Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe = 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 Telegrafenbetriebe

Band: 35 (1957)

Heft: 2

Artikel: Die Nachrichtenübermittlung auf Wellenleitern = La transmission d'informations au moyen de guides d'ondes

Autor: Epprecht, G.W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-875066

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: 23.01.2026

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

— L'oscillographe électro-dynamique «OED» encreur, à pivots virtuels. Microtecnic **5** (1951), 26...27.

— Die elektro-dynamischen Oszillographen-Universal-Registrierinstrumente für Frequenzen zwischen 0 und 500 Hz. Microtecnic **7** (1953), 28...32.

— Le typo-sonographe phonétique ou phonétographe. Bull. techn. PTT 1952, n° 12, p. 363...379.

— L'enregistrement magnéto-graphique de fréquences acoustiques. (Magnétophones diviseurs de fréquences pour oscillographes encreurs.) Helv. Phys. Acta **26** (1953), 403...407.

— Frequenzteilende Magnetophone für Tintenoszillographen OED. Magneto-graphische Aufzeichnung von Frequenzen zwischen 0 und 10 000 Hz. Microtecnic **7** (1953), 149...152.

— Phonétographe et phonétique. Folia Phoniatrica **5** (1953), 223...232.

Liste des brevets publiés, de l'auteur, concernant les sonographes et phonétographes (autres brevets déposés).

Pays	numéro	date publ.	durée
USA	2512889	27. 6. 1950	1953
USA	2540660	6. 2. 1951	1968
Grande-Bretagne	6633880	19. 1. 1951	1964
Allemagne	937019	29. 12. 1955	
France	976368	16. 3. 1951	1968
Italie	449588	22. 6. 1949	1964
Hollande	78136/42t/2	27. 6. 1955	1972
Belgique	468700	31. 1. 1949	1969

Adresse de l'auteur: *Jean Dreyfus-Graf*, Ing. Dipl. E. P. F. avenue de la Grenade 5, Genève.

Die Nachrichtenübermittlung auf Wellenleitern*

Von *G. W. Epprecht*, Bern

621.372.8

Zusammenfassung. *Die Arbeit vermittelt einen Überblick über den Stand der Forschung auf dem Gebiete der Nachrichtenübermittlung über Hohlleiter. Es werden einzelne Schwierigkeiten beleuchtet, die überwunden werden müssen, und die Lösungsmöglichkeiten, wie man sie heute sieht, skizziert. Es ist vor allem das Problem der Vielwelligkeit, das einerseits eine spezielle Konstruktion solcher Wellenleiter bedingt und anderseits besondere Modulationsmethoden verlangt. Es scheint jedenfalls möglich, in einigen Jahren, falls dafür Bedarf vorhanden ist, Wellenleiter als Kanäle mit sehr grosser Informationskapazität (100... 1000 MHz Grundbandbreite) zur Verfügung zu stellen.*

Seit dem Auftauchen der Hohlleitertechnik liegt auch die Frage in der Luft, ob *Hohlleiter an Stelle der heute üblichen Trägerkabel und Koaxialkabel als Nachrichtenkanäle* benützt werden könnten. Verlockend daran ist vor allem, dass man durch ein einfaches Rohr eine derart grosse Bandbreite übertragen könnte, dass auch für internationale Verbindungswege auf lange Zeit hinaus ein Überfluss von Sprech- und Fernsehkanälen zur Verfügung stände. Da Frequenzbänder, insbesondere für die drahtlose Übertragung, immer mehr zu einer Mangelware werden, wird man sich früher oder später mit der Frage der Übertragung über Wellenleiter befassen müssen. Es ist vor allem das Verdienst der *Bell-Laboratorien* in den Vereinigten Staaten von Amerika, einen Anfang in der Untersuchung dieses Gebietes gemacht zu haben, und die vorliegende Übersicht über den gegenwärtigen Stand der Dinge stützt sich zu einem grossen Teil auf Publikationen und persönliche Angaben von Mitarbeitern dieses Forschungsinstitutes (vgl. Bibliographie). Im folgenden seien nun einige grundsätzliche Fragen, Schwierigkeiten und Lösungsmöglichkeiten eines solchen Übertragungssystems beleuchtet.

Trägerfrequenz und Dämpfung des Übertragungsweges

Es gibt mancherlei Arten von Übertragungsleitungen, Wellenleiter im weitesten Sinne, die man

* Als Erstdruck erschienen in der Beilage «Technik» der «Neuen Zürcher Zeitung», Nr. 409, vom 13. Februar 1957.

La transmission d'informations au moyen de guides d'ondes*

Par *G. W. Epprecht*, Berne

Résumé. *Le présent article donne un aperçu de l'état des recherches dans le domaine de la transmission des informations par des guides d'ondes. Il montre les difficultés qui restent à vaincre et esquisse les possibilités de réalisation telles qu'on les entrevoit aujourd'hui. L'une de ces difficultés est la multiplicité des modes d'ondes, qui exige une construction particulière des guides et des méthodes de modulation spéciales. Il est possible cependant que d'ici quelques années, si le besoin s'en fait sentir, on puisse mettre à disposition des guides d'ondes en tant que canaux présentant une capacité d'information élevée (100... 1000 MHz de largeur de bande fondamentale).*

Dès l'apparition de la technique des guides d'ondes, on s'est demandé s'il serait possible d'utiliser ces conducteurs *comme canaux de transmission en lieu et place des câbles à courants porteurs et des câbles coaxiaux généralement en usage aujourd'hui*. L'intérêt d'un tel système réside dans le fait de pouvoir transmettre par un simple tube une largeur de bande telle qu'elle constituerait pour longtemps encore une réserve suffisante de voies de conversation et de télévision pour les liaisons internationales. Les bandes de fréquences devenant une marchandise toujours plus rare, surtout pour la transmission sans fil, on devra tôt ou tard s'occuper de la question de la transmission au moyen de guides d'ondes. C'est aux *laboratoires Bell* des Etats-Unis d'Amérique que revient surtout le mérite d'avoir commencé à explorer ce domaine, et le présent exposé s'appuie en grande partie sur des publications et des indications personnelles de collaborateurs de cet institut de recherches (voir bibliographie). Nous ne traiterons ci-après que de quelques questions de principe, de difficultés et de solutions possibles relatives aux transmissions par les guides d'ondes.

Fréquence porteuse et affaiblissement de la voie de transmission

Il existe une grande variété de lignes de transmission à guide d'ondes au sens large du terme. Les

* L'original en allemand de cet article a paru dans le supplément «Technik» de la «Neue Zürcher Zeitung», n° 409, du 13 février 1957.

in der Hochfrequenztechnik benützt. Die bekanntesten sind die *Lecher- oder Paralleldrahtleitung*, die verschiedenen Typen von *koaxialen Leitungen*, die verschiedenen *Hohlleiter* und die *Goubau-Leiter* (vgl. Fig. 1).

Für die Fernübertragung kommen nur Leitungen mit einer Dämpfung von weniger als etwa 10 dB/km in Frage. Koaxialkabel können wegen sonst zu grossen Abmessungen höchstens bis zu Frequenzen gegen 100 MHz verwendet werden. Unterhalb von etwa 1 GHz (1 GHz = 1 Gigahertz = 1000 Megahertz = 10^9 Hertz) könnten unter Umständen Goubau-Leiter verwendet werden. Solche Leiter bestehen entweder aus einem Draht, der mit einer Schicht von Dielektrikum bedeckt ist, oder aus einer Drahtwendel mit grosser Steigung. Ein Goubau-Draht kann ähnlich wie eine Freileitung gespannt werden, nur dass besondere Vorkehren getroffen werden müssen, wenn solche Leiter um Ecken geführt werden.

Oberhalb von etwa 3000 MHz liegt der Bereich der Hohlleiter. Die elektromagnetischen Wellen laufen vollständig im Innern des Rohres, ähnlich wie bei den Koaxialkabeln, nur dass hier kein Innenleiter vor-

plus connus sont la *ligne de Lecher ou à fils parallèles*, les divers types de *lignes coaxiales*, les *guides d'ondes* et les *guides de Goubau* (v. fig. 1).

Pour la transmission à grande distance n'entrent en considération que des lignes ayant un affaiblissement inférieur à 10 dB/km environ. Les câbles coaxiaux ne peuvent être employés que pour des fréquences ne dépassant pas 100 MHz, sinon leurs dimensions deviennent trop considérables. Au-dessous de 1 GHz environ (1 GHz = 1 gigahertz = 1000 mégahertz = 10^9 hertz), on peut dans certains cas employer des guides de Goubau, constitués soit d'un fil recouvert d'une couche de diélectrique, soit d'un fil enroulé en hélice avec spires à forte pente. Un fil de Goubau peut être tiré comme une ligne aérienne; il faut toutefois prendre certaines précautions pour les coudes.

Le domaine des guides d'ondes se situe au-dessus de 3000 MHz. Les ondes électromagnétiques passent entièrement à l'intérieur du tube, comme dans les câbles coaxiaux, avec cette différence qu'il n'y a pas de conducteur central. Les guides d'ondes les plus courants sont ceux de forme rectangulaire (par

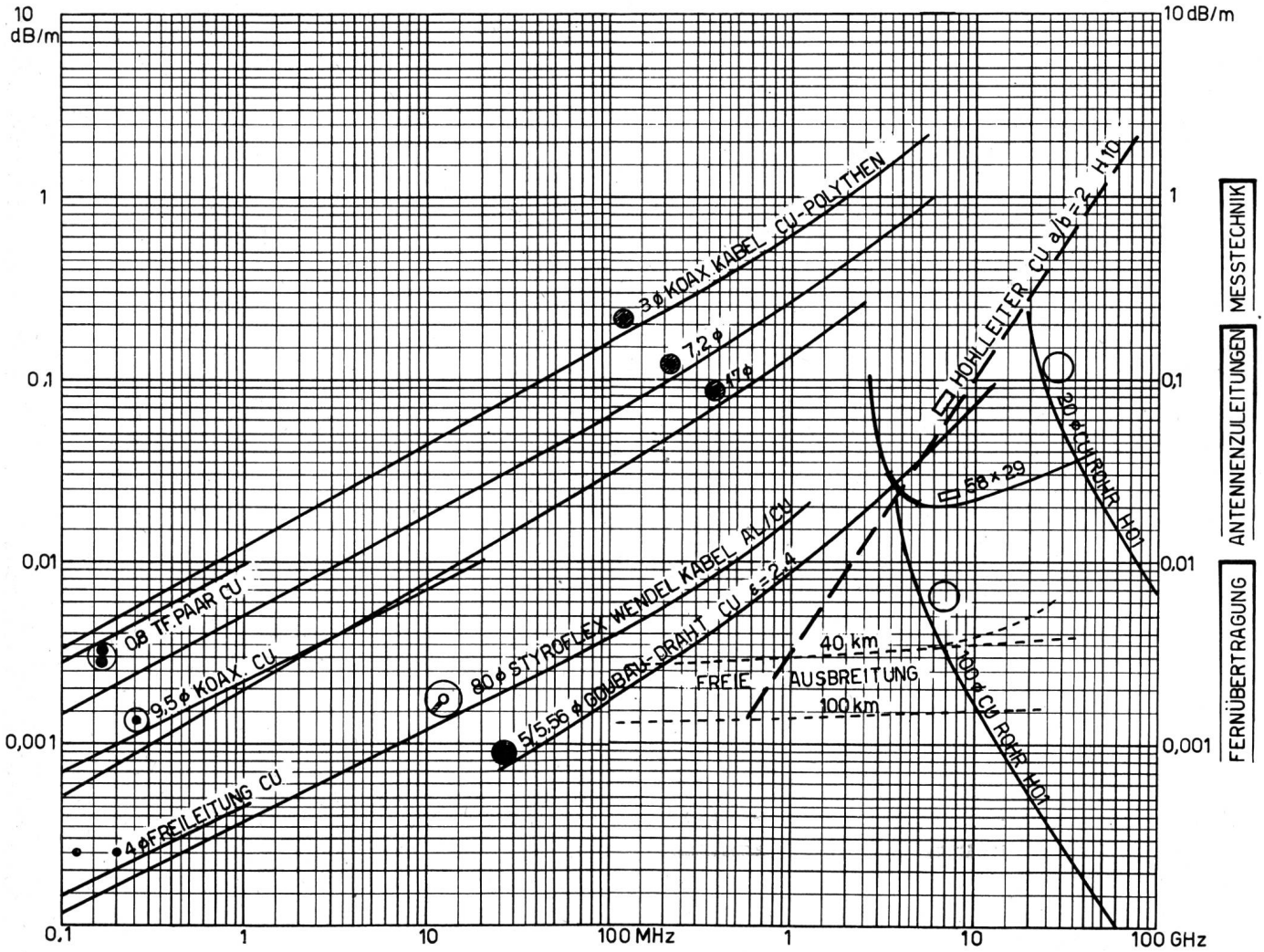

Fig. 1. Dämpfung verschiedener Hochfrequenzleitungen in Funktion der Frequenz
Affaiblissement de différentes lignes à haute fréquence en fonction de la fréquence

handen ist. Am gebräuchlichsten sind die rechteckigen Rohre (z. B. der Typ WR 229 für das 4-GHz-Band mit Innenabmessungen von 29 × 58 mm). Obwohl solche Hohlleiter ein sehr grosses Frequenzband übertragen können, wird normalerweise nur ein kleiner Ausschnitt davon benützt (Bandbreite etwa 40 %, vgl. Fig. 1). In diesem Bereich kann sich nur die sogenannte H 10-Welle oder Grundwelle im Hohlleiter fortpflanzen. An rechteckigen Hohlleitern hat man eine ganze Reihe zur Verfügung. Die mittleren Dämpfungswerte für die H 10-Wellen solcher Hohlprofile steigen proportional zu $f^{3/2}$ (vgl. gestrichelte Gerade in Fig. 1). Für die Fernübertragung wären solche Hohlleiter nur brauchbar unterhalb etwa 2 GHz, und dort übersteigen die notwendigen Dimensionen bereits 15 cm; solche Leiter wären schwierig zu verlegen.

Neben den rechteckigen verwendet man auch runde Hohlleiter. Im Bereich ihrer Grundwelle (hier die H 11-Welle) verhält sich der runde Hohlleiter ähnlich wie der rechteckige. Wichtig ist jedoch für uns hier hauptsächlich die H 01-Welle, deren Dämpfung interessanterweise mit steigender Frequenz stark abfällt, so dass sich die Benützung als Fernleitung geradezu aufdrängt. Um zu vernünftigen Leiterdurchmessern zu kommen, müssen allerdings die verwendeten Frequenzen mindestens in der Gegend von 30 GHz liegen.

Damit man die Probleme der Wellenausbreitung in Hohlleitern verstehen kann, muss die *Mehrwelligkeit* kurz beschrieben werden:

In jedem Hohlleiter kann bei der gleichen Frequenz eine Vielzahl von elektromagnetischen Wellen existieren (vgl. Fig. 2). Jeder dieser Wellenmodi oder Wellentypen ist unabhängig von den andern und hat eine bestimmte Ausbreitungsgeschwindigkeit, die von der Frequenz abhängt und die verschieden ist für jeden Modus. Jeder Modus hat auch eine ihn charakterisierende Grenzfrequenz, bei der die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Energie null wird. Die Dämpfung eines Modus steigt bei der Grenzfrequenz um etliche Zehnerpotenzen und ist jenseits dieser Frequenz so gross, dass ein Modus schon innerhalb einer Wellenlänge vollständig abklingt. Ein idealer Hohlleiter ist in unserem Falle exakt zylindrisch. Jede Abweichung von dieser Idealform stört die sich ausbreitende Welle eines reinen Modus. Damit die Randbedingungen für das elektromagnetische Feld auch an einer Unstetigkeit erfüllt sein können, muss nämlich eine Anzahl weiterer Modi entstehen. Diese setzen sich zu der wirklichen Feldkonfiguration zusammen, ähnlich wie die Komponenten einer *Fourier*zerlegung. Alle Modi, die oberhalb ihrer entsprechenden Grenzfrequenz liegen, laufen nun nach beiden Richtungen von der Unstetigkeit fort, sie nehmen einen Teil der Energie mit sich und können an anderer Stelle wieder störend auftreten. In der gewöhnlichen Wellenleitertechnik sind die Dimensionen des Leiters so gewählt, dass nur ein einziger Modus (der Grund-

exemple le type WR 229 pour la bande de 4 GHz, dimensions intérieures 29 × 58 mm). Bien que ces guides puissent transmettre une très large bande de fréquences, on n'en utilise normalement qu'une petite partie (largeur de bande d'environ 40 %, voir fig. 1). Dans cette région du spectre, seule l'onde H 10 ou onde fondamentale peut se propager. On dispose de toute une série de guides d'ondes rectangulaires. Avec ce type de profil, les valeurs moyennes d'affaiblissement pour les ondes H 10 croissent proportionnellement à $f^{3/2}$ (voir ligne droite pointillée de la figure 1). Pour la transmission à grande distance, les guides d'ondes rectangulaires ne seraient utilisables qu'au-dessous de 2 GHz et leurs dimensions seraient alors supérieures à 15 cm, ce qui rendrait leur pose difficile.

On peut, au lieu de guides rectangulaires, utiliser des tubes à section circulaire. Dans la gamme de son onde fondamentale (onde H 11), le guide d'ondes rond se comporte comme le guide rectangulaire. Cependant, l'onde importante pour nous est surtout l'onde H 01, car, particularité intéressante, son affaiblissement diminue fortement à mesure que la fréquence augmente. Son emploi s'impose tout spécialement pour les transmissions à grandes distances. Pour obtenir des diamètres de tube raisonnables, il faudrait toutefois choisir les fréquences de l'ordre d'au moins 30 GHz.

Pour faire comprendre les problèmes de la propagation des ondes dans les guides d'ondes, nous devons parler brièvement de la *multiplicité des modes d'ondes.*

Dans chaque guide d'ondes peuvent exister, pour la même fréquence, un grand nombre d'ondes électromagnétiques (v. fig. 2). Chacun de ces modes ou types d'onde est indépendant des autres et a une vitesse de propagation déterminée, dépendant de la fréquence et différente pour chaque mode. Chaque mode a également une fréquence de coupure caractéristique à laquelle la vitesse de propagation de l'énergie passe à zéro. A la fréquence de coupure, l'affaiblissement d'un mode s'accroît de quelques puissances de dix et, au delà de cette fréquence, devient si grand que le mode s'amortit complètement déjà dans les limites d'une longueur d'onde. Dans le cas que nous étudions, un guide d'ondes idéal est exactement cylindrique. Chaque déviation de cette forme idéale trouble la propagation de l'onde d'un mode pur. Pour que les conditions limites pour le champ électromagnétique soient satisfaites en présence d'une irrégularité du tube, il faut que se produise toute une série d'autres modes. Ceux-ci se groupent, par rapport à la configuration réelle du champ, de manière analogue aux composantes d'une analyse de *Fourier*. Tous les modes qui sont situés au-dessus de leur fréquence de coupure se propagent dans les deux directions à partir de la zone d'irrégularité, empruntent une partie de l'énergie et peuvent produire des perturbations à un autre endroit. Dans la technique ordinaire des guides d'ondes, les

modus) oberhalb der Grenzfrequenz liegt. Zwar entstehen bei Unstetigkeiten auch in diesem Falle die höheren Modi; diese klingen aber über sehr kurze Distanz ab und nehmen keine Wirkleistung auf, sondern stellen nur eine reaktive Belastung dar.

Um die geringe Dämpfung der H 01-Welle im runden Hohlleiter zu verstehen, muss man sich daran erinnern, dass der Verlust bei solchen Leitungen fast ausschliesslich von den *Joule*schen Verlusten der Ströme in den Wänden herrührt. Diese Ströme sind proportional zu den an der Wand herrschenden Feldstärken. Bei der H 01-Welle ist das Feld an der Leiteroberfläche theoretisch null; die Stromdichte in der Wand ist äusserst klein, und dementsprechend sind die Verluste gering.

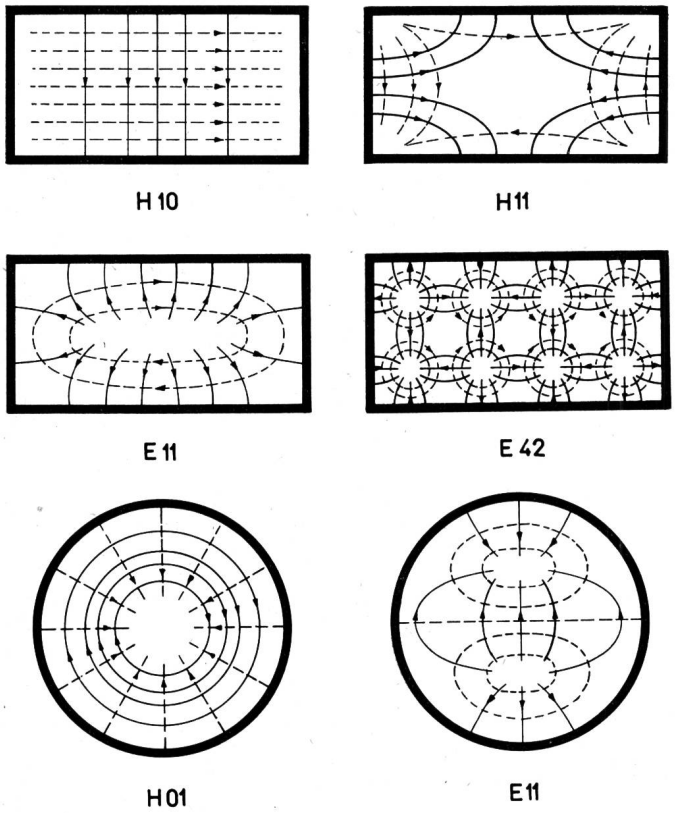

Fig. 2. Verschiedene Wellenleitermodi. Feldbilder im Querschnitt des Leiters: Die ausgezogenen Linien stellen das elektrische, die gestrichelten das magnetische Feld dar

Différents modes de transmission dans des guides d'ondes. Images du champ dans la section du guide d'ondes. Les lignes pleines représentent le champ électrique, les lignes pointillées le champ magnétique

Wenn man nochmals die Dämpfungsverhältnisse betrachtet (vgl. Fig. 1), so sieht man, dass Koaxialkabel bis etwa 10 MHz für Fernübertragungen in Frage kommen. Das Gebiet zwischen 10 MHz und 10 GHz wird gegenwärtig ausschliesslich durch die drahtlose Übertragung beherrscht. Oberhalb etwa 20 GHz wird die leitungsgebundene Übertragung wieder interessant – und zwar für runde Hohlleiter im H 01-Modus –, dies um so mehr, als hier die Schwierigkeiten der drahtlosen Übertragung wegen der atmosphärischen Absorption steigen.

dimensions du guide sont choisies de manière qu'un seul mode (le mode fondamental) se trouve au-dessus de la fréquence de coupure. Les irrégularités y donnent également naissance aux modes supérieurs mais ceux-ci s'amortissent sur une très courte distance; ils n'acquièrent aucune puissance effective et ne représentent qu'une charge réactive.

La raison pour laquelle l'affaiblissement de l'onde H 01 est minime dans le guide d'ondes de section circulaire, est qu'il résulte presque exclusivement des pertes par effet Joule dans les parois. Ces courants sont proportionnels aux intensités de champ existant à la paroi. Pour l'onde H 01, le champ est théoriquement nul à la surface du guide d'ondes; la densité du courant dans la paroi est extrêmement faible et, par conséquent, les pertes sont minimes.

Si l'on considère de nouveau les conditions d'affaiblissement (v. fig. 1), on voit que les câbles coaxiaux entrent en considération jusqu'à environ 10 MHz pour des transmissions à grande distance. La région du spectre comprise entre 10 MHz et 10 GHz est, pour le moment, le domaine exclusif de la transmission sans fil. Au-dessus de 20 GHz, la transmission par conducteur métallique redevient intéressante avec le mode H 01 pour des guides d'ondes de section circulaire, ceci d'autant plus que dans cette région les difficultés de la transmission sans fil s'accroissent en raison de l'absorption atmosphérique.

Perturbations sur la voie de transmission

Dans le cas des liaisons sans fil les difficultés de transmission dépendent des conditions topographiques et atmosphériques qui modifient les cheminements multiples de la propagation et entraînent des évanouissements. Dans celui des guides d'ondes, des problèmes analogues sont soulevés par la dispersion des fréquences et la multiplicité des modes d'onde. Alors que l'évanouissement est limité dans le temps, ces derniers phénomènes sont en quelque sorte constants et par conséquent beaucoup plus gênants. Considérons d'abord la dispersion de fréquence. On entend par là la dépendance qui existe entre la vitesse de propagation et la longueur d'onde. On connaît par exemple la dispersion des ondes lumineuses dans les corps transparents; le résultat en est la décomposition des couleurs par le prisme. La vitesse de propagation de l'énergie dans chaque mode obéit à cette même loi (v. fig. 3); elle est nulle à la fréquence de coupure et, lorsque la fréquence augmente, s'approche asymptotiquement de la vitesse des ondes lumineuses. Un signal qui, au commencement du circuit, est nettement délimité dans le temps, mais contient une certaine bande de fréquences, fond en quelque sorte pendant qu'il passe sur le circuit. Les composantes supérieures de la bande parviennent les premières au but, les inférieures suivent péniblement. L'impulsion est déformée et élargie, un signal modulé en fréquence est distordu. A une différence

Störungen auf dem Übertragungsweg

Bei drahtlosen Verbindungen hängen die Übertragungsschwierigkeiten mit den topographischen und atmosphärischen Verhältnissen zusammen. Analog zu den Schwunderscheinungen, die auf Mehrwegausbreitungen zurückgehen, hat man bei der Wellenleiterübertragung die Probleme der Frequenzdispersion und der Vielwelligkeit. Während der Schwund eine zeitlich begrenzte Störung ist, sind die letzteren Erscheinungen einigermassen konstant und daher auch viel störender. Zunächst soll das Phänomen der Frequenzdispersion betrachtet werden. Man versteht darunter die Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Wellenlänge. Bekannt ist zum Beispiel die Dispersion der Lichtwellen in durchsichtigen Körpern; als Resultat entsteht die Farbenzerlegung durch ein Prisma. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Energie in jedem Modus gehorcht dem gleichen Gesetz (vgl. Fig. 3); sie ist null bei der Grenzfrequenz und nähert sich mit steigender Frequenz asymptotisch der Lichtgeschwindigkeit. Ein Signal, das am Anfang einer Leitung zeitlich scharf begrenzt ist, aber ein bestimmtes Band von Frequenzen enthält, zerfliesst gewissermassen, während es auf der Leitung läuft. Die höheren Frequenzkomponenten sind zuerst am Ziel, die tieferen hinken nach. Ein Impuls wird dadurch verformt und verbreitert, ein frequenzmoduliertes Signal verzerrt. Für einen bestimmten zulässigen Laufzeitunterschied zwischen den beiden Frequenzenden eines zu übertragenden Bandes ergibt sich daraus ein Zusammenhang zwischen übertragbarer Bandbreite und Übertragungsdistanz. Die Bandbreite nimmt dabei ab mit der Wurzel aus der Distanz. Für die in Frage kommenden Wellenleiter und Distanzen liegen die übertragbaren Bandbreiten in der Grössenordnung von wenigen hundert Megahertz oder etwa 1 % der Trägerfrequenz. Die Dispersion ist nun allerdings eine Erscheinung, die durch geeignete Laufzeitglieder kompensiert werden kann. Wie weit solche Glieder technisch realisiert werden können, so dass sie auch den übrigen Anforderungen, zum Beispiel an Modusreinheit genügen, ist noch nicht abgeklärt. Aber auch wenn es gelingt, die zulässigen Bandbreiten wesentlich zu steigern, so ist im Prinzip vorauszusehen, dass ein Hohlleitersystem nicht mit einem einzigen, sondern mit mehreren Trägern in gewissen Frequenzabständen von einigen Prozenten gespeist werden wird.

Schlimmer als die Frequenzdispersion erscheint uns heute die *Frage der Modusumwandlungen*. Je grösser die Anzahl der Wellentypen ist, die auf einer Leitung laufen können, desto schwieriger wird es, die gewünschten Modi rein zu erzeugen und zu erhalten. Man muss sich vergegenwärtigen, dass in unserem Hohlleiter grössenordnungsmässig 100 oder mehr Modi bestehen können, einige breiten sich schneller aus und andere langsamer als die H 01-Welle. Ein Impuls, der Energie in mehreren Modi enthält, wird sich ebenfalls verbreitern, während er sich

admissible donnée du temps de propagation entre les deux extrémités d'une bande à transmettre, correspond une relation entre la largeur de bande transmissible et la distance de transmission. La largeur de bande diminue propotionnellement à la racine carrée de la distance. Pour les guides d'ondes et les distances entrant en considération, les largeurs de bande transmissibles sont de l'ordre de quelques centaines de MHz, c'est-à-dire à peu près 1 % de la fréquence porteuse. Le phénomène de la dispersion peut toutefois être compensé par des organes de retardement. On ne sait pas encore dans quelle mesure de tels organes peuvent être réalisés techniquement de manière à satisfaire aussi aux autres exigences, par exemple sous le rapport de la pureté du mode. Mais, même si l'on réussit à augmenter considérablement les largeurs de bandes admissibles, on peut prévoir qu'en principe un système de guides d'ondes ne sera pas alimenté par un seul porteur, mais par plusieurs écartés en fréquence de quelques pour-cent dans la bande de transmission de ce guide.

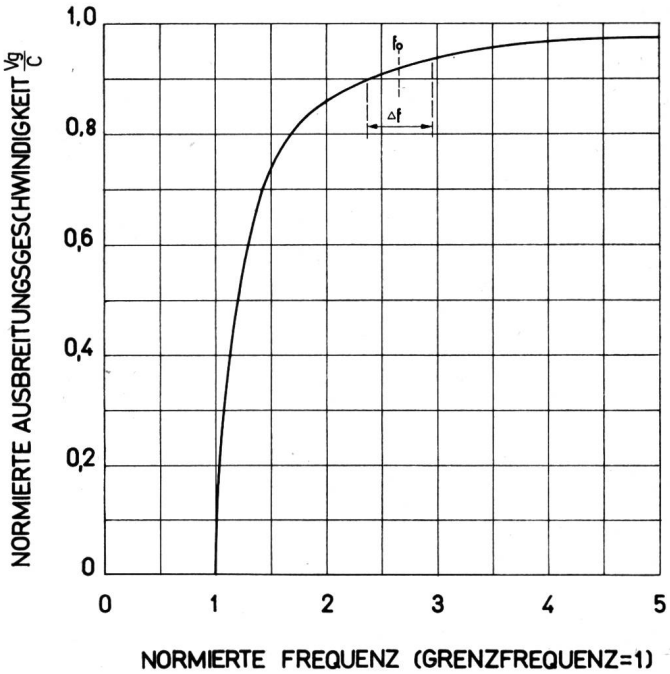

Fig. 3. Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen im Hohlleiter von der Nähe der Grenzfrequenz. Die Kurve gilt für alle Modi

Rapport entre la vitesse de propagation des ondes dans le guide d'ondes et la proximité de la fréquence de coupure. La courbe est valable pour tous les modes

Plus grave que la dispersion des fréquences nous apparaît aujourd'hui *la question des transformations de mode*. Il est d'autant plus difficile d'obtenir et de maintenir purs les modes désirés que le nombre des types d'ondes qui parcourent une ligne est plus élevé. Il faut se souvenir que dans notre guide d'ondes, il peut exister jusqu'à cent et même plus de ces modes, certains se propagent plus rapidement et d'autres plus lentement que l'onde H 01. Une impulsion qui renferme de l'énergie convoyée par plu-

längs des Leiters fortpflanzt; es entsteht eine Art Modusdispersion, die im Unterschied zu der gewöhnlichen Dispersion auch für ein verschwindend enges Frequenzband vorhanden ist. An jeder kleinen mechanischen oder elektrischen Inhomogenität eines Wellenleiters (z. B. wenn der Leiter leicht elliptisch ist an einer Stelle) wird ein Teil der reinen H 01-Welle in andere Modi verwandelt. Dies hat zweierlei Folgen: Erstens ist die Energie des fremden Modus verloren, und dadurch steigt die Dämpfung an. Zweitens und schwererwiegend: An jeder Stelle, die den H 01-Modus in andere umwandelt, werden auch andere Modi in den H 01-Modus zurückverwandelt. Wenn, wie im praktischen Fall, mehrere Umwandlungsstellen vorhanden sind (vgl. Fig. 4), so werden Anteile eines ursprünglich reinen Modus, die in andere Modi übergegangen sind, in den gleichen Modus zurückverwandelt. Die rückverwandelte Information ist nun aber nicht mehr kohärent mit der direkt übertragenen, wegen der verschiedenen Laufzeiten der Modi. Die mehrfach umgewandelte Energie wirkt wie ein Rauschpegel. Leider kann man dieses Rauschniveau durch höhere Sendeleistung nicht überwinden, weil es proportional der Sendeleistung ansteigt.

Das Problem der Modusumwandlung wurde in den Bell-Laboratorien theoretisch und praktisch in Angriff genommen, und diese Studien haben schon einige wichtige Resultate geliefert, wenn auch der ganze Fragenkomplex noch nicht als abgeklärt gelten kann. Vor allem fehlen noch praktische Versuche auf lange Distanzen, die die Richtigkeit der heute gemachten Annahmen bestätigen. Versuche wurden bis heute nur an einer etwa 150 m langen Leitung gemacht, mit der allerdings durch Vielfachreflexion Distanzen bis zu 60 km simuliert wurden. Die theoretischen Untersuchungen liefern folgendes Resultat: Für den durch Modusumwandlungen verursachten Störpegel sind vor allem zwei Parameter wichtig, erstens das Verhältnis der Dämpfung im H 01-Modus zu den Dämpfungen der andern Modi, zweitens das Verhältnis des Verlustes durch Moduskonversion zum reinen Stromwärmeverlust der H 01-Welle. Nimmt man an, dass der Konversionsverlust ein Drittel des Gesamtverlustes beträgt, so muss die Dämpfung der unerwünschten Modi etwa 500mal grösser sein als jene für den Nutzmodus. In diesem Falle ist der Pegelunterschied von Nutz- zu Störsignalen noch etwa 20 dB, nachdem die Nutzwelle eine Distanz durchlaufen hat, die einer Dämpfung von 60 dB entspricht. 60 dB Streckendämpfung ist ein vernünftiger Wert für ein Verstärkerfeld; auch die Streckendämpfungen der meisten andern Übertragungssysteme, drahtlos oder drahtgebunden, liegen in dieser Grössenordnung.

Damit die unerwünschten Modi so stark gedämpft werden, wie dies nach dem Gesagten erforderlich ist, sind besondere Filter nötig. Ein einfaches Rohr wird kaum je in Frage kommen. Es gibt verschiedene Möglichkeiten für solche Filter, die in ziemlich kurzen

sieurs modes s'élargit également en se propageant le long du guide d'ondes. Il en résulte une sorte de dispersion de modes qui, contrairement à la dispersion ordinaire, existe aussi pour une bande de fréquences infiniment étroite. A chaque défaut d'homogénéité mécanique ou électrique d'un guide d'ondes (par exemple lorsque le guide présente un endroit légèrement elliptique), une partie de l'onde H 01 pure est transformée en d'autres modes. Ce fait a deux conséquences: premièrement l'énergie du mode non désiré est perdue, ce qui augmente l'affaiblissement; deuxièmement et surtout, à chaque endroit qui transforme le mode H 01 en d'autres modes; d'autres modes encore sont transformés à leur tour en mode H 01. S'il existe, comme c'est le cas dans la pratique, plusieurs points de transformation (v. fig. 4), cer-

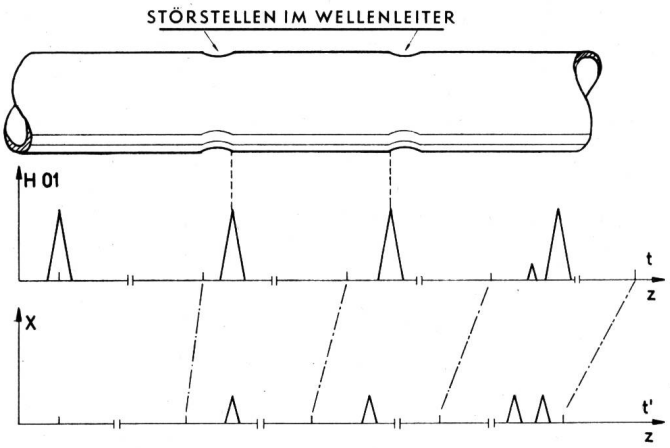

Fig. 4. Mehrfache Modusumwandlungen im Wellenleiter am Beispiel eines Impulses. Der Modus X breitet sich langsamer aus im Leiter als der H 01-Modus. An der zweiten Umwandlungsstelle wird Energie vom X-Modus in den H 01-Modus zurückverwandelt, und zwar verzögert gegenüber der Hauptwelle

Transformations multiples d'un mode dans le guide d'ondes, montrées par l'exemple d'une impulsion. Le mode X se propage plus lentement que le mode H 01. Au deuxième point de transformation, l'énergie du mode X est retransformée en mode H 01, en retard par rapport à l'onde principale

taines parties d'un mode pur, qui ont passé à d'autres modes, sont ramenées au mode primitif. L'information retransformée n'est cependant plus cohérente avec celle qui est transmise directement, à cause des temps de propagation différents des modes. L'énergie transformée plusieurs fois agit comme un niveau de bruit. On ne peut malheureusement combattre le bruit par une puissance d'émission plus élevée, car il croît proportionnellement à cette puissance.

Les laboratoires Bell se sont attaqués au problème de la transformation des modes, du point de vue théorique et pratique. Ces études ont déjà donné quelques résultats importants, bien que tout ce complexe de questions ne puisse encore être considéré comme élucidé. On manque surtout d'essais pratiques sur de longues distances, qui confirmeraient l'exactitude des hypothèses émises jusqu'ici. Des essais n'ont eu

Abständen (z. B. 10...50 m) in die Leitung eingefügt werden müssten. Eine Filterart sei hier besonders erwähnt: sie besteht im Prinzip aus einem satt gewikkelten Helix aus dünnem, isoliertem Draht (vgl. Fig. 5). Die Drahtlage ist von einem verlustreichen Material umgeben, beispielsweise leitfähigem Gummi und irgendeiner Armatur, die für mechanische Stabilität sorgt. Alle, ausser den H 0n-Wellen, werden

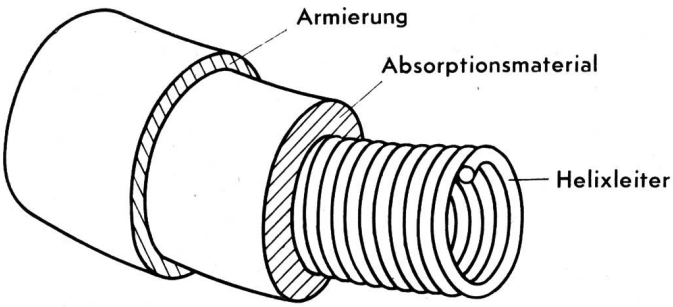

Fig. 5. Helixleiter. Ein solcher Leiter ist gleichzeitig Filter und flexibles Kabel. Solche Hohlleiter könnten für die Fernübertragung in Frage kommen

Guide hélicoïdal. Un guide d'ondes de ce genre constitue en même temps un filtre et un câble flexible. On pourrait utiliser de tels guides d'ondes pour la transmission à grande distance

in diesem Leiter sehr stark gedämpft. Ein solcher Leiter hat noch einen weiteren sehr wichtigen Vorteil, und das ist seine Flexibilität. Es ist nämlich ein besonderes Problem, die H 01-Welle durch einen gebogenen oder abgewinkelten Leiter hindurchzubringen, ohne dass sehr grosse Konversionsverluste auftreten. Möglicherweise kann man den ganzen Hohlleiter als Helixleiter und damit als flexibles Kabel aufbauen. Dieser Leiter ist allerdings kein exklusives Filter für die H 01-Welle, sondern er lässt alle H 0n-Wellentypen passieren, und es wäre noch abzuklären, wieweit diese Modi stören oder ob dafür noch besondere Filter zugefügt werden müssen.

Modulationsmöglichkeiten

Die reinen Übertragungsprobleme hängen eng mit den Fragen des verwendeten Modulationssystemes zusammen. Während man bei tiefen Trägerfrequenzen vorzugsweise Systeme benützt, bei denen die Gesamtbandbreite annähernd gleich dem Produkt aus Kanalzahl und Einzelband ist, hat man bei höheren Frequenzen, wo mehr absolute Bandbreite zur Verfügung steht, die Möglichkeit, jedem Informationskanal ein Mehrfaches seiner Grundbandbreite zuzuordnen. Es gibt eine Vielzahl von einfachen und doppelten Modulationssystemen dafür. Man tauscht damit Störabstand gegen Bandbreite ein. Der Hohlleiter ist auf grosse Distanzen eigentlich ein recht mangelhaftes Übertragungsmedium, denn auch mit aller Sorgfalt wird es schwierig, Störabstände von wesentlich mehr als 20 oder 30 dB zu erreichen. In

lieu jusqu'à maintenant que sur une ligne d'environ 150 m, sur laquelle on avait cependant, par des réflexions multiples, simulé des distances de 60 km. Les essais théoriques ont donné le résultat suivant: Pour le niveau de bruit produit par les transformations des modes, deux paramètres surtout sont importants, le rapport de l'affaiblissement dans le mode H 01 aux affaiblissements des autres modes, et le rapport de la perte par conversion des modes à la perte pure par échauffement dans le mode H 01. Si l'on admet que la perte par conversion est égale au tiers de la perte totale, l'affaiblissement des modes non désirés doit être 500 fois plus grand que celui du mode utile. Dans ce cas, la différence de niveau signal/bruit est encore d'environ 20 dB, l'onde utile ayant parcouru une distance correspondant à un affaiblissement de 60 dB. Un affaiblissement de ligne de 60 dB représente une valeur raisonnable pour une section d'amplification; les affaiblissements de ligne de la plupart des autres systèmes de transmission sont compris dans cet ordre de grandeur.

Des filtres spéciaux sont nécessaires pour affaiblir les modes non désirés dans la mesure indiquée ci-dessus. Un tube simple ne peut guère entrer en considération. Il y a plusieurs possibilités de construire de tels filtres, qui doivent être insérés dans la ligne à des distances relativement courtes (par exemple 10 à 50 m). Mentionnons un genre de filtre particulier: il se compose en principe d'un fil métallique mince, isolé, enroulé en hélice à spires jointives (v. fig. 5). L'hélice est entourée d'une matière provoquant beaucoup de pertes, par exemple de caoutchouc conducteur, et d'une armure destinée à assurer la stabilité mécanique de l'ensemble. Toutes les ondes, sauf l'onde H 0n, sont très fortement affaiblies dans ce guide, qui présente encore un avantage important, celui d'être très flexible. C'est en effet tout un problème que de faire passer l'onde H 01 par un guide courbé ou coudé, sans provoquer des pertes élevées par conversion. Il serait peut-être possible de constituer tout le guide d'ondes d'un conducteur en hélice et d'obtenir ainsi un câble flexible. Ce guide n'est toutefois pas un filtre exclusif pour l'onde H 01, mais laisse passer tous les types d'ondes H 0n. Il y aurait lieu de rechercher encore dans quelle mesure ces modes sont gênants et si des filtres spéciaux doivent encore être ajoutés.

Possibilités de modulation

Les problèmes de transmission proprement dits sont en rapport étroit avec le système de modulation employé. Alors que pour les fréquences porteuses basses on emploie de préférence des systèmes dans lesquels la largeur totale de la bande est égale approximativement au produit du nombre de voies par la largeur de bande individuelle, on a pour les fréquences plus élevées, où l'on dispose d'une plus grande largeur absolue de bande, la possibilité d'attribuer à chaque voie de transmission un multiple

diesem Falle scheint nun die Pulscodemodulation am Platze zu sein. Im Unterschied, zum Beispiel zur Pulsphasenmodulation, wird hier an Stelle jedes Einzelimpulses eine Impulsgruppe übermittelt, die im binären System eine Zahl darstellt, die der momentanen Amplitude des Signals entspricht. Da es bei diesem System nur darauf ankommt, ob an einem der vorbestimmten Zeitpunkte ein Impuls da ist oder nicht, Amplitude und Phase aber in weiten Grenzen variieren können, ist dieses System ausserordentlich störungsfest, sobald die Nutzamplitude einigermassen aus dem Störniveau herauskommt. Ein weiterer Grund für die Pulscodemodulation ist die Möglichkeit der Regeneration. Wenn schon auf einer einzelnen Strecke nur mit Mühe der nötige Rauschabstand erreicht werden kann, so erscheint es beinahe aussichtslos, über eine Vielzahl von Teilstrecken das Signal vor den kumulativen Störeffekten zu retten, wollte man gewöhnliche Verstärker zwischen die Strecken schalten. Bei der Pulscodemodulation kann auf relativ einfache Art bei jedem Zwischenverstärker das Signal neu geformt und von allen unerwünschten Komponenten gereinigt werden.

Während die heutigen kommerziellen Impulssysteme mit Impulsen von der Grössenordnung von 1 μs (Mikrosekunde) operieren, wurden in Amerika bereits Impulsgeneratoren mit Hochfrequenzimpulsen von etwa $^1/_{500}$ μs ($2 \cdot 10^{-9}$s) laboratoriumsmässig hergestellt. Ebenso wurde in den Bell-Laboratorien ein Impulsregenerator mit 40 MHz Impulsfrequenz entwickelt. Geht man von einer Grundbandbreite von 10 MHz aus, so bedingt dies eine Impulsfrequenz von etwa 160 MHz. Diese Bandbreite passt schon ganz gut in die Möglichkeiten einer Übertragung über Hohlleiter. *Ein solches Band könnte etwa 2000 Gespräche oder einen Fernsehkanal bewältigen.* Zwar ist ein System dieser Art noch nicht einmal experimentell realisiert worden, aber es scheint heute durchaus im Bereich der Möglichkeiten zu liegen. Wenn man bedenkt, dass das Band mit den 2000 Gesprächen nur ein bis zwei Prozent des Gesamtbandes eines Hohlleiters belegt, so kann man die Möglichkeiten, die in dieser Übertragungsart liegen, abschätzen.

Zusammenfassung

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine Übertragung über Wellenleiter vermutlich in nicht zu ferner Zukunft realisiert werden kann. Das Hauptproblem besteht darin, die übertragene Welle durch eine besondere Konstruktion des Hohlleiters oder durch periodische Filter mit genügender Reinheit über eine vernünftige Distanz zu bringen. Weitere Schwierigkeiten liegen einerseits in der Technik der Millimeterwellen und anderseits beim Modulationssystem, doch sind diese Probleme nicht grundsätzlicher Art, sie sind zum Teil im Laboratorium schon gelöst und müssen nur noch produktionsreif gemacht werden. Eine weitere Frage, die schliesslich den Aus-

de la largeur de bande fondamentale. Il existe à cet effet une quantité de systèmes de modulation simples ou doubles. Ils permettent d'échanger le rapport signal/bruit contre la largeur de bande. Sur de grandes distances, le guide d'ondes est à proprement parler un moyen de transmission défectueux, car, même en prenant les plus grandes précautions, il est difficile d'obtenir des rapports signal/bruit dépassant de beaucoup 20 ou 30 dB. Dans ce cas, la modulation par impulsions codées semble tout indiquée. Contrairement à ce qui se passe par exemple avec la modulation par impulsions modulées en phase, chaque impulsion individuelle est remplacée par un groupe d'impulsions qui, dans le système binaire, représente un chiffre correspondant à l'amplitude momentanée du signal. Etant donné que dans ce système il s'agit uniquement qu'une impulsion soit présente ou non à un moment déterminé d'avance, tandis que l'amplitude et la phase peuvent varier entre de larges limites, le système est extrêmement peu sensible aux perturbations dès que l'amplitude utile sort quelque peu du niveau de bruit. Un autre motif qui milite en faveur de la modulation par impulsions codées est la possibilité de la régénération. Si, lorsqu'on insère entre les sections des répéteurs ordinaires, on ne peut, sur une seule section, atteindre qu'avec peine le niveau signal/bruit nécessaire, il paraît à peu près exclu, sur un grand nombre de sections, de libérer le signal des effets perturbateurs cumulés. Avec la modulation par impulsions codées, on peut, à chaque répéteur intermédiaire, reformer le signal de manière relativement simple et le débarrasser de toutes les composantes non désirées.

Tandis que les systèmes de modulations par impulsions en usage aujourd'hui travaillent avec des impulsions de l'ordre de grandeur de 1μs (microseconde), on a construit en Amérique, en laboratoire, des générateurs d'impulsions de haute fréquence de l'ordre de 1/500 μs ($2 \cdot 10^{-9}$ s). Les laboratoires Bell ont également mis au point un régénérateur d'impulsions pour une fréquence d'impulsions de 40 MHz. Si l'on prend pour point de départ une largeur de bande fondamentale de 10 MHz, on devra avoir une fréquence d'impulsions de 160 MHz. Cette largeur de bande est tout à fait dans les possibilités d'une transmission par guide d'ondes. *Une telle bande pourrait servir à transmettre 2000 conversations ou une voie de télévision.* Il est vrai qu'aucun système de ce genre n'a encore été mis au point même expérimentalement, mais il semble bien qu'il soit possible de le réaliser. Lorsqu'on considère que la bande occupée par 2000 conversations ne représente qu'un ou deux centièmes de la bande totale d'un guide d'ondes, on se rend compte des possibilités qu'offre ce mode de transmission.

Conclusion

On peut dire en résumé que la transmission par guides d'ondes pourra être réalisée dans un avenir assez rapproché. Le problème principal consiste à

schlag geben wird, ist diejenige nach Bedarf und Wirtschaftlichkeit. Für kürzere Strecken werden Stränge von mehreren tausend Sprechkanälen kaum je benötigt werden. Es liegt jedoch durchaus im Bereich der Möglichkeiten, dass in einer ferneren Zukunft Informationskanäle mit grösseren Bandbreiten als die heutigen Sprechkanäle erwünscht wären, dass also mit dem Angebot auch die Nachfrage geweckt würde.

transmettre l'onde désirée avec une pureté suffisante à une distance raisonnable, grâce à une construction particulière du guide d'ondes ou par l'insertion de filtres périodiques. D'autres difficultés résident dans la technique des ondes millimétriques, d'une part, et dans le système de modulation, d'autre part, ces problèmes ne sont toutefois pas de nature fondamentale, ils ont été partiellement résolus en laboratoire, et il suffira d'appliquer ces solutions à la fabrication. Une autre question, dont tout dépend en définitive, est celle du besoin et du rendement économique. Pour de courtes distances, il est peu probable que des artères de plusieurs milliers de voies soient nécessaires. Il est très possible cependant que dans un avenir assez rapproché des voies avec largeurs de bande plus grandes que celles des voies de conversation actuelles soient demandées, et qu'ainsi l'offre fasse naître la demande.

Bibliographie

Morgan, S. P. Mode Conversion Losses in TE 01 Wave Transmission. J. Appl. Phys. **21** (1950), 329.

Miller, S. E. Waveguide as a Communication Medium. Bell Syst. Techn. J. **33** (1954), 1209.

Cutler, C. C. The Regenerative Pulse Generator. Proc. Inst. Radio Engrs **43** (1955), 140.

De Lange, O. E. Experiments on the Regeneration of Binary Microwave Pulses. Bell Syst. Techn. J. **35** (1956), 67.

Die Identifizierung chemischer Stoffe mit Röntgenstrahlen (Feinstrukturuntersuchungen)

Von *H. Mauch*, Bern 544.64

Zusammenfassung. *Einleitend wird kurz auf die Strahlungsquellen und auf die Erzeugung des monochromatischen Röntgenlichtes eingegangen. Die Bildung von Röntgeninterferenzen an Kristallgittern wird theoretisch erklärt und anhand eines Beispieles noch weiter erläutert. Hierauf werden die beiden wichtigsten Pulvermethoden, nämlich die Verfahren nach Debye-Scherrer und nach Guinier und die Auswertung der Diagramme behandelt. Abschliessend wird noch auf einige weitere Anwendungsmöglichkeiten, wie zum Beispiel auf das Rückstrahlverfahren, hingewiesen.*

Résumé. *L'auteur traite tout d'abord des sources de rayonnement et de la production des rayons X monochromatiques. Il explique théoriquement et par des exemples la formation d'interférences de rayons X dans des cristaux. Il expose ensuite les deux principales méthodes d'examen de matières réduites en poudre, celle de Guinier, et la manière d'utiliser les diagrammes, puis termine en montrant quelques possibilités d'application, par exemple le procédé par réflexion contre l'arrière.*

1. Einleitung

Die eingehende Prüfung eines Korrosionsschadens an einem Telephonkabel bedingt verschiedene Arbeiten im Feld und im Laboratorium. Neben visuellen Prüfungen, Boden- und Wasseranalysen, elektrochemischen Messungen usw., ist auch die analytische Untersuchung der Korrosionsprodukte von Bedeutung. In unserem chemischen Laboratorium werden die Korrosionsprodukte meistens mit röntgenographischen Methoden gekennzeichnet. Diese Ergebnisse gestatten oft, die Ursachen eines Korrosionsschadens zu erklären. In einem später erscheinenden Aufsatz soll dieses besondere Problem eingehend behandelt werden, während im Nachfolgenden in leichtfasslicher Form die allgemeinen Fragen der Röntgen-Feinstrukturuntersuchung dargestellt werden.

Die röntgenographische Feinstrukturuntersuchung darf heute als eine der wichtigsten Methoden der chemischen Analyse bezeichnet werden. Bei der grossen Zahl von chemischen Verbindungen ist es nach den üblichen analytischen Verfahren oft nur mit einem erheblichen Zeitaufwand möglich, eine chemische Verbindung sicher und genau zu identifizieren. Zum Beispiel können durch die qualitative chemische Analyse sowie durch physikalische Verfahren, wie beispielsweise der Emissionsspektrographie, nur die im Untersuchungsmaterial vorhandenen Ionen bzw. Atome erfasst werden. Einzig mit der Röntgen-Feinstrukturuntersuchung gelingt es, eine chemische Verbindung, die sowohl anorganischer wie organischer Natur sein kann, als solche qualitativ und – bis zu einem gewissen Grade – auch quantitativ zu bestimmen. Das Röntgendiagramm einer bestimmten Substanz darf als absolut charakteristisch bezeichnet werden. Auch Modifikationen ein und derselben Verbindung lassen sich mit Sicherheit unterscheiden, was nach den anderen üblichen analytischen Methoden kaum möglich ist. Die zu untersuchende Substanz muss kristallisiert sein, das heisst aber nicht, dass sie in Form gut ausgebildeter Kristalle vorliegen muss. Nicht der äussere Habitus, sondern die gleichmässige Anordnung der Atome bzw. Ionen ist entscheidend. Feinstrukturuntersuchungen mit Röntgenstrahlen zeigten, dass die meisten der chemischen Substanzen kristallisiert vorliegen. Selbst feinste Pulver, die bei der mikroskopischen Betrachtung keine Kristalle erkennen lassen und daher früher als amorph bezeichnet wurden, erwiesen sich meistens als mehr oder weniger gut kristallisiert. Der kristallisierte Zustand wird heute als die normale Erscheinungsform der festen Körper angesprochen.