

Zeitschrift: Pionier : Zeitschrift für die Übermittlungstruppen
Herausgeber: Eidg. Verband der Übermittlungstruppen; Vereinigung Schweiz. Feld-Telegraphen-Offiziere und -Unteroffiziere
Band: 42 (1969)
Heft: 9

Artikel: Beobachtung (Ortung) der Flugkörper von der Erde aus
Autor: [s.n.]
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-563232>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 02.02.2025

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

Beobachtung (Ortung) der Flugkörper von der Erde aus

Für das Orten von Satelliten und Raumsonden wurden verschiedene Verfahren entwickelt, die man am zweckmässigsten in Radio-Ortungsverfahren, Radar-Ortungsverfahren und optische Ortungsverfahren einteilt. Zum Auswerten der an den zahlreichen Bodenstationen erhaltenen Beobachtungsergebnisse stehen in Zentralanlagen elektronische Rechenmaschinen zur Verfügung, die zurzeit für Hunderte von Flugkörpern Bahnvoraberechnungen anstellen und so ein systematisches Orten erst ermöglichen.

Das Ortungsprinzip

Die Ortung von Satelliten und Raumsonden wird zurzeit noch ausschliesslich von Beobachtungsstellen an der Erdoberfläche vorgenommen; nur in seltenen Fällen sind einige Flugzeugbeobachtungen von Satelliten während ihres Absturzes erhalten worden. Die folgenden Ausführungen sollen daher auf die Ortung von Raumkörpern von Stationen auf der festen oder der flüssigen Erdoberfläche beschränkt bleiben. Allerdings kann man heute schon voraussehen, dass in nicht allzuferner Zukunft Positionsbestimmungen und andere Beobachtungen auch von eigens dazu konstruierten Mess-Satelliten und von möglicherweise bemannten Raumstationen aus vorgenommen werden. In jedem Fall aber besteht die Aufgabe, eine Ortung eines Raumkörpers vorzunehmen, in der Bestimmung der Position relativ zur Beobachtungsstation, gemessen in einem genau definierten Koordinatensystem und verbunden mit einer genauen Zeitangabe.

Bei fast allen bis heute von der Erde aus gestarteten Raumflugkörpern handelt es sich um künstliche Erdsatelliten, deren Gravitationszentrum also die Erde ist. Nur einige wenige Flugkörper sind aus dem Anziehungsbereich der Erde herausgeschleudert worden, wie z. B. die Venus- und Marssonden; die Mondsonden waren in Wirklichkeit immer noch Erdsatelliten in sehr langgestreckten Ellipsenbahnen. Um die Bewegung solcher Raumkörper zu beschreiben, wählt man gewöhnlich als praktisches Bezugssystem ein rechtwinkliges x -, y -, z -Koordinatensystem, das seinen Ursprung im Erdmittelpunkt hat, ein sog. geozentrisches System. Die x -, y -Ebene liegt in der Erdäquatorebene; dabei zeigt die x -Achse zum (astronomischen) Frühlingspunkt und die z -Achse zum Nordpol. In diesem Koordinatensystem werden dann die Bahnbestimmungsrechnungen ausgeführt. Der Beobachter nimmt allerdings seine Messungen in einem anderen System vor, in einem «topozentrischen» System, dessen Ursprung sich im Messinstrument befindet. Der Beobachter misst z. B. im Horizontalsystem die Höhe (oder den dazu komplementären Winkel, die Zenithdistanz) und das Azimut oder im astronomischen Äquatorialsystem die Deklination und den Stundenwinkel. Mit verschiedenen Verfahren kann man ausserdem auch noch die Entfernung des Körpers von der Station und manchmal die Radialgeschwindigkeit bestimmen. Um solche Beobachtungen für

weitere Rechnungen — z. B. für die Bestimmung der Bahnelemente — benutzbar zu machen, muss man eine Koordinatentransformation vornehmen, zu der man sowohl den genauen Ort der Station auf der Erde als auch die genaue Zeit der Beobachtung braucht. Mathematisch gesehen bedeutet diese Transformation die Addition von zwei Vektoren: der Beobachtungsvektor (z. B. durch die Höhe, das Azimut und die Entfernung festgelegt) wird zu dem Stationsvektor (gegeben durch die geographische Breite, die geographische Länge und die Entfernung vom Erdmittelpunkt) vektoriell addiert; ausserdem hat man noch eine Drehung des Koordinatensystems vorzunehmen, um den Nullpunkt der geographischen Länge (den Meridian von Greenwich) mit dem Frühlingspunkt zu verbinden.

Für mässige Genauigkeitsansprüche gestaltet sich das Bestimmen der Stationskoordinaten verhältnismässig einfach; will man aber eine sehr grosse Genauigkeit erzielen, dann wird die Bestimmung des Stationsvektors zu einem Problem, das sich heute noch nicht zur völligen Zufriedenheit lösen lässt. Zwar bestehen in den meisten Ländern der zivilisierten Welt sehr genaue geodätische Bezugssysteme, an die man die Stationsposition anschliessen kann; jedoch ist die genaue Verbindung dieser Systeme — vor allem von Kontinent zu Kontinent — heute noch nicht genau genug bekannt. Man vermutet, dass in diesen Anschlüssen noch Fehler in der Größenordnung von bis zu hundert Metern bestehen. Zusätzlich muss man aber auch noch die Entfernung der Beobachtungsstation vom Erdmittelpunkt kennen. Hierzu benötigt man die Kenntnis der genauen Gestalt der Erdoberfläche, die — im grossen gesehen — keine Kugel-, sondern angenähert eine Rotationsellipsoidfläche ist. In der Tat haben die Satellitenbeobachtungen der letzten Jahre die Forschungsergebnisse über die Erdgestalt wesentlich erweitert und dazu geführt, dass man heute anstelle der für Jahrzehnte angenommenen Abplattung $1/297$ den besseren Wert $1/298,3$ anerkennt.

Ein weiteres Problem, ebenfalls für sehr genaue Messungen, bildet das Bestimmen der genauen Zeit bei einer Beobachtung. Ein Erdsatellit bewegt sich in seiner Bahn mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 7 bis 7,5 km/s. Will man seinen Ort im Raum mit einer Genauigkeit von einigen Metern bestimmen, so muss die Zeit bis auf die Millisekunde genau bekannt sein. Eine solche Genauigkeit bei Zeitmessungen ist im Laboratorium selbstverständlich schon lange möglich; jedoch gelang es bisher noch nicht, ein einheitliches Zeitsystem für Stationen zu erstellen, die über die ganze Erde verteilt liegen. Selbst die durch besondere Radiosender laufend ausgestrahlten Zeitzeichen sind über lange Zeiten nicht sehr genau; sie bilden aber das einzige Mittel, mit dessen Hilfe man die Uhren an den verschiedenen Beobachtungsstationen synchronisieren kann. Gibt man sich allerdings mit Ortungsgenauigkeiten von hundert Metern zufrieden, dann braucht man die Zeit auch nur bis auf ein Hundertstel Sekunde genau. Dies lässt sich ver-

hältnismässig einfach erreichen, vor allem, wenn man an den Stationen, an denen genaue Beobachtungen angestellt werden, Quarzuhren verwendet und diese regelmässig kontrolliert.

Einteilung der Ortungsverfahren

Nach dieser kurzen, die Probleme allerdings nur streifenden Behandlung der Frage, wie man den Ort und die Zeit bei Beobachtungen bestimmt, sei nun auf die Verfahren eingegangen, mit denen man die Ortung von Raumkörpern vornehmen kann. Allen Verfahren liegt ein gemeinsames Prinzip zugrunde: elektromagnetische Strahlung — allerdings in verschiedenen Wellenbereichen — wird stets als Metermass benutzt. Man könnte daher die Verfahren nach dem benutzten Wellenbereich klassifizieren. Dies wäre jedoch nicht sehr zweckmässig, da sowohl Radio- als auch Radarwellen oft in den gleichen Wellenbereichen arbeiten. Eine etwas praktischere Einteilung ergäbe sich, indem man danach fragt, ob eine aktive Mitwirkung des Satelliten — durch besondere Radiosender oder Blitzeinrichtungen — für die Ortung nötig ist, oder ob der Satellit passiv sein kann. Eine dritte Möglichkeit bestünde im Unterteilen der Verfahren in solche, die eine vollständige Ortsbestimmung, d. h. den Positionsvektor ergeben, und in solche, die nur die Richtung zum Raumkörper liefern, ohne dass man die Entfernung bestimmen kann. Leider führen alle diese theoretischen Einteilungen zu unbequemen Ausnahmen; eigentlich alle Stationen sind einmalig und schwer in ein richtiges System einzuordnen.

In Kreisen, die tagtäglich beruflich mit der Ortung von Raumkörpern beschäftigt sind, hat sich in den letzten Jahren eine lose Einteilung der Ortungsverfahren in drei allgemeine Klassen eingebürgert, die man grob als Radioverfahren, Radarverfahren und optische Verfahren bezeichnen kann. Die Radioverfahren erfordern immer besondere aktive Sender im Satelliten oder in der Raumsonde. Bei den Radarverfahren kann man ebenfalls Sender im Satelliten verwenden oder ohne solche das Radarecho von der Oberfläche des Satelliten zur Messung benutzen. Optische Verfahren sind fast ausschliesslich passive Verfahren, bei denen man das von dem Satelliten reflektierte Sonnenlicht auffängt; nur in einem Falle bisher waren an einem Satelliten Elektronenblitz-Einrichtungen angebracht, die optisch beobachtet wurden.

Welche Verfahren im einzelnen zur Ortung eines Satelliten angewandt werden können, hängt also nicht nur von der Stationseinrichtung, sondern massgeblich auch von dem Satelliten selbst ab. Die Öffentlichkeit erfährt gewöhnlich nur von solchen Satelliten, die mit komplizierten Messinstrumenten für wissenschaftliche Untersuchungen im Weltraum ausgestattet sind, wie z. B. die Sputniks, die Explorer, die Kosmos, die Tiros, der Doppelsatellit Transit 4 A/INJUN usw. Solche Satelliten müssen mit Radiosendern versehen sein, um die im Raum angestellten Messungen zum Boden heruntermelden zu können. Man darf aber nicht vergessen, dass beim Start von Satelliten oft auch noch eine manchmal erhebliche Anzahl von zusätzlichen Körpern in Erdbahnen geschleudert werden, wie z. B. die Endstufen der Startraketen, die Verkleidung zum Erzielen eines stromlinienförmigen Vorderteils, die Schutzdeckel über den Beobachtungsfenstern, Abbremsgewichtstücke und sonstiger «Abfall». Manchmal missglückt auch ein

Experiment, nachdem sich der Flugkörper in der Erdbahn befindet, z. B. wenn man mehrere zusammen gestartete Satelliten oben trennen will oder manchmal auch aus völlig unerfindlichen Gründen. Dies passierte z. B. kurz nach dem Start des amerikanischen Doppelsatelliten Transit 4 A/INJUN. Beide Satelliten bewegten sich bereits sicher in ihrer Bahn und hatten sich auch voneinander gelöst. Die gleichermassen losgetrennte letzte Raketenstufe befand sich ebenfalls in einer etwas verschiedenen Erdbahn. Plötzlich explodierte diese Rakete kurz vor Beendigung des ersten Umlaufs. Man hat dann weit über hundert Reststücke dieser Explosion gefunden und für sie ebenfalls Bahnbestimmungen ausgeführt; denn jedes dieser Stücke bildet auch einen selbständigen Erdsatelliten, d. h. einen künstlichen Raumkörper, der sich wie der Hauptsatellit Transit nach den Gesetzen der Himmelsmechanik um die Erde bewegt. In die gleiche Kategorie der «toten» Satelliten fallen übrigens auch alte Satelliten, deren Sender ausgesetzt hat oder sogar durch ein Kommando von einer Bodenstation aus abgestellt wurde. Dies hat man schon mehrfach getan, um eine Konfusion in den Bodenstationen zu verhindern, die durch das Senden von mehreren Satelliten im gleichen Wellenband entstehen könnte. Wenn man alle Satelliten verfolgen will, wie es z. B. die Aufgabe von SPADATS ist, dann sind solche Radiomethoden nur sehr begrenzt anwendbar. (SPADATS ist eine Abkürzung für «Space Detection und Tracking System». SPADATS ist die aus dem Projekt SPACE TRACK entwickelte Satellitenverfolgungsgruppe, angeschlossen dem North American Air Defense Command in Colorado.) Anfang September 1965 befanden sich etwa 705 Satelliten in Erdbahnen, davon 182, die als wissenschaftliche Mess-Satelliten bezeichnet werden können. Alle anderen waren entweder Raketen-Endstufen oder sonstiger «Abfall», der niemals einen Sender hatte. Die Radioverfahren spielen allerdings die grösste Rolle in der Verfolgung der instrumentierten wissenschaftlichen Satelliten, der bemannten Raumfahrzeuge und der Raumsonden in den interplanetaren Raum, zum Monde und zu den Planeten.

Radio-Ortungsverfahren

Die Radio-Ortungsverfahren erfordern, wie schon erwähnt wurde, einen Radiosender im Satelliten. Gewöhnlich wird ein besonderer Sender für Ortungszwecke in den Raumkörper eingebaut, zusätzlich zu dem Sender oder den anderen Sendern, die die wissenschaftlichen Daten — oft auf das Kommando von dafür vorgesehenen Bodenstellen — zur Erde heruntermelden. Die Frequenz dieses Senders für Ortungszwecke ist gewöhnlich dem vorhandenen Beobachtungsnetz angepasst und wird so stabil wie nur möglich gehalten, gewöhnlich mit Hilfe von Kristalloszillatoren. Sind diese Vorbedingungen gegeben, so lässt sich eine Ortung des Satelliten dadurch anstellen, dass man an der Bodenstation sehr genaue Frequenzmessungen vornimmt. Auf Grund des Dopplerprinzips beobachtet man eine Frequenzerhöhung, wenn sich der Satellit der Station nähert, und eine Frequenzerniedrigung, wenn er sich von der Station entfernt. Aus dem zeitlichen Verlauf der Frequenz, der sog. Dopplerkurve, lässt sich dann recht genau der Zeitpunkt bestimmen, in dem sich der Satellit der Station am nächsten befunden hat. In diesem Zeitpunkt muss die gemessene Frequenz genau gleich der des Senders sein.

Nimmt man solche Messungen an verschiedenen Stationen vor, so kann man durch Triangulation den Ort des Satelliten verhältnismässig einfach festlegen. Die Einrichtung einer solchen Dopplerstation ist ziemlich einfach. Grundsätzlich benötigt man nicht viel mehr als eine Antenne für den richtigen Wellenbereich, einen guten Radioempfänger und ein Frequenzmessgerät. In den ersten Monaten des «Raumzeitalters» bestanden solche Antennen oft aus nicht viel mehr als einigen über Zaunpfähle gespannten Drähten. Als Empfänger dienten häufig gewöhnliche Kurzwellengeräte; das Frequenzmessgerät war ein zufällig vorhandener Oszillograph. Heute sind solche Stationen im allgemeinen mit besonders für diese Zwecke entwickelten Geräten ausgestattet, die gegenüber den ersten Hilfsgeräten wesentlich empfindlicher, einfacher zu bedienen und weitgehend automatisiert sind. Dennoch gehören solche Dopplerstationen auch heute noch zu den billigsten Ortungsanlagen, ausgenommen vielleicht einfache, kleine, optische Beobachtungsstellen. Dopplerstationen sind heute in vielen Ländern in Betrieb, so auch in der Bundesrepublik Deutschland.

Allerdings kann man mit diesem Ortungsverfahren selbst bei bester Instrumentierung nicht sehr hohe Genauigkeiten erzielen. Dies liegt an der Störung beim Ausbreiten der Radiowellen durch die Ionosphäre und an den häufig auftretenden, z. B. durch solare Einflüsse verursachten Störungen im Verhalten der Ionosphäre. Daher werden heute solche Messungen von Dopplerkurven weniger zur Ortsbestimmung von Satelliten, sondern vielmehr meistens zum Untersuchen der ionosphärischen Störungen angestellt. In diesem Fall nimmt man den «wahren» Ort des Satelliten, der durch andere Verfahren bestimmt worden ist, als bekannt an und schliesst aus den Abweichungen der Ergebnisse aus der Dopplermessung von diesen bekannten Orten auf die ionosphärischen Schwankungen.

Das Dopplerverfahren lässt sich aber auch noch anders verwenden. Kennt man den genauen Ort des Satelliten (und kann man erreichen, dass der Satellit diesen Ort auf Befragen nach den Bodenstationen meldet), dann ermöglicht es eine Dopplermessung, den Ort der Beobachtungsstelle auf der Erdoberfläche zu bestimmen. Man benutzt den Satelliten sozusagen als einen künstlichen Stern, der auch am Tage und bei bedecktem Himmel angepeilt werden kann. Wie der Seefahrer früher zur Ortsbestimmung mehrere Sterne «schoss», so hat er es jetzt mit diesem Verfahren durch mehrfaches Anpeilen des Satelliten, der sich verhältnismässig schnell über den Himmel bewegt, in der Hand, seine Position schnell und genau zu ermitteln. Dies ist das Prinzip des Transit-Systems, das die amerikanische Marine zurzeit entwickelt. Die Bord-einrichtungen sind verhältnismässig einfach. Mit Hilfe eines kleinen Elektronenrechners an Bord des Schiffes dürfte es bald möglich sein, laufend Ortsbestimmungen mit einer Genauigkeit von etwa 1 km zu erhalten.

Erheblich bessere Ergebnisse vermögen die sog. Interferometerverfahren zu erzielen. Bei ihnen benutzt man zwei (oder mehr) Antennen in einem bestimmten Abstand voneinander und misst die Phase der einfallenden Radiowellen an beiden Antennen oder unmittelbar die Phasendifferenz. Gewöhnlich werden diese Antennen in der Nord-Süd- oder der Ost-West-Richtung angeordnet; der Antennenabstand beträgt etliche hundert Meter bis zu einigen Kilometern. Das Prinzip dieser

Messung ist ebenfalls recht einfach. Solange sich die Weglängen vom Satelliten zu den beiden Antennen voneinander unterscheiden, werden auch die Phasen der ankommenden Wellenfronten im allgemeinen verschieden sein. Es gibt aber Stellen, an denen die Phase in beiden Empfängern die gleiche ist. Dies trifft ein, wenn die beiden Weglängen genau gleich sind oder sich um ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge unterscheiden. Solche Nullinterferenzen können zum Bestimmen des Winkels dienen, unter dem der Satellit der Beobachtungsstelle erscheint. Die vorstehend erwähnte Vieldeutigkeit lässt sich durch gleichzeitiges Verwenden von mehreren Antennensystemen beseitigen, da ja die sekundären Nullinterferenzen von dem Verhältnis der Wellenlänge zur Basislänge abhängen. Benutzt man gleichzeitig zwei senkrecht aufeinander stehende Antennenanlagen, so gelingt es damit, den Höhen- und den Azimutwinkel aus einfachen trigonometrischen Beziehungen zu berechnen.

Die Genauigkeit solcher Interferometerverfahren hängt ausser von der instrumentellen Genauigkeit — die man durch weitere Entwicklung der Empfänger usw. erhöhen kann — ebenfalls von den ionosphärischen Störungen ab. Da diese Störungen aber im allgemeinen die beiden Wellenzüge nahezu gleichartig beeinflussen, bleiben die Störungsfehler weitaus kleiner als bei einfachen Dopplerverfahren. Genauigkeiten von einigen Winkelminuten sind leicht zu erreichen, wenn man sich bei den Messungen auf Zenitdistanzen von nicht mehr als etwa 30° beschränkt. Das Interferometerverfahren liegt dem sog. Minitrack-System zugrunde, das in den Vereinigten Staaten von Amerika zum Beobachten der ersten wissenschaftlichen Satelliten entwickelt wurde. Anfangs hat man die Antennen und die Empfänger für eine Satellitenfrequenz von 108 MHz berechnet; als die Sowjetunion dann bei den Sputniks die 20- und 40-MHz-Frequenzen benutzte, wurden zusätzliche Antennen errichtet. Im Jahre 1961 hat man die Arbeitsfrequenz der amerikanischen Satelliten auf 136 MHz umgestellt; die Stationen arbeiten heute alle mit diesem Wellenband. Der Grossteil dieser Stationen befindet sich in Nord- und in Südamerika. Sie bilden sozusagen einen «Zaun» längs des 75sten Meridians, so dass fast alle Satelliten mit Ausnahme von solchen in polaren Bahnen diesen Zaun während eines jeden Umlaufs um die Erde überfliegen müssen. Zusätzlich befinden sich einige Stationen in Südafrika und in Australien. Die Messergebnisse dieser Stationen werden durch Funk und Fernschreibkabel zu der Zentralstelle in der Nähe von Washington, dem Goddard Space Flight Center, übertragen und dort zur rechnerischen Verfolgung der Satelliten benutzt. Gleichzeitig werden die Ergebnisse auch anderen Rechenzentralen, wie denen des Projekts SPADTS, weitergemeldet.

Schliesslich kann man zur Ortung von Satelliten und Raumsonden auch noch die üblichen Radiopfeilverfahren anwenden. Die Empfangsantennen werden dann auf besonderen Montierungen angebracht, die sich in die Richtung der einfallenden Radiowellen einpeilen lassen. Liest man dann die Stellung der Antenne an Höhen- und Azimutkreisen ab, so ist damit die Richtung bekannt, aus der die Strahlung kam, d. h. in der sich der Satellit zu der bestimmten Zeit befunden hat. Gleichzeitig kann man auch noch Dopplermessungen vornehmen und so die Radialgeschwindigkeit des Körpers relativ zur Station bestimmen. Antennen verschiedener Art werden auf solchen Montierungen angebracht; häufig verwendet man — wegen

ihrer hohen Empfindlichkeit bei verhältnismässig kleinem Gewicht und kleinen Abmessungen — sog. Yagi-Antennen (Kurzwellenantennen), Helix-Antennen, oder andere Spezialantennen.

Für Antennen mit grossen Abmessungen verwendet man im allgemeinen Parabol-Antennen (in Amerika sehr anschaulich «dish antennas» genannt). Sie beruhen für Radiowellen auf dem gleichen Prinzip, das bei optischen Spiegelteleskopen schon lange benutzt wurde, nämlich auf dem Konzentrieren der aufgefundenen Wellen in einem Brennpunkt, in dem sich der Detektor befindet. Dieses Prinzip nutzt man auch in den astronomischen Radioteleskopen aus. Die grössten solcher für Satellitenbeobachtungen gebauten Antennen haben Durchmesser über 25 m. Ihre Oberfläche ist meist nicht eine geschlossene Metallfläche, sondern ein netzförmiges Metallgitter, das bei den verhältnismässig langen Radiowellen (im Zentimeter- und Meterband) den gleichen Zweck erfüllt und eine erhebliche Gewichtersparnis mit sich bringt. Bei solchen grossen Antennen bilden übrigens auch der Winddruck und sogar die unsymmetrische Erwärmung der Spiegelfläche durch die Sonne eine nicht zu vernachlässigende Fehlerquelle; die Gitterkonstruktion erlaubt jedoch den Einbau von Kompensationsgeräten. Nach Möglichkeit — und dies ist oft eine Frage der Kosten — wird man solche Antennen auch in grosse Dome («radome») einschliessen, deren Oberfläche aus Werkstoffen besteht, die Radiowellen durchlassen.

Die meisten dieser Antennen sind mit selbsttätigen Nachführeinrichtungen versehen, die die von der Antenne aufgefangene Energie in einem Rückkopplungssystem zum Korrigieren der Antenneneinstellung benutzen. Das «Hörrohr», das die Fernseh- und die Fernsprechsinnale von den Telstar-Satelliten aufnimmt, verwendet diese Signale auch unmittelbar zum Steuern der Nachführung. Die Empfänger hinter solchen Antennen sind höchstempfindlich und enthalten die neuesten Geräte der heutigen Radiotechnik, wie Maser, parametrische Verstärker usw. Die hohen Empfindlichkeiten sind aber auch nötig, wenn man mit den Geräten noch Raumsonden über interplanetare Entfernungen verfolgen will. Die Aufnahme der Signale und das Anpeilen der Raumsonde Mariner 4 z. B. bei seinem Vorbeiflug am Planeten Mars bedeuteten einen grossen Triumph der Nachrichtentechnik, wenn man berücksichtigt, dass der Sender an Bord des Mariners nur einige Watt Leistung hatte. Das amerikanische «deep space network» besteht aus drei Beobachtungsstellen in Kalifornien (Goldstone), in Südafrika (Johannisburg) und Australien (Woomera). An allen Stellen befinden sich Antennen von 25 m Durchmesser.

Zum Verfolgen von «deep space probes» ist jetzt eine neue Antenne im Bau, die einen Radar-Parabolspiegel von fast 70 m tragen wird. Sie ist trotzdem noch so konstruiert, dass sie im Azimut und Höhenwinkel der Bewegung der Raumsonde noch nachgeführt werden kann.

Radar-Ortungsverfahren

Die Entwicklung der Radartechnik in den letzten 25 Jahren hat zu einer erheblichen Genauigkeitssteigerung bei der Ortung von Schiffen und Flugzeugen sowie kürzlich auch von Satelliten geführt. Das Grundprinzip einer Radaranlage ist recht einfach. Von einem Sender schickt man, in Richtung auf den zu messenden Gegenstand, einen elektromagnetischen Puls von

sehr kurzer Zeitdauer aus; mit einem Empfänger «hört» man dann das Echo. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Strahlung bekannt ist, liefert eine Messung der Laufzeit einen Wert für die Strecke, die der Puls zurückgelegt hat, d. h. die doppelte Entfernung des Gegenstands vom Beobachter. Misst man ausserdem die Richtung, aus der die zurückkommende Strahlung kommt, so lässt sich der Vektor vom Beobachter zum Satelliten ermitteln. Die Komponenten dieses Vektors werden gewöhnlich durch die Höhe, das Azimut und die Entfernung gegeben.

Die praktische Ausführung solcher Messungen ist selbstverständlich nicht ganz so einfach. Um einen Radarpuls zu erzeugen, der noch Messungen über Hunderte von Kilometern ermöglichen soll, muss man erhebliche Energien von der Sendeantenne ausstrahlen. In Satelliten-Radaranlagen werden Werte in der Grössenordnung von Millionen Watt benötigt, was die Energieleistung von selbst grossen Radiostationen erheblich übersteigt. Besonders leistungsfähige Endstufen-Senderröhren sind für solche Radaranlagen in den letzten Jahren entwickelt worden. Da die verfügbare Energie mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt, steht nach einer Laufstrecke von einigen hundert Kilometern nicht mehr sehr viel Energie zur Verfügung, die der Flugkörper reflektieren könnte. Die Oberfläche des Raumkörpers bildet auch selten einen idealen Reflektor; d. h. weitere Energie geht bei der Reflektion verloren. Weiterhin wird die zurückkehrende Welle noch einmal ebenso abgeschwächt wie die Sendewelle, so dass man schliesslich im Empfänger nur noch Bruchteile eines Milliwatts messen kann. Der Gesamtverlust ist proportional der vierten Potenz der Entfernung. In den meisten Fällen wird man daher grosse Parabol-Antennen sowohl zum Senden (um die Strahlung zu konzentrieren) als auch zum Empfangen (um möglichst viel Energie noch aufzufangen) benutzen. Im allgemeinen dient dieselbe Antenne für beide Zwecke. Man schaltet nach dem Aussenden eines Pulses elektrisch auf den Empfänger um.

Sowohl bewegliche als auch feste Antennen werden in Satelliten-Radaranlagen benutzt; die grossen, festen Antennen haben oft die Abmessungen von Hunderten von Quadratmetern und sehen wie auf die Seite gestellte Fussballfelder aus. Diese Antennen erzeugen ein im Raum festes Strahlenbündel, das aus einer ganzen Reihe von dicht nebeneinanderliegenden Richtstrahlen besteht. Wenn ein Satellit in einen dieser Richtstrahlen eintritt, wird er die schnell aufeinanderfolgenden Pulse in diesem Strahl reflektieren und so angepeilt. Da man die Antennen nicht zu bewegen braucht, können sie sehr massiv und mit grossen Oberflächen gebaut werden. Dies bietet die Möglichkeit, auch noch von sehr weit entfernten Satelliten genügend Energie aufzufangen und sie zu messen. Solche Antennen werden z. B. in dem amerikanischen Raketen-Frühwarnsystem («ballistic missile early warning system») im Norden Grönlands und in Alaska verwendet. Diese Stationen melden alle Satelliten, die ihre Richtstrahlen durchlaufen, unmittelbar an eine Zentralstelle in den Vereinigten Staaten von Amerika.

Die grossen beweglichen Radar-Antennen sehen fast ebenso aus wie die schon beschriebenen passiven Radio-Empfangsanlagen. Der wesentliche Unterschied besteht, äusserlich gesehen, in der Einrichtung der Instrumente im Brennpunkt des Spiegels. Radaranlagen müssen dort sowohl das Sende- als auch das Empfangsgerät oder

zum mindesten die Leitungsendgeräte enthalten und haben im allgemeinen in dieser Gegend einen verwickelteren Aufbau als die Radiopeilgeräte. Die Wellenlängen solcher Radaranlagen liegen heute meist im Meter- und Dezimeterband; neuerdings stellt man auch im Zentimeter- und Millimeterband Versuche an. Ausser dem Entfernungsvektor kann man mit Radaranlagen meist auch noch die Radialgeschwindigkeit des Körpers messen, da bei einem z. B. von der Station fortlaufenden Körper die Entfernung, die jeder der vielen aufeinanderfolgenden Pulse zurücklegt, ständig zunimmt. Wendet man in der Radaranlage auch noch selbsttätige Nachführeinrichtungen an, so gelingt es, einen Satelliten über den ganzen Himmel zu verfolgen und eine ganze Reihe von aufeinanderfolgenden Messungen zu erhalten, die sehr einfach die Bestimmung der Bahn dieses Körpers im Raum gestatten. Die Messgenauigkeit von Radaranlagen hängt sehr von der benutzten Wellenlänge ab; auf grosse Entfernungen und mit Meterwellen (die in den grossen Radaranlagen heute noch fast ausschliesslich verwendet werden) erzielt man eine Genauigkeit von einigen hundert Metern in der Entfernungsmessung und von einigen Bogenminuten in der Winkelmessung. Besonders bei Radaranlagen wird man, wenn es irgend möglich ist, die Antenne in einen Radar-Dom einschliessen; dann sieht die Radaranlage von aussen aus wie ein riesiger Golfball. Der Dom besteht im allgemeinen aus plastischen hexagonalen oder oktagonalen Platten aus einem Kunststoff. Metall eignet sich nicht als Baustoff für Dome, da es die elektrische Strahlung nicht durchlassen würde.

Die grosse Abschwächung der Pulsenergie über die weiten Entfernungen beeinträchtigt selbstverständlich die Leistung und die Genauigkeit von Radarmessungen. Oft geschieht es, dass die im Empfänger verfügbare Energie durch Störeinflüsse des Empfängers selbst (z. B. Röhrenrauschen) überstrahlt und damit eine Messung unmöglich wird. Könnte man die von dem Satelliten zurückkommende Energie künstlich verstärken, so ergäben sich auch bessere Messungen. Dies lässt sich erreichen, wenn man nicht nur die von der Oberfläche des Satelliten passiv zurückgestrahlte Energie zurücksendet, sondern mit Hilfe eines im Satelliten eingebauten Empfänger-Sender-Aggregates den ankommenden Puls vielfach verstärkt und dann wieder zurückschickt. Solche Anlagen an Bord von Satelliten werden gewöhnlich als Verstärker («repeater»), Überbrücker («transponder») oder als Baken («beacon») bezeichnet. Selbstverständlich erfordern solche Messverfahren besonders dafür eingerichtete Satelliten. Man benutzt Baken dieser Art hauptsächlich in bemannten Raumfahrzeugen und in wissenschaftlichen Satelliten; ausserdem werden sie im allgemeinen in die verschiedenen Raketenstufen eingebaut, die einen Satelliten in seine Bahn befördern, damit während des Starts und des Aufstiegs möglichst genaue Messungen der Position und der Geschwindigkeit möglich sind. Besondere Instrumente, die mit Hilfe von Baken arbeiten, sind z. B. auf dem «Atlantic Missile Range» vorhanden, d. h. auf den Raketen- und Satellitenstartbahn-Meßstationen, die sich vom Kap Kennedy in Florida über Tausende von Kilometern nach Südosten über den Atlantischen Ozean erstrecken.

Solche Radaranlagen brauchen — wegen der grösseren verfügbaren Energie beim Empfang — nicht so riesig zu sein wie die Anlagen, die nur auf die von der Oberfläche des Satelliten zurückgeworfene Energie angewiesen sind; auch kann man

eine viel grössere Genauigkeit bei der Messung erzielen. Bei einem Start werden die Raketen sozusagen von einem zum anderen Instrument weitergereicht und die Messergebnisse der Bodenstationen unmittelbar auf grosse Elektronenrechner übertragen, die in Millisekunden die Messdaten mit der vorausberechneten Flugbahn vergleichen. Treten plötzlich erhebliche Abweichungen auf, die das Erfüllen der Aufgabe dieser Rakete — z. B. das Einführen eines Satelliten in eine Erdbahn — in Frage stellen, so kann man die Rakete vom Boden aus zerstören. Der Vergleich der Flugbahn mit den vorausberechneten Werten wird gewöhnlich auf einer von der Elektronenrechenmaschine unmittelbar angetriebenen Zeichentafel vorgenommen.

Eine besondere Abart des Radarverfahrens wendet die amerikanische Kriegsmarine bei dem sog. Satellitengitter an, das sich quer über den südlichen Teil der Vereinigten Staaten von Amerika erstreckt. (Der Name dieses Systems ist «SPASUR», eine Abkürzung von Space Surveillance System.) Hier benutzt man nicht einzelne Pulse wie bei den vorher beschriebenen Radaranlagen, sondern eine kontinuierliche Wellenausstrahlung elektrischer Energie von drei Sendern aus. Jeder Sender erzeugt einen Fächer von Energiestrahlung, der in der Nord-Süd-Richtung sehr schmal, in der Ost-West-Richtung aber sehr ausgedehnt ist. Die drei Sender sind so angeordnet, dass die drei Fächer sozusagen eine schmale, lotrechte Wand von Strahlungsenergie über der Grundlinie des Systems bilden. Tritt ein Satellit in diese Strahlungswand ein, so reflektiert er einen Teil ihrer Energie. Die reflektierte Energie wird am Boden von einer oder von mehreren der zurzeit sechs Empfangsanlagen aufgefangen, und zwar mit ganz ähnlichen Einrichtungen (Antennen, Empfängern usw.), wie sie sich in den Minitrack-Stationen befinden. Ursprünglich waren es sogar die gleichen Anlagen. Die Grundlinie, die die drei Sender und die sechs Empfangsanlagen enthält, bildet einen Grosskreis von der Ostküste Nordamerikas im Staate Georgia hinüber zur pazifischen Küste bei San Diego in Kalifornien. Die ersten vier Empfangsstationen waren etwa 800 km voneinander entfernt; kürzlich sind im Ostteil noch zwei zusätzliche Stationen gebaut worden, um insbesondere hohe Satelliten erfassen zu können. Fliegt der Satellit genügend hoch, so wird er im allgemeinen von mindestens zwei, oft von drei und — bei sehr hoch fliegenden und grossen Satelliten — manchmal sogar von vier Stationen empfangen. Durch die Phasendifferenzmessung erhält man die jeweiligen Winkel (Höhe) des Satelliten. Das Azimut liegt fest, da die Reflektion nur in dem engen Fächer geschehen kann. Die Entfernung ergibt sich aus einer einfachen Triangulation.

Bis zu welcher Höhe man mit diesem Satellitengitter noch Satelliten zu beobachten vermag, hängt — ausser von der Leistungsstärke der Bodensender — weitgehend von der Grösse des Satelliten ab: je grösser seine reflektierende Oberfläche ist, um so mehr Energie wird zurückgestrahlt. Man kalibriert die Leistungsfähigkeit eines solchen Systems (und übrigens auch aller anderen Radaranlagen) dadurch, dass man alle Messungen auf einen bestimmten «Radarquerschnitt» von 1 m² reduziert. Dieser Radarquerschnitt hängt, für einen Körper mit gegebener Oberfläche aus einem bestimmten Werkstoff, auch noch von der benutzten Wellenlänge der Radaranlage ab; er lässt sich im allgemeinen nicht unmittelbar mit der tatsächlichen Grösse des Satelliten vergleichen. Hat

2-m-Verbindungen aus Gebirgstälern

ein Satellit z. B. Antennen, die sich in Resonanz mit der einfallenden Radarstrahlung befinden, so wird dadurch u. U. das Vorhandensein eines viel grösseren Radarquerschnitts vorgetäuscht. Diese Tatsache nutzt man bei dem sog. Nadel-Versuch aus. Feine Kupfernadeln (dünner als ein Haar und nur einige Zentimeter lang), die der Satellit ausstösst, befinden sich in Resonanz mit einer Wellenstrahlung von rund 8000 MHz. Während die Nadeln in allen anderen Wellenbereichen überhaupt nicht zu bemerken sind, erscheinen sie in den besonderen Radaranlagen, die auf dieser Wellenlänge arbeiten, als ziemlich grosse Körper und reflektieren einen erheblichen Teil der Strahlung. Solche Nadeln verteilen sich mit der Zeit ziemlich gleichmässig über die ganze Satellitenbahn und sollen wegen ihrer Eigenschaften als Reflektoren für die Nachrichtenübermittlung verwendet werden. Die Dichte der Nadeln wurde häufig weit überschätzt: nachdem sie einigermassen gleichmässig in der Bahn verteilt waren, betrug der Abstand der einzelnen Nadeln im Mittel mehr als einen Kilometer. Durch die Einwirkung des Lichtdrucks (von der Sonnenstrahlung) sind ihre Bahnen im Raum übrigens inzwischen schon so stark verformt, dass die meisten Nadeln bereits in die tieferen Schichten der Atmosphäre eingedrungen und durch Reibung verbrannt sind. Irgendeinen nachteiligen Einfluss eines solchen Experiments auf andere astronomische Messungen braucht man bei solchen geringen Dichten und der begrenzten Lebenszeit wohl kaum noch zu befürchten.

Die Sendeantennen des Satellitengitters dieses Raumüberwachungssystems (mit der offiziellen Bezeichnung Space Surveillance Facility, abgekürzt Spasur) bestehen aus über 1 km langen Feldern von elektrischen Dipolen, die so untereinander abgestimmt sind, dass sie im Raum die gewünschte Fächerform der ausgestrahlten Energie ergeben. Satelliten mit einem Radarquerschnitt von etwa 1 m² kann man mit diesem System noch in Höhen von mehr als 1000 km beobachten. Da in dem Raumüberwachungssystem — ebenso wie bei den festen, vorher beschriebenen Richtstrahl-Radaranlagen — keinerlei bewegliche Teile vorkommen, kann man solche Sende- und Empfangsanlagen verhältnismässig billig und auch sehr zuverlässig bauen. Hierin besteht einer der Hauptvorteile eines solchen Beobachtungssystems. Ferner benötigen Anlagen dieser Art nur sehr wenig Betriebspersonal, da die Sender und die Empfänger praktisch vollselbsttätig arbeiten. Die Daten der sechs Empfangsstationen werden über Fernschreibkabel zu einer zentralen Auswertstelle (in Dahlgren, Virginia) übertragen, wo man wieder mit Hilfe von Elektronenrechnern die endgültigen Ortsbestimmungen erhält. Ein solches Gitter bildet ein sehr wirksames Überwachungsmittel für Satelliten, da alle Flugkörper, die wenigstens die geographische Breite dieses Grosskreises — etwa 33 Grad — in ihrer Bahn erreichen, jeden Tag mindestens zweimal von diesem Gitter erfasst werden. Die Bahn eines Satelliten liegt ja, von kleinen Störungen abgesehen, im Raum fest. Das Gitter wird aber auf Grund der Erddrehung zweimal unter der Bahnebene durchgeführt. Wegen der verhältnismässig grossen Ost-West-Erstreckung dieser Gitter sichten sie die meisten Satelliten bei zwei aufeinanderfolgenden Umläufen um die Erde, zuerst im östlichen und dann, eine Periode später, im westlichen Teil des Gitters. Damit erhält man eine sehr genaue Bestimmung der Umlaufzeit des Satelliten ohne grosse Rechnung.

Der alte Lehrsatz, dass bei UKW nur Sichtverbindungen möglich sind, gehört schon seit langem der Vergangenheit an. Amateurverbindungen auf dem leider aufgehobenen 5-m-Band zeigten dies bereits in den Jahren 1936 bis 1939 und 1945 bis 1948. Verbindungen zwischen Luzern und Basel oder Luzern und Schaffhausen wurden 1938 realisiert. 1945 bis 1948 gab es neue Erfolge. DX-Verbindungen über 1000 bis 2000 km waren dank Sporadic-E-Schichtwolken während der Sommermonate Mai bis August möglich. Neben diesen aufsehenerregenden Erstverbindungen nach England, Algier, Malta, Skandinavien usw. mit zeitweise phantastischen Signalstärken zeichneten sich aber bereits auch andere Ausbreitungsarten ab. So konnte bspw. während winterlichen Hochnebelzeiten während mehreren Tagen mit Nancy bei mässigen, aber relativ stabilen Feldstärken gearbeitet werden (F 8 YZ — HB 9 BZ). Es handelte sich dabei um die heute gut bekannten typischen Inversionsverbindungen.

Andererseits waren in 5-m-Amateurreisen bereits auch die Reflexionsmöglichkeiten an Gebirgsmassiven bzw. die Möglichkeiten von Streulichtverbindungen über Berggräte bekannt. Mit der Aufhebung des 5-m-Bandes und der Neuzuteilung des 2-m-Bandes glaubte man vorerst an eine wesentliche Verschlechterung der Amateur-Verkehrsmöglichkeiten. Durch die starke Reduktion der Antennenabmessungen war aber der Bau von wirksameren Richtantennen möglich, welche zusammen mit der Verbesserung der Sende- und Empfangsgeräte den Einfluss der Wellenlängenreduktion kompensierten. Sehr bald entdeckte man, dass die Gebirgsreflexionen auf 145 MHz mindestens ebensogut funktionieren, wenn nicht noch besser als auf 56 MHz. Verbindungen zwischen Luzern und Uster waren bspw. über Reflektion am Pilatus wesentlich zuverlässiger als über den direkten Pfad. Einen schlagenden Beweis für diese Theorie stellten die Erstverbindungen zwischen Bern und Uster anfangs 1950 auf 145 MHz mit ausgeprägter Reflektion an der Jungfrau dar. Eine zusätzliche Bestätigung für diesen Effekt war ein am gleichen Tag einlaufender Telefonanruf eines Amateurs aus Thun, der seinen Ohren kaum traute, aus Richtung Jungfrau eine Station aus dem Kanton Zürich zu hören.

Bald darauf gelang es der Berner Station HB 9 AT, die italienische Station 11 FA in Voghera über die Hochalpen hinweg zu erreichen, was in der Folge auch regelmässig von Uster aus möglich war. Heute werden solche Verbindungen professionell als «Obstacle-gain»-Verbindungen bezeichnet.

Im allgemeinen lagen in den ersten Jahren die erfolgreichsten 2-m-Heimstationen im Mittelland in der Ebene. Nur wenigen glücklichen Hams standen erhöhte QTHs für ihre Heimstationen zur Verfügung. Dass es mit Portabelstationen von Berggipfeln aus wesentlich weiter in die umliegenden Länder hinausreichte, war eine längst bekannte Tatsache. Die Erfahrungen der letzten 20 Jahre haben aber bewiesen, dass es bei Beobachtung der Wetterverhältnisse möglich ist, auch aus dem schweizerischen Mittelland heraus über Distanzen von 500 bis 800 km 145-MHz-Verbindungen mit PA ϕ , G und Norddeutschland zu tätigen.

Wie stehen aber nun die Chancen für den UKW-Amateur, der sein Home-QTH aus beruflichen Gründen in einem grösseren oder kleineren Gebirgstal aufschlagen muss? So ohnehin wird man zum Schluss kommen: Hoffnungslos!