

Nachrichtenübertragung im Weltraum

Autor(en): **Paul, H.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **90 (1972)**

Heft 33: **SIA-Heft, Nr. 6/1972: Nachrichtentechnik**

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-85282>

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.

SIA-Heft Nr. 6, 1972, Nachrichtentechnik

Nachrichtenübertragung im Weltraum

DK 621.39:629.19

Von Dr. H. Paul, Baden

1. Nachrichtenübertragung als Transportproblem

1.1 Nachricht und Information

Wenn an irgendeinem Ort ein Ereignis stattfindet, welches irgendwohin mitgeteilt wird, so dass man «sich danach richten» kann, dann ist das eine *Nachricht*. Allgemeiner gesagt, ist jede nicht voraussehbare, aber deutbare Folge von Ereignissen eine Nachricht. Diese *informiert* den Empfänger – sei es nun Mensch, Tier oder Pflanze oder sei es irgendein Messgerät oder ein Computer –, und zwar um so mehr, je unerwarteter das Ereignis eintritt.

Die Nachricht enthält also für den aufnehmenden Organismus oder Automaten Information; ein Mass dafür ist das «bit». Diese Einheit der Information liefert eine Nachrichtenquelle, wenn sie dem Empfänger die Möglichkeit gibt, zwischen zwei und nur zwei Zuständen eine Auswahl zu treffen, also beispielsweise zwischen «Schwarz» und «Weiss» oder «Ein» und «Aus» eines Stromes usw.

Der Informationsgehalt eines Buchstabens unseres Alphabets ist durchschnittlich 4,8 bit, eine vollgeschriebene Schreibmaschinenseite hat etwa 6000 bit, und ein Bild hat sogar 10^7 bit. Eine moderne Grossrechenanlage kann bis 10^{10} bit speichern. Alle diese Informationsspeicher werden aber weit übertroffen vom menschlichen Gehirn, welches 10^{13} bis 10^{15} bit speichern kann, und das in einem Volumen (einschliesslich Sensoren) von nur 5000 cm^3 !

1.2 Nachricht und Signal

Will man nun eine Nachricht vom Ort der Quelle zu einem entfernten Empfänger übertragen, so liegt ein Transportproblem besonderer Art vor, denn eine Nachricht lässt sich nicht so ohne weiteres transportieren wie Material, Menschen oder elektrische Energie. Bei diesen kann nämlich das Gut direkt auf oder in das Transportmittel (Bahn, Schiff, elektrische Leitung o.ä.) verladen werden; bei der Nachricht geht das aber nicht. Das Gedankengut eines Menschen kann man nicht transportieren, es muss erst im Mund und Kehlkopf in Laute umgewandelt werden, welche dann als Schallwellen durch die Luft als Transportmittel zum aufnehmenden Ohr des Empfängers gelangen. Am Ort der Nachrichtenquelle findet also eine Wandlung des Transportgutes, der Nachricht, durch den Kodierer in ein Signal und beim Empfänger die entsprechende Rückwandlung im Dekodierer statt. Die Signale sind transportierbar. Es können dies Schallwellen, elektrische Ströme in der Telefonleitung, die Schrift auf Papier oder auch ein Bild sein. Allerdings muss man sich darüber klar sein, dass bei der Umwandlung auch Beschädigungen des Transportgutes auftreten können, die man in der Nachrichtentechnik allgemein als *Verzerrungen* bezeichnet.

Ebenso wie auf das mit einem Lastauto transportierte Gut unerwünschter Staub abgelagert wird, kommt auch beim

Signaltransport ungewollt von aussen her das «Rauschen» bzw. das Geräusch hinzu, welches, wie der Staubbelag, möglichst schwach gehalten werden muss, damit das Signal und somit auch die Nachricht deutlich verständlich bleibt.

Schliesslich entstehen beim Transport auch noch Verluste. Diese sind bei Menschentransporten natürlich ausserordentlich klein. Bei Materialtransporten können es vielleicht einmal Promille sein, und beim Energietransport auf Hochspannungsleitungen rechnet man mit 1 bis 5% Verlusten. Bei der Signalübertragung aber steigen die Verluste oft weit über 90%, was man in diesem Falle jedoch hinnehmen kann, da sich die ankommenden schwachen Signale verhältnismässig einfach wieder auf ihren ursprünglichen Wert verstärken lassen.

Ein Nachrichtenübertragungssystem hat also prinzipiell den in Bild 1 dargestellten Aufbau.

1.3 Das Übertragungsmedium

Der Weg, den die Signale vom Absender über den Kodierer, das Übertragungsmedium und den Dekodierer zum Empfänger durchlaufen, heisst der *Übertragungskanal*. Das *Übertragungsmedium* ist in der elektrischen Nachrichtentechnik entweder eine Leitung bzw. ein Kabel – leitungsgebundene Übertragung –, oder es ist, bei drahtloser Übertragung, die Funkstrecke. In der Leitung sind die ungewollten Verluste reine Stromwärme des Kupfers, und sie wachsen daher nach einem Exponentialgesetz mit zunehmender Leitungslänge an.

Bei drahtloser Übertragung tritt keine Erwärmung des Übertragungsmediums auf, hingegen hat man mit Verlusten infolge der sphärischen Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen zu rechnen, wobei die Abschwächung auf dem Weg vom Sender zum Empfänger proportional zum Quadrat der Entfernung ist. Diese kugelförmige Ausbreitung der Wellen hat zur Folge, dass beispielsweise ein Signal, welches der Sender Beromünster ausstrahlt, in St.Gallen – das heisst in rund 100 km Entfernung – ungefähr fünfmillionenmal schwächer ankommt.

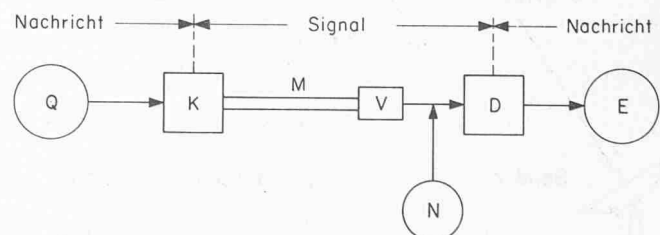


Bild 1. Schema einer Nachrichtenübertragung

Q	Nachrichtenquelle	V	Verluste
K	Kodierer	N	Geräuschquelle
M	Medium	D	Dekodierer
		E	Nachrichtempfänger

rund 127 min oder 2 h einmal die Erde, und er ist daher nur für etwa 20 min auf der Strecke zwischen Europa und Amerika gleichzeitig sichtbar [2]. Man könnte dann bei jedem Umlauf während etwa 20 min eine Funkverbindung über ihn aufrechterhalten. Auf diese Weise wurden tatsächlich die ersten Richtfunkübertragungen über den Nachrichtensatelliten «Telstar» erfolgreich durchgeführt.

Wesentlich günstiger liegen die Verhältnisse, wenn der Satellit sich in 35830 km Höhe über der Erde befindet, denn dann ist seine Umlaufzeit $U = 86400 \text{ s} = 24 \text{ h}$. Stimmt dann noch seine Umlaufrichtung mit dem Drehsinn der Erdrotation überein, so scheint er von der Erde aus gesehen über einem Punkt des Erdäquators still zu stehen (geostationärer oder Synchronsatellit) [3]. Liegt dieser Punkt noch bei 30° westlicher Länge, so befindet sich die Relaisstation halbwegs zwischen Europa und Amerika am richtigen Ort. Vom Satelliten aus gesehen erscheint dann die Erde mit einem Durchmesser von $17,5^\circ$. Man kann also eine Hemisphäre durch eine Antenne mit einem Strahlungskegel von $17,5^\circ$ fast voll ausleuchten, so dass ein Funkverkehr zwischen dem westlichen Teil von Europa und Afrika einerseits und dem östlichen Teil von Nord- und Südamerika andererseits möglich ist (Bild 4).

2.2 Technik und Organisation des Nachrichtenverkehrs über Satelliten

Der Richtfunkverkehr von der Erde hinauf zum Satelliten und von dort wieder hinab zur Erde verlangt wegen der sehr grossen Länge der Funkstrecke ($R = 36200 \text{ km}$) einerseits und wegen der beschränkten an Bord verfügbaren elektrischen Leistung andererseits eine recht sorgfältige Auslegung des gesamten Übertragungssystems.

Durch den Abstand R zwischen Bodenstationsantenne und Satellitenantenne wird bei der Wellenlänge $\lambda = 4,83 \text{ cm}$ das Signal um den Betrag

$$a = \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 = 8,8 \cdot 10^{19}$$

geschwächt, so dass bei einer Sendeleistung des Bodensenders von $P_s = 1,6 \text{ kW}$ nur noch

$$P_e = \frac{P_s}{a} = 1,8 \cdot 10^{-17} \text{ W}$$

beim Satelliten ankommen. Diese Empfangsleistung wird aber wesentlich erhöht durch den Gewinn G_E der Bodenantenne, welche $D = 28 \text{ m}$ Durchmesser hat und damit einen Gewinn

$$G_E = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 = 1,7 \cdot 10^6$$

Auch die Bordantenne liefert noch einen kleinen Gewinnbeitrag von $G_S = 7,5$, so dass nunmehr die Empfangsleistung

$$P_e = \frac{P_s}{a} G_E G_S = 2,3 \cdot 10^{-10} \text{ W}$$

wird.

Dieses hochfrequente Signal wird von der Empfänger-Sender-Kombination an Bord, *Transponder* genannt, auf der neuen Wellenlänge von $7,28 \text{ cm}$ mit einer Leistung von $1,6 \text{ W}$ über die Bordantenne zur Erde hinabgestrahlt. Dort trifft nun eine Leistung von $1,9 \cdot 10^{-13} \text{ W}$ ein, welche nach Demodulation und Verstärkung an den Teilnehmer abgeliefert werden kann.

Das hier geschilderte Übertragungssystem sieht recht einfach aus, doch verlangt der Betrieb mit hoher Zuverlässigkeit einen umfangreichen Nebenapparat. Für den Einschuss und die Platzierung des Satelliten mit Hilfe einer Träger Rakete ist ein grosses Bahnverfolgungs- und Telemetrienetz auf der ganzen Erde nötig. Es sind dann Einrichtungen für die Übermittlung von Kommandos an den Satelliten von der Erde aus vorzusehen, welche natürlich an Bord geeignete Kommandoempfänger und Rückmeldesender verlangen. Sodann muss am Boden jederzeit der Betriebszustand des ganzen Satelliten überwacht werden können, wozu neben den Bordmessgeräten für die elektrischen Einrichtungen, Temperaturregelung, Lage-

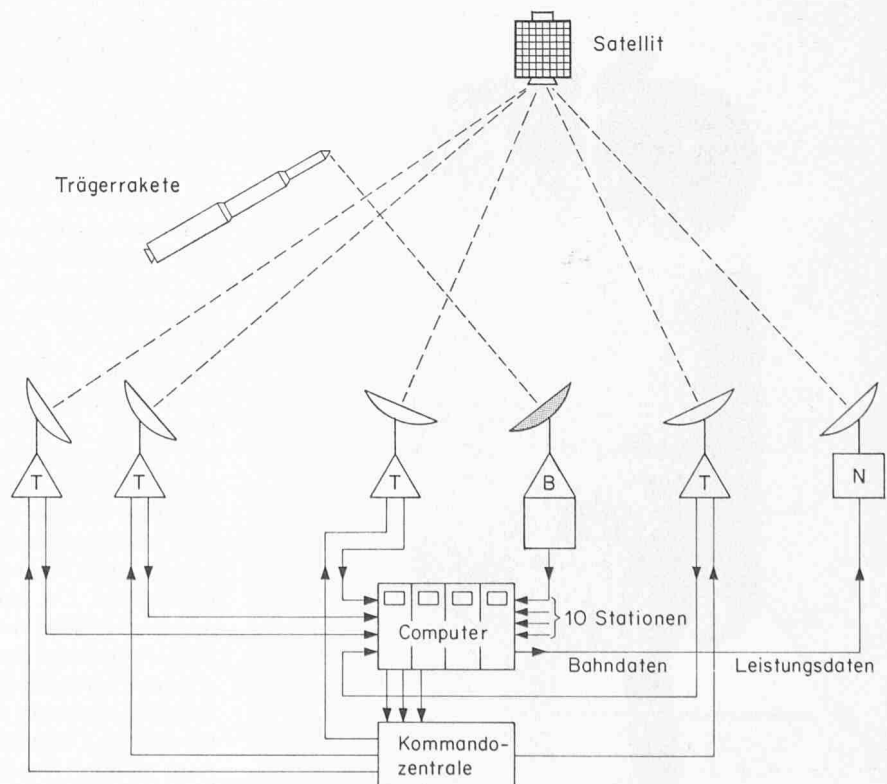


Bild 5. Technisches Bodennetz für den Betrieb eines Nachrichtensatelliten

- B Bahnverfolgungsstation für Einschuss
- N Nachrichtenstation
- T Technische Station (Telemetrie, Kommandostrecke, Überwachung der Leistungsverteilung)

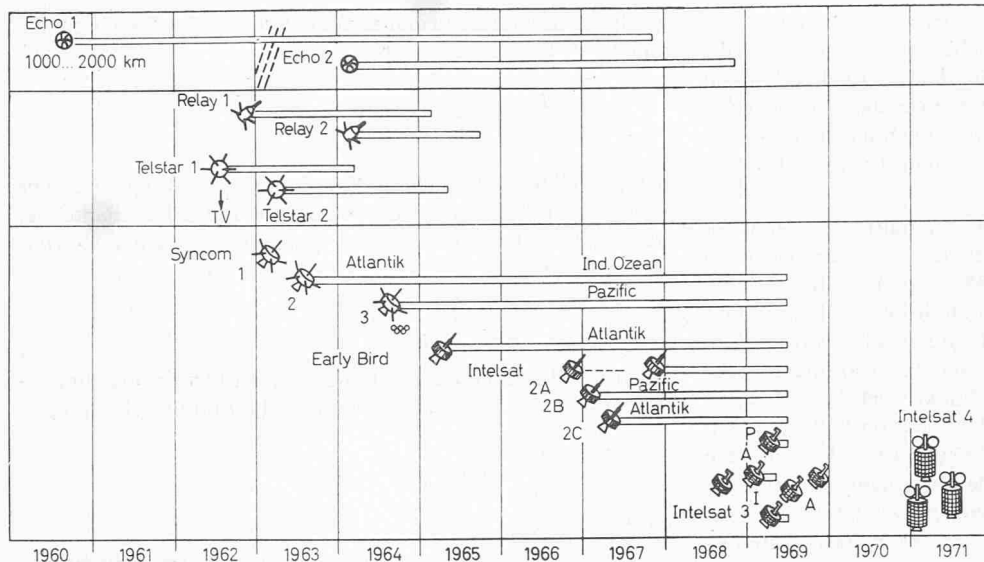


Bild 6. Zivile US- und Intelsat-Nachrichtensatelliten, dargestellt in Funktion ihres Startdatums

und Positionskorrekturen usw. eine umfangreiche Telemetrieanlage an Bord bereitgestellt werden muss nebst den dafür nötigen besonderen Sende- und Empfangseinrichtungen. Am Boden werden alle Daten natürlich mit Computern verarbeitet. Man kann sich eine Vorstellung vom Ausmass dieser Anlagen anhand von Bild 5 machen [5].

Da die Nachrichtensatelliten Verbindungen von Kontinent zu Kontinent herstellen sollen, muss ihr Betrieb und Unterhalt und die Planung auf eine internationale Grundlage gestellt werden. Dafür sind zwei Gremien vorhanden, die *Intelsat* und die *Comsat*.

Die Intelsat ist ein Konsortium der Fernmeldeverwaltungsbehörden der am Satellitenfunk beteiligten Staaten. Ihr obliegt die Verantwortung für die Planung, Entwicklung, In-

betriebnahme und den Unterhalt des Raumsegments. Sie teilt ferner die zur Verfügung stehenden Satellitenkanäle den einzelnen Ländern zu und bestimmt die Mietgebühren für die Kanäle. Sie ist also eine internationale Verwaltungsbehörde.

Die Comsat ist dagegen eine reine private «Managergesellschaft» für die praktische Ausführung der Projekte und für den Betrieb. Ihr gesamtes Kapital ist von Unternehmungen der Nachrichtentechnik und von Privaten aufgebracht worden. Sie ist also keine Behörde [4].

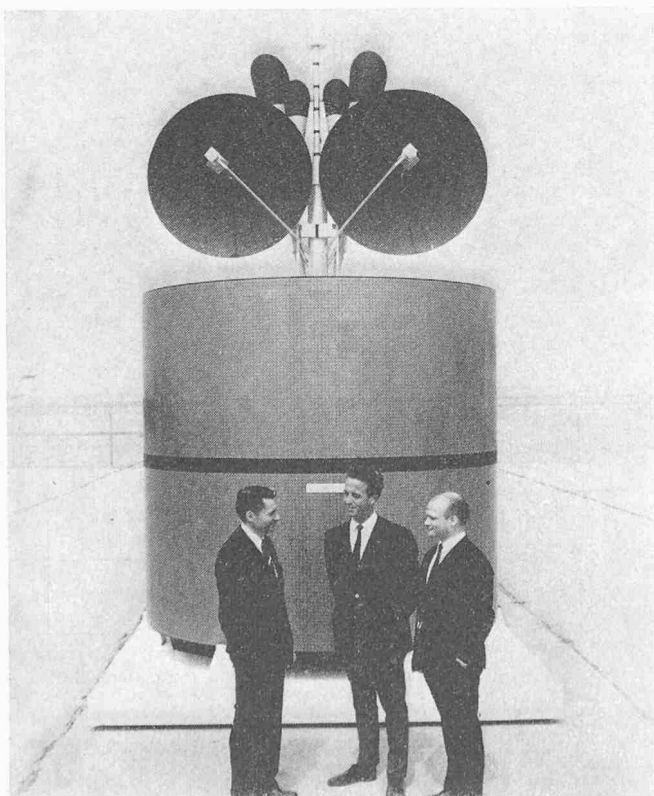
2.3 Nachrichtensatelliten

Im Auftrag der Intelsat hat die Comsat in den vergangenen 10 Jahren seit ihrem Bestehen 18 Nachrichtensatelliten in Betrieb genommen. Vorher hatte man schon einige orientierende Versuche zur Nachrichtenübertragung über Satelliten unternommen (Echo 1 und 2, Telstar 1 und 2, Relay 1 und 2). Sie zeigten, dass grundsätzlich eine Nachrichtenübermittlung über diese in niedrigen Bahnen über der Erde (1000 bis 10000 km) fliegenden, nicht synchronen Satelliten möglich ist, und dass Lebensdauern von mehr als 4 Jahren erreichbar sind, sofern sie sich nicht gerade in den Strahlungsgürteln der Erde bewegen.

Im Jahre 1963 wurde dann mit der Generation der «Syncom»-Satelliten bewiesen, dass geostationäre Satelliten durchaus zuverlässig arbeiten können. Wie Bild 6 zeigt, werden die erwarteten Lebensdauern im Weltraum mit Sicherheit erreicht und überschritten.

Der Intelsat 1, auch «Early Bird» genannt, übertrug bekanntlich schon die Fernsehbilder von der Olympiade 1964 in Japan. Mit Intelsat 2B bis 2D wurde dann eine zweite Generation von Fernmeldesatelliten in Betrieb genommen, die vor allen Dingen die Nachrichtenverbindungen für das Apollo-Programm sicherstellen sollen. Während Early Bird noch 72,5 cm Durchmesser und ein Gewicht von nur 38,5 kg hatte, war bei Intelsat 2 der Durchmesser schon auf 1,40 m erhöht bei einem Gewicht von 87 kg. Mit diesen Abmessungen konnte man bereits umfangreiche Transponder einbauen, die gestatten, in jeder Richtung 240 Telephonverbindungen gleichzeitig herzustellen. Die Sendeleistung ist zwar bei Intelsat 3 und 4 pro Kanalbündel nur auf 6 bis 10 Watt erhöht worden, aber die Gewinne der Bordantennen wurden durch wesentlich vergrösserte Antennen beträchtlich verbessert. Early Bird hat eine Rundstrahlantenne mit $G \approx 1,6$, bei Intelsat 2 ist $G \approx 6$, und bei Intelsat 3 konnten erstmals Richtantennen mit $G \approx 22$ an Bord montiert werden.

Bild 7. Der Nachrichtensatellit «Intelsat 4»



Schliesslich haben die Intelsat 4 je zwei Parabolantennen von etwa 65 cm Durchmesser mit Gewinnfaktoren von 700; sie haben 2,35 m Durchmesser, 3 m Höhe ohne die Antennen und wiegen 555 kg. Sie sind in der Lage, entsprechend den gesteigerten Bedürfnissen in jeder Richtung je 6000 Telefongespräche gleichzeitig zu übertragen und auch mit mehreren Bodenstationen gleichzeitig zu verkehren. Bild 7 zeigt den Intelsat 4, und Bild 8 gibt einen Überblick über das Intelsatnetz nach dem Stande von 1969 [1].

3. Das Übertragungsproblem

3.1 Der Funkkanal

Der Funkkanal soll sich vom Ausgang des Senders bis zum Eingang des Empfängers erstrecken. Er enthält also die Sendeantenne, die eigentliche Funkstrecke und die Empfangsantenne.

Wie bereits unter 2.2 gezeigt wurde, erleidet das von der Sendeantenne abgestrahlte Signal eine Abschwächung a , welche durch

$$a = \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2$$

gegeben ist. R ist der Abstand zwischen den beiden Antennen, und λ ist die Betriebswellenlänge. Da aber beide Antennen einen Gewinn G_S bzw. G_E haben, wird das tatsächlich an den Eingang des Empfängers gelangende Signal

$$P_E = P_S \cdot \frac{G_S \cdot G_E}{a}$$

Ist z. B. $P_S = 1,6 \text{ W}$ } an Bord
 $G_S = 7,5$ }
 $G_E = 5,85 \cdot 10^5$ am Boden
 $R = 36200 \text{ km}$ }
 $\lambda = 7,27 \text{ cm}$ } $a = 3,9 \cdot 10^{19}$
 so wird $P_E = 1,8 \cdot 10^{-13} \text{ W}$ am Boden.

Will man dieses Signal dem Telephonhörer zuführen, so muss es, um gut hörbar zu sein, auf $1 \text{ mW} = 10^{-3} \text{ W}$ verstärkt werden. Es ist aber zu berücksichtigen, dass auf dem Transportweg von aussen her als ungewollter «Staub» ein Rauschen hinzukommt, welches durch die ungeordnete Brownsche Bewegung der Moleküle in den stromführenden Teilen, insbesondere den Kabeln, Verstärkern und Antennen, hervorgerufen wird. Dieses Rauschen ist um so stärker, je höher die Temperatur T der Leiter ist. Es wird im Telephon um so stärker wahrgenommen, je grösser der verstärkte Tonbereich, die Bandbreite B , ist, da das Rauschen alle Frequenzen von Null an bis zu den höchsten Tönen enthält. Für ein Telefongespräch genügt eine Bandbreite von 300 bis 3400 Hz, für eine Fernsehübertragung sollte jedoch die Bandbreite mindestens 3 MHz sein. Die im Empfänger zu verarbeitende Rauschleistung N ist dann

$$N = k T B \text{ Watt}$$

wobei $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Ws}$ pro Grad ist (Boltzmannsche Konstante). Damit würde nun das Verhältnis von Signalleistung $S = P_E$ zur Rauschleistung N :

$$S/N = P_S \cdot \frac{G_S \cdot G_E}{a k T B}$$

Mit $T = 290 \text{ K}$ und $B = 3000 \text{ Hz}$ ist

$$S/N = 1,5 \cdot 10^4$$

Das Signal ist also zehntausendmal stärker als das Rauschen, und es ist daher gut verständlich. Im öffentlichen Telephonverkehr soll das S/N -Verhältnis sogar 10^6 nicht unterschreiten.

Was kann man nun tun, um eine wesentliche Verbesserung dieses Wertes herbeizuführen? Die Sendeleistung P_S ist durch die Zahl der Sonnenzellen beschränkt, die man bei gegebenem Satellitendurchmesser auf seiner Oberfläche anbringen kann. Ebenso kann man den Gewinn G_S der Bordantenne wegen dieses Durchmessers, den ja wiederum die Trägerrakete

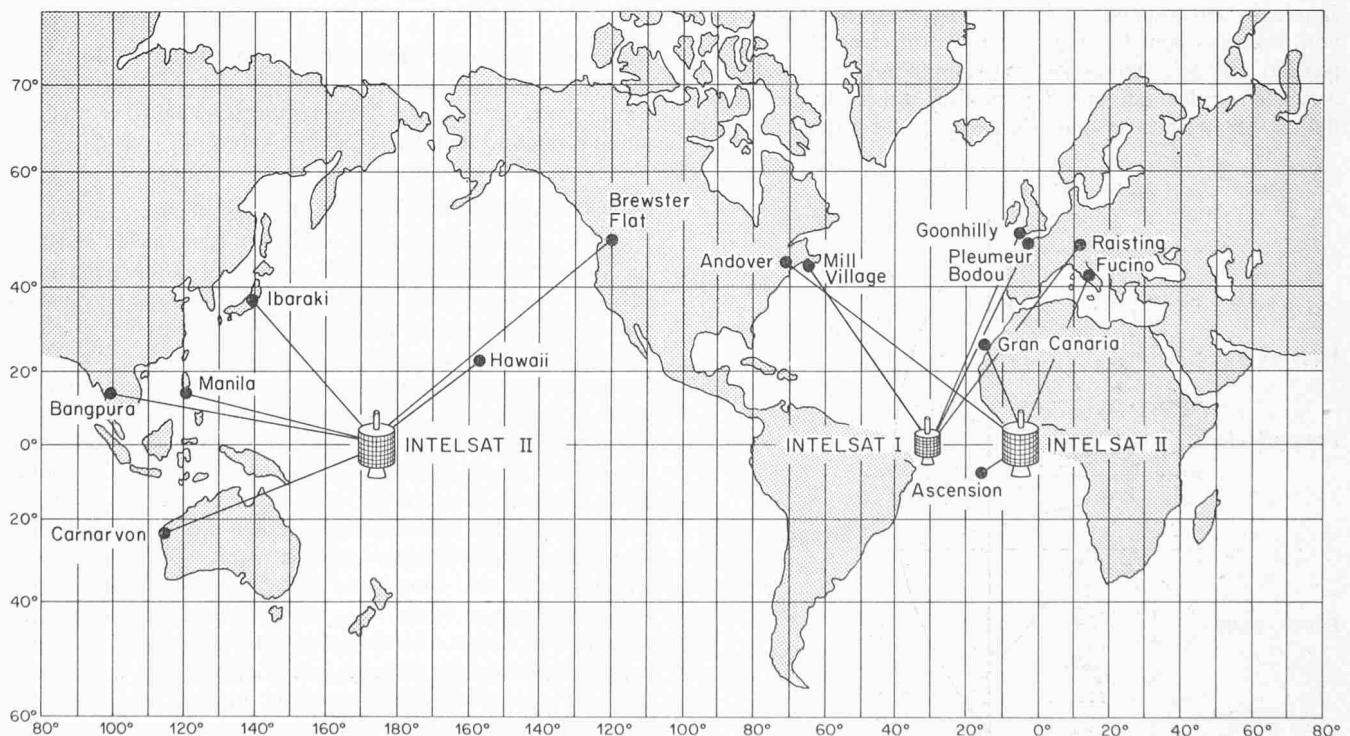


Bild 8. Das Intelsat-Netz

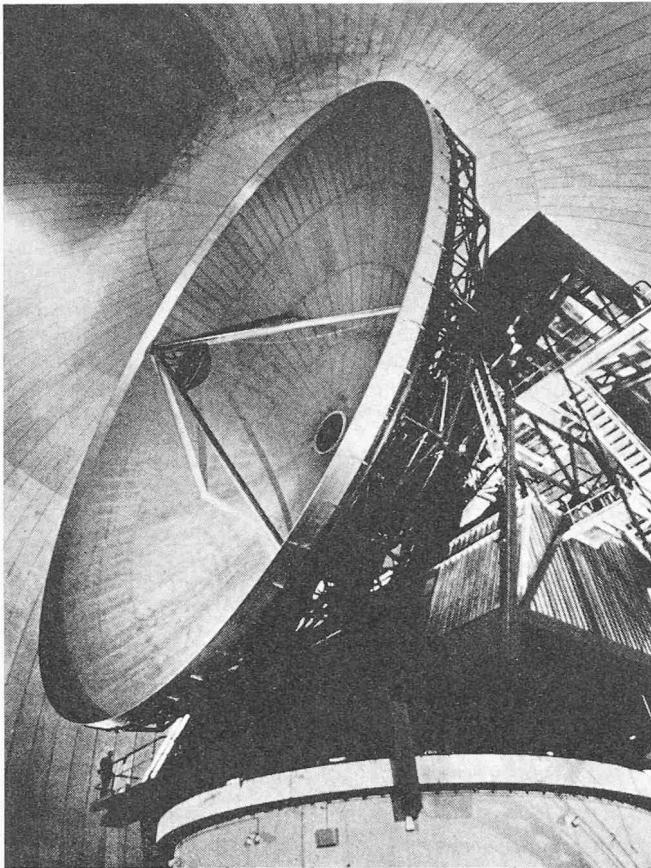


Bild 10. Die Antenne der Bodenfunkstelle in Raisting bei München

bestimmt, kaum erhöhen. Dagegen ist der Gewinn G_E der Bodenantenne fast nicht begrenzt. Es ist heute üblich, im Intelsatnetz die Bodenantennen mit Durchmessern von 28 m zu verwenden, welche Gewinne in der Größenordnung von 10^6 aufweisen. Bild 9 zeigt das Schema dieser Grossantennen. Sie arbeiten nach dem Cassegrain-Prinzip, welches schon seit Jahren in astronomischen Fernrohren angewendet wird. Die von links aus dem Unendlichen in Form einer ebenen Welle parallel in den parabolischen Hauptreflektor einfallenden Strahlen werden auf den hyperbolisch gekrümmten Fangreflektor geworfen, von dem sie dann in das Erregerhorn des

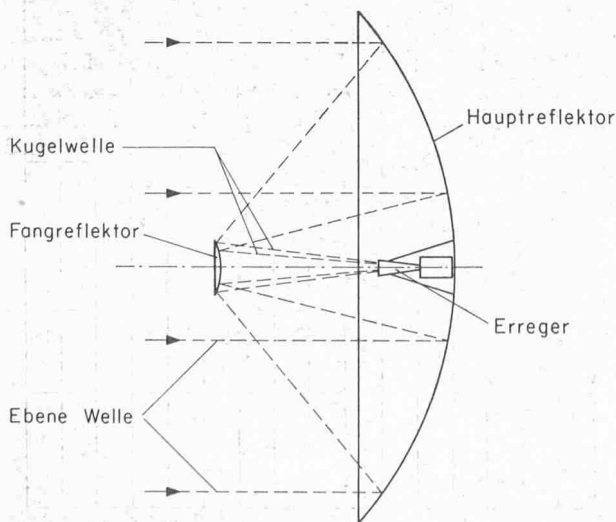


Bild 9. Prinzip einer Cassegrain-Antenne

Empfängers gelangen. Die praktische Ausführung einer solchen Antenne zeigt Bild 10. An die Genauigkeit der parabolischen Spiegelfläche werden sehr hohe Anforderungen gestellt (mittlere Abweichung von der exakten Parabel kleiner als 1 mm bei 28 m Durchmesser), was sich natürlich in den Kosten bemerkbar macht. Je kleiner die Wellenlänge λ , desto geringer werden die Herstellungstoleranzen und desto höher wird der Preis Pr , der ausserdem ungefähr mit der dritten Potenz des Durchmessers D anwächst. Eine bewährte Faustformel lautet:

$$Pr \approx 64 \frac{D^3}{\lambda} \text{ Fr.}$$

was bei $D \sim 30$ m und $\lambda = 4,4$ cm auf $Pr \sim 40$ Mio Fr. führt. Mit der Betriebswellenlänge kann man hinsichtlich des S/N -Verhältnisses nicht viel erreichen, da diese ziemlich genau festgelegt ist durch die ungewollten Geräusche. Diese haben nämlich einen Kleinstwert zwischen $\lambda = 3$ cm und $\lambda = 10$ cm, so dass die Wahl von $\lambda = 5$ cm für den Aufwärtsweg und $\lambda = 7,5$ cm für den Abwärtsweg in dieser Hinsicht ein Optimum darstellt. Mit λ ist natürlich auch der Abschwächungsfaktor a festgelegt. Die Bandbreite ist ebenfalls nicht beliebig wählbar, denn für Telephonie muss sie mit Rücksicht auf die Verständlichkeit 3000 Hz und für Fernsehen wegen der Bildqualität mindestens 3 MHz betragen.

Es bleibt nun noch die Temperatur T , bei welcher der Empfangsverstärker betrieben wird. Normale Raumtemperatur ist $T = 290$ K. In den letzten Jahren hat man Verstärker entwickelt, welche bei der Temperatur des flüssigen Heliums, $T = 4$ K, betrieben werden. Diese bringen dann eine ganz erhebliche Verbesserung des S/N -Verhältnisses. Zwar wird unter Berücksichtigung aller kleinen Unvollkommenheiten des Verstärkers die Heliumtemperatur nicht ganz erreicht, aber mit Werten von 10 bis 30 K kann man immer rechnen. So kommt man für eine Telephonübertragung vom Satelliten zur Erde auf etwa

$$S/N = 1,3 \cdot 10^5$$

für den Betrieb mit Intelsat 1. Beim Intelsat 4 mit $P_s = 8$ W und $G_s = 700$ ist das Verhältnis

$$S/N \approx 6 \cdot 10^7$$

Man sieht, dass man durch erhöhten Aufwand an Bord (Antennendurchmesser und Sendeleistung) und am Boden (Antennendurchmesser und Empfängertemperatur) die Übertragungsqualität noch wesentlich verbessern kann.

3.2 Kanalkapazität und Übertragungsentfernung

Die im vorhergehenden Abschnitt berechneten Beispiele für die Übertragungsgüte S/N eines Telefonkanals haben gezeigt, wie man durch erhöhten Aufwand dieses Verhältnis verbessern kann. Offensichtlich ist ja die empfangene Nachricht um so naturgetreuer, je stärker das Signal im Verhältnis zum unerwünschten Rauschen ist. Aber zur guten Verständlichkeit gehört auch eine möglichst exakte Wiedergabe aller Töne der Sprache. Engt man die Bandbreite eines Verstärkers schrittweise ein, so unterdrückt man mehr und mehr die hohen Töne, wodurch Buchstaben wie s und f oder i und e allmählich nicht mehr unterschieden werden können. Und diese Unterscheidungsmöglichkeit drückt man, wie eingangs gesagt wurde, in bit aus. Man kann also sagen, dass ein Übertragungskanal um so besser ist, je mehr bit er pro Sekunde übertragen kann. Diese übertragbaren bit/s stellen also die *Informationskapazität des Kanals* dar. C.E.Shannon hat gezeigt, dass der bereits mehrfach erwähnte Einfluss von Signal-zu-Geräusch-Verhältnis S/N und übertragbarer Bandbreite B auf die Informationskapazität C durch die Formel

Tabelle 1. Mindestwerte B , S/N und C für Fernschreiben, Telephonie und Fernsehen

Kanal	Bandbreite B in Hz	S/N -Verhältnis	Kanalkapazität C in bit/s
Fernschreiben	10^2	30	500
Telephonie	$3 \cdot 10^3$	10^6	$60 \cdot 10^3$
Fernsehen	$3 \cdot 10^6$	10^3	$30 \cdot 10^6$

$$C = 3,32 B \log(1 + S/N) \text{ bit/s}$$

gegeben ist. C ist also der Informationsfluss, welcher in der Zeiteinheit durch den Kanal bei gleichzeitig vorhandenem Störgeräusch hindurchgehen kann. Die angegebene Formel gilt für den günstigsten Fall einer idealen Kodierung. In der Praxis ist C immer kleiner [7].

Für die drei wichtigsten Informationsübermittlungskanäle, Fernschreiben, Telephonie und Fernsehen, sind die in Tabelle 1 gezeigten Mindestwerte einzuhalten.

Es stellt sich nun die Frage, mit welchem Aufwand an Bord und am Boden diese Forderungen beim Funkverkehr über grosse Entfernungen erfüllt werden können. Dabei soll nicht nur die eine feste Entfernung von 36200 km zwischen Nachrichtensatelliten in der Synchronbahn und irdischen Bodenstationen betrachtet werden, sondern allgemeiner die Verbindung zwischen einem Satelliten im Weltraum und der Erde über eine beliebige Entfernung R .

In der Shannon-Gleichung stehen die beiden Grössen B und S/N . Letzteres Verhältnis kann man auch schreiben

$$S/N = \frac{P_S G_S G_E}{\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2 k T_E B} = \frac{(P_S G_S) D_E^2}{R^2} \cdot \frac{4,5 \cdot 10^{21}}{T_E B}$$

In diesem Ausdruck stellt das Produkt $P_S \times G_S =$ Sendeleistung \times Antennengewinn den Aufwand an Bord dar. D_E^2 ist ein Mass für den Aufwand am Boden (Antennengrösse). Die Bandbreite B kennzeichnet die Betriebsart, ob Fernschreiben, Telephonie oder Fernsehen, und T_E ist ein Mass für die Güte der Empfangsanlage am Boden, ihre äquivalente Rauschtemperatur. Das Produkt $P_S \times G_S$, auch ERP = Effective Radiated Power genannt, kann man durch die Summe der Gewichte $W_S + W_A$ der Sendeanlage einerseits und der Bordantenne andererseits ausdrücken, da, wie die Erfahrung gezeigt hat, zwischen P_S und W_S einerseits und zwischen G_S und W_A andererseits verhältnismässig einfache Zusammenhänge bestehen. Das Gesamtgewicht $W_S + W_A$ ist an Bord beschränkt wegen der Leistung und dem Durchmesser der Trägerrakete. Rechnet man nun die Kanalkapazität C in Abhängigkeit von der Entfernung R bei verschiedenem Aufwand an Bord und Boden aus, so erhält man die in Bild 11 dargestellten Kurven. Dabei wurden Entfernungen bis zu 10^5 Lichtjahren = 10^{21} m in Betracht gezogen und der Aufwand an Bord bis 100 t als in näherer oder fernerer Zukunft realisierbar angenommen [6].

4. Grenzen der Nachrichtenübermittlung im Weltraum

4.1 Funkverkehr innerhalb des Sonnensystems

Man ersieht aus dem Diagramm Bild 11 ohne weiteres, dass eine Fernsehverbindung vom Mond zur Erde mit einem Aufwand von 2×50 kg an Bord und 30-m-Bodenantennen nicht mehr zu verwirklichen ist. Bei den Apollo-Unternehmen wurde deshalb dafür die 64-m-Antenne in Goldstone (Kalifornien) verwendet.

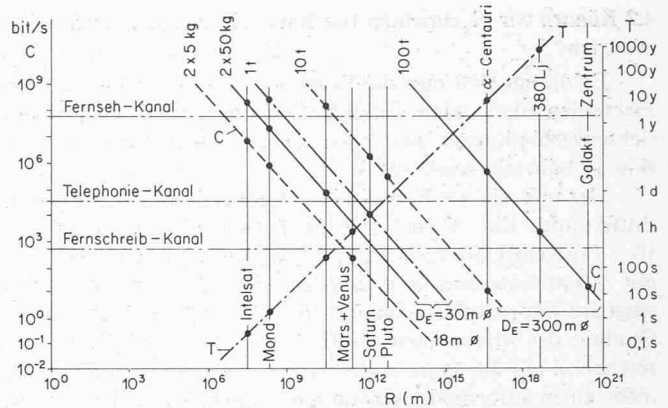


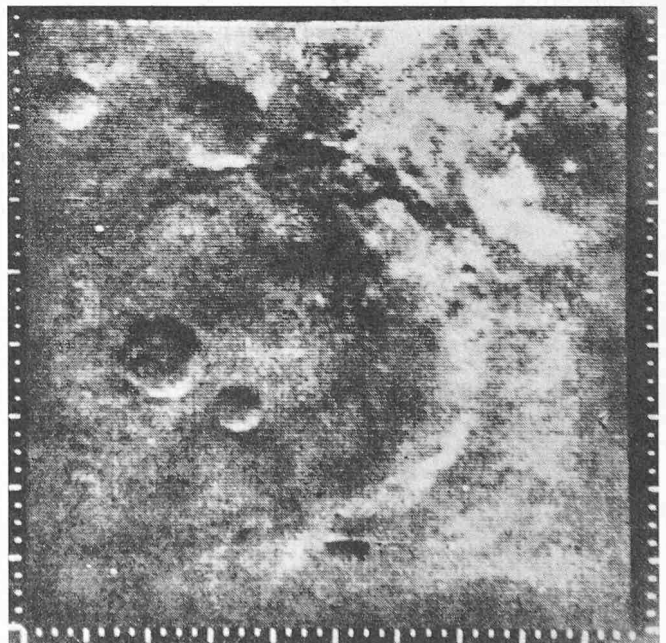
Bild 11. Informationskapazität C und Wartezeit T einer Verbindung mit Raumschiffen für verschiedene Gewichte der Bordanlage und Durchmesser der Bodenantennen

Mit Venus oder Mars kann eine Fernsehverbindung nur noch mit einem Aufwand von 2×5 t an Bord und 300-m-Antennen am Boden hergestellt werden. Für einen Fernschreibkanal würden dagegen bereits 2×5 kg Bordeinrichtungen und 18-m-Antennen genügen. Allerdings ist die einfache Laufzeit für die Signale von der Erde bis zum Mars ($R = 240 \cdot 10^6$ km) bereits 800 s, so dass die Wartezeit T auf eine Antwort von einem Partner auf dem Mars mindestens 1600 s oder 27 min ist. (In Bild 11 sind diese Wartezeiten T ebenfalls eingetragen.) Die im Jahre 1965 vom Mars zur Erde übertragenen Fotos (siehe Bild 12) wurden mit nur $8^{1/3}$ bit/s gesendet, wobei jedes Bild 240000 bit enthielt (200 Zeilen mit 200 Bildpunkten und pro Punkt $2^6 = 64$ Helligkeitsstufen). Die Übertragungszeit pro Bild war also 8 h.

Auch mit Saturn ist eine Fernschreibverbindung mit 2×50 kg an Bord und 30-m-Antennen noch möglich, doch muss man nun schon etwa $2^{1/2}$ h auf eine Antwort warten.

Man sieht also, dass man innerhalb unseres Sonnensystems durchaus Nachrichtenverbindungen herstellen kann, man muss nur genügend grossen Aufwand an Bord treiben und viel Geduld haben beim Warten auf eine Antwort.

Bild 12. Die Oberfläche des Planeten Mars aus 12 000 km Abstand, fotografiert von Mariner IV



4.2 Können wir Nachrichten von den nächsten Fixsternen erwarten?

Es drängt sich nun die Frage auf, ob man auch mit den Fixsternen bzw. deren allfällig vorhandenen Planeten Nachrichtenverbindungen herstellen kann. Auch hierüber gibt Bild 11 teilweise Auskunft.

Der uns nächste Fixstern ist α -Centauri in 4,3 Lichtjahren Entfernung. Ein in seiner Nähe fliegendes Raumschiff mit 10 t Funkeinrichtungen an Bord könnte zwar auf der Erde mit 300-m-Antennen noch empfangen werden, aber die übertragbare Information von rund 10 bit/s hat dann auch nur die Qualität des Marsphotos, Bild 12. Dabei ist aber die Wartezeit schon auf 8,6 Jahre angestiegen. Das kann man fast nicht mehr einen Informationsaustausch nennen. Dabei ist es nicht einmal sicher, ob α -Centauri überhaupt Planeten hat.

Bei Barnards Stern in 6,8 Lichtjahren Entfernung ist ein Planet nachgewiesen worden, der nach Masse und Umlaufzeit vielleicht *Leben in irgendeiner Form* haben könnte. Ein «Funkverkehr», wenn man das noch so nennen darf, verlangt allerdings schon einen gewaltigen Aufwand (100 t an Bord) und eine Wartezeit von 13,6 Jahren. Ein irdisches Raumschiff, welches etwa mit 1/10 Lichtgeschwindigkeit dorthin reisen wollte, wäre immerhin 68 Jahre, also ein Menschenleben lang, unterwegs. Funksignale von dort könnte man wohl nur erwarten, wenn dort *Leben und eine höhere Zivilisation* vorhanden wäre.

Wo kann man nun in der Milchstrasse (andere Galaxien fallen wegen der riesigen Entfernungen überhaupt nicht in die Betrachtung) «Leben in irgendeiner Form» und weiterhin «eine gewisse höhere Zivilisation» ähnlich der irdischen erwarten?

Soll auf einem Planeten eines Fixsterns überhaupt das Phänomen «Leben» bestehen, so sind eine Reihe von Vorbedingungen zu erfüllen. Seine Sonne muss alt genug sein, denn höheres Leben entwickelt sich auf dem Planeten nur in einigen Milliarden Jahren. Er darf nicht zu weit von der Muttersonne entfernt sein (Kälte) und nicht zu nahe dabei (Hitze), er muss eine Mindestgrösse haben, damit seine Masse eine geeignete Atmosphäre durch Gravitation festhalten kann. Sodann sollte seine Bahn nahezu kreisförmig sein und seine Achse senkrecht auf der Bahnebene stehen, damit die täglichen und jahreszeitlichen Temperaturschwankungen nicht zu gross werden.

Die obigen Bedingungen sind vielleicht nach Schätzungen einiger Forscher [8, 9] bei 6% aller Sterne des Milchstrassensystems erfüllt. Da unsere Galaxie etwa 200 Mrd Sterne enthält, ergibt das rund 12 Mrd Sterne, bei welchen man «Leben in irgendeiner Form» antreffen könnte. Aus dem Volumen der Milchstrasse ($\sim 10^{14}$ Lj³) und der Gesamtzahl der Fixsterne kann man eine mittlere Sterndichte berechnen und daraus wieder schliessen, dass von den genannten 12 Mrd Sternen mit «belebten» Planeten sich nur 10 Sterne in unserer Nähe, nämlich in weniger als 18 Lichtjahren Abstand von unserer Sonne, befinden.

Sucht man aber nach Leben mit einer ähnlichen oder höheren technischen Zivilisation, so muss man seine Erwartungen stark vermindern. Technische Zivilisationen haben auf einem Planeten nur eine begrenzte Lebensdauer, da sie durch Degeneration oder Selbsterstörung eines Tages erlöschen. Man kann nun diese Lebensdauer L auf das Alter T des Planeten beziehen und erhält damit den Wahrscheinlichkeitsgrad für die Zahl der «zivilisierten» Planeten. Eine mögliche Schätzung für L ist 100000 Jahre und für T kann man 10 Mrd Jahre einsetzen. Dann wird

$$L/T \sim 10^{-5},$$

was besagt, dass nur noch etwa 120000 «zivilisierte Partner» in der Milchstrasse zu suchen wären. Rechnet man nun wieder über die Sterndichte den Abstand aus für die 10 der Sonne am nächsten stehenden «Zivilisationsplaneten», so ergibt sich eine Kugel von 800 Lichtjahren Radius. Und weiterhin ist eine von diesen 10 technischen Zivilisationen innerhalb einer Kugel von 380 Lichtjahren Radius um unser Sonnensystem zu suchen.

Ein Nachrichtenverkehr zwischen zivilisierten Lebewesen verschiedener Fixsternsysteme scheint also nach irdischen Begriffen nicht möglich zu sein, was auch aus Bild 11 hervorgeht. Das Leben des Menschen ist viel zu kurz im Verhältnis zur Laufzeit der elektromagnetischen Wellen in interstellaren Räumen. So gesehen scheint der Gedanke von *Giordano Bruno* (1548–1600) doch richtig zu sein, dass das Weltall aus lauter von einander isolierten Lebenssphären besteht.

Literaturverzeichnis

- [1] *W. Guggenbühl*: Einige Probleme moderner Nachrichtensatelliten. «Bull. SEV» 61 (1970), H. 1, S. 19–35.
- [2] *H. Paul*: Bahnstörungen bei nichtstationären Nachrichtensatelliten. «Bull. SEV» 57 (1966), H. 3, S. 101–109.
- [3] *H. Paul*: Bahnstörungen bei geostationären Nachrichtensatelliten. «Bull. SEV» 59 (1968), H. 5, S. 215–224.
- [4] *R. Trachsel*: Internationales Abkommen über die Schaffung eines weltweiten kommerziellen Satelliten-Nachrichtensystems. «Techn. Mitt. PTT» 42 (1964), H. 10, S. 395–404.
- [5] *W. Guggenbühl*: Aufbau und Betrieb kommerzieller Nachrichtensatelliten. «NZZ» Nr. 99, 14. Febr. 1968.
- [6] *H. Paul*: Bord- und Bodenantennenanlagen für den Verkehr mit Satelliten und Raumschiffen. «Bull. SEV» 56 (1965), H. 19, S. 835–841.
- [7] *C.E. Shannon*: Communication in the Presence of Noise. «Proc. IRE» 37 (1949), H. 1, S. 10–21.
- [8] *J. Eugster*: Die Forschung nach ausserirdischen Leben. Zürich 1969, Orell-Füssli Verlag.
- [9] *S. von Hoerner*: Sind wir allein im Kosmos? «Naturwissenschaft und Medizin» 1964, H. 2, S. 42–55.

Adresse des Verfassers: Dr. H. Paul, 5430 Wettingen, Lerchenstrasse 15.