Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 56 (1965)

Heft: 19

Artikel: Bord- und Boden-Antennenanlagen für den Verkehr mit Satelliten und Raumschiffen

Autor: Paul, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916405

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.07.2025

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

Bord- und Boden-Antennenanlagen für den Verkehr mit Satelliten und Raumschiffen

Vortrag, gehalten an der 28. Hochfrequenztagung des SEV vom 20. Mai 1965 in Lausanne,

von *H. Paul*, Baden

621.396.67 : 621.396.946

Für die breitbandige Übertragung von Vielkanaltelephonie und von Fernsehbildern werden sehr grosse Parabol-Antennen in klassischer Bauweise (Goonhilly/England), Hornparabolantennen (Andover/USA) und (Bodou-Pleumeur/Frankreich) und Kombinationen von Hornparabol- und Cassegrain-Antenne (Raisting/Deutschland verwendet. Es wird gezeigt, dass die unvermeidlichen mechanischen Verformungen eine untere Grenze für die Betriebswellenlänge bringen; die Kosten für grosse Antennen steigen mit der dritten Potenz des Durchmessers und sind umgekehrt proportional zur Wellenlänge. Zum Schluss wird ein Diagramm entwickelt, welches zeigt, welche Informationskapazität man für gegebene Gewichte der bordseitigen Sender-, Modulations- und Antennenanlage einerseits und für verschiedene Bodenantennen-Durchmesser anderseits bei verschiedenen interplanetarischen Distanzen erzielen kann. Ein Ausblick auf die Verwendung von kohärentem Licht (Lasern) als Träger der Information zeigt, dass man ausserhalb der Erdatmosphäre mit kleinerem Aufwand interplanetarische Distanzen überbrücken kann.

Pour la transmission à large bande de téléphonie multicanaux et d'images télévisées, on se sert de très grandes antennes paraboliques de construction classique (Goonhilly/Angleterre), d'antennes paraboliques à coret (Andover/USA et Bodou-Pleumeur/France), ainsi que de combinaison d'une antenne parabolique à cornet et d'un dispositif d'excitation du type Cassegrain (Raisting/Allemagne). Le conférencier montre que les déformations mécaniques inévitables posent une limite à la longueur d'onde de service; le coût de grandes antennes croît avec la troisième puissance du diamètre et est inversement proportionnel à la longueur d'onde. Pour terminer, il présente un diagramme qui indique quelle capacité d'information peut être obtenue pour des poids donnés de l'installation d'émission, de modulation et d'antenne à bord de satellites artificiels et engins spatiaux, d'une part, et pour différents diamètres d'antennes de sol, d'autre part, en fonction de différentes distances interplanétaires. Un aperçu de l'emploi de lumière cohérente (lasers) comme support d'information montre qu'en dehors de l'atmosphère terrestre des distances interplanétaires peuvent être franchies en utilisant des dispositif moins onéreux.

1. Leistungsbetrachtungen für die Übertragung vom Satelliten zur Erde

Die Nachrichtenübermittlung zwischen der Erde und Satelliten bzw. Raumfahrzeugen hin und zurück wird heute mehr und mehr auf die Frequenzbänder 100...400 MHz (VHF), 1,7...1,8 und 4...6 GHz verlegt, nachdem die anfänglich verwendeten 20- und 40-MHz-Kanäle von Satelliten sich wegen der Störungen beim Durchgang durch die Ionosphäre als nicht sehr geeignet erwiesen hatten. Das VHF-Band wird für ausgesprochene Schmalbandkanäle für Fernmessung und Fernsteuerung mit Breiten von ca. 50 kHz verwendet, während die drei Mikrowellenbänder bei 1,7, 4 und 6 GHz für Vielkanal-Telephonie- und Fernsehübertragungen mit Bandbreiten bis 25 MHz vorgesehen sind.

Bei den *Forschungs- und Wettersatelliten* (ESRO, Ariel, Tiros, Transit) rechnet man im allgemeinen mit Übertragungsdistanzen von 3000...4000 km, bei den *Nachrichtensatelliten* (Syncom, Telstar und Relay) sind Distanzen bis 40000 km durchaus möglich und bei *Raumschiffen* (Ranger, Mariner), welche sich in der Nähe von Venus oder Mars bewegen, beträgt die Übertragungsstrecke etwa 150 Mill. km. Bei allen Raumfahrzeugen kann man bis heute noch keine grösseren Sendeleistungen als 1...10 W unterbringen, und da die Bordantennen aus Gewichts- und Platzgründen ebenfalls nur sehr kleine Gewinne aufweisen, sind die auf der Erde eintreffenden Signalleistungen ausserordentlich schwach. Die *Streckendämpfungen* für interplanetarische Entfernungen liegen bei 100...300 dB (Fig. 1). Dadurch kommen die Signalleistungen am Empfängereingang in die Nähe der Rauschleistungen. Man muss daher versuchen, mit extrem hohem Gewinn der Bodenantenne, kleinstmöglichem Eigenrauschen der Empfangsanlage und optimalem Modulationsverfahren, den Signal- zu Rauschabstand genügend hoch für eine möglichst fehlerfreie Informationsauswertung zu halten.

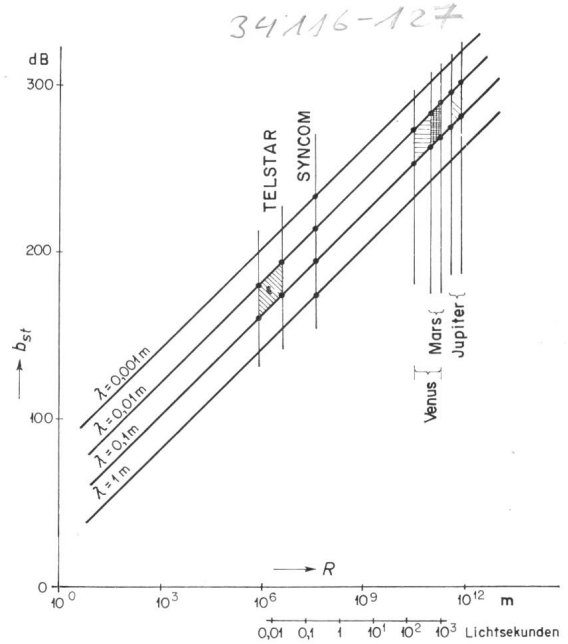

Fig. 1

Streckendämpfung b_{st} zwischen isotropen Strahlern in Abhängigkeit von der Entfernung R für verschiedene Wellenlängen λ

$$b_{st} = 20 \log \left(\frac{4 \pi R}{\lambda} \right)$$

Fig. 2 gibt einerseits Aufschluss über die mit Elektronenröhren und Lasern erzielbaren Leistungen und anderseits über die in modernen Verstärkern, bzw. Empfängern, erreichbaren kleinsten Rauschleistungen pro Hertz Bandbreite in der Frequenz-Leistungsebene.

2. Bordantennen

2.1 Quasi-isotrope Strahler

Als Bordantennen kommen im allgemeinen nur fast-isotrope Strahler in Frage, da die Antenne gegenüber der Bodenstation meist eine beliebige Lage einnimmt. (Eine Ausnahme machen nur die gravitationsstabilisierten Satelliten.) Zur Erzielung der isotropen Strahlung sind drei Möglichkeiten vorhanden, welche vom Verhältnis Satellitendurchmesser D zu Wellenlänge λ abhängen.

2.1.1 $D/\lambda \ll 1$

Für ein $D/\lambda \ll 1$ ist wohl die «Alouette» (Kanada) das beste Beispiel. Dieser Satellit hatte als Hauptaufgabe, die Ionosphäre von aussen her zu vermessen. Da diese Reflexionsmessungen im Frequenzbereich von 1,6...11,5 MHz ausgeführt werden müssen, war man gezwungen, einen $\lambda/2$-Dipol von 2×25 m Länge aus einem Behälter von ca. 1 m Durchmesser auszufahren, was mit anfangs gerollten Stahlbändern nach Art des Bandmaßstabs sehr gut gelungen ist. Noch extremer liegen die Verhältnisse beim englischen

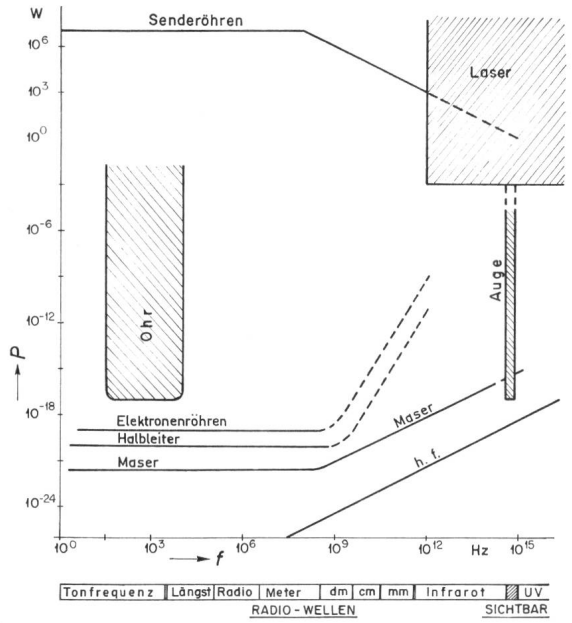

Fig. 2

Leistungen P von Senderöhren und Rauschleistungen pro Hertz Bandbreite für lineare Verstärker in der Frequenz-Leistungs-Ebene

f Frequenz; $h.f.$ = Quantenrauschleistung

Satelliten «UK2», genannt «Ariel 2», dessen Dipol-Antenne eine Gesamtlänge von 40 m hat.

2.1.2 $D/\lambda \approx 1$

α) Ist $D/\lambda \approx 1$, so kommt vor allen Dingen die Drehkreuzantenne in Frage, bei welcher drei bis sechs $\lambda/4$-Dipole räumlich äquidistant auf der Satellitenoberfläche verteilt und mit entsprechender Phasenverschiebung gespeist werden, so dass sich ein Drehfeld ergibt. Man hat dann in der Ebene der Dipole lineare und in der Achse zirkulare Polarisation. Diese Antennenkonfiguration wurde z. B. für das Projekt «ESRO II» vorgeschlagen, wobei für Senden und für Empfangen je ein Drehkreuzsystem bestehend aus je drei $\lambda/4$-Dipolen vorgesehen worden ist. Man erspart dadurch die Frequenzweiche zur Trennung des Sendekanals (f = 137 MHz) vom Empfangskanal (f = 120 MHz). Die Gleichförmigkeit des Strahlungsdiagramms wurde an einem Modell ausgemessen, und zeigte, dass man schon bei dieser kleinen Dipolzahl recht gute Isotropie erreicht. Die Antennendrähte kann man für Satelliten mit Spin aus sehr dünnem Draht (0,3 mm Beryllium-Bronze, vergoldet) ausführen und das Ende mit einem 5-g-Kügelchen belasten; damit erhält man durch die Fliehkraft genügende radiale Streckung, wenn der Satellit in der Umlaufbahn ist. Die dünnen Antennendrähte lassen sich vor und beim Abschuss leicht unter dem Hitzeschild zusammenlegen; sie entfalten sich von selbst und benötigen keine aufwendigen und störanfälligen Gelenke oder Teleskope. Da bei ESRO II zwei Sender mit nahe beieinanderliegenden Frequenzen (136 und 138 MHz) verwendet werden, ist ein Hybridring (Differentialtransformator) für die Trennung beider Sender vorgesehen worden, welcher sich aus Mikrominiaturkabeln und Steckern mit sehr geringem Gewichts- und Raumbedarf aufbauen lässt.

Zum Schutz des Empfängereingangs gegen unerwünschte Reststrahlung der Sender ist noch ein ebenfalls aus Kabeln aufgebautes Filter mit einer offenen $\lambda/4$-Stichleitung vorgesehen.

In den beiden Wettersatellitenserien Tyros und Nimbus, deren Achse ja stets zum Erdmittelpunkt hin gerichtet ist, haben sich diese Antennen bestens bewährt.

β) Einen etwas anderen Weg hat man beim Telemetrie-Antennensystem im VHF-Band für den «Telstar» beschritten. Da die Achse derart spin-stabilisiert ist, dass sie stets senkrecht auf der Ebene der Ekliptik steht, und der Satellit entsprechend seiner Bahnneigung zum Äquator nur zwischen 45° nördlicher und südlicher Breite pendelt, wo auch die Mehrzahl der Bodenstationen für die Steuerung und Fernmessung liegen, kann man sich stärkere Einbrüche im Strahlungsdiagramm in der Umgebung der Spinachse etwa im Bereich $0 < \vartheta < 21{,}5^0$ leisten. Man käme also hier mit dem einfachen in der Spinachse liegenden Halbwellendipol aus. Beim Telstar war dieser jedoch unerwünscht wegen der möglichen Abschattung von Sonnenzellen, wegen der linearen Polarisation und wegen des notwendig werdenden Ausfahrmechanismus für die beiden Antennenstäbe, die ja nicht durch Fliehkraft entfaltet werden können. Man hat daher auf die schon im Jahre 1947 von *H. A. Wheeler* entwickelte Vierfach-Wendelantenne (Fig. 3), die als Breitseitenstrahler ähnlich wie ein Dipol strahlt, zurückgegriffen. Die Antenne sitzt auf dem «Nordpol» der Satellitenkugel, sie ist durch entsprechende Netzwerke breitbandig angepasst für den Bereich von 120...140 MHz.

Die Berechnung der Strahlungskennlinie von Dipolen auf Körpern, deren Dimensionen mit der Wellenlänge vergleichbar ist, führt auf schlecht konvergierende Reihen von der Form:

$$E = \sum_{n=0}^{\infty} A_n Z_n (k_0 r) \cdot P_n (\cos \vartheta) \cdot \cos (n \varphi)$$

deren Auswertung nur mit Hilfe von grossen Rechenmaschinen möglich ist. Das Problem ist u. a. von *Mie, Bremmer — v. d. Pool, Buchholz, Zuhrt, Wait* und *Borgnis* behandelt worden.

2.1.3 $D/\lambda \gg 1$

Wenn das Verhältnis von Wellenlänge zu Satellitendurchmesser viel kleiner als eins ist, muss man etwas andere Wege gehen. Beim Telstar ist D/λ = 11,5...17,3. Man hatte dem Antennen-Entwickler einen äquatorialen Ring von 15 cm Höhe und 7,5 cm Tiefe zur Verfügung gestellt mit der Aufgabe, darin in zwanzig Arbeitstagen ein Rundstrahlantennensystem unterzubringen, welches in der Äquatorebene zirkular-polarisiert ist und sowohl für 4 als auch für 6 GHz brauchbar ist. Unter diesen Umständen blieb nicht viel Zeit für theoretische Studien, und man entschloss sich kurzerhand für folgendes Vorgehen:

1. Wird der Äquatorring mit unendlich vielen Strahlern belegt, welche alle konphas und mit gleicher Leistung erregt sind, so erhält man ein reines Rundstrahldiagramm. Bei endlicher Anzahl äquidistanter Erreger bilden sich im Azimutaldiagramm Minima, deren Tiefe mit kleinerwerdender Erregerzahl wächst. Eine einfache Rechnung zeigt, dass für eine Schwankung von ± 3 dB eine Mindestzahl von 72 Strahlern für 6 GHz und von 48 Strahlern für 4 GHz nötig sind.

2. Die zirkulare Polarisation des einzelnen Strahlers erhält man durch gleichzeitige Erregung eines Rechteckhohlleiters mit der H_{10} und der H_{01}-Welle bei entsprechender Phasenverschiebung von $\pi/2$ zwischen beiden Wellen. Dazu erregt man den Hohlleiter von der

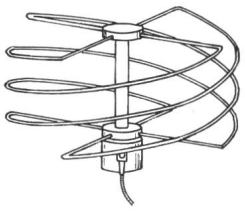

Fig. 3

Vierfach-Wendelantenne des «Telstar» für den VHF-Bereich

koaxialen Speiseleitung aus mit einem diagonal gestellten Dipol und wählt Schmal- und Breitseite und die Länge von der kurzgeschlossenen Rückwand bis zur strahlenden Apertur so, dass in dieser Öffnung beide E-Komponenten gerade den Phasenunterschied $\pi/2$ infolge der verschiedenen Hohlleiterwellenlänge, bzw. Phasenkonstante haben (Fig. 4).

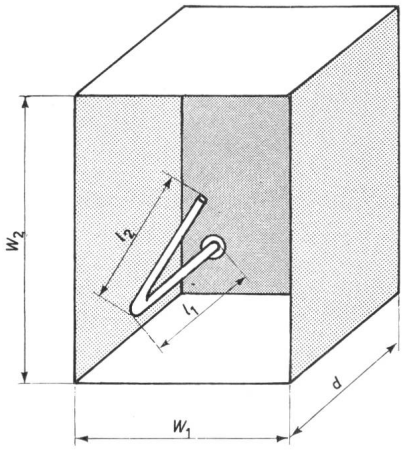

Fig. 4

Hohlleiter-Strahler für den Mikrowellenbereich des «Telstar»

3. Die amplituden- und phasenrichtige Anspeisung aller Einzelstrahler erfolgt durch ein Tannenbaumsystem von Hybridringen, welche eine relativ breitbandige Leistungsaufteilung ohne wesentliche Phasenfehler ermöglicht. Der Leistungsteiler ist in gedruckter Schaltung aufgebaut, so dass man von Längenstreuungen, wie sie bei Kabeln unvermeidlich sind, weitgehend verschont bleibt (Fig. 5).

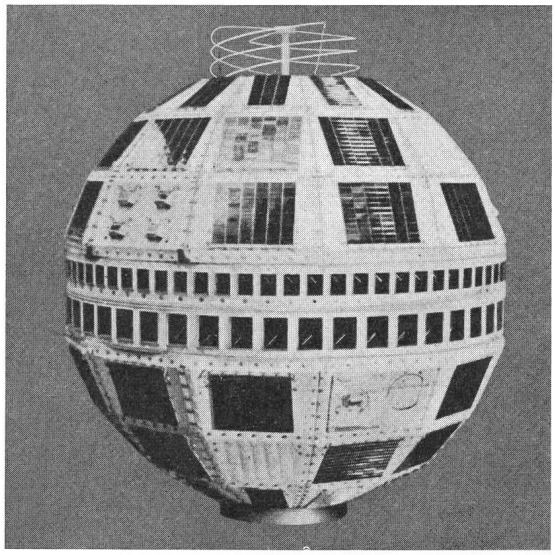

Fig. 5
Der «Telstar» mit den beiden Mikrowellen-Antennen für 4 und 6 GHz und der VHF-Antenne für 120...140 MHz

2.2 Richtstrahlantennen

Zum Schluss sei noch erwähnt, dass auch Richtstrahlantennen als Bordantennen für Satelliten, welche in grosser Entfernung von der Erde sind (Mondnähe, Venus-, bzw. Marssonden), bereits mit Erfolg verwendet worden sind. Als ein Beispiel sei der «Mariner 2» gezeigt, welcher eine Parabolantenne von 120 cm Durchmesser, Gewinn ca. 24 dB bei 960 MHz, trug. Wegen der noch verhältnismässig schwachen Bündelung (Halbwertsbreite 16^0) ist nur eine langsame Nachführung der Antenne in Richtung Erde nötig. Das gleiche gilt auch für die Mondsonde «Ranger VII», welche die berühmten Fernsehbilder von der Mondoberfläche lieferte. Sie sah für die Zeit der Übertragung die Erde mit einem Durchmesser von etwa $0{,}5^0$, brauchte also auch keine rasche Antennen-Nachführung.

Für die Übertragung der Messwerte vom «Mariner II» zur Erde und der Fernsteuersignale von der Erde zum «Mariner II» hat man die beiden folgenden Bilanzen:

Distanz Erde—«Mariner II» in Venusnähe

	R	$= 50$ Mill. km $= 5 \cdot 10^{10}$ m
Betriebswellenlänge	λ	$= 0{,}312$ m
Antennengewinn (Goldstone)	G_E	$= 48$ dB
Bodenempfängerrauschen	N	$= 1{,}66 \cdot 10^{-18}$ W
Bordantenne-Gewinn	G_s	$= 24$ dB
Sendeleistung an Bord	P_s	$= 3$ W
	S/N	$= 9$ dB

Für die Übermittlung von der Erde zum Satelliten hat man:

P_s	$= 10$ kW	$+ 40$ dB
R	$= 5 \cdot 10^{10}$ m	$- 246$ dB
λ	$= 0{,}312$ m	$- 206$ dB
G_s	$= 48$ dB	$+ 48$ dB
G_E	$= 24$ dB	$+ 24$ dB
N	$= 2 \cdot 10^{-15}$ W	$S = - 134$ dB
		$N = - 147$ dB
S/N	$= 7$ dB	(noch ausreichend für Telemetrie)

3. Bodenantennen

Auch bei den Bodenantennen unterscheidet man wieder zwischen den relativ schwach gebündelten Schmalbandanlagen im VHF-Bereich, die für Vermessung, Steuerung und Datenübertragung verwendet werden, und den sehr scharf bündelnden Breitbandanlagen im Mikrowellenbereich, welche der Nachrichtenübertragung dienen.

3.1 VHF-Antennen

3.1.1 Wendelantennen

Bei den VHF-Antennen im Meter- und Dezimeterwellenbereich ist die zirkularpolarisierte Wendelantenne weitaus vorherrschend, denn sie verbindet die Vorteile einfacher, mechanischer Konstruktion und kleinen Gewichtes mit der geringen Frequenzabhängigkeit und der leichten Zusammenschaltbarkeit zu beliebigen Gruppen mit 1, 2, 4, 8 bis 32 Einzelstrahlern, wodurch Antennengewinne von 10...25 dB erzielt werden können (Fig. 6).

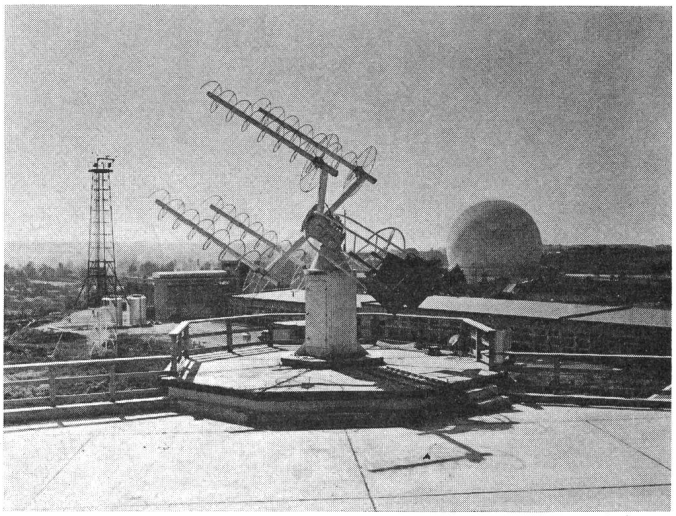

Fig. 6
Telemetrie-Antenne in der Station Bodou-Pleumeur

Mit diesen relativ einfachen Antennenanlagen lieferte der Wettersatellit «Nimbus A» aus ca. 1000 km Höhe Wolkenbilder wie Fig. 7, wobei der Signal-Geräusch-Abstand bei etwa 40 dB liegt.

3.1.2 Parabol-Antennen

In einzelnen amerikanischen Tracking-Stationen werden auch Parabol-Antennen von 18 m Durchmesser im VHF-

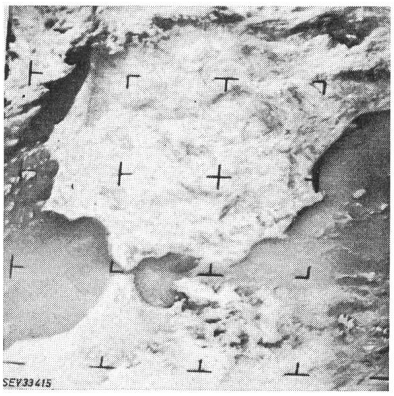

Fig. 7
Wolkenaufnahmen über Spanien
vom Wettersatelliten «Nimbus A» aufgenommen aus 500 km Höhe

Bereich verwendet. Sie haben Gewinne von 28...32 dB. Dabei werden noch Vierfach-Wendelantennen mit geringer Bündelung zur Grobpeilung, bzw. zur Einweisung der grossen Antennen benützt.

3.2 Grosse Mikrowellenantennen für Breitband-Übertragungen

Sie sind die Giganten in der Antennentechnik für die Nachrichtenübermittlung mit Satelliten im Zentimeterwellenbereich. Die Übertragungsdistanzen betragen hier etwa 40000 km («Syncom»), die Bandbreiten liegen bei 3...30 MHz, die Trägerfrequenzen bei 4...6 GHz und die geforderten Rauschabstände bei 30...50 dB. Die Informationskapazität dieser Kanäle ist also etwa 10^7 bit/s. Da die Bordantennen und die Bordsender wegen der beschränkten Gewichte in ihrer Leistungsfähigkeit stark reduziert sind, muss man alles mit der Bodenanlage herauszuholen suchen, also den Antennengewinn möglichst hoch und die Rauschtemperatur der Empfangsanlage möglichst klein halten. Letzteres erreicht man in bekannter Weise mit den heliumgekühlten Molekularverstärkern ($T_{eff} \approx 30\,^0$K), in Verbindung mit rauscharmen Antennen (grosse Nebenzipfel- und Rückendämpfung). Zur Erzielung hoher Antennengewinne gibt es nur das eine Mittel, eine möglichst grosse Apertur A.

3.2.1 Konturungenauigkeit, minimale Wellenlänge und Herstellungspreis

Bekanntlich ist ja der Antennengewinn:

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A = \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2$$

wenn keinerlei mechanische Fertigungstoleranzen bei den Reflektoren und Erregern auftreten. Man muss aber eine gewisse, statistisch verteilte Ungenauigkeit (Abweichung s von den Sollmassen) in Kauf nehmen und diese reduziert den Antennengewinn:

Es ist

$$G = \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 e^{-25\,(D/\lambda)^2\,(2{,}6\,s/D)^2}$$

Für eine 60-dB-Antenne muss man bei einem D/λ-Verhältnis von 300 eine statistisch verteilte mechanische Toleranz von $S/D = 1 \cdot 10^{-4}$ einhalten. Bei $\lambda = 5$ cm müsste also $D = 15$ m und $s = 1{,}5$ mm sein. Diese maximal zulässige Abweichung s enthält aber nicht nur die Fertigungstoleranzen, sondern auch die unvermeidlichen Deformationen durch das Eigengewicht der Spiegelkonstruktion, die thermische Ausdehnung, den Winddruck und etwaige Bewegung in den Fundamenten. Man kann nun verhältnismässig einfach mit den bekannten Formeln der Statik und Festigkeitslehre ausrechnen, dass es eine kleinste Wellenlänge λ_{min} für jeden Durchmesser D einer Parabolantenne gibt, welche man von Natur aus nicht unterschreiten darf. Doch wird man nach Möglichkeit eine zu projektierende Grossantenne nicht für diese Minimalwellenlänge auslegen, da sonst die Kosten untragbar hoch werden. Eine Faustformel für den Preis P auf der Dollarbasis lautet:

$$P \approx 4^n \frac{D^3}{\lambda} \quad [\$]$$

n ist die Zahl der Drehachsen, D der Durchmesser und λ die Wellenlänge. In Fig. 8 sind nun die minimale Wellenlänge λ_{min} und die zugehörigen Kosten P in Abhängigkeit vom Durchmesser D dargestellt. Es ist auch der maximale zu λ_{min} gehörige Antennengewinn in dB angegeben. Wenn man also grosse Antennen tatsächlich für die angegebenen kleinstmöglichen

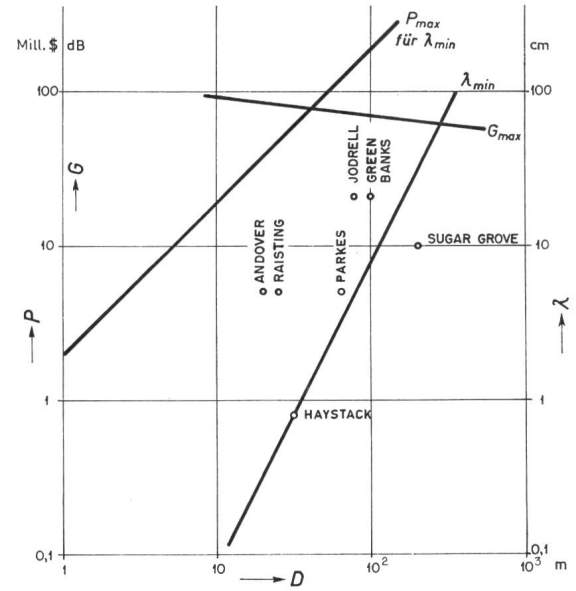

Fig. 8

Minimale Wellenlänge λ_{min}, Gewinn G_{max} und Herstellungskosten P_{max} für grosse Parabol-Antennen in Abhängigkeit vom Durchmesser D

$$P = 4^n \frac{D^3}{\lambda}\ \$, \qquad n = 2$$

Wellenlängen auslegen will, so muss man mit gewaltigen Kosten rechnen. Doch sieht man aus den eingetragenen Punkten für die Wellenlänge von ausgeführten Anlagen, dass es wirklich ratsam ist, für die Betriebs-Wellenlänge einen «Sicherheitsfaktor» von ungefähr 10 einzuführen, wie dies bei den Anlagen Andover und Raisting gemacht worden ist. Jeder Versuch, den Wert von λ_{min} zu unterschreiten, ist bestimmt zum Scheitern verurteilt.

Ein Beispiel dafür ist die Anlage «Sugar Grove», welche bei $D = 200$ m für $\lambda = 10$ cm vorgesehen war, obgleich $\lambda_{min} = 33$ cm ist. Der erste Kostenvoranschlag lautete auf 20 Mill. $; dieser musste dann auf 50 Mill. $ erhöht werden, und als dann nach Verbrauch dieser 50 Millionen noch keinerlei Aussicht auf ein tatsächliches Gelingen der Antennenanlage bestand, wurden die Arbeiten abgebrochen und die Antenne verschrottet.

3.2.2 Fernfeldbedingung, Signal-Rauschverhältnis

Es sei hier kurz darauf hingewiesen, dass die Messung von Gewinn und Charakteristik von derart grossen Antennen nicht ganz leicht ist. Das Fernfeld beginnt für die 25-m-Antenne bei 5 cm Wellenlänge erst in 25 km Entfernung! Für die 100-m-Antenne von Green Banks beginnt es erst in 100 km Entfernung! — Rein zufällig ist bei der Telstar-Übertragung das Signal zu Rauschverhältnis:

$$S/N \approx \frac{G_E}{T_A + T_E}$$

wobei T_A die Antennenrauschtemperatur und T_E die Empfängerrauschtemperatur ist. Durch den Molekularverstärker im Empfängereingang wird $T_E \approx 30\,^0$K. Die am Aufstellungsort gemessene Antennenrauschtemperatur beträgt $\approx 10\,^0$K bei Ausrichtung zum Zenith und $\approx 30\,^0$K bei $30\,^0$ Elevation.

3.2.3 Hornparabol-Antennen

Es seien nun zwei der wichtigsten und interessantesten Grossantennen für Nachrichtenverkehr über Satelliten beschrieben. Bei den Anlagen Andover und Bodou-Pleumeur hatte man sich nach umfangreichen Vorstudien für eine Horn-

parabolantenne mit einer Aperturfläche von 330 m² bei einem Durchmesser von 20,6 m entschieden. Die prinzipielle Anordnung ist eine Hornantenne von 36,6 m Länge mit Kreisquerschnitt, die durch einen parabolisch gekrümmten Umlenkreflektor unter 45° abgeschlossen ist und von diesem durch einen Kreiszylinder von 20,6 m Durchmesser die in der Kegelspitze des Horns über eine Drehkupplung eingespeiste Sendeleistung von 2 kW bei 6, bzw. 4, GHz abstrahlen.

Die technischen und elektrischen Daten der ganzen Antenne sind:

Gewicht	380 t
Höhe	29 m
Max. Durchmesser	58 m
Radom-Durchmesser	64 m
Gewicht des Radomes	26 t
Gewinn der Antenne	57,8 dB
3-dB-Breite	0,165° bei 4,170 GHz
Nullstellen-Breite	5° 50′
Höhe des 1. Nebenzipfels	−22,6 dB

Die Gesamtansicht der Antenne zeigt Fig. 9.

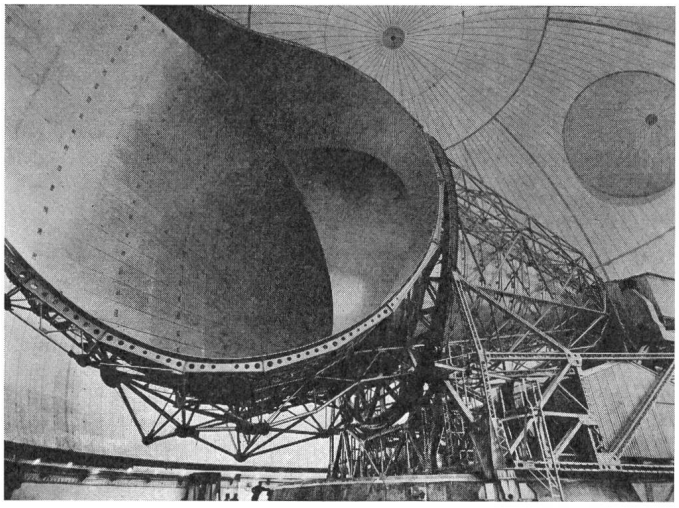

Fig. 9
Gesamtansicht der Antenne in Bodou-Pleumeur

3.2.4 Cassegrain-Antennen

In Raisting bei München hat man nach reiflichen Überlegungen das Prinzip der Hornparabol-Antenne mit der Cassegrain-Antenne vereinigt. Fig. 10 zeigt das Prinzip der Antenne von Raisting. Diese Antenne hat eine Aperturfläche von 490 m² bei einem Paraboldurchmesser von 25 m. Sie ist räumlich wesentlich kleiner, da das bei der Hornparabol-Antenne ca. 50 m lange Horn auf etwa 12 m reduziert ist. Das Radom hat dementsprechend nur 50 m Durchmesser und wiegt nur 13 t. Die 290 t schwere Antenne hat einen Gewinn von 57 dB bei 4 GHz, also etwa die gleichen elektrischen Eigenschaften wie die Hornparabolantenne. Die Konturungenauigkeit beträgt maximal 2 mm in jeder Stellung des Parabols, beim Fangreflektor und Horn ist sie kleiner als 0,4 mm. Der quadrische Mittelwert der Verformung ist kleiner als 0,78 mm [1]).

3.3 Selbstbündelnde Antennen

Nach dem unter Ziff. 3.2.1 Gesagten begrenzen die unvermeidlichen Konturungenauigkeiten den maximalen für eine

[1]) Siehe Bull. SEV 55(1964)20, S. 1035...1036.

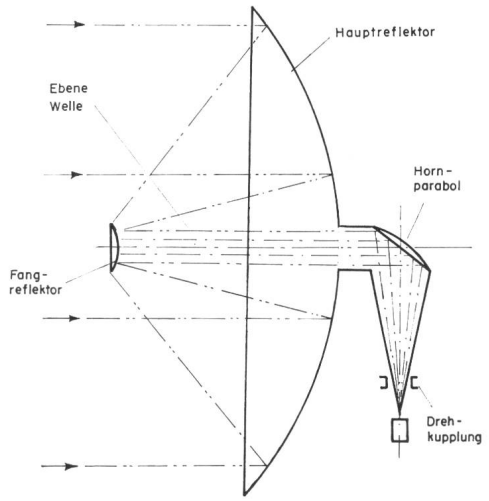

Fig. 10
Prinzip der Cassegrain-Antenne mit Hornparabolspeisung

Wellenlänge erzielbaren Gewinn. So ist, wenn man auf die Kosten keine Rücksicht nimmt, für $\lambda = 21{,}1$ cm $G_{max} = 67{,}7$ dB bei $D = 165$ m. Es gibt nun, in der Radio-Astronomie besonders, Fälle, wo dieser Gewinn nicht ausreichend ist, und man hat nach Mitteln und Wegen gesucht, um eine Erhöhung von G zu erreichen. Man hat sich z. B. von den Einflüssen der Schwerkraft auf die Kontur dadurch unabhängig zu machen versucht, dass man den natürlichen Boden eines Talkessels parabolisch ausgeebnet hat, und die Schwenkung der Charakteristik durch Defokussierung des Primärerregers erzielt. Diese Antenne hat einen Durchmesser von 300 m und bei $\lambda = 21{,}1$ cm einen Gewinn von 73 dB. Die Achse der Hauptkeule kann natürlich nur sehr beschränkt geschwenkt werden, was aber für radioastronomische Beobachtungen u. U. zulässig sein kann. Bei dieser enorm grossen Apertur von 70000 m² ist es wegen der Inhomogenität der unteren Atmosphäre durchaus nicht mehr sicher, dass die von einer fernen Quelle einfallende Strahlung in der Ebene der Apertur an allen Stellen konphas eintrifft. Die dadurch verbogene oder unregelmässig gekrümmte Phasenfront der Welle täuscht Konturfehler in der Reflektorfläche vor und setzt praktisch den Gewinn der Antenne wieder herab. Es sind Gewinnverluste ΔG von 10 dB durch die Troposphäre bekannt. *Bracewell* hat daher vorgeschlagen, die Antennenanlage in viele Einzelantennen aufzuteilen, welche räumlich mit beliebigen Abständen verteilt sein können. Das von jeder Antenne gelieferte Signal wird durch Phasenvergleich mit einer zentralen Antenne mit Hilfe eines Phasenschiebers stets auf Phasengleichheit einreguliert und dann erst werden die Signale addiert und so die ebene Phasenfront der einfallenden Welle sichergestellt. Dieses Prinzip, welches man auch als «Automatic THreedimensional Electronic Scanned Array = ATHESA» bezeichnet, kann man nun auf eine grössere Zahl von Antennen anwenden, z. B. 4, 8 oder 16 Stück, und man erhält damit eine Gewinnzunahme von 6, 9 oder 12 dB. Für eine Athesa-Anlage mit 36-m-Parabolen, welche einen maximalen Gewinn von 63 dB bei $\lambda = 5{,}0$ cm haben, erhält man mit 16 Antennen 75 dB Gewinn, den man bei Verwendung einer Einzelantenne nur mit einer Apertur von 144 m erreichen könnte. Die Kosten für einen so grossen Einzelspiegel sind dann mindestens viermal so hoch wie für alle 16 Einzelspiegel zusammen! Die beiden Vorteile der ebenen Wellenfront bei extrem hoher

Bündelung und des wesentlich geringeren Preises dürften für die Zukunft der selbstbündelnden Antennen ausschlaggebend sein.

4. Leistungsbedarf und Antennengrössen für Nachrichtenübermittlung im interplanetarischen Raum

Wenn man sich die Leistungsbilanzen für die Übertragungen zwischen Satelliten und Bodenstationen aufstellt:

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

so hat man im ersten Faktor die drei charakteristischen Grössen des Systems, nämlich:

1. $P_s\, G_S$. Dieses Produkt ist die ERP (effektive radiated power) des Bordsenders. Da an Bord des Satelliten die Gewichte stets beschränkt sind, ist es angebracht, sowohl P_s als auch G_S in Abhängigkeit von der Frequenz für konstante Gewichte W_S des Senders und W_a der Bordantenne zu untersuchten.
2. D_E ist der Durchmesser der Bodenantenne. Aus bisherigen Darlegungen ist bereits bekannt, dass jeder Wellenlänge ein maximaler Antennendurchmesser zugeordnet ist.
3. R ist die interplanetarische Distanz.

Nimmt man nun ideale Codierung der zu übertragenden Signale an, so ist die Übertragungskapazität C des Kanals:

$$C = B \cdot \mathrm{ld}\left(1 + \frac{S}{N}\right)$$

Diese Gleichung kann man nun nach den drei Grössen $W_a + W_s$ (entsprechend $P_s\, G_S$), D_E und R für eine feste Frequenz auswerten. Das ist in Fig. 11 gezeigt für $f = 6$ GHz;

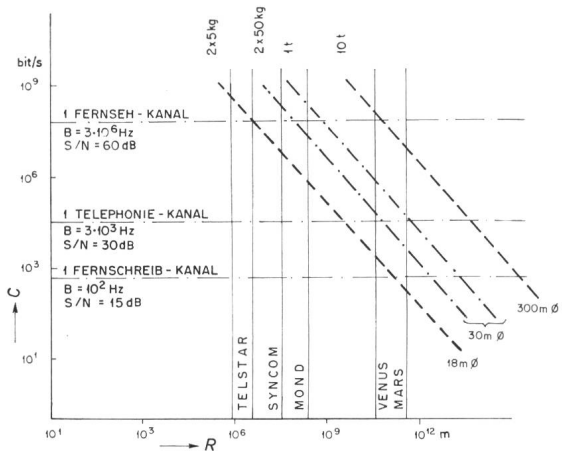

Fig. 11
Informationskapazität C einer Verbindung mit Raumschiffen für verschiedene Gewichte der Bordanlage und verschiedene Durchmesser der Bodenantenne
$\lambda = 5$ cm, $T_{eff} = 30$ °K

dazu ist noch die Informationskapazität C der drei wichtigsten Übertragungskanäle eingezeichnet (wobei auf den höheren Geräuschabstand für Telephonie und Fernsehkanäle Rücksicht genommen ist). Man sieht sehr gut, dass zwar Fernsehübertragungen vom Mond zur Erde mit einer Bodenantenne von 30 m Durchmesser und einem Gewicht von 100 kg für die Bordsendeanlage ($P_s = 8$ W, $G_S = 2 \cdot 10^4$, Richtantenne mit $D_S = 2{,}25$ m ∅ an Bord) gerade noch möglich sind. Mit dem gleichen Aufwand könnte man auch noch einen Telephoniekanal bis zur Venus, evtl. auch noch bis zum Mars durchbringen, mit einer Laufzeit von ca. 3...6 min. Um aber einen Fernsehkanal von der Venus zur Erde zu übertragen, müsste man etwa 10 t Sendeeinrichtungen an Bord nehmen, nämlich eine Parabolantenne von 22,5 m Durchmesser und einen Sender mit etwa 1 kW Leistung. Die Bodenantenne sollte in diesem Falle eigentlich 300 m Durchmesser haben, was aber bei $\lambda = 5$ cm nicht mehr realisierbar ist. Nur eine Athesa-Anlage mit 16 Einzelantennen von je 80 m Durchmesser könnte die Aufgabe noch erfüllen.

Es drängt sich darum die Frage auf, ob nicht die Übertragung mit kohärentem Licht (Laser) günstiger ist. Nach dem heutigen Stand der Laser-Entwicklung scheint der optische Überlagerungsempfang sowohl hinsichtlich der Frequenzstabilität des Überlagerungsoszillators als auch der direkten

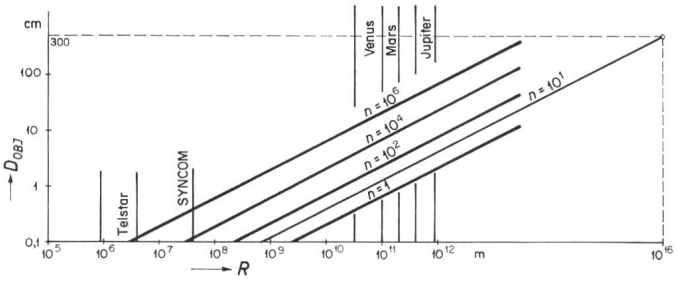

Fig. 12
Notwendiger Fernrohrdurchmesser D_{OBJ} für eine interplanetarische Nachrichtenübertragung mit kohärentem, infrarotem Licht

Mischung in Photokathoden durchaus realisierbar zu sein. Das Empfängerrauschen rührt fast nur von den Quanten her, und man hat daher theoretisch als minimale Empfangsleistung:

$$N = S_{min} = 1 \text{ Photon/s pro Hz Bandbreite}$$

Für Licht gilt auch die Übertragungsgleichung:

$$S = P_s \frac{A_S\, A_E}{\lambda^2\, R^2} = \left(\frac{S}{N}\right) h f B = n\, h f B$$

Dabei ist A die Fläche der strahlenden Apertur, bzw. des Fernrohres $A = D^2\pi/4$. Bei Lasern mit grossen Leistungen ist der Pulsbetrieb noch vorherrschend; man rechnet daher die abgestrahlte, bzw. empfangene Energie pro Puls. Ist τ die Impulsbreite und $B \approx 1/\tau$, dann erhält man:

$$\frac{W_E}{W_S} = \left(\frac{A}{\lambda\, R}\right)^2 = \left(\frac{S}{N}\right) h f = n\, h f$$

Man kann also die notwendige Apertur ($A_E = A_S$), bzw. den Fernrohrdurchmesser $D_E = D_s$ für einen gegebenen «Geräuschabstand» n in Abhängigkeit von der Übertragungsdistanz R berechnen, wie das Fig. 12 zeigt. Voraussetzung ist dabei, dass die «Bodenstation» sich ausserhalb der irdischen Atmosphäre befindet, da diese erheblichen Einfluss auf die Übertragungsdämpfung hat. Dann kann man aber schon mit den recht bescheidenen Fernrohrdurchmessern von 20...30 cm gute Übertragungsqualität erhalten, wobei aber nicht vergessen werden darf, dass die beiden Fernrohrachsen auf mindestens $^1/_{10}$ Bogensekunde genau aufeinander ausgerichtet sein müssen. Diese ungeheuer grosse Stabilität der Fernrohrachsen bedingt wieder ganz erhebliche Gewichte an Bord des Satelliten für die Stabilisierung der Satellitenachse und der Fernrohre. Wenn man die Entfernung R in Fig. 12 bis 10^{16} m ausdehnt, das ist die Entfernung bis zum nächsten Fixstern «α-Centauri», so findet man für $n = 10$ einen Fernrohrdurchmesser von etwa 3 m.

Literatur

[1] *P. S. Carter:* Antenna Arrays Around Cylinders. Proc. IRE 31(1943)12, S. 671...693.

[2] *H. H. Kuehl:* Radiation from a Radial Electric Dipole Near a Long Finite Circular Cylinder. Trans. IRE Antennas and Propagation AP-9(1961)6, S. 546...553.

[3] *J. R. Wait:* Electromagnetic Radiation from Cylindrical Structures. London, Pergamon Press 1959.

[4] *H. B. Riblet:* A Broadband Spherical Satellite Antenna. Proc. IRE 48(1960)4, S. 631...635.

[5] *H. A. Wheeler:* A Helical Antenna for Circular Polarization. Proc. IRE 35(1947)12, S. 1484...1488.

[6] *J. T. Bangert* et al.: The Spacecraft Antennas. Bell. Syst. techn. J. 42(1963)4/1, S. 869...897.

[7] *J. Robieux:* L'influence de la précision de fabrication d'une antenne sur ses performance. Ann. Radioélectr. 11(1956)43, S. 29...56.

[8] *J. Giuttet:* Le rayonnement diffus lié aux erreurs de distribution. Rev. techn. Thomson-Houston, Electronique –(1960)33, S. 29...57.

[9] *J. N. Hines* and *R. H. Turrin:* The Electrical Characteristics of the Conical Horn-Reflector Antenna. Bell. Syst. techn. J. 42(1963)4/2, S. 1187...1211.

[10] *H. Kinder* und *W. Stöhr:* Die Funkstelle Raisting für Nachrichtenverbindungen über Satelliten. Siemens Z. 38(1964)10, S. 723...733.

[11] *J. H. Schrader:* Receiving System Design for the Arraying of Independently Steerable Antennas. Trans. IRE Space Electronics and Telemetry SET-8(1962)2, S. 148...153.

[12] *M. Breese, R. Colbert, W. Rubin* and *P. Sferrazza:* Phase-Locked Loops for Electrical Scanned Antenna Arrays. Trans. IRE Space Electronics and Telemetry SET-7(1961)4, S. 95...100.

[13] *A. Rupp:* Antennenprobleme bei Raumfahrt-Bodenstationen. Raumfahrtforschung 8(1964)1, S. 17...21.

[14] *G. E. Mueller, W. B. Herbenstreit:* Möglichkeiten und Probleme von Fernmeldesatelliten. Raketentechnik und Raumfahrtforschung 6(1962)1, S. 9...23.

Adresse des Autors:

Dr. *H. Paul,* AG Brown Boveri & Cie., 5400 Baden

Commission Electrotechnique Internationale (CEI)

Sitzungen des CE 59, Aptitude à la fonction des appareils électrodomestiques und seiner Groupes ad hoc vom 20. bis 24. Juli 1965 in Paris

CE 59, Aptitude à la fonction des appareils électrodomestiques

Das CE 59 traf sich vom 20. bis 24. Juli in Paris zur 1. Sitzung. Der Präsident, L. Elfström, Schweden, konnte annähernd 120 Delegierte aus 15 Ländern begrüssen. Überdies waren Vertreter verschiedener internationaler Organisationen anwesend, so vom ISO/TC 73, Marques de Conformité aux Normes, vom Centre International de Promotion de la Qualité (CTPQ) und von der Organisation Internationale des Union des Consommateurs (IOCU). Dieses aussergewöhnliche Interesse bestätigt die Aktualität der Aufgabe, derer sich das CE 59 anzunehmen hat. Speziell begrüsst wurden die zahlreichen Konsumentenvertreter, die als Beobachter der erwähnten Organisationen, aber auch als Mitglieder nationaler Delegationen anwesend waren. Es wurde einleitend daran erinnert, dass im Anschluss an eine letztes Jahr durchgeführte schriftliche Umfrage unter den Nationalkomitees mit überwältigender Zustimmung beschlossen wurde, ein neues Comité d'Etudes ins Leben zu rufen, das sich mit der Aufstellung von genormten Messmethoden zur Prüfung des Gebrauchswertes elektrischer Haushaltapparate zu befassen hat.

In Anbetracht des grossen Arbeitsgebietes bemühte sich das Comité vorerst seinen Auftrag zu präzisieren, was für die weiteren Arbeiten von entscheidender Bedeutung ist. Es herrschte anfänglich Unklarheit, insbesonders in Bezug auf Bestimmungen über die Sicherheit der Apparate, da einzelne, dem Comité unterbreitete Entwürfe Sicherheitsbestimmungen und Gebrauchswertprüfungen in einem Dokument vereinigten. Man anerkannte die Arbeiten anderer internationaler Organisationen über die Sicherheit, wie z. B. jene der CEE und strebte allgemein nach einer sauberen Trennung zwischen Sicherheitsvorschriften und Prüfmethoden zur Ermittlung des Gebrauchswertes. Das Comité d'Action soll jedoch um klare Richtlinien in dieser Frage gebeten werden. Ferner wurde gewünscht, den Sinn und Zweck der Arbeiten, der ja darin besteht, die Konsumenten auf objektive Weise zu informieren, im Auftrag besser zum Ausdruck zu bringen. Das Comité umriss demnach seine Aufgabe wie folgt:

«Es sollen die Kriterien zusammengestellt und definiert werden, die für die Ermittlung des Gebrauchswertes eines elektrischen Haushaltapparates wesentlich sind, um dadurch die Konsumenten informieren zu können; es sollen genormte Prüfmethoden zur Messung dieser Kriterien beschrieben werden.»

Anschliessend wurde das Comité d'Etudes intern organisiert. Es standen sich verschiedene Vorschläge gegenüber, die vom einen Extrem, starke Konzentration der Arbeiten auf 2 Sous-Comités, bis ins andere Extrem, Aufsplitterung der Arbeiten in Sous-Comités für jeden Gegenstand, reichten. Die schlussendlich gewählte Organisation scheint befriedigend zu sein und verspricht, möglichst bald konkrete Ergebnisse veröffentlichen zu können. Man bildete 6 Sous-Comités, von denen sich jedes mit einem, auf die Prioritätsliste gesetzten Gegenstand, zu befassen hat. Die Bezeichnung dieser Sous-Comités wurde jedoch derart erweitert, dass sie später die Bearbeitung weiterer verwandter Apparate übernehmen können. Die Bestimmung der Sekretariate und der Präsidenten war unumstritten. Die Sekretariatsländer stimmen ausnahmslos mit jenen Nationalkomitees überein, welche vom Comité d'Action die Aufträge zur Ausarbeitung von Erstentwürfen übernommen haben. Die Präsidenten wurden vorläufig als Rapporteure eingesetzt und sollen später definitiv gewählt werden. Es sei speziell erwähnt, dass als Rapporteur des SC 59B in Ingenieur A. Gugg, ein Schweizer zum Zuge kam.

Die endgültige Organisation ist in Tabelle I wiedergegeben.

Die 6 Sous-Comités hielten nach der Eröffnungssitzung als ad hoc-Gruppen gleichzeitig Arbeitssitzungen ab, womit die zur Verfügung stehende Zeit optimal ausgenützt werden konnte. Die Schweiz war durch 6 Vertreter anwesend und entsandte in jede Gruppe einen Delegierten, um die Arbeiten auf der ganzen Basis verfolgen zu können.

Organisation des CE 59 der CEI

Tabelle I

Sous-Comité	Name	1. Gegenstand	Weitere Gegenstände	Sekretariat
A	Küchenmaschinen	Geschirrwaschmaschinen	Saftpressen, Mühlen	USA
B	Kochapparate	Kochherde und Kochplatten	Warmhalteplatten, Toaster	Deutschland
C	Heizapparate	Heizdecken	Heizöfen, Kochtöpfe, Warmwasserspeicher	Holland
D	Waschküchenmaschinen	Waschmaschinen	Wäsche-Zentrifugen	Frankreich
E	Bügel- und Pressapparate	Bügeleisen	Bügelmaschinen	Japan
F	Bodenbehandlungsapparate	Staubsauger	Blocher	Schweden