

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

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 78 (1987)

Heft: 15

Artikel: Der drahtlose Übertragungskanal

Autor: Debrunner, W. E.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-903894>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 01.02.2025

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

Der drahtlose Übertragungskanal

W. E. Debrunner

Funkverbindungen stellen eine notwendige Ergänzung des Leitungsnetzes dar, deren besondere Eigenschaften in der Planung Rechnung zu tragen ist. So muss die Wahl des Modulationsverfahrens unter Berücksichtigung der Eigenschaften des Übertragungskanals erfolgen. Im besonderen bedingen die heute technisch realisierbaren Breitbandverfahren die Berücksichtigung von Ausbreitungsverzerrungen, wie sie infolge unvermeidbarer Mehrwegeausbreitung auftreten. Die relevanten Ausbreitungsmechanismen sind kurz dargestellt und Abschätzungsformeln angegeben. Die Verhältnisse werden durch Ergebnisse von Messungen und Berechnungen illustriert.

Les liaisons radioélectriques constituent le complément indispensable du réseau câblé des télécommunications. Lors de la planification, il est alors nécessaire de tenir compte de leurs spécifications particulières. Le choix optimal de la modulation dépend d'une façon essentielle des caractéristiques de la voie de transmission. Ainsi, la conception des systèmes à large bande exige la prise en considération des distorsions par propagation multiple. Les phénomènes concernant la propagation sont brièvement décrits et des formules destinées à leur évaluation sont présentées. De plus, des résultats de mesures et de calculs illustrent les thèses exposées dans l'article.

Adresse des Autors

Walter E. Debrunner, dipl. Ing. ETH, GD PTT,
Abt. F+E, Ostermundigenstrasse 93,
3000 Bern 29.

1. Einleitung

Die faszinierende Aufgabe des Fernmeldeingenieurs besteht im Suchen guter Kompromisse zwischen sich widerstrebenden Forderungen. Nicht nur ein guter Bedienungskomfort und niedere Kosten sind anzustreben, sondern es müssen auch die möglichen technischen Standards eingehalten werden. Durch die Informatik und Mikroelektronik sind heute viele Übertragungsverfahren realisierbar geworden, die man noch vor wenigen Jahren als utopisch bezeichnen musste. War früher die Machbarkeit durch die Unvollkommenheit der Technik beschränkt, so scheint man heute die durch Physik und Mathematik gezogenen Grenzen erreichen zu können. In der drahtlosen Nachrichtentechnik sind diese natürlichen Grenzen vorwiegend durch den Charakter des «Äthers», d.h. die durch Meteorologie und Topographie bedingten und deshalb naturgegebenen, unveränderbaren Eigenschaften des Übertragungskanals festgelegt. Diese Gegebenheiten werden hier für den Trägerfrequenzbereich über 30 MHz diskutiert.

Die heutige Technik erlaubt, neue Modulationsarten zur Erhöhung der Interferenzimmunität anzuwenden. Von Konstruktionen einfachster Nachrichtensysteme her ist bekannt, wie durch höhere Signalamplituden wohl einerseits grössere Störfestigkeiten resultieren, jedoch andererseits auch ausgeprägtere Verzerrungen entstehen. Ausbreitungsverzerrungen entstehen infolge von *Mehrwegeempfang*, es sind lineare Verzerrungen, die durch die Demodulation in nichtlineare Verzerrungen übergeführt werden. Je nach Frequenz überlagern sich die auf verschiedenen Pfaden zum Empfänger gelangenden Signale mit unterschiedlichen Phasenlagen. Dadurch wird die RF-Übertragungsdämpfung eine Funktion der Frequenz; sie variiert um so mehr, je grösser die benutzte RF-Bandbreite ist.

In Anbetracht dieser wesentlichen Wirkung von Topographie und Klima auf das Ausbreitungsverhalten elektro-

magnetischer Wellen ist die grundsätzliche Frage zu stellen, wie weit die mit einem bestimmten Übertragungsverfahren erhaltenen Resultate auch für andere Regionen und Jahreszeiten Gültigkeit haben. Wie Versuche gezeigt haben, können sich Kenngrössen des Mehrwegeempfangs in Grossstädten von denen in hügeligem Gelände bis um einen Faktor von 10 unterscheiden [1; 2].

In dieser Arbeit sollen Grundlagen zusammengestellt werden, welche die bei bestimmten *topographischen und klimatischen Verhältnissen* zu erwartenden Mehrwegeausbreitungen abzuschätzen erlauben. Die Mannigfaltigkeit, mit welcher Ausbreitungsmechanismen in Erscheinung treten, mag auf die Notwendigkeit einer statistischen Beschreibung hinweisen. Im Hinblick auf Planungsentscheide müssen diese statistischen Daten auf geeigneten Ausbreitungsmodellen basieren. Es wird gezeigt, wie aufgrund solcher Modelle Abschätzungen möglich sind.

Die Methode zur Berechnung von Ausbreitungsverzerrungen muss dem jeweiligen Modulationsverfahren entsprechen. Die folgenden Angaben stellen einen Teil der hierfür notwendigen Unterlagen dar. Sie sollen mithelfen, Modulationsverfahren für drahtlose Übertragungskanäle sowohl im Hinblick auf eine hohe Störfestigkeit wie auch auf geringe Ausbreitungsverzerrungen zu entwerfen.

2. Störungen

Es werden im folgenden drei Arten von Fremdstörungen unterschieden:

- natürliche Störungen wie Himmelsrauschen,
- Störungen durch Starkstromanlagen, Autozündungen u.ä.,
- sog. Interferenzstörungen durch fremde Sender.

Bei Verwendung heute üblicher Empfänger ist vor allem der von anderen Funkanlagen herrührende «Man Made Noise» von Bedeutung. Grundsätzlich sind solche Störungen durch eine adäquate Frequenzplanung zu

vermeiden bzw. zu reduzieren. Bei realistischer Betrachtung der Sachlage muss die Frage gestellt werden, in welchem Masse eine wirksame Frequenzkoordination unter den gegenwärtigen Bedingungen möglich ist.

Die heute starke Belegung des Frequenzspektrums erlaubt einerseits nur noch geringe Sicherheitsmargen. Andererseits nehmen die zu kontrollierenden Störmöglichkeiten *überproportional* mit der Anzahl der Funkverbindungen zu. Die Ausbreitungsmechanismen sind komplex und auch die Verwendung von Computern ermöglicht nur im beschränkten Rahmen eine Überprüfung der bestehenden Verhältnisse.

Bei Anwendung der Breitbandtechnik ist die «Energie» von Fremdstörungen nach der Demodulation über einen grösseren Frequenzbereich verschmiert. Damit manifestieren sich die Interferenzen in einer Erhöhung des Rauschpegels der *verschiedenen* Empfänger und nicht mehr als stärkere diskrete Störsignale bei *einem* Empfänger. Deshalb ist es verständlich, wenn eine Anwendung breitbandiger Modulationsverfahren angestrebt wird. Inwiefern aber die bei Breitbandmodulation stärker in Erscheinung tretenden Ausbreitungsverzerrungen von Bedeutung sind, ist aufgrund der möglichen relativen Verzögerungen der Echo abzuschätzen. Zwischen höheren Ausbreitungsverzerrungen und besserer Störunterdrückung ist dann ein zweckmässiger Kompromiss zu suchen.

3. Ausbreitungsmechanismen

3.1 Allgemeines

Die Ausbreitungsbedingungen werden durch das Funkfelddämpfungs-mass, d.h. durch die Dämpfung zwischen Sende- und Empfangsantenne beschrieben. Bei *Freiraumausbreitung* und Verwendung von *isotropen Antennen* besteht zwischen der empfangenen Leistung P_r und der Sendeleistung P_t die Beziehung (1)

$$P_r = P_t \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 D^2} \quad (1)$$

wobei D die Distanz und λ die Wellenlänge darstellt. Je nach Frequenzbereich und Diensten (z.B. Richtstrahl- oder Rundfunk) sind verschiedene Ausbreitungsmechanismen für die Ausbreitungsverzerrungen massge-

bend. In den folgenden Kapiteln werden die Phänomene einzeln behandelt.

Bei Meter- und Dezimeterwellen kommt innerhalb des Versorgungs-bereichs der *Topographie* eine entscheidende Bedeutung zu¹. Es sind im besonderen die Abschirmwirkungen durch Geländehindernisse und Reflexionen an Hügeln und Bergen zu beachten. Die bezüglich Ausbreitungsverzerrungen massgebenden Leistungsverhältnisse zwischen den reflektierten Signalen und dem «direkten» Signal ist stark durch die *konkrete Umgebung* mitbestimmt [2]. In dem Masse als bei Dezimeter- und Zentimeterwellen die Strahlenoptik zur Beschreibung der *troposphärischen* Brechungserscheinungen benützt werden darf, ist der troposphärischen Mehrwegeausbreitung Beachtung zu schenken.

Die verschiedenen Reflexions- und Brechungserscheinungen und damit auch die Arten der Mehrwegeausbreitung dürfen in der Praxis als von der Polarisation unabhängig betrachtet werden.

Bei *Fix-Fix-Verbindungen* werden Antennen mit gebündeltem Strahlungsdiagramm verwendet; die empfangenen Geländereflexionen sind deshalb vernachlässigbar, und es müssen nur die troposphärische Mehrwegeausbreitung beachtet werden. Im zentral-europäischen Klima betragen die relativen Verzögerungen bei troposphärischem Mehrwegeempfang weniger als 3 ns.

Im *Mobilfunk* sind Rundstrahlantennen erforderlich, und deshalb werden (wie beim Hörfunkempfang im Auto) die Reflexionen von Gebäuden und Bodenerhebungen mitempfangen. Die troposphärische Mehrwegeausbreitung ist dabei vergleichsweise vernachlässigbar. Wesentliche Gebäude-reflexionen sind höchstens um etwa $7 \mu\text{s}$ verzögert. Die Amplituden und die Verzögerungszeiten der Geländereflexionen sind wesentlich durch die Art der Topographie bestimmt. Im schweizerischen Mittelland sind leicht Verzögerungen von 10 bis $40 \mu\text{s}$ beobachtbar. Ähnliche Verhältnisse treten im süddeutschen Raum auf. In Lausanne und Genf sind Werte von $50 \mu\text{s}$ und mehr zu erwarten.

¹ Über grosse Distanzen (für die Frequenzplanung wegen Störungen von Bedeutung!) werden die Ausbreitungsverhältnisse hauptsächlich durch die *meteorologischen* Bedingungen bestimmt.

3.2 Mehrwegeempfang infolge von Geländereflexionen

Von Gebäuden, Hügeln und Bergen können zum Teil starke Streureflexionen empfangen werden. Es handelt sich dabei um eine Überlagerung vieler Einzelreflexionen zufälliger Amplituden und Phasen. Von diesen kann nur die *mittlere Leistung* P_{si} der mit einer isotropen Antenne empfangenen Reflexion abgeschätzt werden:

$$P_{si} = P_{ti} \cdot \alpha \cdot \frac{\sqrt{\Omega_t \cdot \Omega_r}}{D_t \cdot D_r} \cdot \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \quad (2)$$

Dabei ist P_{ti} die durch eine isotrope Antenne abgestrahlte Leistung, D_t und D_r sind die Entfernungen der streuenden Fläche vom Sender und Empfänger, während Ω_t bzw. Ω_r die Raumwinkel bezeichnen, unter denen die streuende Fläche vom Sender bzw. vom Empfänger aus gesehen wird. Der Koeffizient α darf als etwa 0,3 angenommen werden. Oberhalb von 200 MHz ist (für bewaldete Hänge) ein geringerer Wert zu vermuten.

Die nach (2) geschätzten Streureflexionen sind relativ gering im Vergleich zu dem nach Formel (1) berechneten direkten Signal. Im Frequenzbereich von 30 bis 1000 MHz treten hingegen leicht Beudungsdämpfungen durch benachbarte Gebäude und Bodenerhebungen von 10 bis 30 dB auf [2]. Ausbreitungsverzerrungen hängen u.a. vom Leistungsverhältnis zwischen den Streureflexionen und dem «direkten» Signal ab; sie variieren deshalb entsprechend der näheren Umgebung stark.

Besteht zwischen Sender und Empfänger Sichtverbindung oder werden (potentielle) Streureflexionsflächen durch umliegende Gebäude verdeckt, so sind die Empfangsbedingungen günstig. Starke Ausbreitungsverzerrungen sind hingegen zu befürchten, wenn zu den Streureflexionsflächen eine offene Sicht besteht und das «direkte» Signal durch nahe Hindernisse abgeschwächt wird. In den Figuren 1 und 2 sind Beispiele der innerhalb der Stadt Bern und auf der Hauptstrasse nach Muri bei 220 MHz beobachteten Echogramme dargestellt [3].

3.3 Mehrwegeempfang infolge troposphärischer Brechung

Die Ursachen des troposphärischen Refraktionsschwundes können mittels der Strahlenoptik erklärt werden (s. Fenster). In der Praxis sind nicht

Troposphärische Brechungserscheinungen

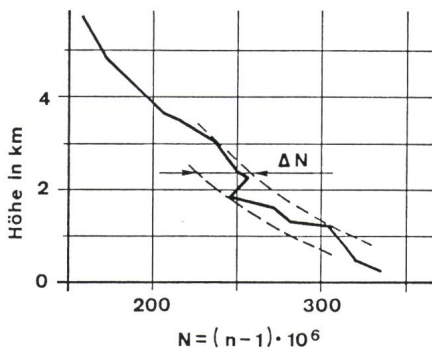
Grundsätzlich ist die Troposphäre als ein verlustbehaftetes Medium mit örtlich variablem Brechungsindex zu betrachten. Die dämpfende Wirkung durch Niederschlag und Gasmoleküle ist bis 8 GHz vernachlässigbar, d.h., die Signaleinbrüche sind durch troposphärische Brechungserscheinungen zu erklären. Unter Brechungsindex n eines Mediums versteht man das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c zur Phasengeschwindigkeit v im Medium. Der in der Praxis benützte Brechwert N (f_2) ist gemäss der experimentellen Formel (f_3) abhängig von der Temperatur T (in Kelvin), dem Druck P der trockenen Luft (in mbar) und dem Partialdruck e des Wasserdampfes, d.h. der H_2O -Moleküle (in mbar) [4].

$$n = c/v \quad (f_1)$$

$$N = (n-1) \cdot 10^6 \quad (f_2)$$

$$N = 77,6 \frac{P}{T} - 5,6 \frac{e}{T} + 3,75 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (f_3)$$

Numerische Untersuchungen zeigen, dass die örtlichen Variationen des Brechwertes N primär durch Änderungen des Partialdrucks e des Wasserdampfes zu erklären sind. Auf Figur F1 ist ein für Zentraleuropa typisches Höhenprofil des

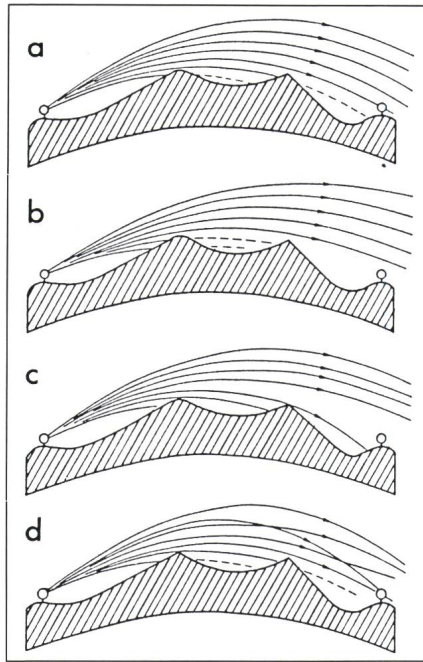


Figur F1 Mögliches Höhenprofil des Brechwertes N

Typisch für schweizerisches und süddeutsches Klima, ΔN gibt die Variation bezüglich der Standardatmosphäre an.

Brechwertes $N(h)$ dargestellt. Nebelschwaden und Quellwolken geben augenfällige Hinweise auf die horizontale Struktur des Brechwertes.

Für qualitative Untersuchungen mag es erlaubt sein, eine ebene Schichtung anzunehmen und die Höhenabhängigkeit des Brechwertes durch einen Polygonzug anzunähern. Bezüglich der Fernmeldepraxis interessieren vor allem Strahlen mit *geringer Neigung*, und in Anbetracht der möglichen Grössen des Brechungsindex n ist eine Approximation der Strahlen durch Parabelstücke möglich. Wenn mit z bzw. h die horizontale bzw. vertikale Koordinate des Punktes auf einen Strahl bezeichnet werden, so lautet die Differentialgleichung des Strahlenverlaufs



Figur F2 Strahlenverlauf bei typischen troposphärischen Brechungseffekten

- a Normalfall: keine Schichtenbildung; Strahlenverlauf in der Standardatmosphäre
- b sog. *k-Schwund* infolge geringeren Höhengradienten des Brechwertes N (Auftreten von Beugungsdämpfungen an Geländehindernissen)
- c Defokussierung/Fokussierung: infolge bestimmter räumlicher Strukturen des Brechwertes entstehen Gebiete mit relativ niedriger bzw. relativ hoher Strahlendichte; die Unterschiede können leicht 10 dB betragen, mässig rasch variieren oder tageweise andauern.
- d Mehrwegeausbreitung infolge besonderer räumlicher Struktur des Brechwertes N ; das Signal kann auf verschiedenen Wegen vom Sender zum Empfänger gelangen.

$$\frac{dh}{dz} = (z-z_0) \frac{dn}{dh} \quad (f_4)$$

wobei z_0 eine Konstante ist und dn/dh , wie bereits bemerkt, als stückweise konstant angenommen wird. Dadurch ergeben sich entscheidende Vereinfachungen der Berechnung.

Wie in Figur F2 dargestellt, können die Schwunderscheinungen durch drei (einzeln oder gemeinsam wirkende) Brechungsphänomene erklärt werden. Die Figur F2a zeigt den Strahlengang in der gut durchmischten Standardatmosphäre. Die Strahlkrümmung hängt vom Höhengradienten des Brechwertes ab. Ein geringerer Gradient dn/dh bewirkt eine schwächere Strahlkrümmung und Geländehindernisse vermögen dann durch Beugungsdämpfungen in Erscheinung zu treten; dieser *k-Schwund* ist schwach frequenzabhängig (Fig. F2b). *Defokussierungen* bzw. *Fokussierungen* führen zu frequenzunabhängigen Feldstärkevariationen (Fig. F2c).

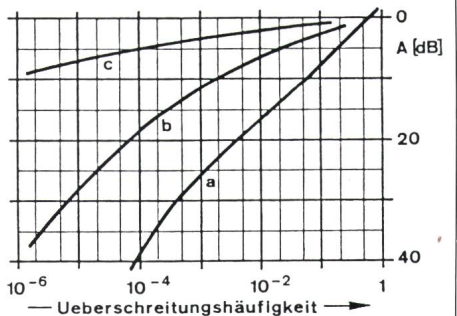
Starke Signaleinbrüche sind erst beim Auftreten troposphärischer *Mehrwegeausbreitung* möglich. Die auf verschiedenen

Pfaden vom Sender zum Empfänger gelangenden Signale (Fig. F2d) treffen mit verschiedenen Phasenlagen ein; durch Überlagerung mögen sie sich (teilweise) auslöschen. Die Frequenzabhängigkeit ist ausgeprägt. Bereits innerhalb der RF-Bandbreite können beträchtliche Variationen der Übertragungsdämpfung auftreten. Man spricht von *Selektivschwund*.

Der Planer möchte wissen, wie gross die *relative Verzögerung* der verschiedenen Signale sein kann. Unter Voraussetzung ebener Schichtung sind die möglichen Differenzen von der Streckenlänge D und dem Höhenprofil des Refraktionsindex abhängig. Offensichtlich kann bei monotoner Abnahme des Brechwertes N keine troposphärische Mehrwegeausbreitung auftreten. Entscheidend ist die auf Figur F1 eingezeichnete Variation ΔN . In der Schweiz sind Werte von $\Delta N < 50$ zu erwarten. Gestützt auf Radiosondierungen [4] ist $\Delta N < 200$. Offensichtlich ist der Wertebereich ΔN durch das betreffende regionale Klima bestimmt. Zur *Abschätzung* der grösstmöglichen *Zeitdifferenz* ΔT darf die folgende Formel benützt werden.

$$\Delta T < \frac{D \cdot \Delta N}{2000 \text{ km}} \text{ ns} \quad (f_5)$$

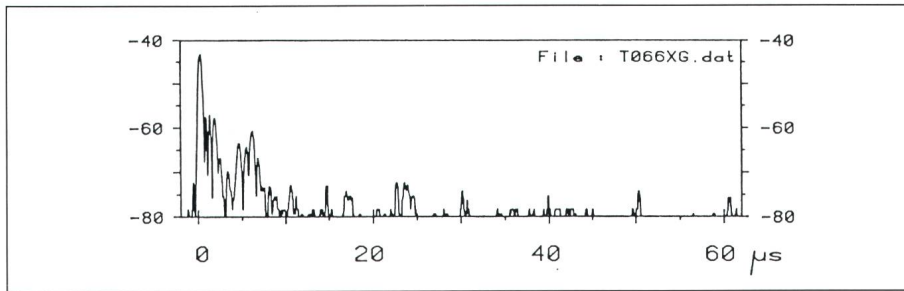
Die einem Phänomen zukommende Bedeutung ist auch durch die Auftretenshäufigkeit bestimmt. In Figur F3 sind die Unterschreitungshäufigkeiten der Empfangsfeldstärken auf Richtstrahlverbindungen während «günstigen» und «ungünstigen»



Figur F3 Monatliche Summenhäufigkeiten der Ausbreitungsdämpfungen A auf einer Richtfunkstrecke (4 GHz, etwa 100 km)

- a ungünstigster Monat: andauernder Mehrwegeschwund
- b Monat mit Mehrwegeschwund während etwa 1% der Zeit
- c günstiger Monat: nur Defokussierung und *k-Schwund*, jedoch kein Mehrwegeschwund

Zeitperioden angegeben. Unter bestimmten Umständen kann sich *stundenweise zusätzlich* ein *k-Schwund* von bis zu 15 dB einstellen. Eine Abhängigkeit von der Jahreszeit und der Lage der Strecke (z. B. Höhe über Meer) ist vorhanden [5]. Ausmass und Häufigkeit von Schwunderscheinungen nehmen mit der Streckenlänge zu.



Figur 1 Im Lorraine-Quartier Bern empfangene Impulsantwort

Horizontal: Verzögerungszeit in μs
 Vertikal: Empfangsamplitude in dB bez. Referenzpegel
 Sender: TV-Station Bantiger, 220 MHz, horizontal polarisierter Rundstrahler
 Empfang: Turnstile-Antenne, 2 m über Boden

bloss die Signaleinbrüche und die Überfeldstärken von Bedeutung, sondern auch die infolge troposphärischer Mehrwegeausbreitung entstehenden Ausbreitungsverzerrungen. Abschätzungsverfahren sind bekannt; für *exakte* Berechnungen genügen die vorhandenen Daten hingegen nicht. Weder meteorologische Untersuchungen noch Ausbreitungsmessungen vermögen in *erwünschtem* Masse Auskunft über die räumliche Struktur des Brechwertes N zu geben.

Diese naturbedingte Beschränkung, welche einer quantitativen Erfassung der Ursachen von Ausbreitungserscheinungen unterliegt, mag als Vorwand benützt werden, den physikalischen Fragestellungen auszuweichen. An die Stelle wissenschaftlicher Betrachtungen tritt dann das blosses Sammeln «statistischer Daten». Unter solchen Umständen ist vielfach auch ungenügend bekannt, wie die erhaltenen Ergebnisse auf Orte und Zeiten mit anderen Bedingungen zu übertragen sind. Die *Interpretation* quantitativer statistischer Daten bedingt qualitative Untersuchungen, wie sie durch ein Beispiel illustriert werden sollen.

Beispiel

Es sei zur Vereinfachung – und Ermöglichung – der Berechnung eine ebene Schichtung mit stückweise konstantem Gradienten dN/dh des Brechwertes N angenommen. Damit die Un-

tersuchung leicht nachvollziehbar ist, soll das Höhenprofil $N(h)$ nur einen Knick in der Höhe h_k aufweisen. Im weiteren sei für die Höhen $h < h_k$ der Brechwert N konstant und für $h > h_k$ weise der Gradient dN/dh einen fixen Wert auf. Bei Benützung von Formel (f4) kann dann die Berechnung des Strahlenfeldes auf die Lösung von Gleichungen ersten, zweiten und dritten Grades zurückgeführt werden. Dabei charakterisieren nur die realen Lösungen mögliche Verbindungswege vom Sender zum Empfänger. Eine grössere Mannigfaltigkeit, d.h. mehr als drei Lösungen ergeben sich bei Benützung komplizierterer Modelle.

Die Höhe h des Knicks im Profil kann als zeitlich variabel angenommen werden. Die dann als Funktion der Zeit berechenbaren Empfangssignale weisen ein gleiches Erscheinungsbild wie reale Feldstärkeregistrierungen auf. Dementsprechend mögen auch die aufgrund von Vereinfachungen erhaltenen Ergebnisse als wirklichkeitsnah betrachtet werden. Das Rechenverfahren basiert auf der Strahlenoptik. Beim Wechsel auf eine andere Zahl von Verbindungswegen können die für die Anwendung der Strahlenoptik notwendigen Voraussetzungen nicht mehr in genügendem Masse erfüllt sein, weshalb dann die Berechnung beispielsweise zu hohe Feldstärkewerte ergibt, die zu ignorieren sind. Die Berechnung soll jedoch primär nicht quantitative, sondern

qualitative Ergebnisse liefern und damit zu einem besseren Verständnis beitragen.

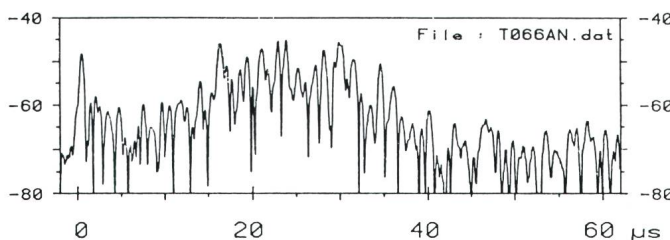
Entsprechend den obigen Angaben sind für eine 75 km lange Strecke die Ausbreitungsbedingungen als Funktion der «Knickhöhe» h_k bestimmt und in Figur 3 dargestellt worden. Das Niveau des Senders dient als Referenzhöhe; der Empfänger befindet sich auf der Höhe 150 m. Der Gradient dN/dh beträgt $-0,2\text{ m}^{-1}$. Bezüglich dieser Konfiguration ist für $h_k < 138\text{ m}$ und $h_k > 145\text{ m}$ (bezüglich der Senderhöhe) je *nur* ein Weg vom Sender zum Empfänger möglich. Für den Bereich $138\text{ m} < h_k < 145\text{ m}$ existiert jedoch Mehrwegeempfang. Die drei Signale S_n mit den relativen Amplituden E (in dB) und relativen Verzögerungen T_n (in ns) sind als Funktionen der Knickhöhe h_k skizziert. Bei tiefen Werten von h_k wird nur das um T_1 verzögerte Signal S_1 empfangen. Durch das Auftreten der zusätzlichen Signale S_2 und S_3 entsteht der (selektive) Mehrwegeschwund. Wie ersichtlich, darf die Amplitudengleichheit unterschiedlich verzögerter Signale nicht ausgeschlossen werden. Dementsprechend sind stärkere Variationen der RF-Übertragungsfunktion zu erwarten. Der nach Formel (f5) abgeschätzte Wert ΔT gibt Hinweise auf die Frequenzabhängigkeit. Ist später h_k grösser als 145 m, so findet die Übertragung nur noch durch das Signal S_3 mit der relativen Verzögerung T_3 statt.

In der Breitbandkommunikation ist z.T. eine gute Synchronisation zwischen Sender und Empfänger erforderlich. Die auf Figur 3 dargestellten, durch einfache und überblickbare Berechnungen erhaltenen Ergebnisse zeigen, dass die Synchronisation *während der ganzen Dauer* eines Schwundereignisses einzuhalten ist (Mehrwegeschwunderscheinungen treten stundenweise auf). Im besonderen ist die möglicherweise erhoffte Existenz einer «fixen, dominanten Verzögerungszeit» auszuschliessen.

4. Schlussbemerkungen

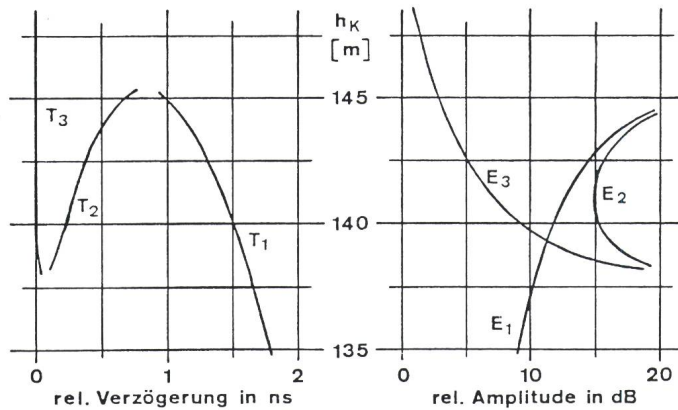
Ein Hauptproblem der drahtlosen Übertragungstechnik hat früher darin bestanden, ein im Vergleich zu Fremdstörungen und Eingangsruschen genügend starkes Signal zu empfangen. Dieser Frage ist auch heute noch Beachtung zu schenken; den Schwierigkeiten kann grundsätzlich durch höhere Senderleistungen, Antennengewinne und Diversity-Verfahren begegnet

Figur 2
 Auf der Kantonsstrasse Bern-Muri empfangene Impulsantwort
 (Thunstr. 63, Muri); gleiche Messbedingungen wie bei Figur 1.



Figur 3
Relative Amplituden
und Verzögerungs-
zeiten der einzelnen
Signale bei troposphä-
rischer Mehrwegeaus-
breitung

Berechnungsergebnisse
 für die folgende Höhen-
 bereichskonfiguration:
 $h < h_K$: $N = \text{konstant} \approx 1$
 $h > h_K$: $dN/dh = -0,2$
 pro m
 Streckenlänge: 75 km
 Senderhöhe: 0 m
 Empfängerhöhe: 150 m



Messreihen unter vorgegebenen Bedingungen.

Viele der Gegenmassnahmen lassen sich als eine allgemeine Anwendung adaptiver Equalizer, interpretieren (Korrektur des RF-Frequenzgangs). Wie die Illustrationsbeispiele zeigen, sind diese Equalizer, den sich stochastisch ändernden Gegebenheiten entsprechend, dauernd abzugleichen. Die Entwicklung solcher Methoden zur Vermeidung oder Korrektur zur Ausbreitungsverzerrungen stellt eine interessante Aufgabe dar.

Literatur

- [1] D. C. Cox and R. P. Leck: Distribution of multipath delay spread and average excess delay for 910-MHz urban mobile radio paths. IEEE Trans. AP 23(1975)2, p. 206...213.
- [2] W. E. Debrunner and A. Zogg: Übertragungsfunktionen bei Mehrwegeempfang in hügeligem Gelände. Techn. Mitt. PTT 65(1987)3, S. 147...151.
- [3] A. Zogg: Reflexionsmessungen mit Fernseh-testzeilen: Echodiagramme der 1. Messkampagne (Bantiger TV K 10). Bericht Nr. VD11.1045 (30.4.85) der Abteilung F+E, GD/PTT. Bern, Generaldirektion der PTT, 1985.
- [4] B. R. Bean and E. J. Dutton: Radio meteorology. New York, Dover Publications, 1968.
- [5] W. E. Debrunner: Abschätzung des zu erwartenden Refraktionsschwundes (d.h. Mehrwegschwund u.ä.). Bericht Nr. VD11.1044F (8.5.85) der Abteilung F+E, GD/PTT. Bern, Generaldirektion der PTT, 1985.

werden. Die zur Vermeidung gegenseitiger Störungen notwendige Frequenzkoordination lässt sich – wie viele technische Massnahmen – der Sache entsprechend nur mit begrenzter Wirksamkeit durchführen. Eine Anwendung der Breitbandtechnik lässt bessere Störfestigkeiten erwarten. Sowohl theoretische Studien wie praktische Erfahrungen lehren jedoch, dass mit grösserer Übertragungsbandbreite die Gefahr von Ausbreitungsverzerrungen im allgemeinen zunimmt. Methoden zur Abschätzung dieser Verzerrungen hängen wesentlich von der gewählten Modulationsart ab.

Der drahtlose Übertragungskanal stellt eine notwendige Ergänzung zu den leitergebundenen Systemen dar, und seine Eigenschaften sind für die Planung im notwendigen Masse erfassbar. Die Ursache der Ausbreitungsverzerrungen, d.h. der Mehrwegeempfang ist abhängig von der Topographie und dem Klima und daher nicht vermeidbar! Die Zusammenhänge lassen sich durch Modelle beschreiben, und die Grössenordnung können aufgrund allgemeiner Überlegungen abgeschätzt werden. Wie in anderen Sachgebieten bedingen quantitative Aussagen die Durchführung von