z}_q)^q \quad (13)$$

oder  $A_{rc} = \Delta x \cdot a_z \cdot (\bar{Z}_q)^q$

Dabei ist  $A_{rc}$  nicht nur abhängig von der Streckenlänge  $\Delta x$ , sondern auch von  $x_o$ , das heisst vom Gebiet, über das diese Strecke verläuft; also  $A_{rc} = A_{rc}(x_o, \Delta x)$ .

Die uns interessierende Summenhäufigkeit  $P_A$  von  $A_{rc}$  ergibt sich aus der Summenhäufigkeit  $P_{Zq}$  von  $\bar{Z}_q$

$$P_A(A_{rc}) = P_{Zq}(\bar{Z}_q) \quad (14)$$

wobei  $A_{rc}$  und  $\bar{Z}_q$  die Gleichung (13) erfüllen müssen.  $P_{Zq}$  und damit  $P_A$  sind selbstverständlich Funktionen von  $x_o$  und  $\Delta x$ .

Da für Frequenzen bis zu 20 GHz der Wert  $q$  sich zwischen 1,0 und 0,5 ändert, weisen die Mittelwerte  $\bar{Z}_{0,5}$  und  $\bar{Z}_1$  besondere Bedeutung auf. Deren Summenhäufigkeiten sind für verschiedene Werte von  $\Delta x$  in Funktion von  $x_o$  in *Figur 8* dargestellt. Es handelt sich um Zwischenresultate für die Berechnung der im folgenden definierten Grössen.

Entscheidend für die Zuverlässigkeit von Richtstrahlnetzen gegebener Streckenlängen  $\Delta x$  ist die Dämpfung  $\hat{A}(\Delta x, P)$ , die auf dem *ungünstigsten* Streckenstück mit einer Wahrscheinlichkeit von  $P$  überschritten wird.  $\hat{A}(\Delta x, P)$  lässt sich aufgrund der Summenhäufigkeiten von  $\bar{Z}_q(x_o, \Delta x)$  bestimmen, indem bei gegebenem  $\Delta x$  die Grösse  $x_o$  so zu wählen ist, dass der Summenhäufigkeit  $P$  das höchste  $\bar{Z}_q = \hat{Z}_q(\Delta x, P)$  entspricht. Dann ist gemäss Formel (13)  $\hat{A}(\Delta x, P) = \Delta x \cdot a_z \cdot \{\hat{Z}_q(\Delta x, P)\}^q$  (15)

Um die Frage nach der Abhängigkeit der gesamten Regendämpfung  $A_r$  von der Streckenlänge  $\Delta x$  zu beantworten, ist anzugeben, in welchem Masse der mit einer Wahrscheinlichkeit  $P$  überschrittene Dämpfungswert  $\hat{A}(\Delta x, P)$  mit der Streckenlänge zunimmt. Wir bilden daher

$$B(\Delta x_1, \Delta x_2, P) = \frac{\hat{A}(\Delta x_1, P)}{\hat{A}(\Delta x_2, P)} = \frac{\Delta x_1}{\Delta x_2} \cdot \left\{ \frac{\hat{Z}_q(\Delta x_1, P)}{\hat{Z}_q(\Delta x_2, P)} \right\}^q \quad (16)$$

Die Auswertung der Wetterradarbeobachtungen zeigte, dass  $B(\Delta x_1, \Delta x_2, P)$  nur leicht von  $q$  und damit auch nur geringfügig von der Frequenz abhängt.  $B$  ist das gesuchte

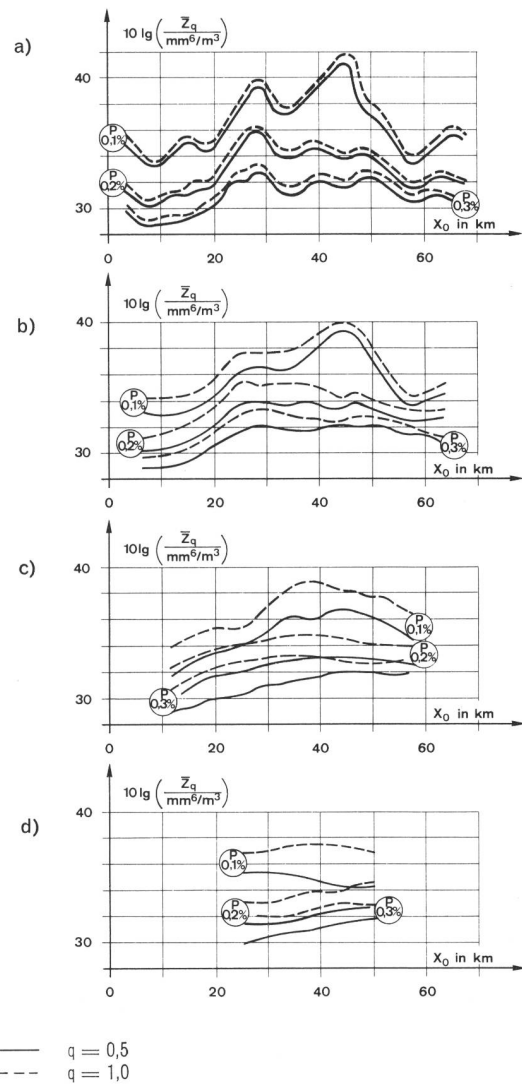


Fig. 8a

$\bar{Z}^q(x_o, \Delta x)$  als Funktion von  $x_o$  für  $\Delta x = 6$  km

Fig. 8b

$\bar{Z}^q(x_o, \Delta x)$  als Funktion von  $x_o$  für  $\Delta x = 12$  km

Fig. 8c

$\bar{Z}^q(x_o, \Delta x)$  als Funktion von  $x_o$  für  $\Delta x = 24$  km

Fig. 8d

$\bar{Z}^q(x_o, \Delta x)$  als Funktion von  $x_o$  für  $\Delta x = 48$  km

Mass, um den Zusammenhang zwischen der gesamten Regendämpfung und der Streckenlänge angeben zu können, denn

$$\hat{A}(\Delta x_1, P) = B(\Delta x_1, \Delta x_2, P) \cdot \hat{A}(\Delta x_2, P) \quad (17)$$

*Figur 9* zeigt  $B(\Delta x_1, \Delta x_2, P)$  als Funktion von  $\Delta x_1$  für  $\Delta x_2 = 6$  km und  $P = 0,1\%$ ,  $0,2\%$ ,  $0,3\%$ . Für Wahrscheinlichkeitswerte  $P > 0,3\%$  gilt näherungsweise  $B \Delta \approx x_1 / \Delta x_2$ . Dies bedeutet, dass Regendämpfungen, welche mit der Häufigkeit von  $> 0,3\%$  auftreten, proportional zur Strecken-

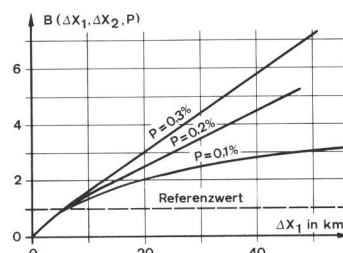


Fig. 9

$B(\Delta x_1, \Delta x_2, P)$  für  $\Delta x_2 = 6$  km

länge sind. Wenn jedoch  $P < 0,2\%$ , so nimmt  $B$  deutlich unterproportional mit  $\Delta x_1$  zu. Für sehr kleine Wahrscheinlichkeiten  $P$  hängt  $B$  und damit die gesamte Regendämpfung nur dann wesentlich von der Streckenlänge  $\Delta x_1$  ab, wenn diese nicht viel grösser als die mittlere Ausdehnung einer Regenzelle ist.

Dieser Sachverhalt lässt sich durch die verschiedenartigen Strukturen der Regengebiete erklären. Ist  $B$  proportional zu  $\Delta x_1/\Delta x_2$ , so muss es sich um ein ausgedehnteres Gebiet von gleichmässiger Regenrate  $R$ , also um einen Landregen handeln. Wenn jedoch  $B$  deutlich unterproportional zu  $\Delta x_1$  zunimmt, bedeutet dies, dass die gesamte Dämpfung  $A_r$  vorwiegend durch die Absorption in einer Regenzelle hoher Intensität bestimmt wird. Wie aus den in Figur 8 angegebenen Zwischenresultaten hervorgeht, sind diese die Gesamtdämpfung bestimmenden Regenzellen meistens über den Geländeanstiegen aufgetreten (vgl. Abschnitt 53). Dies zeigt erneut die Bedeutung der durch die Geländeform bedingten Zonen mit hoher Dämpfung  $\gamma_r$ .

### 56 Der «Formfaktor» von Regenzellen

Wie in Abschnitt 55 festgestellt, ist im allgemeinen die in einer einzelnen Regenzelle von hoher Intensität auftretende Absorption massgebend für die gesamte Regendämpfung der Strecke. Deshalb interessiert die innerhalb einer Regenzelle auftretende Regendämpfung.

Wie bereits definiert, ist eine Regenzelle ein Gebiet innerhalb dem  $Z \geq Z_0$ , wobei  $Z_0$  als Parameter zu betrachten ist. Die Dämpfung  $A_i(Z_0)$  durch eine einzelne Regenzelle von der Ausdehnung  $L$  ist daher gemäss Formel (11)

$$A_i(Z_0) = a_z \cdot \int_{x_0}^{x_0+L} Z^q(x) \cdot dx \quad (18)$$

wobei im Gebiet von  $x_0$  bis  $(x_0+L)$  gilt:  $Z \geq Z_0$ .

Die Regendämpfungen an den Orten  $x < x_0$  und  $x > x_0+L$  werden in  $A_i(Z_0)$  nicht mehr berücksichtigt.

Führt man den Mittelwert

$$\bar{Z}_q = \left\{ \frac{1}{L} \int_{x_0}^{x_0+L} Z^q(x) \cdot dx \right\}^{1/q} \quad (19)$$

ein, so ergibt sich

$$A_i(Z_0) = a_z \cdot L \cdot (\bar{Z}_q)^q \quad (20)$$

Die Dämpfung innerhalb einer Regenzelle hängt damit sowohl von ihrer Ausdehnung  $L$  wie vom oben definierten Mittelwert  $\bar{Z}_q$  ab.  $L$  wie  $\bar{Z}_q$  sind statistische Grössen.

Es ist naheliegend,  $\bar{Z}_q$  auf den Parameter  $Z_0$  zu beziehen. Der nachfolgend definierte Formfaktor  $S$  (shape factor) charakterisiert die Form einer Regenzelle, das heisst den Verlauf von  $(Z/Z_0)$  innerhalb der Zelle.

$$S = \frac{\bar{Z}_q}{Z_0} \quad (21)$$

Der Formfaktor  $S$  ist ebenfalls eine statistische Grösse. Da innerhalb der Regenzelle  $Z \geq Z_0$ , muss  $S \geq 1$  sein. Die statistischen Auswertungen zeigen, dass  $S$  in erster Näherung unabhängig von  $Z_0$  und für den Bereich  $q = 0,7 \dots 0,9$  (entspricht den Frequenzen 20 GHz bis 7 GHz) unabhängig von  $q$  ist. Eine ausgeprägte Korrelation ist jedoch zwischen  $S$  und  $L$ , der Ausdehnung der Regenzelle, feststellbar.

Zur Beschreibung der Summenhäufigkeit der beobachteten Formfaktoren  $S$  sind in Figur 10 die Medianwerte, Quartil- und Octilwerte als Funktion der Zellengrösse  $L$  aufgezeichnet. Zwei Sachverhalte verdienen Erwähnung:

Die Überschreitungswahrscheinlichkeit  $P_s(S)$  kann für kleine  $L$  als Potenzverteilung angegeben werden,

$$P_s(S) = S^{-(L_1/L)} \quad (22)$$

wobei die Konstante  $L_1 \approx 5,3$  km; man beachte, dass  $S \geq 1$ .

Ferner zeigt der obere Octilwert und andeutungsweise schon der obere Quartilwert als Funktion der Regenzellengrösse  $L$  ein relatives Maximum bei  $L \approx 3$  km. Die mittlere Regenzellengrösse ist in Abschnitt 52 zu rund 4,5 km angegeben worden. Die erwähnten Maxima bedeuten nun, dass kleinere Regenzellen von ungefähr 3 km teilweise einen hohen Formfaktor aufweisen, das heisst eine verhältnismässig hohe Dämpfung verursachen können; es muss sich dabei um «Gewitterzellen» handeln.

Die Ausdehnung  $L$  einer Regenzelle sowie der Formfaktor  $S$  charakterisieren eine Regenzelle. Die in ihr auftretende Dämpfung  $A_i(Z_0)$  ist gegeben durch die Formel

$$A_i(Z_0) = a_z \cdot L \cdot Z_0^q \cdot S^q \quad (23)$$

Statistische Angaben über  $L$  [vgl. Formel (7)] und  $S$  (vgl. Fig. 10) erlaubten grundsätzlich die Berechnung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Dämpfungen  $A_i(Z_0)$  je Regenzelle. Die aus den Formeln (7), (22) und (23) hergeleiteten Ausdrücke für die Wahrscheinlichkeit von  $A_i(Z_0)$  werden relativ kompliziert. Deshalb berechnen wir – wie es im folgenden Abschnitt gezeigt wird – diese Statistiken aus den Quellendaten.

### 57 Die Dämpfung innerhalb einer einzelnen Regenzelle

Die Dämpfung  $A(Z_0)$  innerhalb einer Regenzelle ist im vorangehenden Abschnitt durch die Formel (18) angegeben worden, nämlich

$$A_i(Z_0) = a_z \int_{x_0}^{x_0+L} Z^q(x) \cdot dx$$

Es handelt sich dabei nur um die Dämpfung über die Strecke  $L$ , innerhalb der der Reflektivitätsfaktor den Wert  $Z_0$  überschreitet. Die Benützung von  $A_i(Z_0)$  für Dämpfungsberechnungen führt zu optimistischen Resultaten; denn

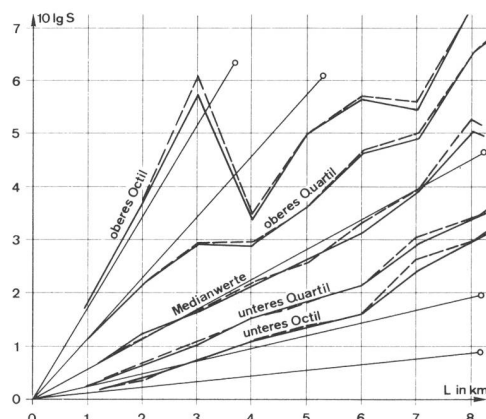


Fig. 10 Statistik des Formfaktors  $S$  in Funktion der Zellengrösse  $L$

- $q = 0,7$  entspricht 20 GHz
- - -  $q = 0,9$  entspricht 7 GHz
- entspricht  $P(S) = S^{-(L_1/L)}$  wobei  $L_1 = 5,3$  km

für  $Z_1 > Z_2$  gilt  $A_i(Z_1) < A_i(Z_2) < A_{tot}$ , wenn  $A_{tot}$  die gesamte Regendämpfung zwischen Sender und Empfänger bedeutet.

Die durch Formel (18) definierte Dämpfung  $A_i(Z_o)$  ergibt sich aus der für Regenzellen sich aufdrängenden Definition (vergleiche Abschnitt 52). Der hier benützte Begriff der Dämpfung  $A_i(Z_o)$  innerhalb einer Regenzelle lässt ausser der oben erwähnten Abschätzung auch Aussagen über die für die Planung zu benützenden Daten von Regenstatistiken zu.

$A_i(Z_o)$  ist eine statistische Grösse. Ihre Überschreitungswahrscheinlichkeit ist in *Figur 11* für die  $Z_o$ -Werte  $\xi = 10 \lg Z_o / \text{mm}^6 / \text{m}^3 = 35, 40$  und  $45 \text{ dBz}$  und für die Frequenz  $F = 10 \text{ GHz}$  angegeben. Die Auswertungen zeigen, dass  $A_i(Z_o)$  in dB in guter Näherung proportional zum Quadrat der Frequenz zunimmt.

Wie *Figur 11* deutlich zeigt, müssen die grossen Dämpfungswerte eher aufgrund der Kurve für  $\xi = 35 \text{ dBz}$  als jener für  $\xi = 45 \text{ dBz}$  berechnet werden. Dies bedeutet, dass die alleinige Berücksichtigung der Starkregen ( $R > 20 \text{ mm/h}$ ) zu optimistische Planungswerte ergeben würde.

Die vorhin definierte Dämpfung  $A_i(Z_o)$  ist die Dämpfung über dem Streckenstück  $L$  mit  $Z \geq Z_o$ . Es ist für die Praxis zweckmässig eine Dämpfung  $A(Z_o)$  je Regenzelle zu bestimmen, in der die vor und nach dem Streckenstück  $L$  auftretenden Dämpfungen mitberücksichtigt sind. In den *Figuren 12a, b und c* sind die Überschreitungswahrscheinlichkeiten von  $A(Z_o)$  für eine, zwei und drei simultane Regenzellen angegeben. Sie wurden aufgrund der Statistik der Regenzellenabstände und der Quelldaten errechnet.

## 6 Anwendung: Berechnung von Dämpfungsstatistiken

### 61 Allgemeines

Die Berechnung der zu erwartenden Regendämpfungen hat unter Berücksichtigung der Strukturen von Regenzellen und Regengebieten zu geschehen; das Vorliegen von Regenstatistiken allein genügt nicht. Im folgenden

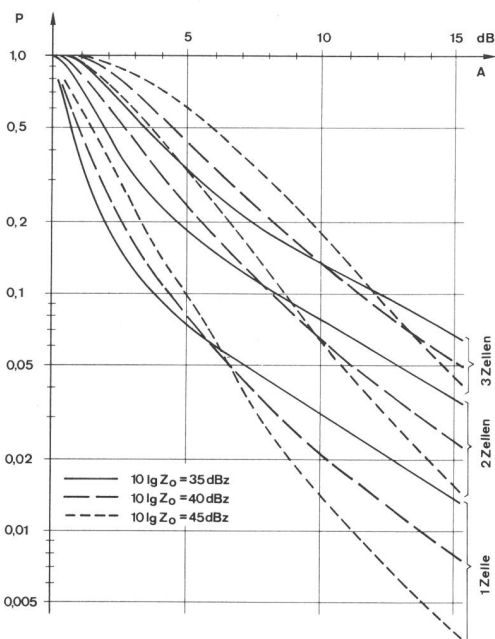


Fig. 11  
Überschreitungswahrscheinlichkeiten  $P$  der Dämpfungen  $A_i(Z_o)$  innerhalb 1, 2 und 3 Regenzellen bei 10 GHz, unter der Voraussetzung, dass Zellen mit  $Z \geq Z_o$  vorhanden sind

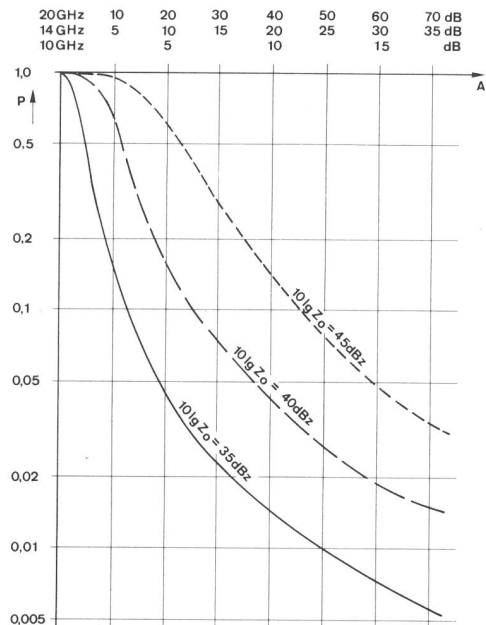


Fig. 12a  
Überschreitungswahrscheinlichkeit  $P$  der Dämpfung  $A$  pro 1 Regenzelle, unter der Voraussetzung, dass eine Zelle mit  $Z \geq Z_o$  vorhanden ist

wird gezeigt, wie unter Verwendung der mit Wetterradarbeobachtungen erhaltenen Daten und Gesetze von den Regenintensitäten auf die Dämpfungsstatistik geschlossen werden kann. Wenn hierfür ein numerisches Beispiel gewählt worden ist, so nicht bloss der Anschaulichkeit wegen, sondern auch, weil dabei die Grössenordnungen der einzelnen Daten sowie deren Einflüsse auf das Endresultat unmittelbar ersichtlich sind.

### 62 Aufgabenstellung

Auf einer Strecke der Länge  $D = 70 \text{ km}$  werde die Niederschlagsintensität von  $R_o = 15 \text{ mm/h}$  in sogenannten Regen-

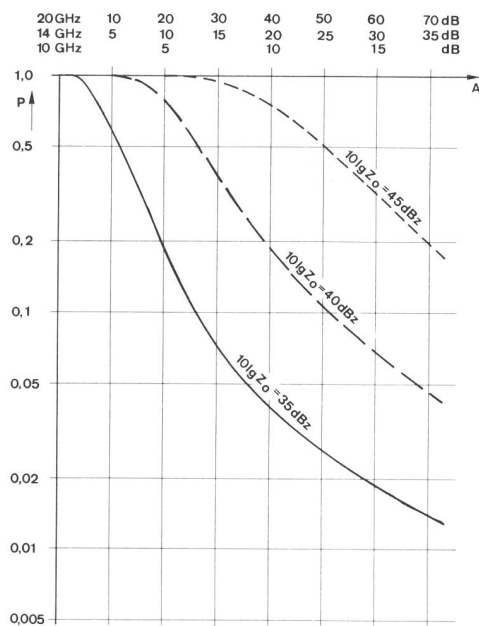


Fig. 12b  
Überschreitungswahrscheinlichkeit  $P$  der Dämpfung  $A$  pro zwei simultane Regenzellen, unter der Voraussetzung, dass zwei simultane Zellen mit  $Z \geq Z_o$  vorhanden sind

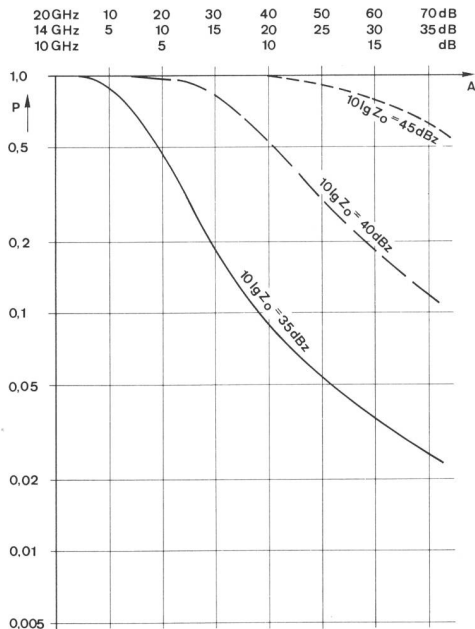


Fig. 12c  
Überschreitungswahrscheinlichkeit P der Dämpfung A pro drei simultane Regenzellen, unter der Voraussetzung, dass drei simultane Zellen mit  $Z \geq Z_0$  vorhanden sind

monaten mit einer Wahrscheinlichkeit von  $P_R = 0,0065 = 0,65\%$  überschritten. Gesucht sind die Wahrscheinlichkeiten, dass bei 10 GHz die Regendämpfung die Werte von 10 dB beziehungsweise 15 dB überschreitet. (Für  $P_R$  siehe Fig. 13.)

### 63 Berechnungsmethode

Dem Wert  $R_0 = 15 \text{ mm/h}$  entspricht gemäss Formel (4) ein Reflektivitätsfaktor  $Z_0 \approx 1,45 \cdot 10^4 \text{ mm}^6/\text{m}^3$ . Die Berechnung der Dämpfungsstatistik basiert auf den Eigenschaften von Regenzellen mit  $Z \geq Z_0$ . Nach Formel (7.1) beträgt die mittlere

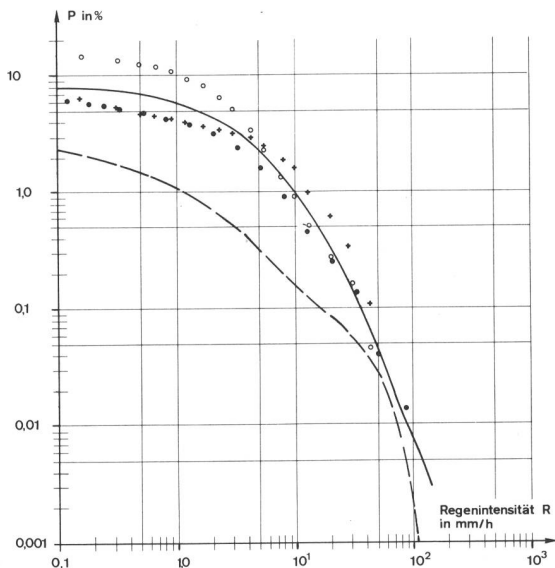


Fig. 13  
Wahrscheinlichkeit in Prozent der Zeit, dass eine gewisse Regenintensität überschritten wird

Messungen von J. Joss, Locarno-Monti

- Juli 1967 1 min. Auflösung
- \* Juli 1965 1 min. Auflösung
- Mai + Juli + September 1965

3

— Bern 1972 (Auswertung Ch. Zufferey)

Ausdehnung  $l_r$  solcher Zellen  $l_r \approx 4,2 \text{ km}$ . Die Bedingung  $D \gg l_r$  ist erfüllt. Die «Wahrscheinlichkeit»  $W_R$  des Auftretens solcher Zellen auf der Strecke D ergibt sich aus den Formeln (7) und (7.2) zu

$$W_R = P_R \cdot \frac{D}{l_r} = 0,0065 \cdot \frac{70 \text{ km}}{4,2 \text{ km}} = 0,108 \quad (24)$$

das bedeutet, dass bei 1000 Beobachtungen im Gesamten 108 Zellen festgestellt werden, wobei auch zwei oder drei Zellen gleichzeitig auf der Strecke auftreten können.

Die Wahrscheinlichkeit P2, dass beim Vorhandensein einer ersten Zelle zugleich eine zweite auftritt, sei gemäss Formel (10)  $P_2 = 0,27$  und die Wahrscheinlichkeit P3 des Auftretens einer dritten  $P_3 \approx P_2^2 = 0,073$  (vergleiche Abschnitt 53). Die Fälle mit vier Regenzellen über der Strecke sind in der Regel vernachlässigbar. Bei den für P2 und P3 angenommenen Werten lassen sich damit bei den erwähnten 1000 Beobachtungen in 50,0% nur eine, in 20,6% zwei und in 5,6% drei Regenzellen über die Strecke D feststellen.

Die Wahrscheinlichkeit, dass eine einzelne Regenzelle mit  $10 \cdot \lg Z_0 = 41,6$  bei 10 GHz eine grössere Dämpfung als 10 dB oder 15 dB verursacht, ist gemäss Fig. 12a 0,065 beziehungsweise 0,026. Bei zwei Regenzellen ist diese Wahrscheinlichkeit 0,33 beziehungsweise 0,11 und bei drei Zellen 0,76 oder 0,32.

Damit ergibt sich für das Auftreten einer Regendämpfung über der Strecke von mehr als 10 dB die Wahrscheinlichkeit

$$\begin{aligned} P_{10} &= 0,065 \cdot 50,0\% + 0,33 \cdot 20,6\% + 0,76 \cdot 5,6\% \\ P_{10} &= 3,25\% \quad + 6,8\% \quad + 4,25\% \\ P_{10} &= 14,3\% \quad = 0,14 \end{aligned}$$

Desgleichen erhält man für das Überschreiten einer Dämpfung von 15 dB die Wahrscheinlichkeit

$$\begin{aligned} P_{15} &= 0,026 \cdot 50,0\% + 0,11 \cdot 20,6\% + 0,32 \cdot 5,6\% \\ P_{15} &= 1,30\% \quad + 2,26\% \quad + 1,79\% \\ P_{15} &= 5,35\% \quad = 0,054 \end{aligned}$$

Für den Fall, dass zwei Regenzellen mit einer Wahrscheinlichkeit  $P_2 = 0,20$  oder  $P_2 = 0,10$  auftreten erhält man:

$$\begin{aligned} P_2 = 0,20 : P_{10} &= 0,012 ; P_{15} = 0,0046 \\ P_2 = 0,10 : P_{10} &= 0,0095 ; P_{15} = 0,0036 \end{aligned}$$

Für andere Frequenzen als 10 GHz ist zu berücksichtigen, dass die Dämpfung in dB ungefähr proportional zum Quadrat der Frequenz zunimmt. (Vergleiche Skalen der Fig. 12.)

### 64 Diskussion der Methode, Extrapolationsformeln

Das vereinfachte Berechnungsschema zeigt, wie aufgrund von Angaben über die Struktur von Regengebieten die zu erwartenden Regendämpfungen abgeschätzt werden können. Die erhaltenen Resultate sind vergleichbar mit jenen von Ausbreitungsmessungen [8]. Wetterradarmessungen weisen von Natur aus nicht vernachlässigbare absolute Messfehler auf (vergleiche Abschnitt 42). Deshalb soll auch kein Anspruch auf quantitative Genauigkeit erhoben werden. Wesentlich sind jedoch die beobachteten qualitativen Beziehungen. So zeigt die Berechnung, wie von Messungen auf einer Strecke auf die entlang einer anderen Strecke zu erwartenden Dämpfungen geschlossen werden kann. Vergleichbar sind Strecken in topografisch ähnlichen Regionen (vergleiche Abschnitt 53) und nicht stark unterschiedlicher Höhenlage (Einfluss der Nullgradgrenze = Schmelzzone).

Die an verschiedenen Orten in der Schweiz gemessenen Überschreitungswahrscheinlichkeiten von Regenintensität

täten unterscheiden sich meistens näherungsweise nur durch einen Faktor. Deshalb ist es in der Praxis erlaubt, die Regendämpfungsstatistik aufgrund der Überschreitungswahrscheinlichkeit einer Regenintensität *und* der in den Figuren 12a, b und c angegebenen Wahrscheinlichkeiten der Dämpfung je Regenzone zu bestimmen.

Der Einfluss der Wahrscheinlichkeit P<sub>2</sub> des Auftretens einer zweiten Regenzone ist deutlich, jedoch geringer als die Wirkung des Geländes. Für erste Abschätzungen der Regendämpfung darf P<sub>2</sub> daher als Null angenommen werden.

Formel (24) zeigt den wesentlichen Einfluss der Streckenlänge D auf. Ist P<sub>0</sub> (A) die über eine Strecke D<sub>0</sub> gemessene Überschreitungswahrscheinlichkeit der Dämpfung A, dann lässt sich offensichtlich die Überschreitungswahrscheinlichkeit P (A) für eine Strecke D folgendermassen abschätzen

$$P(A) \approx D \cdot \frac{P_0(A)}{D_0} \quad (25)$$

Eine bessere Extrapolationsformel erhält man aufgrund der folgenden Überlegungen: Feldstärkemessungen [8] zeigen, dass die Überschreitungswahrscheinlichkeit grosser Regendämpfungen – solche sind auch von besonderer Bedeutung – durch die Formel (26) beschrieben werden kann

$$P(A) = p \cdot \exp(-\alpha A) \quad (26)$$

Die beiden Parameter p und  $\alpha$  hängen von der Streckenlänge und der Art des Klimas ab. Im besonderen stellt p den Prozentsatz der Zeit dar, während dem («wesentliche») Regendämpfungen auftreten. Um anzugeben, wie p und  $\alpha$  in Formel (26) bei einem bestimmten Klima mit der Streckenlänge variieren, wenden wir uns vorerst dem allgemeinen Fall zu.

Eine Richtstrahlstrecke setze sich aus zwei Teilstücken zusammen. Es gelte für

$$\text{Teilstück 1: } P_1(A) = p_1 \cdot \exp(-\alpha_1 \cdot A) \quad (26a)$$

$$\text{Teilstück 2: } P_2(A) = p_2 \cdot \exp(-\alpha_2 \cdot A) \quad (26b)$$

Ferner sei P<sub>12</sub> die Wahrscheinlichkeit, dass auf beiden Teilstücken simultan («wesentliche») Regendämpfungen auftreten. Die Überschreitungswahrscheinlichkeit P (A) für Regendämpfungen A über die ganze Strecke ist dann gemäss den Sätzen der Wahrscheinlichkeitsrechnung.

$$P(A) = \left. \begin{aligned} & \left[ p_1 + P_{12} \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \right] \cdot \exp(-\alpha_1 A) \\ & + \left[ p_2 + P_{12} \cdot \frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} \right] \cdot \exp(-\alpha_2 A) \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Wenn  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_0$ , so ergibt sich aus Formel (27)

$$P(A) = [p_1 + p_2 + P_{12}(\alpha_0 \cdot A - 1)] \cdot \exp(-\alpha_0 \cdot A) \quad (28)$$

Ist zudem  $p_1 = p_2 = p_0$ , so sind die beiden Teilstrecken bezüglich Regendämpfungen identisch. Messungen lassen erkennen, dass  $P_{12} \approx \tau p_0$ , wobei  $\tau \approx 0,2 \dots 0,7$ . Dann ergibt sich für P (A)

$$P(A) = p_0 [2 + \tau(\alpha_0 \cdot A - 1)] \cdot \exp(-\alpha_0 \cdot A) \quad (29)$$

Dieser Ausdruck ist formal von (26) verschieden. Es ist jedoch für den uns interessierenden Wertebereich die folgende Approximation erlaubt

$$[2 + \tau(x - 1)] \cdot \exp(-x) \approx 2,5 \cdot \exp(-0,92x) \quad (30)$$

für  $1 \leq x \leq 15$

Damit ist bekannt wie sich p und  $\alpha$  bei einer Vergrößerung der Streckenlänge um den Faktor 2 ändern, nämlich

Strecke von der Länge D<sub>0</sub>:  $P_0(A) = p_0 \cdot \exp(-\alpha_0 \cdot A)$

Strecke von der Länge 2 D<sub>0</sub>:  $P(A) = 2,5 \cdot p_0 \cdot \exp(-0,92 \cdot \alpha_0 \cdot A)$

(31)

Wenn p<sub>0</sub> und  $\alpha_0$  die Parameter der Überschreitungswahrscheinlichkeit P<sub>0</sub> (A) für eine Strecke der Länge D<sub>0</sub>, so gilt demnach für eine Strecke D bei gleicher Art des Klimas

$$\begin{aligned} p &= p_0 \cdot 1,6^{D/D_0} \\ \alpha &= \alpha_0 \cdot 0,96^{D/D_0} \end{aligned} \quad (32)$$

Die eben hergeleitete Extrapolationsmethode unterscheidet sich nicht sehr wesentlich von Formel (25). Vergleiche mit den aufgrund der Wetterradarbeobachtungen aufgestellten Dämpfungsstatistiken zeigen, dass die letzte Extrapolationsmethode zu besseren Resultaten führt.

Die obigen Formeln gelten für räumlich homogene Klimabedingungen. Wie in Abschnitt 53 gezeigt worden ist, sind Zonen mit erhöhter Wahrscheinlichkeit des Auftretens grosser Dämpfung möglich. Um diese ungünstigen Fälle zu berücksichtigen, ist die Extrapolation auf andere Streckenlängen aufgrund der in Figur 9 (und Abschnitt 55) enthaltenen Angaben durchzuführen. Ein für das Mittelland und Voralpengebiet gültiges Beispiel der Extrapolation auf andere Streckenlängen ist in Figur 14 wiedergegeben. Der Vergleich mit den auf einer kurzen Strecke erhaltenen Messresultaten ist befriedigend ausgefallen.

## 7 Schlussbemerkungen

Zur Beurteilung der Zuverlässigkeit von Richtfunkstellen wird auf die Verhältnisse, wie sie während des ungünstigsten Monats, das heisst hier während des regenreichsten Monats des Jahres, auftreten, abgestellt. Der Umfang der verarbeiteten Daten entspricht zwei solchen Monaten oder Dauerregistrierungen von 1...2 Jahren.

Die Beobachtungen entlang der über das Mittelland und Voralpengebiet führenden Strecke von 70 km erlaubten Formeln zur statistischen Beschreibung von Regenzone und Regengebieten anzugeben. Dadurch lassen sich einerseits aufgrund von Regenstatistiken die Wahrscheinlichkeiten des Auftretens von Dämpfungen bestimmen und andererseits die Resultate von Feldstärkeregistrierungen auf Strecken anderer Länge extrapolieren. Die Abweichungen solcher Schätzungen von den experimentellen Ergebnissen liegen etwa im Streubereich der Messungen.

Wie die Untersuchungen zeigen, können Dämpfungsstatistiken kurzer Strecken sehr unterschiedlich sein (Abschnitt 55, Fig. 8). Da die ausgewertete Datenmenge

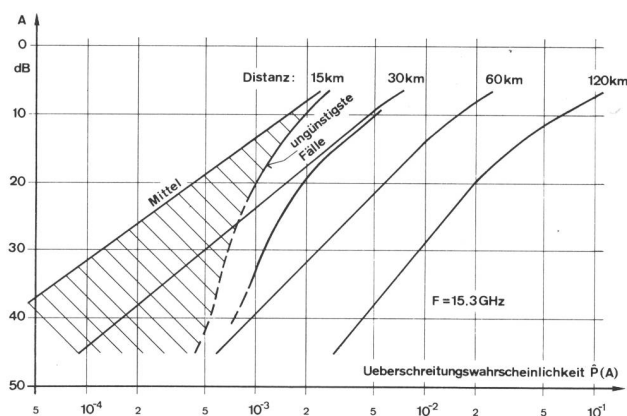


Fig. 14  
Regendämpfungen A auf Richtfunkstrecken

(gemessen bei Distanz 120 km, für andere Distanzen extrapoliert)

einer Messdauer von nur 1...2 Jahren entspricht, mögen solche Unterschiede auf die von Jahr zu Jahr räumlich variierenden meteorologischen Verhältnisse oder aber auf orografisch bedingte Zonen mit häufigem Auftreten hoher Dämpfungskoeffizienten  $\gamma_r$  zurückgeführt werden. Es bestehen Vermutungen, dass die letztere Erklärung mindestens teilweise zutrifft (Abschnitt 53). Der Einfluss des Geländes ist daher genauer zu untersuchen.

Starke Regendämpfungen, die mit Wahrscheinlichkeiten von  $\leq 10^{-3}$  auftreten, erfahren keine grosse Zunahme, wenn die Strecke über die mittlere Ausdehnung der Regenzellen, das heisst über 5 km, verlängert wird (Abschnitt 55). Dementsprechend nimmt auch die Betriebssicherheit einer längeren Verbindung durch eine Vergrösserung der Zahl der Teilstrecken ( $\rightarrow$  Verringerung der Teilstreckenlängen) nicht wesentlich zu. Zur Vermeidung von Betriebsunterbrüchen infolge seltener, starker Fadings kann zum Beispiel das Routendiversityverfahren Verwendung finden. Welche Möglichkeit bevorzugt werden soll, ist auch eine Frage der Wirtschaftlichkeit und daher von Fall zu Fall unter Mitberücksichtigung der Kabelverbindungen zu untersuchen.

## Bibliographie

- [1] *K. Morita, I. Higuti*. Statistical Studies on Electromagnetic Wave Attenuation due to Rain. Review of the Electrical Communication Laboratories, Vol. 19 (1971) Nrs. 7...8, p. 798.
- [2] *R. A. Semplak, R. H. Turrin*. Some Measurements of Attenuation by Rainfall at 18,5 GHz. BSTJ Vol. 48 (1969) Nr. 6, p. 1767.
- [3] *J. Joss, J. C. Thams, A. Waldvogel*. The Variation of Raindrop Size Distributions at Locarno. Toronto/Canada, Proceedings of the International Conference on Cloud Physics, August 1968.
- [4] *J. Joss, J. C. Thams, A. Waldvogel*. The Accuracy of Daily Rainfall Measurements by Radar. Montreal/Canada, Proceedings of the 13th Radar Meteorology Conference, McGill University, August 1968.
- [5] *CCIR Period 1970-1973, Doc. 5/65*. Relation between the Reflectivity Factor Z as a Function of Altitude and the Surface Rainfall Rate.
- [6] *A. E. Freeny, J. D. Gabbe*. A Statistical Description of Intense Rainfall. BSTJ Vol. 48 (1969) Nr. 6, p. 1789.
- [7] *M. E. Cleverly*. Observation of the Small-Scale Structure of Intense Rain by the Scattering of Microwaves. Electronics Newsletters, Vol. 9 (1973) Nr. 22, p. 535.
- [8] *E. Wey, M. Fiechter*. Feldstärkeschwund-Statistiken für die Planung von Richtfunkverbindungen. Bern, Abt. Forschung und Entwicklung der Schweiz. PTT-Betriebe, Bericht Nr. VD 32.040A vom 25. Juli 1974.

---

## Die nächste Nummer bringt unter anderem Vous pourrez lire dans le prochain numéro

|                         |  |
|-------------------------|--|
| M. Gfeller              | Der Einsatz von Bezirkskabeln mit Minikoaxialtuben und ihre PCM-mässige Ausnützung im schweizerischen Fernmeldenetz<br>Emploi des câbles ruraux à tubes minicoaxiaux et leur exploitation en régime MIC dans le réseau de télécommunication suisse |
| B. Eicher,<br>J. Furrer | Untersuchung der Fehlereinflüsse bei Dämpfungsmessungen im Frequenzgebiet 1...18 GHz   |
| J. Wehrli               | Erfahrungen des ersten Betriebsjahres mit der Satelliten-Bodenstation Leuk<br>Expériences faites au cours de la première année d'exploitation de la station terrestre pour satellites de Loèche  |
| L. Praz                 | Calcul de la distribution de trafic dans un réseau maillé à centraux multiples   |

---