Zeitschrift: Pionier : Zeitschrift für die Übermittlungstruppen

Herausgeber: Eidg. Verband der Übermittlungstruppen; Vereinigung Schweiz. Feld-Telegraphen-Offiziere und -Unteroffiziere

Band: 31 (1958)

Heft: 11

Rubrik: Funk + Draht

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: 06.07.2025

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

Funk + Draht

November 1958

Beilage zum «Pionier»
zur fachtechnischen Ausbildung
der Übermittlungstruppen

Nachdruck verboten

Die Nachrichtenübermittlung auf Wellenleitern

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 gemacht zu haben in der Untersuchung dieses Gebietes, 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. 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 in der Hochfrequenztechnik benützt. Die bekanntesten sind die Lecher- oder Paralleldrahtleitung, die verschiedenen Typen von koaxialen Leitungen, die verschiedenen Hohlleiter und die Goubau-Leiter.

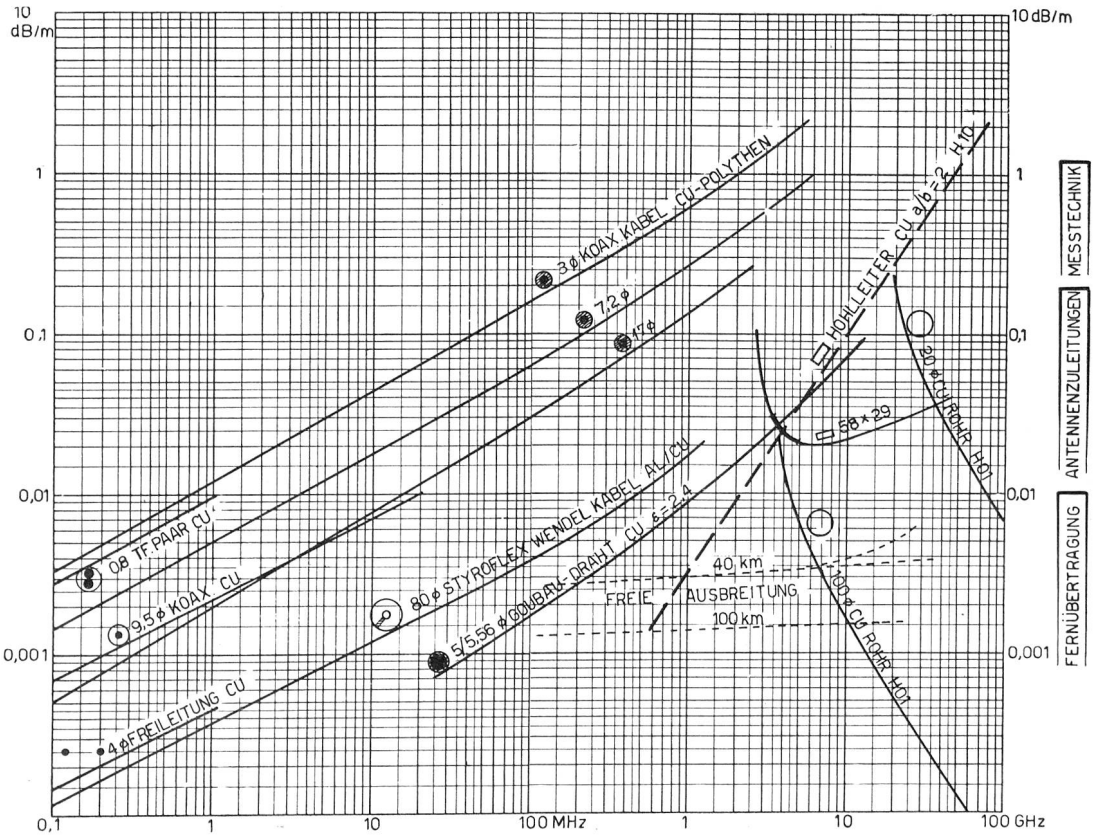

Fig. 1. Dämpfung verschiedener Hochfrequenzleitungen in Funktion der Frequenz.

Für die Fernübertragung kommen nur Leitungen in Frage mit einer Dämpfung von weniger als etwa 10 dB/km. 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 vorhanden 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 ca. 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, und 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.

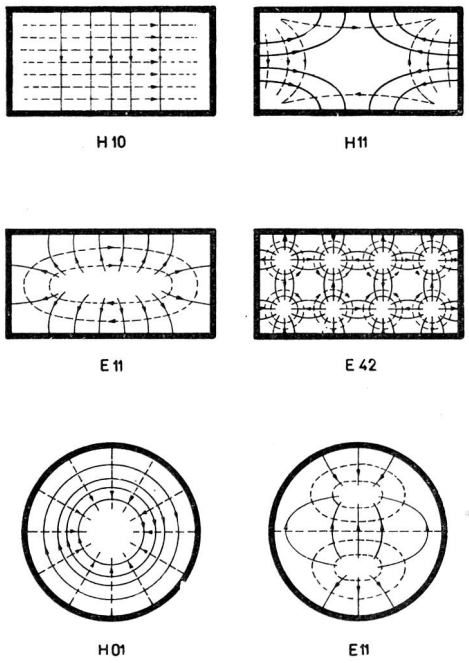

Fig. 2. Verschiedene Wellenleitermodi. Feldbilder im Querschnitt des Leiters. Die ausgezogenen Linien stellen das elektrische, die gestrichelten das magnetische Feld dar.

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 Fourierzerlegung. 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 Grundmodus) 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 Jouleschen 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.

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 von 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.

Störungen auf dem Übertragungsweg

Bei drahtlosen Verbindungen hängen die Übertragungsschwierigkeiten mit den topographischen und atmosphärischen Verhältnissen zusammen. Analog zu den Schwunderscheinungen, die auf Mehrwegausbreitungen zurück-

gehen, 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 z. B. 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

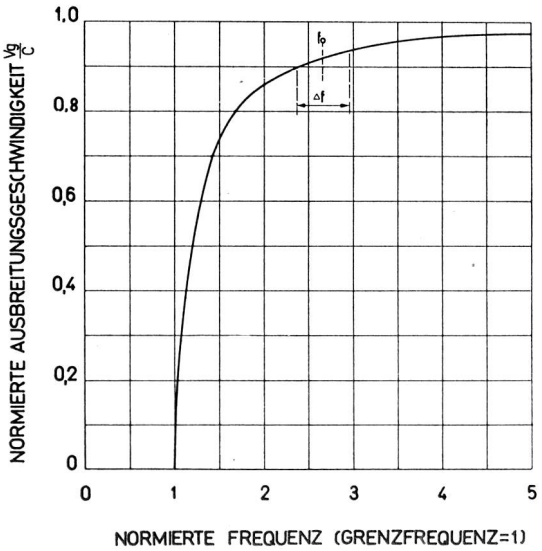

Fig. 3. Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen im Hohlleiter von der Nähe der Grenzfrequenz. Die Kurve gilt für alle Modi.

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 z. B. 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 längs des Leiters fortpflanzt; es entsteht eine Art Modusdispersion, die im Unterschied zu der gewöhnlichen Dispersion auch vorhanden ist für ein verschwindend enges Frequenzband. 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 schwerwiegend: 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 nicht überwinden durch höhere Sendeleistung, 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

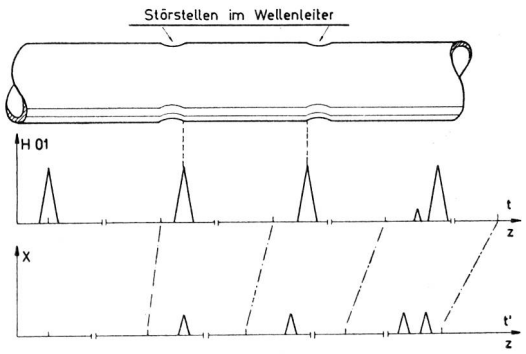

Fig. 4. Mehrfache Modusumwandlungen im Wellenleiter am Beispiel eines Impulses. Der Modus X breitet sich langsamer aus im Leiter als der H-01-Modus. An der zweiten Umwandlungsstelle wird Energie vom X-Modus in den H-01-Modus zurückverwandelt, und zwar verzögert gegenüber der Hauptwelle.

man an, dass der Konversionsverlust ⅓ des Gesamtverlustes beträgt, so muss die Dämpfung der unerwünschten Modi etwa 500mal grösser sein als jene für den Nutzmodus. In diesem Fall 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 anderen 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 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 gewickelten Helix aus dünnem, isoliertem Draht (vgl. Fig. 5).

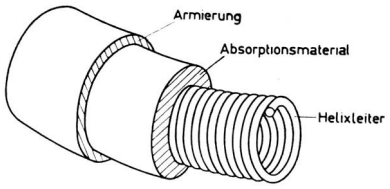

Fig. 5. Helixleiter. Ein solcher Leiter ist gleichzeitig Filter und flexibles Kabel. Solche Hohlleiter könnten für die Fernübertragung in Frage kommen.

Die Drahtlage ist umgeben von einem verlustreichen Material, z. B. leitfähigem Gummi und irgend einer Armatur, die für mechanische Stabilität sorgt. Alle ausser den H-0n-Wellen werden in diesem Leiter sehr stark gedämpft. Ein solcher Leiter hat noch einen weiteren sehr wichtigen Vorteil, und das ist seine Flexiblität. 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 zusammen mit den Fragen des verwendeten Modulationssystems. Während man bei tiefen Trägerfrequenzen vorzugsweise Systeme benützt, bei denen die Gesamtbandbreite annähernd gleich dem Produkt der 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 diesem Falle scheint nun die Pulscodemodulation am Platze zu sein. Im Unterschied z. B. 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 aus von einer Grundbandbreite von 10 MHz, 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 des Möglichen 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 Ausschlag 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.

(Klischees NZZ)