

Einige Probleme moderner Nachrichtensatelliten

Autor(en): **Guggenbühl, W.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **61 (1970)**

Heft 1

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-915895>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Einige Probleme moderner Nachrichtensatelliten ¹⁾

Von W. Guggenbühl, Zürich

532-561

629.783.621.39

Nach einer kurzen Einführung in die Geschichte der zivilen Nachrichtensatelliten und der Präsentation des gegenwärtigen Standes des Intelsat-Netzes werden die massgeblichen Faktoren der Leistungsbilanz eines über Satelliten laufenden Telephonie-Sprechkanals diskutiert. Den Eigenschaften der Weitband-Frequenzmodulation und ihrem Vergleich mit der Shannonschen Grenze der Informationsübertragung wird dabei besonderes Gewicht beigemessen. Ausserdem werden einige Aspekte des Mehrfachzuganges zum Satelliten besprochen. Die Diskussion dieser nachrichtentechnischen Aspekte wie auch die nachfolgende Behandlung einiger Probleme der Lagestabilisierung des Satellitenkörpers beziehen sich auf die zivilen Nachrichtensatelliten Intelsat 3 und 4. Zum Schluss des Aufsatzes werden einige Aspekte militärischer Nachrichtensatelliten besprochen.

Après un bref historique des satellites de télécommunications civils et la description de l'état actuel du réseau de l'INTELSAT, les facteurs essentiels du bilan de puissance d'un canal de conversation téléphonique retransmis par satellite sont traités, en particulier les propriétés de la modulation de fréquence à large bande et sa comparaison avec la limite de la transmission des informations selon Shannon. Les accès multiples à un satellite sont également examinés. La discussion de ces divers aspects des télécommunications, puis de quelques problèmes de la stabilisation de position des satellites, se rapportent aux satellites de télécommunications civils Intelsat 3 et 4. L'exposé se termine par la discussion de quelques aspects concernant les satellites de télécommunications militaires.

1. Einleitung

In den zivilen Weitverkehrs-Verbindungsnetzen stehen heute bereits zahlreiche Fernmeldesatelliten im Einsatz. Auch die militärischen Stellen der Staaten mit geographisch sehr ausgedehnten Verbindungsnetzen befassen sich intensiv mit diesem neuen Verbindungsmittel. Die folgende Arbeit über Probleme der Nachrichtensatelliten behandelt vorwiegend die für kommerzielle Zwecke eingesetzten Fernmeldesatelliten der Intelsat-

Reihe, an deren Bau die Contraves AG in Zürich im Rahmen eines internationalen Konsortiums mitbeteiligt ist. Die Probleme militärischer Satelliten werden, soweit dies angesichts der Lückenhaftigkeit der zur Verfügung stehenden Informationen möglich ist, am Schluss des Aufsatzes kurz besprochen.

2. Entwicklung und gegenwärtiger Stand der kommerziellen Fernmeldesatellitennetze

Fig. 1 zeigt den «Stammbaum» der zivilen Fernmeldesatelliten (exklusive russische Satelliten).

¹⁾ Erweiterte Fassung eines Vortrages, der am 18. Dezember 1968 im Kolloquium «Krieg im Äther» an der ETH, Zürich, gehalten wurde.

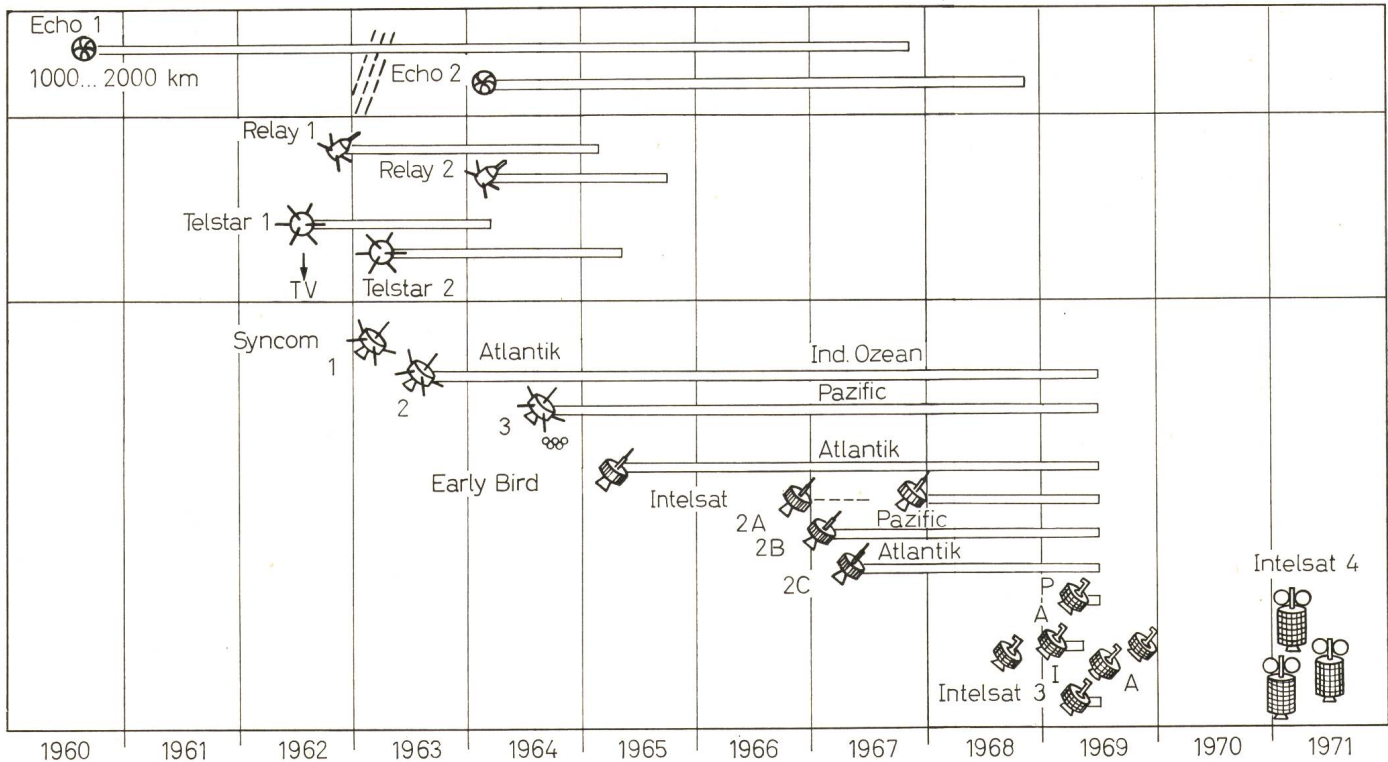


Fig. 1

Zivile US- und Intelsat-Nachrichtensatelliten dargestellt in Funktion ihres Startdatums
Die Balken bezeichnen die Lebensdauer der Satelliten (Stand Mitte 1969)

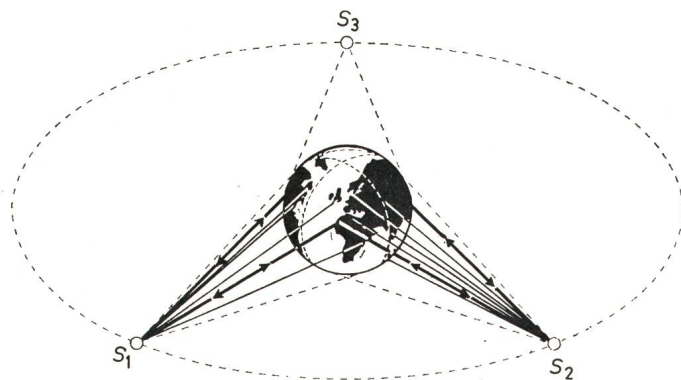


Fig. 2

Aufbau des erdumspannenden Nachrichtennetzes durch drei geostationäre Satelliten

Die amerikanischen Übertragungsversuche mit Satelliten begannen 1960 mit «Echo I», einer mit Aluminium beschichteten Kugel von 30 m Durchmesser. Echo I und sein später lancierter Partner Echo II waren kugelförmige, passive Reflektoren für elektromagnetische Wellen ohne elektronische Ausrüstung. Ihnen folgten in den Jahren 1962–1964 die ersten «aktiven», d. h. ein Nachrichtenrelais tragenden Satelliten «Relay» und «Telstar», die auf relativ niedrigen elliptischen Bahnen in Umlauf gebracht wurden. Nach der Demonstration der Realisierbarkeit von Synchronsatelliten (Satelliten mit 24-Stunden-Bahnen) mit Hilfe der «Syncom»-Satelliten folgte ab 1964 die eigentliche Ära der kommerziellen Fernmeldesatelliten. In diesen Zeitraum fallen Planung, Bestellung und teilweise der Abschuss der 4 Satellitengenerationen der «Intelsat»-Organisation, die für die Planung und Finanzierung des internationalen kommerziellen Fernmeldesatellitennetzes der westlichen Welt verantwortlich ist. Alle Intelsat-Satelliten laufen auf äquatorialen Synchronbahnen, d. h. Bahnen mit 24 h Umlaufdauer in West-Ost-Richtung. Solche Satelliten, die nach den Keplerschen Gesetzen in einem Abstand von ca. 36000 km Höhe über der Erdoberfläche laufen, erscheinen einem erdgebundenen Beobachter stillstehend (sog. geostationäre Satelliten).

Der wesentliche Vorteil dieser Satellitenbahnen liegt bei den einfachen Antennenanlagen der Bodenstationen. Während bei niedrigfliegenden Satelliten, die periodisch am Horizont auf- und niedergehen, für einen unterbrechungsfreien Fernmeldeverkehr mindestens zwei Antennen erforderlich sind, genügt beim Synchronsatelliten eine einzige Antenne, die ausserdem eine sehr geringe Beweglichkeit zur Kompensation der sehr langsamen und kleinen Bewegungen des Satelliten relativ zur Erde aufweisen muss. Für den Aufbau eines weltweiten Verbindungsnetzes genügen 3 auf der Synchronbahn geeignet plazierte Satelliten; man kann sich diese gemäss Fig. 2, wie an den Speichen eines Wagenrades mit der Erde umdrehend, vorstellen.

Der Hauptnachteil der Synchronbahn ist die relativ grosse Signallaufzeit zwischen zwei

Bodenstationen als Folge der grossen Bahnhöhe. Ein Telefonabnehmer, der über eine Satellitenverbindung spricht, muss 0,5 bis 0,6 s auf die Antwort des Partners warten. Diese Zeit liegt etwas über der Toleranzgrenze klassischer Telephonkanäle. Die Synchronbahn ist ausserdem für Gebiete sehr grosser geographischer Breite ungünstig, weil der Satellit dort relativ «tief» am Himmel steht.

Die Reihe der Synchronsatelliten-Generationen der Intelsat in Fig. 3 illustriert den gewaltigen Fortschritt der Satellitentechnik der letzten 5 Jahre; die sukzessive Vergrösserung dieser Nachrichten-Relais-träger im Weltraum setzt natürlich einen entsprechenden Fortschritt auf der Raketenseite voraus.

Intelsat 1 (besser unter dem Namen «Early-Bird» bekannt) war ursprünglich als Experimentalsatellit geplant, der über folgende Fragen Aufschluss bringen sollte:

- a) Reaktion der Gesprächspartner auf den Zeitverzug bei «synchronen» Satellitenverbindungen;
- b) Regenmargen der Bodenstationen;
- c) Langzeit-Driftverhalten synchroner Satelliten;
- d) Langzeitverhalten der Ventile im Raum.

Dieser Satellit hat sich weit über die seinerzeitigen Erwartungen hinaus bewährt und steht noch heute zeitweise im kommerziellen Verbindungsnetz über dem Atlantik im Einsatz.

Intelsat 2. Die Satelliten der Intelsat-2-Reihe wurden auf Wunsch der NASA als Interimslösung für die Sicherstellung der Verbindungen des «Apollo»-Unternehmens in Umlauf gebracht. Zwei Intelsat-2-Satelliten stehen über dem Pazifik und einer über dem Atlantik. Sie sind teilweise im NASA-Netz, teilweise im zivilen Telephonnetz eingesetzt.

Intelsat 3. Diese Satellitengeneration mit Abschussdatum 1968/69 soll die Basis des weltweiten Verbindungsnetzes (2 Satelliten über dem Atlantik, je 1 Satellit über dem Pazifik und Indischen Ozean) der Intelsat-Organisation bilden.

Intelsat 4. Die Satelliten Intelsat 4 sind für den Nachrichten-Fernverkehr der 70er Jahre bestimmt, der nach den heutigen Verkehrsprognosen von den Intelsat-3-Typen nicht mehr bewältigt werden kann. Sie sind ausserdem für den Einsatz in regionalen Netzen geeignet.

Die schweizerische Industrie ist am Bau der Satellitengenerationen Intelsat 3 und Intelsat 4 beteiligt. Fig. 4 zeigt ein 1 : 1-Modell des Satelliten Intelsat 4.

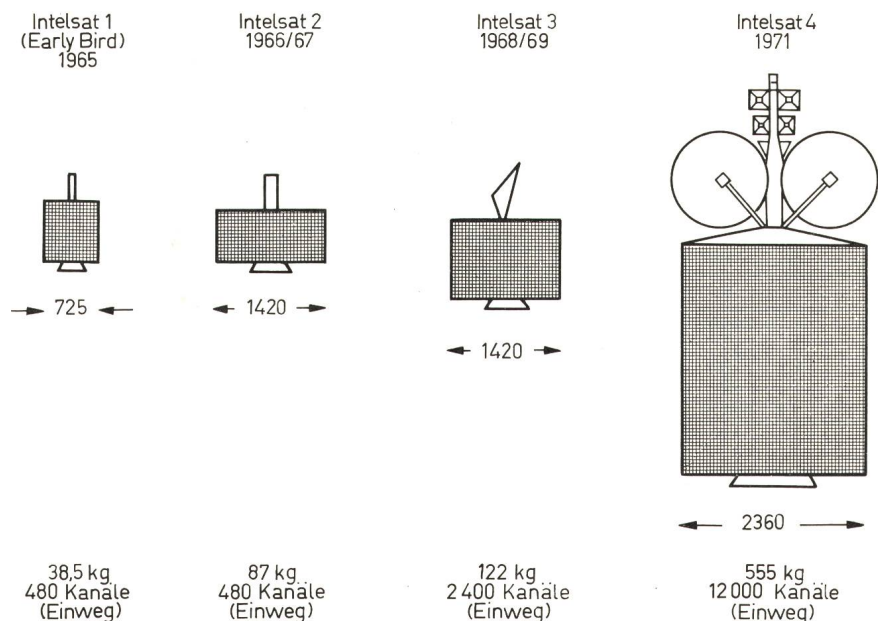


Fig. 3

Maßstäblicher Vergleich der vier Intelsat-Satellitengenerationen

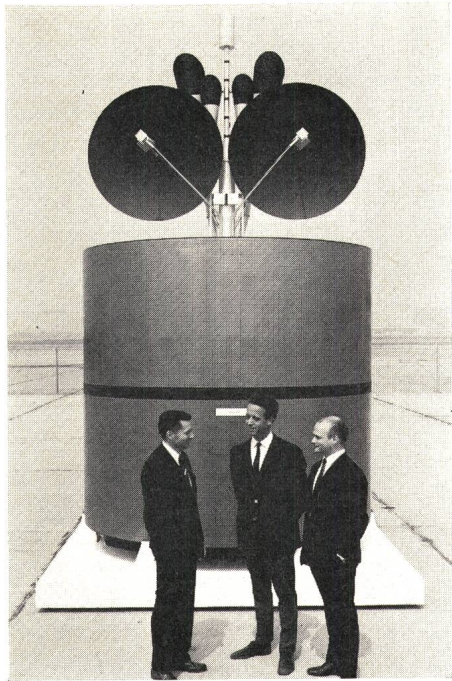


Fig. 4

Modell eines Intelsat-4-Nachrichtensatelliten

Parallel zu dieser Entwicklung auf der Satellitenseite befindet sich ein weltweites Netz von Bodenstationen im Aufbau. Für den interkontinentalen Verkehr zwischen den Industriestaaten bilden die Satelliten eine Ergänzung (und Konkurrenz) zu den bereits bestehenden Telephon-Kabelverbindungen. Für die Entwicklungsländer bilden die Satelliten mit ihren Mehrfach-Zugangsmöglichkeiten das eigentliche Gerüst der im Aufbau befindlichen internationalen Verkehrsnetze (keine existierenden Kabelnetze). Die Fernmeldesatelliten sind zur Zeit das einzige Mittel für die Übertragung breitbandiger Televisionsprogramme. Fig. 5 zeigt die 1968 bestellten und bereits gebauten Bodenstationen des Intelsat-Netzes. Ausser dem Intelsat-Netz existiert ein russisches Fernmeldesatellitensystem, bestehend aus 10 Satelliten vom Typ Molniya, die auf elliptischen Bahnen (nicht geostationär) umlaufen. Es dient für innerrussische Verbindungen, insbesondere für die Fernsehprogrammverteilung.

3. Übertragungstechnische Probleme der synchronen Fernmeldesatelliten

Aufbau und Problematik eines Nachrichtensatelliten lassen sich in 2 Hauptproblemkreise aufteilen:

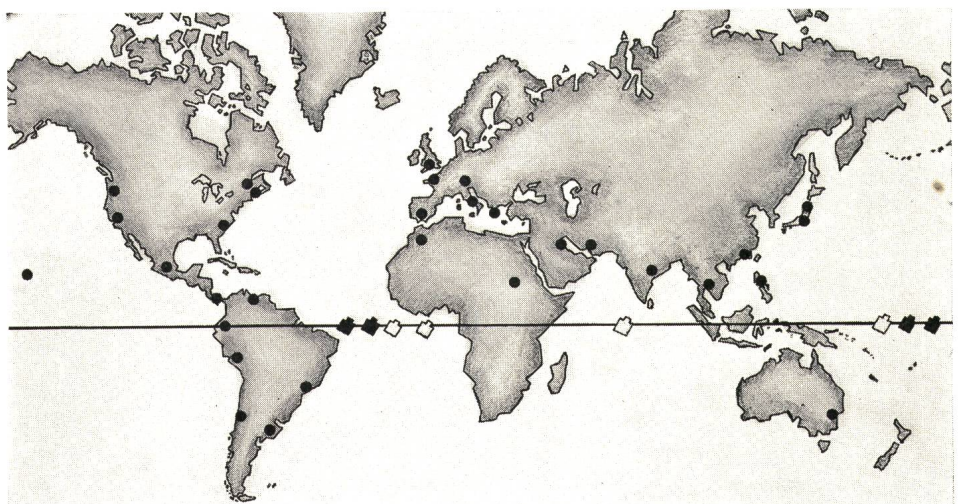
- a) Das eigentliche Nachrichtenrelais, das die Teile umfasst, die mit der Nachrichtenübermittlung in direktem Zusammenhang stehen. Es ist die Nutzlast des Satelliten.
- b) Die satellitenspezifischen Einrichtungen, die zur Positionierung, Lagestabilisierung, Energieversorgung, Steuerung usw. notwendig sind.

Fig. 5

Bestehende und im Bau befindliche zivile Bodenstationen des Intelsat-Nachrichtennetzes

(Stand 1968 ohne NASA-Stationen)

Die Satelliten der Generationen Intelsat 1...3 sind über dem Äquator aufgereiht eingezeichnet



Der folgende Abschnitt befasst sich mit einigen Problemen der Nachrichtenübertragung über Synchronsatelliten.

3.1 Die Leistungsbilanz

Die Nachrichtenrelais in Satelliten haben dieselben Funktionen wie die Verstärkerzwischenstellen beim Richtfunk, nämlich Verstärkung und Frequenzumsetzung, da Geradeausverstärkung wegen der riesigen Leistungsdifferenz zwischen ankommendem und abgehendem Signal nicht in Frage kommt. Eine Punkt-zu-Punkt-Übertragung über einen Satelliten (Fig. 6) kann in 2 Teilstrecken zerlegt werden, die einzeln nach den für die Übertragungstechnik geltenden Gesetzen behandelt werden können.

Die aus der Nachrichtentechnik bekannte Formel für die Empfangsleistung einer Übertragungsstrecke lautet:

$$P_e = \frac{P_s G_s G_e}{(4 \pi R/\lambda)^2} \quad (1)$$

worin

- P_e Empfangsleistung
- P_s Sendeleistung
- G_e Antennengewinn des Empfängers
- G_s Antennengewinn des Senders
- R Übertragungsdistanz
- λ Wellenlänge

bedeuten.

Zur Beurteilung der Güte einer Übertragungsstrecke muss das empfangene Signal mit den Störungen verglichen werden. Nimmt man thermisches Rauschen als dominante Störungsquelle im Empfangskanal an, so wird die auf die Bandbreite b des Informationskanals bezogene Störleistung:

$$P_{re} = k T_e b \quad (2)$$

worin

- P_{re} Rauschleistung auf den Empfängereingang bezogen
- k Boltzmannsche Konstante
- T_e effektive Rauschtemperatur des Empfängers
- b Frequenzbandbreite der Information

bezeichnen.

Es ist eine bekannte Tatsache der Übertragungstechnik, dass das Signal-Rauschverhältnis im Informationskanal verbessert werden kann, wenn man zur Signalübertragung eine grössere Bandbreite als die Informationsbandbreite b benützt.

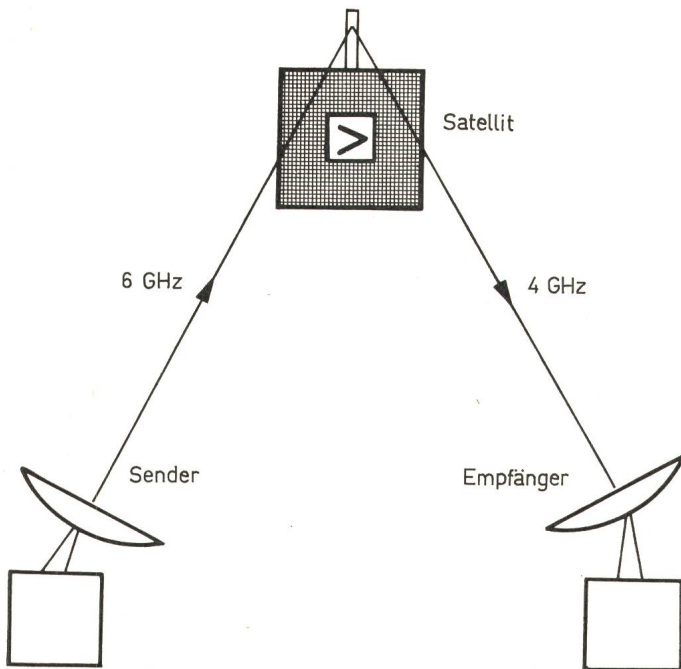


Fig. 6

Aufbau einer Punkt-Punkt-Verbindung über einen Nachrichtensatelliten

Man kann diese Tatsache durch den sog. Modulationsgewinn g_m berücksichtigen und schreibt für das Signal/Rauschverhältnis im Informationskanal (nach Demodulation):

$$\frac{P_{so}}{P_{ro}} = \frac{P_e}{P_{re}} g_m = \frac{P_s G_s G_e}{\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2 k T_e b} g_m \quad (3)$$

P_{so} Signalleistung im Informationskanal
 P_{ro} Rauschleistung im Informationskanal
 g_m Modulationsgewinn

Fig. 7 zeigt eine quantitative Darstellung der Leistungsverhältnisse gemäss Gl. (3) für einen über Intelsat 3 laufenden Telephoniekanal ($b = 4$ kHz). Die eingesetzten Zahlen entsprechen dem im Intelsat 3 installierten Empfänger/Sender und einer modernen, den Intelsat-Normen entsprechenden Bodenstation mit 28 bis 30 m Antennenspiegel und Empfänger niedriger Rauschtemperatur. Die kritische und damit kanalzahlbegrenzende Übertragungsstrecke ist angesichts der beschränkten, auf dem Satelliten installierbaren Sendeleistung die Abwärtsstrecke. Die einzelnen Faktoren der Übertragungsgleichung müssen so festgelegt werden, dass am Empfängeranfang ein gewogenes Signal/Rauschverhältnis von 50 dB, bezogen auf einen normierten Testton, pro Telephoniekanal resultiert. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Faktoren der Gl. (3) diskutiert.

3.2 Systemgrössen der Bodenanlage

Die Bodenanlage geht in die Gl. (3) mit dem Faktor G_e/T_e ein. Dieser soll im Rahmen des kostenmässig Vertretbaren möglichst gross gemacht werden. Jede Steigerung des Faktors G_e/T_e erlaubt eine Erhöhung der Kanalzahl der betrachteten Satellitenverbindung. Die durch Comsat für die Partnerstationen des Intelsat-3-Netzes festgesetzte Zahl $G/T \geq 40,7$ dB (bei $f = 4$ GHz, bezogen auf 1°K) ergibt ausgewogene Kosten innerhalb einer für die nächsten Jahre angenommenen Netzdichte. Da nur Bodenstationen gleicher G/T -Werte im Mehr-

fachzugangsbetrieb (multi-access) des Satelliten miteinander einen vernünftigen Betrieb aufrechterhalten können, kommt der Einhaltung der entsprechenden technischen Spezifikationen aller beteiligten Bodenstationen grosse Bedeutung zu. Die heutige Normierung des G/T -Wertes der Intelsat-Bodenstationen schliesst nicht aus, dass sich in Zukunft Netze mit kleinerer G/T -Zahl bilden werden, z. B. dann, wenn die Zahl der im Netz beteiligten Bodenstationen gemessen an der totalen Netzkanalzahl sehr gross ist. So basiert z. B. das NASA-Verbindungsnetz über Intelsat 2 auf Bodenstationen mit kleineren G/T -Werten.

Die Aufteilung des Quotienten $G/T = 40,7$ dB auf den Antennengewinn und die Rauschtemperatur lässt, weil bereits nahe an den heutigen technischen Grenzen liegend, nicht viel Spielraum offen.

Bei Verwendung heliumgekühlter parametrischer Diodenverstärker werden dem Antennengewinn $G_e \approx 58$ dB der effektiven Rauschtemperatur $T_e \approx 50^\circ\text{K}$ (ca. 17 dB) zugeordnet.

Diese Aufteilung ergibt bei $f = 4$ GHz Antennenspiegeldurchmesser von ca. 28 bis 30 m, die zugehörigen Empfangsbündelbreiten betragen $0,23^\circ$.

Die effektive Rauschtemperatur T_e setzt sich aus dem Hintergrundrauschen und dem eigentlichen thermischen Empfängergerauschen zusammen. Die totale Rauschtemperatur der heutigen Bodenempfänger kann nur dank der Zuordnung eines Frequenzbandes für den Empfangskanal im Band von 1 bis 10 GHz auf dem geforderten Wert gehalten werden. Unterhalb dieses in Fig. 8 dargestellten Rauschfensters stört das sog.

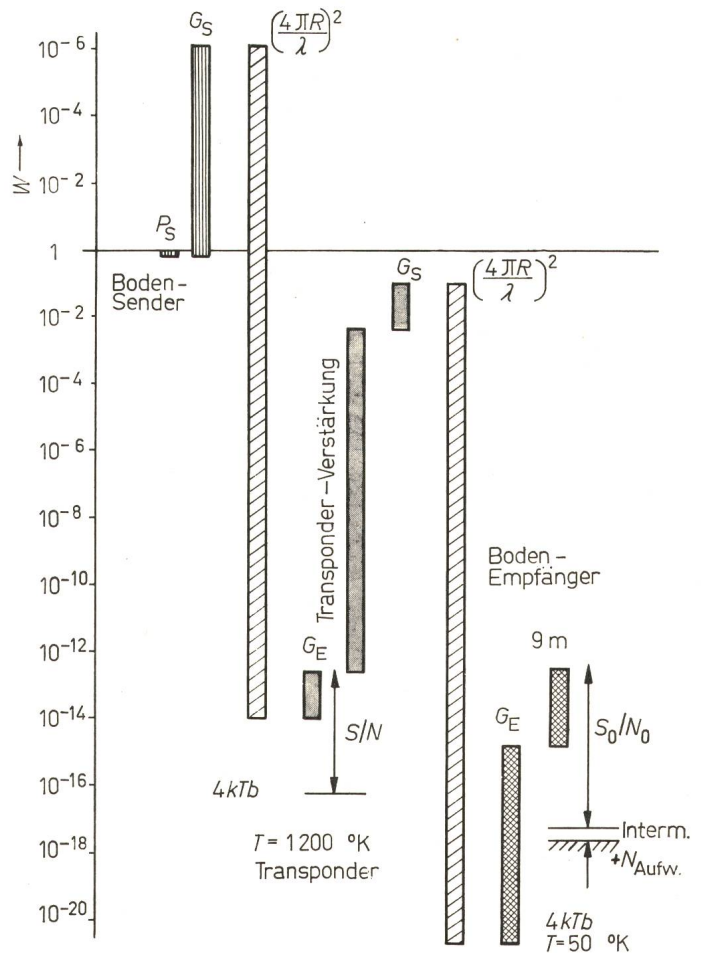


Fig. 7

Leistungsbilanz für einen über den Satelliten Intelsat 3 laufenden Telephon-Sprechkanal gemäss Gl. (1) bis (3)

W Leistung pro Sprechkanal

galaktische Rauschen (Rausch-Strahlung aus unserer eigenen Galaktik), oberhalb dieses Fensters dominiert das troposphärische Rauschen. Die Sauerstoff- und Wassermoleküle der Troposphäre absorbieren Strahlung und emittieren sie wieder mit Maximalwerten bei den Resonanzlinien der beteiligten Moleküle. Diese Rauschpegel werden bei Regen vergrößert.

Zur Rauschtemperatur der Antenne trägt auch die über Seitenzipfel der Antenne einstrahlende, warme Erde bei. Auf dem Gebiet rauscharmer Empfänger sind die anfänglich verwendeten Maser heute weitgehend durch parametrische Diodenempfänger ersetzt worden, mit denen bei Heliumkühlung Rauschtemperaturen von 15 bis 20 °K erreicht werden. Man hofft, diese Rauschtemperatur in Zukunft auch mit weniger teuren Kühlapparaturen (z. B. mit Kühlmedium von 77 °K) erreichen zu können.

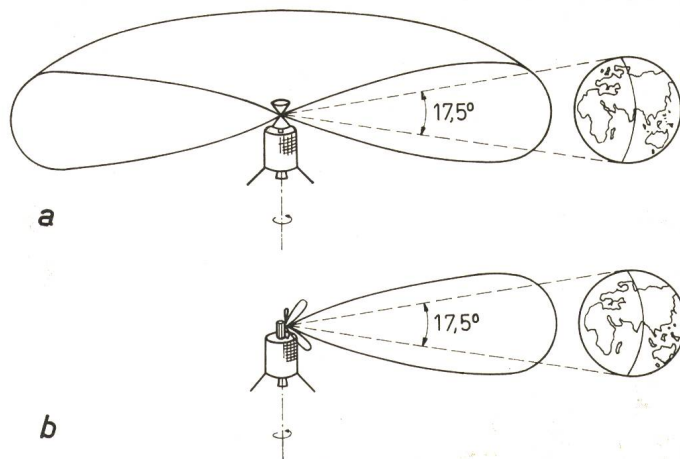


Fig. 9
Strahlungsdiagramme von Satellitenantennen
a Zirkularstrahler
b gebündelter Strahler

erfahren. Der verwendete Antennentyp hängt eng mit der Stabilisierungsart des Satellitenkörpers zusammen. Alle Intelsat-Satelliten sind spin-stabilisiert, d. h. ihre stabile Lage im Raum wird durch die Kreiselwirkung des rotierenden Satelliten festgelegt. Die Rotationsachse steht parallel zur Erdrotationsachse; bei Abweichungen von dieser Ideallage können vom Boden aus Korrekturen befohlen werden (siehe Abschnitt 4.3).

Die einfachste brauchbare Antennenanordnung, wie sie auf Intelsat 1 und 2 eingesetzt ist, hat ein rotationssymmetrisches Strahlungsdiagramm gemäss Fig. 9a. Die Antenne kann starr mit dem rotierenden Satelliten verbunden werden, allerdings

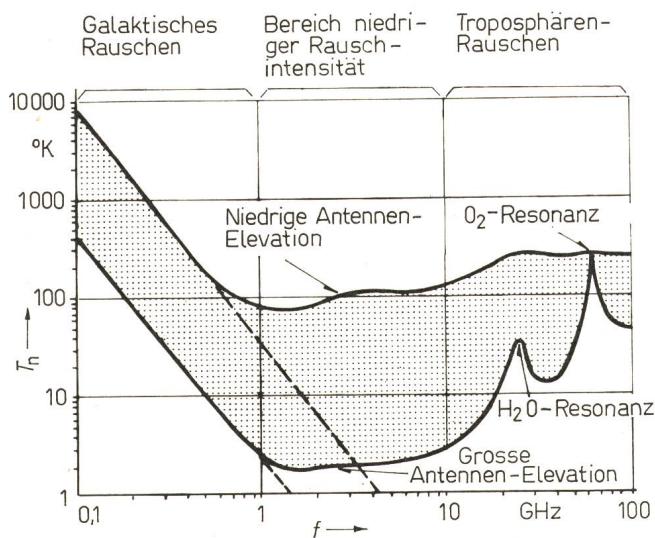


Fig. 8
Rauschtemperatur von stark gebündelten Empfangsantennen als Funktion der Frequenz
 T_n Antennen-Rausch-Temperatur

Die Kombination der oben beschriebenen technischen Mittel ergibt die geforderten G/T -Werte (40,7 dB); die Zahl ist bei Regen und bei schlechten Aspektwinkeln (niedrige Elevation) des Satelliten kleiner.

3.3 Nachrichtentechnische Ausrüstung des Satelliten

Der Beitrag des Satelliten zur Leistungsbilanz Gl. (3) ist durch das Produkt $P_s G_s$ (Sendeleistung \times Antennengewinn) festgelegt (effective radiated power, ERP). Als Sender werden in den heutigen Fernmeldesatelliten (4 GHz) ausschliesslich Wanderfeldröhren benützt. Sie bieten den Vorteil eines guten Wirkungsgrades, hoher Verstärkung, grosser Bandbreite und guter Linearitätseigenschaften bei geringer Grösse und relativ kleinem Gewicht. Angesichts der grossen Zuverlässigkeitsforderungen der kommerziellen Nachrichtensatelliten ist man bis heute nicht über das bewährte Leistungsniveau von 6...10 W pro Röhre hinausgegangen. Die bei den neueren Satelliten notwendige Steigerung der Gesamtleistung wurde durch Aufteilung des zur Verfügung stehenden Frequenzbereichs auf mehrere Senderöhren erreicht. So ist z. B. beim Intelsat 4 die Sendeleistung auf 12 TWT-Röhren verteilt, von denen im Defektfall jede durch eine Reserveröhre ersetzt werden kann (vgl. Fig. 12). Demgegenüber hat das Satelliten-Antennensystem von Generation zu Generation wesentliche Änderungen

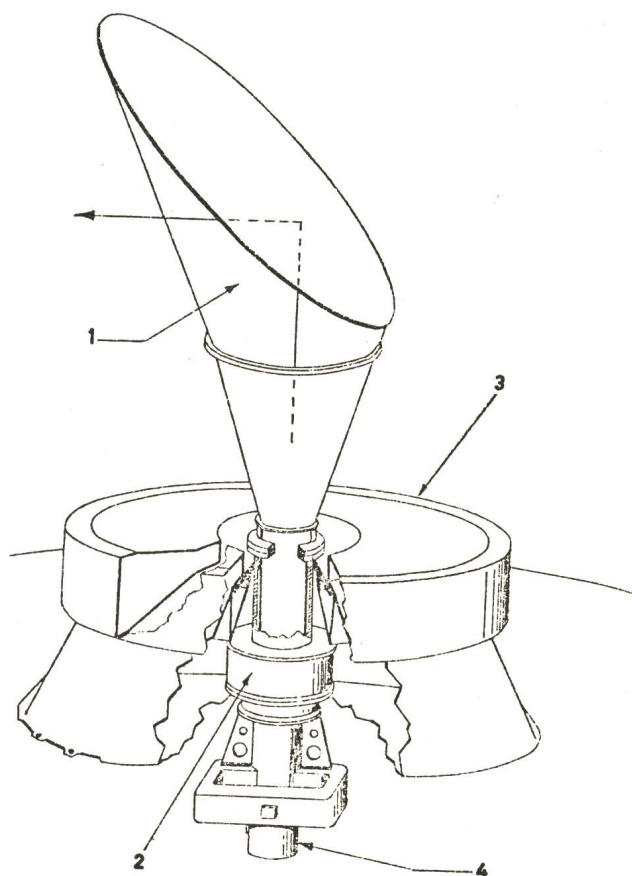


Fig. 10
Antennenkonstruktion des Intelsat 3
1 Richtstrahl-Antenne; 2 Motor-Gehäuse; 3 Rundstrahl-Antenne; 4 Eingangs-, Ausgangs-Leitung

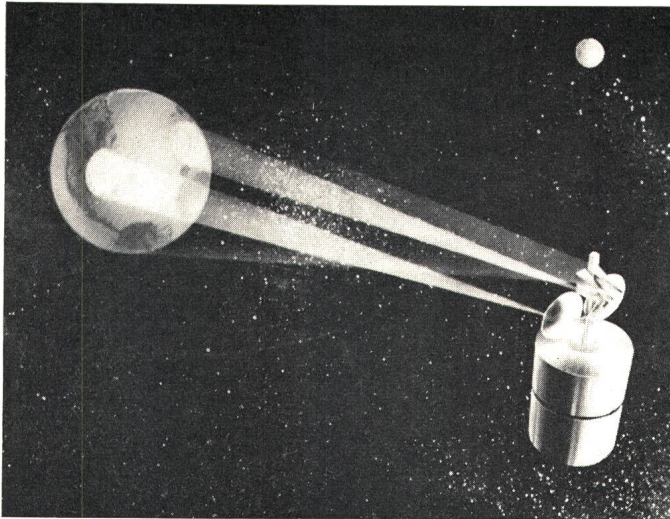
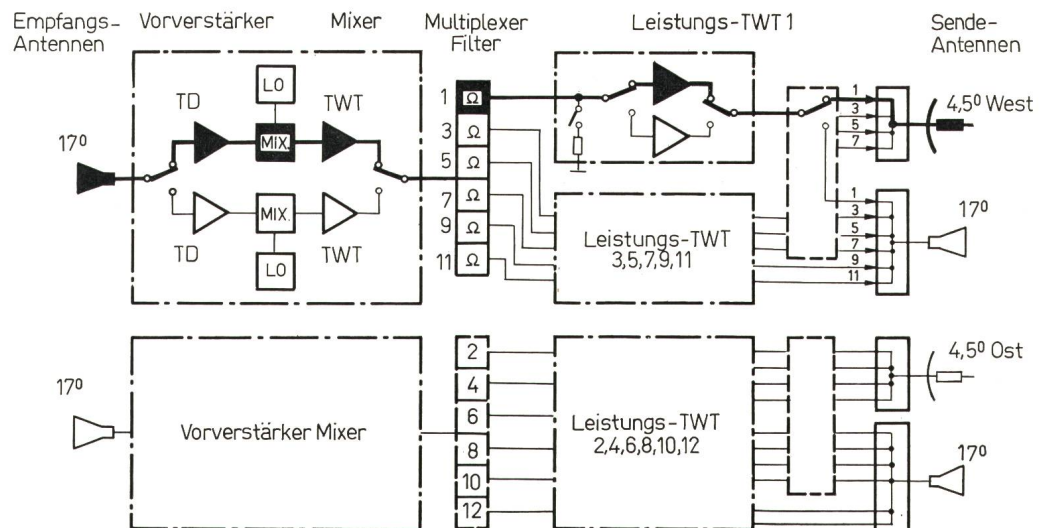


Fig. 11
Nachrichtensatellit Intelsat 4 mit Antennenbündeln

geht dabei ein beträchtlicher Anteil der Sendeenergie im Weltall verloren. Die naheliegende Lösung mit Richtstrahler gegen die Erde erfordert eine relativ zum Satelliten rotierende Antenne (Fig. 9b), wobei schwierige Lagerprobleme der rotierenden Teile zu lösen sind. Beim Intelsat-3-Satelliten, dessen Antennenkonstruktion Fig. 10 darstellt, wird lediglich das zirkularpolarisierte Antennenhorn mit der aufgesetzten Reflektorplatte rotiert.

Lässt man die Forderung fallen, dass das Sendebündel des Satelliten die ganze vom Satelliten aus sichtbare Erdoberfläche ausleuchten müsse (170° -Bündel, 16,8-dB-Hornantenne), so können noch grössere Antennengewinne realisiert werden. Die Verwendung schmalbündeliger Antennen ($4,5^\circ$ Öffnung, Gewinn: 28,5 dB), wie sie erstmals beim Intelsat 4 vorgesehen sind, bietet Leistungsvorteile bei starkfrequentierten Verbindungen mit ausgesprochenem Punkt-Punkt-Charakter (z. B. Europa-Nordamerika) oder beim Aufbau lokaler Verbindungsnetze. Die «erdbedeckenden» Bündel werden beim Intelsat 4 weiterhin für den Verkehr in geographisch über weite Flächen vermaschten Netzen (z. B. Afrika-Europa-Südamerika) benötigt. Der Übergang zu teilweise schmalen Bündeln erfordert Spiegelreflektoren, wobei nun grosse Teile des Satelliten (Antennenplattform mit Leistungsendern) relativ zum Satellitenmantelkörper rotieren müssen. Fig. 11 zeigt eine gezeichnete Darstellung der Strahlungsbündel des Intelsat-4-Satelliten relativ zur Erde. Die schmalen Antennenbündel können durch Stellmotoren relativ zur Plattform bewegt werden, um eine möglichst grosse Einsatzflexibilität des Satelliten zu erreichen.

Fig. 12
Vereinfachtes Transponderschema des Satelliten Intelsat 4
Die dick gezeichneten Elemente zeigen den Weg eines herausgegriffenen Telephonbündels von einer der Empfängerantennen zu einer der Sendeantennen



Daten der Intelsat-Transponder

Tabelle I

Satellit	Bandbreite	Sendeleistung × Antennengewinn	Telephonie Kanäle	Mehrfach-Zugang
Early Bird 1965	2×26 MHz	2×10 W	2×240	Nein
Intelsat 2 1966/67	2×126 MHz	2×35 W	2×240	Ja
Intelsat 3 1968/69	2×225 MHz	2×160 W	2×1200 (ca.)	Ja
Intelsat 4 1971	12×36 MHz	6×200 W $6 \times 2,9$ kW	2×6000 (ca.) ¹⁾	Ja

¹⁾ Die Kanalkapazität des Intelsat-4-Satelliten variiert je nach eingesetzter Transponderkonfiguration.

Tabelle I gibt eine Zusammenstellung der wichtigsten Transponderdaten. Das zur Verfügung stehende Frequenzband von 500 MHz wurde erstmals bei Intelsat 3 durch Aufteilung auf 2 Transponder mit je 225 MHz Bandbreite und je einer Leistungsröhre von 10 W voll ausgenutzt. Wie bereits früher erwähnt, wird die Leistung des Intelsat 4 durch 12 Wanderfeldröhren erbracht, denen je 36 MHz Bandbreite zugeordnet ist. Jeder Röhre kann eine Reserveröhre parallelgeschaltet werden (Redundanz), Fig. 12 zeigt das recht komplexe Verbindungsschema, das die Zuordnung der Endstufen zu den Vorverstärkern und die Kombinationsmöglichkeiten der Leistungsstufen und Sendeantennen aufzeigt. Das Grundschema für einen herausgegriffenen Übertragungskanal (dick gezeichnet) zeigt, dass das klassische Transponderprinzip angewendet ist. Vorverstärkung mit Tunneliodenverstärker im 6-GHz-Band, Frequenzumsetzung auf 4 GHz, Leistungsverstärkung mit Wanderfeldröhren und wahlweise Ausstrahlung über eine der Sendeantennen. Der Empfang des Satellitentransponders erfolgt ausschliesslich über 170° -Antennen, da die Leistungsbilanz der Aufwärtsstrecke durch entsprechende Vergrösserung der Sendeleistung am Boden der kritischen Abwärtsstrecke angepasst werden kann. Die aufwendigen Spiegelantennen werden deshalb nur für die Abwärtsstrecke eingesetzt.

3.4 Modulationssystem

3.4.1 *Allgemeines zur Bandbreitefrage.* Der letzte Faktor von Gl. (3), über den der Systemtechniker verfügen kann, ist der Modulationsgewinn g_m , der selbstverständlich von der

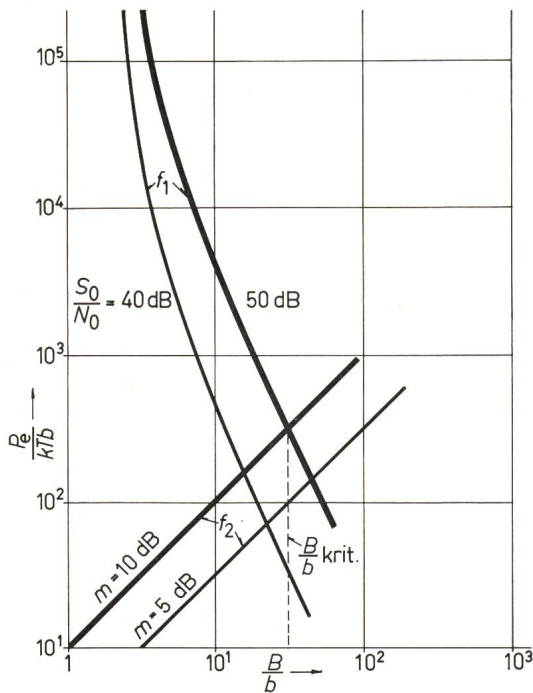


Fig. 13

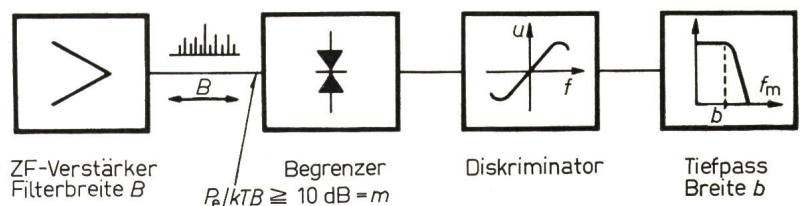
Erforderliche HF-Trägerleistung P_e/kTb (normalisiert) als Funktion der Bandausweitung B/b bei sinusförmiger Modulation
 f_1 gemäss Gl. (8); f_2 gemäss Gl. (10)
 Bezeichnungen siehe im Text

Wahl des Modulationssystems abhängt. Trotz der chronischen Knappheit im heute für drahtlose Übertragung nutzbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums konnten den Nachrichtensatelliten relativ grosse Frequenzbereiche (je 500 MHz im 6- und 4-GHz-Band) zugeordnet werden. Dank der grossen Empfangsleistungsunterschiede der Satellitenübertragungsstrecken und der terrestrischen Richtfunkstrecken und dank der grossen Bündelung der Antennen der Satelliten-Bodenstationen können beide Übertragungsmittel im selben Frequenzbereich koexistieren, sofern die effektive Strahlungsdichte der Satelliten auf der Erdoberfläche ein den terrestrischen Richtfunkstrecken zuträgliches Mass nicht überschreitet. Die starke Bündelung der in den Intelsatnetzen verwendeten Bodenantennen ermöglicht ausserdem den Betrieb (jedenfalls vorläufig) aller Satelliten im selben Frequenzbereich (räumliche Diskrimination).

Es können demzufolge breitbandige Modulationsverfahren mit relativ grossen Modulationsgewinnen verwendet werden. Das verwendete Modulationsverfahren muss ausserdem den Mehrfachzugang (Verkehr mehrerer Bodenstationen über denselben Satelliten) ermöglichen. Die in Frage stehenden breitbandigen Modulationsverfahren sind die Frequenzmodulation (FM) und die Pulse-Code-Modulation (PCM). Der Mehrfachzugang kann im Fall der FM durch Frequenzmultiplex (FDM, frequency division multiplex), im Fall der PCM durch Frequenz- oder Zeitmultiplexverfahren erreicht werden (FDM oder TDM).

Die heute mit den Intelsat-Satelliten im Aufbau befindlichen und bereits aufgebauten Verbindungsnetze verwenden durchwegs die Frequenzmodulation.

Fig. 14
Blockschema eines klassischen FM-Empfängers
 Schwellfaktor $m \approx 10$ dB



Mit breitbandiger FM kann ein relativ guter Modulationsgewinn erreicht werden. Grund für die Wahl der Frequenzmodulation ist zweifelsohne auch die Tatsache, dass die dazu benötigten bodenseitigen Apparaturen aus der Mikrowellen-Richtstrahltechnik weitgehend verfügbar sind. Es sei speziell darauf hingewiesen, dass die Satellitentransponder wohl die Anforderungen der Frequenzmodulation erfüllen müssen, ebensogut aber auch mit anderen Modulationsarten betrieben werden können. Im folgenden soll die Grösse und die Bedeutung des Modulationsgewinns g_m eingehender diskutiert werden. Der Modulationsgewinn im Sinne von Gl. (3) berücksichtigt die Verbesserung des betrachteten Verfahrens gegenüber einem Modulationssystem, bei dem Übertragungsbandbreite und Informationsbandbreite identisch sind (Einseitenbandübertragung). Signal/Rauschverhältnis im Übertragungsband und nach der Demodulation (Informationskanal) sind bei einem solchen Modulationssystem gleich ($g_m = 1$).

3.4.2 Sinusförmige Frequenzmodulation. Im Falle der Frequenzmodulation wird die formelmässige Erfassung des Modulationsgewinns g_m für einen Kanal mit sinusförmiger Modulation am einfachsten. Das Signal/Rauschverhältnis am Ausgang des Frequenzdiskriminators lautet in diesem Fall:

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P_e}{b k T} M^2 = \frac{P_e}{b k T} g_m \quad (4)$$

$$\text{mit } M = \Delta f/b$$

worin

- S_o Ausgang-Signalleistung
- N_o Ausgang-Rauschleistung
- b Informationsbandbreite (Bandbreite des NF-Kanals)
- M Modulationsindex bei der oberen NF-Bandgrenze b
- Δf Frequenzhub
- P_e HF-Trägerleistung
- kT Rauschleistungsdichte im Übertragungsband

Der Modulationsgewinn g_m wird demzufolge:

$$g_m = \frac{3}{2} M^2 \quad (6)$$

Für die Übertragung eines Signals der Frequenz b wird bei einem Modulationsindex M erfahrungsgemäss die Hochfrequenzbandbreite B :

$$B \approx 2b(M + 1) \quad (7)$$

benötigt.

Mit Gl. (4) und (7) folgt als Zusammenhang zwischen dem Signal/Rauschverhältnis S_o/N_o am Demodulatorausgang (Informationskanal) und dem bei der Bandausweitung B/b benötigten Signal/Rauschverhältnis P_e/bkT im Übertragungskanal (bezogen auf b):

$$\frac{P_e}{b k T} \approx \frac{2}{3} \left(\frac{S_o}{N_o} \right) \frac{1}{\left(\frac{B}{2b} - 1 \right)^2} = f_1 \quad (8)$$

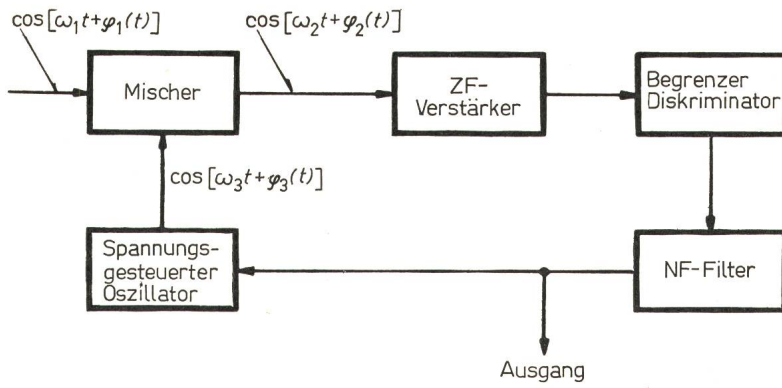


Fig. 15
 Blockscheema eines FM-Rückkopplungsempfängers
 $\omega_2 = \omega_1 - \omega_3; \varphi_2 = \varphi_1 - \varphi_3$

Die Formel illustriert die bei FM durch Bandausweitung mögliche Reduktion der Übertragungsleistung. Das Signal/Rauschleistungsverhältnis im Übertragungskanal (bezogen auf Informationsbandbreite b) ist in Fig. 13 als Funktion der Bandausweitung B/b aufgetragen (Kurven f_1).

Die Übertragungsleistung in FM-Systemen kann, in Übereinstimmung mit der Shannonschen Formel für die maximale Kanalkapazität, durch Bandausweitung nicht beliebig verkleinert werden. Die Grenze wird durch den Schwelleneffekt gegeben, der in der Folge anhand des Blockschemas eines FM-Empfängers erläutert wird (Fig. 14). Die relativ gute Stör- unterdrückung des klassischen FM-Demodulators beruht auf der Auswertung der Nulldurchgänge des Trägersignals, was durch eine Begrenzerschaltung vor dem eigentlichen Frequenzdiskriminator erreicht wird. Die Unterdrückung der Störungen funktioniert aber nur solange, als diese wesentlich kleiner als das Nutzträgersignal sind. Bei grossen überlagerten Stör- signalen werden «falsche» Nulldurchgänge erzeugt; das Signal/Rauschverhältnis am Ausgang nimmt dann mit wachsenden Störungen schnell ab, und die Übertragung wird unbrauchbar. Die störungsarme Demodulation des FM-Empfängers, für die Gl. (8) zuständig ist, verlangt deshalb einen Mindestwert m des S/N -Verhältnisses vor der Schwellenschaltung (Bandbreite B). Bei einer Rauschleistungsdichte kT im Übertragungskanal wird dieses Verhältnis P_e/kTB .

Die Schwellwertbedingung lautet demzufolge:

$$\frac{P_e}{kTB} \geq m \quad (9)$$

m Mindestwert des S/N -Verhältnisses an der Empfängerschwelle

Bezieht man die Empfangsleistung auf die Rauschenergie pro Informationsbandbreite b , so lautet die entsprechende Gleichung:

$$\frac{P_e}{kTb} \geq m \frac{B}{b} = f_2 \quad (10)$$

Für das klassische FM-Empfangsschema gilt erfahrungsgemäss $m = 10$ dB. Die Kurve $f_2 = f(B/b)$ ist in der Fig. 13 als Funktion der Bandausweitung B/b aufgetragen.

Ein FM-Empfänger mit vorgegebener Signal-Rauschleistung S_0/N_0 am Ausgang erfordert demnach:

$$\frac{P_e}{bkT} \geq f_1, f_2 \quad (11)$$

Daraus folgt, dass für die Übertragungsleistung P_e in einem FM-System vorgegebener Ausgangs- S_0/N_0 -Qualität und mit vorgegebenem Schwellwert m als Funktion der Bandausweitung

ein Minimum existiert (optimale Bandbreite B/b_{krit} beim Schnittpunkt der Kurven f_1 und f_2). Eine Bandausweitung über den Punkt B/b_{krit} hat praktisch keinen Sinn.

Ein FM-Übertragungssystem, das mit einer Bandbreite $B/b < (B/b)_{krit}$ betrieben wird, bezeichnet man als frequenzbandbegrenzt. Ein FM-System, bei dem mehr Bandbreite zur Verfügung steht, als man im obigen Sinne sinnvoll ausnützen kann, wird als leistungs- begrenzt bezeichnet.

Der Wert $m = 10$ dB ist keine echte physikalische Grenze. In der Folge des sich für Breitbandssysteme zeigenden Gerätebedarfs sind Empfänger mit niedrigeren Schwellwerten entwickelt worden (threshold-extension-demodulators).

Die meisten für Satelliten-Bodenstationen entwickelten Geräte verwenden das sog. Frequenz-Rückkopplungsverfahren. Gemäss Blockscheema in Fig. 15 wird die Mischstufe am Empfängereingang durch einen Lokal-Oszillator gespeist, dessen Frequenz vom Diskriminatorausgang gesteuert ist (VCO). Damit kann der ZF-Kanal vor der Diskriminatorschwelle

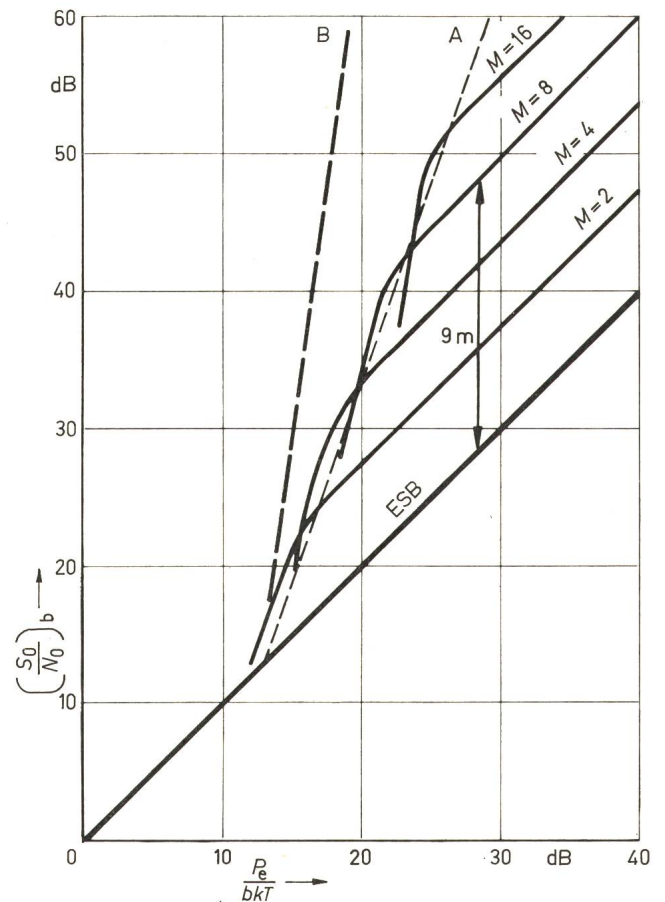


Fig. 16
 Darstellung der Rausch-Transferfunktion eines klassischen FM-Diskriminators

$(S_0/N_0)_a$ Signal/Rauschleistungsverhältnis am Diskriminatorausgang;
 (P_e/bkT) auf Informationsbandbreite normiertes Signal/Rauschleistungs- verhältnis am Diskriminatoreingang
 Die mit ESB bezeichnete Kurve gilt für Einseitenbandmodulation
 A Schwelle für klassische FM-Empfänger; B Schwelle für Rückkopplungsempfänger

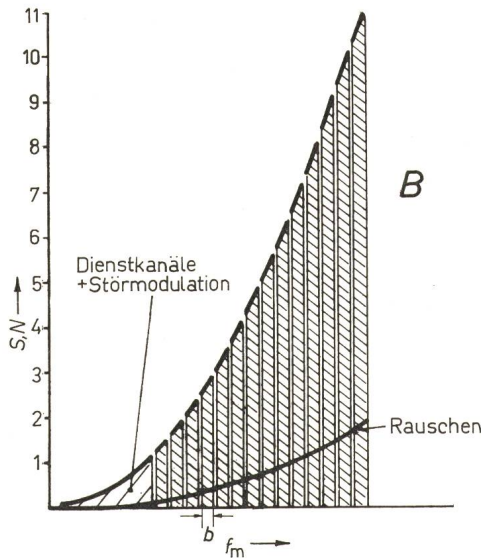
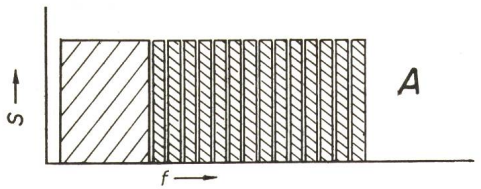


Fig. 17

Frequenzmässige Anordnung eines Telephonie-Kanalbündels (A) (die Kanäle sind nach dem Trägertelephonieprinzip aneinandergereiht) und entsprechendes Modulationssignal des HF-Trägers bei Frequenzmodulation (B)

Die frequenzmässige Entzerrung ist für kanalunabhängiges Signal/Rauschverhältnis notwendig
 S, N relativer Maßstab

schmäler gehalten werden als der HF-Eingangskanal. Die Verbesserung des effektiven Schwellwertes dieser Empfänger hängt von verschiedenen Parametern ab; für die bei Intelsat 3 angewendeten Übertragungsbündel wurden Rückkopplungsempfänger mit Richtwerten:

$$m_{\text{eff}} \approx 5 \text{ dB}$$

praktisch realisiert. Gemäss Fig. 13 kann durch Einsatz solcher Empfänger bei leistungsbegrenzten Systemen die Übertragungsleistung weiter abgesenkt werden.

In der klassischen Darstellung des Signal/Rauschverhaltens von FM-Empfängern gemäss Fig. 16 wird Gl. (4) durch die Schar paralleler Geraden mit Parameter M dargestellt. Der Modulationsgewinn g_m liest sich als Abstand von der mit ESB (Einseitenbandmodulation) bezeichneten Geraden ab, die für ein System mit $B=b$ gültig ist. Der Schwelleneffekt erscheint als Grenze A, unterhalb der eine Verbesserung durch Vergrößerung des Modulationsindex nicht mehr möglich ist. Die in Fig. 16 mit B bezeichnete Kurve gilt für FM-Rückkopplungsempfänger mit $m \approx 5$ dB.

3.4.3 Frequenzmodulation mit Kanalbündeln. Die via Satelliten laufenden Übertragungskanäle werden den betreffenden HF-Trägern bündelweise aufmoduliert, d. h. das Modulationssignal besteht aus einem Gemisch verschiedener Frequenzen. Die Verhältnisse werden deshalb unübersichtlicher als beim oben besprochenen Fall eines einfachen sinusförmigen Signals. Die Zusammenfassung der Telephoniekanäle zu «Bündeln» erfolgt wie bei der klassischen Trägertelephonie durch Einseitenbandmodulation der einzelnen Kanäle und durch Aneinander-

derreihung der Kanäle im Frequenzraum (Fig. 17A). Dabei werden die untersten Kanäle ($f < 12$ kHz) für Dienstkanäle und «Verwischungsmodulationsfrequenzen» freigelassen.

Bei der Übertragung eines zusammengesetzten Signals gemäss Fig. 17A mittels Frequenzmodulation sind folgende Besonderheiten zu beachten:

a) Das Ausgangsrauschen eines Frequenzmodulators steigt bei spektral konstanter Rauschdichte am Eingang als Funktion der Modulationsfrequenz an. Frequenzmässig höherliegende Sprachkanäle haben deshalb grösseres Ausgangsrauschen als niedrigliegende. Durch Vorentzerrung (preemphasis) und entsprechende Frequenzkorrektur nach der Demodulation erzeugt man bei gleicher Signalstärke in allen Kanälen dasselbe Signal/Rauschverhältnis (Fig. 17B). Der Modulationsindex ist deshalb abhängig von der frequenzmässigen Lage des betreffenden Kanals. Die nachfolgende zahlenmässige Auswertung bezieht sich auf einen mittleren Kanal.

b) Bei der Bestimmung der pro Kanal beanspruchten Übertragungsbandbreite muss ausserdem berücksichtigt werden, dass sich die Amplituden der verschiedenen Kanäle statistisch addieren. Der Ausgleich wird umso günstiger, je mehr Kanäle pro HF-Träger übertragen werden, d. h. der kombinierte Frequenzhub kann kleiner sein als die Summe aller maximalen Frequenzhübe der Einzelkanäle. Die gleichmässige spektrale Verteilung der Energie im Übertragungsband wird ausserdem durch Einführung einer sog. Verwischungsmodulation (niederfrequente Dreieckssignale) befördert. Es wird damit vermieden, dass bei fehlender oder schwacher Modulation des Senders grosse spektrale Energiedichten auftreten. Diese können zu Intermodulationsstörungen bei Mehrträgerbetrieb im Satelliten führen.

Die in der Fig. 18 dargestellte Funktion f_1^* für den normierten Empfangsträgerleistungsbedarf als Funktion der Bandausweitung berücksichtigt diese zusätzlichen Faktoren

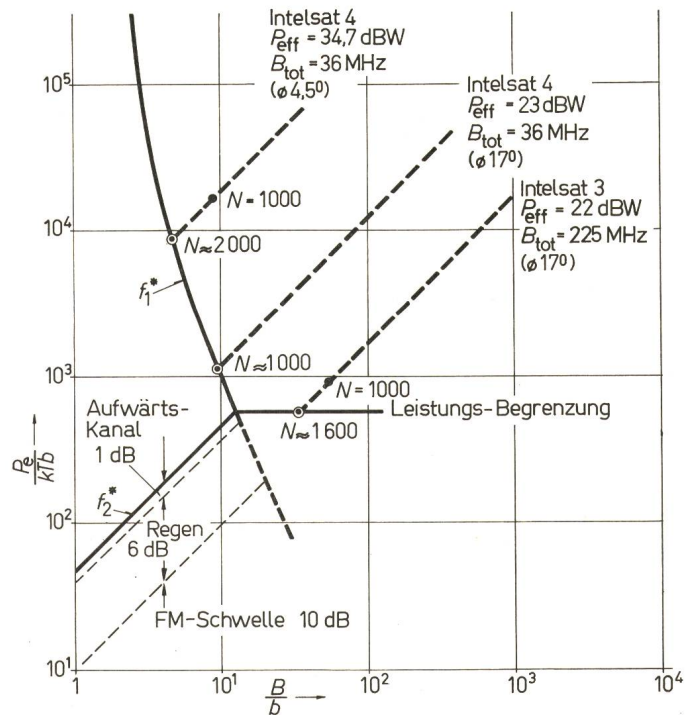


Fig. 18

Normierte HF-Trägerleistung P_e/kTb pro Sprechkanal als Funktion der Bandausweitung bei Modulation des Trägers mit einem Telephoniekanalbündel

f_1^* analog zu f_1 in Fig. 13, aber für bündelweise Sprachmodulation; f_2^* analog zu f_2 in Fig. 13, aber mit zusätzlicher Berücksichtigung des Aufwärtskanals und der Regenmarge. Die gestrichelten Kurven entsprechen der Leistungs/Bandbreitenaufteilung verschiedener Intelsat-Transponder. N Kanalzahl bei Anwendung eines Einzelträgers pro Transponder

P_{eff} Sendeleistung \times Antennengewinn pro Einzeltransponder
 B_{tot} Bandbreite pro Einzeltransponder
 ϕ Antennenbündelöffnung

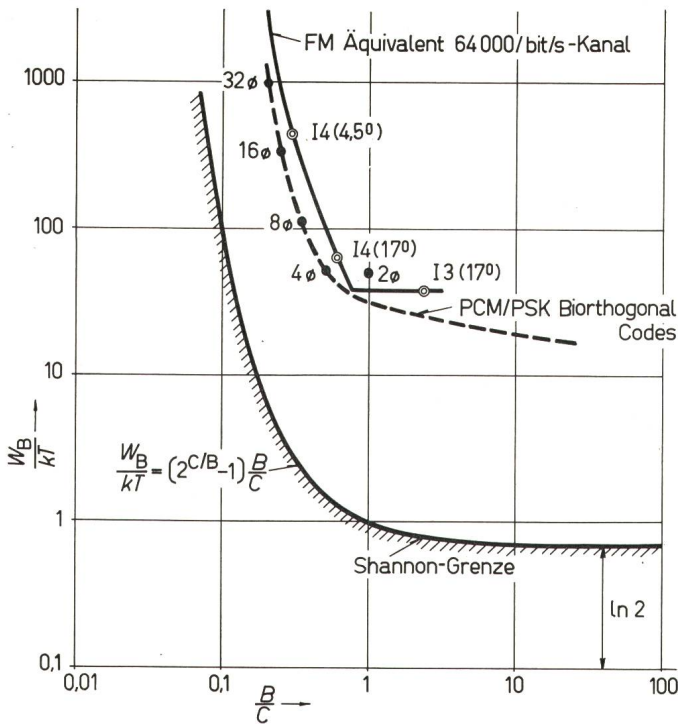


Fig. 19

Normierte Energie/bit W_B/kT als Funktion der pro bit/s aufgewendeten Bandbreite B/C

Shannon-Grenze gemäss Gl. (15). Die «FM-Kurve» entspricht der Darstellung in Fig. 18

Die gestrichelte Kurve stellt Systeme mit Pulse-Code-Modulation dar

der Mehrkanalübertragung bei Voraussetzung grosser Kanalzahlen/Träger ($N > 40$). Die Funktion f_2^* repräsentiert einerseits die Auswirkung des Schwelleneffektes eines klassischen FM-Diskriminators ($m = 10$ dB) und den Rauschanteil der Aufwärtsstrecke (1 dB). Ausserdem enthält f_2^* in der Form der Regenmarge (6 dB) eine Dämpfungsreserve für allfällige wetterbedingte Schwunderscheinungen. Der Schnittpunkt von f_1^* und f_2^* ergibt die Grenze zwischen bandbegrenztem und leistungsbegrenztem Übertragungsbereich.

Mit der Darstellung der Fig. 18 kann nun die Kanalkapazität der verschiedenen Intelsat-Satellitentransponder unter der Voraussetzung der Verwendung eines einzigen Hochfrequenzträgers pro Transponder ermittelt werden.

Von der totalen Sendeleistung $P_{s\ tot}$ wird pro Kanal der Anteil P_e :

$$\frac{P_e}{k T_e b} = \frac{P_{s\ tot} G_s G_e}{\left(\frac{4 \pi R}{\lambda}\right)^2 k T_e b} \cdot \frac{1}{N} \quad (12)$$

zum Empfänger gelangen. Pro Kanal steht die Übertragungsbandbreite B :

$$\frac{B}{b} = \frac{B_{tot}}{Nb} \quad (13)$$

zur Verfügung. Dabei bezeichnen

- N Anzahl Sprechkanäle
- B_{tot} Bandbreite des Transponders
- $P_{s\ tot}$ Sendeleistung des Transponders

Für die übrigen Bezeichnungen siehe Gl. (1) und (2).

Die durch die Gl. (12) und (13) beschriebene Leistungsbandaufteilung entspricht den in Fig. 18 gestrichelt eingetragenen 45°-Geraden. Die Schnittpunkte mit der Funktion f_1^* bzw.

dem Leistungsbegrenzungslevel bestimmen die Transponderkapazitäten (nur 1 HF-Träger). Für die zahlenmässige Auswertung wurde eine moderne Intelsat-Station ($G_e/T_e = 40,7$ dB bezogen auf 1°K) vorausgesetzt. Man erkennt aus Fig. 18, dass unter den besprochenen Voraussetzungen die Intelsat-3-Transponder im Gebiet der Leistungsbegrenzung betrieben werden. Die dem Punkt «Intelsat 3» entsprechende Bandbreite würde natürlich aus Gründen des Schwellenrauschens nicht ausgeñutzt; die Bandbreite würde auf B/b_{krit} verkleinert.

Dagegen laufen die Intelsat-4-Transponder im Gebiet der Frequenzbegrenzung; die Anwendung besserer Frequenzdemodulatoren (Schwellenerniedrigungsschaltungen Fig. 15) hätte hier keinen Sinn. Diese Aussage ist an die vorausgesetzte Bodenstation mit ($G_e/T_e = 40,7$ dB) gebunden, für Netze mit Bodenstationen mit kleineren G/T -Werten können auch die Intelsat-4-Transponder im leistungsbegrenzten Bereich arbeiten.

3.4.4 Vergleich mit der Shannonschen Kanalkapazität. Die Untersuchung solcher nahe an der physikalischen Grenze arbeitender Übertragungsstrecken legt den Vergleich mit der theoretischen Kanalkapazität C nahe. Nach Shannon gilt:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{P_e}{P_R} \right) \quad (14)$$

worin

- C Kanalkapazität (bit/s)
- B Übertragungsbandbreite (Hz)
- P_e Signalleistung
- P_R Rauschleistung

bedeuten.

Zur einfacheren Beurteilung des Einflusses der Bandausweitung auf die Kanalkapazität wird Gl. (14) umgeformt. Mit dem Begriff: W_B Energie pro bit und der Rauschleistung $P_R = BkT$ folgt aus Gl. (14):

$$\frac{C}{B} = \log_2 \left(1 + \frac{C W_B}{k T B} \right) \quad (15)$$

oder

$$\frac{W_B}{k T} = (2^{C/B} - 1) \frac{B}{C}$$

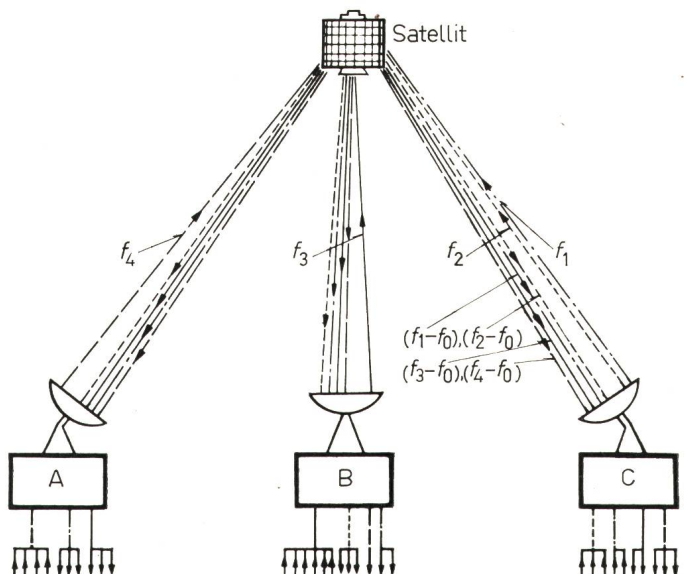


Fig. 20

Zum Prinzip des Mehrfachzuganges

f_1, f_2, f_3, f_4 sind HF-Sendefrequenzen der Bodenstationen; $(f_1-f_0), (f_2-f_0), (f_3-f_0), (f_4-f_0)$ sind HF-Empfangsfrequenzen der Bodenstationen
 f_0 Lokaloszillatorfrequenz

Gl. (15) gibt an, wieviel Energie W_B pro übertragenes bit als Funktion des Bandbreiteaufwandes pro bit/s aufgewendet werden muss. Gl. (15) ist in der Fig. 19 als Shannon-Grenze eingetragen. Man erkennt aus dieser Darstellung, dass die Bandausweitung über $B/C = 1$ hinaus keinen wesentlichen Leistungsgewinn mehr bringt.

Der Vergleich der oben diskutierten, breitbandigen Frequenzmodulation mit dieser theoretischen Grenze ist insofern problematisch, als ein analoges Modulationssystem in einem digitalen Begriffssystem (d. h. in bit/s) bewertet werden muss. Ohne detaillierte Diskussion der dabei auftretenden Probleme sei ein 4-kHz-Sprechkanal der oben diskutierten Qualität mit 64000 bit/s gleichgesetzt. Mit dieser Erfahrungszahl der Nachrichtentechnik kann die für Frequenzmodulation ermittelte Grenzkurve Fig. 18 in die Darstellung der Fig. 19 übertragen werden. Der grosse Abstand der FM-Grenzleistung von der Shannon-Grenze erklärt sich aus der in Fig. 18 berücksichtigten Regenmarge und der Reserve für den Aufwärtskanal.

In Fig. 19 sind ausserdem die Systemwerte für einige Puls-Code-Modulationstypen mit Phasensprung-Modulation (PCM/PSK) eingetragen. Die Kanalqualität (die hier durch das Quantisierungsrauschen und die Bitfehlerwahrscheinlichkeit bestimmt wird) entspricht qualitativ derjenigen des FM-Systems. Für die Regenmarge ist, unbeachtet des verschiedenen Verhaltens von PCM und FM bei Leistungsschwankungen im Gebiet der Detektionsschwelle, der gleiche Wert wie für Frequenzmodulation (6 dB) eingesetzt. Die Werte für die mehrphasigen Phasensprungmodulationsverfahren (4 \varnothing , 8 \varnothing , 16 \varnothing usw), von denen aber nur die Vierphasenmodulation (4 \varnothing) bis heute einen fortgeschrittenen Entwicklungsstand erreicht hat, liegen etwas günstiger als die Frequenzmodulation, während die klassische 2-Phasensprung-Modulation (2 \varnothing) unter den gemachten Voraussetzungen etwa der Frequenzmodulation entspricht. Die Anwendung breitbandiger Digitalmodulationsverfahren, wie sie bereits bei Raumsonden Verwendung fanden (z. B. Biorthogonalcodes), würde nur noch wenig Leistungsgewinn bringen. Die dazu benötigte Bandbreite steht bei den Sendeleistungen der neueren Intelsat-Transponder ohnehin nicht zur Verfügung.

3.5 Mehrfachzugang

Die modernen Satellitentransponder müssen der Forderung nach Mehrfachzugang genügen. Intelsat 1 (Early Bird) ist nur für die Verbindung zwischen zwei Bodenstationen ausgerüstet; die verschiedenen europäischen Bodenstationen mussten deshalb in der Frühzeit der Transatlantik-Übertragung turnusweise arbeiten. Eine grössere Ausweitung des Nachrichtenverkehrs kann aber nur erreicht werden, wenn über denselben Satelliten ein vermaschtes Netz vieler kleiner Kanalbündel aufgebaut werden kann. Die Mehrfachausnutzung eines Transponders kann durch Aufteilung des Zeitraums (Zeitmultiplex) oder durch Aufteilung des Frequenzraumes (Frequenzmultiplex) unter die verschiedenen Verkehrspartner oder durch Mischung beider Systeme erreicht werden.

Die bereits im Betrieb stehenden und in Vorbereitung befindlichen Netze über die Intelsat-Satelliten arbeiten mit dem Frequenzmultiplexverfahren (Frequency Division Multiplex, FDM), weil diese Mehrfachausnutzungsart sich am besten mit der Frequenzmodulation als Modulationssystem der einzelnen Träger verträgt. Fig. 20 zeigt die typische Anordnung des FDM-Mehrfachzugangsverfahrens. Jede am betrachteten Nach-

richtennetz beteiligte Bodenstation sammelt die bei ihr einlaufenden Sprechkanäle und organisiert sie, wie bei Mehrkanal-Trägersystemen, in eine oder mehreren Gruppen (Normbündel von 24, 60 oder 132 Kanälen). Jede dieser Gruppen wird auf einen Hochfrequenzträger moduliert und in Richtung Satellit abgestrahlt. Die Bodenstationen können grundsätzlich alle Bündel der am Netz beteiligten Partnerstationen empfangen, demodulieren aber nur die für sie bestimmten Sprechkanäle.

Auf diese Weise lassen sich Sprechkanäle, die für verschiedene Empfänger bestimmt sind, sendeseitig zusammenfassen. Bandbreite und Leistung des Satellitentransponders werden entsprechend der Grösse der Kanalbündel auf diese aufgeteilt, wobei die Leistung ungefähr proportional zur Sprechkanalzahl ist.

Das Nebeneinander verschiedener Hochfrequenzträger im selben Transponder bedingt einige zusätzliche Beschränkungen ihrer Ausnutzbarkeit und stellt besondere technische Anforderungen an die Linearitätseigenschaften dieser Geräte. Folgende Übertragungscharakteristiken müssen besonders beachtet werden, wenn mehrere frequenzmodulierte Träger durch dieselbe Wanderfeldröhre verstärkt werden:

a) Die Änderung der Verstärkung über den Frequenzbereich des Transponders ergibt bei FM eine Amplitudenmodulation des Trägers. Diese Spannung, an eine Wanderfeldröhre angelegt, ändert die elektrische Länge der Röhre und moduliert die Phasen aller andern Träger, die durch dieselbe Röhre laufen. Dieser Vorgang überträgt verständliche Information auf die Kanäle aller andern Bündel (intelligible crosstalk).

b) Der zweite der störenden Effekte bei Mehrträgerbetrieb betrifft die Intermodulationsgeräusche als Folge der Nichtlinearität des Satellitentransponders. Um den betreffenden Störspiegel klein zu halten, müssen strenge Linearitätsforderungen bezüglich Amplitude und Phase eingehalten werden. Nun sättigen aber alle Wanderfeldröhren, d. h. ihre Ausgangsleistung steigt bei Eingangssignalen oberhalb einer gewissen Schwelle nicht mehr wesentlich an. Während eine solche Schwellenerscheinung einem einzelnen FM-modulierten Träger nichts anhaben kann, darf bei Mehrträgerbetrieb als Folge der statistisch auftretenden ungünstigen Kombinationen der verschiedenen Trägeramplituden diese Sättigungsleistung nicht ausgenutzt werden. Die Fig. 21 zeigt die Kanalausnutzbarkeit des Intelsat 4-Transponders mit 17°-Antennen bei der Aufteilung der Transponderleistung auf verschiedene HF-Träger variabler Sprechkanalzahl. Im Vergleich dazu hat der Einträgerbetrieb eine Sprechkanalkapazität von $N = 1000$ Kanälen.

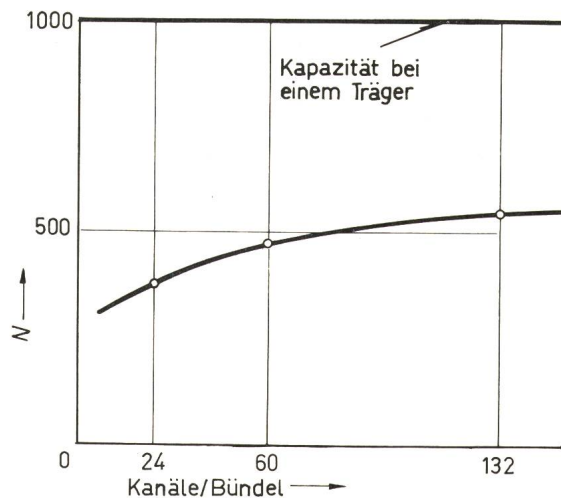


Fig. 21
Kanalkapazität des Intelsat-4-Transponders ($B_{\text{tot}} = 36$ MHz) mit 17°-Antennenbündel als Funktion der Kanalbündelstärke
 Die Kapazität bei einem einzigen HF-Träger beträgt $N \approx 1000$ Sprachkanäle

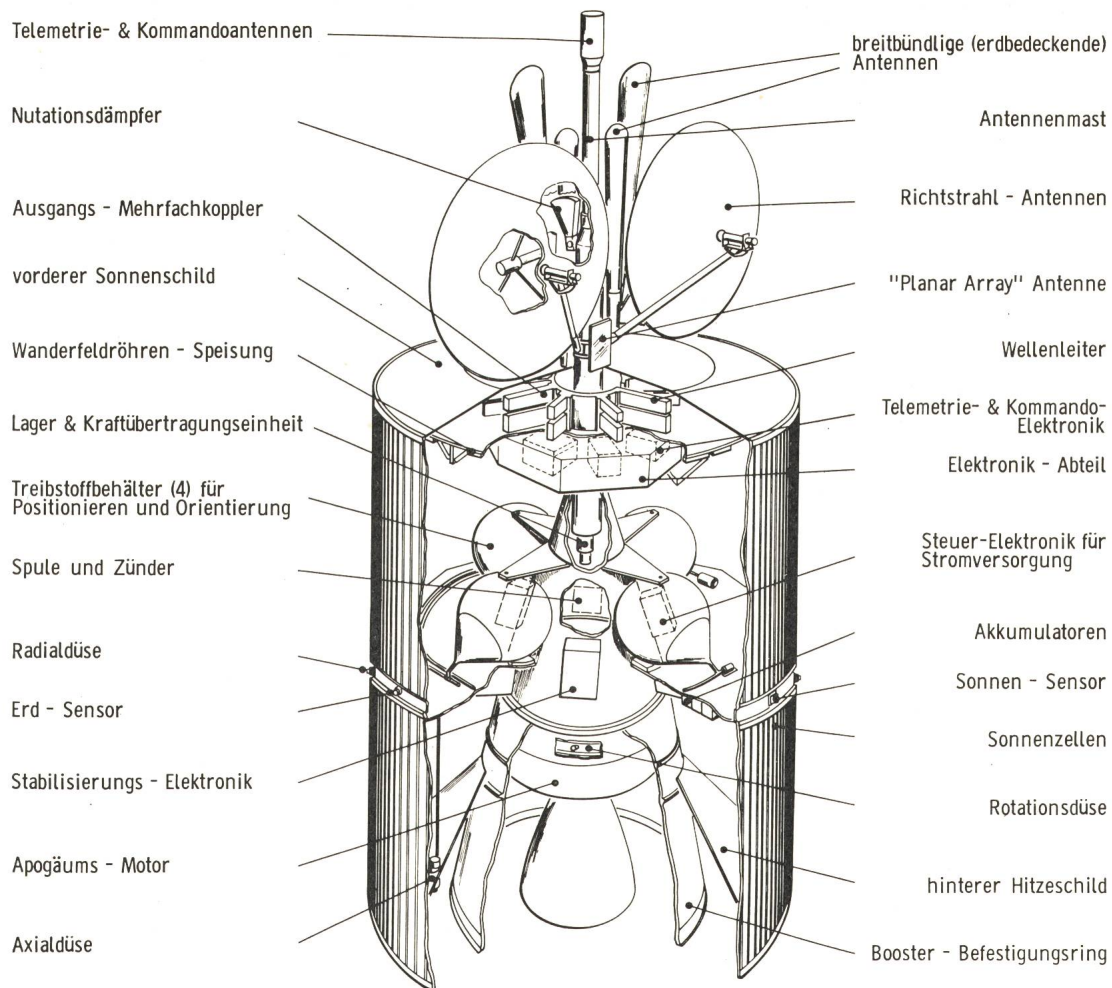


Fig. 22
Schnittbild des Intelsat-4-Satelliten

Ausser dem Leistungsverlust, bedingt durch den Leistungsabstand von der Sättigungsleistung, reflektiert diese Figur ausserdem den zunehmenden Bandbreitebedarf als Folge der bei kleineren Bündeln notwendigen Abstände zwischen den einzelnen Trägern (Filteranforderungen der bodenseitigen Empfänger). Der Mehrkanalbetrieb bedingt demzufolge einen Kapazitätsverlust von ca. zwei. Beim Intelsat 3-Transponder, der bei Verwendung moderner Bodenstationen leistungsbegrenzt arbeitet, kann ein Teil dieses Verlustes durch Anwendung von Rückkopplungsempfängern (Schwellenverminderung) kompensiert werden (siehe Abschnitt 3.4.2). Die in der Literatur angegebene Nennkapazität von $N = 1200$ Sprechkanälen/Transponder (vgl. Tabelle I) liegt deshalb über der Hälfte der Kapazität bei einem einzigen HF-Träger. Die Kanalkapazität des Intelsat 4-Satelliten variiert je nach eingeschalteter Transponder-Antennenkombination.

Bei der Übertragung eines Televisionskanals wird eine ca. 260 Telephoniekanäle äquivalente Trägerleistung gebraucht (Zahl für Intelsat 3).

Die bisher beschriebene Betriebsart ordnet den einzelnen Bodenstationen fix zugeordnete Trägerfrequenzen minimaler Bündelstärke (24) zu. Für Verbindungen kleiner Auslastung kann man einzelne Kanäle geringer Benützungsfrequenz mehreren Empfängern zuordnen, die man durch entsprechende Endausrüstungen dem jeweiligen Bedarf entsprechend auswählen kann.

In Netzen mit vielen Kanälen geringer Ausnutzung ist es vorteilhaft, die Kanäle quasi als «Pool» gemeinsam zu ver-

walten und den jeweiligen Partnern auf Grund des Bedarfs zuzuordnen. Dazu darf, wenn man beim Frequenzmultiplexverfahren bleibt, nur ein Kanal pro HF-Träger aufmoduliert sein. Bei der Comsat-Corporation (Betriebsgesellschaft der Intelsat) wurde ein solches Kleinbenützersystem versuchsweise mit folgenden Daten aufgebaut: 24 Träger von je 1 Kanal, PCM-moduliert, Trägerabstand 100 kHz, 1 Dienstkanal zur Vermittlung, 50 Partnerstationen. Systeme mit einem Kanal/Träger erlauben ausserdem eine Leistungseinsparung, indem man die Trägerleistung in den Sprechlücken ausschaltet (statistische Mittelung).

In die gegenwärtig laufenden Untersuchungen zur besseren Ausnutzung der «teuren» Senderleistung der Nachrichtensatelliten sind auch die Zeitmultiplexsysteme für das Mehrfachzugangsproblem einbezogen worden. Dabei werden die Einzelkanäle durch ein Impulsverfahren (vornehmlich PCM) moduliert. Die Vorteile dieser Lösung sind naheliegend:

- a) Bessere Senderausnutzung durch Aussteuerung bis zur Sättigungsleistung;
- b) Keine Übersprechprobleme zwischen den einzelnen Kanälen.

Die Hauptschwierigkeiten liegen bei der zeitlichen Synchronisierung der verschiedenen Partnerstationen die auf Grund eines Referenzimpulses erfolgen muss. Bei der Comsat-Corporation läuft eine Prototypanlage mit 4×24 Kanälen mit 6,176 Mbit/s Bitfrequenz und Phasensprungmodulation. Die Intervallzeit zwischen den Sendungen der 4 Partnerstationen (Synchronisationsunsicherheit und Einschwingzeit auf den

neuen Träger) beträgt 162 ns. In einer neuen Anlage soll die Bitfrequenz auf 50 Mbit/s gesteigert, die Intervallzeit auf 30 ns vermindert werden. Als Modulationsverfahren ist 2- und 4-Phasen-Phasensprungmodulation (PSK) vorgesehen.

Für die Zukunft wird ein adaptives System geplant, das die Aufteilung einer Zykluszeit auf die verschiedenen Stationen vollautomatisch dem jeweiligen Verkehr anpassen soll. Dazu ist jedoch bei jeder Bodenstation ein Computer notwendig, der aus den von den Partnerstationen gesendeten Kanalbelegungs- informationen nach einem vorbestimmten Programm die jeweilige (von Zyklus zu Zyklus verschiedene) Sendezeit der Impulsfolge der in Frage stehenden Station ausrechnet. Bis zur praktischen Einführung solcher selbstoptimierender Systeme dürfte jedoch noch einige Zeit vergehen.

4. Satellitenspezifische Probleme

4.1 Telemetrie und Kommandosystem

Jeder Fernmeldesatellit trägt, wie das Bild des aufgeschnittenen Intelsat 4 (Fig. 22) zeigt, ausser dem Nachrichtenrelais Hilfseinrichtungen, die für den Betrieb der Relaisstation im Raum notwendig sind. So ist z. B. jeder Satellit mit einem Fernmeßsystem (Telemetriesystem) ausgerüstet, das Daten über den Zustand des Satelliten (Lage im Raum, Zustand der Batterien, Solarzellen, Sensoren etc.) mit einem vom Nachrichtenrelais weitgehend unabhängigen Sendesystem zur Erde übermittelt. Übertragungstechnisch (Bandbreite und Leistung) werden an dieses System geringere Ansprüche gestellt als an das Nachrichtenrelais, da die zu übermittelnden Daten langsam variieren und die Informationsgeschwindigkeit demzufolge gering ist. Eine Ausnahme bezüglich Informationsgeschwindigkeit bilden die Informationen des Lagevermessungssystems des Satelliten.

Der Telemetriesender wird von den Bodenstationen des Nachrichtennetzes oft als Ortungsquelle zum Ausrichten der

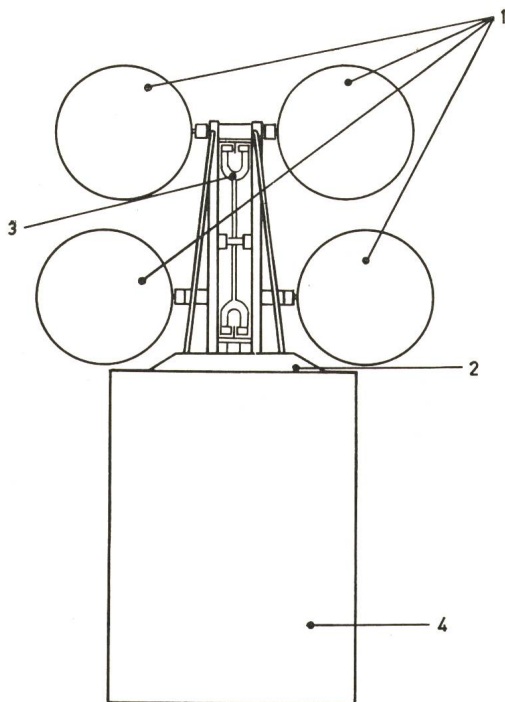


Fig. 23

Zum Prinzip der Nutationsdämpfung eines Versuchssatelliten

1 Antennenspiegel; 2 Antennenplattform; 3 Wirbelstrom-Nutationsdämpfer; 4 Satellitenkörper (rotierend)

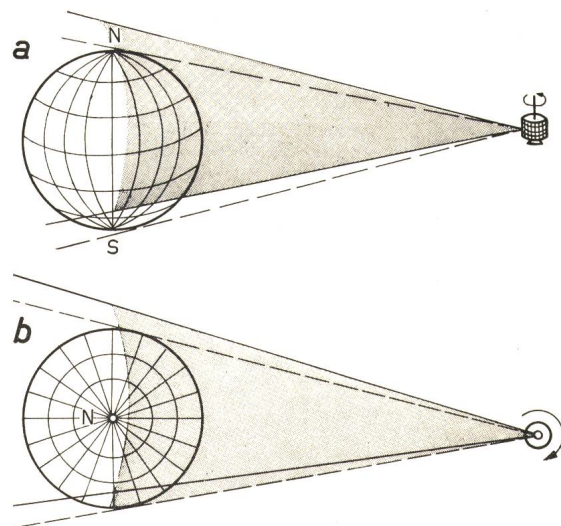


Fig. 24

Probleme der Antennenausrichtung

a Verhältnisse bei Drallachsenfehler

b ungenaue Gegenrotation der Antennenplattform

grossen Antennenspiegel benutzt, bei den Intelsat 4 wird dazu vom Satelliten ein besonderer Hilfsträger abgestrahlt.

Auch vom Boden zum Satelliten ist ein vom Nachrichtenrelais weitgehend unabhängiger, drahtloser Übermittlungspfad vorhanden. Er wird als Kommando-Übertragungsstrecke bezeichnet und dient zur Übermittlung der Fernsteuersignale, die in den Haushalt des Satelliten eingreifen (z. B. Ein- und Ausschalten der Batterie, Ein- und Ausschalten der Sender, Befehle zur Lage- und Positionskorrektur). Auch dieses System ist bezüglich Bandbreite und Leistung anspruchsloser als das Nachrichtenrelais.

Der «technische» Verkehr mit den Satelliten via Telemetrie- und Kommandostrecken erfolgt über ein dazu besonders eingerichtetes Netz von vier, über den Erdball möglichst gleichmässig verteilten, technischen Bodenstationen. Sie liefern genaue Unterlagen über die Bahnelemente der verschiedenen, am Netz beteiligten Satelliten, die den kommerziellen Bodenstationen über ein Kontrollzentrum übermittelt werden. Diese technischen Bodenstationen besorgen auch die Überwachung der von den verschiedenen Benützern beanspruchten Anteile an der Gesamtleistung des Nachrichtenrelais. Da der Satelliten-Transponder als linearer Umsetzer arbeitet, ist die Leistung der verschiedenen Hilfsträger proportional zu den von den verschiedenen Partnerstationen ausgesendeten Trägerleistungen. Die korrekte Aufteilung der Transponderleistung auf die verschiedenen Träger hängt deshalb von der «Sendeleistungsdisziplin» aller Partnerstationen ab. (10...20 Partner pro Transponder.)

4.2 Energieversorgung

Alle im Umlauf und im Bau befindlichen Fernmeldesatelliten werden in der heute bereits klassischen Art durch Silizium-Solarzellen, die die Sonnenenergie in elektrische Energie umwandeln, mit Strom versorgt. Zur Überbrückung der Erdschattenperioden, die bei äquatorialen Synchronsatelliten im Zeitraum der Frühlings- und Herbst-Tag und Nachtgleiche periodisch alle 24 Stunden auftreten, wird ein Teil dieser Energie in Ni-Cd-Batterien gespeichert. Die bisher notwendigen Speiseleistungen (110...160 W bei Intelsat 3, 400...500 W bei Intelsat 4) sind noch klein genug, dass mit der sehr zuverlässigen Montageart der Zellen auf der zylindrischen Satelliten-

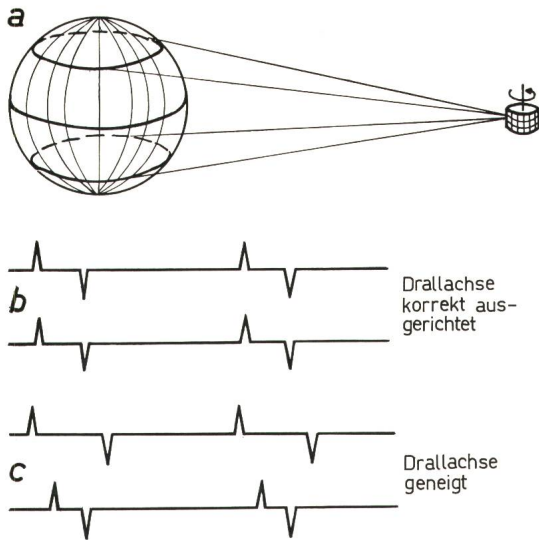


Fig. 25

Erdensorsystem eines drallstabilisierten Nachrichtensatelliten

- a Anordnung der Sensorebenen
- b differenzierte Empfangssignale bei korrekter Ausrichtung der Drallachse
- c differenzierte Empfangsimpulse bei geeigneter Drallachse

oberfläche gearbeitet werden kann, obwohl die für Intelsat 4 benötigte Leistung eine respektable Zylindergrösse erfordert und die Abmessungen dieses grössten Nachrichtensatelliten wesentlich mitbestimmt. Ein Nachteil dieser Montageart ist, dass immer die Hälfte der Siliziumzellen im Schatten liegt.

Bei noch grösseren Leistungen zukünftiger Nachrichtensatelliten wird man mit besonderen sonnenorientierten «Paddles» arbeiten oder andere Energiequellen erschliessen müssen.

4.3 Lagestabilisierung und Positionierung

Hauptaufgabe des Lagestabilisierungssystems ist die Ausrichtung der Antennenbündel auf die Erde. Dabei muss insbesondere beim Intelsat 4 mit den engen Strahlungskeulen für regionale Ausleuchtung der Erde, eine relativ hohe Richtgenauigkeit erreicht werden (Fehler $< 0,3^\circ$). Bei den bis heute gebauten Intelsat-Satelliten basiert das Stabilisierungssystem primär auf der Eigenrotation des Satelliten um seine Längsachse (Spinstabilisierung), die parallel zur Erdrotationsachse ausgerichtet wird. Wie bei einem Kreisel bleibt dadurch diese Achsrichtung unabhängig von der Satellitenbewegung durch den Raum konstant. Als erstes muss die Stabilität dieser Eigenrotation untersucht werden. Die Mechanik lehrt, dass ein starrer Körper um die beiden Hauptachsen mit kleinstem und grösstem Trägheitsmoment stabil rotieren kann. Nun ist aber ein Satellit kein starrer Körper (er enthält z. B. den flüssigen Treibstoff für sein Lagestabilisierungssystem) und bereitet deshalb wie das rohe Ei bei der Rotation um die Hauptachse kleinsten Trägheitsmomentes Stabilitätsschwierigkeiten. Beim Intelsat 4 Satelliten ist, bedingt durch die Platzverhältnisse in der Trägerrakete, gegenüber seinen Vorläufern (siehe Fig. 3) erstmals ein ausgesprochen «langer» Nachrichtensatellit gebaut worden. Ausserdem ist bei diesem Satelliten im Gegensatz zu Intelsat 3 nicht nur ein hornförmiger Reflektor, sondern die ganze Antennenplattform mit dem Nachrichtenrelais (vergl. Fig. 22) dauernd auf die Erde ausgerichtet (eine Umdrehung pro Tag). Nur der Satellitenmantel mit den eingebauten Hilfsystemen «rotiert» als Kreiselkörper (ca. 1 U./s). Zur stabilen Rotation solcher Körper um ihre Längsachse muss ein beson-

derer Nutationsdämpfer verwendet werden. Dieses Gerät besteht aus einer im Antennenmast eingebauten, magnetisch bedämpften «Wippe» (siehe Fig. 22). Fig. 23 zeigt diese Einrichtung im Antennenmast eines Versuchssatelliten.

Da das Nutationsdämpfersystem sehr langsame Änderungen der Drallachsrichtung nicht zu korrigieren vermag, muss ein aktives Lageregelsystem vorhanden sein, das die ständige Erdausrichtung der Antenne, beim Intelsat 4 der Antennenplattform, gewährleistet. Fig. 24a zeigt eine Strahlungskeule mit Richtfehler als Folge einer Auswanderung der Drallachse. Ein weiterer Regelkreis ist zur Einstellung einer korrekten Drehbewegung der Antennen relativ zum Satelliten notwendig. Fig. 24b zeigt die Strahlungskeule bei nicht ideal rotierender Antenne bzw. Antennenplattform.

Ausgangspunkt jedes Regelsystems sind Sensoren zur Feststellung der Abweichungen vom Sollzustand. Die neueren Intelsat-Typen orientieren sich mit Hilfe von auf dem rotierenden Teil placierten Erdsensoren über ihre relative Lage zur Erde (vgl. Fig. 25). Zwei im fernen Infrarot (14...16 μm) arbeitende Empfänger, deren Messebenen gemäss Fig. 25 gegeneinander etwas geneigt sind, stellen den Durchgang des Erdhorizonts durch ihr Blickfeld fest, indem die empfangene Strahlung ihre Intensität abrupt ändert. Differentiation dieser Diskontinuität ergibt impulsförmige Signale, deren zeitliche Struktur von der Lage des Satelliten abhängt. Diese Signale können zur Einleitung einer Änderung der Rotationsgeschwindigkeit oder der Drallachsenrichtung benutzt werden.

Das Bremsen oder Beschleunigen der Antennenrotation (bzw. Satellitenmantelrotation) erfolgt durch einen Elektromotor. Die Information zur Steuerung dieses Antriebs gewinnt man aus dem Vergleich der Ausgänge der Erdsensoren mit einem durch die Relativbewegung der Antennen auf dem Satellitenkörper erzeugten Positionsimpuls. Anstelle der Erdsensoren kann auch die periodische Messung des Sonnenstandes als Richtinformation benutzt werden. Diese beim Intelsat 4 angewandte Methode benötigt ausserdem eine Uhr zur Korrektur des über die Tageszeit variablen Sonnenstandes.

Der Aktuator für die Drallachsenkorrektur besteht aus einer exzentrisch zur Drallachse angeordneten axialen Schubdüse auf dem rotierenden Teil des Satelliten, die impulsförmig betrieben wird. Wenn sie während des Umdrehungsvorganges im rechten Zeitpunkt gezündet wird, ergibt sich nach den Gesetzen

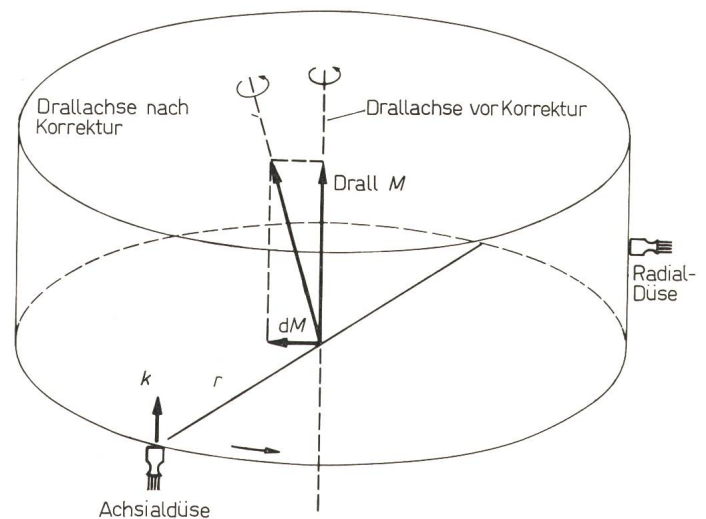


Fig. 26

Zum Prinzip der Drallachsenkorrektur von spinstabilisierten Satelliten

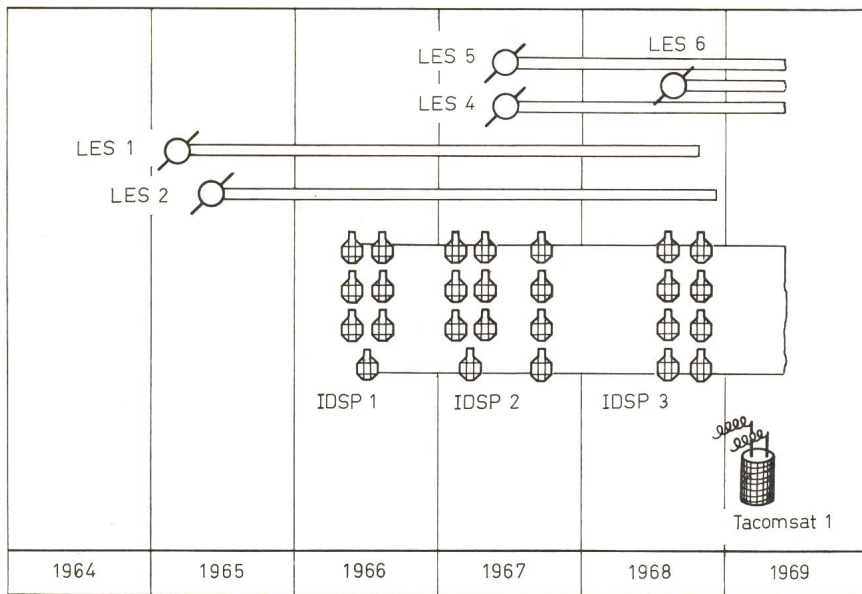


Fig. 27
Geschichte der militärischen US-Satelliten
Die Balken bezeichnen die Lebensdauer

Synchronbahn führen. So erfahren zum Beispiel alle atlantischen Satelliten, mit denen am meisten praktische Betriebserfahrung vorliegt (Early Bird seit 1965), eine Westdrift (Early Bird ca. 16^0 geographische Länge pro Jahr) und eine Drehung der Bahnebene zum Äquator (Early Bird $0,9^0$ Drehung pro Jahr). Vom Standpunkt der Benutzer aus wäre es wünschenswert, wenn die Position der Satelliten innerhalb der Bündelbreite der bodenseitigen Antennen stabil gehalten würden ($\pm 0,12^0$). Eine Übersichtsrechnung zeigt aber, dass dann zur Kompensation der Bahnebenedrehung sehr viel Energie aufgewendet werden müsste. Bei den bisherigen

der Mechanik eine Korrekturkomponente zum Drallvektor (vgl. Fig. 26), die diesen korrigiert. Hinter diesen Schubdüsen stehen Steuerventile und Treibstoffbehälter (vgl. die birnenförmigen Gebilde der Fig. 22). Der im Satelliten mitgeführte Treibstoff besteht aus einer Spezialflüssigkeit (Hydrazin), die gasförmig aus den Düsen austritt. Ein Druckgas (Stickstoff) sorgt für das Ausschleusen, wenn die entsprechenden Ventile geöffnet sind. Flüssigkeit und Druckgas befinden sich im selben Behälter und werden auf Grund ihrer verschiedenen spezifischen Dichten und der Zentrifugalkraft getrennt. Düsen und Treibstoffbehältersystem sind mehrfach ausgeführt (Redundanz). Die Betätigung dieses Orientierungssystems geschieht via Kommandosystem von den «technischen» Bodenstationen aus auf Grund von Computerauswertungen der «rückgemeldeten» Lageinformationen des Satelliten. Die Drallachsenkorrektur ist relativ selten notwendig. Beim Intelsat 4 wird mit einer Achsdrift von $0,006^0$ pro Tag und einem Achsaufrichtemanöver pro 2 Monate gerechnet.

Die Achsialdüsen mit dem zugehörigen Treibstoffverteilsystem werden ausser zur Drallachsenkorrektur auch zur Positionierung des Satelliten benutzt. Für diese Aufgabe benötigt man zusätzliche Radialdüsen, deren Schubachsen durch den Schwerpunkt des Satelliten gehen. Pulsständiges Zünden dieser Radialdüsen im richtigen Zeitmoment des Eigenrotationsvorganges verschiebt den Satelliten in der Bahnebene. Dauerndes Zünden der Achsialdüsen verschiebt den Satelliten senkrecht zur Bahnebene. Dieses Positionierungssystem wird beim Einschleusen des Satelliten in die Synchronbahn zur Feinkorrektur der nach den einzelnen Antriebsphasen erreichten Flugbahnen verwendet. Positionierungsmanöver sind aber auch nach einmal erreichter perfekter Flugbahn notwendig. Geostationäre Satelliten erfahren nämlich zusätzliche Kräfte durch die Sonne, den Mond und die Unrundheit der Erde, die zu Abweichungen von der idealen

Intelsat-Satelliten verzichtet man deshalb auf dieses aufwendige Manöver und toleriert die allmähliche Drehung der Bahnebene. Für den erdgebundenen Beobachter führt diese Drehung zu einer scheinbaren Bewegung des Satelliten in der Form einer 8 um die stationäre Position. Die damit verbundene Forderung nach einer beschränkten Beweglichkeit der Bodenantennen lässt dann eine zu häufige Korrektur der Longitudinal-Position nicht als notwendig erscheinen. Early Bird wurde bisher nur in Intervallen von 1/2 bis 3/4 Jahren Korrekturimpulse zur Kompensation der Westdrift erteilt und damit Schwankungen seiner geographischen Länge von einigen Grad zugelassen.

Die Menge des mitgeführten Treibstoffs richtet sich nach der Grösse des Satelliten und den vorgesehenen Korrekturmanövern. Sie beträgt bei Intelsat 1 (Early Bird) ca. 1 kg, bei Intelsat 3 ca. 18 kg und bei Intelsat 4 ca. 100 kg.

Ausser diesem klassischen Stabilisierungsprinzip durch Eigenrotation und Schubdüsen sind andere Lösungen vorgeschlagen und teilweise an Versuchssatelliten der NASA (ATS, Applied Technology Satellites) erprobt worden. Das Prinzip der Gravitations-Gradient-Stabilisierung beruht auf der Tatsache, dass sich ein langes Objekt im Raum als Folge der mit der Radialdistanz von der Erde variierenden Gravitationskräfte senkrecht zur Erde stellt. Das «erdnähere» Ende des langen Körpers ist schwerer als das «erdferne» Ende. Da das Richt-

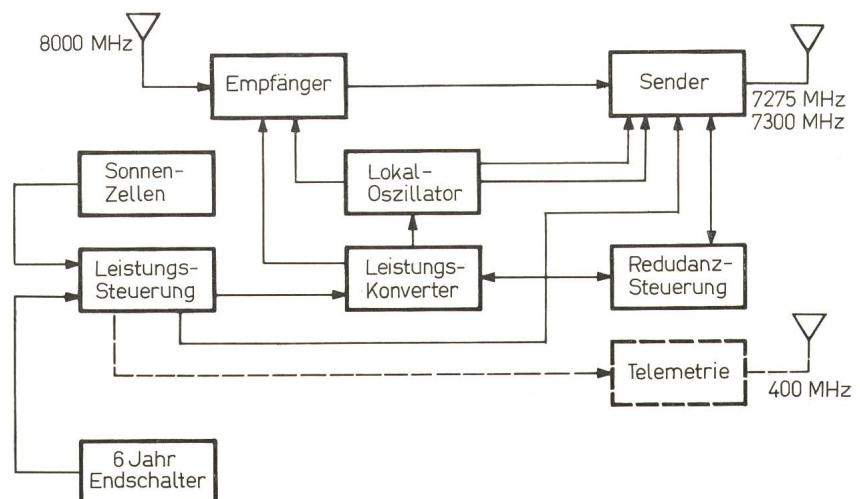


Fig. 28
Elektrisches Blockschema der IDSPS-Satelliten

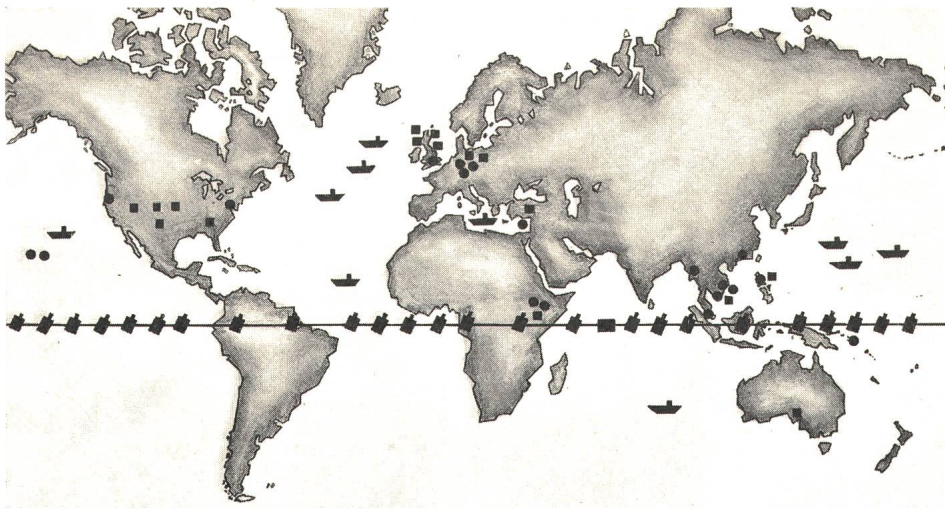


Fig. 29
Militärisches Bodennetz für die taktischen Verbindungen über das IDSPS-Netz
 Die Satelliten sind über dem Äquator aufgereiht eingezeichnet

Satellitenbahnen:

- Etwas subsynchron mit ca. 30° Longitudinaldrift pro Tag.
- Durch etwas verschiedene Geschwindigkeiten der Einzelsatelliten wird eine quasi-statistische Verteilung um den Erdball in der Äquatorebene erreicht.

Diese Wahl der Satellitendaten ist offenbar ein Kompromiss zwischen finanziellem Aufwand (einfache Satelliten), Störbarkeit und Zerstörbarkeit (grosse Anzahl) und Einfachheit des

Betriebes (wegen der langsamen Drift ist kein häufiger Satellitenwechsel pro Verbindung erforderlich).

Moment mit dem Abstand der beteiligten Massen zunimmt, werden diese an langen Teleskopstäben (44 m Länge) befestigt.

Andere Lösungen des Stabilisierungsproblems verwenden nichtrotierende Satelliten mit eingebauten Schwungrädern kombiniert mit Schubdüsen zur Achskorrektur.

5. Militärische Nachrichtensatelliten

Dieser letzte Abschnitt beschreibt, soweit darüber Angaben vorliegen, die militärischen Nachrichtensatelliten. Alle Daten beziehen sich auf Flugkörper, die von den Vereinigten Staaten von Amerika in Umlauf gebracht wurden. Die USA hat ein grosses Bedürfnis an strategischen Verbindungen, die heute den ganzen Erdball umspannen. Es handelt sich dabei um ausgesprochene Weitdistanz-Nachrichtenkanäle. Daneben hat aber in den letzten Jahren auch die Frage der taktischen Verbindungen über Satelliten, die ja im allgemeinen nur in lokalen Netzen Verwendung finden, grössere Bedeutung erlangt.

Die amerikanischen Militärbehörden waren schon sehr früh aktiv mit dem Couriersatellitenprogramm (1960), das aber wenig praktischen Erfolg zeitigte.

Eine grössere Aktivität auf dem Gebiet der strategischen Satellitenverbindungen ist seit 1964 mit dem Beginn des «Initial-Defense Communication Satellite Project» (IDCSP) zu verzeichnen (Fig. 27). Die Grundphilosophie dieses Systems sieht einen möglichst einfachen Satelliten vor, der in grosser Stückzahl verwendet wird. Der Basissatellit, von dem heute ca. 25 Exemplare im Umlauf sind, hat die folgenden Eigenschaften:

Nachrichtenrelais:

- 3 Watt Wanderfeldröhre im unteren X-Band mit Frequenzversetzung zwischen Sender und Empfänger.
- Antenne mit 28° Öffnung und rotationssymmetrischem Diagramm erlaubt beschränkte Änderungen der Drallachse.
- Kein Despin der Antenne
- Modulationssystem geheim, vermutlich Pulsmodulationssystem

Satellitentechnische Hilfseinrichtungen:

- Kein Kommando- und Telemetriesystem. (Bei einigen Satelliten ist ein Telemetriesystem zur Gewinnung von grundsätzlicher Information über ihr Verhalten eingebaut).
- Stabilisierung durch Eigenrotation
- Kein Orientierungs- und Positionierungssystem
- Stromversorgung aus Sonnenszellen ohne Speicherbatterie (25...40 W)

Mechanische Daten:

- Gewicht ca. 45 kg
- Durchmesser ca. 91 cm
- Höhe ca. 81 cm

Fig. 28 zeigt das Blockschema eines solchen Satelliten. Es fällt der automatische Schalter auf, der den Satelliten nach 6 Jahren ausschaltet, um den von ihm beanspruchten Frequenzbereich wieder freizugeben, was wegen des Fehlens einer Kommandostrecke bei diesem Satelliten vom Boden aus nicht möglich wäre. Die mit den IDCSP Satelliten arbeitenden Bodenstationen haben nach amerikanischen Angaben Antennenspiegeldurchmesser von 12 m. Auf Schiffen wird mit Antennenspiegeln von 1,8 m Durchmesser gearbeitet, wobei allerdings die empfangene Leistung für einen Sprechkanal nicht ausreicht (Telegraphiebetrieb).

Neben diesen Satelliten für den Aufbau des strategischen Verbindungsnetzes hat die amerikanische Armee mehrere Versuchssatelliten der LES Reihe (Lincoln Experimental Satellites) zur Erprobung neuartiger Übermittlungsverfahren abgeschossen (Fig. 27). Fig. 29 zeigt das zum IDSPS gehörende Bodennetz.

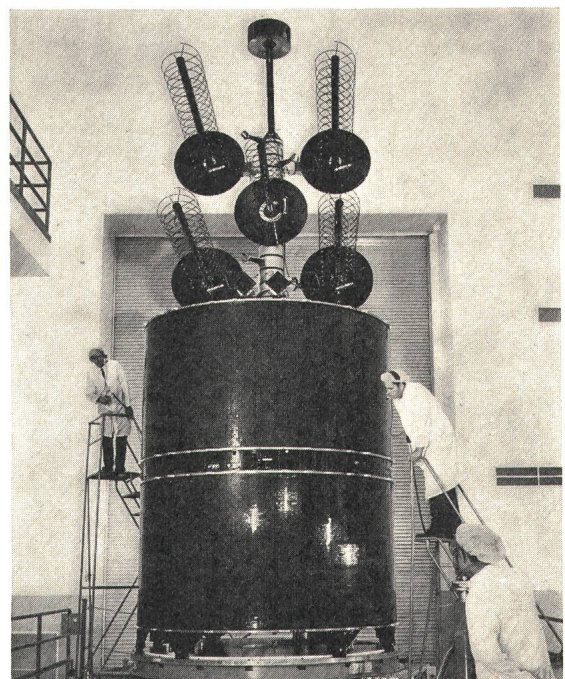


Fig. 30
TACOMSAT 1

Ein grösserer Schritt in Richtung taktischer Nachrichtensatelliten wurde mit dem Bau des Tacomsat I vollzogen (Abschluss Februar 1969). Dieser Satellit arbeitet sowohl im SHF (x-Band) wie im UHF Band (225...400 MHz) worauf die Hörner und die grossen Helixantennen in Fig. 30 hinweisen. Der Übergang ins UHF-Band bringt Probleme des Schwundes, hervorgerufen durch die Ionosphäre, sowie Probleme der Mehrfachausbreitung mit sich. Diese Probleme sind bereits vor dem Bau des Tacomsat durch die LES-Satelliten abgeklärt worden. Ein Grund für den Übergang in den UHF-Bereich liegt zweifelsohne bei der für Satelliten-Übertragungsstrecken benötigten Bodenantennen. Nach der Gl. (1) gilt für die Empfangsleistung P_e einer drahtlosen Übertragungsstrecke:

$$P_e = \frac{P_s G_s G_e}{(4 \pi R/\lambda)^2} \quad (16)$$

Danach müsste bei festgehaltenem Antennengewinn G_e (Bündelöffnung) der Empfangsantenne die Empfangsleistung mit zunehmender Wellenlänge λ zunehmen. Die Bündelöffnung darf bei taktisch brauchbaren Antennen nicht zu klein sein

(keine automatische Nachführung). Man kann den Vorzug längerer Wellen für taktische Verbindungen auch daraus einsehen, dass eine Antenne relativ grosser Bündelöffnung im SHF-Bereich eine kleinere effektive Fläche aufweist, als bei tieferen Frequenzen. Antennen der taktisch gewünschten Bündelbreiten haben im UHF-Bereich feldmässig handhabbare Abmessungen während SHF-Antennen «leistungsmässig» zu klein sind.

Tacomsat I hat ähnliche Abmessungen und Hilfseinrichtungen wie Intelsat 4.

Mit Tacomsat I, dessen effektive abgestrahlte Leistung 6 kW beträgt, will die amerikanische Air Force und Armee die Brauchbarkeit synchroner Satelliten für taktische Verbindungen zwischen Schiffen, Flugzeugen und kleinen mobilen Stationen bis herunter zu tragbaren Geräten und Antennendurchmessern von 30 cm erproben.

Adresse des Autors:

Dr. W. Guggenbühl, Privatdozent ETH, Contraves AG, Schaffhauserstr. 580, 8052 Zürich.

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Elektrische Energie-Technik und -Erzeugung Technique et production de l'énergie

Die Kerntechnik in der Bundesrepublik Deutschland

621.039(430.1)

[Nach: Die kerntechnische Industrie in der Bundesrepublik Deutschland. Nuclex 69, Basel 1969]

Die Bundesrepublik Deutschland ist eines der wenigen Länder, dessen Industrie, gestützt auf internationale Zusammenarbeit, aber ebenso auf eigene Forschungen und Entwicklungen, in allen Bereichen der Kerntechnik tätig ist. Es können komplette Kernkraftwerke mit drei verschiedenen Reaktortypen angeboten werden, nämlich mit einer der beiden Varianten des Leichtwassertyps oder dem gasgekühlten Graphitreaktor. Zwei Kernkraftwerke von je 600 MW sind im Bau und kürzlich wurde das ausserhalb der USA grösste Werk mit 1150 MW in Auftrag gegeben; jedes dieser Werke umfasst einen Reaktor und einen Turbogeneratorsatz. Bei Ausschreibungen in der Bundesrepublik können Kernkraftwerke künftig als «normale» Anlagen angeboten werden. Bis 1980 wird mit einer installierten Kernkraftwerkskapazität von 25 000 MW gerechnet.

Die deutschen Kernkraftwerkangebote haben sich auch international als wettbewerbsfähig erwiesen und es konnten bereits zwei Exportaufträge hereingebracht werden. Besonderes Interesse findet die Zweizweckanlage, die neben elektrischer Energie auch Prozessdampf für die Industrie erzeugt. Die Forschungen werden in verschiedenen Richtungen vorwärts getrieben, doch gelten besondere Anstrengungen der Entwicklung der schnellen Brüter und der Hochtemperaturreaktoren, wofür der Staat die nötigen Mittel bereitstellt. Das erste Handelsschiff Europas mit Atomantrieb wurde in der Bundesrepublik gebaut und 1969 in Betrieb genommen, womit noch unterstrichen sei, wie weit das Arbeitsfeld der Industrie auf dem Gebiete der Kerntechnik ist. K. Winkler

Strahltriebwerke in thermischen Kraftwerken

621.454:621.318.122

[Nach E. Ellwanger: Strahltriebwerke in der Elektrizitätsversorgung für Spitzenlast und steile Lastanstiege. Elektrizitätswirtschaft 68(1969)15, S. 523 bis 531]

Ein technisch und wirtschaftlich schwieriges Problem der Elektrizitätsversorgung ist die Schnellbereitschaft zur Deckung von Spitzenlast. Gasturbinen sind für diesen Zweck besonders gut geeignet, für deren rasche Versorgung mit heissem, unter Druck stehendem Gas in zunehmendem Masse Strahltriebwerke eingesetzt werden. Die Nordwestdeutsche Kraftwerke AG (NWK) hat erstmals in Deutschland, gestützt auf Erfahrungen in England, zwei derartige Anlagen in Betrieb genommen und so gute Erfolge damit erzielt, dass die Aufstellung einer weiteren Gasturbinenanlage mit Strahltriebwerken geplant ist. Da bis zu 800 Ausnutzungsstunden/Jahr die Gesamtkosten solcher Kraftwerke am tiefsten sind (bei höherer Betriebsstundenzahl liegt ein mit Kernenergie betriebenes Pumpspeicherwerk günstiger), wird man in Zukunft, besonders zur Bewältigung schmaler Lastspitzen und steiler Lastanstiege, Gasturbinenanlagen mit Strahltriebwerken als eigene Spitzenkraftwerke bauen, um allen Anforderungen genügen zu können. K. Winkler

Elektronik, Röntgentechnik — Electronique, radiologie

Aktive Zenerdioden

565-567

621.382.2

[Nach J. Preis: High-performance Low-cost «Active Zener» Regulators. Wireless Wld. 10(1969)1408, S. 484...486]

Die Basis-Emitterdiode von Siliziumtransistoren zeigt bekanntlich im Sperrgebiet bei etwa 6...9 V einen sehr steilen Zener-Durchbruch. Insbesondere sinkt der dynamische Widerstand im Gegensatz zu normalen Zenerdioden schon für kleine Ströme auf einen sehr niederen Wert, der sich über den gesamten nutzbaren