

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 40 (1962)

Heft: 8

Artikel: Nachrichtübertragung mit Hilfe künstlicher Erdsatelliten

Autor: Klein, W.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-875135>

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: 15.01.2026

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

mit die LASER-Bedingung erfüllt. Die LASER aktiven Übergänge vollziehen sich zwischen $\text{Ne}(2s) \rightarrow \text{Ne}(2p)$ (Bezeichnung nach *Paschen*) bei einer Wellenlänge von 11 530 Å. Auch bei diesem Gas-LASER wird das Pérot-Fabry-Prinzip angewandt. Die beiden Platten stehen im Abstand von 80 cm auf einige Bogensekunden parallel. Um einen hohen Reflexionsgrad zu erreichen, wurden die Pérot-Fabry-Platten mit dielektrischen Interferenzschichten belegt. Zwischen den Platten brennt die Gasentladung. Von den Autoren wurde für diesen He/Ne-LASER eine überraschend schmale Linienbreite von etwa 40 kHz gemessen; dem entspricht ein $\lambda/\Delta\lambda$ von $0,6 \cdot 10^{10}$.

Adresse des Autors: Dr. Bruno Elschner, Battelle-Institut, Genf-Carouge.

Literaturverzeichnis

- [1] Gordon, J. P., Zeiger, H. Z. und Townes, C. H. Phys. Rev. **95** (1954), S. 282.
- [2] Basov, N. G. und Prokhorov, A. M. Journ. exp. theor. Physik. USSR **27** (1954), S. 431.

- [3] Gordon, J. P., Zeiger, H. Z. und Townes, C. H. Phys. Rev. **99** (1955), S. 1264.
- [4] Troup, G. MASERS, Menthuen and Co. Ltd., London 1959.
- [5] Bonanomi, J., und Herrmann, J. Helv. Phys. Acta **XXIX** (1956), S. 224.
- [6] Bloembergen, N. Phys. Rev. **104** (1956), S. 324.
- [7] Bölger, B., Robinson, B. J. und Ubbink, J. Physica **26** (1960), S. 1.
- [8] Cook, J. J., Cross, L. G., Bain, M. E. und Terhune, R. W. Proc. I.R.E. **49** (1961), S. 768.
- [9] Aus «Physiker-Tagung Essen 1959». Vortrag Townes, C. H. Physik-Verlag Mosbach.
- [10] Schawlow, A. L. und Townes, C. H. Phys. Rev. **112** (1958), S. 1940.
- [11] Maiman, T. H. et al. Phys. Rev. **123** (1961), S. 1151.
- [12] Wieder, I. und Sarles, L. R. Phys. Rev. Letters **6** (1961), S. 95.
- [13] Kaiser, W., Garrett, C. G. B. und Wood, D. L. Phys. Rev. **123** (1961), S. 766.
- [14] Sorokin, P. P. und Stevenson, M. J. Phys. Rev. Letters **5** (1960), S. 557.
- [15] Javan, A., Bennett, W. R. und Herriott, D. R. Phys. Rev. Letters **6** (1961), S. 106.
- [16] Nelson, D. F. und Boyle, W. S. Appl. Optics **1** (1962), S. 181.

W. Klein, Bern

621.396.934:629.19:621.39

Nachrichtenübertragung mit Hilfe künstlicher Erdsatelliten

1. Allgemeines

Wir erleben gegenwärtig einen gewaltigen technischen Wettlauf um die Erforschung und Eroberung der höheren Erdatmosphäre und darüber hinaus des kosmischen Raumes. Anlass und Möglichkeit hierzu bot die erfolgreiche Entwicklung von Raketentriebwerken, die dem Menschen erstmals erlauben, das Gravitationsfeld der Erde, vorläufig mit einer verhältnismässig bescheidenen Nutzlast, zu überwinden und ausserdem im Weltraum Relativgeschwindigkeiten zu erreichen, die grundsätzlich zunächst einmal Teile unseres eigenen Planetensystems in greifbare Nähe bringen. Vor wenigen Jahren hätte man dies noch als utopische Zukunftsvision betrachtet; heute vergeht kaum eine Woche, ohne dass nicht irgendein neuer Versuchssatellit in seine Umlaufbahn um die Erde geschickt wird. Freilich sind neben dem eigentlichen Fortbewegungsproblem noch hundert andere zu lösen, doch das Haupttor in diese neue Welt der Entdeckungen steht von nun an offen. Wie gross der heutige materielle und personelle Einsatz für Entwicklungen in dieser Richtung ist, zeigen die hohen Ausgaben der National Aeronautical and Space Administration (NASA), der Dachorganisation für Raumforschung der Vereinigten Staaten, die nächstens die 3 Milliarden Dollargrenze im Jahr überschreiten werden.

Die Ursachen und Ziele dieser Entwicklung sind teils wissenschaftlicher, teils militärischer Natur. Die

Wissenschaft erwartet als Nahziel wertvolle neue Aufschlüsse über die Struktur der oberen Erdatmosphäre und deren Beeinflussung durch die komplizierten Vorgänge auf der Sonne sowie über die Struktur des kosmischen Raumes, als Fernziel neue Einblicke in die Entstehung und Weiterentwicklung unseres Planeten, unseres Sonnensystems und des gesamten Kosmos, Fragen, welche die Grundfesten der Physik und unseres materiellen Seins berühren. Wenn einerseits die Wissenschaft vielleicht noch nie vor derart weitreichenden und aufregenden Problemen stand, so verlangt andererseits die Erschliessung dieses Neu-landes einen maximalen Einsatz der besten Köpfe und materiellen Hilfsmittel aus den verschiedensten technischen Sparten.

Eine der grundlegenden Voraussetzungen für die Eroberung des Luftraumes ist, ausser einem geeigneten Fortbewegungsmittel, eine zuverlässige Nachrichtenübertragung zwischen Erde und Raumfahrzeugen, in einer späteren Phase auch zwischen Raumfahrzeugen unter sich. Damit stellt sich von selbst auch die Frage nach einer direkten Nutzenanwendung von künstlichen Erdsatelliten für die Nachrichtenübertragung zur Erde und auf der Erde. In der Tat scheint es zum Beispiel verlockend, künstliche Erdsatelliten dem kommerziellen Nachrichtenaustausch über interkontinentale Entfernungen dienstbar zu machen, fehlt uns doch hier bisher ein genügend leistungsfähiges Übertragungsmittel, welches das Anwachsen des in-

ternationalen Nachrichtenverkehrs im gegenwärtigen Ausmass auf längere Sicht auffangen könnte. Zahlreiche bedeutende Unternehmungen der Nachrichtentechnik haben daher bereits mit grossen Mitteln die Entwicklung von Nachrichtengeräten für interkontinentale Erdsatellitenverbindungen in Angriff genommen, zunächst in den Vereinigten Staaten, neuerdings auch in gewissen europäischen Ländern, wobei sich eine erfreuliche internationale Zusammenarbeit angebahnt hat. Dem künstlichen Erdsatelliten fällt dabei die Rolle eines weithin sichtbaren, drahtlosen Relaisverstärkers mit Frequenzumsetzung zu, der in einem einzigen grossen Sprung viele Tausende von Kilometer zu überbrücken gestattet. Dabei erscheint es, unter Berücksichtigung der neuesten Erkenntnisse und Geräteentwicklungen in der Hochfrequenztechnik, durchaus möglich, Informationskapazitäten von der Grössenordnung 10^8 bit/s zu erreichen, das heisst entsprechend den heutigen bodengebundenen Mikrowellen-Richtstrahlenverbindungen je Übertragungskanal ein Fernsehbild, rund 1000 Telefongespräche oder eine entsprechende Menge Daten zu übertragen. Dies ist ein Vielfaches dessen, was ein modernes Seekabel mit eingebauten Unterwasserverstärkern oder gar eine Kurzwellen-Überseeverbindung leisten kann. Hinzu kommt, dass ein Nachrichtensatellit, auch wenn er einmal in Umlauf gesetzt ist, nicht nur zwei, sondern beliebige Punkte auf einem grossen Teil der Erdoberfläche miteinander verbinden kann, sei es in zeitlicher Aufeinanderfolge, sei es, im jeweiligen Sichtbereich, gleichzeitig mit aufgeteilter Übertragungskapazität.

Bis zur betrieblichen Reife und kommerziellen Auswertung derartiger Breitband-Nachrichtensatelliten sind allerdings noch zahlreiche Probleme zu lösen, deren volle Tragweite erst durch weitere praktische Versuche ersichtlich werden wird. Umgekehrt sind aber auch keine nach dem heutigen Stand der Technik unüberwindliche Hindernisse vorauszusehen. Zahlreiche internationale Institutionen, unter anderem auch die Vereinten Nationen, widmen diesen Problemen grosse Aufmerksamkeit. Im Herbst letzten Jahres veranstaltete die «Union Radio Scientifique Internationale» (URSI) in Paris eine besondere Tagung, die sich ausschliesslich mit der Nachrichtenübertragung mit künstlichen Erdsatelliten befasste und die einen umfassenden Überblick der gegenwärtigen Probleme und künftigen Entwicklungsmöglichkeiten bot. Die Internationale Fernmelde-Union (UIT) hat bereits die praktische Seite des Problems im Rahmen ihrer Aufgabe in Angriff genommen, die im wesentlichen darin besteht, auf weltweiter Ebene die technischen und administrativen Voraussetzungen zu schaffen, die eine ungestörte Nachrichtenübermittlung mit Raumfahrzeugen aller Art, neben den bereits bestehenden und geplanten drahtlosen Bodendiensten, gewährleisten sollen. Die für derartige Aufgaben neu gebildete Studiengruppe IV des CCIR befasste sich dieses Frühjahr in ihrer ersten Sitzung in Washington hauptsächlich mit den

für die Frequenzplanung der eigentlichen Nachrichtensatelliten dringlichen Problemen und Richtlinien*. Eine besondere internationale Wellenkonferenz wird Ende nächsten Jahres über die Anpassung des Radioreglementes an die neue Lage, vor allem über die erforderlichen Frequenzuteilungen, Beschlüsse fassen müssen.

Nachfolgend sollen nun kurz einige der wichtigsten Gesichtspunkte für die Planung und Entwicklung von Nachrichtensatelliten gestreift werden.

2. Wahl der geeigneten Umlaufbahn

Die Funktion eines Erdsatelliten als Nachrichtenrelais verlangt gleichzeitig direkte Sicht mit beiden, gegebenenfalls auch mehreren Bodenstationen, die miteinander in Verkehr zu treten wünschen. Aus der geometrischen Anschauung ergibt sich unmittelbar, dass für die Überbrückung interkontinentaler Entfernungen mit Rücksicht auf die Sichtverhältnisse, eine Höhe der Umlaufbahn zwischen 1 bis 3 Erdradien zweckmässig wäre. Bei Höhen unterhalb etwa 5000 km verringert sich der Sichtbereich des Satelliten sehr rasch, andererseits ist oberhalb 18 000 km nur noch ein bescheidener Zuwachs möglich. Ein günstiger Wert könnte bei 12 000 bis 15 000 km liegen.

Nun sind aber eine Reihe weiterer Gesichtspunkte von praktischer Bedeutung. Die Umlaufgeschwindigkeit, und damit die jeweilige Dauer der Sichtbarkeit sowie die Winkelgeschwindigkeit von bestimmten Bodenstationen aus, ist zwangsläufig mit der Höhe der Umlaufbahn, entsprechend den Keplerschen Gesetzen für die Planetenbewegung gegeben. Bewegt sich ein Satellit nach Aufhören der Antriebskraft frei im Raum auf einer Kreisbahn im Abstand h^* um den Erdmittelpunkt, so berechnet sich seine Umlaufzeit u besonders einfach aus dem Gleichgewicht zwischen Fliehkraft und Massenanziehung:

$$m \cdot h^* \cdot \omega^2 = k \cdot \frac{m \cdot M}{h^{*2}} \quad (1)$$

$$u = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{k \cdot M}} h^{*3/2} \quad \begin{matrix} k = \text{Gravitations-} \\ \text{konstante} \\ M = \text{Erdbmasse} \end{matrix} \quad (2)$$

In Erdbodennähe ergibt sich hieraus eine Umlaufzeit von etwa $1\frac{1}{2}$ Stunden bei einer Umlaufgeschwindigkeit von rund 27 000 km/Std. oder 7,5 km/s, was etwa den Daten der bisherigen Versuche mit bemannten Raumkapseln entspricht. Mit zunehmender Höhe wächst die Umlaufzeit entsprechend obiger Gleichung an, um in etwa 42 000 km Abstand vom Erdzentrum mit 24 Stunden die Rotationszeit unseres Planeten zu erreichen (*Fig. 1*). Die Umlaufgeschwindigkeit beträgt dann noch etwa 11 000 km/Std. oder etwas über 3 km/s.

Da uns sehr viel daran gelegen sein muss, eine dauernde, möglichst unterbruchsfreie Verbindung zwischen den Bodenstationen über Nachrichtensatelliten zu erreichen, ist diese Umlaufbahn von besonderem Interesse, gestattet sie doch, den Satelli-

* Vgl. «Technische Mitteilungen PTT» Nr. 7/1962, S. 228 ff.

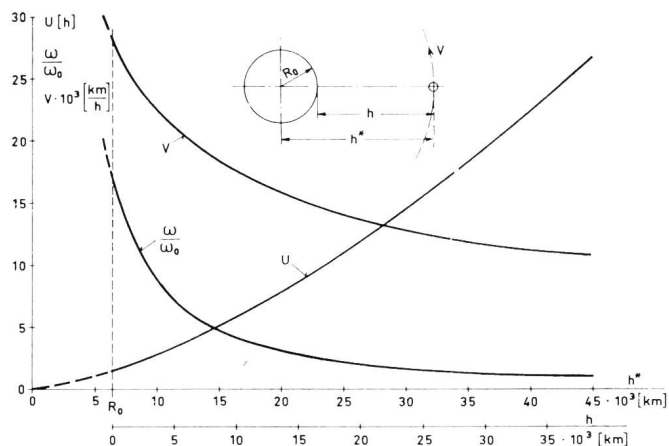


Fig. 1. Höhenabhängigkeit bei ungestörter, kreisförmiger Umlaufbahn eines Erdsatelliten für
 – die absolute Geschwindigkeit V (in 1000 km/h)
 – die absolute Umlaufzeit U (in h)
 – die Winkelgeschwindigkeit ω , relativ zur Winkelgeschwindigkeit ω_0 der Erdrotation

ten in der Äquatorebene synchron mit der Erde drehen zu lassen, so dass er relativ zur Erde stillsteht (quasi-stationär). Die Ausnützung der Erdrotation beim Abschuss des Satelliten in der Äquatorebene verringert den zur Erreichung der synchronen Umlaufbahn notwendigen hohen Antriebsaufwand nicht unwesentlich. Die erforderlichen grossen und schweren Richtantennen der Bodenstationen können grundsätzlich dauernd in die gleiche Richtung zeigen oder schlimmstenfalls sehr langsam nachgeführt werden. Ein einzelner Satellit würde sichtmässig gut ein Drittel der bewohnten Erdoberfläche erfassen (Fig. 2). Allerdings ist es dann praktisch nicht zu umgehen, ihn mit einer Korrekturmöglichkeit für die Grösse und Richtung seiner Geschwindigkeit auszurüsten (station-keeping). Beim gegenwärtigen Stand der Nachrichtentechnik und der Stromversorgungsmöglichkeiten muss ein solcher Synchronsatellit zudem mit einer Richtantenne gegen die Erde versehen werden, was den Einbau einer selbsttätigen oder vom Boden steuerbaren Kontrolle der Achsrichtung des Satelliten bedingt (attitude-control). Derartige Einrichtungen sind aber auch für niedriger fliegende

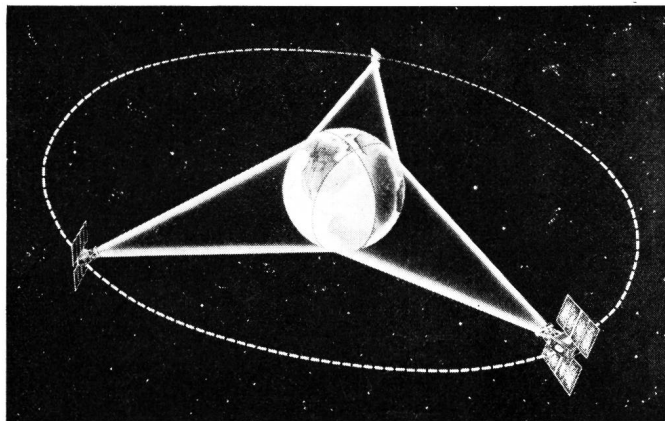


Fig. 2. Synchrones Satellitensystem in der Äquatorebene (Kreisbahn in etwa 35 800 km über Erdboden)

Satelliten erwünscht, für zahlreiche andere Satellitenanwendungen sogar notwendig, und werden ohnehin entwickelt.

Ein den Synchronsatelliten leider anhaftender Nachteil ist die lange Signallaufzeit. Sie beträgt fast $\frac{3}{10}$ Sekunden in einer Übertragungsrichtung, entsprechend der zu überbrückenden Entfernung von rund 80 000 km. Werden zwei Satellitenübertragungen hintereinander durchlaufen, was für bestimmte lange Verbindungen der Fall sein kann, so verdoppelt sich dieser Wert. Dies stellt allerdings praktisch nur für den Gegensprechverkehr, hauptsächlich infolge der damit verbundenen Echoprobleme, eine ernsthafte Behinderungsmöglichkeit dar. Da jedoch das Telefon wohl einer der wichtigsten Benutzer von Nachrichtensatelliten sein wird, dürfte viel davon abhängen, ob und wie dieses Problem gelöst werden kann. Entsprechende Untersuchungen sind im Gang.

Kehren wir zu den niedrigeren Umlaufbahnen mit Höhen von 5000–10 000 km über Boden zurück, so stellen wir fest, dass zwar die Übertragungszeit auf einen auch für die Telephonie ohne weiteres annehm-

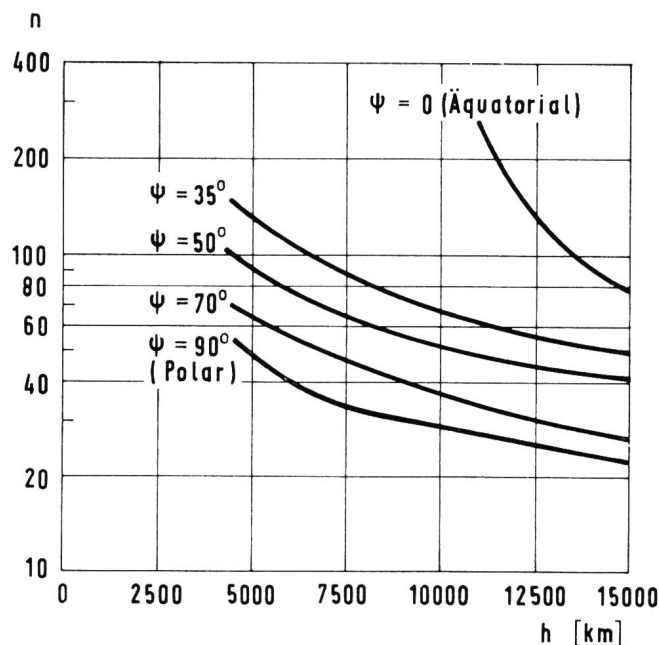


Fig. 3. Anzahl n der erforderlichen Satelliten bei Kreisbahn im unteren, asynchronen Höhenbereich für eine Dauerverbindung über den Nordatlantik (Nach J. L. Glaser: The design of medium height random orbit satellite systems, vgl. Lit. 1)

baren Wert sinkt, dafür aber andere Nachteile in Erscheinung treten. Die Umlaufzeit liegt hier zwischen 3 und 6 Stunden, die jeweilige Dauer der Sichtbarkeit von zwei korrespondierenden Bodenstationen aus ist ausserordentlich kurz und die Winkelgeschwindigkeit für die mit grosser Präzision nachzuführende Richtantenne der Bodenstation entsprechend gross. Die Wahl der geeigneten Umlaufbahnen relativ zur Erdachse für eine dauernde Überdeckung aller interessierenden Gebiete der Erde ist recht schwierig und die Zahl der hierfür benötigten Satelliten mindestens von der Grössenordnung 100. Figur 3 zeigt den

Satellitenaufwand am Beispiel einer Dauerverbindung zwischen dem Osten der Vereinigten Staaten und Westeuropa, wobei vorausgesetzt wurde, dass die Satelliten etwas verschiedene, nicht genau kontrollierte Geschwindigkeiten haben. Um eine Dauerverbindung zu gewährleisten, muss jede Bodenstation mindestens über zwei vollständige, identische Betriebsausrüstungen verfügen, und es muss stündlich mehrmals auf den nächstfolgenden Satelliten umgeschaltet werden. Die Anzahl der erforderlichen Satelliten liesse sich zwar durch Einbau einer vom Boden aus kontrollierbaren Geschwindigkeitssteuerung merklich vermindern, der zusätzliche Aufwand hierfür wäre aber auch sehr gross.

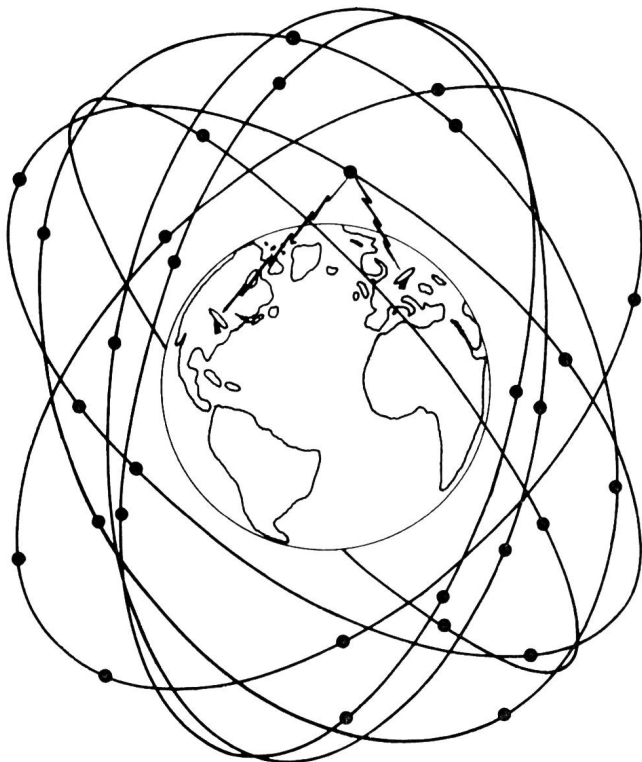


Fig. 4. Asynchrones Satellitensystem mit verschiedenen Bahn-ebenen (ungefähre Kreisbahnen 5÷10 000 km über Erdboden)

Die Relativgeschwindigkeit eines Satelliten gegenüber einer bestimmten Bodenstation kann bei den hier in Frage stehenden niedrigeren Umlaufbahnen je nachdem maximale Werte von $\pm 4-5$ km/s annehmen. Der Dopplereffekt erreicht damit in gewissen Fällen relative Frequenzänderungen von der Grössenordnung 2 bis $3 \cdot 10^{-5}$ und ist für viele Anwendungen nicht mehr vernachlässigbar. Eine empfangsseitige Korrektur ist grundsätzlich möglich, jedoch nicht bei allen Übertragungssystemen einfach durchzuführen.

Auf Grund der heutigen, allerdings noch sehr unvollständigen Kenntnisse muss befürchtet werden, dass die zerstörende Wirkung der Elektronen- und der Protonenstrahlung in einigen tausend Kilometern Höhe maximal ist (Van Allen-Gürtel), wodurch die Lebensdauer der Nachrichtensatelliten mit niedriger

Umlaufbahn drastisch herabgesetzt werden könnte. Bei synchroner Umlaufbahn ist diese Gefahr gering.

Beim Synchronsystem ist praktisch eine Verdopplung der minimal erforderlichen Satellitenzahl zur Schaffung einer Sofort-Reserve nicht zu umgehen (6 statt 3), da sonst ein einzelner Ausfall einen grossen Teil des Verkehrs für längere Zeit lahmlegen könnte. Die grosse Zahl der Satelliten bei niedriger Umlaufbahn macht dagegen eine Sofort-Reserve entbehrlich.

Es ist schwierig, heute einen zuverlässigen Kostenvergleich über die beiden hier diskutierten Umlaufsysteme anzustellen; er würde aber bei Berücksichtigung aller Faktoren wahrscheinlich doch zugunsten des Synchronsystems ausfallen. Allgemein technisch und betrieblich gesehen scheint auf lange Sicht das Synchronsystem ganz wesentlich eleganter und interessanter, allerdings noch mit der teilweisen Einschränkung, dass es gelingt, eine praktisch brauchbare Lösung für das Laufzeitproblem der Telephonie zu finden. Sollte dies nicht der Fall sein, so wäre immer noch eine äquatoriale Umlaufbahn, in einer mittleren Höhe von etwa 15 000 km über Boden (beziehungsweise so hoch, wie es der Laufzeiteffekt eben noch zulässt), von besonderem Interesse: Sie bedient den dichtbesiedelten Teil der Erde, ergibt die kleinstmögliche Relativgeschwindigkeit gegenüber der Erdoberfläche, die grösstmögliche Dauer der Sichtbarkeit während eines Durchganges und den kleinsten Raketenaufwand für eine gegebene Bahnhöhe. Für 15 000 km Bahnhöhe stellt sich eine absolute Umlaufzeit von über $8\frac{1}{2}$ Stunden oder relativ zur Erde von rund 13 Stunden ein. Die Dauer der Sichtbarkeit für jeden Durchgang beträgt je nach geographischer Lage bis zu einigen Stunden, so dass in zahlreichen Fällen auf die zweite Betriebsausrüstung der Bodenstation verzichtet werden könnte.

3. Die Wahl der geeigneten Frequenzbänder

Um auf dem ungewöhnlich grossen Verstärkerabstand zwischen Erde und Satellit grosse Informationsleistungen zu übertragen, muss der Wellenbereich von vornherein so gelegt werden, dass sich aus dem Zusammenwirken der Ausbreitungseigenschaften des Übertragungsmediums, der nicht vermeidbaren äusseren Störquellen und der bestmöglichen Ausnutzung der Antennenrichtwirkung optimale Übertragungsverhältnisse ergeben.

3.1 Durchlässigkeit der Atmosphäre

Der kosmische Raum stellt an sich den Idealfall der freien, ungestörten Wellenausbreitung für beliebige Frequenzen dar. Die Erdatmosphäre, die auf dem Übertragungsweg durchstossen werden muss, ist nun glücklicherweise fast im ganzen Bereich der m-, dm- und cm-Wellen, etwa zwischen 50 und 15 000 MHz, durchlässig.

Störungen der Ausbreitung durch Absorption, Brechung und Reflexion, in deren Folge dann auch Schwunderscheinungen und Signalverzerrungen auftreten, sind in diesem Bereich um so unwahrschein-

licher, je steiler der Elevationswinkel der Ausbreitungsrichtung verläuft. Dies hängt direkt mit der Länge des Übertragungsweges in der Erdatmosphäre, mehr aber noch mit deren Dichteverteilung und horizontalen Schichtung zusammen. Elevationswinkel kleiner als $5^\circ \div 10^\circ$ müssen daher bei kommerziellen Satellitenverbindungen wahrscheinlich ausgeschlossen werden.

Längere Wellen sind zwar für Satellitenverbindungen in manchen Fällen auch brauchbar, vor allem bei geringer Übertragungskapazität; sie sind jedoch alle den stark veränderlichen ionosphärischen Störungen unterworfen und gerade deshalb mehr für wissenschaftliche Untersuchungen wertvoll. Es scheint zwar, dass durch aussergewöhnliche, starke Ionisationserscheinungen, zum Beispiel bei Nordlicht, beim Durchgang von Meteoriten oder sehr schnellen Überschallflugzeugen, unter Umständen noch eine messbare Absorption bis in die dm-Wellen auftreten kann. Solche Erscheinungen sind aber örtlich und zeitlich begrenzt und daher für unsere Betrachtung kaum von Bedeutung. Bei kürzeren Wellen als etwa 1 bis 2 cm machen sich andererseits in zunehmendem Masse Absorptions- und Dispersionerscheinungen, hervorgerufen durch Niederschläge, Wolken, Wasserdampf und atmosphärische Gase, bemerkbar.

Niederschläge und Wolken sind wohl nicht immer vorhanden, decken aber dann praktisch das ganze höhere Frequenzspektrum ab. Wasserdampf und atmosphärische Gase haben selektiven Charakter und lassen somit gewisse Frequenzfenster zwischen Erdboden und Raum frei, was für manche Zwecke vielleicht noch interessant sein kann, weniger jedoch für kommerzielle Anwendungen. Die Sauerstoffabsorption erreicht im Bereich ihres Maximums (60 435 MHz) Dämpfungswerte von einigen 100 dB, das heisst die Atmosphäre stellt hier praktisch einen Isolator dar. Dies kann unter Umständen für Verbindungen der Raumfahrzeuge untereinander von besonderem Interesse sein.

3.2 Äquivalente Antennenrauschtemperatur

Es erweist sich als notwendig, für Breitband-Satellitenverbindungen, mindestens am Boden, Empfänger mit geringstem Eigenrauschen zu verwenden, wie sie bisher nur in der Radioastronomie üblich waren. Solche Empfänger benützen das Prinzip des Molekularverstärkers (MASER) oder des parametrischen Verstärkers. Um derart niedrige Rauschwerte zu kennzeichnen, schien es zweckmässig, anstelle der Empfängerrauschzahl R die äquivalente Rauschtemperatur T_r in Kelvin-Graden einzuführen, die durch die Beziehung

$$T_r = (R-1) 290^\circ \quad (3)$$

mit der Empfängerrauschzahl verbunden ist. Rauscharme Wanderwellenröhren-Verstärker erreichen heute etwa T_r -Werte von 400° K , parametrische Verstärker 150° K (mit Kühlung etwa 25° K) und Molekularverstärker sogar 10° K . Ein gewöhnlicher, guter Mikro-

wellenverstärker hat vergleichsweise eine Rauschtemperatur von $3000^\circ\text{--}6000^\circ \text{ K}$.

Für den Betrieb solch rauscharmer Empfänger muss nun aber die zwangsläufig von der Antenne aufgenommene, dauernd vorhandene Störstrahlung aus dem Raume mit in Rechnung gestellt werden. Das für den Betrieb massgebliche Grundgeräusch lässt sich in der äquivalenten Antennenrauschtemperatur T_{aq} wie folgt zusammenfassen:

$$T_{\text{aq}} = T_r + T_k + T_q + T_a + T_e \quad (4)$$

Darin bedeuten:

- T_r das eigentliche Empfängerrauschen
- $T_k = c \cdot f^{-2.3}$ die allgemeine kosmische Störstrahlung, unter Ausschluss einzelner, stark hervortretender Quellen, wie etwa der Sonne; T_k fällt allgemein mit wachsender Frequenz f rasch ab und setzt somit eine Grenze gegen die tiefen Frequenzen. Die Konstante c ist gebietsabhängig.

$$T_q = \frac{h}{k} \cdot f = 4,8 \cdot 10^{-11} \cdot f \quad \text{das Quantengeräusch,}$$

das proportional der Frequenz wächst und damit eine Grenze gegen die hohen Frequenzen zieht. Es erreicht aber erst bei Frequenzen von 10^{12} (gleich 1000 GHz) merkbare Werte.

- T_a das Absorptionsrauschen, verursacht durch atmosphärische Niederschläge, vor allem Regen. Dieses wächst mit abnehmendem Elevationswinkel der Richtantenne, in einem grossen Frequenzbereich aber auch mit steigender Frequenz.
- T_e die elektrischen Gerätestörungen, die im wesentlichen mit wachsender Frequenz abnehmen. Sie können und müssen durch geeignete Standortwahl der Bodenstation eliminiert werden.

In *Figur 5* ist der Frequenzverlauf der uns hauptsächlich interessierenden Rauschtemperaturen ein-

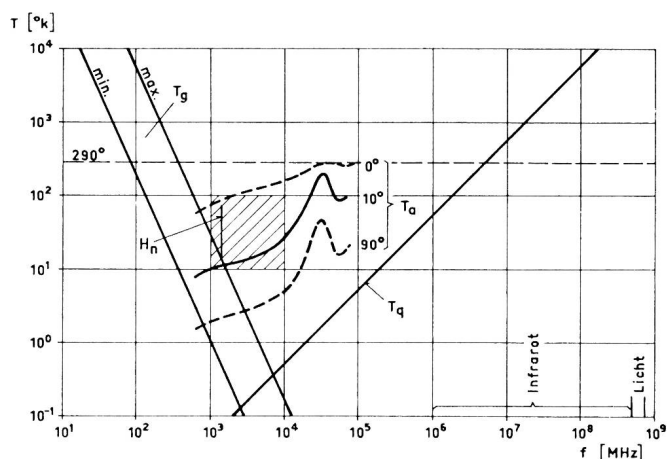


Fig. 5. Absolute Geräuschtemperatur des Himmels in Abhängigkeit von der Frequenz

T_g galaktisches Rauschen (unter Ausschluss einiger besonders starker, singulärer Quellen). Die obere Grenze entspricht dem galaktischen Äquator, die untere dem galaktischen Pol

T_q Quantengeräusch

T_a Absorptionsgeräusch der Atmosphäre für verschiedene Elevationswinkel

H_n Wasserstoffabsorptionslinie (Nach J. A. Webb und J. L. Glaser, vgl. Lit. 3 bzw. 1)

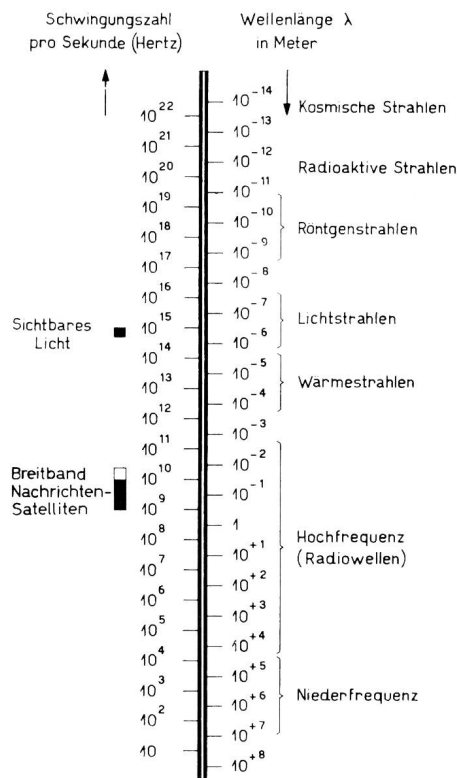


Fig. 6. Wellenspektrum

getragen. Daraus geht hervor, dass sich die höchste Empfängerempfindlichkeit wegen äusserer Störeinflüsse nur etwa im Frequenzbereich von $1 \div 10$ GHz vernünftig ausnützen lässt, was eine Einschränkung des rein ausbreitungsmässig verwendbaren Frequenzspektrums bedeutet, allerdings nicht eine unter allen Umständen und auch für die Zukunft zwingende Einschränkung. Die praktisch erreichbare äquivalente Rauschtemperatur liegt dabei um 50° K, wenn wir einen minimalen Elevationswinkel der Antenne von etwa $7,5^\circ$ voraussetzen. Schwunderscheinungen sind unter dieser Voraussetzung nicht zu befürchten und das Übertragungssystem kann im wesentlichen für einen konstanten Wert der Übertragungsdämpfung ausgelegt werden. Empfängerrauschtemperaturen von $10 \div 20^\circ$ K sind im Frequenzbereich $1 \div 10$ GHz noch sinnvoll und beim gegenwärtigen Stand der Technik für Satelliten-Breitbandverbindungen sogar notwendig, wie noch gezeigt wird.

3.3 Grenzen der Antennenbündelung

Da wir bei unseren Satellitenverbindungen infolge der langen Übertragungsstrecken darauf angewiesen sind, nicht nur maximal empfindliche Empfänger zu bauen, sondern auch die Übertragungsdämpfung möglichst niedrig zu halten, müssen wir danach trachten, bei der Bodenstation eine möglichst grosse Richtwirkung der Antenne zur Konzentration der ausgestrahlten und aufgenommenen Hochfrequenzenergie auf den gewünschten Satelliten zu erzielen. Auf dem Satelliten sind wir in dieser Hinsicht stark eingeschränkt, nicht nur aus praktischen Gründen, sondern auch grundsätzlich, weil die Satellitenantenne den

ganzen jeweils sichtbaren Teil der Erdoberfläche überstrahlen muss.

Bezeichnen wir den Richtgewinn der Boden- und Satellitenantenne gegenüber dem Kugelstrahler mit G_B und G_S , so schreibt sich der Übertragungsverlust beziehungsweise das Verhältnis der ausgestrahlten zur empfangenen Leistung

$$b_{ii} = \frac{(4\pi d)^2}{G_B \cdot G_S \cdot \lambda^2} \quad (5)$$

Unter der etwas vereinfachenden Annahme, dass die Energiebündelung der Antenne einen einzigen, kreisrunden Strahlungskegel von gleichmässiger Intensität entsprechend dem Maximalwert in der Strahlungsachse bewirkt, ergibt sich für den Spitzenwinkel ε dieses Kegels (Fig. 7) eine einfache Beziehung mit dem Richtgewinn G einer Antenne:

$$\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{G}} \quad (6)$$

Die Halbwertsbreite des wirklichen, abgerundeten Hauptstrahlungslobens ist dann ungefähr $1,5 \varepsilon$.

Ein hoher Richtgewinn der Bodenantenne bedeutet entsprechend grosse, allerdings noch von der Wellenlänge abhängige Dimensionen, entsprechend kleine Energiekonzentrationswinkel ε und damit auch wieder eine entsprechend hohe Präzision der mechanischen Ausführung, der Richtgenauigkeit und grosse

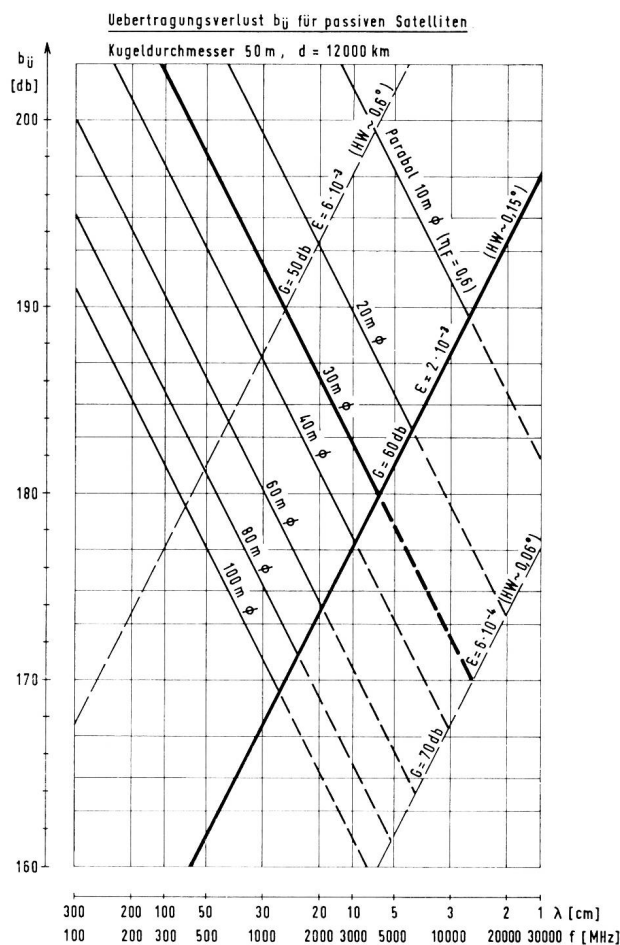


Fig. 7. Übertragungsverlust b_{ii} für passive Satelliten

zeitliche Stabilität. Mechanische Gründe und Kosten-
aufwand setzen damit der Energiebündelung prak-
tisch eine obere Grenze, wenn diese auch nicht scharf
definiert ist. Es gibt aber ausserdem eine natur-
gebundene Grenze in der Instabilität der Richtung
der abgestrahlten oder aufgenommenen Wellenfronten,
hervorgerufen durch turbulente Bewegungen der
bodennahen Luftschichten (vergleiche Flimmern bei
Lichtwellen). Diese naturgebundene, durch Turbulenz
verursachte Unsicherheit der Wellenrichtung ist am
geringsten, wenn die Atmosphäre vertikal durch-
stossen wird, sie wächst bei kleinen Elevationswin-
keln zum Horizont ziemlich stark an und ist im Be-
reich $1 \div 10$ GHz nahezu frequenzunabhängig. Dies
ist neben dem Anwachsen von Absorption, Brechung
und äquivalenter Antennenrauschtemperatur der
Hauptgrund, warum kleinere Antennenelevations-
winkel als $5 \div 10^\circ$ für breitbandige Satellitenverbin-
dungen ausgeschlossen werden müssen. Man nimmt
heute an, dass die Richtungsunsicherheit in diesem
Elevationsbereich bereits etwa $1/10^\circ$ erreicht, wo-
durch die zulässige Energiebündelung der Boden-
antenne auf etwa 60 dB oder $G_B = 10^6$ begrenzt
wird. Bei einer Frequenz von 10 GHz ($\lambda = 3$ cm)
entspricht dies einer Parabolantenne von rund 12 m
Durchmesser, bei 1 GHz ($\lambda = 30$ cm) etwa 120 m
Durchmesser.

Aus der Übertragungsformel (5) ergibt sich, dass
bei gegebenem maximalem Antennengewinn G der
Übertragungsverlust $b_{\bar{u}}$ mit wachsender Frequenz
quadratisch ansteigt.

$$b_{\bar{u}} = \frac{(4 \pi d)^2}{G_B \cdot G_s \cdot \lambda^2} = \frac{C}{\lambda^2} = C^* \cdot f^2 \quad (7)$$

Es scheint also naturbedingt, dass man mit längeren
Wellen an sich günstigere Übertragungsdämpfungen
erzielen kann, allerdings mit entsprechend grösseren
und viel teureren Antennen. Ausgedehntere experi-
mentelle Ergebnisse sind jedoch nötig.

4. Möglichkeiten aktiver und passiver Satelliten

Aktive Satelliten verstärken die von den Boden-
sendern aufgefangene, mit Nachrichten modulierte
Energie und strahlen das Produkt in einer neuen
Frequenzlage wieder aus. Der grundsätzliche Unter-
schied gegenüber einem Richtstrahlrelais am Boden
besteht darin, dass es für den Satelliten nur eine
Übertragungsrichtung gibt, indem er gleichzeitig und
über dieselbe Antenne Signale aus dem gesamten
Sichtbereich empfängt und diese, in anderer Frequenz-
lage, auf den gesamten Sichtbereich wieder abstrahlt.
Allein schon aus diesem Grunde kann auch die all-
fällig anzuwendende Antennenrichtwirkung nur eine
bescheidene sein. Solange eine zuverlässige Lage-
kontrolle des Satelliten nicht gewährleistet ist, muss
man sich sogar mit Rundstrahlern behelfen. Die Lage-
kontrolle muss aber, wie früher erwähnt, auch aus
anderen Gründen ohnehin realisiert werden.

Ein passiver Satellit ist im Prinzip einfach ein
elektromagnetische Wellen reflektierender Körper

oder auch eine Ansammlung derartiger Körper. Die
naheliegendste Form eines passiven Satelliten ist der
kugelförmige Ballon mit metallisierter Aussenhülle.
Er ist richtungsunabhängig und verhältnismässig
wirksam. Abgesehen von einem kleinen und sehr ein-
fachen Peilsender, der für die radiogoniometrische
Auffindung des Ballons erforderlich oder mindestens
sehr nützlich ist, benötigt er keinerlei eigene elek-
tronische Einrichtungen. Der Übertragungsverlust $b_{\bar{u}}$
nimmt mit dem Quadrat des Ballonradius r_k und der
Wellenlänge λ ab, er steigt aber andererseits mit der
4. Potenz der Entfernung d . Setzt man voraus, dass
am Boden für Senden und Empfang gleich wirksame
Richtantennen mit Absorptionsfläche F_B beziehungs-
weise Bündelungsfaktor G_B verwendet werden, so
ergibt sich

$$b_{\bar{u}} = \frac{\lambda^2}{r_k^2 \cdot F_B^2} \cdot d^4 = \frac{(4\pi)^2}{r_k^2 \cdot \lambda^2 \cdot G_B^2} \cdot d^4 \quad (7)$$

Für die zulässige Richtwirkung G_B der Bodenantennen
gelten die gleichen Überlegungen wie im voran-
gehenden Abschnitt. Die Absorptionsfläche F_B ist
proportional zur geometrischen Antennenöffnung und
beträgt beispielsweise für einen guten Parabolspiegel
rund 60%. Der Ballondurchmesser kann aus me-
chanischen Gründen nicht beliebig gross gemacht
werden. Bei genügend breitbandigen Modulations-
verfahren können zudem unzulässige Signalverzer-
rungen auftreten, sobald die reziproke Bandbreite
die Grössenordnung der Laufzeit erreicht, die dem
Ballondurchmesser entspricht. Nehmen wir 50 m
Durchmesser als obere gegenwärtige Grenze an, so sind
bei 12 000 km Übertragungsdistanz in dem uns in-
teressierenden Wellenbereich Übertragungsdämpfun-
gen zwischen 170 und 190 dB erreichbar (Fig. 7),
die niedrigeren Werte allerdings schon mit extrem
grossen Bodenantennen.

Die Hauptvorteile des passiven Satelliten sind ein-
leuchtend:

- Keine Elektronik, daher einfach und betrieblich
zuverlässig
- Übertragungskanäle vom Boden aus bestimmbar
- Beliebig viele Übertragungskanäle im interessieren-
den Frequenzbereich gleichzeitig verfügbar
- Benötigt nur 1 Übertragungskanal je Richtung
(keine Frequenzumsetzung)
- Bei störender Beeinflussung der Verbindung kann
durch Frequenzverlagerung verhältnismässig leicht
ausgewichen werden.

Wenn man heute für allgemeine kommerzielle An-
wendungen trotzdem auf den viel schwieriger zu
realisierenden aktiven Satelliten lossteuert, so hat
dies seinen triftigen Grund in der unvermeidlich
hohen Übertragungsdämpfung der Echo-Satelliten,
wie sie im Entfernungsfaktor d^4 zum Ausdruck kommt.
Für bestimmte Zwecke mit relativ geringer Anforder-
ung an die Übertragungskapazität kann das Echo-
Prinzip aber auch in Zukunft interessant sein, vor
allem wenn es gelingen sollte, merklich grössere
wirksame Reflexionsflächen herzustellen als bisher.

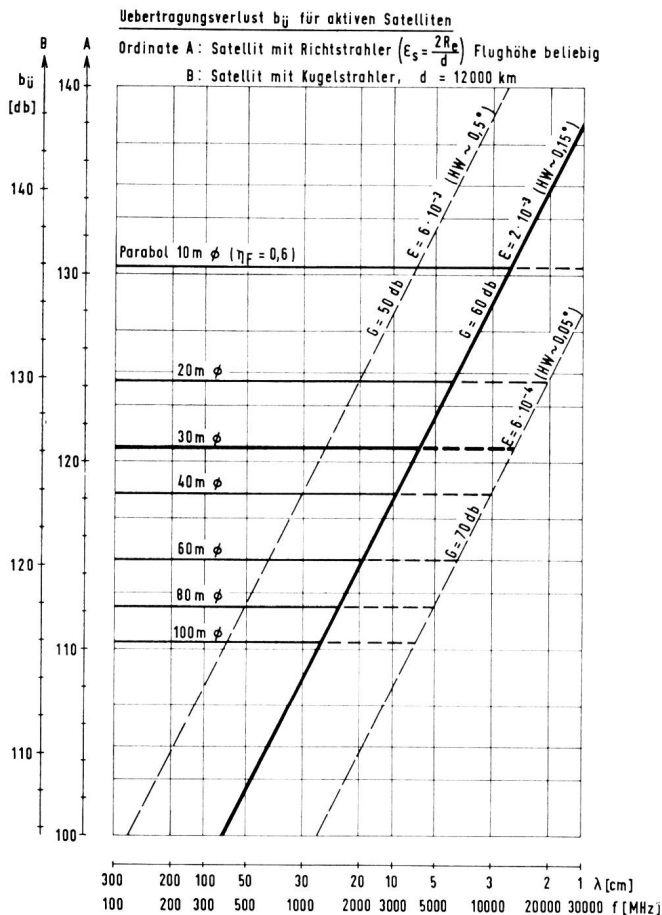


Fig. 8. Übertragungsverlust $b_{\text{ü}}$ für aktive Satelliten

sei es durch Vergrößerung des Ballondurchmessers oder durch andere geeignete Massnahmen.

Eine völlig andere Art des passiven Satellitenprinzips stellt der von *Morrow* vorgeschlagene Dipolgürtel um die Erde dar, der eine sehr weitmaschige, ringförmig verteilte Ansammlung frequenzselektiver Reflektoren in Form von feinsten Metallnadeln darstellt, die in 3000–5000 km Höhe um die Erde rotiert und auf diese Art ebenfalls durch diffuse Spiegelung Nachrichtenverbindungen zwischen Bodenstationen ermöglichen soll. Trotz einiger sehr guter Grundideen und partieller Vorteile scheint aber dieses Projekt zum Scheitern verurteilt. Die Übertragungs-dämpfung ist notwendigerweise ebenfalls sehr hoch und infolge der weiträumigen Verteilung und unterschiedlichen Geschwindigkeit der Teilreflektoren ergeben sich sogar bei sehr schmalbandigen Signalen inhärente Signalverzerrungen und Geräusche. Ausserdem reflektieren diese Dipolnadeln auch Licht, und es könnte gewissermassen eine künstliche Milchstrasse entstehen, wodurch gewisse astronomische Beobachtungen erschwert oder gestört würden. Die internationale Vereinigung der Astronomen hat mit Recht darauf hingewiesen, dass die für den ersten Versuch in Aussicht genommene Dipoldichte von rund 20 Stück pro km^3 für eine genügende Reflexionsintensität nicht ausreichen dürfte, so dass im Falle einer betrieblichen Realisierung auch mit entsprechend grösseren Lichtstörungen zu rechnen wäre.

Der aktive Nachrichtensatellit schliesslich benötigt eine an sich recht heikle elektronische Ausrüstung samt Stromversorgung, die ohne irgendwelchen Unterhalt jahrelang und unter ganz neuartigen äusseren Bedingungen funktionieren soll, die zum Teil noch gar nicht genügend erforscht und bekannt sind. Diesen Problemen und Nachteilen steht aber eine viel kleinere Übertragungsdämpfung gegenüber, indem das unverstärkte Signal nur je 1 Wegrichtung zurücklegen muss. Bei einem sich völlig frei in seiner Laufbahn bewegendem Satelliten müssen Antennen mit angenäherter Kugelstrahler-Charakteristik verwendet werden. Dies bedeutet, dass in der Formel (5) für den Übertragungsverlust der Antennengewinn des Satelliten den Wert $G_s = 1$ erhält.

Setzen wir weiter wie früher $G_B = 10^6$ und eine effektive Übertragungsstrecke $d = 12000$ km voraus, so ergeben sich in dem uns interessierenden Frequenzbereich von 1 ÷ 10 GHz Übertragungsdämpfungen zwischen 115–135 dB (Fig. 8). Diese Werte sind für breitbandige Anlagen immer noch sehr hoch, aber sie lassen sich mit heute erreichbaren Mitteln doch realisieren.

Durch Einführen einer zur Erde relativen Lagekontrolle des Satelliten (attitude-control) und Verwendung einer bescheidenen Richtantenne anstelle des Kugelstrahlers, lässt sich eine weitere, erhebliche Verbesserung, vor allem für höhere Umlaufbahnen, erzielen. Der Energiekonzentrationswinkel ϵ_s der Satellitenantenne (Fig. 9) muss so gewählt werden, dass jeweils die ganze sichtbare Erdoberfläche in dem uns interessierenden Höhenbereich mit einer genügenden Sicherheit bedient wird. Wir wählen deshalb

$$\epsilon_s = \frac{2 R_0}{d} \quad \begin{array}{l} R_0 = \text{Erdradius} \\ d = \text{mittlere Entfernung} \end{array} \quad (8)$$

Hieraus ergibt sich mit (6):

$$G_s = \frac{4}{\epsilon_s^2} = \left(\frac{d}{R_0} \right)^2 \quad (9)$$

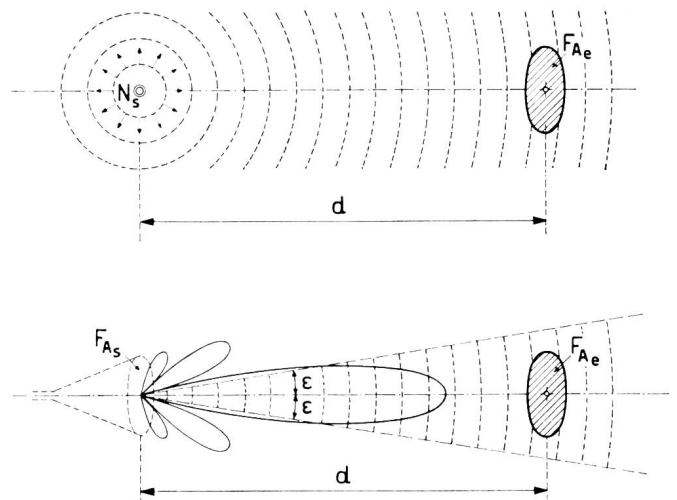


Fig. 9. Kugelstrahler und Richtstrahler: Energie-Konzentrationswinkel ϵ

und der Übertragungsverlust schreibt sich in diesem Fall

$$b_{\text{üd}} = \frac{5,1 \cdot 10^{14}}{F_B} = \frac{6,4 \cdot 10^{15}}{G_B \cdot \lambda^2} \quad (10)$$

Der Übertragungsverlust wird somit von d beziehungsweise von der Höhe der Umlaufbahn unabhängig! (Gültig etwa von 6000 km über dem Boden an.)

Mit $G_B = 10^6$ als maximal zulässigem Wert für den Antennengewinn ergeben sich analog zu den vorangehenden Fällen im Bereich $1 \div 10$ GHz Übertragungsdämpfungen von $110 \div 130$ dB (Fig. 8), wobei wiederum für die niedrigeren Dämpfungswerte am untern Ende des Frequenzbereiches ausserordentlich grosse Bodenantennen vorausgesetzt werden müssen. Im

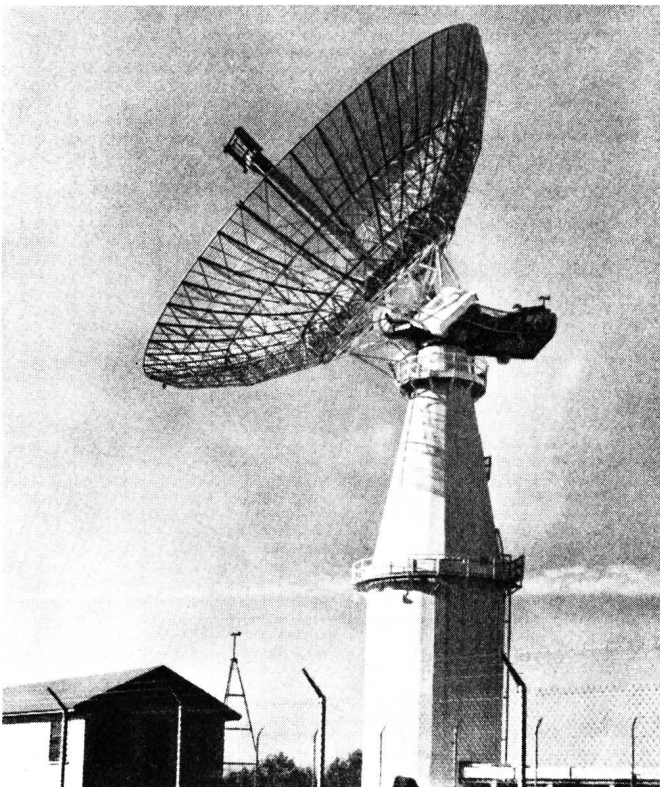


Fig. 10. Parabolantenne für Satellitenverbindungen, Durchmesser etwa 26 m (Aus Technical Report N° 32-137 der NASA)

mittleren Teil des Frequenzbereiches, der uns gegenwärtig am meisten interessiert, ist ein Dämpfungswert von etwa 121 dB möglich, was mit Parabolspiegeln einen Antennendurchmesser von etwa 30 m erfordert. Dies entspricht annähernd der Grösse der für Satellitenbodenstationen heute gebauten Antennen (Fig. 10, 11, 12).

Der aktive Satellit ermöglicht somit Übertragungsdämpfungen, die auch bei Verwendung der synchronen Umlaufbahn um 6 Grössenordnungen oder 60 dB günstiger sind als im Falle des passiven Satelliten mit 50 m Ballondurchmesser bei niedriger Umlaufbahn. Legen wir in beiden Fällen die synchrone Umlaufbahn zugrunde, so beträgt der Unterschied sogar fast 80 dB zum Nachteil des passiven Satelliten.

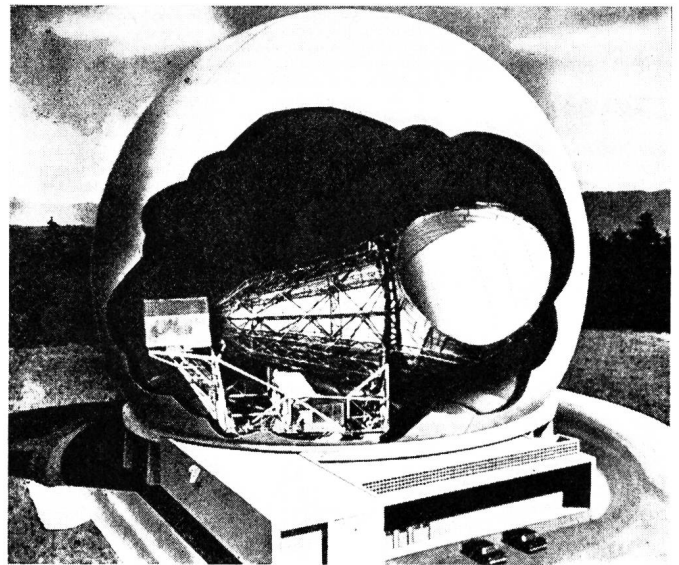


Fig. 11. Modell einer Bodenstation mit Hornparabolantenne von 335 m² Öffnung und Schutzhülle (Radom) gegen Wettereinflüsse. Der Antennengewinn liegt bei 60/57 dB für eine Frequenz von 6000/4000 MHz

Im Vergleich zum aktiven Satelliten mit Kugelstrahler und synchroner Umlaufbahn ergibt sich ein Dämpfungsgewinn von mindestens 15 dB, so dass sich in diesem Fall der Aufwand für die Lagestabilisierung – anstelle eines entsprechenden Mehraufwandes an Sendeleistung, Empfängerempfindlichkeit und Stromversorgung – im Satelliten sicher lohnt, auch wenn dieser Mehraufwand schon im Bereich des Realisierbaren liegen würde.

Um die Beziehung mit unserer heutigen, bodengebundenen Richtstrahltechnik nicht zu verlieren, ist andererseits festzustellen, dass im vorerwähnten günstigsten Fall des aktiven Satelliten die Dämpfung einer Teilstrecke immer noch rund 60 dB höher ist als bei einer normal geplanten breitbandigen Mikrowellen-Richtstrahlverbindung nach CCIR-Norm. Dafür haben wir bei der Satellitenverbindung praktisch keinen Schwund und keine Summierung der Teilstreckengeräusche zu berücksichtigen, was bereits etwa 40 dB ausgleicht. Die restlichen 20 dB müssen und können

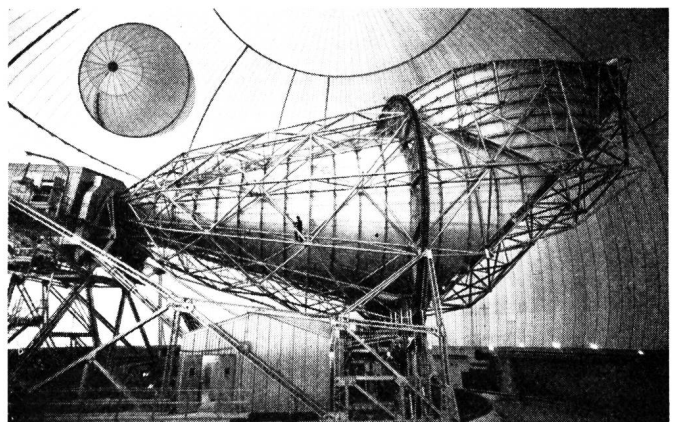


Fig. 12. Eine der ausgeführten Hornparabolantennen in Andover, Maine (USA). Der Durchmesser der Schutzhülle beträgt rund 65 m

gegenwärtig in der einen Übertragungsrichtung durch eine etwa 100fach höhere Sendeleistung der Bodenstation (etwa 1 kW statt 10 W), in der anderen Übertragungsrichtung durch eine rund 100fach bessere Empfindlichkeit des Empfängers der Bodenstation (etwa $T_{\text{äq}} = 50^\circ \text{ K}$ statt 5000° K) aufgebracht werden; dies selbstverständlich zusätzlich zum bereits vorausgesetzten, gewaltigen Antennenaufwand. Der Übertragungstechnische Aufwand im Satelliten selber ist beinahe als «normal» vorausgesetzt, abgesehen von der Miniaturisierung der Geräte, der unabhängigen Stromversorgung und den völlig ungewohnten Betriebsbedingungen. Es ist nicht ausgeschlossen, dass später einmal ein gewisser Teil des Mehraufwandes in den Satelliten verlegt werden kann (parametrische Empfangsverstärker, höhere Sendeleistung).

All diese Überlegungen zeigen, dass für Nachrichtenverbindungen grosser Kapazität praktisch nur der aktive Satellit in Frage kommt, während der passive, infolge seiner bestechenden Einfachheit und sonstigen Vorzüge, für schmalbandige Übertragungssysteme und besondere Anwendungen interessant erscheint.

5. Anforderungen an ein Breitband-Übertragungssystem im Falle eines lagestabilisierten, aktiven Satelliten

Es sei eine Satellitenverbindung zur wahlweisen Übertragung eines Fernsehbildes mit $\delta f = 5 \text{ MHz}$ Bandbreite oder von 600 Telephonkanälen im Frequenzmultiplexverfahren mit $\delta f = 2,5 \text{ MHz}$ Bandbreite zu erstellen. Entsprechend der uns heute am besten geläufigen Technik erfolge die Übertragung in beiden Richtungen durch einfache Frequenzmodulation des Hochfrequenzträgers im Bereich von 4000 MHz. Die erforderliche äquivalente Rauschbandbreite ΔF im Hochfrequenzspektrum kann durch folgende Näherung gegeben werden:

$$\Delta F = 2 \delta f (1 + 1,7 h) \quad (11)$$

Darin bedeutet h das maximale Hubverhältnis, bezogen auf die höchste Modulationsfrequenz.

Ein frequenzmodulierter Empfänger besitzt eine Empfangsschwelle, die im Betrieb nicht unterschritten werden darf. Sie ist durch die Eigenrauschleistung N_R bestimmt und liegt praktisch etwa 14 dB höher als diese. Um einigermaßen sicher zu gehen, verlangen wir für Gerätealterung, zeitweilig auftretende atmosphärische Absorption und Antennenrichtfehler einen Planungsabstand von 8 dB. Bei einer angenommenen Übertragungsdämpfung von 121 dB, entsprechend einer Parabolantenne von rund 30 m Durchmesser, ist somit folgende minimale Senderleistung zu fordern:

$$N_{S\min} = 2 \cdot 10^{14} \cdot N_R = 2,72 \cdot 10^{-9} \cdot T_{\text{äq}} \cdot \frac{\Delta F}{r} [W] \quad (12)$$

r bedeutet den Frequenzhub-Gegenkopplungsfaktor des Empfängers (wenn keine Gegenkopplung angewendet wird ist $r = 1$ zu setzen).

Die Übertragung des Mehrkanaltelephoniespektrums stellt im allgemeinen die kritischeren Bedingungen als die Übertragung des Fernsehbildes, so dass wir uns im folgenden auf den Fall der Telephonie beschränken.

Wenn wir somit für die relative Aussteuerung eines Sprechkanals bei insgesamt 600 Kanälen wie üblich -23 dB zugrunde legen, eine Verschlechterung des Geräuschabstandes durch Intermodulation von 1 dB und eine Verbesserung von 4 dB infolge Anhebung der hohen Modulationsfrequenzen annehmen, so lässt sich das Signal-Rauschverhältnis S_K im ungünstigsten Telephonkanal, unter Beibehaltung der früheren Voraussetzungen, in der folgenden Form darstellen:

$$S_{K\min} = 670 \cdot N_{S\min} \cdot \left(\frac{\Delta F}{2 \delta f} - 1 \right)^2 \quad (13)$$

Wählen wir die Senderleistung

$$N_S = n \cdot N_{S\min} \quad (14)$$

wobei $n \geq 1$, so ergibt sich allgemein

$$S_K = 670 n \cdot N_{S\min} \left(\frac{\Delta F}{2 \delta f} - 1 \right)^2 \quad (15)$$

Betrachten wir zunächst die Übertragungsrichtung Satellit-Bodenstation: Mit $T_{\text{äq}} = 50^\circ \text{ K}$ und

$r = \frac{\Delta F}{13,5 \cdot 10^6}$, womit das Hubverhältnis vor der Demodulation auf den Wert 1 reduziert wird, berechnet sich nach Gleichung (12) die durch die Empfängerschwelle vorgeschriebene, minimale Leistung des Satellitensenders zu

$$N_{S\min} = 1,82 [W] \quad (16)$$

unabhängig von der Bandbreite ΔF des ausgestrahlten Spektrums. Der Signal-Rauschabstand aber ergibt sich mit $2 \delta f = 5 \cdot 10^6 \text{ Hz}$ und

$$a = \frac{\Delta F}{\Delta F_{\min}} = \frac{\Delta F}{13,5 \cdot 10^6} \quad (17)$$

zu

$$S_K = 1240 \cdot n \cdot (2,7 a - 1)^2 \quad \begin{matrix} a \geq 1 \\ n \geq 1 \end{matrix} \quad (18)$$

Damit ergeben sich folgende Verhältnisse (Tabelle I):

Tabelle I.	Satellit	→	Bodenstation	
a	1	2	3	4
ΔF [MHz]	13,5	27	54	108
h	1	2,6	5,8	12,1
$S_{Kmin} = \frac{S_k}{n}$ [d b]	35,5	43,8	50,8	57,2
N_{Smin} [W]	1,8	1,8	1,8	1,8

Wenn wir somit im ungünstigsten Telephonkanal für die Übertragungsrichtung Satellit-Bodenstation

als Planungswert einen Geräuschabstand von 57 dB verlangen, so lässt sich dies zum Beispiel bei der minimalen Sendeleistung von 1,8 W mit einer grossen Bandbreite von rund 100 MHz¹ oder bei 10 W Sendeleistung mit rund 50 MHz erkaufen. Für eine Bandbreite von 27 MHz müsste die Leistung des Satellitensenders bereits auf 75 W gesteigert werden, was gegenwärtig noch mit grösseren Schwierigkeiten verbunden wäre.

Für die Übertragungsrichtung Bodenstation-Satellit müssen wir aus praktischen Gründen heute $r = 1$ und $T_{\text{aq}} \cong 5000^\circ \text{K}$ annehmen, woraus sich analog ergibt:

$$N'_{\text{Smin}} = 2,72 \cdot 10^{-9} T_{\text{aq}} \cdot \Delta F_{\text{min}} \cdot a = 186 a [W] \quad (19)$$

$$S'_K = 1240 \cdot n \cdot a (2,7 a - 1)^2 \quad \begin{matrix} a \geq 1 \\ n \geq 1 \end{matrix} \quad (20)$$

Das Ergebnis für verschiedene a -Werte ist in *Tabelle II* zusammengestellt; man ersieht daraus, dass sich in der Übertragungsrichtung Bodenstation-Satellit bei gleichem Schwellenabstand und gleicher Bandbreite wesentlich bessere Rauschabstände erzielen lassen, allerdings mit viel höheren Senderleistungen. Senderleistungen von 1–10 kW lassen sich jedoch am Boden unter den geforderten Bedingungen heute schon verwirklichen, so dass die Verhältnisse hier bedeutend günstiger liegen. Ein Rauschabstand von 53 dB liesse sich beispielsweise bei 10 kW Senderleistung schon bei einer Bandbreite von 15 MHz verwirklichen, bei 1 kW wären hierfür rund 30 MHz erforderlich.

Tabelle II. Bodenstation \rightarrow Satellit

a	1	2	3	4	8
ΔF [MHz]	13,5	27	40,5	54	108
h	1	2,6	4,2	5,8	12,1
$S'_{K\text{min}} = \frac{S'_K}{n}$ [dB]	35,5	46,8	52,8	56,8	63
N'_{Smin} [W]	186	372	558	745	1490

Diese Überlegung zeigt, dass das gewünschte Ziel grundsätzlich mit heute vorhandenen Mitteln erreicht werden kann, andererseits aber auch, dass diese Mittel teilweise bis zur Grenze des Möglichen ausgeschöpft werden müssen. An sich wären analoge Untersuchungen mit andern, vielleicht etwas besser geeigneten «harten» Übertragungssystemen durchzuführen, etwa mit Pulscod-Modulation. Eine allgemeine Betrachtung zeigt jedoch, dass damit unter Umständen wesentliche technische und betriebliche Vorteile, jedoch nur noch geringfügige Verbesserungen der Übertragungseigenschaften unter den gegebenen Verhältnissen erzielt werden können. Einseitenbandverfahren ermöglichen wohl eine viel kleinere Belastung des Frequenzspektrums, stellen aber gerätetechnische Anforderungen, die beim gegenwärtigen Stand der Technik äusserst schwer zu erfüllen sind. Ihre Störfestigkeit

ist auch viel geringer, was infolge der unumgänglichen Frequenzbandteilung mit bestehenden oder geplanten Bodendiensten stark ins Gewicht fällt.

Da bei den kommerziellen Nachrichtensatelliten andererseits die *freie Zutrittsmöglichkeit* ausserordentlich wichtig ist, muss das Problem des geeigneten Übertragungssystems auch von diesem Gesichtspunkte aus betrachtet werden. «Freie Zutrittsmöglichkeit» bedeutet hier die Unterteilung der gesamten Übertragungskapazität eines aktiven Satelliten in eine Anzahl im voraus bestimmter, vielleicht sogar beliebig anpassungsfähiger kleinerer Kanalgruppen, die gleichzeitig von verschiedenen miteinander korrespondierenden Paaren von Bodenstationen benützt werden können. Damit soll auch der direkte Anschluss von Gebieten mit geringerem Verkehrsvolumen ermöglicht werden. Bei den gegenwärtig im Bau befindlichen Versuchssatelliten, die alle nach dem hier ausführlich dargestellten Frequenzmultiplexverfahren mit einfacher Frequenzmodulation des Hochfrequenzträgers arbeiten, ist dies nur möglich, wenn eine drastische Herabsetzung der gesamten Übertragungskapazität in Kauf genommen wird (Intermodulation im gemeinsamen Satellitenverstärker). Diesem Übelstand könnte allerdings durch vermehrten Aufwand im Satelliten grundsätzlich abgeholfen werden (je 1 getrennter Empfänger mit Demodulation je Kanalgruppe, Rekombination aller Gruppen zwecks gemeinsamer Modulation des Satellitensenders). Das Frequenzspektrum würde dadurch voraussichtlich nicht stärker beansprucht.

6. Wellenzuteilung und Interferenzprobleme

Kommerzielle Nachrichtensatelliten benötigen ausserordentlich breite Frequenzbänder und belegen diese, was besonders einschneidend ist, praktisch immer über die ganze Erde. Wie aus den früheren Überlegungen hervorgeht, muss gegenwärtig damit gerechnet werden, dass je Breitbandkanalverbindung bis zu 100 MHz Bandbreite beansprucht werden. Mit fortschreitender Entwicklung dürfte es allerdings möglich werden, diesen Anspruch auf die Hälfte oder weniger zu verringern, sofern sich dies überhaupt als notwendig und zweckmässig herausstellt. Denn es liegt andererseits in der Natur der Satellitenverbindungen, dass im Prinzip fast beliebig viele Satelliten gleichzeitig und unabhängig voneinander auf denselben Frequenzen arbeiten können, sofern sie bloss individuell gekennzeichnet sind und von den Richtantennen der Bodenstationen genügend gut getrennt werden können. Nun müssen aber diese Antennen aus einer Reihe von Gründen nicht nur sehr scharf bündeln, sondern ebenso äusserst geringe Nebenzipfel-Empfindlichkeit und Vordergrund-Reflexionen aufweisen, so dass, je nach Übertragungssystem, ein geringer Raumwinkelunterschied für einen ungestörten Gleichkanalbetrieb genügt (*Fig. 13*). Bei harten Übertragungssystemen mit ausgeprägter Empfängerschwelle kann ein Raumwinkelabstand von 2°

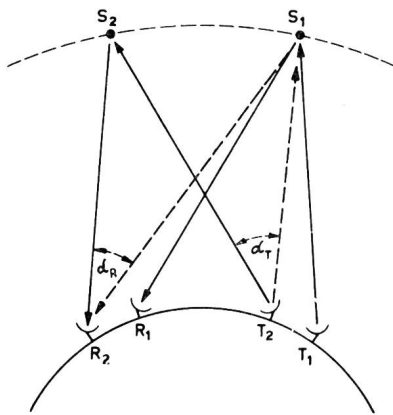


Fig. 13. Gleichkanalbetrieb: für harte Übertragungssysteme $\sim \alpha \geq 2^\circ$, für weiche Übertragungssysteme $\sim \alpha \geq 10^\circ$

bereits genügen, bei weichen Systemen mögen es an die 10° sein. Eine zweckmässige betriebliche Organisation vorausgesetzt, ergibt sich hieraus die Möglichkeit, den Gesamtanspruch an Frequenzbandbreite für Nachrichtensatelliten doch in einem allgemein tragbaren Rahmen zu halten.

Es wäre ausserordentlich schwierig und verfrüht, den Mindestbedarf an Bandbreite für kommerzielle Nachrichtensatelliten heute schon festlegen zu wollen; sicher ist nur, dass er in der Grössenordnung 1000 MHz liegt. Eine Übersicht der heute vorhandenen und geplanten drahtlosen Bodendienste im Bereich 1–10 GHz zeigt rasch, dass unter diesen Verhältnissen eine Zuteilung von Exklusivwellen an Nachrichtensatelliten praktisch ausgeschlossen ist. Es bleibt nichts anderes als die Mitbenützung schon belegter Frequenzbänder übrig, wobei natürlich ein ungestörter Parallelbetrieb beider Partner sichergestellt werden muss. Durch die zwangsläufige Aufteilung – minimaler Aufwand an Empfängerempfindlichkeit und Strahlungsleistung im Satelliten, maximaler Aufwand in der Bodenstation – ergibt sich glücklicherweise von selbst die bestmögliche Situation bezüglich Interferenzwahrscheinlichkeit mit dem Bodendienstpartner. Sind die Strahlungsleistungen des Bodendienstes verhältnismässig gering, so erreichen sie die Empfindlichkeitsschwelle des Satellitenempfängers selbst dann nicht, wenn die Übertragungsrichtung zufällig mit der Stellung des Satelliten übereinstimmt. Umgekehrt vermag der verhältnismässig schwache Satellitensender normal empfindliche Empfänger und Antennen des Bodendienstes nicht zu stören.

Als Frequenzbandpartner eignen sich daher am besten die ortsgebundenen Mikrowellen-Richtstrahlverbindungen, die mit Direktsicht arbeiten, wobei sich die Interferenzmöglichkeit beidseits auf die verhältnismässig wenigen, ohnehin möglichst isoliert aufzustellenden Bodenstationen der Satellitenverbindungen beschränkt. Dieses Problem ist aber technisch ohne weiteres lösbar, wie die provisorisch ins Auge gefassten Richtlinien der Studiengruppe IV des CCIR zeigen, und dies, ohne wesentliche Einschränkungen für den einen oder andern Partner in Kauf

nehmen zu müssen. Völlig ungeeignet als Frequenzpartner wären dagegen Streustrahlungsverbindungen (Scattering), Radar, Navigation und Radio-Astronomie. Von der praktischen Seite her sind deshalb vermutlich noch einige Schwierigkeiten zu überwinden, indem das fragliche Wellenspektrum bisher nicht durchwegs in allen Regionen und Ländern gleich benützt wird, die Satellitenverbindungen aber unbedingt eine weltweite Koordination und damit wahrscheinlich doch gewisse Umstellungen erfordern. Das Ausmass dieser Schwierigkeiten dürfte weitgehend davon abhängen, wieviel Frequenzbandbreite im gesamten für die Nachrichtensatelliten beansprucht wird. Figur 14 gibt einen Eindruck über den möglichen Umfang künftiger Ansprüche auf Grund einer amerikanischen Studie: rund 3000 MHz für Breitbandkanäle, dazu eine Anzahl verhältnismässig schmaler Teilbänder für die Hilfsdienste (Fernmessung, Fernsteuerung, Identifizierung usw.) sowie für andere Nutzenanwendungen, wie Forschung, Meteorologie und Navigation. Ob derart weitgehende Frequenzbandansprüche als Fernziel gerechtfertigt sind, ist auf Grund der gegenwärtigen Erkenntnisse schwierig zu entscheiden.

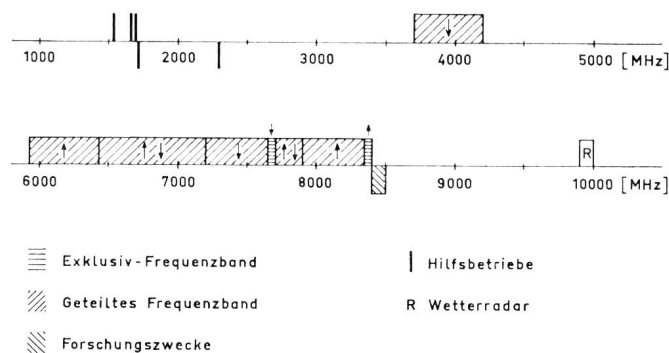


Fig. 14. Frequenzbänder für Satellitenverbindungen (nach einer amerikanischen Studie, vgl. Lit. 1.)

7. Direkte Verbreitung von Rundspruch- und Fernsehprogrammen

Im Prinzip ist jeder Nachrichtensatellit nach der vorangehenden Darstellung bereits ein Rundstrahler, das heisst, er kann im ganzen jeweiligen Sichtbereich empfangen oder beeinflusst werden, auch wenn er oft nur gerade der Verbindung zweier Bodenstationen dient. Die Grösse des gleichzeitig erfassten Gebietes steht dabei im krassen Gegensatz zur bloss punkweisen Ausnützung der ausgestrahlten Energie. Es scheint daher technisch verlockend, von künstlichen Erdsatelliten aus Rundspruch- und Fernsehprogramme zu verbreiten.

Warum dies wenigstens heute noch nicht geht, zeigt eine einfache Rechnung: Wir setzen einen lagestabilisierten aktiven Satelliten mit einer Richtantenne voraus, deren Öffnungswinkel ε nach Gleichung (8) so bestimmt ist, dass der ganze sichtbare Teil der Erdoberfläche mit einiger Reserve sicher

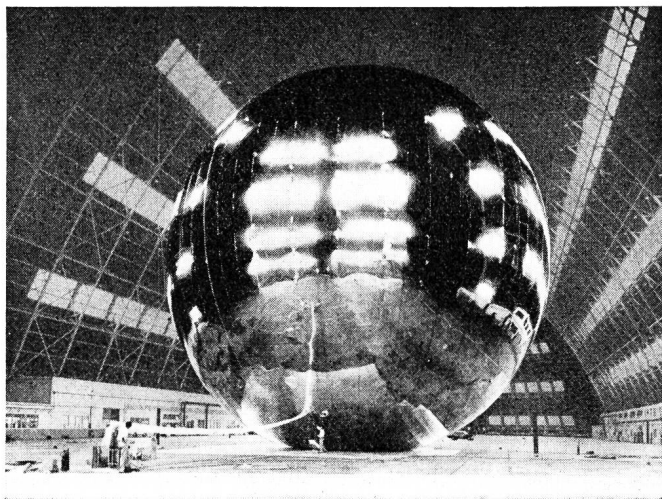


Fig. 15. Echosatellit in der Montagehalle

bedient wird. Für die Übertragungsdämpfung $b_{\text{ü}}$ ergibt sich damit nach Gleichung (10), unabhängig von der Höhe des Satelliten und von der Wellenlänge, ein Wert

$$b_{\text{ü}} = \frac{5,1 \cdot 10^{14}}{F_B}$$

Andererseits schreibt sich die für eine bestimmte Feldstärke E am Boden in mittlerer Entfernung vom Satelliten erforderliche Senderleistung

$$N_S = b_{\text{ü}} \cdot N_e = b_{\text{ü}} \cdot \frac{E^2 \cdot F_B}{120 \pi} \quad (21)$$

und damit

$$N_S = 1,35 \cdot 10^{12} \cdot E^2 \text{ [W]} \quad (22)$$

Da man für diesen Zweck mit handelsüblichen Empfängern und Antennen rechnen muss, sind die erforderlichen Bodenfeldstärken, und damit die Satellitensenderleistungen, entsprechend hoch,

$E = 50 \mu\text{V/m}$	verlangt $N_S =$	3,4 kW
$500 \mu\text{V/m}$	verlangt	340 kW
$5000 \mu\text{V/m}$	verlangt	34 000 kW

Durch Einschränkung des Bedienungsbereiches mit einer stärker bündelnden Richtantenne und einer entsprechend genaueren Lagestabilisierung des Satelliten liesse sich zwar der Leistungsaufwand noch verringern; er bleibt aber jedenfalls so hoch, dass vorläufig nicht ernsthaft an die Verwirklichung eines weltweiten, direkten Rundspruch- oder gar Fernsehdienstes gedacht werden kann. Und selbst wenn diese Einschränkung nicht oder nicht mehr bestände, müssten vorher noch anderweitige Probleme gelöst werden, wie die Schaffung weltweiter Exklusivwellen und einheitlicher Übertragungsnormen, die Auswahl der Sprachen, die Zuständigkeit für die Programmwahl usw.

8. Ausblick

In den bisherigen Ausführungen wurde zu zeigen versucht, dass Nachrichtenverbindungen grossen Stils und über weltweite Entfernungen mit aktiven, künstlichen Erdsatelliten übertragungstechnisch möglich sind. Zahlreich und ungeheuer vielfältig sind jedoch die Probleme, die noch zu klären und die Schwierigkeiten, die noch zu überwinden sind, bevor es gelingen kann, einen zuverlässigen und dauerhaften derartigen Dienst einzurichten.

Ein Hauptproblem ganz allgemeiner Natur dürfte noch für lange Zeit die *Zuverlässigkeit und Lebensdauer* sämtlicher Satellitengeräte sein. Es ist wohl bekannt, dass in einem bestimmten Fall ein einfacher Transistoroszillator von wenigen Milliwatt Leistung, und ausgerüstet mit einer überreichlich dimensionierten Sonnenbatterie, jahrelang funktioniert hat. Dem gegenüber stehen aber bisher sehr viel gegenteilige Erfahrungen, wobei über die Ursache des vorzeitigen Versagens meist nur Vermutungen angestellt werden können. Je komplizierter die Geräte und je höher die Leistung, desto schwieriger wird die Beherrschung des Problems unter den neuartigen Betriebsbedingungen im Satelliten, über die noch nicht in allen Belangen völlige Klarheit herrscht (zum Beispiel Schäden durch Strahlung, Mikrometeoriten, Austrocknung). Die Zuverlässigkeit ist geradezu zu einem Begriff aller Satelliten-Entwicklungsprogramme ge-

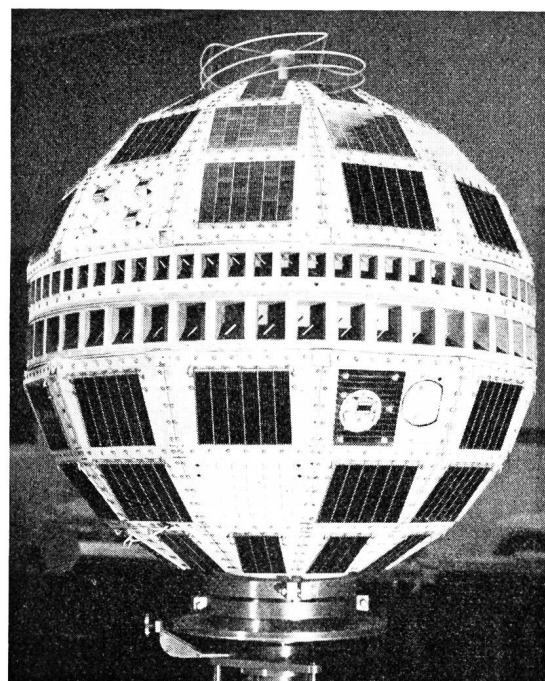


Fig. 16. Aktiver Satellit «Telstar» (ATT) im Versuchsstadium

Oben: VHF-Antenne für Grobpeilung sowie Übertragung von Mess- und Steuersignalen

Mitte: Empfangs- und Sendeantenne, ringförmig angeordnet, für den Hauptkanal auf 6390 MHz und 4170 MHz sowie die Feinpeilung auf 4080 MHz

Der Durchmesser beträgt rund 86 cm, das Gewicht 77 kg, die Zahl der Sonnenzellen 3600

worden, zum Leitmotiv für die Auswahl der Materialien, die Konstruktion und den Zusammenbau der Geräte und der Prüfmethode. Zuverlässigkeit und Lebensdauer des Satelliten sind nicht bloss entscheidend für die technische Verwirklichung kommerzieller Satellitenverbindungen, sondern auch für deren Rentabilität. Da es ausserordentlich schwierig ist, im Falle des praktischen Versagens Aufschluss über die Ursache zu erhalten, kann es noch Jahre dauern, bis man sich an die richtigen Lösungen herangekastet hat.

Im Zusammenhang mit der Lebensdauer ist auch die *Art der elektrischen Energieversorgung* des Satelliten von Bedeutung. Die naheliegendste und an sich eleganteste Lösung ist die Ausnützung der Energie der Sonnenstrahlung. Die Sonnenbatterien ergeben einen Anfangswirkungsgrad von etwa 10%, werden aber durch Protonenstrahlung, gegen die sie nicht geschützt werden können, langsam zerstört und benötigen ausserdem einen elektrischen Energiespeicher, um die unvermeidliche tote Zeit im Erdschatten zu überbrücken. Bei grösserem Energiebedarf werden die erforderlichen Flächen unhandlich gross; sie sind ausserdem nur soweit wirksam, als sie der Sonne direkt zugekehrt sind, müssen daher automatisch in die günstigste Lage gebracht oder entsprechend reichlicher dimensioniert werden. Man ist deshalb bereits seit längerer Zeit mit der Entwicklung geeigneter Kernreaktoren beschäftigt, die in Verbindung mit Turbogeneratoren oder Thermoumformern im Prinzip fast beliebige Energiemengen während Jahre zu liefern vermögen, keinen elektrischen Speicher benötigen und eine grössere Freiheit im Aufbau des Satelliten erlauben. Da der Gesamtwirkungsgrad bis heute aber noch unter 10% liegt, stellt sich das Problem der Wärmeabfuhr, die, weil auf Strahlung angewiesen, zwangsläufig auch wieder zu grossen Abmessungen führt.

Ebenfalls von grosser, allgemeiner Bedeutung ist das Problem der *Gewichtsverminderung des Satelliten*. Jedes Kilogramm Nutzlast bedeutet mit den heute bekannten Raketenantriebsmitteln grössenordnungsmässig eine Tonne Startgewicht, um die Nutzlast in die Umlaufbahn zu befördern. Über die je Tonne Startgewicht, oder je Kilogramm nützliches Satellitengewicht, aufzuwendenden Kosten gehen die Schätzungen noch sehr stark auseinander. Bleiben wir eher an der unteren Grenze, so wäre hierfür mit einem Betrag von rund 0,1 Mio Franken zu rechnen. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit einer möglichst weitgehenden Miniaturisierung sämtlicher Satelliten-

ausrüstungen, wobei dies allerdings nicht auf Kosten der Lebensdauer gehen darf.

Ein kommerzielles Nachrichtensystem muss nicht nur technisch schön und realisierbar, sondern auch rentabel sein. Die ständige Zunahme des interkontinentalen Nachrichtenverkehrs ist eine Tatsache, und die Befürchtung ist nicht von der Hand zu weisen, dass schon in wenigen Jahren die Kapazität der heute vorhandenen und noch zu bauenden Seekabel erschöpft sein könnte, ganz abgesehen von den drahtlosen Verbindungen mit Kurzwellen. Der Bedarf für ein leistungsfähigeres Mittel wäre somit vorhanden. Ernsthaftige Schätzungen über den mutmasslichen Kostenaufwand eines Satellitennetzes wurden schon mehrfach angestellt; sie sind aber alle insofern etwas unsicher, als sie auf Lebensdauer und Abschusskosten von Satelliten fussen, die der tatsächlichen technischen Entwicklung ein beträchtliches Stück vorausseilen und erst durch spätere Erfahrungen erhärtet werden müssen. Immerhin zeigen diese Überlegungen, dass Nachrichtensatelliten voraussichtlich auch kommerziell interessant sind, manche rechnen sogar bereits – etwas früh – mit einer Verbilligung des Verkehrs. Die Realisierung eines weltweiten, regulären Nachrichtenaustausches über künstliche Erdsatelliten dürfte aber kaum vor 5 bis 10 Jahren möglich sein.

Das entscheidende Wort über die künftige Entwicklungsrichtung, die Art und den Zeitpunkt der praktischen Realisierung von kommerziellen Nachrichtensatelliten haben aber jetzt zunächst die vorgesehenen amerikanischen Experimente, wie sie unter der Bezeichnung Projekt Telstar, Relay, Syncom, Advent, Rebound bekannt geworden sind, wobei an den kommerziellen Versuchen auch verschiedene europäische Länder aktiv mit Bodenstationen teilnehmen. Ob die europäischen Bestrebungen nach einer eigenen Entwicklung zu einem konkreten unabhängigen Projekt führen, ist noch nicht ersichtlich. Ganz allgemein ist aber doch anzunehmen, dass die grossen Anstrengungen auf dem Gebiet der Nachrichtensatelliten in absehbarer Zeit zum Erfolg führen werden.

Literatur

1. URSL. «Colloque sur les recherches en communications spatiales, Paris, 18-22 septembre 1961». Dokumentsammlung.
2. CCIR-Studienkommission IV, Washington 1962. Dokumentsammlung.
3. Webb, I. A. «Spectral allocation for space communication». Telecom. Journal 28 (1961), Nr. 10, S. 561.