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: 32 (1954)

Heft: 10

Artikel: Richtstrahlverbindungen hoher Übertragungskapazität : Möglichkeit und Entwicklung

Autor: Klein, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-874494

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: 06.12.2025

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

Richtstrahlverbindungen hoher Übertragungskapazität

Möglichkeiten und Entwicklung

Von *W. Klein*, Bern

621.396.43

Zusammenfassung. *Nach einem Blick auf die Entwicklung und die heutige Bedeutung der Richtstrahlverbindungen werden einige allgemeingültige Übertragungseigenschaften des Richtstrahlweges dargestellt. Die Annahme einer physikalisch bedingten Grenze für die zulässige Strahlenbündelung einerseits und einer wirtschaftlich tragbaren Grenze für die Antennengrösse anderseits führt übertragungstechnisch, bei idealer Raumwellenausbreitung, zu einer optimalen Wellenlänge. Die Berücksichtigung der Schwundverhältnisse und der heute verfügbaren Röhrenleistungen beeinflusst dieses Ergebnis allerdings in erheblichem Masse. Die Wirkung der Erdoberfläche und der Troposphäre auf die Übertragungsverhältnisse von Richtstrahlstrecken wird qualitativ besprochen. Die Übertragungseigenschaften moderner Richtstrahlsysteme zeigen, dass die Anforderungen bezüglich Streckenplanung sehr nahe übereinstimmen, selbst wenn man die Anwendung von Puls-Code-Modulationsverfahren in Betracht zieht.*

Résumé. *Après avoir donné un aperçu du développement et de l'importance actuelle des liaisons par faisceaux hertziens, l'auteur analyse quelques propriétés générales de ce genre de liaisons. L'adoption d'une limite physique pour la concentration du faisceau, d'une part, et d'autre part, d'une limite, supportable au point de vue économique, pour la grandeur de l'antenne, conduit, dans des conditions de propagation spatiale idéale, à une longueur d'onde optimum. Toutefois, dans la pratique, le résultat est sensiblement influencé par les conditions d'évanouissement et la puissance des tubes actuellement disponibles. L'effet de la surface terrestre et de la troposphère sur les conditions de propagation de faisceaux hertziens est analysé qualitativement. L'examen des systèmes modernes de transmission par faisceaux hertziens, y compris ceux à impulsions codées, montre qu'ils ne diffèrent pas très sensiblement les uns des autres pour l'établissement des tracés.*

Die Übertragung von Nachrichten auf grössere Entfernung mit Hilfe gebündelter elektromagnetischer Strahlen im Bereich der m-, dm- und cm-Wellen hat im vergangenen Jahrzehnt eine bemerkenswerte technische Entwicklung erlebt, und wir stehen heute am Beginn grösserer praktischer Auswirkungen dieser neuen, stets noch weiter fortschreitenden Technik im öffentlichen Nachrichtenaustausch. Neben zahlreichen anderen Anwendungen steht häufig die Telephonie im Vordergrund des Interesses, weshalb man denn meistens von Richtstrahltelephonie spricht. Die Richtstrahlübermittlung ist indessen keineswegs auf das gesprochene Wort beschränkt, sondern sie ist universell im besten Sinne des Wortes, indem die Raumwelle als Übertragungsmittel keine inhärente Frequenzbandbeschränkung aufweist, wie der lineare metallische Leiter. So ist die wahlweise oder sogar gleichzeitige Übertragung von mehreren Fernsehbildern und vielen Hunderten von Telephongesprächen, gegebenenfalls auch Musikprogrammen und Fernschreibverbindungen, über einen einzigen Richtstrahl heute bereits Wirklichkeit geworden, wie die fast gigantisch anmutende Mikrowellenverbindung Boston–New York–San Francisco–Los Angeles quer über den amerikanischen Kontinent beweist. Ähnliche Richtstrahlverbindungen, wenn auch von bescheidenerem Ausmass, sind seither in verschiedenen andern Ländern geplant und t ilw ise bereits realisiert worden.

Die Physik der Fernwirkung und der Bündelung genügend kurzer elektromagnetischer Wellen ist untrennbar mit dem Namen des grossen Forschers *Heinrich Hertz* verbunden. Das erste der Richtstrahlexperimente mit gedämpften dm-Wellen, die Hertz in den Jahren 1887...1891 im Laboratorium durchführte, um die Existenz der räumlichen elektromagnetischen Schwingung und die gleichartige Natur der Lichtphänomene zu beweisen, war zugleich die Geburt der Hochfrequenzphysik und damit, nach der *Maxwell*schen Theorie, Ausgangspunkt für die ganze hochfrequenztechnische Entwicklung. Ob Heinrich Hertz diese Entwicklung vorausahnte? Hören wir einiges aus seinen eigenen Äusserungen zu dieser Entdeckung*): «Es ist die Verbindung von Licht und Elektrizität, welche die (Maxwellsche) Theorie ahnte, hergestellt ... Die Herrschaft der Optik beschränkt sich nicht mehr auf Ätherwellen, welche kleine Bruchteile von Millimetern messen, sie gewinnt Wellen, deren Längen nach Dezimetern, Metern, Kilometern sich ausdehnen ... in jedem leuchtenden Atom sehen wir einen elektrischen Prozess. Auch wenn ein Körper nicht mehr leuchtet ... ist er der Sitz

*) Nach *Wilhelm Beck*. Die Elektrizität und ihre Technik, Leipzig 1910.

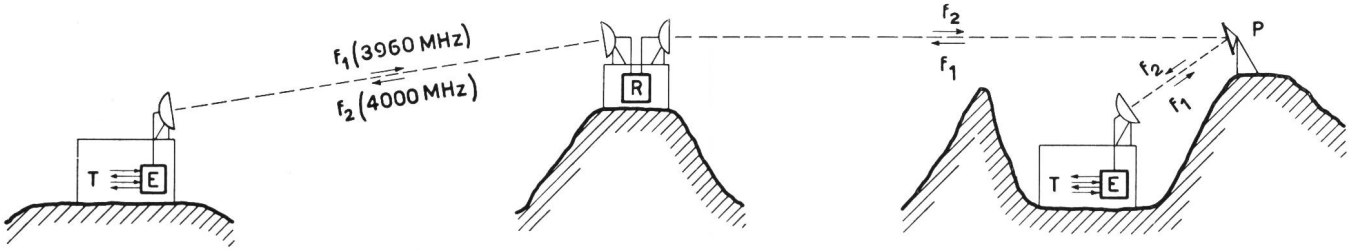

Fig. 1. Prinzip einer cm-Wellen-Richtstrahlverbindung für Mehrfachtelephonie
T = Telephonzentrale E = Endverstärker mit Signalumformung
R = Relaisverstärker P = Passives Relais (nur für kurze Entfernung)

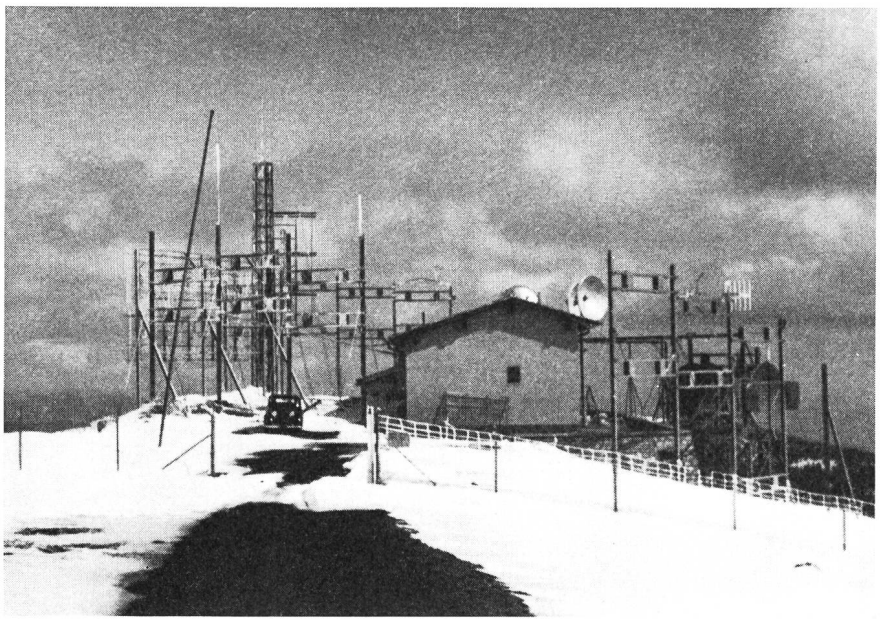

Fig. 2a.
Gesamtansicht der Höhenstation Chasseral (1610 m ü. M.), ein Richtstrahlknotenpunkt und Versuchszentrum im schweizerischen Jura mit Sichtweiten bis zu 180 km. Vgl. auch Fig. 2b und 7

elektrischer Erregungen. So verbreitet sich das Gebiet der Elektrizität über die ganze Natur.»

Dies sind begeisterte Worte, welche das Tor in ein neues Reich der Physik und Technik öffnen. In ihnen liegt die ganze zukünftige Bedeutung des elektromagnetischen Schwingungsspektrums, dessen tiefere Erforschung und Nutzanwendungen heute noch lange nicht erschöpft sind. Man spricht daher mit Recht nicht nur von *Hertz*schen Schwingungen im allgemeinen, sondern bezeichnet die uns hier interessierenden Richtstrahlverbindungen oft als *Hertz*sche Bündel oder Kabel im übertragenen Sinne.

A. Entwicklung der Richtstrahlverbindungen

Vom physikalischen Experiment bis zum ersten praktischen Einsatz der Richtstrahltelephonie dauerte es ungefähr vier Jahrzehnte, indem die technische Entwicklung bekanntlich vom langwelligen Ende des Hochfrequenzspektrums her einsetzte, um, stufenweise und eng verknüpft mit dem Fortschritt im Bau von Elektronenröhren, bis zur heutigen Beherrschung der cm-Wellen vorzudringen. Diese kurzen Wellen sind praktisch immun gegen atmosphärische und industrielle Störbeeinflussung. Die ersten Anwendungen der Richtstrahltelephonie im öffentlichen Verkehr beschränkten sich auf Punkt-zu-Punkt-Verbindungen ohne Zwischenschaltung von Relaisstationen mit relativ bescheidenen Entfernungen, und ihre Qualität erreichte im allgemeinen nicht jene von entsprechend langen Drahtverbindungen (Lympne–St. Inglevert 1933, Belfast–Stranraer 1937, Strasse von Tsugaru, Japan, 1938). So handelte es sich haupt-

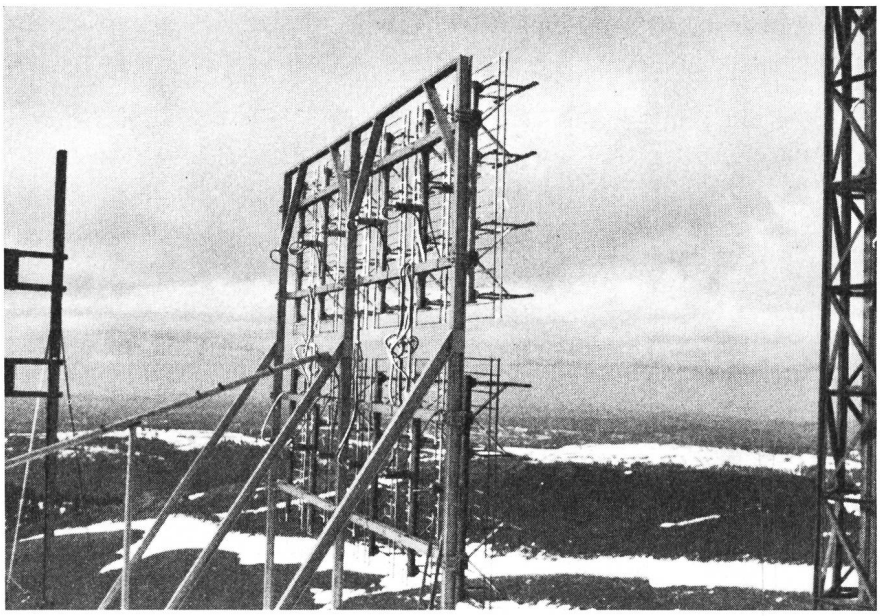

Fig. 2b.
Richtstrahlantenne Band III (im Bereich von 200 MHz) mit 96 Strahlerelementen für die Fernseh-Verbindung Chasseral–Hornisgrinde (Distanz ca. 180 km). Sommer 1954

sächlich um die Überquerung von Wasserwegen, auf denen der Kabelbetrieb Schwierigkeiten bereitete oder zu hohe Kosten verursacht hätte. Erst die Entwicklung neuer, besser geeigneter Modulationsverfahren und Übertragungssysteme im verflossenen Jahrzehnt brachte die notwendige Voraussetzung für eine mit dem Kabel vergleichbare Qualität über grosse Entfernungen und damit den heutigen Aufschwung der Richtstrahltechnik (New York–Philadelphia 1945, Korsika–Grasse 1947, New York–Boston 1947, New York–San Francisco 1951). Der Einsatz von Richtstrahltelephonkanälen parallel zu bestehenden Kabelverbindungen im vollautomatischen Fernverkehr wurde gewagt (Zürich–Genf 1947) und die Barriere der Alpen überwunden (Bern–Lugano 1950).

Tausende von Kilometern an Richtstrahlverbindungen für öffentliche Dienste sind heute in allen Teilen der Welt bereits im Betrieb und grössere Netze im Entstehen. Dabei handelt es sich teilweise um Länder mit gut ausgebauten Drahtverbindungen, wo die Richtstrahlübermittlung als unabhängiger und katastrophensicherer zweiter Weg eine wertvolle Ergänzung und Sicherung des Übermittlungsnetzes darstellt. Es soll aber nicht übersehen werden, dass die Entwicklung der Geräte, selbst wenn man sich auf die heute üblichen Systeme beschränken würde, noch keineswegs abgeschlossen und jedenfalls noch weit entfernt ist von einer Standardisierung. Wesentliche Vereinfachungen und erhöhte Betriebssicherheit der Anlagen sind möglich und auch notwendig und werden zu einer weiteren Verbreitung der Richtstrahltechnik beitragen. Daneben bietet der grosse Reichtum an bisher kaum ausgeschöpften Übertragungssystemen auch völlig neue Entwicklungsmöglichkeiten. Die recht verwickelten Phänomene der Wellenausbreitung müssen noch besser erforscht und beherrscht werden.

B. Einige Eigenschaften der gerichteten Raumwellenübertragung

a) Übertragungskapazität

Nachrichten übertragen heisst für uns Zustands*änderungen* einer messbaren elektrischen Grösse übertragen. Daher ist auch die Nachrichtenkapazität C eines Übertragungskanals nach der *Shannon*schen Definition direkt proportional seiner absoluten Frequenzbandbreite ΔF, welche die grösstmögliche Änderungsgeschwindigkeit des Signals je Zeiteinheit darstellt. Aus Gründen der Wellenausbreitung und der Bündelungsfähigkeit liegt der für die Richtstrahltelephonie interessante Wellenbereich in den Grenzen der m- und cm-Wellen (Fig. 3). Die absoluten Frequenzbandbreiten betragen bei den

m-Wellen	270.10^6 Hz
dm-Wellen	$2\,700.10^6$ Hz
cm-Wellen	$27\,000.10^6$ Hz
heutiger Mittelwellen-Rundspruch (zum Vergleich)	1.10^6 Hz

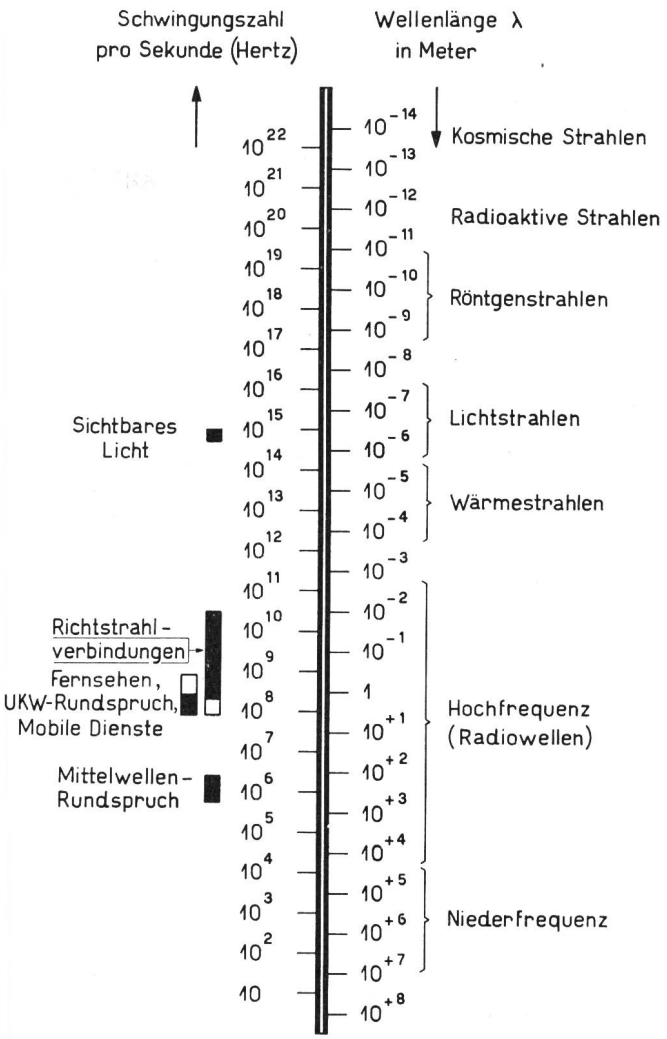

Fig. 3. Spektrum der elektromagnetischen Wellen

In dieser grossen Bandbreite, in Verbindung mit Richtfähigkeit und «quasioptischen» Ausbreitungseigenschaften, ist die grosse Bedeutung der Richtstrahltechnik für die Nachrichtenübertragung begründet. Im cm-Wellenband allein ist viel mehr «Platz» vorhanden, als bei allen längeren Wellenbändern zusammengenommen, und man wird danach trachten müssen, in Übereinstimmung mit der natürlichen Tendenz der frequenzselektiven Elemente (Schwingkreise, Filter, Antennen) nach Beibehaltung der *relativen* Bandbreite grosse Nachrichtenbündel in den cm-Bereich zu verlegen, für kleinere dagegen eher die längeren Wellen zu benützen. Der m-Bereich dürfte mit Rücksicht auf andere Dienste in Zukunft nur noch in besonderen Fällen für Richtstrahltelephonie zur Verfügung stehen, wie beispielsweise das vom CCIF geplante Mittelmeernetz mit sehr langen Teilstrecken.

b) Übertragungsdämpfung

Alle elektromagnetischen Wellen breiten sich im freien ungestörten Raum geradlinig aus und die Energiedichte des Feldes auf der Ausbreitungsachse nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab. Für

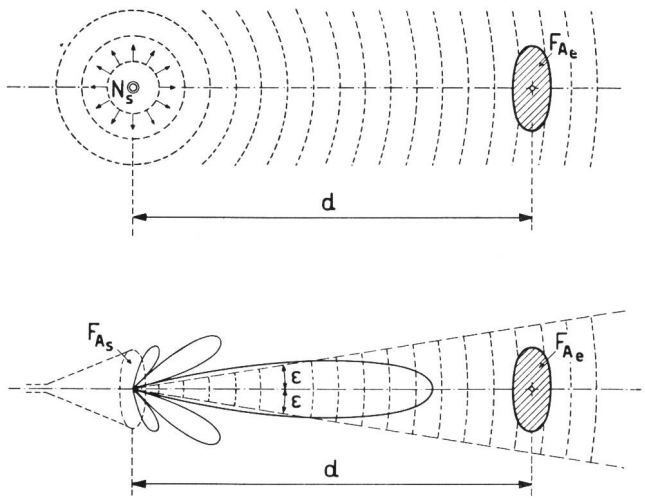

Fig. 4. Kugelstrahler und Richtstrahler
F_{A_s}, F_{A_e} Absorptionsfläche der Sende- bzw. Empfangsantenne

einen hypothetischen Kugelstrahler, der voraussetzungsgemäss in jeder Richtung des Raumes gleich viel strahlt, ergibt sich die Energiedichte P in der Entfernung d aus der geometrischen Anschauung (Fig. 4) zu

$$P = N_s \frac{1}{4\pi d^2} \tag{1}$$

In genügender Entfernung d vom Sender fliesst somit durch eine quer zur Ausbreitungsrichtung liegende ebene Fläche F_e eine Leistung

$$N_E = P \cdot F_{A_e} \tag{2}$$

Diese Leistung ist identisch mit der optimalen Nutzleistung am angepassten Empfänger, wenn wir F_{A_e} die Bedeutung einer Absorptionsfläche der Empfangsantenne nach *Fränz* beimessen. Diese Absorptionsfläche hat zwar nicht allgemein, aber beispielsweise bei den uns hauptsächlich interessierenden «quasioptischen» Antennenformen (Parabolspiegel, Hornstrahler) eine praktische Beziehung zur geometrischen Fläche der strahlenden Öffnung F_{geom}, wobei je nachdem Werte zwischen $F_A \simeq 0{,}5$ bis $0{,}7\ F_{geom}$ erreicht werden. Bei Dipolwänden mit Reflektor, wie sie bei geringeren Bandbreiten und längeren Wellen noch möglich sind, ist sogar $F_A \simeq F_{geom}$. Diese Art der Darstellung ist daher sehr zweckmässig, weil die zulässige physische Antennengrösse meist im vornherein festliegt.

Für den Kugelstrahler erhält man bekanntlich eine Absorptionsfläche, die von der Wellenlänge λ abhängig ist, nämlich

$$F_{A_K} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \tag{3}$$

und die allgemeine Beziehung zwischen Sende- und Empfangsleistung schreibt sich damit nach (1) und (2)

$$N_e = N_s \frac{F_{A_s} \cdot F_{A_e}}{\lambda^2 \cdot d^2}, \quad \text{gültig für} \begin{cases} d\lambda > F_A \\ d \gg \lambda \end{cases} \tag{4}$$

$$b_o = \frac{F_{A_s} \cdot F_{A_e}}{\lambda^2 \cdot d^2} \tag{5}$$

ist dabei die Übertragungsdämpfung der Raumwelle und somit grundsätzlich frequenzabhängig. Berücksichtigt man jedoch, dass die relativen Frequenzbandbreiten bei der Richtstrahlübermittlung stets klein sind, so ist diese Abhängigkeit völlig bedeutungslos.

Hierin liegt ein wesentlicher Unterschied gegenüber der drahtgebundenen Übermittlung. Im Gegensatz zum exponentiellen Anstieg beim metallischen Leiter wächst die Übertragungsdämpfung hier mit dem Quadrat der Entfernung, so dass die Dämpfung des Leiters von einer bestimmten Entfernung an ungeheuer viel rascher anwachsen wird als die Raumwellendämpfung. Diese Entfernung hängt von der Dimensionierung und beim Leiter auch von der höchsten Übertragungsfrequenz ab.

Figur 5 zeigt den Vergleich einer bezüglich Übertragungsdämpfung annähernd optimal dimensionierten Richtstrahlstrecke mit zwei gebräuchlichen Koaxialkabeltypen bei 5 MHz Bandbreite. Die bei Richtstrahlverbindungen mit vergleichbarer Übertragungskapazität mögliche Verstärkung beträgt heute 90...100 dB bei Wellenlängen um 10 cm, und man sieht, dass auch mit Schwundtiefen von 20...30 dB, je nach Verhältnissen, noch Verstärkerfeldlängen von 100 km und mehr möglich sind, sofern im zeitlichen Mittel die Übertragungsbedingungen der Raumwellenausbreitung erfüllt sind. Das ist aber annähernd der Fall, wenn zwischen benachbarten Relais-Verstärkern geometrische «Sicht» herrscht. Die entsprechende

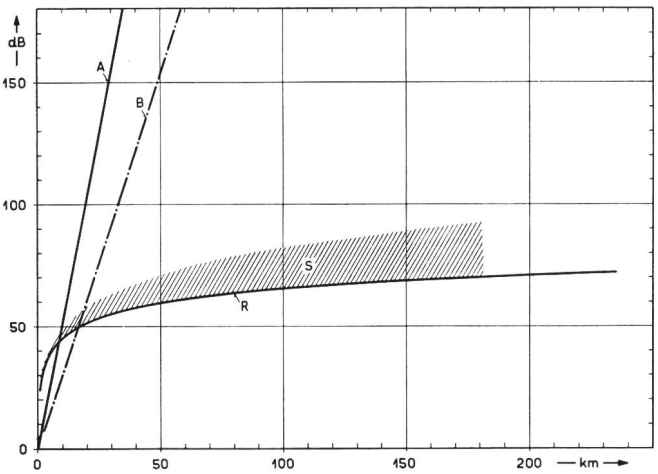

Fig. 5. Streckendämpfung mit Koaxialkabel bzw. Richtstrahlverbindung
A = Koaxialkabel CCIF, ⌀ 2,6/9,4 mm, bei 5 MHz Bandbreite
B = Koaxialkabel ⌀ 5/12 mm, bei 5 MHz Bandbreite
R = Optimal dimensionierte Richtstrahlverbindung Raumwellendämpfung (Bandbreite praktisch nur durch Apparate begrenzt) $F_A = 5\ m^2$, $\lambda = 10$ cm
S = Schwundmarge

Verstärkerfeldlänge beim CCIF-Koaxialkabel wäre knapp 20 km, doch ist der tatsächlich zulässige Verstärkungsgrad aus verschiedenen Gründen wesentlich niedriger, und die praktischen Verstärkerfeldlängen liegen bei 10 km.

Der hohe Verstärkungsgrad der Richtstrahlverstärker deutet bereits hin auf einen erheblich grösseren materiellen Aufwand gegenüber einer Kabelverstärkerstation, der natürlich durch die hohe Trägerfrequenz noch beträchtlich verschärft wird. Dieser Aufwand findet aber seine Rechtfertigung im Wegfall des Kabels, in der viel grösseren Verstärkerfeldlänge, in der besseren Anpassungsfähigkeit an wechselnde Betriebserfordernisse.

c) Grenzen der Bündelung

Für die Richtstrahlübermittlung ist neben der Übertragungsdämpfung auch die Bündelschärfe der Strahlung ein wichtiger Bestimmungsfaktor. Sie hängt direkt mit dem sogenannten «Leistungsgewinn» G der Antenne gegenüber dem Kugelstrahler zusammen, der dem Verhältnis der Absorptionsflächen gleich ist, nämlich

$$G = \frac{F_A}{F_{Ak}} = \frac{4\pi \cdot F_A}{\lambda^2} \qquad (6)$$

Unter der etwas vereinfachenden Annahme, dass die Bündelung einen scharf begrenzten, kreisrunden Strahlungskegel von gleichmässiger Intensität in der Strahlungsachse bewirkt, ergibt sich für den spitzen Winkel ε dieses Kegels (Fig. 4):

$$\varepsilon \cong \frac{\lambda}{\sqrt{\pi F_A}}, \text{ gültig für } \varepsilon < 45^0 \qquad (7)$$

Das wirkliche Strahlungsdiagramm weist natürlich eine abgerundete Strahlungskeule (Hauptlappen) und oft mehrere, leistungsmässig bedeutungslose Nebenlappen auf. Der Winkel ε liegt dann bei kreisrunden und quadratischen Strahlerformen zwischen Leistungshalbwert und Nullstelle des wirklichen Hauptlappens und ist somit für Betrachtungen allgemeiner Art gut brauchbar.

Da der Öffnungswinkel ε direkt proportional der Wellenlänge λ ist, könnte man somit bei cm-Wellen mit erträglichen Antennenabmessungen sehr hohe Bündelungseffekte erreichen. So ergäbe sich beispielsweise mit $F_A = 10$ m², entsprechend einer geometrischen Antennenöffnung von etwa 16 m² bei 5 cm Wellenlänge ein Öffnungswinkel ε von 0,5⁰. Derart hohen Richtwirkungen stehen aber ernsthafte praktische Bedenken entgegen: Die erforderliche hohe Präzision der Antennenherstellung, mehr noch aber die mechanische Stabilität von Antenne und Tragkonstruktion und das Abkrümmen der Strahlungskeule infolge veränderlicher troposphärischer Brechung, was vor allem bei längeren Übertragungsstrecken ins Gewicht fällt. Da das Strahlungsdiagramm kaum Richtfehler über 0,5 ε erlaubt, ohne dass die Gefahr von Verbindungsunterbrüchen infolge Schwankungen der mittleren troposphärischen Strahlenbrechung entsteht, dürfte ein Wert von $\varepsilon_{min} \cong 1{,}5^0$ kaum zu hoch angesetzt sein. Der zulässige Richtfehler zwischen Antennenachse und mittlerer Einfallsrichtung der Strahlung beträgt dann etwa $\pm$ 0,7⁰. Nehmen wir weiter als tragbare Antennengrösse $F_{A\,max} = 5$ m² an, so überschneiden sich die beiden Grenzwertkurven bei einer für diese Voraussetzungen optimalen Wellenlänge $\lambda_0 = 10$ cm, bei welcher der Übertragungsverlust minimal wird (Fig. 6, dick ausgezogene Kurve). λ_0 verschiebt sich je nach den zulässigen Werten für Antennengrösse und Bündelfaktor. Obige Annahmen entsprechen etwa den Verhältnissen bei festen Installationen.

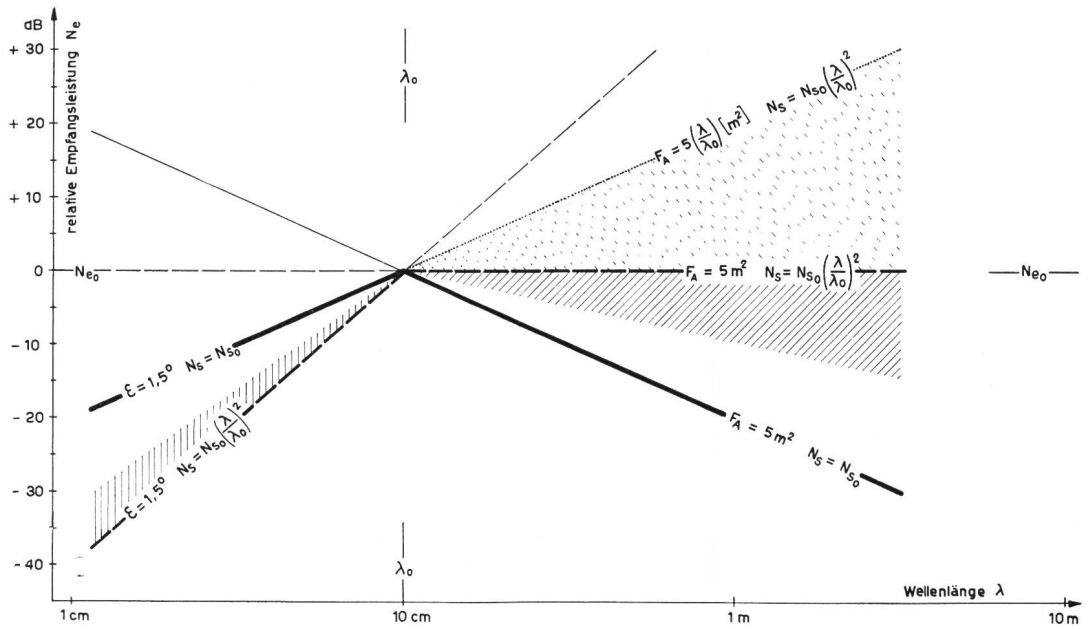

Fig. 6.
Optimal verfügbare Raumwellen-Empfangsleistung bei Begrenzung der Antennengrösse und der Bündelung (für $F_A = 5$ m², $\varepsilon = 1{,}5^0$). Der schraffierte Teil entspricht etwa den heutigen Verhältnissen

d) Reichweite und Wellenlänge

Bei der Richtstrahlübermittlung sind aber neben der Übertragungsdämpfung noch zwei weitere, praktisch von der Wellenlänge abhängige Faktoren zu berücksichtigen: Die verfügbare Senderleistung und das Eigenrauschen des Empfängers. Die erforderlichen mittleren Nutzleistungen der Richtstrahlsender sind verhältnismässig gering; schon die blosse Rücksicht auf den Energieverbrauch der Anlagen würde hier eine obere Grenze setzen. Ohne besonderen Aufwand können wir heute etwa 100 W bei 300 MHz (λ = 1 m) und der erforderlichen Bandbreite erzeugen, was für die meisten Anwendungen reichlich genügt.

Die Dauerstrichleistung der einzigen Triode, die bei 4000 MHz (λ = 7,5 cm) noch verstärkt (Western 416 A/B), beträgt aber nur etwa 0,5 W bei dieser Frequenz. Für die Serienherstellung dieser Röhre musste mit Rücksicht auf die mikroskopisch kleinen Elektrodenabstände eine besondere Fabrik gebaut werden. Dafür arbeitet sie mit ganz normalen Elektrodenspannungen ($U_a \sim 250$ V). Mit heute bereits fabrikationsmässig hergestellten Wanderwellenröhren erreicht man unter den Betriebsbedingungen eines breitbandigen Richtstrahlverstärkers 1...2 W Nutzleistung bei 4000 MHz. Der Wirkungsgrad beträgt aber nur wenige Prozent, und die grösste Elektrodenspannung ist breits 6...10 mal höher als bei der erwähnten Triode. Die neuerdings im Laboratorium erzielten Fortschritte sowohl mit Klystrons als auch Wanderwellenröhren lassen erwarten, dass in absehbarer Zeit Nutzleistungen von etwa 10 W in diesem Frequenzband auch kommerziell erwartet werden dürfen. Für die gegenwärtige Situation trifft aber zu, dass die praktisch erreichbare Nutzleistung der Röhren bei vergleichbarem technischem Aufwand (Stromverbrauch, Elektrodenspannung usw.) im Bereich der Richtstrahltelephonie rascher als proportional der Wellenlänge λ abnimmt (etwa zwischen λ und λ^2). Damit werden die Pegelverhältnisse auf der Empfangsseite mit längeren Wellen wieder günstiger, das heisst, die verfügbare Raumwellen-Empfangsleistung nimmt mit wachsender Wellenlänge oberhalb λ_0 wenig oder überhaupt nicht ab, sinkt aber dafür um so rascher mit abnehmender Wellenlänge unterhalb λ_0 (Fig. 6). Berücksichtigt man ferner, dass die Grenze für die Bündelung physikalischen Charakter hat, die zulässige Antennengrösse bei längeren Wellen dagegen mehr eine Frage des Aufwandes ist, der im Bedarfsfalle erheblich weiter getrieben werden kann, so verschiebt sich die grösstmögliche Raumwellen-Empfangsleistung nach dem langwelligen Ende des Richtstrahlspektrums hin. Diese Überlegungen sind für die Planung kritischer, d. h. sehr langer oder nicht optischer Teilstrecken von besonderer Bedeutung, um so mehr, als auch Gründe der Wellenausbreitung in die gleiche Richtung weisen. Diese Argumentation verliert einen Teil ihrer Bedeutung, wenn es gelingen sollte, genügend hohe absolute Nutzleistungen, d. h. 10...100 W, mit gutem Wirkungsgrad auch im kurzwelligen Teil des Richtstrahlspektrums zu erzeugen.

Die Empfindlichkeitsgrenze eines Signalempfängers ist durch dessen Eigenrauschen gegeben. Je nach den besonderen Eigenarten des Übertragungsverfahrens ist ein verschieden grosser Abstand der Empfangsleistung vom Eigenrauschen erforderlich, um eine befriedigende Übermittlung zu gewährleisten. Der sogenannte Schwellenwert, das heisst praktisch etwa die 30fache, auf den Empfängereingang bezogene Rauschleistung (+15dB), ist die niedrigste Empfangsleistung, die bei Systemen mit hohem Übertragungswirkungsgrad noch eine fehlerfreie, ungestörte Übermittlung ermöglicht. Die physikalische Grenze ist bekanntlich das Wärmerauschen im Ohmschen

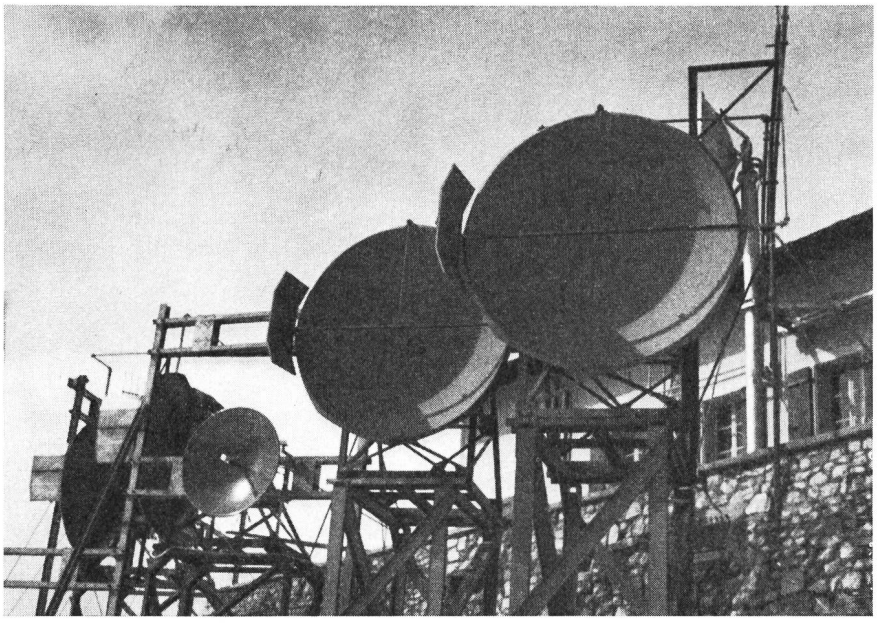

Fig. 7.
Parabolspiegel für die 4000-MHz-Versuchsanlage Bern–Chasseral–Genf mit 180 Sprechkanälen sowie für die 2000-MHz-Versuchsanlage mit 24 Sprechkanälen Chasseral–Jungfraujoch–Monte Generoso. Sommer 1954

Widerstand, und gute Empfänger erreichen heute bei m-Wellen etwa das 6fache (+8dB), bei cm-Wellen das 25fache (+14dB) dieses physikalischen Grenzwertes. Damit ergibt sich für den Schwellenwert im ungünstigeren Falle der cm-Wellen eine Empfangs-Nutzleistung

$$N_{RS} \simeq 4 \cdot 10^{-21} \cdot 25 \cdot 30 \cdot \Delta f = 3 \cdot 10^{-18} \Delta f \qquad (8)$$

Δf = Bandbreite vor der Demodulation

Bei n gleich langen Teilstrecken und gleichen Absorptionsflächen für Sende- und Empfangsantennen schreibt sich die zulässige Länge der Teilstrecken nach (4) und (8) zu

$$d \leq \frac{F_a}{\lambda} \sqrt{\frac{N_s}{n \cdot k \cdot N_{RS}}} \qquad (9)$$

oder für den Wellenbereich $\lambda \leq \lambda_0$, wo die Antennengrösse durch die zulässige Bündelung eingeschränkt ist,

$$d \leq \frac{\lambda}{\pi \varepsilon^2} \sqrt{\frac{N_s}{n \cdot k \cdot N_{RS}}} \qquad (10)$$

Dabei ist $k \geq 1$ ein Systemfaktor, N_s die mittlere Träger- oder die Pulsleistung. Die Formel ist auch gültig ohne Einschränkung auf ideale Raumwellenausbreitung, wenn k sowohl Systems- als auch Ausbreitungsbedingungen (Schwund usw.) berücksichtigt.

Bei einer praktischen Verbindung stellt sich die Aufgabe, k aus Systemeigenschaften und Ausbreitungsverhältnissen so zu bestimmen, dass ein minimaler Rauschabstand des demodulierten Signals für einen bestimmten Prozentsatz der Zeit, zum Beispiel 99 %, nicht unterschritten wird und dass die Verbindung während eines bestimmten Prozentsatzes der Zeit, zum Beispiel 99,99 %, nicht abreisst, eine Aufgabe, die ausserordentlich verwickelt ist, vor allem wegen oft ungenügender Kenntnis der Wellenausbreitungsparameter. Charakteristisch sind etwa Werte für $n \cdot k = 10^3 \ldots 10^4$, womit wir als Beispiel für $\lambda = 10$ cm, $N_s = 1$ W, $F_A = 5$ m², $\Delta f = 20 \cdot 16^6$ Hz erhalten:

$$d \leq 64{,}5 \div 204 \text{ km pro Teilstrecke.}$$

Dies wieder unter der Voraussetzung, dass es möglich ist, die Stationen so aufzustellen, dass bei mittleren Ausbreitungsbedingungen die Raumwellendämpfung erreicht wird. Die Beziehung (9) bzw. (10) ist eine Kontrollgleichung, indem die Schwundverhältnisse und damit k auch von den Grössen d und n selbst abhängen. Die Frage stellt sich in der Praxis häufig umgekehrt: Genügt ein Übertragungssystem zur Überbrückung von bestimmten Teilstrecken?

C. Wellenausbreitungseinflüsse

Die vorangehenden allgemeinen Betrachtungen über die Dimensionierung von Richtstrahlverbindungen stützen sich auf die Wellenausbreitung im homogenen, verlustfreien Raum, das heisst auf Bedingungen, wie sie etwa bei Abstrahlung von der Erde vertikal in den Luftraum erfüllt wären. Die Ionosphäre ist bei den hier in Frage stehenden kurzen Wellen bekanntlich durchlässig. Zwar stellt die niedere Atmosphäre praktisch ein verlustfreies Dielektrikum dar für Wellen, die länger sind als 3...5 cm, indem dann weder die Absorptions- noch die Dispersionsverluste (Energiezerstreuung) durch Luftmoleküle und atmosphärische Niederschläge ins Gewicht fallen. Die Wellenausbreitung parallel zur Erdoberfläche ist aber zahlreichen störenden Einflüssen unterworfen, einerseits hervorgerufen durch die Anwesenheit der Erdoberfläche selbst, aber mehr noch durch den inhomogenen Charakter der niederen Atmosphäre (Troposphäre), der in dieser Ausbreitungsrichtung in Erscheinung tritt. Der Grund liegt in der bevorzugten Luftschichtung (Stratifikation) in horizontaler Richtung und deren zeitlichen Veränderlichkeit.

Einige analoge optische Phänomene sind ja bekannt, wie die normale Strahlenkrümmung gegen die Erdoberfläche (am Beispiel der untergehenden Sonne), das gelegentliche Auftreten von Überreichweiten der Sicht oder von Luftspiegelungen (Fata Morgana), das Luftflimmern über erhitztem Boden. Natürlich sind die Grenzbedingungen für das Auftreten derartiger Phänomene bei unseren dm- und cm-Wellen wegen des grossen Wellenlängenunterschiedes nicht identisch, wohl aber ähnlich, weshalb man von «quasioptischen» Ausbreitungseigenschaften spricht.

Im Gegensatz zum Einfluss der Erdoberfläche sind die troposphärischen Feldstörungen nicht nur ortsabhängig, sondern auch zeitlich starken, oftmals raschen Schwankungen unterworfen und damit die Ursache der für die Richtstrahlübermittlung oft unangenehmen Schwunderscheinungen.

a) «Normalatmosphäre» und Verstärkerfeldlänge

Das Verhalten der Troposphäre bezüglich Wellenausbreitung ist gegeben durch die dielektrische Verteilung, die ihrerseits abhängt von Wasserdampfgehalt, Temperatur und Druck der Luft. Die dielektrische Verteilung wird beschrieben durch den Brechungsexponenten n in Analogie zur Optik, und es gelten ebenfalls die optischen Berechnungsgesetze, unter gebührender Berücksichtigung des Wellenlängenunterschiedes.

Als Basis für die Betrachtung der Phänomene der Wellenausbreitung und damit auch für die Planung von Richtstrahlstrecken dient heute allgemein eine dielektrische «Normalverteilung», dadurch charakterisiert, dass der Brechungsexponent in horizontaler Richtung konstant ist, jedoch linear mit der Höhe h über Boden abnimmt $\left(\frac{dn}{dh} \simeq 3{,}9 \cdot 10^{-9}\right.$ je m für mittlere geographische Breiten). Dies bedeutet eine gleichmässige Strahlenkrümmung gegen die Erdoberfläche zu, die den tatsächlichen optischen und für die Wellenausbreitung massgeblichen Horizont über den geometrischen hinaus vergrössert.

Praktisch äquivalent und zweckmässig ist es, statt des wirklichen Erdradius R_e einen entsprechend der

Strahlenkrümmung vergrösserten, fiktiven Erdradius R_e' anzunehmen, wobei man die Normalatmosphäre als homogen betrachten darf. Bei einer mittleren geographischen Breite ergibt sich für

$$R_e' \simeq \frac{4}{3} R_e \qquad (11)$$

Dieser Darstellung entspricht somit auch ein mittlerer Wert der Übertragungsdämpfung. Bei geeigneter Aufstellung benachbarter Richtstrahlverstärker innerhalb des mittleren Horizontes entspricht diese Dämpfung annähernd der ungestörten Raumwellenausbreitung, bei Überschreitung des Horizontes nimmt sie aber sehr rasch zu.

Die praktisch möglichen Verstärkerfeldlängen hängen damit weitgehend von der vertikalen Gliederung eines Landes ab. Auf einer glatten Kugeloberfläche wachsen die erforderlichen Turmhöhen für die Antennen quadratisch mit der Entfernung an, und man erreicht bald eine wirtschaftlich-technische Grenze, die um 50 km liegt (Turmhöhen etwa 50 m). In Berggegenden sind oft viel grössere Teilstrecken möglich, ohne dass hiebei besondere Hochbauten zu erstellen wären. Die Horizontweite geeigneter Höhen erreicht hier leicht 100...200 km (Feldberg, Ballon de Guebwiller, Mt-Ventoux, Mte Cimone, Zugspitze, Chasseral, Jungfraujoch, Säntis, Mte Generoso).

Die Überbrückung der längsten, auf der Erdoberfläche vorkommenden «quasioptischen» Teilstrecken bei mittleren Ausbreitungsverhältnissen ist somit nach den Betrachtungen des vorigen Abschnittes kein Problem. Einschränkend wirken die Schwunderscheinungen. Wie die Erfahrungen aber bereits gezeigt haben, lassen sich derartig lange Teilstrecken bei Frequenzen von einigen 100 MHz mit der heutigen Gerätetechnik ohne Schwierigkeit überbrücken (Genf–Chasseral 127 km, Mont Afrique–Chasseral 165 km). Gewisse Gebirgsstrecken zeichnen sich sogar aus durch eine auffällig hohe Stabilität der Übertragungsdämpfung (Jungfraujoch–Monte Generoso 106 km). Die Technik der Richtstrahlübermittlung ist daher von besonderem Interesse für gebirgige Länder, die, wie beispielsweise die Schweiz, über zahlreiche verkehrstechnisch erschlossene Höhen verfügen. So wäre es aller Voraussicht nach möglich, eine Richtstrahlverbindung herzustellen zwischen Strassburg–Turin/Mailand mit bloss drei Zwischenverstärkern, ebenso Genf–München oder Lugano–Rom; Genf–Strassburg mit zwei Zwischenverstärkern und Dijon–Bern/Genf mit einem einzigen. Die für die genannten Verbindungen erforderlichen Höhen-Relaisstationen existieren heute sogar schon und werden im Rahmen nationaler Richtstrahlverbindungen benützt. Die Übertragungsverhältnisse mit cm-Wellen auf derartigen Teilstrecken sind erheblich kritischer und werden gegenwärtig noch studiert. Dass lange optische Teilstrecken unter gewissen Geländeverhältnissen aber auch für cm-Wellen sehr gut brauchbar sein können, haben die Ausbreitungsmessungen auf der 160 km langen Übertragungsstrecke Chasseral–Mont Afrique und noch deutlicher auf der 106 km langen Alpenstrecke Jungfraujoch–Mte Generoso bereits gezeigt.

b) Feldstärkeschwund und seine Auswirkungen

Die örtliche Feuchtigkeits-, Temperatur- und Druckverteilung der Luft ist im allgemeinen grossen Veränderungen unterworfen, und es ergeben sich beträchtliche Abweichungen vom Normalzustand mit entsprechender Veränderung der Übertragungsbedingungen, die als Feldstärkeschwund in Erscheinung treten. Schwundtiefe und -häufigkeit wachsen dabei in der Regel nicht nur mit steigender Entfernung, sondern auch mit abnehmender Wellenlänge.

Diese Abhängigkeit erklärt sich damit, dass eine Feldstörung im Strahlungskegel der Sende- und Empfangsantenne, das heisst eine anormale sprunghafte oder allmähliche Änderung der Dielektrizitätskonstante, grundsätzlich eine um so grössere Auswirkung zeitigt, je ausgedehnter der störende Bezirk im Vergleich zur Wellenlänge ist (Fig. 8). Je kürzer

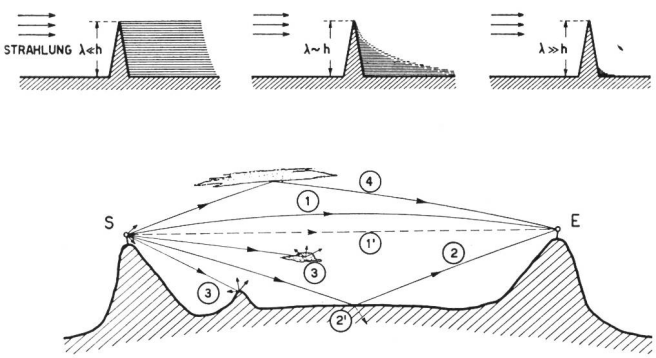

Fig. 8. Wellenausbreitungs-Erscheinungen
Oben: Beugungsschatten bei relativ verschiedener Höhe des Hindernisses.
Unten: Brechung und Reflexion
(1) (1') Normal und anormal gebrochene Raumwelle
(2) (2') Bodenreflektierte bzw. absorbierte Welle
(3) Diffuse Reflexion (lokale Wirkung)
(4) Troposphärische «Reflexion» (infolge Stratifikation)

die Wellenlänge der Strahlung, um so kleinere Störungsbezirke werden «sichtbar» und um so mehr müssen wir uns die Troposphäre als ein durch Luftströmungen bewegtes, von zahlreichen dielektrischen Schlieren oder Wolken durchsetztes Gas vorstellen, wobei eine überwiegende Tendenz zu horizontaler Schichtenbildung besteht (Stratifikation). Diese Schlieren bewirken zeitlich veränderliche Brechungs- und Spiegelungseffekte und verursachen im Verein mit hieraus sich ergebenden Welleninterferenzen am Empfangsort Feldstärkeschwankungen, die verständlicherweise mit abnehmender Wellenlänge häufiger und kräftiger auftreten und im allgemeinen auch rascher verlaufen.

Die ungünstigen Verhältnisse treten im allgemeinen dort auf, wo sich flächenhaft ausgedehnte, dielektrische «Wolken» längs des Übertragungsweges aus-

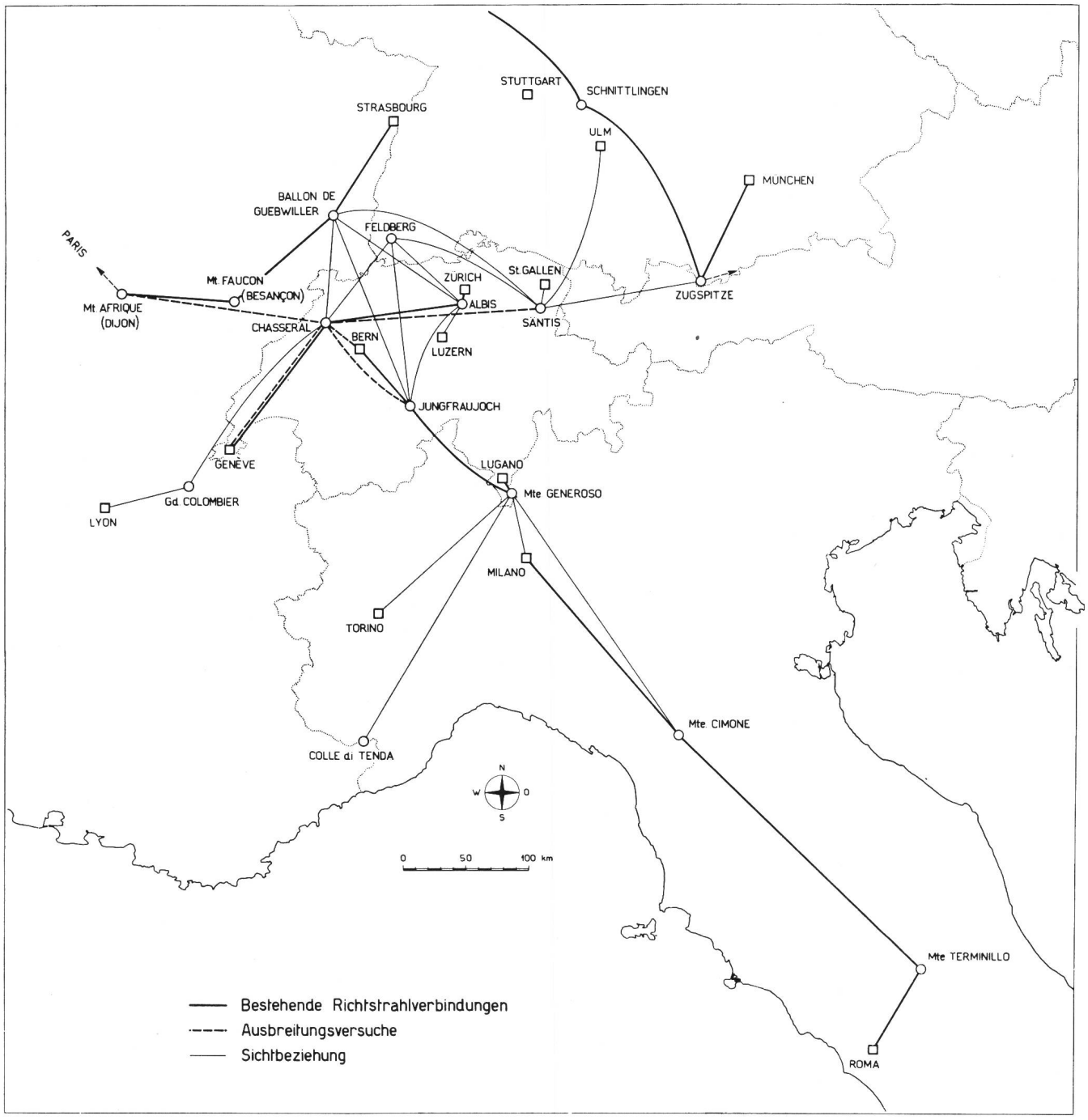

Fig. 9. Sichtweiten in gebirgigem Gelände

bilden, was Strahlumlenkungen und bei genügend kurzen Wellen sogar Wellenleitereffekte («ducts») bewirken kann. Es gelangen dann zwei oder mehr Raumwellen auf verschieden langen Wegen zum Empfänger und interferieren untereinander sowie mit der allenfalls vorhandenen Bodenreflexion (troposphärischer Interferenzschwund), oder, was schlimmer ist, die Richtstrahlkeule des Senders wird direkt aus dem Aufnahmebereich der Empfangsantenne weggelenkt (Wellenleitereffekt). Glücklicherweise tritt dies, in Übereinstimmung mit dem Brechungsgesetz von *Snell*, praktisch nur bei Einfallswinkeln von weniger als 0,5° auf, während sich die Veränderung der Strahlenkrümmung (Brechung) noch bis etwa 1,5° bemerkbar machen kann. Meteorologisch günstige Voraussetzung für solche Stratifikationen sind warme, windstille Tage (Boden-Temperaturinversionen), auch Hochnebeldecken (Höheninversionen). Turbulente Windströmungen und Schlechtwetterlagen sind dagegen ausgesprochen günstig für stabile, «normale» Ausbreitungsbedingungen. Charakteristisch für troposphärischen Interferenzschwund

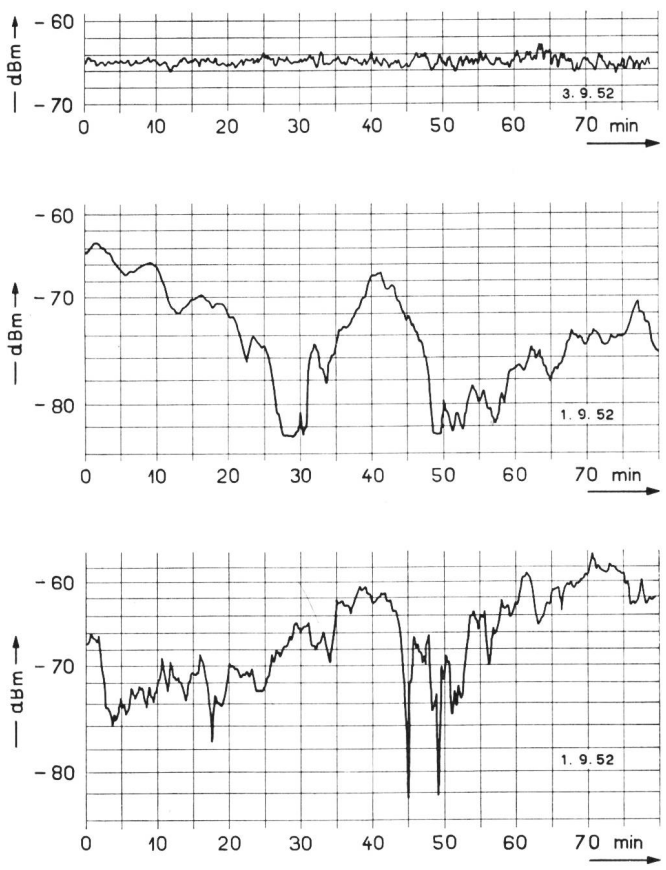

Fig. 10. Feldstärke-Registrierung Mont Afrique–Chasseral. Typische Schwundbeispiele auf einer 160 km langen «optischen» Übertragungsstrecke (Mont Afrique–Chasseral) bei 10 cm Wellenlänge (f = 3075 MHz)

Oben: Mittlere Übertragungsverhältnisee, «Feldstärkeflimmern»

Mitte: Relativ langsamer Schwund («Duct»-Bildung ?)

Unten: Relativ rascher, troposphärischer Interferenzschwund

sind rasche und grosse Feldstärkeänderungen, kurzzeitig sogar bis zum praktischen Verschwinden des Feldes (Fig. 10).

Bei bloss allmählicher räumlicher Änderung der dielektrischen Dichte oder bei Überschreitung des Grenzwinkels der Totalreflexion ändern sich einfach die Übertragungswege der dauernd vorhandenen Feldkomponenten (Raumstrahl- und eventuelle Bodenreflexionen). Die Auswirkung auf den Empfang ist ähnlich, wie wenn die Krümmung der Erdoberfläche abwechselnd grösser und kleiner gemacht würde (Horizontverschiebung). Unter extremen Verhältnissen kann der äquivalente Erdradius über gewisse Entfernungen Werte bis $R'_e = \infty$ und $R'_e = \frac{2}{3}$ erreichen (Normalwert $\frac{4}{3}$). Charakteristisch für diesen Brechungsschwund sind verhältnismässig langsame Feldstärkeänderungen, die eher selten extreme Werte annehmen, hervorgerufen durch veränderlichen Beugungsverlust und gegebenenfalls Interferenz zwischen Raumwelle und bodenreflektierter Welle. Bei der Streckenplanung ist daher nicht bloss auf die mittlere Übertragungsdämpfung bei Normalatmosphäre Rücksicht zu nehmen, sondern ebensosehr eine maximale Stabilität bei veränderlicher Strahlenbrechung anzustreben.

Die Erdoberfläche absorbiert teilweise Energie, zerstreut sie, reflektiert sie in unzähligen Varianten, und wenn wir mit dem «Auge» der cm- und dm-Wellen sehen könnten, würde sich uns ein ähnliches Bild darbieten, wie ein gut ausgearbeitetes Relief, etwa im Maßstab 1:100 000, bei optischen Wellen es uns darbietet. Infolge der um viele Grössenordnungen verschiedenen Wellenlänge ist die relative Rauhigkeit der Erdoberfläche, nach dem Kriterium von *Rayleigh*, entsprechend geringer als in der Optik, weshalb das Bild ebensoviele Grössenordnungen gröber ausfällt. Daher sind auch viel mehr spiegelnde Flächen vorhanden, indem oft noch sehr rauhe und sogar leicht coupierte Landstrecken bei dm- und cm-Wellen als glatt anzusprechen sind. Auch innerhalb des Richtstrahlspektrums ergeben sich hier Unterschiede, die für die Praxis von Bedeutung sind, indem beispielsweise an ausgedehnten Flächen mit cm-Wellen weit weniger häufig Totalreflexion zu beobachten ist als mit dm- und m-Wellen.

Energieabsorption und -dispersion des Erdbodens sind im Grunde genommen für Richtstrahlverbindungen erwünschte Erscheinungen, indem sie die geringste Störung der Raumwelle ergeben, zur Hauptsache einen Beugungseffekt, der im Sichtbereich meistens zu vernachlässigen wäre. Dies ist praktisch der Fall bei reinen Gebirgsstrecken (Jungfraujoch–Mte Generoso).

Bei relativ flachem Streckenprofil ergeben sich aus dem Vorhandensein von Bodenspiegelungen am Standort der entfernten Empfangsantenne Interferenzen zwischen am Boden reflektierten Wellen und eigentlicher Raumwelle, so dass das Feld in Abhängigkeit von der Höhe der Antenne über Boden abwechselnd verstärkt oder geschwächt wird, entsprechend dem Wegunterschied und dem Amplitudenverhältnis der Feldkomponenten.

Für die Stabilitätsbetrachtung (Brechungsschwund) ist vor allem die Bodenreflexion zunächst der Mitte des Übertragungsweges von Bedeutung; sie ist in der Regel auch die kräftigste. Da bei flachen Aufschlagwinkeln die reflektierte Welle einen Phasensprung von 180^0 oder $\frac{\lambda}{2}$ erleidet, ergibt sich hier das erste Feldmaximum für eine Höhenlage der Empfangsantenne, die einem Wegunterschied von $\frac{\lambda}{2}$ der beiden Komponenten entspricht. In der Sprache der Optik heisst das, der Rand der ersten *Fresnel*zone berührt in diesem Falle gerade noch das Reflexionsgebiet. Diese Zone wird umschrieben durch ein Rotationsellipsoid um die Verbindungsachse Sender-Empfänger, mit einem Querschnittradius h_{x_1} von

$$h_{x_1} \cong \frac{1}{2}\sqrt{\lambda \cdot d\,(1 - \frac{4x^2}{d^2})}, \quad \text{gültig für } x < (\frac{d}{2} - \lambda)$$

d = Länge der Verbindungsachse Sender-Empfänger
x = Abstand zur Achsmitte

Kann dieser Abstand h_{x_1} der Verbindungsachse vom Hauptreflexionszentrum auf der Erdoberfläche eingehalten werden, so ergibt sich damit nicht nur eine maximale mittlere Empfangsfeldstärke, grösser als die Raumwellenfeldstärke, sondern unter gewissen Einschränkungen auch eine optimale Übertragungsstabilität bei Schwankungen der troposphärischen Strahlenbrechung, wie sich aus dem Verlauf der Vektorsumme bei veränderlicher Wegdifferenz der interferierenden Wellenzüge ergibt (Fig. 11). Für d = 100 km und λ = 10 cm wird beispielsweise der grösste Radius der ersten *Fresnel*zone in der Mitte

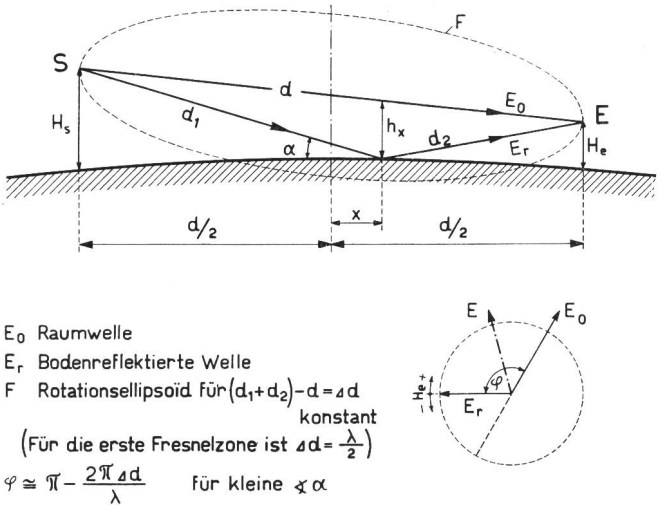

Fig. 11. Bodenreflexion und Antennenhöhe

des Übertragungsweges 50 m. Zufällig entspricht dieses Zahlenbeispiel gerade der Überhöhung, die sich für streifende geometrische «Sicht» auf einer idealen Kugeloberfläche bei Berücksichtigung der normalen Strahlenkrümmung ergeben hätte, das heisst, die mittlere Strahlenkrümmung bewirkt bei 100 km Streckenlänge in der Mitte der Strecke gerade 50 m Überhöhung für den wirklichen Strahlenweg gegenüber der geraden geometrischen Verbindungslinie.

Man trachtet im allgemeinen darnach, diese Übertragungsverhältnisse für den kürzesten, auf einer Richtstrahlstrecke benützten Wellenbereich zu erfüllen, sofern dies wirtschaftlich tragbar ist. Wie eine eingehendere Betrachtung zeigt, ist indessen eine solche Streckendimensionierung nicht unbedingt optimal, es ist vielmehr das Zusammenwirken mehrerer, zum Teil wieder untereinander abhängiger Faktoren zu berücksichtigen, wie die Amplitude der Bodenreflexion, Häufigkeit und Ausmass der Einwirkung troposphärischer Zustandsänderungen auf den Übertragungsweg, Wellenlänge und Übertragungsdistanz.

Schwunderscheinungen lassen sich ebensowenig zeitlich vorausberechnen wie das Wetter. Eines Tages, wenn man die Zusammenhänge besser kennt, wird es vielleicht gelingen, eine Art «Wetterprognose» aufzustellen. Doch wird diese infolge der grossen örtlichen Unterschiede noch schwieriger sein als etwa die ionosphärischen Vorhersagen.

Um die Auswirkung des Feldstärkeschwundes auf die Richtstrahlübermittlung einigermassen zu erfassen, ist man daher auf die statistische Auswertung langfristiger Messungen angewiesen, wobei grosse lokale und regionale Unterschiede zu berücksichtigen sind (Wasser- oder Landweg, maritimes oder kontinentales Klima, Gebirge oder Tiefland, Tal oder Ebene, parallel oder schräg zur Horizontebene usw.). Es ist daher unmöglich, allgemein gültige Werte über Schwund anzugeben. Die heutigen Anlagen erlauben in manchen Fällen «quasioptische» Teilstrecken von 100 km und mehr zu überbrücken. Eine Erhöhung der Sendeleistung bzw. des Wirkungsgrades bei cm-Wellen erscheint aber erwünscht und notwendig. Wo die erforderliche Qualität nicht erreicht werden kann infolge zu hoher Schwundhäufigkeit, vor allem mit cm-Wellen bei Wasserstrecken oder in tropischen Gegenden, müssen besondere Schwundbekämpfungsmassnahmen angewendet werden.

c) Schwundbekämpfung

Da der Schwund bei Richtstrahlverbindungen meistens ein Hauptproblem darstellt, ist vor allem schon bei der Streckenplanung hierauf Rücksicht zu nehmen. Oft lassen aber die praktischen Forderungen im vornherein keine grosse Wahl, oder es ist aus ökonomischen Gründen, besonders in gebirgigem Gelände, vorzuziehen, wenig Relaisstationen mit sehr langen Teilstrecken zu benützen und dafür einen allfälligen Mehraufwand auf der Apparateseite in Kauf zu nehmen. Einige Gesichtspunkte und Möglichkeiten der zusätzlichen Schwundbekämpfung sind im folgenden kurz angedeutet.

1. Vertikale (allenfalls zirkulare) Wellenpolarisation

Bei gewissen Verbindungen ist die Interferenz zwischen Raumwelle und bodenreflektierter Welle eine Hauptursache ungenügender Stabilität, besonders dann, wenn die Reflexion an der Erdoberfläche annähernd total ist und wenn es nicht angeht, durch geeignete Aufstellung der Antennen eine genügende Wegdifferenz der beiden Hauptkomponenten zu erreichen (Phasendifferenz in der Gegend um 180° statt 360°). In solchen Fällen ist oft die vertikale Wellenpolarisation günstiger als die horizontale, besonders bei Wasserstrecken, weil hier schon bei wenig von Null verschiedenem Reflexionswinkel eine merkliche Energieabsorption im reflektierenden Bezirk eintritt, wodurch Amplitude und Phasensprung der reflektierten Komponente verringert werden (diese Erscheinung hängt zusammen mit dem sogenannten *Brewster*winkel). Vertikale Polarisation lässt sich stets verwenden, wenn nicht die Entkopplung

von Sende- und Empfangsantennen eine Kreuzung der Polarisationsachsen verlangt. In diesem Falle wäre immer noch Schrägpolarisation möglich.

2. Ausblenden der Bodenreflexion

Die Bodenreflexion lässt sich teilweise oder ganz eliminieren, wenn in der Nähe des Reflexionszentrums ein «Wellenzaun» geeigneter Grösse, zum Beispiel ein genügend engmaschiges Drahtgeflecht, aufgestellt wird, so dass ein Teil der oberen Hälfte der ersten *Fresnel*zone, etwa 15...50%, der reflektierten Welle ausgeblendet wird (infolge der Spiegelung wird die Flächenwirkung verdoppelt). Bei dem früher erwähnten Beispiel mit $d = 100$ km, $\lambda = 10$ cm ergäbe dies, mit dem Reflexionszentrum in der Mitte des Übertragungsweges, immerhin eine Fläche von wenigstens 600 m²! Die praktische Anwendung ist daher beschränkt. Natürlich tut ein entsprechendes Geländehindernis den gleichen Dienst, wenn es am richtigen Ort steht. Hierauf wäre bei der Streckenplanung Rücksicht zu nehmen.

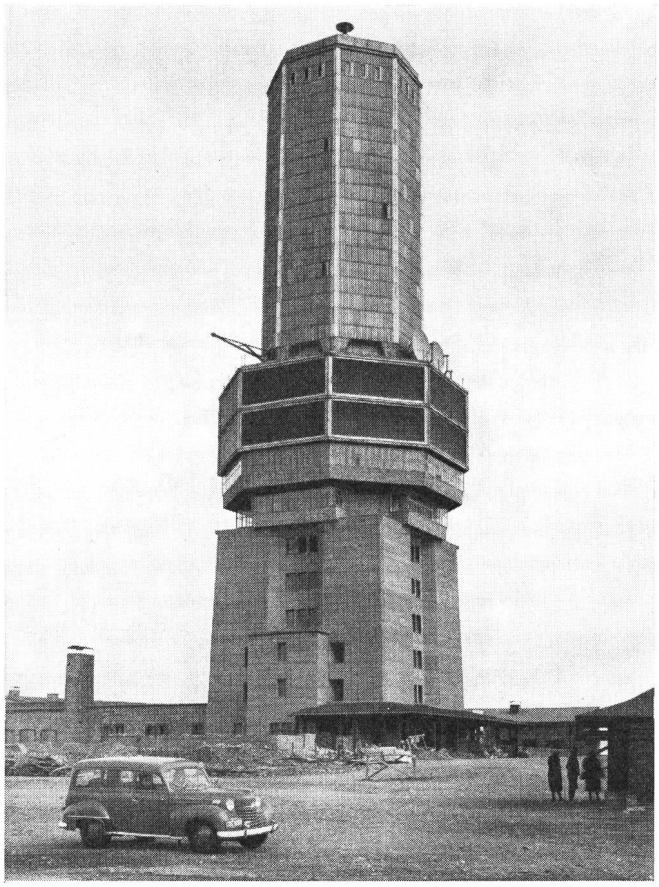

Fig. 12a. Fernmeldeturm auf dem grossen Feldberg im Taunus, 880 m ü. M., ein wichtiger Knotenpunkt des Westdeutschen Richtstrahlnetzes, gleichzeitig Stützpunkt für bewegliche Ultrakurzwellendienste (Landstrassenfunk) und Versuchszentrum. Turmhöhe 68 m. Der obere Teil ist aus Holz und enthält die umfangreicheren UKW-Antennen
Das Bild wurde uns freundlicherweise vom Fernmeldetechnischen Zentralamt in Darmstadt zur Verfügung gestellt

3. Räumlicher Mehrfachempfang

Das gleiche Signal wird auf zwei (oder mehr) Empfängern mit vertikal distanzierten Antennen aufgenommen, so dass infolge der Phasenlaufzeitunterschiede bei Interferenzschwund die Feldstärkeminima nicht auf beiden Empfängern gleichzeitig eintreten. Diese Methode ist die wirksamste und erlaubt oft, die Häufigkeit tiefer Schwundeinbrüche um Grössenordnungen zu vermindern. Sie verlangt aber auch einen beträchtlichen Aufwand an Geräten. Bei cm-Wellen genügen in der Regel Antennenabstände in der Grössenordnung von 10 m.

4. Frequenz-Mehrfachempfang

Das gleiche Signal wird hier auf zwei verschiedenen Trägerfrequenzen über gemeinsame Antennen übertragen, wodurch sich ein analoger Effekt ergibt wie beim räumlichen Mehrfachempfang. Der Aufwand ist eher noch grösser. Das Verfahren hat aber praktisches Interesse, wenn mit Rücksicht auf die Betriebssicherheit der Richtstrahlverbindung ohnehin eine unabhängige Reserveanlage aufgestellt wird.

Mit Hilfe des Mehrfachempfanges lassen sich auch schwierige Übertragungswege überwinden, wie sie etwa bei längeren Teilstrecken über Meer und unter sehr feuchten klimatischen Bedingungen vorliegen.

d) Übertragungsstrecken ohne «optische» Sicht

Wenn man zulässt, dass eine minimale Übertragungsqualität, wie sie vom CCIF verlangt wird, öfters unterschritten wird, beispielsweise während 10% statt 1% der Zeit, dann sind auch längere Richtstrahl-Teilstrecken mit beträchtlicher Überschreitung des optischen Horizontes möglich (zum Beispiel Mittelmeernetz). Aus früher erwähnten Gründen benützt man hierbei vorzugsweise das langwellige Richtstrahlspektrum. Nur bei kürzeren oder ausnehmend stabilen Teilstrecken ist dies in geringem Masse auch ohne Qualitätseinbusse möglich. Die wesentlichen Berechnungsunterlagen hierfür liefern die *Fresnel*sche Beugungstheorie und die *van der Pol*schen Ausbreitungsformeln für die homogene Kugeloberfläche.

In besonderen Fällen ist es auch möglich, ein Sichthindernis mit Hilfe eines passiven Relais zu überwinden, wobei mit Rücksicht auf den Bündelungseffekt sich wieder kürzere Wellen besser eignen. Ein passives Relais ist ein «Wellenspiegel», das heisst eine reflektierende Metallfläche oder eine Antennenkombination, welche die einfallende Strahlung in erwünschter Weise um die Ecke lenkt und so zwei normale Relaisverstärker miteinander verbindet. Da die Leistungsverluste der beiden Teilstrecken (nach Formel 4) sich hierbei multiplizieren, ist die Anwendung dieser eleganten Lösung meistens nur dann von Nutzen, wenn wenigstens die eine Teilstrecke kurz ist.

D. Übertragungssysteme

Als sich bei der drahtgebundenen Übermittlung das Problem stellte, eine möglichst grosse Zahl von

Nachrichtenkanälen über eine einzige Leiterschlaufe aufzubauen, stand naturgemäss die Forderung nach minimalem Frequenzbandbedarf bei der Systemwahl im Vordergrund. Das heute längst standardisierte Verfahren der Einseitenband-Amplitudenmodulation mit unterdrücktem Träger (SS), übertragungstechnisch gesehen eigentlich gar keine Modulation, sondern eine einfache Frequenzbandverlagerung, ist in dieser Beziehung sicher optimal und war auch schon beim damaligen Stand der Technik ausführbar.

Dieses Prinzip auf die Richtstrahlübermittlung anzuwenden ist zwar denkbar und hätte sogar gewisse Vorteile; es würde aber praktisch wegen der hohen Frequenzlage und der Instabilität der Übertragungsdämpfung, noch mehr aber wegen der äusserst hohen Anforderungen an die Amplitudentreue der Relaisverstärker, auf grosse Schwierigkeiten stossen. Es erweist sich daher als zweckmässig und notwendig, bei der Richtstrahlübermittlung die billige Möglichkeit grösserer Frequenzbandbreite durch eine geeignete Signalumformung auszunützen und dadurch den Nachrichteninhalt unempfindlich zu machen gegen Dämpfungsschwankungen, nichtlineare Verstärkereigenschaften und Frequenzunsicherheiten längs des Übertragungsweges.

Dies geschieht einerseits durch eine eigentliche Modulation mit übermitteltem Träger, wobei die ursprünglichen Signalfrequenzen bis zur Demodulation am fernen Ende streng erhalten bleiben, anderseits durch die Transponierung der Nachrichtensignale aus der natürlichen Leistungszeitebene, die störenden Einflüssen aller Art am meisten ausgesetzt ist, in eine hierfür weniger empfindliche Lage, beispielsweise die Frequenzzeitebene; dadurch werden gleichermassen die Auswirkungen des Verstärkerrauschens und fremder Störsignale (Nachbaranlagen usw.) sowie die Intermodulation infolge nichtlinearer Verstärkereigenschaften unterhalb eines bestimmten Schwellenwertes wesentlich verbessert oder sogar gänzlich eliminiert.

Im einfachsten Falle wird beides durch den gleichen Modulationsvorgang, wie bei der einfachen Frequenzmodulation, erreicht. In weiter fortgeschrittenen Systemen, die dann auch einen höheren Unempfindlichkeitsgrad gegen störende Einflüsse aller Art aufweisen, erfährt der Nachrichteninhalt vor der Modulation des hochfrequenten Trägers noch eine besondere Verschlüsselung, sei es durch weitere Modulationsvorgänge oder durch eine regelrechte Codierung, wie bei der sogenannten Puls-Code-Modulation, was durch das Prinzip der Amplitudenquantelung ermöglicht wurde.

Es liegt in der Natur der Sache, dass durch diese Operationen, entsprechend dem Grade der Verschlüsselung, das unerwünschte Abhören von übertragenen Nachrichten auch im Bündelungsbereich der Richtstrahlantennen immer schwieriger wird, was natürlich sehr erwünscht ist. Allerdings wächst damit auch der technische Aufwand bei Endstationen beträchtlich, wo das Nachrichtensignal verschlüsselt und entschlüsselt werden muss. Umgekehrt werden die Anforderungen an die Übertragungseigenschaften der Relaisverstärker immer geringer und die Regenerationsmöglichkeit eines teilweise deformierten, aber noch codierten Empfangssignals vor der Wiederausstrahlung immer grösser. Man ist versucht, diese Verschlüsselungsfestigkeit und Unempfindlichkeit gegen Störbeeinflussung als «*Systemhärte*» zu bezeichnen. An sich ist eine maximale Systemhärte natürlich immer erwünscht, der wirtschaftliche Aufwand an

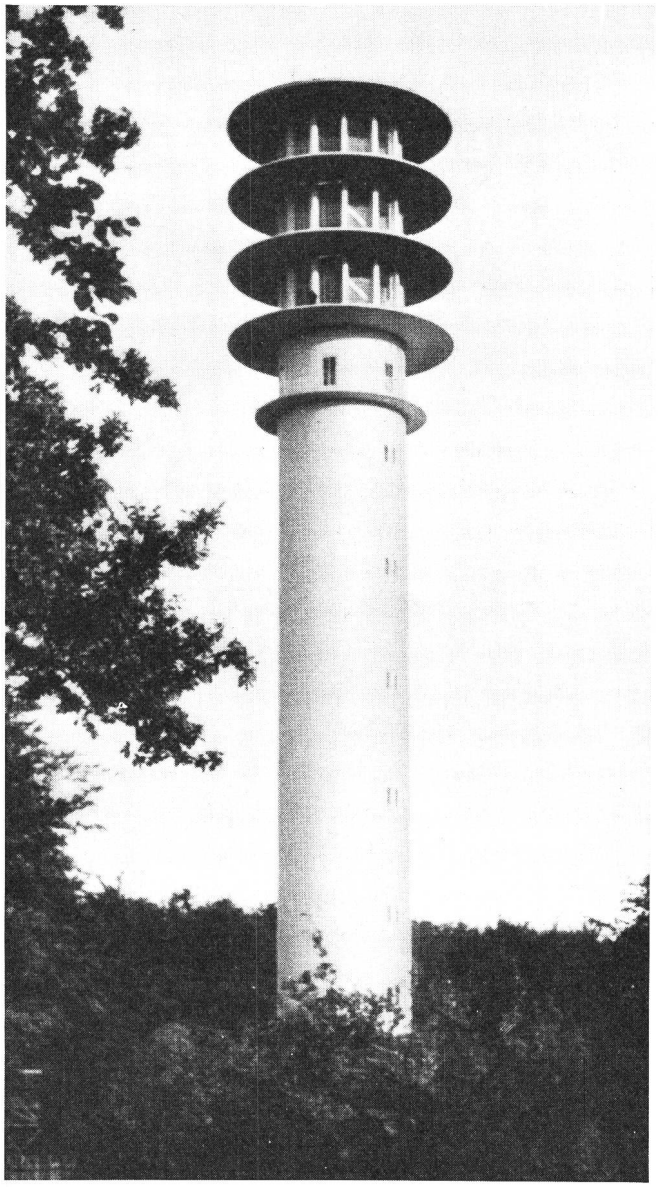

Fig. 12b. Fernmeldeturm Egestorf, 128 m ü. M., ein Stützpunkt der Richtstrahlverbindung Hamburg–Köln(–Frankfurt a. M.–Süddeutschland); dient auch gleichzeitig für mobile Dienste. Die tellerförmigen Plattformen sind zur Aufnahme der Richtstrahlantennen bestimmt. Turmhöhe 70 m. Die elegante Konstruktion passt sehr gut ins Landschaftsbild
Das Bild wurde uns freundlicherweise vom Fernmeldetechnischen Zentralamt in Darmstadt zur Verfügung gestellt

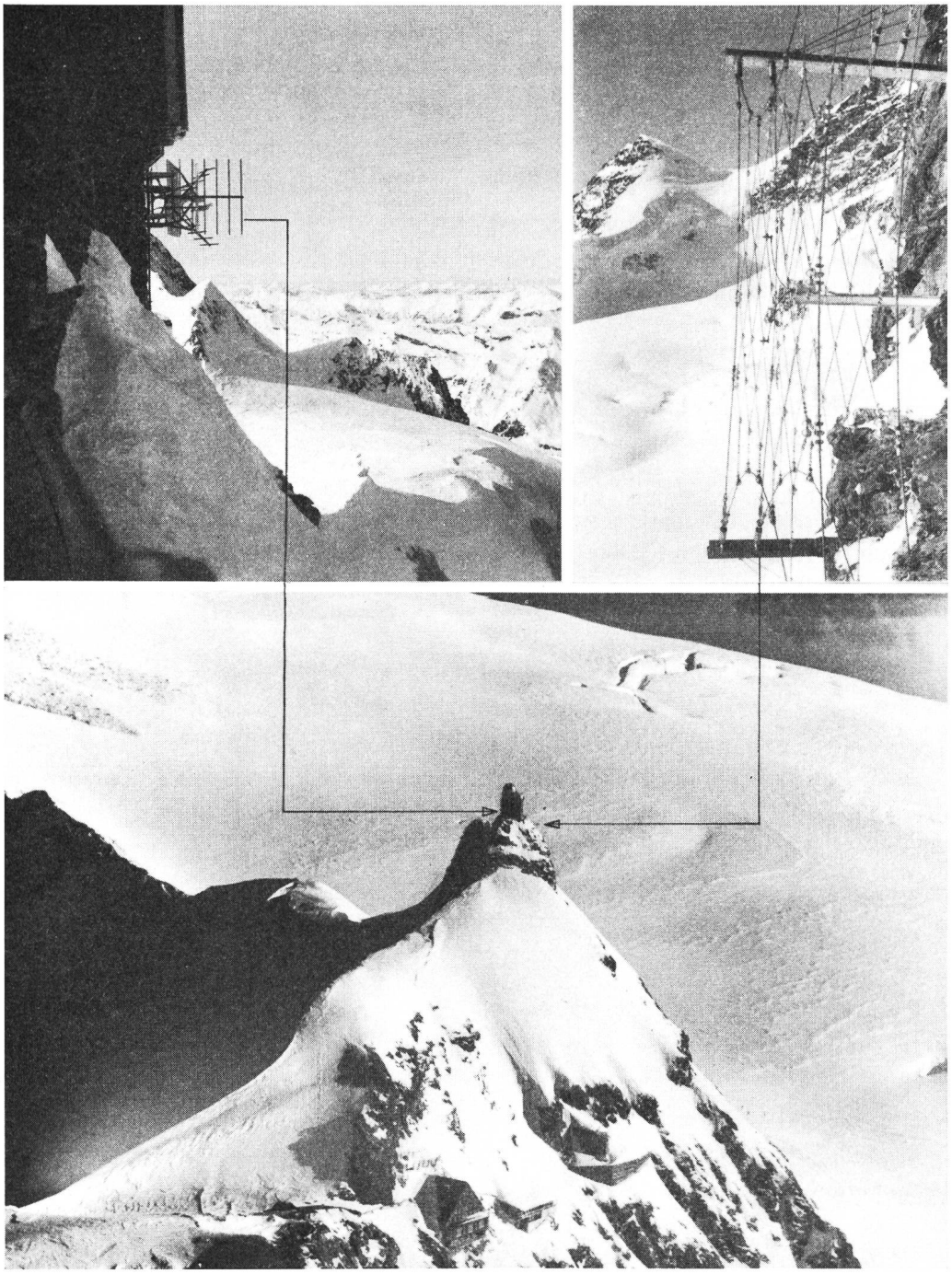

Fig. 13.
Höhenstation Sphinx, Jungfraujoch, 3573 m ü. M., im Zentrum der Schweizer Alpen gelegen, ermöglichte erstmals eine kommerzielle Mehrkanal-Richtstrahlverbindung über die Alpen (Bern–Lugano, im Frühjahr 1950). Die fehlende Sicht mit der Gegenstation Monte Generoso am Alpensüdfuss bedingte hier verhältnismässig grosse Antennen in Verbindung mit der Anwendung verhältnismässig langer Wellen (zirka 1,5 m)

Verschlüsselung wird aber letzten Endes von der homogenen Gesamtstreckenlänge eines Systems bestimmt werden. Heute scheint die praktische Entwicklung in dieser Richtung noch zu wenig weit fortgeschritten.

Die moderne Nachrichtentheorie (Shannon, Wiener, Gabor usw.) hat auf statistischer Grundlage u. a. den Zusammenhang zwischen Übertragungskapazität, Frequenzbandbreite und Geräuschabstand eines Nachrichtenkanals in streng gültiger Form hergestellt und dabei gezeigt, warum und in welchen Grenzen man Bandbreite gegen Geräuschabstand eintauschen kann und wie die «Systemhärte» mit den statistischen Eigenschaften des übertragenen Signals (Signalentropie) verknüpft ist. Ursprünglich angeregt gerade durch die Entwicklung neuer Übertragungssysteme auf dem Hochfrequenzgebiet, die eine Erkenntnislücke aufgezeigt haben, bildet diese Theorie heute das Fundament der Nachrichtenübertragungslehre im weitesten Sinne. Sie gibt auch neue Fingerzeige für die mögliche weitere Entwicklung der Richtstrahlübertragungssysteme. Näher in diese Zusammenhänge einzudringen ist jedoch im Rahmen dieses Aufsatzes nicht möglich.

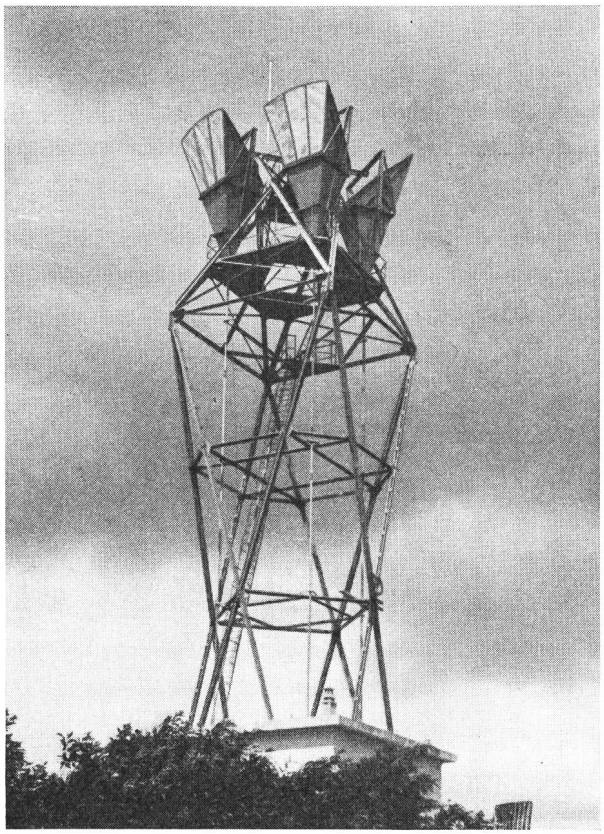

Fig. 14. Richtstrahlturm der Versuchsstation Cormeilles-en-Parisis mit drehbaren Horn-Parabol-Strahlern für die Übertragung sehr breiter Frequenzbänder im Bereiche von 4000 MHz (zirka 7,5 cm Wellenlänge).
Das Bild wurde uns freundlicherweise vom Service des Recherches et du Contrôle Technique des PTT, Jssy-les-Moulineux, zur Verfügung gestellt

Mehrkanalsysteme

Ein Mehrkanalsystem ist charakterisiert durch die Art der Signalumformung (Codierung, Modulation) und der Kanalgruppierung. Die Zahl der möglichen Systeme ist ausserordentlich gross. Nach der Art der Kanalverschachtelung unterscheidet man üblicherweise zwei grosse Systemgruppen, die allerdings auch kombiniert auftreten können.

a) *Frequenzmultiplexsysteme* übertragen alle Kanäle gleichzeitig auf einem gemeinsamen Übertragungsweg. Die sende- und empfangsseitige Zusammenfassung und Ausscheidung der Kanäle erfolgt auf Grund ihrer individuell verschiedenen Lage im Frequenzband durch Filter.

Frequenzmultiplexsysteme stellen erhebliche Anforderungen an die Linearität der gemeinsamen Aussteuerungskennlinie zwischen den Endstellen. Wesentliche praktische und übertragungstechnische Vorteile legen es nahe, hierbei direkt von den international genormten Kanalgruppen (je 12 Kanäle) und -supergruppen (je 60 Kanäle) der drahtgebundenen Mehrkanalsysteme auszugehen, die durch einfache Frequenzverlagerung gebildet werden. Bei grösseren Kanalzahlen ist dies heute bereits allgemein anerkannte Praxis. Bei genügender Gesamtbandbreite ist es mit einem solchen System verhältnismässig einfach, wahlweise, allenfalls sogar gleichzeitig, Fernsehbilder zu übertragen, indem die Qualitätsanforderungen der Fernsehübermittlung wesentlich leichter zu erfüllen sind.

Durch geeignete Signalumformung ist es möglich, die Linearisierungsschwierigkeiten teilweise oder sogar ganz auf die Endstellen zu beschränken. Ausgeführte Anlagen benützen vorwiegend die einfache Frequenzmodulation (SS-FM). Eine wesentlich grössere «Systemhärte» ergibt sich aber beispielsweise mit der doppelten Frequenzmodulation (SS-FM-FM), die auch schon vereinzelt angewendet wurde; der Preis dafür ist u. a. eine grössere Bandbreite.

b) *Zeitmultiplexsysteme* übertragen die Kanäle zeitlich hintereinander gestaffelt in periodisch wiederkehrender Reihenfolge, wobei jedem Kanal jeweils die ganze Bandbreite des Übertragungskanals zur Verfügung steht. An Stelle der üblichen Filter treten hier zur Ausscheidung der Kanäle sende- und empfangsseitig synchron rotierende elektronische Umschalter. Als Grenzbedingung für eine unver-

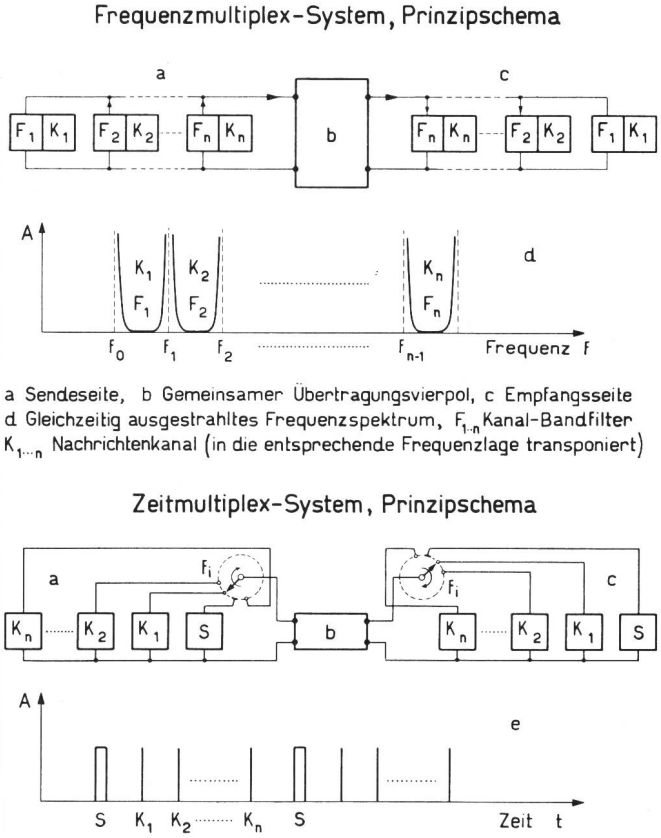

Fig. 15. Grundsätzliche Möglichkeiten für die Bildung von Mehrkanal-Systemen

stümmelte Übertragung ergibt sich, dass die Rotationsfrequenz dieses Umschalters wenigstens doppelt so hoch sein muss wie die höchste Kanalfrequenz (Prinzip der Amplitudenquantelung).

Da zu jedem Zeitpunkt jeweils nur Signale von einem einzigen Kanal im gemeinsamen Übertragungsweg vorhanden sein müssen, ist die Gefahr der Intermodulation gering, und es brauchen keine besonderen Linearitätsanforderungen an die Aussteuerungskennlinie gestellt zu werden. Dagegen ist es schwieriger, ganze Kanalgruppen zu «quantisieren» (Intermodulation). Gerade dieser Fall dürfte aber für die fernere Zukunft der Zeitmultiplexsysteme von beträchtlichem Interesse sein.

Das Prinzip der Amplitudenquantelung, das heisst die hinreichende Kennzeichnung eines Signals im Frequenzband $\triangle f$ durch $2 \triangle f$ periodische Augenblickswerte, erlaubt auch eine wesentlich bessere Signalsverschlüsselung als kontinuierliche Modulationsverfahren. Man erhält damit ausserordentlich «harte» Systeme bei entsprechendem Endstellen-Aufwand. So ist mit Puls-Code-Modulation eine optimale Übertragungsqualität noch an der Geräuschschwelle des Empfängers möglich. Allerdings wird dann die Übertragung schon bei geringer Unterschreitung der Schwelle rasch völlig unbrauchbar. Dies ist in gewisser Hinsicht auch wieder eine Schwäche derartiger Systeme, indem der Übertragungsschwund bei Richtstrahlverbindungen gleichwohl einen beträchtlichen Sicherheitsabstand bei normalen Ausbreitungsverhältnissen bedingt. Dieser Sicherheitsabstand fällt unter Umständen gleich hoch aus wie bei einem weniger «harten» System, wobei dann allerdings bis zum eventuellen Verbindungsunterbruch bei Schwundspitzen die maximale Übertragungsqualität erhalten bleibt. Dagegen findet keine Akkumulierung der Streckengeräusche statt, so dass der Faktor n in der Reichweitenformel (9) und (10) wegfällt. Dieser Vorteil tritt aber erst bei sehr vielen Teilstrecken in Erscheinung.

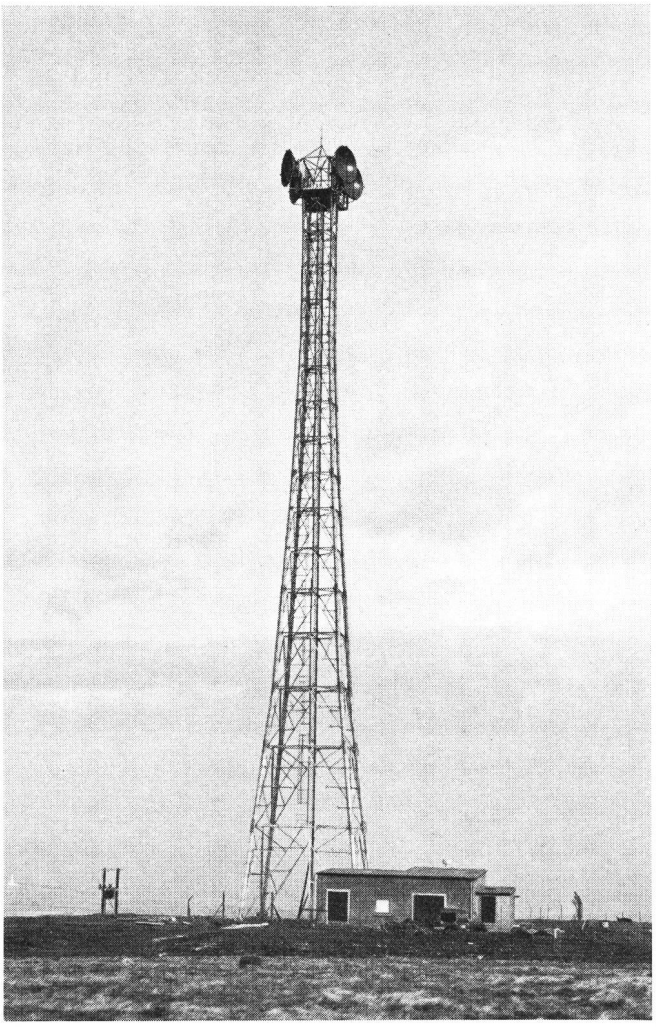

Fig. 16. Relaisstation Blackcastle Hill, an der Ostküste von Schottland, einer der sechs Zwischenstützpunkte der Fernseh-Richtstrahlverbindung Manchester–Edinburgh, Wellenlänge zirka 7,5 cm. Die Parabolreflektoren auf der Spitze dieses fast 70 m hohen Metallturmes sind durch Wellenleiter mit dem Apparateraum neben dem Turmfuss verbunden
Die Aufnahme wurde uns freundlicherweise von der Standard Telephon und Radio AG. in Zürich zur Verfügung gestellt

Eine etwas eingehendere Betrachtung zeigt, dass trotz anderweitiger grösserer Unterschiede (Bandbreite je Kanal, Linearitätsanforderungen usw.) die meisten interessanten Übertragungssysteme bei gleicher Gesamtbreite und mittlerer Sendeleistung praktisch wenig verschiedene maximale Teilstrecken ergeben, solange die Schwundmarge je Teilstrecke, und nicht die Zahl der Teilstrecken, den Ausschlag gibt für die Dimensionierung des Systems bezüglich Rauschen über die Gesamtstrecke. Die allgemeinen Überlegungen zur Dimensionierung von Richtstrahlstrecken (Abschnitt B) werden daher durch die Systemfrage praktisch nur wenig modifiziert.

E. Ausblick

Die Nachrichtenübertragung mittels Richtstrahlen hat gegenüber der drahtgebundenen Technik einige sehr wesentliche Vorzüge. Sie ergeben sich vor allem aus der Natur des Übertragungsmediums, das im Bereich der optischen Sicht und bei den uns interessierenden Wellenlängen im Mittel nahezu die Ausbreitungseigenschaften des freien Raumes besitzt, so dass grosse Frequenzbandbreiten und Verstärkerabstände von 50, sogar 100 und mehr Kilometern (je nach den Geländeverhältnissen) möglich sind. Das verfügbare Frequenzspektrum ist ausserordentlich gross, und es können wegen der «quasioptischen» Ausbreitungseigenschaften die gleichen Wellenbänder in räumlichen Abständen und verschiedenen Richtungen fast beliebig wiederbenützt werden. Der Wegfall des metallischen Verbindungsleiters bringt eine bessere Anpassungsfähigkeit an wechselnde Betriebserfordernisse, ermöglicht die Überbrückung unwirtlicher Gegenden und den mobilen Einsatz. Die Einsparung an Rohmaterial

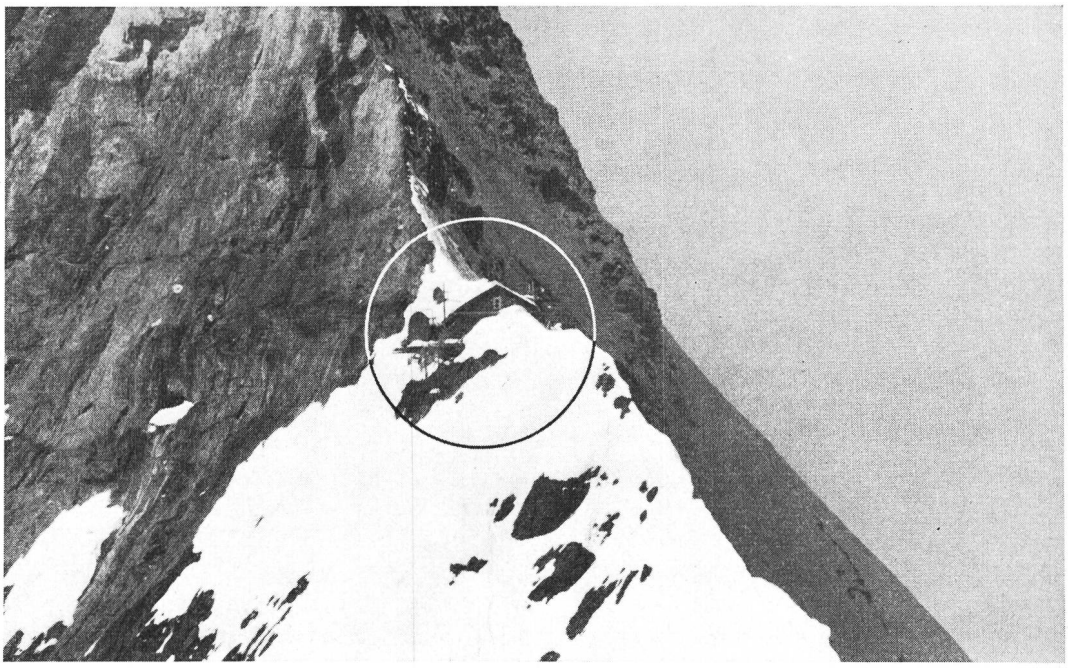

Fig. 17.
Die neue Höhenstation Jungfraujoch am Jungfrau-Ostgrat, 3692 m ü. M., der Sammelpunkt für die Nord–Süd-Richtstrahlverbindung über die Schweizer Alpen (Sommer 1954). Die Station ist durch einen Stollen jederzeit zugänglich

und Erdbauarbeiten ist beträchtlich und die Verbindung weniger verletzbar.

Demgegenüber stehen auch einige gewichtige Nachteile: Wesentlich kompliziertere und umfangreichere Verstärker, grösserer Stromverbrauch und entsprechend grössere Notstromanlagen und Gebäude; Turmbauten für die Antennen im Flachland oder zusätzliche Aufwendungen für Zugang und Stromversorgung von Höhenstationen im Gebirge. Lebensdauer und Wirkungsgrad, besonders der cm- und dm-Wellen-Röhren, müssen noch erheblich verbessert, die Anlagen in mancher Hinsicht vereinfacht und weiterentwickelt werden.

Trotzdem hat die Richtstrahltechnik heute bereits einen beachtlichen Stand erreicht und ist infolge unbestreitbarer Vorzüge in einigen Ländern schon auf dem Wege – sei es in zweckmässiger Ergänzung der Drahtverbindungen oder durch Erschliessung neuer Verbindungsmöglichkeiten –, ein integrierender Bestandteil des öffentlichen Nachrichtennetzes zu werden, angefangen von der Übermittlung einfacher Telegraphiesignale bis zum Fernsehbild. Vielleicht wird ihr eines Tages in der Übertragung *sehr* grosser Frequenzbündel der Wellenleiter mit mm-Wellen wieder den Rang ablaufen?

Bibliographie

Burrows, Ch. R., and *St. S. Attwood*. Radio Wave Propagation. Consolidated Summary Technical Report of the Committee on Propagation of the National Defense Research Committee. New York 1949.

Friis, H. T. Microwave Repeater Research. Bell Syst. Techn. J. **27** (1948), 183...246.

Roetken, A. A., K. D. Smith and *R. W. Friis*. The TD-2 Microwave Radio Relay System. Bell Syst. Techn. J. **30** (1951), 1041...1077.

Sueur, R., et *L. J. Libois*. Les faisceaux hertziens dans les réseaux téléphoniques modernes. Onde électrique 1952, Nos 301–302, p. 121...130.

Cabessa, R. L'apport des liaisons par faisceaux hertziens dans le domaine des télécommunications. Onde électrique 1952, Nos 301–302, p. 131...147.

Starr, A. T., and *T. M. Walker*. Microwave Radio Links. Proc. Inst. Electr. Eng., Part III, **99** (1952), 241...255.

British Television Relay Network. Electrical Communication **29** (1952), 171...178.

Schmidt, K. O. Technische Grundlagen für Richtfunkverbindungen im Dezimeter- und Zentimeterwellenbereich. Fernmeldeingenieur 1951, Heft 5.

Dietrich, E., und *P. Barkow*. Die Dezimeterwellen im Fernsprechdienst der Deutschen Post. Fernmeldetechn. Z. 1950, Heft 5, S. 145...154.

Klein, W. Essais de transmission par ondes dirigées exécutés dans les Alpes pour contribuer à l'établissement d'un réseau radiotéléphonique suisse. Bulletin technique PTT 1950, No 8, p. 308...317; vgl. auch Brown-Boveri-Mitt." 1949, Nr. 12, S. 387...395.

Klein, W., und *C. Steffen*. Die erste kommerzielle Richtstrahl-Telephonverbindung über die Alpen (Bern–Jungfraujoch–Mte Generoso–Lugano) erscheint demnächst in den Techn. Mitt." PTT.

Landon, V. D. Theoretical Analysis of Various Systems of Multiplex Transmission. RCA-Review **9** (1948), 287...351 and 433...482.

Shannon, C. E. A Mathematical Theory of Communication. Bell Syst. Techn. J. **27** (1948), 379...424 and 623...657. Vgl. auch *W. Meyer-Eppler*. Die Nachrichtentheorie von C. E. Shannon. Fernmeldetechn. Z. 1950, Heft 5, S. 161...164.

Bryant, J. H., T. J. Marchese and *H. W. Cole*. Some Recent Developments in Travelling-Wave Tubes for Communication Purposes. Electrical Communication **29** (1952), 229...233.

Klein, W., et *L. J. Libois*. Essais de transmission par faisceaux hertziens sur un long parcours en visibilité optique entre la France et la Suisse. Onde électr. 1953, No 321, p. 665...677.

Holzwarth, H. Ein Vergleich der wichtigsten Modulationsverfahren für Richtfunkverbindungen nach neueren Erkenntnissen. Archiv für elektrische Übertragung **7** (1953), 213...222.

Sueur, R. L'évolution des faisceaux hertziens français, à grande distance, normalisés. L'écho des recherches 1954, No 15, p. 65...67.