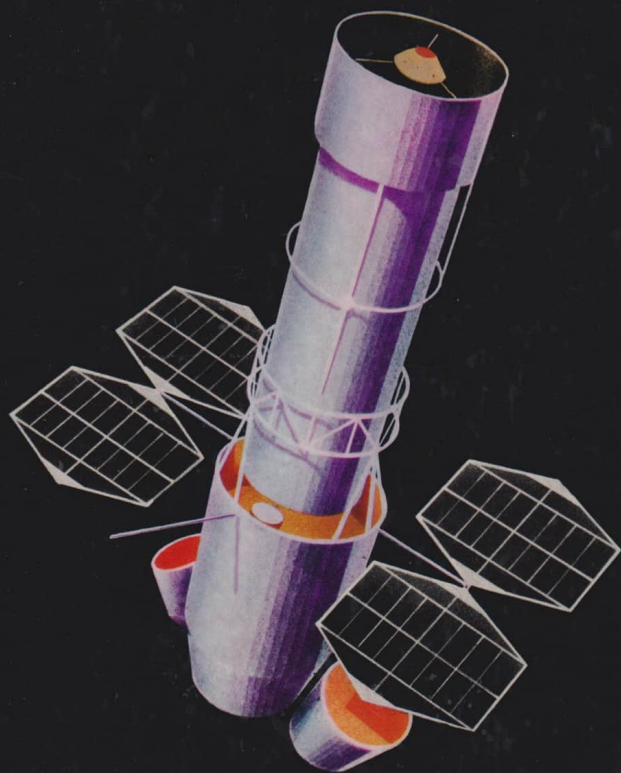
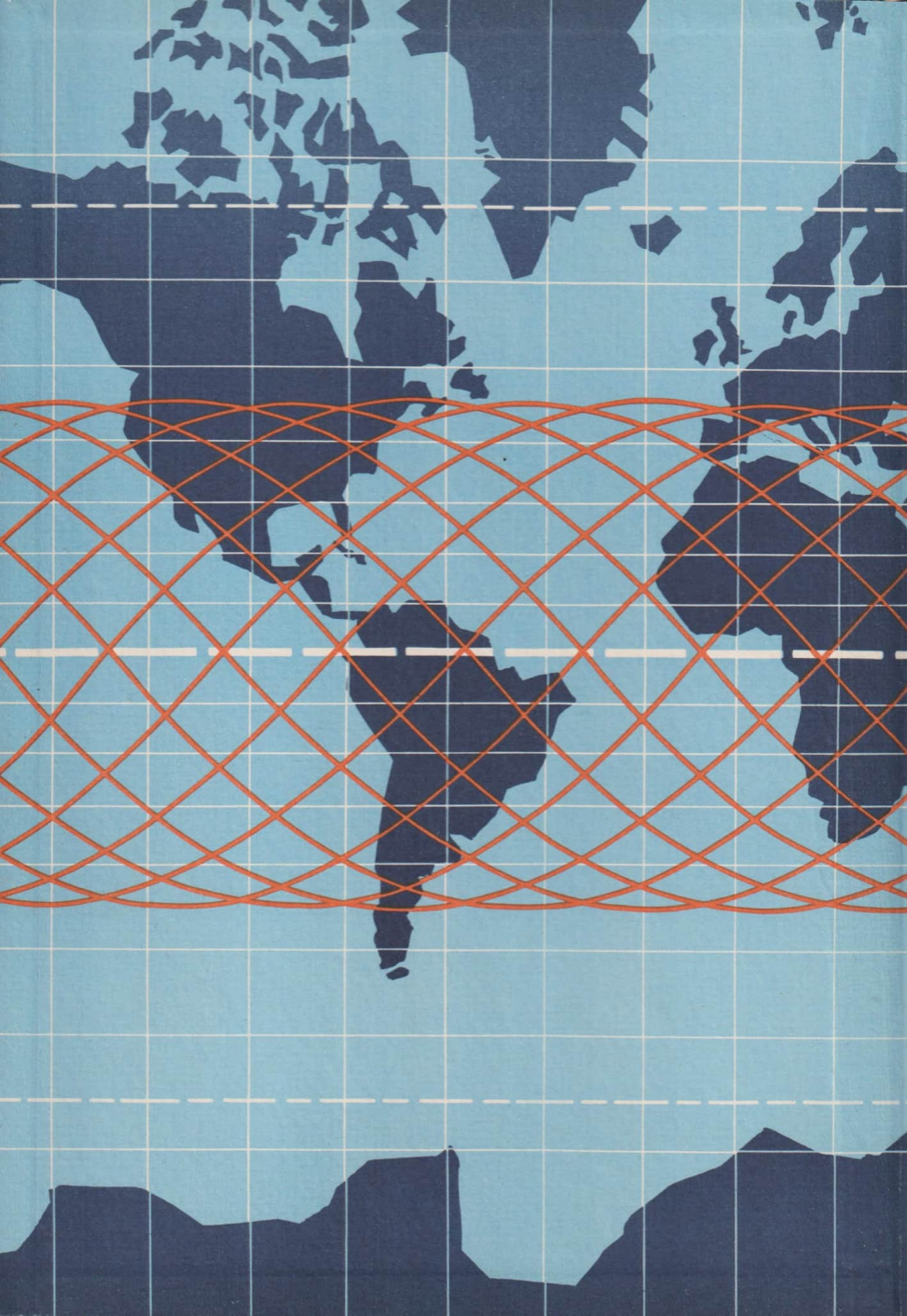


MIELKE ZU NEUEN HORIZONTEN

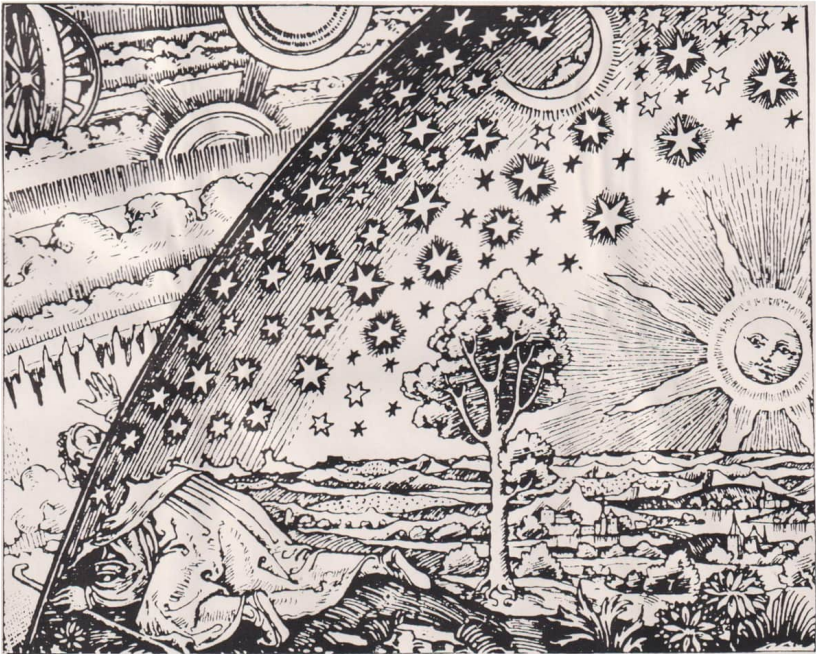






Durch zweitausend Jahre glaubte die Menschheit, daß die Sonne und alle Gestirne des Himmels sich um sie drehen. Der Papst, die Kardinäle, die Fürsten, die Gelehrten, Kapitäne, Kaufleute, Fischweiber und Schulkinder glaubten, unbeweglich in dieser kristallinen Kugel zu sitzen. Aber jetzt fahren wir heraus, Andrea, in großer Fahrt. Denn die alte Zeit ist herum, und es ist eine neue Zeit.

BERTOLT BRECHT · LEBEN DES GALILEI



HEINZ MIELKE

ZU NEUEN HORIZONTEN

WELTRAUMFORSCHUNG
GESTERN-
HEUTE-
MORGEN

TRANSPRESS VEB VERLAG FÜR VERKEHRSWESSEN BERLIN

Grafiken einschl. Titel: Rudolf Skribelka
Wolfgang Würfel

ES 20 L 5

Verlagslektor: Dipl.-Ing. oec. Alfred Förster
transpress VEB Verlag für Verkehrswesen,
108 Berlin, Französische Str. 13/14
Manuskript abgeschlossen am 31. Januar 1967
Alle Rechte vorbehalten

VLN 162 – 925/23/67 –

Typografie und Gestaltung: Willi Krause, Berlin
Fotos: Archiv des Verfassers; Zentralbild
Gesamtherstellung: H (1) VEB Druckerei der Werktätigen,
Halle (Saale)

Sonnenschein, Gewitter und Taifune

Wer hat nicht selbst schon einmal Ähnliches erlebt? – Urlaubsfreuden an der See! Man aalt sich im Sande, tobt vergnügt im Wasser herum, speichert unter strahlend blauem Himmel Sonnenschein und denkt dabei wohl nur ungern an mögliche Heimtücken des Wettergottes – bis dann an irgendeinem Tage diese Herrlichkeit doch ein ebenso plötzliches wie unerfreuliches Ende findet. Unter aufziehenden Wolken verdüstert sich der Himmel, der Wind frischt auf, und vielleicht beginnt es sogar, „Strippen“ zu regnen. Die absinkenden Temperaturen und die zur Orkanstärke anschwellenden Böen treiben schließlich selbst standfestere Naturfreunde ins schützende Quartier, wo es begreiflicherweise nur noch ein Thema gibt – das Wetter.

Wenn diese unangenehme Urlaubsbeigabe dazu noch trotz gegenteiliger amtlicher Wettervorhersagen eintrifft, dann kann man allerseits die schon obligatorischen und mehr oder weniger bissigen Kommentare über die Unzuverlässigkeit der „Wettermacher“ im allgemeinen und das persönliche Urlaubspech im besonderen zu hören bekommen. Die meisten der so entstehenden Wetter-Diskussionen können zwar selten Anspruch auf wissenschaftliche Sachkenntnis erheben, aber die Heftigkeit der Meinungsäußerungen ist dafür oft um so ausgeprägter. Das persönliche Betroffensein lenkt eben, wie so häufig im Leben, die Aufmerksamkeit auf Dinge und Zusammenhänge, denen sonst kaum die ihnen gebührende Beachtung geschenkt wird. Berichten ferner an den nächsten Tagen Zeitungen und Rundfunk auch noch von Unwetterschäden und Schiffskatastrophen, so erreichen die Diskussionen um das Wetter neue Höhepunkte. Wie oft hört man dann: „Was ist doch der Mensch im Toben der Naturgewalten – ist er nicht nur ein machtloses Stäubchen? Wird er der Natur nicht immer hilflos ausgeliefert bleiben?“ Außer diesen fatalistischen Kommentatoren gibt es neuerdings noch einige ganz Neunmalklude, die ganz genau wissen,

warum das Wetter gerade jetzt offensichtlich zunehmend zu katastrophalen Entwicklungen neigt: „Daran ist bloß ‚das Atom‘ schuld – und die Raketenfliegerei, und dieses ganze Zeug von Satelliten und Raumschiffen! – Jawohl, erst seitdem mit diesen Dingen experimentiert wird, geschehen in aller Welt so viele Unwetterkatastrophen!“ Und man will sich nur schwer davon überzeugen lassen, daß diese Verknüpfung völlig unsinnig ist, weil es gehäuft auftretende Wetterkatastrophen seit altersher in den auch heute davon betroffenen Gebieten gibt. Solche Annahme entspringt im Grunde nur dem durch Presse, Rundfunk und vor allem Fernsehen enorm gesteigerten und journalistisch betonten Informationsstrom, der heute tagtäglich Geschehnisse sozusagen „in die Stube rückt“, von denen man vor Jahrzehnten kaum Kenntnis erhalten hätte. Die weltumspannenden Statistiken der Meteorologen zeigen dagegen ganz eindeutig, daß – über lange Zeiträume betrachtet – das Wetter gegenwärtig durchaus nicht unnormaler ist als in vergangenen Zeiten.

Da ist eine Kritik an der Wettervorhersage schon weniger verhänglich. Hier kann man sehr leicht allseits anerkannte Sündenböcke finden. An den geplagten „Wetterfröschen“ läßt man dann oft kein einziges gutes Haar mehr und bewitzelt ihr Bemühen um brauchbare Wettervorhersagen. Höchstwahrscheinlich könnte man aber viele solcher Urlaubs Wetterkritiker schon auf einfache Weise in arge Verlegenheit bringen, nämlich mit der Frage: Was ist denn das eigentlich – das Wetter? Die einen machen es sich mit einer Antwort vielleicht sehr leicht, indem sie ganz allgemein und subjektiv von „schönem“ und „schlechtem“ Wetter sprechen. Andere versuchen es eventuell mit etwas anspruchsvolleren Definitionen, wie „Wetter ist alles, was mit Sonne, Regen, Wolken, Wind usw. zusammenhängt.“ In dieser Art Erklärung steckt tatsächlich schon sehr viel Wahres. Für wissenschaftliche Betrachtungen und Untersuchungen reicht jedoch, wie wir sehen werden, eine so sum-



marische und vereinfachte Charakterisierung bei weitem nicht aus.

Alle tiefsinnigen oder übelgelaunten Urlauber-Diskussionen über das Wetter hören jedoch schlagartig auf, sobald wieder der erste Sonnenstrahl lockt. Zufrieden begibt man sich erneut in die wohlige Wärme des Sommertages; und selbst wenn sich allzu Eifrige einen zünftigen Sonnenbrand holen sollten, so ist man im allgemeinen doch wieder schnell mit der Welt und ihrem unvermeidlichen Wetter ausgesöhnt. Im übrigen – so meinen sie – sollen doch die Wissenschaftler zusehen, wie sie mit ihrem Sorgenkind „Wettervorhersage“ allein fertig werden; das Ganze bleibt ja wohl doch nicht mehr als ein unlösbares Rätselmosaik.

Dieser Schluß wäre allerdings voreilig. Was die Wissenschaft an Anstrengungen unternimmt und mit welchem Erfolg, um das Wettergeschehen besser verstehen und damit auch genauer voraussagen zu können, ist mehr als beachtlich. Das gilt sowohl für den Aufwand an Mitteln, als auch vor allem für die vielseitige schöpferische Forschungsarbeit zahlloser Spezialisten. Diese Fachleute kommen nicht nur aus der reinen Meteorologie, sondern auch aus den verschiedensten Grenzgebieten. In weltweitem Maßstab ringen einige tausend Wissenschaftler gemeinsam und mit wachsenden Erfolgen um die Bewältigung dieser großen Aufgabe, die schließlich weit über die Belange erholungsuchender Urlauber Bedeutung hat. Immerhin ist das Wettergeschehen einer der natürlichen Faktoren, die am stärksten zahlreiche Gebiete des Wirtschaftslebens in allen Teilen der Erde beeinflussen. Durch Mißernten, Unwetter-schäden, Störungen der Handelsverbindungen gehen der Menschheit alljährlich Milliardenwerte verloren. Wenn man diese Tatsache in die Betrachtung einbezieht, dann erscheint der große Aufwand, den man der Erforschung des Wettergeschehens in zunehmendem Maße widmet, mit Sicherheit mehr als gerechtfertigt.

Meteorologisches Rätselmosaik

Wie geht das eigentlich vor sich – die Erforschung des Wettergeschehens? Warum ist der angedeutete, große wissenschaftliche Aufwand überhaupt erforderlich? Hörte man nicht schon von Fällen, in denen die Vorhersage von alteingesessenen Fischern, Schäfern oder Förstern über das „Orts-wetter“, sozusagen „aus dem Hut“ gemacht, eher zutraf als der tägliche Wetterbericht eines meteorologischen Institutes? Diese und ähnliche Fragen lassen sich mit wenigen Sätzen nicht beantworten. Mit den Begriffen „Wetter“ und „Wetterentwicklung“ verbindet sich eben doch sehr viel mehr, als in der summarischen Urlauberantwort vorhin ausgedrückt wurde.

Erst wenn man die Wissensschätze vieler wissenschaftlicher Fachrichtungen zusammenträgt und geduldig Steinchen um Steinchen in das große Rätselmosaik „Wetterentstehung und Wetterentwicklung“ einsetzt, werden sich allmählich die Umrisse von Antworten auf einige dieser Fragen abzeichnen. So wird sich zeigen, daß man die Bausteine des Mosaiks aus Kästen zusammentragen muß, auf denen Bezeichnungen zu finden sind wie „Aeronomie“ (Erforschung der Hochatmosphäre), „Ozeanographie“, „Glaziologie“ (Gletscherkunde), „Geomagnetik“, „Ionosphärenphysik“, „Sonnenphysik“, „Astronomie“ oder „Wettersatelliten“ und „Raumsonden“, um nur einige wichtige zu nennen. Wenn wir aber damit den Vertretern dieser wissenschaftlichen Fachrichtungen auf den Wegen ihrer Untersuchungen und Erkenntnisse folgen, werden wir immer wieder beeindruckt feststellen, wie tief uns schließlich die einfache Frage nach der Erforschung des Wettergeschehens in die Geheimnisse unserer mehr oder weniger weit gefaßten kosmischen Umwelt führt. In umgekehrter Richtung wird dann auch erkennbar werden, daß das Wissen um die Ziele, Methoden und Erfolge der modernen Weltraumforschung eine unerläßliche Voraussetzung dafür ist, unsere natürlichen



Umweltbedingungen besser zu erkennen und ihre Nutzung zu erweitern.

Stellen wir an den Anfang dieses Weges noch einmal eine Frage, die schon früher auftauchte: Was ist das eigentlich – das Wetter?

Als „Wetter“ bezeichnet man den physikalischen Gesamtzustand der Erdatmosphäre zu einem bestimmten Zeitpunkt und an einem einzelnen Ort. Hinzugefügt werden muß noch, daß dabei die Bezeichnung „Ort“ – für den Wetterbegriff im ursprünglichen Sinn – nur für den Bereich von der Erdoberfläche bis zu wenigen Kilometern Höhe gilt. Als charakteristische Größen des physikalischen Zustandes der Atmosphäre gelten Luftdruck, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Bewölkung, Niederschläge und Wind. Betrachtet man die zu einem bestimmten Zeitpunkt innerhalb eines größeren Gebietes auftretenden örtlichen Wetterbedingungen, so spricht man von der Wetterlage oder, noch umfassender, von der Großwetterlage.

Neben diesen Wetterbegriff stellt die Wissenschaft noch den des „Klimas“, beide werden häufig verwechselt. Unter Klima versteht man den allgemeinen Charakter des täglichen oder jährlichen Wetterablaufs an einem einzelnen Ort oder über einem bestimmten Gebiet. So spricht man beispielsweise davon, daß Rostock typisches Küstenklima hat oder daß im mittleren Teil der Sowjetunion ein ausgeprägtes Kontinentalklima herrscht. Bei der Betrachtung des Klimas interessiert somit nicht mehr der einzelne zeitlich fixierte Wert für Luftdruck, Temperatur oder Luftfeuchtigkeit, sondern deren Änderungen innerhalb eines betrachteten Zeitraumes sowie ihr Zusammenwirken. Wetterkunde und Klimaforschung gehen jedoch gemeinsam von den gleichen physikalischen Vorgängen in der Atmosphäre aus. Damit werden beide Arbeitsgebiete auch Zweige einer Wissenschaft, der Meteorologie, die sich ganz allgemein und umfassend mit der Erforschung der Physik der Atmosphäre beschäftigt. Allerdings ist damit der Kreis der ineinander greifenden Beziehungen noch

längst nicht geschlossen. Im Augenblick sei lediglich kurz darauf verwiesen, daß die Atmosphäre nur ein Teil des Planeten Erde ausmacht; sie ist sein gasförmiger Mantel. Es wird sich zeigen, daß man letztthin bestimmte Vorgänge in der Atmosphäre nur dann richtig deuten kann, wenn man von den physikalischen Bedingungen des gesamten Erdkörpers ausgeht. Die Wissenschaft, in der alle diese Forschungen zusammenlaufen, also nicht zuletzt auch die der Meteorologie, ist die allgemeine Geophysik.

Aber ehe wir weiter komplizierten Zusammenhängen nachspüren, sollten wir noch einmal auf unseren Ausgangspunkt zurückkommen. Es ging um die Erforschung der physikalischen Vorgänge in der Atmosphäre. Sicherlich ist es vernünftig, zunächst das im Mittelfeld stehende Objekt, die Erdatmosphäre, in ihren physikalischen Grundeigenschaften zu betrachten.

Etwas Physik der Erdatmosphäre

Die Erdatmosphäre ist ein Gasgemisch, das durch die Anziehungskraft der Erde über deren Oberfläche festgehalten wird. Hier zeigt sich also schon ein erster wesentlicher Zusammenhang mit ganz speziellen physikalischen Einflüssen des Erdkörpers selbst. Masse und Durchmesser der Erde, die gemeinsam die Größe der Anziehungskraft unseres Planeten an seiner Oberfläche bestimmen, werden damit zu entscheidenden Faktoren für den Aufbau und die Zusammensetzung der Erdatmosphäre. Die Zusammensetzung des Gasgemisches, das wir landläufig als „Luft“ bezeichnen, ist im Durchschnitt an allen Stellen der Erdoberfläche gleich. Staubfreie, trockene Luft setzt sich nach Raumteilen zusammen aus:

78,08 Prozent Stickstoff,
20,95 Prozent Sauerstoff,
0,93 Prozent Argon,
0,03 Prozent Kohlendioxid.

Die verbleibenden 0,01 Prozent verteilen sich auf die Edelgase Neon, Helium, Xenon und Krypton sowie Wasserstoff und Ozon. Der Anteil an Ozon beträgt an der Erdoberfläche nur 0,00001 Prozent. Wie wir später sehen werden, spielt jedoch gerade das Ozon in einer höheren Region der Atmosphäre eine ganz entscheidende Rolle als StrahlungsfILTER zum Schutze des irdischen Lebens und für Energieumsetzungen innerhalb der Atmosphäre. Zu den gasförmigen Bestandteilen der Atmosphäre treten im Normalfall noch verschiedene Beimengungen (Wasser in Dampf- und Tropfenform sowie Staub) hinzu, deren Anteil ganz allgemein starken zeitlichen und örtlichen Schwankungen unterliegt.

Auf die Bedeutung der Grundzusammensetzung der Erdatmosphäre für die Entwicklung und Erhaltung des organischen Lebens auf der Erde braucht hier wohl nur allgemein verwiesen zu werden. Der Vollständigkeit halber sei lediglich erwähnt, daß die Sauerstoff- und Kohlendioxidanteile natürlich durch die ständig ablaufenden Stoffwechselvorgänge in Lebewesen zeitlich und örtlich schwanken können.

Über die physikalische Natur und den Aufbau der Atmosphäre gewann man zum erstenmal eine klarere Vorstellung, nachdem der italienische Naturforscher Evangelista Torricelli (1608 bis 1647) im Jahre 1643 einen bemerkenswerten Versuch angestellt hatte. Er ließ eine etwa 100 cm lange einseitig geschlossene Glasröhre mit Quecksilber füllen. Dann tauchte er diese Röhre mit der verschlossenen Seite in ein Gefäß, in dem sich gleichfalls Quecksilber befand. Nachdem die Öffnung im Quecksilberbad wieder freigegeben worden war, floß zwar etwas Quecksilber aus dem Rohr in das Gefäß, es blieb aber eine Säule von etwa 76 cm Höhe in dem Rohr stehen.

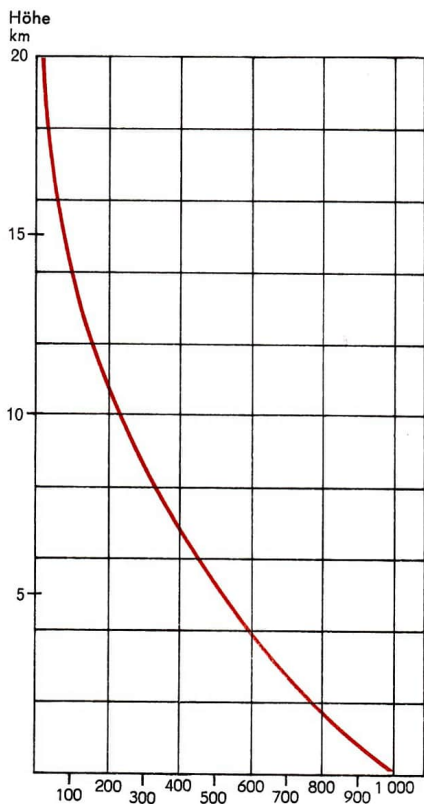
Die dazu von Viviani (einem Zeitgenossen Torricellis) gegebene Erklärung war für die damalige Zeit sehr kühn. Er sprach die Behauptung aus, daß auch die scheinbar schwerelose Luft ein

Gewicht haben müsse. Der Druck, den die Luft auf die Quecksilberoberfläche in dem offenen Gefäß ausübt, müsse die Ursache dafür sein, daß das Quecksilber bis zu der gemessenen Höhe in dem Glasrohr gehalten werden kann. Daraus zog er den naheliegenden Schluß, daß das Gewicht der Luft über einer Fläche, die dem Querschnitt der Quecksilbersäule entspricht, dem Gewicht dieser Quecksilbermenge gleich sein müsse. Das heißt also – wenn man von einem Quadrat-zentimeter Querschnitt ausgeht – daß das Gewicht der Luft über dieser Fläche etwa dem einer Masse von 1 kg gleichkommt.

Nebenbei erbrachte dieser Versuch den Beweis, daß die Natur – entgegen älteren Ansichten („horror vacui“ = Abscheu vor dem leeren Raum) – doch die Entstehung leerer Räume zuläßt; denn der im Glasrohr über der absinkenden Quecksilbersäule entstandene Raum konnte nichts anderes sein als ein Vakuum.

An den Torricelli-Versuch knüpfte man schon bald weitere wichtige Schlußfolgerungen. Der berühmte französische Mathematiker und Philosoph Blaise Pascal (1623–1662) wies darauf hin, daß der gleiche Versuch auf einem Berg eine geringere Höhe der Quecksilbersäule ergeben müsse, weil dann ein gewisser Teil der Atmosphäre schon unterhalb des Beobachters läge. Eine von Clermont aufgeborene Expedition auf den Puy de Dôme bestätigte diese Ansicht. Die Quecksilbersäule war um 10 cm niedriger als in Clermont.

Geht man weiterhin davon aus, daß die Gesamtmasse der Atmosphäre der Masse einer Quecksilberschicht entspricht, von der die Erdoberfläche 760 mm hoch bedeckt wird, so läßt sich daraus noch eine andere Überlegung ableiten. Da Quecksilber eine rund 13,6mal größere Wichte hat als Wasser, ist die Masse der Atmosphäre somit der Masse eines Wasserozeans von durchschnittlich 10 m Tiefe gleich. Andererseits ist aber die Luft in Meereshöhe etwa 800mal leichter als Wasser. Das heißt, wäre die Luft ein Stoff von gleich-

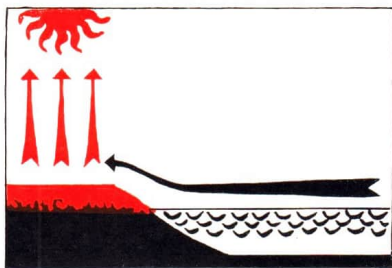


mäßiger Dichte, wie es bei einer Flüssigkeit der Fall ist, dann hätte der „Luftozean“ auch eine scharf begrenzte Oberfläche, und diese Oberfläche müßte in etwa 8000 m Höhe liegen. Der höchste Gipfel der Erde (Mount Everest, Himalaja-Gebirge) würde also schon den „Meeres-

spiegel“ der sogenannten „homogenen Atmosphäre“ um fast 1000 m überragen. Wie wir jedoch wissen, ist auf den Achttausendern des Himalaja durchaus noch kein luftleerer Raum. Trainierte Bergsteiger können dort sogar noch frei atmen. Moderne Flugzeuge bewegen sich in Höhen von 10 000 bis 20 000 m, und mit Ballonen hat man Höhen bis zu 40 000 m erreicht. Die Erdatmosphäre kann also nicht homogen sein. Der Grund dafür ist auch leicht einzusehen.

Die Lufthülle der Erde ist ein Gasgemisch, dessen Dichte mit der Höhe allmählich abnimmt. Das hat seine Ursache im Zusammenwirken der für Gase geltenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten mit der Anziehungskraft der Erde, und woraus sich zwangsläufig an der Erdoberfläche die größte Dichte und zum annähernd leeren Weltraum hin ein stetiger Übergang ergibt. Da mit zunehmender Höhe allerdings zahlreiche zusätzliche äußere (kosmische) Einflüsse eine Rolle zu spielen beginnen, war die zunächst nur theoretisch mögliche Voraussage des Dichteverlaufes und damit der Höhe und der Grenze der Erdatmosphäre außerordentlich schwierig. Anhand bestimmter Modellvorstellungen versuchte man, diesem Problem beizukommen. Diese Überlegungen führten etwa bis zum Jahre 1956 zu der Auffassung, daß die Erdatmosphäre in rund 1000 km Höhe in den interplanetaren Raum übergeht. Erst die danach einsetzenden Experimente mit Höhenraketen, künstlichen Satelliten und Raumflugkörpern zeigten das überraschende Ergebnis, daß die Erdatmosphäre noch viel weiter, zeitweise sogar bis 3000 km weit in den Raum hinausreicht.

Einige Zahlen sollen den schnellen Abfall des Luftdruckes mit zunehmender Höhe etwas veranschaulichen. Während der Luftdruck in 5 km Höhe noch einer Quecksilbersäule von rund 400 mm (mm Hg) das Gleichgewicht zu halten vermag, sinkt der Barometerstand in 10 km Höhe auf etwa 200 mm Hg ab. Die in der Meteorologie heute für den Luftdruck gebräuchliche Maßeinheit ist



das „Torr“ ($1 \text{ Torr} \triangleq 1 \text{ mm Hg}$). Das Quecksilberbarometer, wie der von Torricelli erfundene Apparat noch genannt wird, zeigt in 30 km Höhe etwa 9 mm Hg, in 50 km 0,7 mm Hg und bei 100 km sogar nur noch etwa 0,002 mm Hg. Den Luftdruck in 300 km Höhe könnte man schließlich mit einem solchen Gerät nicht mehr messen; denn er beträgt nur noch 0,0000003 mm Hg. Die Luftdichte ist in diesem Fall schon auf ein Zehnmilliardstel der Dichte in Meereshöhe gesunken. Trotz der geringen Dichte ist die Luft dort oben immer noch „dick“ gegenüber der fast völligen Leere des interplanetaren Raumes. Immerhin enthält ein Kubikzentimeter atmosphärische Luft in dieser Höhe noch ungefähr 3 Milliarden Gasteilchen; an der Erdoberfläche sind es dagegen bei 0°C rund 27 Trillionen je Kubikzentimeter.

Eine globale Wärmekraftmaschine

Kehren wir nach dieser ersten Exkursion durch die Atmosphäre wieder zur Erdoberfläche zurück! Aus unserer eigenen Erfahrung wissen wir, daß die Lufthülle der Erde nicht nur ein unbewegtes ruhendes Gasgemisch ist. Vielmehr zeigt sich an allen Orten der Erde und zu allen Zeiten, daß in ihr ständig mehr oder weniger kräftige Strömungsvorgänge ablaufen, die wir als „Winde“ bezeichnen. Selbst dann, wenn man von einem „windstillen“ Tag spricht, können uns Beobachtungen und physikalische Messungen darüber belehren, daß dennoch Luftbewegungen vorhanden sind. Sie verlaufen dann nämlich vertikal von unten nach oben oder umgekehrt, so daß das mit horizontalen Luftströmungen verbundene typische Windgefühl ausbleibt. Diese Luftströmungen sind es nun, die den wichtigsten Einfluß auf die Ausbildung eines bestimmten physikalischen Zustandes der Atmosphäre an einem Ort, eben des „Wetters“, ausüben. Als Ursache für die ständige Durchmischung der Atmosphäre infolge der Luftbewegungen tritt

zunächst sehr deutlich der Unterschied in den örtlichen Lufttemperaturen in Erscheinung. Das läßt sich durch eigene Beobachtungen im Sommerurlaub an der See bestätigen, wobei allerdings nach Möglichkeit für einige Tage ein ruhiges Wetter mit klarem Himmel und viel Sonnenschein gegeben sein muß.

Während tagsüber die Sonne heiß vom Himmel brennt, sorgt eine kühle Seebrise für einen angenehmen Ausgleich. Abends und nachts dagegen, wenn die Kraft der Sonnenstrahlen abgeschwächt ist oder ganz fehlt, springt der Wind mehr oder weniger schnell um und weht – wohlthuend die eintretende Kühle mildernd – vom Land zum Meer. Dieser Wechsel von See- und Landwind kommt dadurch zustande, daß sich am Tage das Land unter der Sonneneinstrahlung schneller und stärker erwärmt als das Wasser, wogegen in der Nacht das Meer die tagsüber gespeicherte Wärme länger zurückhält als das Land. Die Oberflächen von Land und Meer geben nun die Wärme teilweise wieder an die darüber lagernde Luft weiter. Am Tage wird die Luft also über dem Land stärker erwärmt als über dem Meer. Sie folgt physikalischen Gesetzen und steigt empor. In der Höhe nimmt aber der Luftdruck in einer wärmeren Luftmasse langsamer ab als in einer kühleren. Dadurch ergibt sich dort oben ein Druckgefälle von der wärmeren Festlandluft zur kühleren Meeresluft. Die Folge ist, daß in der Höhe die Warmluft zur Kaltluftmasse hinüberströmt und am Boden eine Ausgleichsströmung in umgekehrter Richtung entsteht. Nachts verläuft dieser Vorgang in entgegengesetztem Sinne. Mit anderen Worten: Für die Strömungsvorgänge in der Atmosphäre sind die durch Temperaturunterschiede verursachten Luftdruckdifferenzen benachbarter Luftmassen verantwortlich. Allerdings sind die Vorgänge nicht immer so durchsichtig wie in diesem Beispiel. Besonders bei großräumigen Luftbewegungen wird die Beurteilung aller Zusammenhänge außerordentlich schwierig. Hier beginnen sich die

großen Probleme der Meteorologie abzuzeichnen. Die Atmosphäre präsentiert sich dabei sozusagen als gewaltige Wärmekraftmaschine, in der ständig Wärme in Bewegungsenergie (Luftströmungen, Winde) umgesetzt wird. Den Funktionsablauf innerhalb der Maschine zu erkennen ist jedoch ungeheuer kompliziert, weil diese sich praktisch über den ganzen Erdball erstreckt und die „Betriebsdaten“ (Temperatur und Dichte) in ihrer Verteilung über die Erdoberfläche im einzelnen nicht erfassbar sind und sich außerdem ständig verändern. Wie sollte man bei den großen Unterschieden in der Beschaffenheit der Erdoberfläche – von den Eisfeldern der Polarregionen bis hin zu den tropischen Wüsten und Urwaldgebieten – allein schon die verschiedenen Temperatureinflüsse richtig erfassen? Dabei wäre natürlich auch der Einfluß der verschieden temperierten Meeres- teile mit ihren kalten und warmen Strömungen (zum Beispiel Golfstrom) zu berücksichtigen. Wenn ein Meteorologe also in diesen Mechanismus hineinleuchten will, muß er zwangsläufig mit Vertretern anderer Wissenschaftszweige, beispielsweise der Polarforschung und der Ozeanographie, eng zusammenarbeiten.

Geht man von der Bedeutung des Wärmeaus- tausches zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre für die Luftmassenströmungen aus, ergeben sich sofort neue Fragen und Probleme. Zunächst müssen wir eine frühere Formulierung korrigieren: Die wirkliche Ursache für die wechselnden Vor- gänge in der Atmosphäre besteht also primär nicht in den Temperaturunterschieden benach- barter Luftmassen, sondern in der aufheizenden Wirkung der Strahlungsenergie unserer Sonne. Damit wird auch klar, daß jede Veränderung in dem gleichmäßig zur Erde fließenden Strahlungs- strom der Sonne, ob sie durch Vorgänge auf der Sonne selbst oder durch Einflüsse auf dem Weg von der Sonne zur Erdoberfläche hervorgerufen ist, von grundlegender Bedeutung für das physika- lische Geschehen in der Erdatmosphäre sein muß.

So tauchen immer neue Verknüpfungen auf, und zur exakten Beurteilung der Vorgänge in der Erd- atmosphäre müssen wir weitere Wissenschaftler zu Rate ziehen, deren Fachgebiete sich schließlich bis zur Sonnenforschung hin erstrecken. Dieses Forschungsgebiet ist ein Teil der Astrophysik, die sich mit den Erscheinungen und Vorgängen auf und in der Sonne beschäftigt.

Wir wollen jedoch zuerst großzügig sein und vor- aussetzen, daß der von der Sonne kommende Strahlungsstrom bis zur Erdoberfläche nach Stärke und Zusammensetzung konstant bleibt. Wie wir gesehen haben, ergeben sich aus den unterschied- lichen Erwärmungen der Luftmassen Strömungs- bewegungen in der Atmosphäre. Für die Meteorolo- gie sind dabei vor allem großräumige Strömungs- gebiete von besonderer Bedeutung. Erinnern wir uns an das Beispiel von Land- und Seewind. Dort handelte es sich um relativ lokale Vorgänge. Dieses stark schematisierte Bild eines Kreislaufes zwischen Warm- und Kaltluftgebieten läßt sich aber auch auf globale Maßstäbe übertragen. Da- durch ergeben sich großräumige Zirkulationen, von denen die horizontalen Luftströmungen (Winde) nur ein Teil sind.

Atmosphärische Zirkulationssysteme

Betrachten wir die Erde als Ganzes und sehen dabei zunächst von ihrer Rotation ab! Selbst wenn man berücksichtigt, daß die Erdachse mit der Senk- rechten auf der Erdumlaufbahn einen Winkel von $23,5^\circ$ bildet, läßt sich erkennen, daß die Sonnen- strahlung allein schon wegen der unterschiedlichen Einfallswinkel am Erdäquator stärker aufheizend wirkt als an den Polen. Ein Strahlungsbündel von bestimmtem Querschnitt verteilt seine Energie an den Polen auf eine größere Fläche als am Äqua- tor. In einem einfachen Versuch läßt sich diese Er- scheinung sehr schön demonstrieren: Man richtet den Lichtkegel einer Taschenlampe auf ein weißes

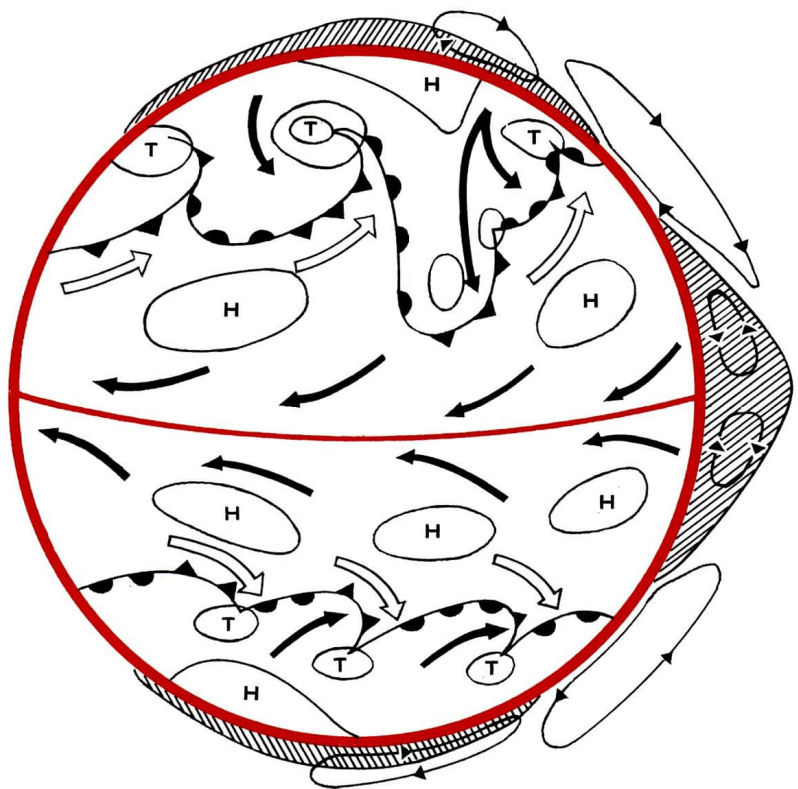
Blatt Papier, das man zuerst senkrecht zum ankommenden Licht hält. Neigt man allmählich das Papier, so sieht man, wie die Beleuchtungsstärke abnimmt, weil die beleuchtete Fläche größer wird. Für die Erde bedeutet das, daß sich am Äquator eine ständig stärker erwärmte Oberfläche befindet, über der sich eine dauerhafte Warmluftzone ausbilden muß, während über den Polen gewaltige Kaltluftmassen lagern. Die am Äquator aufsteigende Warmluft sollte dann wieder in größeren Höhen in Richtung auf die Pole, also nach Norden und Süden, abströmen.

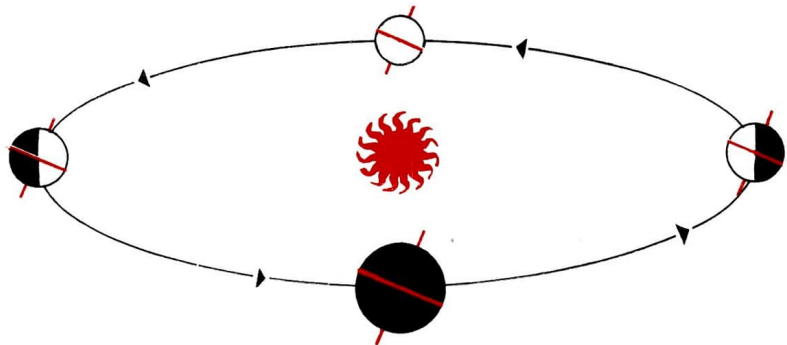
Nach diesem vereinfachten Bild müßte es zu einer durchgehenden Zirkulation zwischen den polaren und äquatorialen Luftmassen kommen. Auf der Nordhalbkugel sollte am Boden eine einheitliche Windrichtung aus Nord entstehen; auf der südlichen Hemisphäre müßte der Bodenwind mehr oder weniger gleichförmig aus der Südrichtung wehen. Unter diesen Voraussetzungen könnte man auch das von den Luftströmungen abhängige übrige Wettergeschehen leicht voraussagen. Aber leider ist es in Wirklichkeit nicht so einfach. Es gibt nämlich auf jeder Erdhalbkugel nicht nur ein umfassendes Zirkulationssystem, sondern jeweils zwei kleinere sekundäre Systeme (Äquator- und Polargebiete), die durch eine dynamische Westwindzone in mittleren Breiten getrennt werden. Eine der Hauptursachen dafür ist die Erdrotation.

Bekanntlich dreht sich die Erde als starrer Körper in 24 Stunden einmal um ihre Achse. Da ihr Äquatortumfang rund 40 000 km beträgt, bewegt sich ein Punkt am Äquator mit 463 m/s Geschwindigkeit weiter. Für alle Punkte nördlich oder südlich des Äquators wird diese Drehgeschwindigkeit um so kleiner, je weiter die Punkte in Richtung auf die Pole liegen. Die Pole rotieren selbst sozusagen „auf der Stelle“. Für einen Punkt in 40° geographischer Breite ist beispielsweise die Drehgeschwindigkeit schon auf 355 m/s abgesunken. Betrachten wir jetzt ein Luftpaket, das sich nach dem Aufstieg am Äquator in Richtung auf den

Nordpol fortbewegt. Von der in Richtung West-Ost rotierenden Erde hat es bei seinem Start die erwähnte Geschwindigkeit von 463 m/s, und zwar in östlicher Richtung, mitbekommen. Auf seinem Weg nach Norden behält es aber nach dem Beharrungsprinzip diese „seitliche“ Bewegungsgeschwindigkeit bei. Ein Punkt in 20° geographischer Breite rotiert jedoch nur noch mit 435 m/s. Das heißt, das Luftpaket eilt der Erdrotation um so mehr nach Osten voraus, je weiter es nach Norden kommt. Man bezeichnet diese Ablenkung nach ihrem Entdecker, dem französischen Mathematiker Gaspard Coriolis (1792–1843), als Coriolis-Effekt. Mit zunehmender Entfernung vom Äquator ergibt sich somit in der Höhe eine immer stärker auf West drehende Windströmung, deren Ausrichtung noch durch Gesetzmäßigkeiten der Strömungsmechanik für die freie (bodenferne) Atmosphäre unterstützt wird. Von etwa 35° bis 65° nördlicher Breite haben wir damit aus rein dynamischen Gründen eine ausgeprägte Westströmung (Westdrift), die schließlich sogar bis zum Boden herunterreicht (Frontalzone); die Frontalzone zeigt sich als schmales Übergangsgebiet mit starkem horizontalem Temperaturgefälle. Die Zirkulation nach Norden findet also schon vorher ihr Ende. Auf der südlichen Hemisphäre begegnet man natürlich der gleichen Erscheinung. Im Frontalzonengebiet zwischen äquatorialer Warmluft und polarer Kaltluft bildet sich etwa in der gleichen geographischen Breite ebenfalls eine reine Westdrift aus. Diese dynamisch entstehenden Westströmungen sind nach neueren Ansichten sozusagen das „Schwungrad“, von dem die gesamte planetare Zirkulation entscheidend beeinflusst wird.

Die äquatorialen Luftmassen ergeben ein sekundäres Zirkulationssystem, das ebenfalls durch den erwähnten dynamischen Effekt geprägt wird. Die Bodenströmung, die als Ausgleich für die Höhenströmung zum Äquator zurückfließt, erfährt auf Grund des Coriolis-Effekts ebenfalls eine Ablen-





kung. Da sie aus Breiten kommt, die gegenüber dem Äquator eine geringere Rotationsgeschwindigkeit haben, bewegt sie sich aus etwa nordöstlicher bzw. südöstlicher Richtung zum Äquator. In der Zeit der Segelschiffahrt spielten diese in etwa 35° nördlicher oder südlicher Breite einsetzenden Dauerwinde, man nennt sie „Passate“ (NO- bzw. SO-Passat), eine außerordentlich wichtige Rolle. Hatte ein Schiff erst einmal das Passatgebiet erreicht, so konnte man unter Umständen wochenlang, ohne schwierige Segelmanöver und in gleichbleibend flotter Fahrt, große Strecken absegeln. Dafür waren aber die Gebiete um den Äquator und bei 35° geographischer Breite von den alten „Windjammer“-Seeleuten um so mehr gefürchtet. Wie wir gesehen haben, bildet sich nämlich am Äquator ein Gebiet aufsteigender Warmluftmassen aus. Am Boden haben wir also keine Windbewegung, jedenfalls nicht von bemerkenswerter Dauer und konstanter Richtung. Man bezeichnet diese windstille oder zumindest windarme Zone als „Kalmen“. Etwa ähnlich ist es in den „Roßbreiten“ (um 35° nördlicher und südlicher Breite), nur daß hier die häufigen Windstillen durch eine absteigende Luftbewegung verursacht werden. Die in der Höhe vom Äquator nach den Polen abströmenden Luftmassen sinken über den Subtropen ab und bilden dort Hochdruckzellen am Rande des Frontalzonengürtels. Dort beginnt nun die Passatrückströmung. In den Roßbreiten geriet so manche Schiffsbesatzung fast an den Rand der Verzweiflung, wenn wochenlang kein Lüftchen wehte, die Segel schlief an den Rahen hingen und Wasser und Proviant knapp wurden. Von diesen ungezählten Dramen an Bord der alten Segler kündigt übrigens auch die seltsame Bezeichnung „Roßbreiten“. Sie geht zurück auf die Zeit, als die mittelalterlichen Karavellen Spaniens die Meere beherrschten und Eroberer auszogen, fremde Länder zu unterwerfen. Viele dieser Schiffe hatten auch Pferde mit an Bord, und immer wieder geschah es, daß nach wochenlangem hilflosem Treiben

in der windstillen Zone Futter und Wasser für die Tiere zu Ende gingen. Die toten oder verendenden Tiere mußten dann ins Meer geworfen werden. Unter den abergläubischen Seeleuten erzählte man sich bald seltsame Geschichten von diesen Breiten, in denen die Geister der über Bord geworfenen Tiere in allerlei Gestalten die Schiffe und ihre Besatzungen verfolgten.

Doch wieder zurück zu den Problemen der atmosphärischen Zirkulationen! Zwischen den Roßbreiten und den Polgebieten zeigen die Strömungsvorgänge nun ein viel komplizierteres Bild für alle damit verbundenen Wettererscheinungen. An die Stelle eines beständigen, einheitlichen und damit leicht durchschaubaren Zirkulationssystems tritt hier ein außerordentlich wechselvolles Spiel zwischen örtlich enger begrenzten Warm- und Kaltluftmassen. Immer wieder führen dabei lokale Einflüsse und globale Effekte zu tiefgreifenden Störungen des allgemeinen Strömungsverlaufs. Allein schon der Wechsel der Jahreszeiten prägt sich vor allem in den gemäßigten Breiten, in denen wir leben, deutlich aus. „Winterwetter“ ist sichtlich mit anderen Witterungserscheinungen verbunden als das typische „Sommerwetter“. Die Wechselhaftigkeit des Wetters ist darum geradezu ein Charakteristikum unserer Breitengrade.

Welcher Art sind nun jene „lokalen“ Störungen der allgemeinen Luftströmung in den gemäßigten Breiten, die den Hauptanteil am Wettergeschehen haben? Unsere Betrachtungen sollen dabei auch weiterhin stark vereinfacht bleiben. Als Störungen wirken ausgeprägte Warm- und Kaltluftgebiete, die sich an den Rändern der Frontalzone (Westwinddrift) in den gemäßigten Breiten ausbilden. Den Steuerungsmechanismus dieser Vorgänge zu durchschauen ist zur Zeit noch nicht möglich; einige der Gründe dafür werden wir später noch näher kennenlernen. Sie sind so vielgestaltig, daß eine richtige Vorausschau auf die Wetterentwicklung ungeheuer schwierig sind. Besonders unangenehm ist, daß sich diese lokalen Warm- und

Kaltluftgebiete mit wechselnden Geschwindigkeiten und veränderlichen Richtungen gegeneinander bewegen und darüber hinaus meist noch starke Wandlungen erfahren. Da sich diese Bildungs- und Veränderungsvorgänge auch noch gegenseitig beeinflussen, entsteht ein schwer entwirrbares Bild atmosphärischen Geschehens.

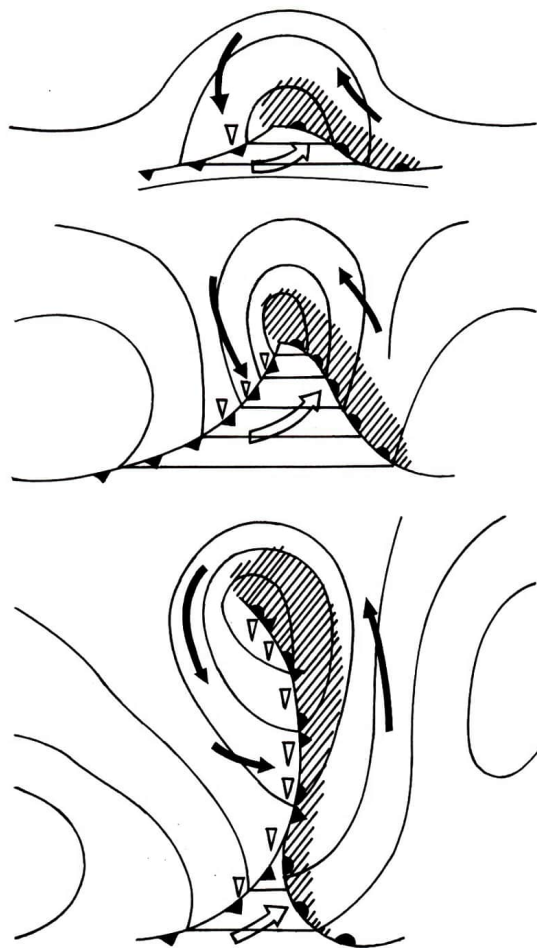
Um wenigstens zu einer allgemeinen Übersicht über die Verteilung unterschiedlicher Luftmassen zu kommen, hat man in der Meteorologie ein einfaches Verfahren eingeführt: Verbindet man auf einer Erdkarte die Orte gleichen Luftdruckes durch Linienzüge – sie werden „Isobaren“ genannt –, so heben sich die verschiedenen Luftmassen als „Tief-“ oder „Hochdruckgebiete“ voneinander ab. Beispielsweise findet man – wie schon erwähnt – in den Roßbreiten ausgeprägte Hochdruckgebiete und in den subpolaren Regionen eine Tiefdruckfurche, aus der sich dann „Ableger“ in Form lokaler Tiefs in das Zusammenspiel mit den subtropischen Hochdruckzellen begeben. Nur, wann das geschieht und unter welchen Bedingungen, läßt sich schwer voraussagen. Zur weiteren Vertiefung des Verständnisses für das Wettergeschehen müssen wir noch einmal auf die Luftzirkulation zwischen Hoch- und Tiefdruckgebieten zurückkommen.

Luftmassenwirbel

Der schon erwähnte Coriolis-Effekt macht sich nämlich nicht nur bei großräumigen planetaren Luftströmungen bemerkbar, er wirkt sich auch bei dem Luftmassenaustausch zwischen benachbarten Hoch- und Tiefdruckgebieten kleineren Umfanges sehr deutlich aus. Daneben wirkt er offenbar noch in dem Kräftespiel mit, das die Bewegungen der Gebiete unterschiedlichen Luftdrucks bestimmt. Bei der Luftzirkulation von benachbarten Hoch- und Tiefdruckgebieten sorgt der Coriolis-Effekt dafür, daß die Bodenströmung vom Hoch zum Tief nicht senkrecht zum Druckgefälle verläuft, wie etwa

bei einem Platzregen das Wasser stets zu den Bodenvertiefungen rinnt, sondern auf der Nordhalbkugel beim Einströmen in das Tiefdruckgebiet entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung des Uhrzeigers abgelenkt wird. Auf der Südhalbkugel verläuft die Bewegung der in ein Tief einströmenden Luftmassen im Uhrzeigersinn. Die Tiefdruckgebiete präsentieren sich also als großräumige Luftmassenwirbel. Die Strömungsgeschwindigkeiten (Winde) zeigen dabei eine verständliche Abhängigkeit von dem Druckgefälle zwischen Hoch und Tief. Je größer der Luftdruckunterschied von einem Tief zum benachbarten Hoch ist, desto kräftiger wird im allgemeinen auch die Austauschströmung sein. Selbst unser einfaches und schematisiertes Bild von den Vorgängen in der Erdatmosphäre wird also allmählich immer verzwickter. Unsere Atmosphäre entpuppt sich als ein wahrer Hexenkessel ziehender und wirbelnder Luftströmungen. Es nötigt schon allerhöchste Bewunderung ab, wie sich die Meteorologen in mühevoller Kleinarbeit durch dieses Dickicht von schier unübersehbaren und komplizierten Zusammenhängen hindurchzuarbeiten versuchen.

Bei allen bisherigen Betrachtungen haben wir immer stillschweigend vorausgesetzt, daß sich die verschiedenen Luftmassen einfach nur durch ihre unterschiedlichen Temperaturen und Drücke zu erkennen geben. Für den Wettereinfluß gibt es jedoch noch ein anderes wichtiges Merkmal. Von der Erdoberfläche gelangt durch Verdunstung ständig Wasserdampf in die Atmosphäre und mischt sich dort – vornehmlich natürlich in den bodennahen Luftschichten – mit den atmosphärischen Gasen. Auf Grund physikalischer Gesetzmäßigkeiten kann warme Luft dabei mehr Wasserdampf aufnehmen als kühlere. Andererseits gibt es aber bei jeder Temperatur ein Maximum für diese Aufnahmefähigkeit; es tritt dann „Sättigung“ ein. Das Verhältnis des bei einer bestimmten Temperatur vorhandenen Wasserdampfes zu dieser maximalen Menge bezeichnet man als „Relative



Warmluft



Kaltluft



Warmfront



Kaltfront



Okklusion



Aufgleitniederschlag



Schauer

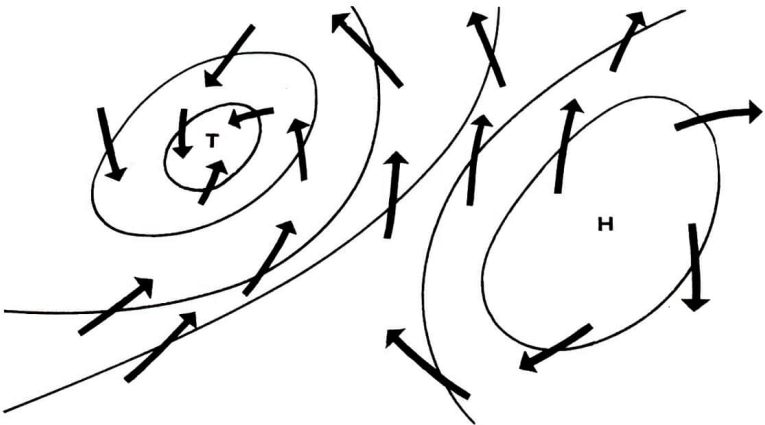


Entwicklung eines Tiefdruckgebietes
(Bjerknessches Zyklonenschema)

Feuchtigkeit". 100 Prozent Relative Feuchtigkeit bedeutet also Sättigung. Weiterhin ist leicht einzusehen, daß eine Warmluftmasse, die sich über dem Meer ausbildet, relativ stark mit Feuchtigkeit angereichert sein wird, im Gegensatz zu einer Luftmasse gleicher Temperatur, die sich über einem größeren Festlandgebiet (zum Beispiel Zentralasien) aufgebaut hat. Denken wir nun wieder an das Bild der Strömungen zwischen Hoch- und Tiefdruckgebieten! Was geschieht, wenn aus einem kühleren und trockeneren Hochdruckgebiet die Luft in eine warme und feuchte Luftmasse (Tiefdruckgebiet) hinüberströmt? In der Berührungszone zwischen beiden Luftmassen beginnt die Kaltluft – während sie allmählich zu der erwähnten großräumigen Wirbelströmung in das Tiefdruckgebiet ansetzt –, die Warmluft vor sich her zu schieben und dabei gleichzeitig zu „unterlaufen“. Die ausweichende Warmluft gleitet ihrerseits an der im Sinne der Wirbelströmung vor ihr liegenden Kaltluft auf-

wärts. Die Folge dieser Vorgänge sind Erscheinungen, die für uns den Begriff „Wetter“ im landläufigen Sinne erst ausmachen. Es bilden sich Wolken und Niederschlagsgebiete.

In unserem Streben nach Vereinfachungen haben wir bisher nicht über das Verhalten der Lufttemperatur in vertikaler Richtung gesprochen. In einer ungestörten Luftmasse ist die Temperatur im allgemeinen am Boden am höchsten, weil wir dort die eigentliche Heizfläche haben. Aber noch etwas anderes kommt hinzu. Steigt in dieser Luftmasse ein am Boden erwärmtes Luftpaket empor, so dehnt es sich dabei aus, und nach den Gesetzen für das physikalische Verhalten von Gasen muß es sich zugleich auch abkühlen. Für den Fall einer mit Wasserdampf angereicherten Warmluftmasse bedeutet das, daß in dem aufsteigenden Luftpaket die relative Feuchtigkeit mit der Höhe zunimmt, bis in einer ganz bestimmten Höhe Sättigung erreicht ist. Steigt die Luft über diese Höhe hinaus, so beginnt der überschüssige Wasser-



dampf zu Wassertröpfchen zu kondensieren, und es kommt zur Wolkenbildung. War der Wasserdampfgehalt des Luftpaketes besonders hoch und die Kondensation demzufolge sehr intensiv, so werden die kondensierten Wassertropfen schließlich anfangen, aus der Wolke abzuregen.

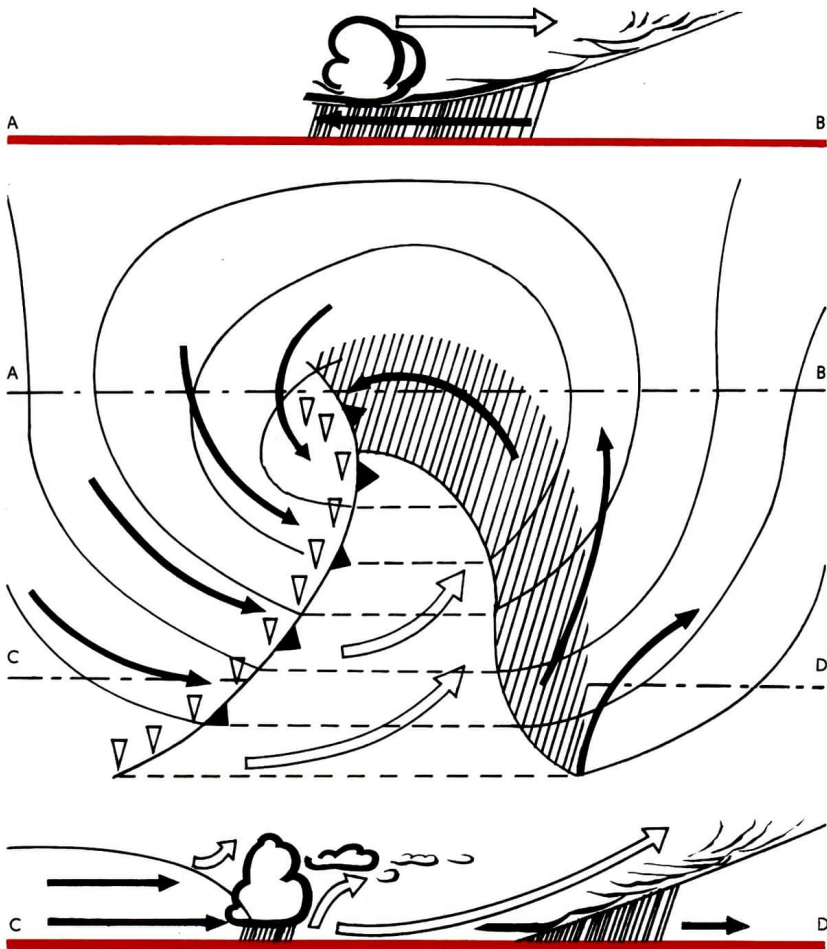
Wenden wir diese Erkenntnisse jetzt auf das Geschehen in einem Tiefdruckgebiet an! An der Berührungsfläche zwischen Kalt- und Warmluft, an der die erstere die zuletzt genannte vor sich her schiebt, wird die Warmluft ziemlich plötzlich aus bodennahen Schichten in größere Höhen gehoben. Es entsteht hier ein Gebiet sehr intensiver vertikaler Wolkenbildungen, die von schauerartigen Niederschlägen und böigen Winden begleitet werden. Dort, wo die Warmluft allmählich auf die vor ihr liegende Kaltluft aufgleitet, ergibt sich im wahrsten Sinne des Wortes eine ganze Stufenleiter verschieden hoher Wolken, wobei die höchsten Wolken im Sinne der Aufgleitbewegung voranziehen. In dem Bereich, in dem die Aufgleitbewegung beginnt, finden wir auch wieder dichte Wolken, diesmal aber ausgedehnte Wolkenfelder geringerer Höhererstreckung (Schichtwolken), aus denen unter Umständen ein tagelanger „Landregen“ zur „Abrundung“ eines Sommerurlaubs beitragen kann. Für den Kundigen bietet sich somit die Möglichkeit, schon aus dem Bewölkungscharakter und -verlauf gewisse Rückschlüsse auf die Wetterentwicklung in den nächsten Stunden zu ziehen, allerdings doch immer nur mit gewissen Vorbehalten, da man ja von einem Ort aus nicht die Wetterlage über einem größeren Gebiet beurteilen kann.

Unter Berücksichtigung der eben erwähnten Zusammenhänge haben die Meteorologen die früher schon erwähnte Methode der Übertragung meteorologischer Meßwerte – es war die Rede von den Isobaren als Linien gleichen Luftdruckes – in Karten der Erdoberfläche systematisch weiter ausgebaut. Sie tragen in ihre Spezialkarten nicht nur die Luftdruckverteilung ein; sie vermerken außer-

dem Lufttemperatur und Feuchtigkeit, Windrichtung, Bewölkungsgrad und Art der Bewölkung sowie Hinweise auf die Niederschläge. Mit diesen Angaben für ein größeres Gebiet läßt sich auf den Karten schon eine recht gute Übersicht über die Wettersituation gewinnen. So lassen sich beispielsweise in einem kräftigen Tiefdruckgebiet – in der Meteorologie früher als „Zyklone“ bezeichnet – sehr schön die Berührungsflächen zwischen Warm- und Kaltluft erkennen. Der Meteorologe bezeichnet diese Gebiete als „Wetterfronten“ oder einfacher, als „Fronten“. Als „Warmfront“ wird dabei der Bereich gekennzeichnet, in dem die Warmluft allmählich aufgleitet, wogegen die andere Berührungsfläche, also dort, wo die Warmluft von der Kaltluft unterlaufen wird, die Bezeichnung „Kaltfront“ erhält. Diese Wetterfronten sind somit die äußerlich aktivsten Erscheinungsformen des Wettergeschehens. In ihnen spiegelt sich praktisch das Endergebnis aller zuvor geschilderten – und es sind in Wirklichkeit noch viel, viel mehr – Einflüsse auf die Vorgänge in der Atmosphäre wider.

Bewölkung und „Rückkopplung“

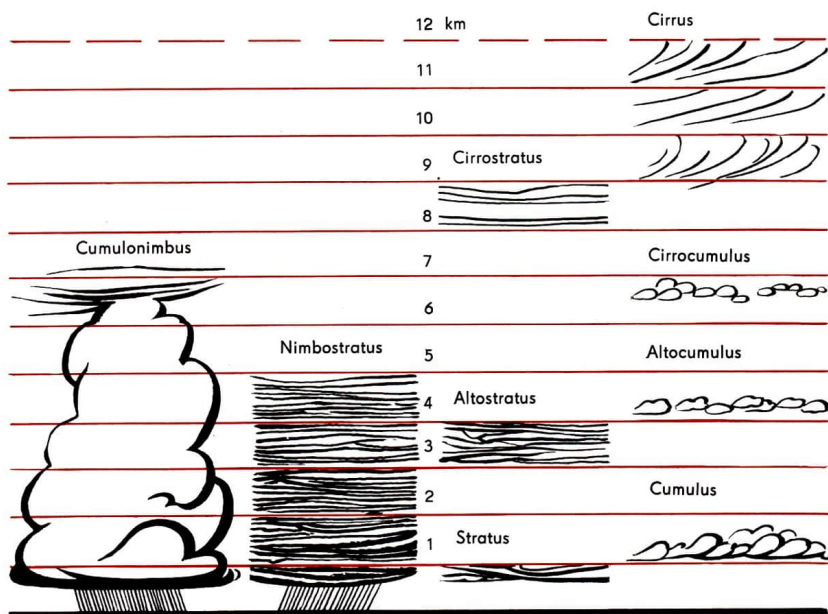
Wie ungeahnt vielfältig die Wechselwirkungen dabei sein können, soll kurz an einem Randproblem erläutert werden. Die bisherigen Darlegungen führten uns von der Wärmeabgabe der Erdoberfläche an die darüberlagernden Luftmassen, über Hoch- und Tiefdruckgebiete, bis hin zum vielfältigen Geschehen in den Wetterfronten. Auslösender Faktor dafür ist die Sonnenstrahlung, wobei als Folgeprodukt unter bestimmten Bedingungen Wolken oder großräumige Wolkenfelder entstehen. Der in den Wolken vorhandene Wasserdampf und das kondensierte Wasser sind aber ihrerseits wieder Hindernisse für die ankommende Sonnenstrahlung. Eine Intensitätsminderung der Sonneneinstrahlung verringert jedoch verständlicherweise die Wärmeabgabe von



der Erdoberfläche an die darüberlagernde Luft. So beeinflussen die Folgen (Wolken) rückwirkend die wetterbildenden Faktoren (Sonneneinstrahlung, Aufheizung). Man braucht sich jetzt nur einmal vor Augen zu halten, wie unabsehbar die Fülle von Varianten bei diesem Zusammenspiel ist, um eine angemessene Vorstellung von der ganzen Schwere der Arbeit auf dem Gebiet der Meteorologie gewinnen zu können.

Übrigens spielt die Bewölkung, sozusagen als „Rückkopplungsfaktor“, auch noch in einem anderen Zusammenhang eine wichtige Rolle für das

Wettergeschehen. Gesellen wir uns dazu diesmal zu Urlaubern, die fern vom Meer im Flachland ihren Urlaub verleben! Nach einem herrlichen Tag, mit wolkenlosem Himmel und hochsommerlichen Temperaturen, steigt die Sonne gegen Abend langsam zum Horizont hinab. Die Sonne versinkt, der Himmel bleibt weiterhin klar, und nun stellt man mit leichtem Frösteln fest, daß die „Nacht-kühle“ kommt. Wie ist es zu erklären, daß trotz des am Tage stark aufgeheizten Bodens und der dadurch erwärmten Luft abends und vor allem nachts die Temperatur so stark absinkt? Die Lö-



sung ist sehr einfach. Der Erdboden nimmt ja nicht nur die Strahlungswärme der Sonne auf, sondern wirft sie auch – nach einer gewissen Umwandlung in Strahlung mit größerer Wellenlänge – wieder teilweise in den darüberliegenden Raum zurück. Am Tage überwiegt die intensive Einstrahlung, während nachts die Ausstrahlung dominiert. Die nächtliche Ausstrahlung ist an sich sehr intensiv. Aber unsere Atmosphäre umgibt die Erde wie ein schützender Mantel. Die von der Erdoberfläche ausgehende langwellige Wärmestrahlung kann sich nicht ungehindert in den kosmischen Raum verlieren, da sie durch den auch bei klarem Himmel immer vorhandenen Wasserdampf zurückgehalten (absorbiert) wird. Auch das in der Atmosphäre vorhandene Kohlendioxid bildet für die Rückstrahlung ein ähnliches Hindernis. Übrigens ist diese besondere Fähigkeit gerade des Kohlendioxids von allgemeiner Bedeutung für den Wärmehaushalt der Erde, wie man die Gesamtbilanz der Strahlung auch nennt, und damit natürlich vor allem auch für das irdische Leben. Schon geringfügige Schwankungen seines normalen Anteils (0,03 Prozent) würden, nach Ansicht der Spezialisten für Klimafragen, zu tiefgreifenden Veränderungen des Gesamtklimas auf unserem Planeten führen.

Der von Wasserdampf und Kohlendioxid ausgehende „Treibhauseffekt“ der Erdatmosphäre kann nun noch durch Wolken wesentlich verstärkt werden. Die Bezeichnung „Treibhauseffekt“ hat ihren Ursprung darin, daß die kurzwellige Sonnenstrahlung zwar hereingelassen wird, der Rückweg aber für die erzeugte langwellige Wärmestrahlung weitgehend versperrt ist; ähnlich wie in dem Treibhaus einer Gärtnerei die Glasscheiben die Sonnenstrahlung passieren, die Wärme der aufgeheizten Treibhauserde jedoch nicht entweichen lassen. Wie schon erwähnt, verstärken also Wolken den Ausstrahlungsschutz der Erdatmosphäre. Besonders deutlich kann man dies vor allem im Winter beobachten. In nächtlichen Aufklarungsgebieten sinkt

die Temperatur viel tiefer ab als in den Gegenden, in denen sich durch örtliche Umstände eine Wolkendecke ausbilden konnte.

Dieser Zusammenhang hat nebenbei bemerkt eine auch heute noch manchmal anzutreffende falsche Vorstellung vom Wettereinfluß des Mondes geweckt. In einer Winternacht, in der der Mond klar und hell leuchtet, wird es nicht deswegen besonders kalt, weil der Mond eine „kalte Strahlung“ aussendet oder der Mond überhaupt das Wetter beeinflusst. Es ist gerade umgekehrt. Weil die Wetterlage keine Wolkenbildung zuläßt und darum die intensive nächtliche Ausstrahlung begünstigt, ist zwangsläufig auch der zu dieser Zeit am Himmel stehende Mond besonders gut zu sehen. Die lange dunkle Winternacht und der zu dieser Jahreszeit sehr hohe Stand des Vollmondes verstärken diesen Eindruck noch zusätzlich. Alle exakten wissenschaftlichen Untersuchungen über einen prinzipiellen Wettereinfluß des Mondes haben darüber hinaus, wie zu erwarten, stets zu eindeutigen negativen Ergebnissen geführt.

Doch weil wir schon mal beim Mond sind, soll noch eine andere Erscheinung erwähnt werden, die man gelegentlich beobachten kann. Der Volksmund sagt: „Der Mond hat einen Hof“, meist mit dem Zusatz, daß sich damit schlechtes Wetter ankündigt. Gemeint ist ein heller Ring, der sich in rund 22° Abstand um den Mond zieht. Der Wissenschaftler nennt eine solche Erscheinung ein „Halo“. Wer bei dieser Gelegenheit genau beobachtet, wird feststellen, daß der Himmel zwar fast klar ist, aber doch einen leichten trüben Schleier zeigt. Es handelt sich dabei um eine sehr hoch liegende durchsichtige Wolkenform, die als „Cirrostratus“ bezeichnet wird und aus winzigen Eisnadeln besteht. Häufig ist diese Wolkenform der Vortrupp einer aufgleitenden Warmluftmasse und damit wirklich Vorbote einer Wetterverschlechterung. Die gleiche Erscheinung läßt sich auch an der Sonne beobachten, nur ist man bei der allgemeinen Sonnhelligkeit etwas stärker geblendet, und es fällt



schwerer, den „Sonnenhalo“ zu erkennen. Manche Sonnenhalos sind so kräftig ausgebildet, daß man sogar einen zweiten Ring in etwa 44° Abstand von der Sonne sehen kann. Zwischen beiden Ringen befinden sich vertikale und horizontale Lichtbrücken, und an den Schnittpunkten sind intensiv leuchtende Knoten („Nebensonnen“) erkennbar. Im Mittelalter nährten derartige Erscheinungen immer wieder den weitverbreiteten Aberglauben, daß hier übernatürliche Kräfte wirksam

seien. Heute beweisen uns die Physiker mathematisch genau, daß es sich um Spiegelungen und Brechungen des Sonnen- oder Mondlichtes in den Eiskristallen der Cirruswolken handelt.

So ließe sich die Kette aufschlußreicher atmosphärischer Wechselwirkungen mit ihren in unser menschliches Dasein gewichtig eingreifenden Naturscheinungen noch um manches Glied verlängern. Denken wir nur an das imponierende Naturschauspiel eines Gewitters mit seinen elek-

trischen Entladungen und den für Landwirtschaft und Verkehr manchmal recht folgenschweren Sturmböen, Regen- und Hagelschauern! Hierbei erleben wir auf engstem Raum die gewaltige Stärke der in der Atmosphäre wirkenden Kräfte. Diese entfalten sich entweder bei besonders heftigen Aufstiegen sehr feuchter Warmluftmassen im Bereich einer Kaltfront (Frontengewitter) oder bei langanhaltender Aufheizung einer sehr feuchten Luftmasse durch intensive Sonneneinstrahlung (Wärmegewitter). Die charakteristischen hochgetürmten Gewitterwolken, deren „Quellköpfe“ manchmal Höhen bis zu 9000 m und gelegentlich sogar darüber erreichen, geben schon optisch einen Eindruck von den großen Feuchtigkeitsmengen, die innerhalb kurzer Zeit von der Strömungskraft der Atmosphäre bis in diese Höhen transportiert werden. Die ungewöhnliche Heftigkeit der Vorgänge in einem Gewitter zeigt sich nicht zuletzt in der Ausbildung gewaltiger elektrischer Ladungskräfte, die bei ihrem Ausgleich vielgestaltige Blitzentladungen verursachen. Als Höchstwerte für die Spannungen und Stromstärken in einem Gewitter ergeben sich nach neueren Ansichten etwa 100 Millionen V und 50 000 bis 100 000 A. Die Energie einer Blitzentladung beträgt jedoch nur etwa 200 bis 300 kWh, weil sie nur Bruchteile einer Sekunde andauert. Nebenbei sei noch bemerkt, daß es trotz langjähriger Bemühungen auch heute noch keine einheitliche und voll befriedigende Theorie der elektrischen Erscheinungen in einem Gewitter gibt.

Lassen wir es mit dieser kurzen Übersicht über die Physik der Atmosphäre und ihre Folgeerscheinungen, die Wettervorgänge, im Augenblick genug sein! Unsere Betrachtungen sollten ja keinen Lehrgang für Meteorologie ersetzen. Dazu müßte man natürlich noch viel tiefer und wissenschaftlich exakter auf Einzelfragen eingehen. Sicher ist aber längst klar geworden, daß die wissenschaftlichen Bemühungen um die Lösung dieser Probleme einerseits von großer Bedeutung sind, andererseits

aber auch ohne erheblichen Aufwand an Arbeit und Hilfsmitteln kaum zu einem befriedigenden Resultat führen können. Selbst wenn man dabei das notwendige Zusammenwirken der rein meteorologischen Forschung mit anderen Wissenschaftszweigen, von denen wir einige schon andeutungsweise kennenlernten, unbeachtet läßt, ergibt sich allein aus der Forderung nach einer laufenden allgemeinen Wetterübersicht, möglichst im Maßstab extrem großräumiger Gebiete (zum Beispiel Kontinentalbereich Europa-Asien mit Atlantik bis in das Polargebiet), ein ganz ungewöhnliches Anliegen. Man müßte nämlich in diesem Raum ein weitgehend lückenloses und dichtes Netz von Beobachtungsstationen unterhalten und deren Messungen und Beobachtungen der meteorologischen Elemente (Luftdruck, Temperatur usw.) nach einem zeitlichen Koordinationsprinzip bestimmten auswertenden Zentralen zuleiten. In besonders „wetteraktiven“ Zonen oder Gebieten sollte dabei das Netz der Beobachtungsstationen besonders dicht sein.

Weltweite Wetterbeobachtung

In jahrzehntelanger mühevoller Kleinarbeit und mit nicht unbeträchtlichen Mitteln haben die Meteorologen in der Tat eine solche Einrichtung schaffen können. Aus bescheidenen nationalen Anfängen heraus entstand schon bald das Skelett eines umfassenden Netzes von Wetterstationen, deren Beobachtungen nach einem international vereinbarten Schlüssel per Funk und Telegraf untereinander ausgetauscht werden. Tausende von Wettertelegrammen fliegen täglich um den Erdball. Diese internationale Zusammenarbeit der nationalen Wetterdienste ist vorbildlich und schafft die einzige Voraussetzung dafür, daß Wetterberatungen hauptsächlich für Luft- und Seeverkehr sowie Landwirtschaft und darüber hinaus Unwetterwarnungen an Seeküsten gegeben werden können. Da es besonders wichtig ist, vor allem

auch über die Wettersituationen über dem Meer orientiert zu sein, sind zahlreiche spezielle Weterschiffe ständig im Einsatz, und sogar die im normalen Seeverkehr fahrenden Schiffe setzen in bestimmtem Umfang Wettermeldungen ab. Trotzdem erhält man aus dem Bereich des freien Meeres nicht solch eine Informationsdichte wie aus dem Stationsnetz der Landgebiete. Ähnliches gilt natürlich auch für die Polargebiete, in denen allerdings in den letzten Jahrzehnten die Stationsdichte bedeutend zugenommen hat. Hier hat sich vornehmlich die Sowjetunion, deren führende Stellung in der Polarforschung hinreichend bekannt ist, umfassende Verdienste erworben. Immerhin ist die Unterhaltung von wissenschaftlichen Stationen unter arktischen Bedingungen kein alltägliches Unterfangen, obwohl manche Berichte von dem routinierten Arbeitsablauf in solchen Stationen dem zu widersprechen scheinen.

Ein besonderes Kapitel im Rahmen des weltweiten Netzes meteorologischer Beobachtungsstationen ist zweifellos der Unwetterwarndienst. Wie wichtig er ist, wird sehr schnell deutlich, wenn man einmal aufmerksam die Meldungen der internationalen Nachrichtenagenturen über Unweterschäden in den verschiedensten Gegenden der Erde längere Zeit verfolgt. In den Jahresbilanzen ist dann meist von mehreren tausend Menschenleben und Milliardenwerten die Rede. Daneben stellt sich heraus, daß offenbar immer wieder bestimmte Bereiche der Weltmeere und angrenzenden Küstengebiete besonders häufig heimgesucht werden. Die verheerenden Auswirkungen hängen einfach damit zusammen, daß man unter derartigen Unwettern eben etwas anderes verstehen muß, als es unseren landläufigen Vorstellungen entspricht, die bestenfalls in einem einzelnen außergewöhnlich heftigen Gewitter mit orkanartigen Sturmböen und Hagel- und Regenschauern gipfeln. Die verheerenden Großunwetter der amerikanischen oder asiatischen Küstengewässer weisen dagegen ganz andere Maßstäbe auf;

denn sie sind die auf schmale Zugstraßen konzentrierte, geballte Auswirkung ungewöhnlich stark entwickelter Tiefdrucksturmwirbel.

Mit übermäßig entwickelt ist gemeint, daß diese Tiefdruckgebiete sich erstens durch einen besonders starken Druckgegensatz zu den umliegenden Hochdruckgebieten auszeichnen und daß sie zweitens mit sehr feuchter tropischer Warmluft beladen sind. Der erste Tatbestand führt dazu, daß sich grundsätzlich eine außergewöhnlich heftige Wirbelströmung zum Tiefdruckkern ausbildet, die diesem Sturmtief den Charakter eines Wirbelsturms verleiht. Zusätzlich macht aber noch die Umsetzung der großen Feuchtigkeitsmassen in ausfallende Niederschläge große Wärmemengen frei, so daß die Strömung noch verstärkt wird. Auf Grund dieser Zusammenhänge und Voraussetzungen bilden sich solche Sturmwirbel bevorzugt in tropischen und subtropischen Bereichen der Erdoberfläche. Auch die Zugstraßen dieser atmosphärischen Gebilde zeigen, in Abhängigkeit von der allgemeinen Wettersituation, gewisse Ähnlichkeiten. Die verschiedenen Bezeichnungen, die man derartigen tropischen Wirbelstürmen gibt („Taifun“, „Hurrikan“ oder „Tornado“), sind nur sprachlich bedingte Unterschiede für die gleiche Erscheinung. In unseren Breiten und im europäischen Küstenbereich entstehen zwar nicht solche ausgeprägten Katastrophen-Sturmwirbel. Aber ein Sturmtief kann auch an europäischen Küsten verheerende Folgen haben, wie sich bei der Hamburger Sturmflutkatastrophe vom 16. und 17. Februar 1962 zeigte.

Von der ungeheuren Gewalt, mit der die Taifune über die Küsten Japans oder Chinas oder die Hurrikane an der Ostküste Nordamerikas toben, kann man sich hierzulande kaum eine Vorstellung machen. Windgeschwindigkeiten von 200, 300, ja 400 km/h konnten festgestellt werden. Dem heran nahenden Unheil versucht man durch einen speziellen Wirbelsturm-Warndienst wenigstens den Effekt der Überraschung, der in früheren Jahren



nicht unwesentlich zu den Verlusten an Menschenleben beitrug, zu nehmen. Heute bemüht man sich, die vom Warndienst als gefährdet bezeichneten Gebiete soweit als möglich für eine entsprechende Zeit zu evakuieren. Voraussetzung ist jedoch, daß man den heranziehenden Sturmwirbel möglichst

frühzeitig auffindet. Am besten ist es natürlich, wenn man ihn schon bei seiner „Geburt“ beobachten und seinen weiteren Weg im „Jugendstadium“ verfolgen kann. Leider ist aber dafür das Beobachtungsnetz gerade über dem Meer noch viel zu weitmaschig. Unter Einsatz von Flugzeugen

und Radargeräten versucht man diese Lücke zu schließen. Doch immer wieder geschieht es, daß man den Verlauf einer Wirbelsturmtrasse erst viel zu spät erkennt, und dann rast „Betty“ oder „Caroline“ mit aller zerstörender Gewalt über Schiffe und Küstenstädte dahin. Der Brauch einer Namensgebung für Wirbelstürme kommt aus den USA. Es werden dabei nur Frauennamen vergeben, und zwar in jedem Jahr neu in alphabetischer Reihenfolge.

Gewiß wäre es eine großartige Sache, wenn es gelänge, den Entstehungsmechanismus und die Entwicklungsvorgänge bei einem Sturmwirbel so weit zu erforschen, daß man vielleicht auch nach Wegen suchen könnte, in dieses Geschehen einzugreifen und die volle Ausbildung des Sturmtiefs zu verhindern. Einige Wissenschaftler sind in dieser Hinsicht schon recht optimistisch. Allerdings wird es darauf ankommen, eben möglichst bereits bei der Entstehung des Keims zum zukünftigen Sturmwirbel einzugreifen, weil dann der Mechanismus der gewaltigen Wärmekraftmaschine noch nicht voll angelaufen ist. Ein entwickeltes Sturmtief ist immerhin mit Energieumsetzungen verbunden, die nach neueren Schätzungen etwa der Energieentfaltung einer im 5-Minuten-Rhythmus ablaufenden Explosionsreihe von 20-Megatonnen-Atombomben entspricht. Dieser Vergleich läßt auch die Frage verneinen, ob einzelne Versuchsexplosionen von Kernwaffen unmittelbar das Wettergeschehen beeinflussen können. Im Maßstab der Kräfte des atmosphärischen Geschehens stellen selbst diese für uns Menschen so gewaltigen Kraftentfaltungen nur untergeordnete Erscheinungen dar.

Internationale geophysikalische Forschungen

Die Erkenntnis, daß die Probleme der geophysikalischen Wissenschaft im allgemeinen und der Meteorologie im besonderen schließlich nur durch

eine umfassende internationale Gemeinschaftsarbeit erfaßt und gelöst werden können, bildete die Voraussetzung für eines der großartigsten wissenschaftlichen Unternehmen der Geschichte. In Anlehnung an die Erfahrungen bei den „Internationalen Polarjahren“ (1882 und 1932) entstand nach 1950, unter Führung der Dachorganisation aller bedeutenden naturwissenschaftlichen Gesellschaften der Erde („Internationaler Rat wissenschaftlicher Gesellschaften“ oder „International Council of Scientific Unions“), der Plan zu einem großangelegten „Internationalen Geophysikalischen Jahr“ (IGJ).

In einem vorbildlichen Zusammenwirken wissenschaftlicher Gesellschaften vieler Länder, unter denen die von der Sowjetunion geleisteten Anstrengungen einen führenden Platz einnahmen, wurde innerhalb bevorzugter Zonen (Arktis; Antarktis; Gebiet 23° beiderseits des Äquators; 5 Gebietsstreifen entlang der Längengrade 10°, 75°, 110°, 140° Ost und 75° West) ein Spezialnetz von 2000 Hauptstationen zusammengeschlossen oder, soweit noch nicht vorhanden, extra dafür geschaffen. Nach einem genau ausgearbeiteten Verfahrens- und Zeitplan begannen dann die Wissenschaftler auf diesen Stationen am 1. Juli 1957 um 0 Uhr Weltzeit, dem Zeitpunkt des offiziellen Beginns des IGJ, mit dem umfassenden Beobachtungs- und Untersuchungsprogramm. Es erstreckte sich über: Meteorologie, Erdvermessung, Erdmagnetismus, Polarlichter, Hochatmosphäre mit Ionosphärenforschung, Sonnenforschung, Kosmische Strahlungen, Gletscherkunde und Ozeanographie. An diesem Arbeitsprogramm waren auch verschiedene wissenschaftliche Institutionen der Deutschen Demokratischen Republik mit beachtlichen Erfolgen beteiligt.

Die wissenschaftlichen Anstrengungen im Rahmen des IGJ erhielten vor allem durch zwei spezielle Programmrichtungen ihre besondere Note. Einmal war es der breite Angriff auf die Geheimnisse der Antarktis, deren Einfluß als Klima- und Wetter-

faktor es zu erforschen galt. Zum anderen war es das erstmalige Eingreifen einer völlig neuen Forschungsrichtung, nämlich der Höhen- und Welt-raumforschung mittels Raketen- und Raumflug-körpern. Kurz nach der Mitte des Jahres 1955 hatten sowjetische und amerikanische Wissen-schaftler Erklärungen abgegeben, daß in ihren

Ländern während des IGT zum erstenmal künstliche Satelliten als Meßgeräteträger aufsteigen würden. Am 4. Oktober und 3. November 1957 setzten sowjetische Raumfahrtspezialisten als erste diese Ankündigung in die Tat um (Meßsatelliten Sputnik-1 und Sputnik-2), und am 31. Januar 1958 folgten ihnen schließlich auch ihre amerikanischen

Kollegen mit ihrem Meßsatelliten Explorer-1. Später werden wir noch sehen, wie groß und bedeutsam gerade die Beiträge und Perspektiven sind, die sich durch die Anwendung der Raumflugtechnik für die Weltraumforschung im allgemeinen und Geophysik bzw. Meteorologie im besonderen ergeben.

Bei der Aufzählung der am IGJ beteiligten Forschungszweige tauchten zwei neue Begriffe auf – Aeronomie (Erforschung der Hochatmosphäre) und Ionosphärenforschung –, die außerhalb der Meteorologie erwähnt wurden, aber doch eng mit der Physik der Atmosphäre verknüpft sind. Mit diesen beiden Arbeitsgebieten gelangt man in einen Bereich der geophysikalischen Forschung, der erst in den letzten Jahrzehnten in seiner vollen Bedeutung erkannt wurde. Die Wettervorgänge, mit denen wir uns bisher beschäftigten, sind lediglich Ausdruck des physikalischen Geschehens in einem bestimmten, bodennahen Bereich der Atmosphäre. Die Meteorologen nennen dieses Gebiet die „Troposphäre“, was man vielleicht etwas sehr frei mit „Wetterküche“ übersetzen könnte. Dieses unterste Stockwerk der Erdatmosphäre reicht, je nach der Jahreszeit, in unseren Breiten und in den Polarregionen bis zu etwa 8 bis 12 km Höhe. Am Äquator hebt sie sich bis auf etwa 17 km Höhe an. Die Troposphäre schließt mit einer Schichtgrenze ab, die man als „Tropopause“ bezeichnet. Darüber liegt die „Stratosphäre“. Ihre Bezeichnung geht auf ältere Vorstellungen zurück, die dieses Gebiet als frei von vertikalen und horizontalen Strömungen ansehen. Die Erfahrungen der letzten Jahre haben jedoch gezeigt, daß diese Ansicht nicht zutrifft. Nach dem klassischen Strukturmodell der Erdatmosphäre erstreckt sich die Stratosphäre bis in etwa 80 km Höhe. Nach neueren Definitionen hat sie ihre Obergrenze bei etwa 50 km Höhe. Der Bereich bis 80 km wird neuerdings als „Mesosphäre“ bezeichnet. Oberhalb der Stratosphäre bzw. Mesosphäre beginnt die „Ionosphäre“, in der – wie der Name

schon sagt – elektrisch geladene Gasatome und -moleküle (Ionen) an der Zusammensetzung der hochverdünnten Atmosphäre einen wesentlichen Anteil haben. Die Obergrenze der Ionosphäre läßt sich nur schwer definieren. Es scheint, daß sie etwa zwischen 500 und 700 km Höhe liegt.

Für das Gebiet, das sich oberhalb der Ionosphäre bis zum Grenzbereich gegen den interplanetaren Raum erstreckt, hat sich die Bezeichnung „Exosphäre“ durchgesetzt. Sie bedeutet soviel wie Außensphäre; aus diesem Bereich wandern ständig Teilchen der Atmosphäre in den interplanetaren Raum hinaus. Als äußere Grenze der Atmosphäre nimmt man, wie schon früher erwähnt, eine Höhe von etwa 3000 km über der Erdoberfläche an. Das Gebiet oberhalb 30 km bezeichnet man heute allgemein als „Hochatmosphäre“.

Schon aus dieser am häufigsten verwendeten schematischen Einteilung des Aufbaues der Erdatmosphäre läßt sich schließen, daß es sicher noch zahlreiche zusätzliche Fragen und Probleme geben wird, die den Gesamtmechanismus der physikalischen Vorgänge in der Lufthülle der Erde betreffen. Das zeigt sich auch darin, daß es noch weitere Aufbauschemata gibt, denen teilweise andere physikalische Gesichtspunkte zugrunde liegen. Unter anderen wird dabei die Frage beachtenswert sein, inwieweit denn unsere ursprüngliche, vereinfachte Annahme von dem ungehinderten Durchtritt der Sonnenstrahlung zur Erdoberfläche – von der abschirmenden Wirkung der Wolken einmal ganz abgesehen – in Wirklichkeit überhaupt zutrifft. Oder nehmen wir die Frage nach der Ursache für die Entstehung der Ionosphäre. Was veranlaßt die Bildung von elektrisch geladenen Teilchen in der Hochatmosphäre? Gehen wir diesen Problemen nach, so werden wir überrascht feststellen, welche Vielfältigkeit an Wirkungen noch in anderer als meteorologischer Hinsicht mit diesem für unsere Sinnesorgane doch so schlecht faßbaren Etwas verbunden ist, das wir schlechthin als „Luft“ bezeichnen.

Goldfischteich und Erdatmosphäre

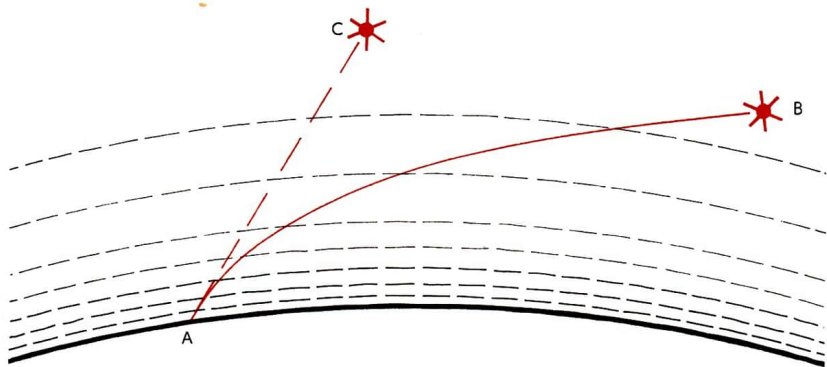
Auf einer internationalen Fachtagung für Welt-raumforschung machte schon vor Jahren ein Wissenschaftler Journalisten gegenüber eine originelle Bemerkung. Er sagte, daß sich die Wissenschaftler auf der Erdoberfläche außerirdischen Beobachtungsobjekten gegenüber etwa in der gleichen schwierigen Lage befänden wie ein Mensch, der vom Grunde eines metertiefen Goldfischteiches aus die Welt am Ufer dieses Teiches beobachten und wissenschaftlich beschreiben sollte. Dieser Vergleich scheint zunächst etwas abwegig zu sein, er kommt aber der Wirklichkeit dennoch weitgehend nahe.

Praktische Erfahrungen im Sinne dieses Vergleichs könnten uns vielleicht Sporttaucher und Unterwasserfotografen mitteilen. Für letzteren wird es freilich wohl nur zu gelegentlicher Spielerei gehören, einmal das Fotoobjektiv von unten gegen die Wasseroberfläche zu richten. Hin und wieder sind aber auch solche Aufnahmen schon veröffentlicht worden. Auf diesen Bildern sieht man verzerrte, unscharfe und im Falle von Farbaufnahmen auch in den Farbwerten stark verfälschte Abbilder der Gegenstände oberhalb des Wasserspiegels. Ein ganz so groteskes Abbild unserer kosmischen Umwelt liefert uns der Blick durch die Erdatmosphäre allerdings nicht, obwohl auch hier im Prinzip die gleichen Effekte wirksam sind.

Wenn die Effekte gleich oder ähnlich sind, so läßt sich daraus schließen, daß dies auch für die Ursachen gelten muß. In beiden Fällen ist der Beobachter in eine im Grunde durchsichtige Substanz eingebettet. Man spricht hier auch von einem „Medium“. Beim Unterwasserfotografen ist dieses Medium das flüssige Wasser, und beim Beobachter außerirdischer Objekte ist es die gasförmige Atmosphäre der Erde. Uns interessiert natürlich jetzt in erster Linie das Medium „Erdatmosphäre“. Wir wollen uns daher mit seinen für die wissenschaftlichen Beobachtungen störenden Effekten eingehender befassen. Beginnen wir mit einer ganz alltäglichen Frage!

Warum ist der wolkenlose „Himmel“ am Tage hell und in der Nacht dunkel, so daß man zwar nachts die schwachen Lichtpunkte der Sterne sehen kann, am Tage aber außer der Sonne höchstens noch den blassen Mond? Diese Tatsachen beeinflussen immerhin nicht unwesentlich die Erforschung kosmischer Objekte; denn die mit optischen Geräten auf der Erdoberfläche arbeitenden Astronomen und Astrophysiker können, von Wolkenstörungen ganz abgesehen, eben nur für die eingeschränkte Zeit der Nacht andere Objekte als Sonne und Mond untersuchen. Große kostspielige Instrumente haben also leider in jedem Fall, selbst bei guten Wettervoraussetzungen, naturbedingte halbtägige Zwangspausen.

Die Ursache für die Helligkeit des Tageshimmels liegt in der Gasnatur der Atmosphäre. Die freibeweglichen Gasteilchen (Moleküle und Atome) lassen zwar einen Teil der Sonnenstrahlen ungehindert passieren, der in unser Auge gelangt und dort das direkte Abbild der Sonne erzeugt. Ein anderer Teil der Lichtstrahlen wird aber von den Luftmolekülen durch Reflexion aus seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt. Die Reflexion der Sonnenstrahlen geht nach allen Richtungen und kann sich unzählige Male an ebenso vielen Luftteilchen wiederholen. Die Folge ist eine teilweise Zerstreuung des Sonnenlichtes über den ganzen sonnenbeschiedenen Teil der Erdatmosphäre. Für den Beobachter auf der Erdoberfläche wird dadurch die Atmosphäre selbst aufgehellt. Bleibt nur noch die Frage zu beantworten, warum dieses gestreute Sonnenlicht nicht „weiß“ ist wie das von der Sonne direkt einfallende Licht, sondern einen mehr oder weniger kräftig gefärbten „blauen“ Himmel ergibt. Wie wir noch sehen werden, ist das „weiße“ Sonnenlicht in Wirklichkeit ein Gemisch aus farbigen Lichtanteilen. Unter anderem gibt es auch eine blaue Komponente in der Sonnenstrahlung. Auf Grund eines hier nicht näher zu erläuternden physikalischen Zusammenhanges wirkt sich die Streuwirkung der atmo-



sphärischen Gasteilchen besonders stark auf diesen blauen Anteil des Sonnenlichtes aus.

Dieser Effekt hat jedoch noch eine andere Konsequenz. Denken wir daran, daß die Luftdichte mit zunehmender Höhe laufend geringer wird. Es ist nun leicht einzusehen, daß die Gesamtintensität des atmosphärischen Streueffektes von der Luftdichte abhängig sein muß. Je weniger Luftteilchen je Raumeinheit vorhanden sind, desto weniger Sonnenlicht kann gestreut werden. In den modernen, hoch fliegenden Passagierflugzeugen läßt sich daher schon deutlich feststellen, daß das helle Himmelsblau der Bodennähe mit zunehmender Höhe allmählich in immer dunklere Tönungen übergeht. In Höhen über 15 km wirkt der Himmel schon dunkelviolettblau und verwandelt sich dann endlich in ein sattes Schwarz, in dem sogar „am Tage“ die Sterne sichtbar werden. Dieser Sachverhalt weckt nebenbei bemerkenswerte Erwartungen vom Himmelsanblick über der Oberfläche anderer Himmelskörper, die entweder keine oder eine zur Erde unterschiedlich aufgebaute Atmosphäre haben. Fehlt eine Atmosphäre, wie es praktisch beim Mond der Fall ist, so ist die Antwort nicht schwer. Der Himmel ist dort auch dann absolut dunkel, wenn die Sonne über dem Horizont steht, also eigentlich „Tag“ ist.

Übrigens verdanken wir es ebenfalls der atmosphärischen Lichtstreuung, daß nach dem Sonnenuntergang in unseren Breiten nicht sofort tiefste Finsternis herrscht. Während nämlich die Sonne für den Beobachter in freier Landschaft schon unter den Horizont gesunken ist, treffen ihre Strahlen für einige Zeit noch immer die Atmosphäre über ihm. Deren Aufhellung sorgt dann für den gleitenden Übergang zur dunklen Nacht, den man als „Dämmerung“ bezeichnet. Aus dem Verlauf der Dämmerungserscheinungen kann man sogar gewisse Rückschlüsse auf den Aufbau der Atmosphäre ziehen, da die sinkende Sonne mit ihren Strahlen die verschiedenen Luftschichten durchleuchtet und kontinuierlich abstastet.

Über Lichtbrechungen

Wenden wir uns einer anderen atmosphärischen Erscheinung zu, die nicht unwesentlich die irdische Beobachtung kosmischer Objekte stört. Am besten kann man das besonders gut während des nun schon viel zitierten Urlaubs an der See studieren. Voraussetzung dafür ist ein schöner klarer Abend und ein Sonnenuntergang direkt über dem Meer. Dann wird man beobachten, daß die normalerweise kreisrunde Sonnenscheibe bei der Annäherung an den Wasserhorizont (Kimm) immer stärker zusammengedrückt erscheint. Mehr oder weniger stark abgeplattet bzw. deformiert taucht sie schließlich ins Meer.

Auch hier haben wir als Ursache wieder die Gasstruktur der Atmosphäre vor uns. Die Gesetze der Optik über die Ausbreitung eines Lichtstrahles innerhalb eines durchsichtigen Mediums besagen, daß der Lichtstrahl von seinem geraden Weg dann abgelenkt wird, wenn er auf ein Gebiet anderer Dichte in diesem Medium trifft. Für den Beobachter ist aber die Erdatmosphäre unmittelbar über dem Horizont am dichtesten und wird mit zunehmendem Horizontabstand zwangsläufig immer dünner. Mit anderen Worten: Ein von außen in die Atmosphäre eintretender Lichtstrahl muß einen gekrümmten Weg zurücklegen. Man bezeichnet diesen Vorgang der Lichtablenkung als Refraktion (Brechung). Die Krümmung des Lichtstrahles wird dabei um so stärker, je tiefer er in die Erdatmosphäre eindringt. Dadurch rückt aber für den Beobachter die Lichtquelle scheinbar an einen anderen Ort. Ihre scheinbare Höhe über dem Horizont ist größer als der wirkliche Abstand. Für den Sonnenuntergang bedeutet dies, daß der untere Sonnenrand tatsächlich schon unter die Horizontlinie gesunken ist, während die atmosphärische Refraktion ihn noch immer über den Horizont „zaubert“. Am unteren Sonnenrand prägt sich dieser Effekt deutlicher aus als am oberen, so daß die untergehende Sonne dort am stärksten ab-

geplattet und somit auch stark deformiert erscheint. Wenn sich dieser Refraktionseffekt auch nur in Horizontnähe so besonders bemerkbar macht, für exakte Beobachtungen außerirdischer Körper müssen ihn die Wissenschaftler auch in größeren Höhen über dem Horizont berücksichtigen. Übrigens, von der Lichtbrechung kann man sich auch auf einem anderen Wege sehr einfach überzeugen. Man braucht nur einmal zu versuchen, einen im flachen Wasser liegenden Gegenstand beim Zustoßen aus seitlicher Richtung mit einem Stock zu treffen. Es wird zunächst einige Mühe machen, die durch die Lichtbrechung hervorgerufene Abknickung des Stockes so zu berücksichtigen, daß man mit dem Stock nicht immer wieder über das Ziel hinaus stößt. Die Lichtbrechung entsteht an der Grenzfläche zwischen den verschiedenen dichten Medien „Luft“ und „Wasser“.

Eine besondere Variante der Lichtablenkung ist die sogenannte „Totalreflexion“. Sie entsteht, wenn ein Lichtstrahl unter einem ganz bestimmten Winkel auf die Grenzfläche zwischen verschiedenen dichten Medien auftrifft. Diese Grenzfläche wirkt dann ebenso wie ein gewöhnlicher Spiegel. In der Erdatmosphäre kann es im Bereich der bodennahen Luftschichten durchaus zur Ausbildung solcher Grenzflächen kommen, und zwar dann, wenn die direkt auf dem Boden aufliegende Schicht durch Sonneneinstrahlung stark aufgeheizt wird und sprunghaft kühler und damit dichtere Luftschichten darüberliegen. Es kann aber auch umgekehrt sein, daß ein „See“ kalter Luft in einer Senke verblieben ist, der sich mit seiner Oberfläche scharf gegen die darüberliegende wesentlich wärmere Luft abgrenzt.

Solche Luftspiegelungen zeigen sich beispielsweise sehr schön bei Fahrten auf der Autobahn. Das Fahrgestell eines weit vorausfahrenden Wagens scheint plötzlich in einer spiegelnden Wasserlache zu versinken, und beim Näherkommen stellt man fest, daß es an dieser Stelle überhaupt keine Feuchtigkeit auf der Bahn gibt. Das klassische

Beispiel für Luftspiegelungen ist die von Afrikareisenden immer lebhaft beschriebene „Fata Morgana“ der Wüstengebiete. Dort kann dieser Effekt so intensiv sein, daß Unkundige es auf ihren Eid nehmen würden, vor sich einen ausgedehnten See gesehen zu haben, in dessen Wassern sich sogar die Palmen einer Oase oder etwas anderes spiegelten. Aber alle diese Trugbilder beruhen nur auf einem Zauber der Lichtbrechungen in verschieden temperierten Luftschichten.

Die Lichtablenkung durch Brechung stört darüber hinaus noch in einer ganz speziellen Form außerordentlich unangenehm bei allen exakten wissenschaftlichen Beobachtungen kosmischer Objekte und Erscheinungen von der Erdoberfläche aus. Man braucht nur einmal an einem heißen, sonnigen Tag über eine Asphaltstraße oder über ein dunkles Pappdach hinweg zu blicken, um sofort zu wissen, was gemeint ist. Die Luft „flimmert“, und die dahinterliegenden Gegenstände, wie Häuser, Bäume oder anderes, erscheinen verzerrt und unruhig hin- und hertanzend. Schuld daran ist die „Luftunruhe“, die bei der ständigen Durchmischung kühlerer und wärmerer Luftzellen entsteht. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einer „Turbulenz“ (Wirbelströmung) der Luft. Bei diesem Durcheinanderwirbeln verschieden temperierter und damit unterschiedlich dichter Luftpakete entstehen stark wechselnde Brechungen und Spiegelungen, so daß man kein klares Bild von den dahinterliegenden Gegenständen erhält. In den extrem bodennahen Luftschichten ist dieser Effekt natürlich besonders stark ausgeprägt, weil sich dort einzelne Luftpakete, deren Durchmesser in der Größenordnung weniger Dezimeter liegen kann, sehr unterschiedlich aufheizen können.

Wenn man eine Sternwarte besucht, wird man also immer wieder von der Luftunruhe, als einem der ärgsten Hindernisse bei allen astronomischen Beobachtungen, hören. Wie ein häßlicher Zerrspiegel legen sich die Luft-Schlieren, so nennt man das Gemisch verschieden brechender Luftzellen, zwi-

schen den Astronomen und seine Beobachtungsobjekte. Alle feineren Einzelheiten entziehen sich dadurch bei der Beobachtung der Erscheinungen auf der Sonnenoberfläche oder auf dem Mond und den Planeten einem genaueren Studium. Es gibt Nächte mit völlig klarem Himmel, in denen der Mond- oder Planetenspezialist resignierend von seinen Instrumenten lassen muß, weil einfach kein ausreichend klares Bild von den betreffenden Himmelskörpern zu erhalten ist. Diese ungünstigen Beobachtungsnächte sind schon mit bloßem Auge daran zu erkennen, daß die Sterne so „schön funkeln“. Dieses „Szintillieren“ der Sternpunkte hat ebenfalls seine Ursache in den ständig wechselnden Brechungen des Lichtstrahles beim Durchtritt durch die turbulente Erdatmosphäre.

Als einziger Ausweg aus diesem Dilemma blieb den Astronomen bis vor wenigen Jahren nur der Weg auf möglichst hohe Berge. In diesen Regionen ist die Luft nicht nur ruhiger, sie ist auch ungetrübter von atmosphärischen Beimengungen wie Staub und Dunst, weil schon ein merklicher Teil der Atmosphäre unterhalb des Beobachters liegt. So findet man heute die erfolgreichsten astronomischen Forschungsinstitute für Mond-, Planeten- und andere Spezialuntersuchungen auf Bergen bis zu rund 3000 m Höhe. Als Beispiele seien nur erwähnt das Observatorium in Alma Ata (UdSSR, 1450 m ü. M.), das Observatorium Skalnaté Plešo (ČSSR, 1783 m ü. M.) und die Sonnen-Observatorien Wendelstein (Westdeutschland, 1837 m ü. M.) und Kislowodsk (UdSSR, 2130 m ü. M.). In den Niederungen trifft man heute meist nur noch ältere Sternwarten und Auswertungszentren. Jedoch die Errichtung von Bergobservatorien vermag das Problem letztlich nicht befriedigend zu lösen. Immer verbleibt noch ein gewisser Teil des Luftozeans über ihnen, und damit ist auch etwas von dem Goldfischeffekt der Erdatmosphäre nie ganz zu vermeiden.

Bisher haben wir uns nur mit dem Brechungs einfluß des gasförmigen Mediums „Erdatmosphäre“

beschäftigt, der die Abbildung der Beobachtungsobjekte verschlechtert. Es gibt aber noch andere, für wissenschaftliche Untersuchungen kosmischer Objekte nicht weniger unangenehme Wirkungen der irdischen Lufthülle. Kehren wir dazu noch einmal zur Erläuterung eines Sonnenunterganges zurück! Zur Deformation der Sonnenscheibe kommt das Phänomen einer allgemeinen Helligkeitsminderung des Sonnenlichtes und vor allem einer mehr oder weniger starken Farbverschiebung zu gelbroten und roten Tönungen dazu. Beide Effekte ergeben zusammen die Möglichkeit, gelegentlich auch mit ungeschütztem Auge die Sonnenscheibe am Horizont zu beobachten. Es kann dann sogar vorkommen, daß man zu bestimmten Zeiten kleine dunkle und scharfbegrenzte Flecken auf der Sonnenscheibe erkennt, sogenannte Sonnenflecken, mit deren Deutung wir uns jedoch erst später beschäftigen wollen. Uns sollen im Augenblick nur die Dämpfung und Färbung des Sonnenlichtes interessieren. Auch sie werden wieder durch die Erdatmosphäre verursacht. Aber um die näheren Zusammenhänge zu erkennen, müssen wir uns zunächst in einem Überblick mit der Natur des Sonnenlichtes oder besser, der Lichtstrahlung im allgemeinen beschäftigen.

Das Licht und sein Spektrum

Sendet ein Körper Licht aus, so handelt es sich dabei in jedem Fall um die Abstrahlung von Energie einer ganz bestimmten Form. Diese Strahlungsenergie kommt aus dem Inneren der Atome oder Moleküle, aus denen sich die Lichtquelle zusammensetzt. Die Leuchterscheinungen sind also immer nur dort möglich, wo sich Materie befindet. Das gilt übrigens auch für den Fall, daß die entsprechende stoffliche Substanz nicht selbst Licht ausstrahlt, sondern nur die Eigenstrahlung einer anderen Lichtquelle reflektiert (zurückwirft). Bei der Entstehung von Licht oder dem Licht ver-

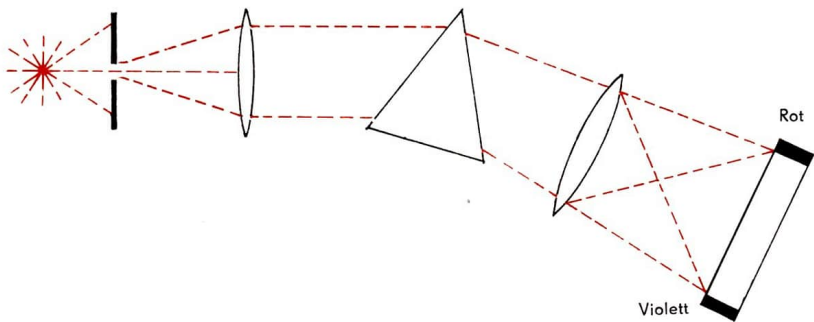
**Das französische Bergobservatorium
auf dem Pic du Midi (Pyrenäen)
zählt auf Grund der ausgezeichneten
Luftbedingungen in rund 3000 m Höhe
zu den leistungsfähigsten
astronomischen Beobachtungsstätten der Erde**

wanderter Strahlung spielen vor allem temperatur-
erzeugende Prozesse, von denen die Atome und
Moleküle zur Aussendung der Strahlung „an-
geregert“ werden, eine entscheidende Rolle. Der
Vollständigkeit halber sei aber noch erwähnt, daß
die Atome auch auf „kaltem“ Wege, nämlich durch
elektrische Kräfte und durch Zusammenstöße mit
anderen Materieteilchen, zum Strahlen angeregt
werden können.

Die ausgesandte Strahlung zeigt eine merk-
würdige Doppelnatur, die eine der aufregendsten

Erkenntnisse in der modernen Physik darstellt.
Einmal verhält sie sich wie ein Vorgang mit all-
seitiger wellenförmiger Ausbreitung, bei dem die
Strahlungsquelle im Zentrum steht. Sie ähnelt
also etwa der Wellenausbreitung, die bei einem
Steinwurf ins Wasser entsteht, nur daß bei der
Lichtstrahlung die Wellenfronten kugelförmig sind.
Daneben kann aber auch das Licht bei bestimmten
Experimenten wie ein fortlaufender Strom einzelner
Teilchen in Erscheinung treten. Diese Licht-„Kor-
puskeln“ oder „Quanten“ – wie Max Planck





(1858–1947), der Begründer der Quantentheorie sie nannte – könnte man sich somit stark vereinfacht als die einzelnen Geschosse einer Garbe von Energiepaketen vorstellen, die von der Lichtquelle ausgesandt werden. Es ist allerdings für unser Anschauungsvermögen nicht mehr faßbar, sich beide Eigenschaften in einer Erscheinung vereint vorzustellen.

Um im Rahmen einer einheitlichen Terminologie zu bleiben, ist es üblich, das Licht und die ihm verwandten Strahlungen unter der gemeinsamen Bezeichnung „elektromagnetische Wellenstrahlung“ zusammenzufassen, weil bei ihrer Erzeugung elektrische und magnetische Schwingungsvorgänge Pate stehen. Der Einfachheit halber soll aber weiterhin immer nur von „Wellenstrahlung“ gesprochen werden. Ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit ist die größte in der Natur mögliche Fortpflanzungsgeschwindigkeit und beträgt im Vakuum rund 300 000 km/s. Diese große, aber endliche Geschwindigkeit des Lichtes wurde 1676 von dem dänischen Astronomen Olaus (Olaf) Römer (1644–1710) entdeckt, als er Beobachtungen von Verfinsterungen des ersten Jupitermondes auswertete. Er erhielt dabei bereits einen Wert für die Lichtgeschwindigkeit, der dem tatsächlichen nahekommt.

Wie bei jeder anderen sich wellenförmig ausbreitenden Erscheinung kann man natürlich auch beim Licht nach der „Wellenlänge“ fragen. Auf dem Wege zur Beantwortung dieser Frage werden wir uns zunächst noch mit einer weiteren Feststellung beschäftigen müssen. Fängt nämlich unser Auge von einer Lichtquelle, beispielsweise der Sonne, Licht auf, das wir als „weiß“ empfinden, so stellt sich bei einer genaueren Untersuchung dieses „weiße“ Licht durchaus nicht als etwas durch und durch Einheitliches heraus. Es erweist sich vielmehr als ein Gemisch verschiedenfarbigen Lichtes, das sich mit einer einfachen Vorrichtung für genauere Untersuchungen sauber auseinander sortieren läßt. Zum Nachweis kann man sich der

speziellen Eigenschaften eines Glasprismas bedienen: Läßt man ein durch einen schmalen Spalt begrenztes Bündel Sonnenlicht auf einen solchen dreikantigen Glasstab fallen, so wird das hindurchtretende Licht einerseits von seinem geraden Weg abgelenkt und andererseits in das Regenbogen-Farbband (Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo, Violett) aufgespalten. Die für exaktere physikalische Untersuchungen vervollständigte Anlage mit regulierbarer Spaltbreite und verschiedenen Linsensystemen zur Verbesserung der optischen Abbildungen bezeichnet man als „Spektroskop“ oder im Fall einer fotografischen oder sonstigen Aufzeichnungsmethode als „Spektrograph“. Beide Worte sind abgeleitet von der Bezeichnung „Spektrum“ für das bei der Zerlegung entstehende bunte Farbband.

Die Parallele zur Farbenfolge im Regenbogen erklärt sich daraus, daß dieser ebenfalls durch Zerlegung des weißen Sonnenlichtes beim Auftreffen auf die ähnlich wie winzige spiegelnde Prismen wirkenden Regentropfen entsteht. Diese Erklärung fand schon der französische Philosoph René Descartes (1596–1650) im Jahre 1635. Eine genauere Analyse des spektralen farbigen Lichtes zeigt schließlich eindeutig, daß man es hier wirklich mit der reinen Grundform der Lichtstrahlung zu tun hat. Es läßt sich nicht weiter in irgendwelche feineren Bestandteile zerlegen und liefert für jeden einzelnen Punkt innerhalb der Farbskala einen festen und eindeutigen Wert für die Wellenlänge, wobei die Wellenlänge vom roten Ende des Spektrums zum violetten hin kontinuierlich abnimmt. Das sichtbare Sonnenlicht umfaßt einen Wellenlängenbereich, dessen untere Grenze etwa 400 nm (1 nm = 1 millionstel Millimeter) und obere Grenze etwa 800 nm betragen.

An diesen Bereich des sichtbaren Lichtes schließen sich am kurzwelligen Ende die Ultraviolett-, die Röntgen- und die extrem kurzwellige Gammastrahlung an. Am langwelligen Ende des Lichtspektrums kommt nach dem äußersten noch sicht-

baren Rot die Infrarotstrahlung, die sich zu noch größeren Wellenlängen hin mit den kürzesten, funkttechnisch erzeugten elektromagnetischen Schwingungen überschneidet. Nach dieser Richtung hin bilden somit die längsten Radiowellen die Grenze des elektromagnetischen Schwingungsspektrums. Mit den Eigenschaften der einzelnen Strahlungsarten brauchen wir uns vorläufig nicht näher zu beschäftigen. Wichtiger ist das Verständnis ihrer Gesamtstruktur, weil sich dadurch leichter eine Einsicht in viele astrophysikalische Methoden zur Erforschung der Himmelskörper ergibt und zugleich die Wechselwirkungen zwischen einer von außen kommenden Wellenstrahlung und der Erdatmosphäre besser verstanden werden können. Das für beide Aufgabenbereiche grundlegende Untersuchungsverfahren ist die „Spektralanalyse“.

Spektralanalyse

Betrachtet man im einfachsten Fall das Spektrum eines selbstleuchtenden Körpers (zum Beispiel der Sonne), so kann man feststellen, daß es durchaus nicht einfach nur eine durchlaufende („kontinuierliche“) Folge der Regenbogenfarben darstellt. Man findet vielmehr, in das sogenannte „Kontinuum“ eingebettet, zahllose mehr oder weniger schmale dunkle Linien, die man nach dem genialen deutschen Optiker Joseph Fraunhofer (1787–1826) auch als „Fraunhofersche Linien“ bezeichnet und deren Zustandekommen später erläutert wird.

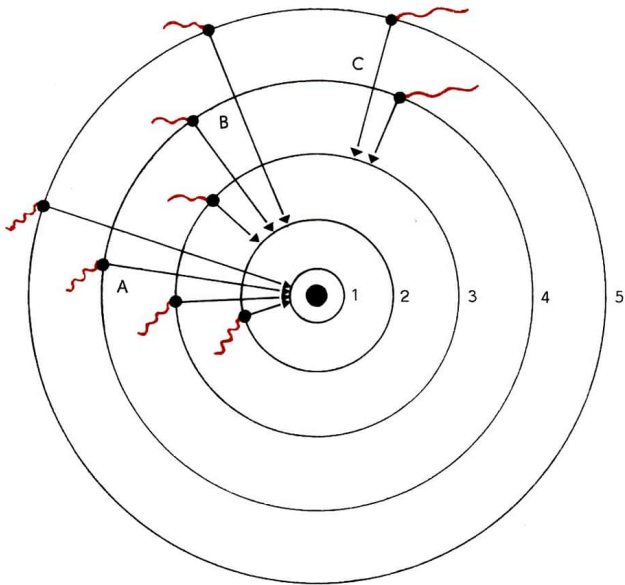
Benutzt man dagegen beispielsweise den leuchtenden Dampf des Elementes Natrium als Lichtquelle, so ist überhaupt kein Kontinuum vorhanden, und an Stelle des bunten Farbbandes sieht man lediglich dort, wo sonst der gelbe Bereich zu finden ist, zwei dicht beieinander liegende schmale gelbe Linien. Ein ähnliches Bild erhalten wir, wenn wir andere Elemente verdampfen und dabei zum Leuchten anregen. Es entstehen dann

jeweils ganz bestimmte helle Einzellinien oder Liniengruppen (Banden) in den verschiedensten Bereichen des Spektrums. So lassen sich beispielsweise beim Eisendampf einige tausend solcher Spektrallinien beobachten. Zur Deutung dieser Erscheinung muß man sich noch einmal daran erinnern, daß das Licht aus dem Inneren der Atome und Moleküle kommt. Nähere Untersuchungen haben gezeigt, daß die Aussendung der Lichtstrahlung auf bestimmte Vorgänge in der Elektronenhülle, von der der Atomkern umgeben ist, zurückgeführt werden muß. Ein Elektron kann nur in verschiedenen, aber für ein bestimmtes Element eindeutig festliegenden Entfernungen um den Atomkern laufen. Man spricht dabei von einzelnen „Energieniveaus“. Darüber hinaus besteht aber für ein Elektron noch die Möglichkeit, sprunghaft von dem einen auf das andere Energieniveau innerhalb der Atomhülle überzuwechseln. Verläßt ein Elektron zum Beispiel sein ursprüngliches Energieniveau und geht auf ein niederes Niveau über, so entsteht ein Lichtblitz (Energiequant im Sinne der Korpuskelvorstellung des Lichtes) von ganz bestimmter Wellenlänge. Summiert man die vielen von den leuchtenden Dampfparten ausgehenden Lichtblitze, zeigen sich im Spektroskop einzelne helle Linien auf dunklem Grunde. Man nennt diese Linien „Emissionslinien“ (Emission = Aussendung von Strahlung).

Berücksichtigt man weiterhin, daß sich alle Elemente in ihren chemischen und sonstigen Eigenschaften ausschließlich durch die Anzahl der Elektronen in ihren Atomhüllen und durch deren spezielle Struktur unterscheiden, so sieht man leicht ein, daß die vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten bei den Elektronensprüngen auch zu mannigfaltigen und jeweils charakteristischen Linienkombinationen für jedes einzelne Element führen müssen. Aus den Linien in einem Linienspektrum kann man also umgekehrt auf die unter Umständen unbekannte Zusammensetzung einer Lichtquelle Rückschlüsse ziehen. Damit wird auch

der Begriff „Spektralanalyse“ verständlich. Ihre Einführung in die wissenschaftliche Untersuchungsmethodik verdankt die Spektralanalyse vornehmlich dem deutschen Physiker Gustav Robert Kirchhoff (1824–1887) und dem mit ihm befreundeten Chemiker Robert Bunsen (1811

bis 1899). Heute zählt die enorm verfeinerte Technik der spektralanalytischen Verfahren zur Grundlage zahlreicher Forschungs- und Prüfmethoden in Wissenschaft, Technik und Wirtschaft. Es geschah bisher immer aus gutem Grund, daß speziell von dampf- oder gasförmigen Lichtquellen



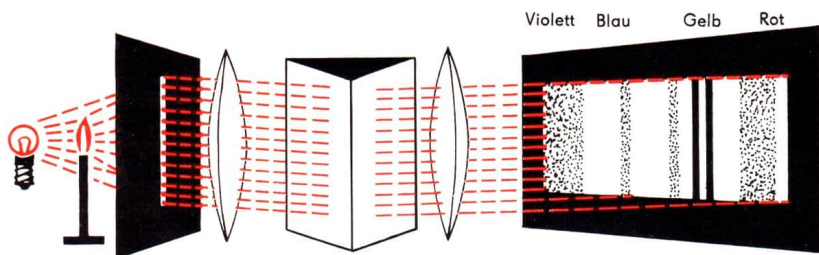
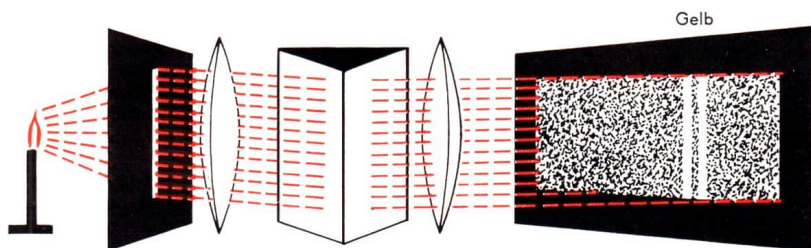
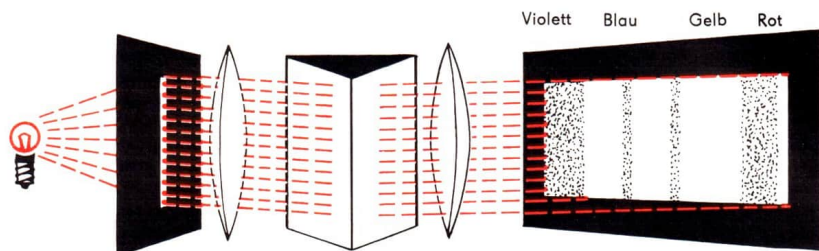
die Rede war. Betrachtet man nämlich das Spektrum eines festen glühenden Körpers (zum Beispiel des Leuchtfadens einer Glühbirne) oder eines quasifesten (flüssigen oder gasförmigen und unter hohem Druck stehenden), so sieht man lediglich das vollständige Farbband (Kontinuum) ohne jegliche Einzelheiten. Die chemische Zusammensetzung der Lichtquelle läßt sich dann also nicht ermitteln. Dafür kann man jedoch eine andere, für die Untersuchung kosmischer Körper nicht weniger wichtige Information aus dem Kontinuum ableiten. Es zeigt sich nämlich, daß die Intensität der Strahlung nicht gleichmäßig über den Gesamtbereich des Spektrums verteilt ist. Es gibt vielmehr ein deutliches Intensitätsmaximum innerhalb des Farbbandes. Aus der Lage dieses Intensitätsmaximums läßt sich die Temperatur der festen oder quasifesten Lichtquelle ermitteln. Je höher deren Temperatur ist, desto weiter verschiebt sich das Intensitätsmaximum zum violetten Ende des Spektrums. Dieser Zusammenhang hat allgemeine Gültigkeit, so daß der Bereich größter Strahlungsintensität sogar außerhalb des sichtbaren Teiles des elektromagnetischen Schwingungsspektrums liegen kann. So gibt es bestimmte Fixsterntypen, deren Temperatur so ungewöhnlich hoch ist, daß ihr Intensitätsmaximum weit in den Bereich des Ultraviolett hineinrückt.

Welche Schlußfolgerungen kann man nun aber ziehen, wenn man, wie beim Spektrum der Sonne, ein vollständiges Kontinuum beobachtet, in dem dunkle Linien zu sehen sind? Aus unseren bisherigen Betrachtungen läßt sich darauf eine Antwort finden. Würde man nämlich die Lage der Fraunhoferschen Linien im Sonnenspektrum relativ zum Kontinuum oder, was das gleiche wäre, ihre Wellenlänge bestimmen, so käme man zu einer wichtigen Feststellung: Jede dieser Linien stimmt, unter gewissen zusätzlichen Voraussetzungen, mit der Position einer Linie aus dem Emissionsspektrum eines auf der Erde vorkommenden Elementes überein. Der Rest der Erklä-

rung ist einfach. Immer dann, wenn das Licht eines heißen festen oder quasifesten Kontinuumsstrahlers durch eine kühlere Gasschicht hindurchtritt, erscheinen in dem Kontinuum genau an den Stellen dunkle Linien, an denen im Emissionsspektrum dieser Gasschicht allein helle Linien zu finden wären. Das liegt daran, daß die Atome der kühleren Gasschicht aus dem Wellenlängengemisch des intensiveren Kontinuumsstrahlers gerade die Wellenlängen verschlucken (absorbieren), die sie selbst mit geringerer Intensität aussenden. Man spricht daher in diesem Fall von „Absorptionslinien“ und „Absorptionsspektrum“.

Diese Erklärung ergibt also nicht nur die bedeutungsvolle Erkenntnis, daß auch außerhalb unserer Erde die gleichen Elementarbausteine der stofflichen Materie anzutreffen sind wie auf unserem Heimatplaneten selbst, sondern läßt uns auch schon einen ersten Blick in die Struktur eines außerirdischen Körpers tun. Die Oberfläche der Sonne (Photosphäre) ist zwar gasförmig, strahlt aber wie ein quasifester Kontinuumsstrahler, der von einer ebenfalls heißen, jedoch im Verhältnis zu den tiefer liegenden Gebieten kühleren Gashülle umgeben ist. Mit einer solchen „Durchleuchtung“ kann man sogar die chemische Zusammensetzung eines gasförmigen Körpers ermitteln, der nicht einmal selbst zu leuchten braucht. Das heißt, auch kalte Gase ergeben beim Durchtritt von Licht ein Absorptionsspektrum.

Und damit wären wir wieder bei unserer Erdatmosphäre angelangt. Auch unsere irdische Lufthülle ist ja ein Gemisch aus nichts selbstleuchtenden oder stark übertrieben ausgedrückt: „kalten“ Gasen. Demnach müßte man also auch ein atmosphärisches Absorptionsspektrum beobachten können. Das ist auch der Fall. Man braucht als durchleuchtende Strahlungsquelle nur wieder die Sonne zu nehmen. Im Sonnenspektrum zeigen sich nämlich neben den Linien, deren Ursprung eindeutig auf der Sonne selbst zu suchen ist, verschiedene Linien und Liniengruppen (Banden),



die von der Erdatmosphäre herrühren. Bei der Entstehung dieser „atmosphärischen Linien“ wirken vor allem außer dem Sauerstoff das Kohlendioxid und der Wasserdampf als absorbierende Bestandteile entscheidend mit.

Außer diesen „selektiven“ Absorptionseigenschaften der Erdatmosphäre, die uns auch im weiteren noch stark beschäftigen werden, gibt es aber auch eine Schwächung der Sonnenstrahlung, die sich über das gesamte Spektrum erstreckt. Sie ist abhängig von der Weglänge, die das Licht in der Erdatmosphäre zurücklegen muß, und wirkt sich auf die kürzeren Wellenlängen beträchtlicher aus. Dieser allgemeine Schwächungseffekt ist also die Ursache, daß die Sonne am Horizont weniger hell erscheint und zugleich in der Färbung bevorzugt gelbe und rote Tönungen zeigt. Staubauftrübungen und Dunsteinlagerungen verstärken diesen Vorgang. Übrigens läßt sich damit auch erklären, daß man selbst in einer klaren Nacht in Horizontnähe weitaus weniger Sterne beobachten kann als in der Gegend des Zenits. Die wahren Helligkeiten der Sterne, hier als Helligkeitseindrücke außerhalb der Atmosphäre verstanden, werden durch die Schwächung des Lichtes in der Lufthülle („Extinktion“) verfälscht. Die Wissenschaftler stehen bei exakten Helligkeits- und Strahlungsmessungen vor der Aufgabe, den jeweiligen Extinktionseffekt berücksichtigen zu müssen. Diese Aufgabe ist außerordentlich schwierig, wie es gerade moderne hochempfindliche Meßmethoden gezeigt haben; denn auch bei geringerem Zenitabstand findet man örtliche und zeitliche Extinktionsschwankungen.

Atmosphärische Strahlungsfenster

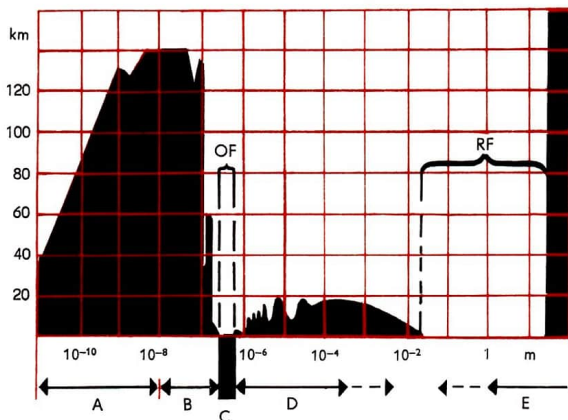
Keihen wir aber noch einmal zu den Absorptionseffekten in der Erdatmosphäre zurück, die sich ganz speziell in bestimmten Wellenlängenbereichen auswirken! Abgesehen von einigen schmalen Spektralbereichen, die wir schon als „atmosphä-

rische Linien“ im Bereich des sichtbaren Lichtes kennengelernt haben, findet man im übrigen Verlauf des elektromagnetischen Schwingungsspektrums noch mehrere enger begrenzte Spektralbereiche (zum Beispiel Infrarot, Ursache: Wasserdampf), in denen verstärkte Absorption auftritt, und dann auch ausgedehnte Wellenlängengebiete, in denen sich die Atmosphäre für die von außen eindringende Strahlung praktisch als völlig undurchlässig erweist. So wird Strahlung, deren Wellenlänge kleiner ist als etwa 300 nm, nicht mehr zur Erdoberfläche hindurchgelassen. Damit entfällt natürlich auch für die Wissenschaftler die Möglichkeit, die speziellen Strahlungseigenschaften von kosmischen Körpern, soweit sie Strahlung im nahen und extremen Ultraviolett- bzw. Röntgenbereich aussenden, zu analysieren. Das gleiche gilt auch für das Absorptionsgebiet, das im Infrarot bei etwa 1000 nm beginnt und sich bis zu Wellenlängen um einige Millimeter erstreckt. Für den anschließenden Bereich bis zu Wellenlängen um etwa 15 m ist die Atmosphäre dann wieder strahlungsdurchlässig. Zu noch größeren Wellenlängen hin baut sie sich erneut als vollkommenes Strahlungshindernis zwischen außerirdischen Strahlungsquellen und der Erdoberfläche auf. Diese Tatsachen haben dazu geführt, daß man allgemein von „Strahlungsfenstern“ der Erdatmosphäre spricht. Neben dem „optischen“ Fenster von 300 bis 800 nm bleibt der Wissenschaft, außer einigen schmalen Fenstern im Infrarotbereich, praktisch nur noch das sogenannte „Radiofenster“ im Millimeter-, Zentimeter- und Meterwellenbereich als einziger weiterer „Durchblick“ durch die Erdatmosphäre zur Untersuchung außerirdischer Objekte und Erscheinungen.

Für den ständig an die Erdoberfläche gefesselten Beobachter kann also die abschirmende Wirkung der Atmosphäre die Möglichkeit zur Information über die Beschaffenheit unserer kosmischen Umwelt empfindlich einschränken, nämlich dann, wenn sich im extraterrestrischen (außerirdischen)

Eindringtiefe der
elektromagnetischen
Wellenstrahlung
in die Erdatmosphäre
in Abhängigkeit
von der Wellenlänge.

- A Röntgenstrahlung;
B Ultraviolettstrahlung;
C sichtbares Licht;
D Infrarotstrahlung;
E Radiowellen;
OF Optisches Fenster;
RF Radiofenster

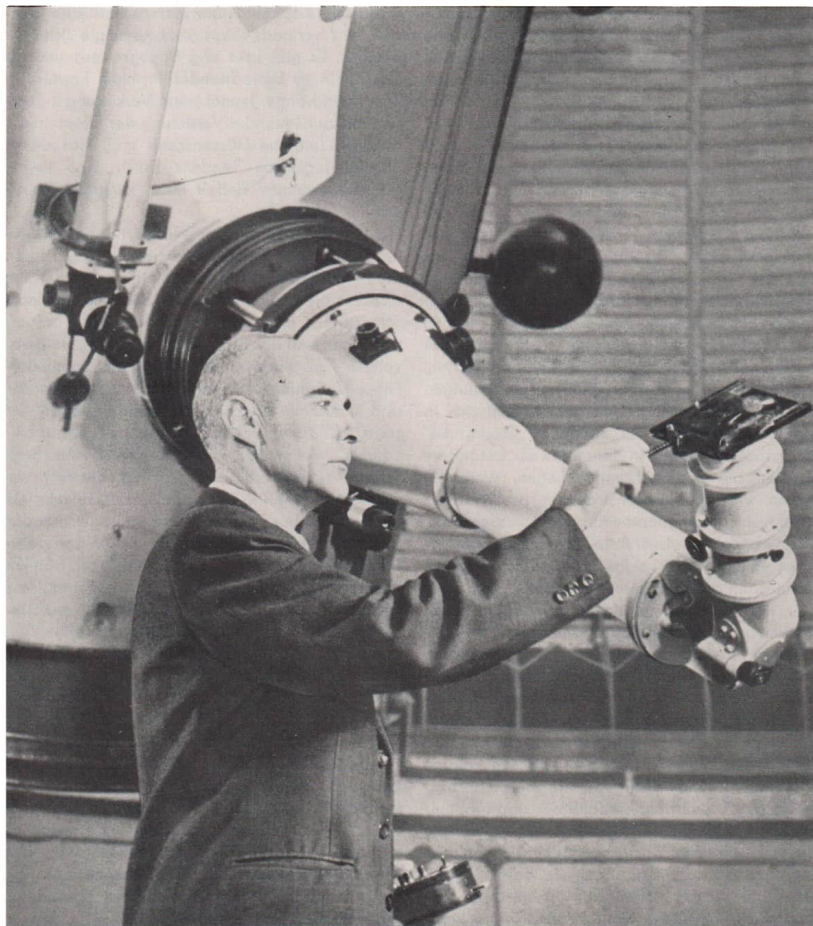


Raum bestimmte physikalische Erscheinungen ergeben bzw. Vorgänge abspielen, die sich nur durch jene Strahlung entschlüsseln ließen, die eben von der Erdatmosphäre absorbiert wird. Zwei Beispiele sollen hier für viele kurz erwähnt werden. Das eine betrifft die physikalischen Vorgänge auf der Sonne, die tief in das komplizierte Geschehen atomarer Prozesse blicken lassen und von denen der Lebensrhythmus unseres gewaltigen Zentralgestirns bestimmt wird. Wie wir noch sehen werden, entstehen als äußere Begleiterscheinung dabei zeitweilig sehr intensive Strahlungsausbrüche gerade in den Wellenlängengebieten, die außerhalb der Strahlungsfenster liegen, so daß sich diese aufschlußreichen Erscheinungen nur sehr schwer erforschen lassen. Außer der radiofrequenten Strahlung steigt dann vor allem der Anteil an kurzwelliger Ultraviolettstrahlung an. Allerdings dürfen wir der Erdatmosphäre für diesen Filtereffekt in anderer Hinsicht mehr als dankbar sein;

denn die verschluckte kurzwellige Ultraviolettstrahlung würde bei ungehindertem Durchtritt innerhalb kürzester Zeit das höher entwickelte organische Leben auf der Erdoberfläche vernichten. Einen kleinen Vorgeschmack davon vermag uns ein zünftiger „Sonnenbrand“ zu liefern, den wir ebenfalls der Einwirkung solarer Ultraviolettstrahlung verdanken. Die Verbrennung bleibt hierbei jedoch relativ milde, da die auslösende Ultraviolettstrahlung noch zum sogenannten „harmlosen“ Bereich gehört, der sich unmittelbar an das noch sichtbare Violett anschließt.

Das zweite der oben erwähnten Beispiele umschließt alle Untersuchungen, die sich mit der Zusammensetzung der Atmosphären anderer Planeten des Sonnensystems beschäftigen. Verständlicherweise gilt dabei das Interesse der Astronomen besonders der Suche nach Planetenatmosphären, die in ihrer Zusammensetzung der irdischen ähnlich sind. Da aber beispielsweise die

**Sternspektrographie –
wichtiges Hilfsmittel der Astrophysik.
Am Astrophysikalischen Observatorium
auf der Krim beschäftigt sich
der sowjetische Astronom N. Kosyrew
besonders mit spektralanalytischen
Untersuchungen des Mondes
und der Planeten**



Spektrallinien des Sauerstoffes in der Erdatmosphäre im Normalfall genau an der gleichen Stelle des Spektrums liegen wie die Linien des eventuell in einer anderen Planetenatmosphäre vorhandenen Sauerstoffes, würden sie diese so stark überlagern, daß ihr Nachweis praktisch unmöglich wäre. Auf diese Schwierigkeit ist es zurückzuführen, daß man bisher nur unbefriedigende Vorstellungen von den Atmosphären der Planeten Mars und Venus hat.

Abgesehen von den allgemeinen Hinweisen auf Strahlungsabsorption durch die Bestandteile des atmosphärischen Gasgemisches, haben wir uns bisher im Grunde einfach nur mit der Feststellung abgefunden, daß diese Strahlung den Beobachter an der Erdoberfläche nicht erreicht oder nicht in den Weltraum zurückgelassen wird. Es bleibt jedoch noch offen, nach Einzelheiten zu fragen, die sich an andere unserer früheren Feststellungen knüpfen lassen. Wir haben gehört, daß sich in der Erdatmosphäre verschiedene „Stockwerke“ unterscheiden lassen, in denen jeweils besondere physikalische Bedingungen vorliegen. Weiterhin wissen wir, daß Wellenstrahlung praktisch als Strom von Energiequanten aufgefaßt werden kann. Wenn aber ein gewisser Anteil von diesem Energiestrom in der Atmosphäre verschluckt wird, wo bleibt dann die absorbierte Energie?

Hier liegt die Vermutung nahe, daß vielleicht bestimmte Zusammenhänge zwischen den physikalischen Bedingungen in der Hochatmosphäre und der Filterwirkung der Erdatmosphäre bestehen. Dazu wäre allerdings notwendig, entsprechende Untersuchungen in der Hochatmosphäre selbst anzustellen oder aber auf anderen Wegen den Wechselwirkungen zwischen solaren Strahlungen und der Erdatmosphäre nachzugehen. Auf welchen vielfältigen und komplizierten Wegen die Wissenschaft der Aufklärung dieses Problemkreises nachgegangen ist, welchen überraschenden Entdeckungen sie dabei begegnete und welche raffinierten technischen Methoden sie einsetzte, zählt zu den bemerkens-

wertesten Kapiteln naturwissenschaftlicher Forschung. Aber noch etwas anderes zeigte sich sehr deutlich. Es gibt kein eng abgegrenztes und für sich allein zu betrachtendes Problem kosmischer Zusammenhänge. Immer neue Verkettungen werden mit zunehmender Vertiefung der Erkenntnisse deutlich, und die Wissenschaft muß sich dieser absolut logischen Tendenz durch eine immer größer werdende Vielfalt ihrer Methoden anpassen suchen.

Heute hat die stürmische und glänzende Entwicklung der Technik den Wissenschaftlern sogar schon die Möglichkeit erschlossen, mit ihren Meßgeräten direkt in die zu untersuchenden Bereiche der Hochatmosphäre oder des kosmischen Raumes vorzudringen und das Strahlungshindernis „Erdatmosphäre“ gegebenenfalls völlig auszuschließen. Diese Verfahren verbinden somit die klassischen und modernen Wege der Forschung auch rein technisch zum großen Komplex „Weltraumforschung“, wie er sich schon von den wissenschaftlichen Problemverknüpfungen her deutlich abzuzeichnen beginnt. Dennoch wird auch weiterhin ein wesentlicher Teil der Untersuchungsmethoden in dem Bereich verbleiben, der schon seit Jahrhunderten der einzige „Weg ins All“ war, nämlich der Blick von der Erdoberfläche durch das optische Fenster der Erdatmosphäre. Hierin haben es Astronomie und Astrophysik zu bewundernswerter Vollendung gebracht; und da seit einigen Jahrzehnten noch die „Astronomie des Radiofensters“, die Radioastronomie, hinzugekommen ist, kann man wohl mit Recht sagen, daß man sich in diesem Teil der ergebundenen Weltraumforschung mit technischen Möglichkeiten allmählich einem Optimum zu nähern beginnt. Ehe wir uns daher weiter mit spezielleren Problemen und Ergebnissen der Weltraumforschung beschäftigen, müssen wir uns noch einen kurzen Einblick in die wichtigsten Grundlagen astronomischer Forschungsmethoden und der dabei verwendeten Einrichtungen verschaffen.

Rüstzeug der klassischen Weltraumforschung

Die einfachste und in manchen Punkten sogar heute noch immer unübertroffene astronomische Beobachtungseinrichtung ist – das menschliche Auge. Das unbewaffnete Auge, als Strahlungsempfänger für Wellenstrahlung im sichtbaren Bereich des Spektrums, war jahrhundertlang das einzige optische Instrument zur Erforschung kosmischer Erscheinungen. Wenn es auch nicht in allen Punkten mit künstlichen optischen Hilfsmitteln konkurrieren kann, es vermag beispielsweise nicht ein ankommendes Strahlungsgemisch nach seiner spektralen Zusammensetzung auf-

zulösen, so bleibt seine Leistungsfähigkeit als wissenschaftliches Instrument immerhin erstaunlich. Man muß es nur zu handhaben wissen. Schon mit seiner Hilfe allein gelang es schließlich scharfsichtigen Himmelsbeobachtern und den kritischen Interpreten ihrer Beobachtungen, ein erstaunlich vollkommenes Bild vom Aufbau der näheren kosmischen Umwelt der Erde zu entwerfen.

Der Grundriß unseres heutigen kopernikanischen Weltbildes wurde von Männern geschaffen, die noch kein Fernrohr auf den Himmel richten konnten. Ausschließlich in Anlehnung an die vorangegangenen, jahrhundertlangen einfachen Himmelsbeobachtungen mit bloßem Auge kam Nikolaus Kopernikus (1473–1543) dazu, in kühner Gedankenkonstruktion die mythologisch begründeten Weltbilder des Altertums durch das nach ihm benannte, heliozentrische Weltsystem zu ersetzen. Dem deutschen Astronomen Johannes Kepler (1571–1630) gelang schließlich annähernd achtzig Jahre später die Entdeckung der ersten Gesetzmäßigkeiten kosmischer Bewegungsvorgänge (Keplersche Gesetze) allein aus den Messungen, die der dänische Astronom Tycho Brahe (1546–1601) ohne zusätzliche optische Hilfsmittel in jahrelanger mühevoller Beobachtungsarbeit und unter Verwendung relativ einfacher Meßeinrichtungen gewonnen hatte. Mit diesen Leistungen war ein entscheidender Schritt zur Verbesserung und Sicherung des kopernikanischen Weltbildes getan.

An die Seite des Auges, als Empfangselementes für sichtbare Wellenstrahlung, trat dann als entscheidendes Beobachtungshilfsmittel das Fernrohr. Es brachte eine ungeahnte Erweiterung der Fähigkeiten unseres natürlichen Sehorgans mit sich. Zwei Eigenschaften befähigen es dazu: Einmal läßt sich mit Hilfe der lichtsammelnden Optik des Fernrohres (Objektiv) eine größere Lichtmenge in das Auge des Beobachters leiten, als durch die maximal 9 mm große Pupillenöffnung eintreten kann. Ein Fernrohr gestattet es also im all-



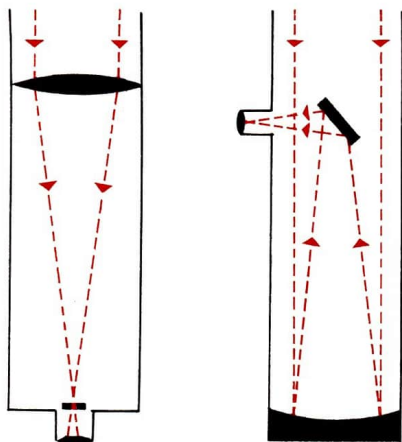
größert und damit aus scheinbar größerer Nähe betrachten konnte. Lippershey verbesserte schließlich dieses Gerät noch zum Gebrauch für beide Augen und lieferte mit diesem ersten Doppelfernrohr praktisch das Vorbild für Operngläser einfacher Konstruktion, wie sie auch heute noch vielfach benutzt werden.

Von dieser aufsehenerregenden Erfindung erfuhr schließlich der italienische Naturforscher Galileo Galilei (1564–1642), der dann selbst sofort ein derartiges Gerät nachbaute und es als erster Mensch auf Himmelsobjekte richtete. Der von Lippershey-Galilei verwendete Fernrohrtyp wird seither allgemein als „Galileisches Fernrohr“ bezeichnet. Damit ehrt man nicht so sehr die Erfinder, denn dann wäre zweifellos die Bezeichnung „holländisches Fernrohr“ sachlich richtiger, als vielmehr die umwälzende Bedeutung seiner Anwendung für naturwissenschaftliche Zwecke. Galilei entdeckte mit seinen Fernrohren innerhalb weniger Jahre die vier großen Monde des Jupiter (Galileische Jupitermonde), die gebirgige Oberflächenstruktur des Mondes und die Lichtphasen der Venus. Mit diesen Entdeckungen vollzog sich endgültig der Durchbruch von einer mythologisch-idealistischen Erklärung kosmischer Erscheinungen zu einer materialistisch-naturwissenschaftlichen Betrachtungsweise. Der Einfluß der Galileischen Lehren, die auf seinen Beobachtungen basierten, war so stark, daß sich der Forscher schließlich vor der reaktionären Inquisition verantworten mußte.

Der Typ des Galileischen Fernrohres, bei dem eine beiderseitig erhabenen geschliffene (bikonvexe) Glaslinse als lichtsammeles Objektiv wirkt und eine auf beiden Seiten hohlgeschliffene (bikonkave) Glaslinse als „Okular“ (Augenlinse) ein aufrechtes Bild des zu betrachtenden Gegenstandes liefert, hat sich allerdings im weiteren Verlauf nicht als astronomisches Beobachtungshilfsmittel halten können. Die Gründe dafür liegen in der allgemein ungünstigen optischen Abbildungsmöglichkeit dieses Fernrohrtyps. Den bis heute

verwendeten Typ des astronomischen Linsen-Fernrohres schuf Johannes Kepler. Er untersuchte als erster systematisch für astronomische Beobachtungserfordernisse die verschiedensten Linsenkombinationen. Schließlich konstruierte er das später nach ihm benannte „Keplersche Fernrohr“. Bei diesem bildet im einfachsten Fall wiederum eine größere bikonvexe Linse das Objektiv, während als Okular gleichfalls eine allerdings kleinere Bikonvexlinse verwendet wird. Diese Linsenkombination hat allerdings den Nachteil, daß das betrachtete Objekt für den Beobachter auf dem Kopf steht. Eine solche Bildumkehrung wirkt sich bei terrestrischen Beobachtungen recht unangenehm aus, aber mit Hilfe zwischengeschalteter Umkehr-linsen oder Umlenkprismen (Prismenfeldstecher) läßt sich der „Schaden“ leicht beheben. Für astronomische Beobachtungen kann man auf derartige Hilfsmittel verzichten, da es im Grunde gleichgültig ist, in welcher Orientierung man das Objekt betrachtet. Um jedoch Mißverständnissen vorzubeugen, gibt man in den Beobachtungsdokumenten (Zeichnungen, Fotografien) meist noch die Richtung zum Himmelsnordpol an.

Ist ein Fernrohr für den Durchblick mit dem Auge eingerichtet (visuelle Beobachtung), so läßt sich die lineare Vergrößerung, unter der man das Objekt im Okular sieht, aus dem Verhältnis der Brennweiten von Objektiv und Okular bestimmen. Je länger also die Objektivbrennweite und je kürzer die Okularbrennweite sind, desto stärker ist die Vergrößerung. Aus diesem Grunde war es ganz natürlich, daß die Hauptinstrumente großer Sternwarten gegen Ende des vorigen Jahrhunderts Linsenfernrohre mit zum Teil beachtlichen Objektivbrennweiten und dementsprechend imposanten Baulängen waren, weil damals noch der Hauptteil der astronomischen Beobachtungsarbeit auf visuellem Gebiet lag. So entstanden Fernrohrriesen mit Objektivdurchmessern um 100 cm und Brennweiten bis zu annähernd 20 m (Yerkes-Sternwarte und Lick-Observatorium, beide USA).



Man könnte nun annehmen, daß es nur darauf ankäme, Fernrohre mit immer längeren Objektivbrennweiten zu bauen, um durch beliebig gesteigerte Vergrößerungen fremden Himmelskörpern auch beliebig nahe auf den Pelz rücken zu können. Das ist ein Irrtum. Die schon früher erwähnte Luftunruhe setzt der optimal möglichen Vergrößerung praktisch schon in den Bereichen eine Grenze, in denen das theoretische Leistungsvermögen des Instrumentes noch längst nicht erreicht ist. Bis in die Gegenwart hinein blieb nur der bereits genannte Ausweg: Man mußte auf hohe Berge oder in klimatisch günstige Gebiete ausweichen und dort noch gegebenenfalls auf besonders ruhige Luft warten, um die Bedingungen bei visuellen Beobachtungen wenigstens einigermaßen mit der Leistungsfähigkeit des Instrumentes in Einklang zu bringen.

Auf alten Stichen aus astronomischen Büchern des 17. und 18. Jahrhunderts sieht man gelegentlich außerordentlich merkwürdige Ungetüme von „Riesenfernrohren“, neben denen sich sogar die langbrennweitigsten Linsenfernrohre der Neuzeit recht bescheiden ausnehmen. Zu diesen ungewöhnlichen Konstruktionen war man damals gezwungen, weil die optischen Unvollkommenheiten der verwendeten einfachen Bikonvexlinsen nur dann einigermaßen ausgeglichen werden konnten, wenn die Brennweite des Objektivs im Verhältnis zu seinem Durchmesser möglichst groß war. Man kann den seinerzeitigen Astronomen, die an diesen bis zu 60 m langen Ungetümen gearbeitet haben, seine Bewunderung nicht versagen. Immerhin gelangten jene trotz der Un-

handlichkeit ihrer Instrumente zu erstaunlichen Beobachtungsergebnissen. Der Hauptfehler der durch einfache Linsen hervorgerufenen Abbildung liegt in der Prismenwirkung des Glaskörpers, die den betrachteten Gegenstand mit einem unscharfen farbigen Saum umgibt (chromatische Aberration). Erst die Erfindung der farbfreien (achromatischen) Linsenkombination durch den Engländer Chester Moor Hall im Jahre 1733, bei der zwei Linsen aus verschiedenen brechenden Gläsern (Kron- bzw. Flintglas) zu mehr oder weniger farbfrei abbildenden Objektiven zusammengestellt werden, änderte das. Auf diesem Wege ergab sich im weiteren der Typ des modernen astronomischen Linsenfernrohres.

Spiegelteleskope an der Spitze

Der große englische Physiker Isaac Newton (1643–1727) kam auf den Gedanken, durch einen hohlgeschliffenen Spiegel das lichtsammlende Objektiv der Linsenfernrohre zu ersetzen, weil er den chromatischen Abbildungsfehler der bis dahin verwendeten einfachen Linsenfernrohre irrtümlich für unvermeidbar hielt. So entstand 1668, sozusagen als „Zwischenlösung“, ein neuer Typ astronomischer Fernrohre, das „Newtonsche Spiegelteleskop“. Die verschiedenen Abarten, die sich aus der ursprünglichen Konstruktion im Laufe der Zeit entwickelten, faßt man auch unter dem gemeinsamen Namen „Reflektor“ zusammen. Man unterscheidet sie damit von den als „Refraktoren“ bezeichneten Linsenfernrohren.

Doch die ursprüngliche Ersatzlösung im astronomischen Instrumentenbau stellte sich schon sehr bald als selbstständiges Verfahren von großer Bedeutung heraus. Es kam zu einem regelrechten Wettbewerb zwischen Refraktor und Reflektor. Zunächst gewannen die Spiegelteleskope einen gewissen Vorsprung, weil es anfangs erhebliche Schwierigkeiten bereitete, die für große achroma-

Strahlengang im Newton-Reflektor (schematisch)

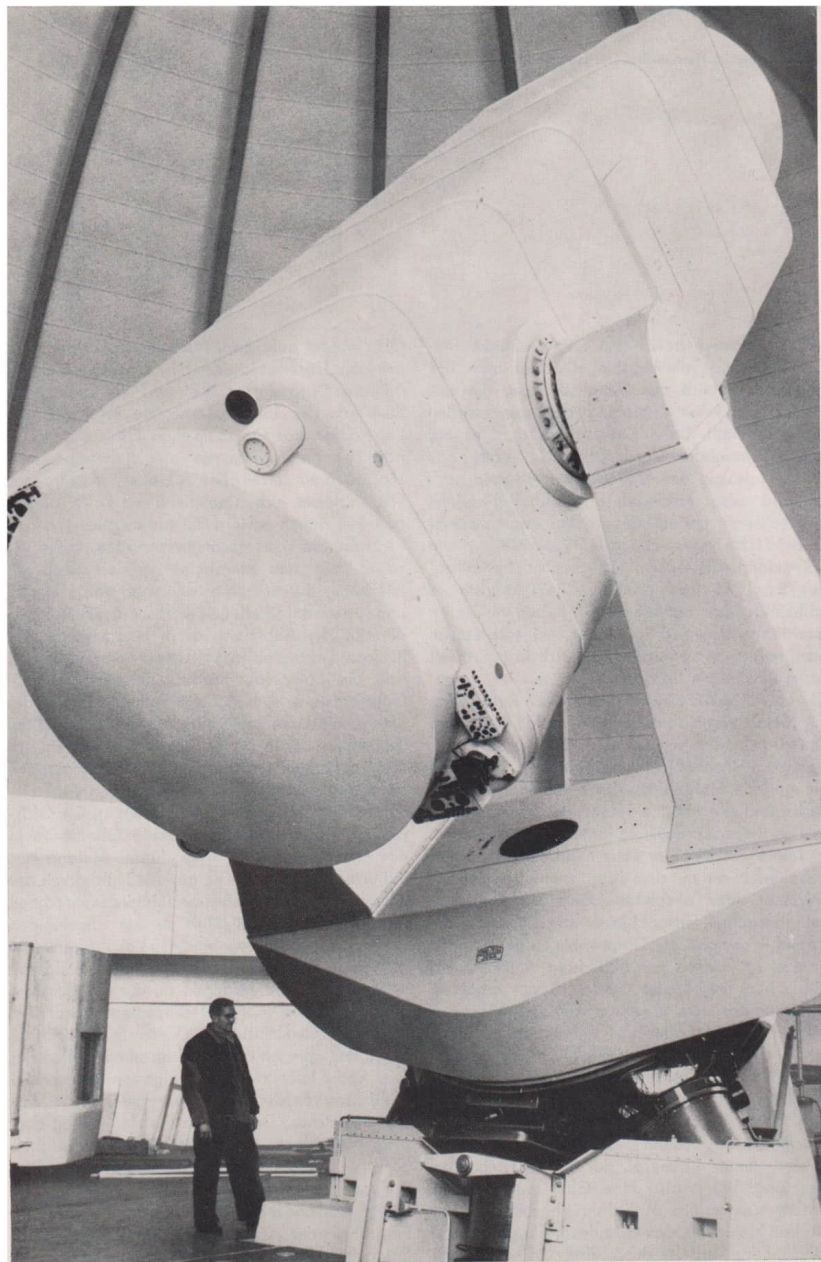
tische Objektive benötigten Flintglasblöcke herzustellen. Die Teleskopspiegel schliﬀ man dagegen anfänglich aus Metallscheiben, die aus einer besonderen Legierung gegossen wurden (Spiegelmetall). Bei ihnen brachte man es auf ganz erstaunliche Durchmesser. So hatte das größte Teleskop des 1757 aus Deutschland nach England ausgewanderten ehemaligen Musikers und späteren bedeutendsten Astronomen seiner Zeit, Wilhelm Herschel (1738–1822), einen Spiegeldurchmesser von 122 cm. Der „Leviathan“ des Earl of Rosse (1800–1867) brachte es schließlich sogar auf 183 cm. Die Arbeit mit diesen Geräten war jedoch mit sehr viel technischen Schwierigkeiten verbunden, die sich in jener Zeit kaum bewältigen ließen.

Die optischen Qualitäten dieser alten Reflektoren mit Metallspiegeln wurden sehr bald wieder von den inzwischen verbesserten und größer gewordenen Linsenobjektiven übertroffen. Vor allem die geringe Haltbarkeit der spiegelnden Oberfläche und die enorme Masse der Metallplatten setzten dieser Entwicklung zunächst eine Grenze. Es folgte die Zeit der extrem großen modernen Refraktoren, die mit dem schon erwähnten Yerkes-Refraktor ihren absoluten Höhepunkt erreichte. Sein gewaltiges Linsenobjektiv von 102 cm Durchmesser liegt nahe der Grenze, bis zu der es noch sinnvoll ist, Linsen zur Abbildung zu benutzen. Wie schon angedeutet wurde, ist der moderne Astronom gar nicht so sehr an der vergrößernden Fähigkeit eines Fernrohres interessiert, sondern er will vor allem mit dem Objektiv stets möglichst viel Licht von den kosmischen Objekten einfangen. Je größer nun ein Linsenobjektiv im Durchmesser wird, desto dicker wird es natürlich auch. Glas ist aber nicht absolut lichtdurchlässig. Es absorbiert immer einen Teil der hindurchtretenden Strahlung. Wenn also eine Glaslinse oder ein Linsensystem zu dick wird, dann kann es den Gewinn an Helligkeit, den man durch die große Objektivöffnung erzielt, durch den Lichtverlust im

Glas wieder aufheben. Aus diesem Grund ist es sinnlos, Linsenobjektive mit einem wesentlich größeren Durchmesser als einem Meter zu bauen.

Etwa um die Jahrhundertwende erreichten die Refraktoren das Optimum ihrer Entwicklung. Danach begannen wieder die Spiegelteleskope, neue Maßstäbe zu setzen. Die Arbeit der Astronomen konzentrierten sich zunehmend auf Untersuchungen, bei denen soviel Licht als möglich von den Fernrohrobjektiven gesammelt werden mußte. So schritt man zum Bau immer größerer Spiegelteleskope, die den Konstruktionen von Herschel und Rosse weit überlegen waren. Da sich in ihnen die optische Abbildung durch eine nahezu verlustlose Lichtreflexion vollzieht – vorausgesetzt, daß die Spiegeloberfläche eine entsprechende Güte aufweist –, hängt die optimale Größe der Spiegelteleskope tatsächlich nur von technischen Problemen ab. In dieser Richtung bewegten sich dann auch die grundlegenden Verbesserungen gegenüber den alten Spiegelteleskopen. An Stelle der hohlgeschliffenen Metallplatten traten Glasplatten, deren hochreflektierende Oberfläche in der ersten Zeit durch eine dünne Auflage aus Silber erzeugt wurde. Die geringe Haltbarkeit der Versilberung, deren Reflexionsfähigkeit sehr schnell nachläßt, führte schließlich zu der allgemeinen Verwendung von Spiegeln, die in Vakuumkammern mit einer dünnen Aluminiumauflage bedampft werden. Die Anforderungen an die Genauigkeit, mit der moderne große Teleskopspiegel geschliffen werden müssen, sind hoch. Die tatsächliche Krümmung der Spiegelfläche darf an allen Stellen der Oberfläche kaum mehr als einige zehntausendstel Millimeter von dem theoretisch geforderten Verlauf abweichen. Deshalb ist die Herstellung derartiger Wunderwerke der Optik mit beträchtlichen Schwierigkeiten und einem erheblichen technischen Aufwand verknüpft.

Die größten und leistungsfähigsten astronomischen Fernrohre der Gegenwart sind ausschließlich Spiegelteleskope. Das zur Zeit größte, im Einsatz



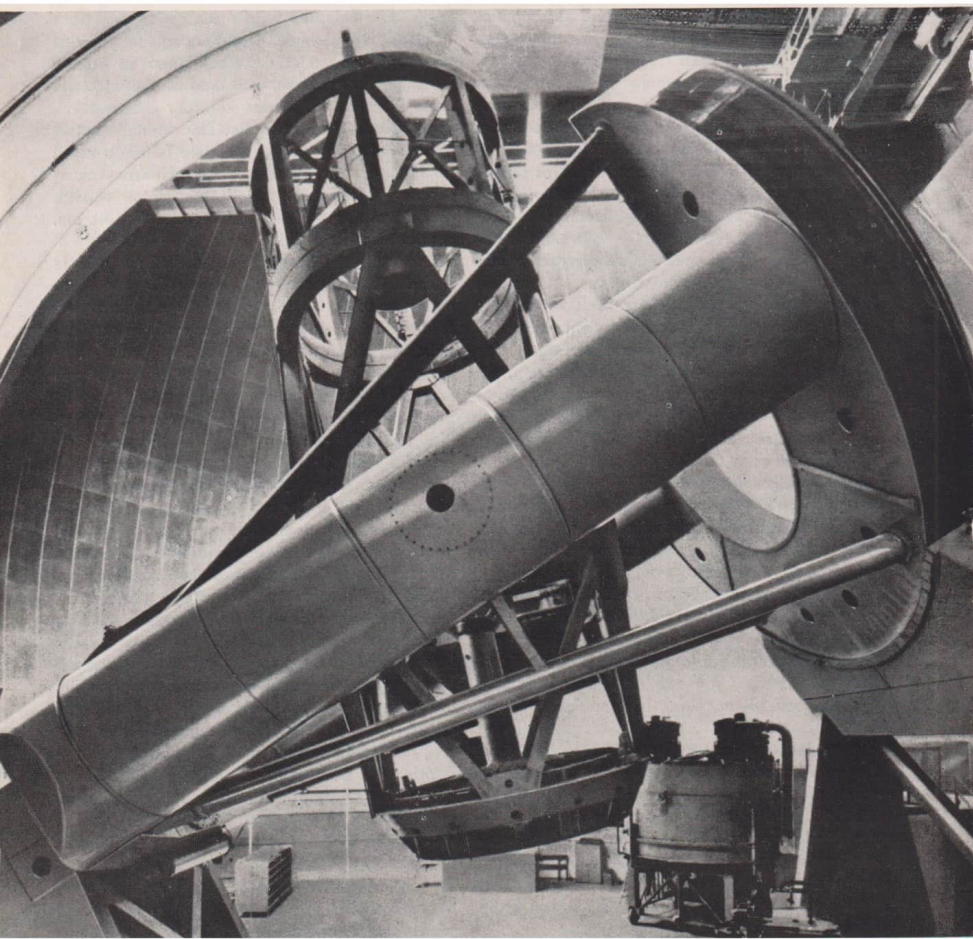
befindliche Instrument ist das Hale-Teleskop des Mount-Palomar-Observatoriums in Kalifornien (USA). Es wurde nach 17jähriger Bauzeit im Jahre 1947 in Betrieb genommen; es hat einen Spiegel von 9000 kg Masse mit einem Durchmesser von 510 cm. In der Sowjetunion befindet sich ein Instrument im Bau, dessen Spiegel einen Durchmesser von 600 cm haben wird. Das größte Spiegelteleskop beider deutscher Staaten wurde 1960 in dem neu erbauten Karl-Schwarzschild-Observatorium in Tautenburg bei Jena in Betrieb genommen. Es hat einen Spiegeldurchmesser von 200 cm und stellt auf Grund einer universellen Zusatzausrüstung ein auf der Welt einmaliges astronomisches Forschungsinstrument dar. Es wurde – ebenso wie unter anderem auch das leistungsfähigste Teleskop Westdeutschlands, ein Spezialspiegelteleskop der Hamburger Sternwarte (Spiegeldurchmesser 120 cm) – im VEB Carl Zeiss Jena entwickelt, der als Hersteller hochwertiger wissenschaftlicher Geräte überall in der Welt großes Ansehen genießt.

Aus dem von Newton vorgegebenen Grundschema des Spiegelteleskops haben sich im Laufe der Zeit noch zahlreiche Varianten herausgebildet. Wir wollen die wesentlichsten kurz betrachten, weil ihnen in der astronomischen Beobachtungspraxis meist größere Bedeutung zukommt als dem reinen Newton-Prinzip. Wie wir uns erinnern, hängt der Abbildungsmaßstab (Vergrößerung) eines Fernrohrs in erster Linie von der Brennweite des Objektivs ab. Beim reinen Newton-Spiegel liegt die Brennweite des meist parabolisch geschliffenen Hauptspiegels auch als Fernrohrbrennweite fest. Ein im Fernrohr befindlicher ebener Hilfsspiegel reflektiert das vom Hauptspiegel kommende Lichtbündel seitlich aus dem Rohr heraus, wo es in das Okular vor dem Auge des Beobachters oder in eine Meßapparatur gelangt. Dieser Fangspiegel verringert zwar etwas die Intensität (Helligkeit) des einfallenden Lichtes, bewirkt jedoch keine wesentliche Abbildungsverschlechterung.

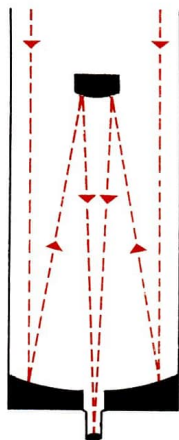
Beim Hale-Teleskop ergab sich sogar eine ganz originelle Möglichkeit. Der Fangspiegel für das Newton-Prinzip müßte hierbei einen so großen Durchmesser erhalten, daß man an seiner Stelle auch eine Kabine in das Fernrohr fahren kann, in der der Astronom mit allen Einrichtungen untergebracht ist. Man kann im Hale-Teleskop somit unmittelbar im sogenannten „Newton-Fokus“ (Fokus = Brennpunkt) beobachten. Eine wirklich großartige Geschichte: Der Astronom nicht **am**, sondern **im** Fernrohr!

Wenn man mit einem Spiegelteleskop größere Brennweiten erreichen will, wie sie für eine Reihe astronomischer Untersuchungen durchaus erforderlich sind, so kann man das nach einem Zeitgenossen Newtons benannte „Cassegrain“-Prinzip anwenden. Dazu muß allerdings ein Hauptspiegel vorhanden sein, der in der Mitte durchbohrt ist. Der Fangspiegel wird ihm frontal gegenübergestellt, und durch dessen konvex-hyperbolische Oberfläche verlängert man dann die Brennweite. Die Brennweite des Hauptspiegels ist somit nicht mehr mit der Gesamtbrennweite des Systems identisch. Dadurch ergeben sich bei geringerer Baulänge des Fernrohrs sehr große Brennweiten für den „Cassegrain-Fokus“.

Ähnlich ist es beim sogenannten „Coudé-System“, mit dessen Hilfe sich – unter Verwendung weiterer Hilfsspiegel – noch größere Brennweiten erzielen lassen. Bei ihm kann man den Strahlengang zusätzlich noch so leiten, daß das Brennpunktbild immer an der gleichen Stelle aus dem Aufstellungssystem des Fernrohrs austritt, unabhängig davon, auf welche Stelle des Himmels das Fernrohr gerichtet ist. Dieses Verfahren hat vor allem dann große Vorteile, wenn besonders aufwendige oder empfindliche Meßeinrichtungen benutzt werden sollen. Die modernen Riesenteleskope sind fast ausnahmslos für alle drei Systeme eingerichtet. So hat beispielsweise das Hale-Teleskop neben der Brennweite im primären Newton-Fokus von 16,8 m im Cassegrain-Fokus eine Brennweite von



**Strahlengang
im Cassegrain-Reflektor (schematisch)**



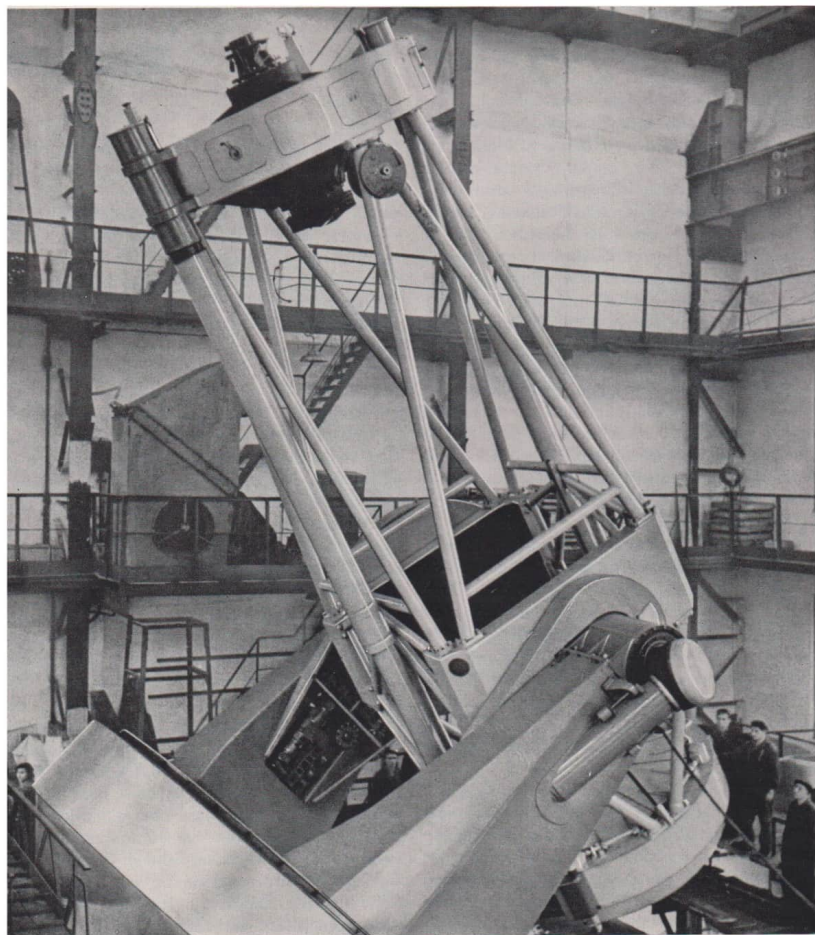
83 m und im Coudé-Fokus sogar von 152 m. Man muß sich diese Zahlen vergegenwärtigen und dabei berücksichtigen, daß die optische Abbildung im Brennpunkt des jeweiligen Systems ein Optimum an Genauigkeit erreichen soll! Dann kann man sich leicht vorstellen, welche ungewöhnlichen Anforderungen an Halterung, Montierung und Aufstellung sehr großer Geräte gestellt werden. Der beste Teleskopspiegel wäre völlig wertlos, wenn die Einrichtungen zu seiner Handhabung nicht den extremen Anforderungen an fast vollkommene Unveränderlichkeit des Strahlenganges bei jeder Lage des Fernrohres entsprechen. Die Leistung der Techniker bei der Aufstellung eines Teleskops ist darum nicht weniger hoch zu bewerten als die der Schöpfer der optischen Teile. Die Sorgen beginnen bei der Lagerung des Spiegels im Rohr, die keine Veränderung der spiegelnden Oberfläche zulassen darf, und reichen bis zur Forderung nach einer möglichst leichten Beweglichkeit eines technischen Riesen von einigen Dutzend Tonnen Masse, wobei die Präzision in diesen Bewegungen eben nur als „astronomisch“ bezeichnet werden kann.

Für bestimmte astronomische Aufgaben können jedoch die Spiegelteleskope normaler Bauart nicht mit reinen Linsefernröhren konkurrieren, zum Beispiel, wenn die Lichtempfangseinrichtung nicht das Auge ist, sondern eine fotografische Platte, die das Fokalbild festhalten soll, und wenn die Abbildung eines möglichst großen Himmelsfeldes mit größter Exaktheit gefordert wird. Auf diesem Gebiet waren daher noch bis vor wenigen Jahrzehnten die „Astrokameras“ mit Linseobjektiven allein gebräuchlich.

Erst die geniale Erfindung des deutschen Optikers Bernhard Schmidt (1879–1935) wies neue Wege. Etwa um 1930 gelang ihm die Konstruktion eines optischen Systems, das heute in Form der „Schmidt-Spiegel“ der astronomischen Forschung ungeahnte Fortschritte gebracht hat. Ein solcher Schmidt-Spiegel besteht aus einem kugelförmig

(sphärisch) geschliffenen Hauptspiegel, vor den in doppelter Entfernung der Brennweite eine verhältnismäßig dünne, durchsichtige Korrekionsplatte gesetzt wird. Diese Korrekionsplatte hat eine sehr kompliziert geschliffene Oberfläche. Sie beseitigt die Abbildungsfehler des Kugelspiegels so weit, daß selbst über eine Himmelsfläche von mehreren Grad die Sterne hervorragend punktförmig abgebildet werden. Der Spiegel allein würde dagegen nur ein Feld von einigen Bogenminuten scharf zeichnen.

Die Schmidt-Spiegel zählen heute zu den unentbehrlichsten Hilfsmitteln des Astronomen. So ist beispielsweise das große Tautenburgerteleskop unter anderem auch als Schmidt-System zu verwenden. Der Hauptspiegel von 2 m Durchmesser und 4 m Brennweite wird dazu durch eine Korrekionsplatte von 134 cm Durchmesser zum leistungsfähigsten Schmidt-Spiegel der Erde. Das ebenfalls schon erwähnte Hamburger Instrument ist ein reiner Schmidt-Spiegel. Ein anderes Gerät dieser Art befindet sich im Mount-Palomar-Observatorium und hat bei 183 cm Spiegeldurchmesser eine Korrekionsplatte von 122 cm. Die Kassette mit der Fotoschicht (Platte oder Film) liegt beim Schmidt-Spiegel ebenso im Fernrohr wie der Fangspiegel beim normalen Reflektor. Das Bildfeld ist außerdem nicht eben, sondern gewölbt. Man muß also entweder den Träger der Fotoschicht entsprechend biegen oder aber vor der Kassette eine Ebnungslinse oder einen konvexen Hilfsspiegel einführen. Im letztgenannten Fall spricht man vom „Baker-Schmidt-System“. Eine ähnliche Konstruktion, wie sie von Schmidt eingeführt wurde, stellen die etwa um 1940 erfundenen Meniskus-Teleskope dar. Bei ihnen tritt an



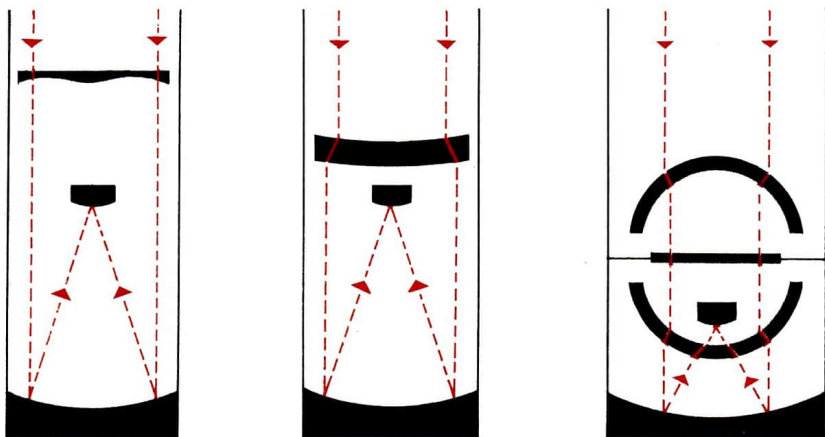
Strahlengang im Schmidt-System (links),
im Maksutow-System (Mitte)
und im Super-Schmidt-System (rechts),
schematisch dargestellt

die Stelle der Schmidtschen Korrekzi-
onsplatte eine dicke, zum Spiegel konzentrische Meniskuslinse
(allerdings näher an die Bildfläche des Spiegels
herangerückt). Heute bezeichnet man sie meist
nach dem sowjetischen Optiker Dmitri Mak-
sutow (geb. 1896) als „Maksutow-Spiegel“. Das
Optimum aller Möglichkeiten wurde schließlich in
einer Kombination Kugelspiegel, Meniskuslinsen
und Korrekzi-
onsplatte gefunden. Hier spricht man
allgemein von „Super-Schmidt-Systemen“. Es gibt
Super-Schmidt-Kameras, die ein Öffnungsver-
hältnis von 1 : 0,67 haben und bei 31 cm Öffnung
ein Himmelsfeld von 52° scharf abbilden. Aller-
dings ist dann der Abbildungsmaßstab sehr klein.

Uhren und Zeitmessung

Es gibt astronomische Forschungsaufgaben, näm-
lich in der Astrometrie, bei denen nicht das Fern-
rohr allein als Arbeitsgerät fungiert. Fragt man

einen der auf diesem speziellen Gebiet tätigen
Astronomen nach seinem wichtigsten Hilfsmittel,
dann wird man eine vielleicht unerwartete Antwort
erhalten. Hat man Glück, so darf man sogar den
Gegenstand der Antwort aus der Nähe betrachten:
Es ist eine Uhr oder meist gleich eine Batterie von
Spezialuhren. Sie sind in einem besonderen
Uhrenraum untergebracht und werden von den
Wissenschaftlern mit äußerster Sorgfalt betreut.
Die Bedeutung von Zeitmeßgeräten für die astro-
nomische Forschung läßt sich leicht einsehen.
Jede Beobachtung oder Messung eines Vorganges
im Weltall ist erst dann wissenschaftlich voll-
ständig und damit verwertbar, wenn dazu auch
der genaue Zeitpunkt der Beobachtung mitgeteilt
wird. Nicht bei jeder physikalischen Messung oder
Registrierung wird eine bis auf die tausendstel
Sekunde genaue Zeitangabe verlangt. Doch bei
den astrometrischen Positionsbestimmungen am
Himmel kann man auf einen solchen Genauig-
keitsgrad in der Zeitmessung nicht verzichten.



Seit etwa dreihundert Jahren verwendet man als Zeitmeßgeräte hauptsächlich Pendeluhrn. Die erste Uhr dieser Art wurde 1656 vom Niederländer Christian Huygens (1629–1695) gebaut. Sie entwickelte sich im Laufe der Zeit zu einem wahren Wunderwerk der Präzisionsmechanik und ließ schließlich Zeitbestimmungen mit einer Genauigkeit von etwa 0,01 s zu! Um Ungenauigkeiten im Gang am wirksamsten zu begegnen, muß man in erster Linie Erschütterungen der Aufhängung und Temperatureinflüsse ausschalten. Man bringt darum die astronomischen Pendeluhrn meist in geschützten Kellerräumen unter, in denen eine weitgehend gleichförmige Temperatur herrscht. Bei höheren Anforderungen kommt die Uhr zusätzlich in ein hermetisch abgeschlossenes und stark luftleer gepumptes Gehäuse (Riefler-Uhr). Die Ganggenauigkeit der astronomischen Uhren wird durch Vergleiche mit der Erdrotation kontrolliert. Dabei setzt man in erster Näherung voraus, daß die Erde mit völlig konstanter Geschwindigkeit rotiert. Die Erdrotation beobachtet man mit besonderen Fernrohren (Meridiankreise, Durchgangsinstrumente), in denen ein Okular-Fadensystem feste Marken liefert, die ein bestimmter Stern im Zeitmaß der Erdrotation immer wieder passiert. Die auf diese Weise ermittelte Zeit nennt man „Sternzeit“, im Gegensatz zu der nach dem Sonnenlauf festgelegten „mittleren Sonnenzeit“, die als Basis für Zeitangaben im Alltag dient. Den 86 400. Teil einer vollen Erdrotation bezeichnet man als „Sekunde“ oder genauer: „Sternzeitsekunde“. So ist die eigentliche „Hauptuhr“ der Astronomen die Erde mit ihrer als gleichförmig angenommenen Rotation.

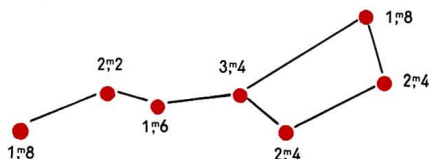
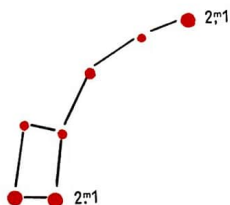
Inzwischen hat man aber Uhren geschaffen, die so genau gehen, daß man mit ihnen sogar geringfügige Schwankungen in der Rotationszeit der Erde nachweisen kann. Diese Schwankungen liegen in der Größenordnung einiger tausendstel Sekunden. Sie waren daher mit Pendeluhrn nicht zu messen. Die neuartigen „Uhren“ sind kompli-

zierte Anlagen, in denen die periodischen Schwingungsvorgänge von Quarzen, Molekülen oder Atomen als Zeitmeßeinheiten ausgenutzt werden. Die Schwingungen laufen unter sorgfältig eingehaltenen Betriebsbedingungen mit außerordentlicher Konstanz ab. Sie gestatten es, die Genauigkeit einer Zeitbestimmung bis auf etwa $1 \mu\text{s}$ ($0,000001 \text{ s}$) zu treiben! Die ersten Quarzuhrn wurden 1933/34 von den deutschen Physikern Scheibe und Adelsberger gebaut. Heute nimmt man astronomische Zeitmessungen meist nur mit derartigen Uhren vor. Die von internationalen Standardanlagen über Funk ausgestrahlten „Zeitsignale“ erlauben auch jenen Beobachtungsstationen einen Zeiteinschluß, die selbst über keine eigenen speziellen Hauptuhren verfügen oder aber diese kontrollieren wollen.

In der Astronomie gibt es außer bei der Zeitbestimmung und den damit eng verbundenen Positionsmessungen noch zahlreiche andere Aufgaben, bei denen die Meßtechnik heute einen ständig breiter werdenden Raum einnimmt. Eigentlich gibt es nur noch ganz wenige Arbeiten, bei denen das Auge des Astronomen am Fernrohr allein die Beobachtungsdaten liefert. Dies geschieht zum Beispiel bei der Erkundung der Oberflächendetails von Planeten. Meist tritt eine mehr oder weniger komplizierte physikalische Meßeinrichtung an die Stelle des Beobachterauges. Heute liegen die Aufgaben des Astronomen nicht mehr im Beobachten der Himmelskörper im Sinne von „Anschauen“, sondern vielmehr im Messen. Böse Zungen behaupten sogar, daß es Astronomen geben soll, die noch niemals durch ein Fernrohr geblickt haben, weil ihnen ständig Meßgeräte den Weg zum Okularstutzen des Instrumentes verbaut hätten. Aber das ist bloße Ironie.

Die Anwendung einer ständig verfeinerten physikalischen Meßtechnik ergab sich für die Astronomie ebenso zwangsläufig wie für jedes andere moderne naturwissenschaftliche oder technische Arbeitsgebiet. Die Erforschung der Himmelskörper



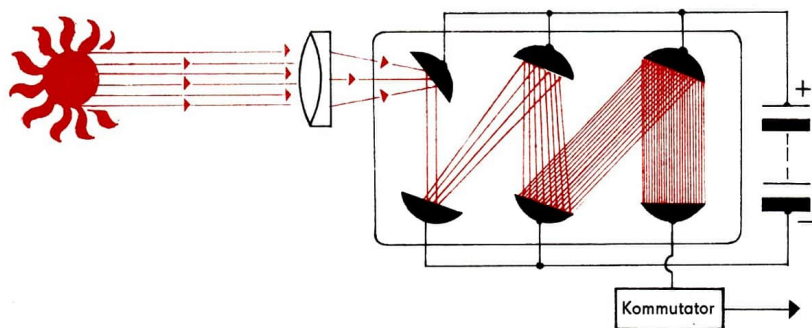


war bis vor kurzem ausschließlich an die von der elektromagnetischen Wellenstrahlung übertragenen Informationen gebunden. Deren „Geheimsprache“ kann aber nur allein durch physikalische Messungen enträtselt werden. Das menschliche Auge hat dafür als meßtechnisches Empfangs- und Registrierelement nur sehr mangelhafte Fähigkeiten. Nehmen wir als Beispiel die für astronomische Untersuchungen außerordentlich wichtige Bestimmung von Strahlungsintensitäten (Helligkeiten), sowohl im unzerlegten als auch im zerlegten Licht.

Sternhelligkeiten und Himmelsfotografie

Ein Blick zum Nachthimmel lehrt, daß die Sterne sehr unterschiedliche Helligkeiten haben. Die Astronomen legten deshalb schon vor vielen Jahrhunderten eine Skala fest. Sie sprechen von „Größenklassen“ der Sternhelligkeiten, ohne damit allerdings eine Aussage über die tatsächlichen räumlichen Dimensionen der Sterne machen zu wollen. Der Begriff „Größenklasse“ ist historisch bedingt, und man hat ihn, trotz seiner physi-

kalischen Unkorrektheit, bis heute beibehalten. Mit dem geschichtlichen Ursprung hängt übrigens auch der widersprüchliche Verlauf der Größenklassenzahlen, wogegen den lichtschwächsten Objekten die höchsten Zahlenwerte zugeordnet werden. Als diese Skala im Altertum für Helligkeitsvergleiche sozusagen nach „Augenmaß“ geschaffen wurde, legte man pauschal die hellsten Sterne des Himmels als Sterne „1. Größe“ fest. Die schwächsten, mit bloßem Auge gerade noch sichtbaren Himmelskörper bezeichnete man als Sterne „6. Größe“. Den dadurch grob vorgegebenen Stufenwert der Relativskala hat man bis in die heutige Meßtechnik hinein bewahrt, mußte ihn jedoch meßtechnisch präzisieren. Danach ist ein Stern 1. Größe 2,5mal so hell wie ein Stern 2. Größe, und dieser wiederum 2,5mal so hell wie ein Stern 3. Größe usw. In dieser physikalisch korrekten Skala mußte man für die hellsten Sterne noch über die 1. Größe hinaus Helligkeitsklassen schaffen. Während der Polarstern als Stern 2. Größe gilt, der rötlichgelb leuchtende Aldebaran im Stier etwa die 1. Größenklasse vertritt,



Schema eines Sekundärelektronen-
Vervielfachers (SEV)

hat man dem hellen Stern Wega in der Leier die „0. Größe“ zugeordnet. Der hellste Fixstern des Himmels, Sirius im Großen Hund, erhält schließlich sogar die Größenklasse -1^m , 43. Aus dem zuletzt genannten Beispiel ist zu ersehen, daß die heutige Skala auch dezimale Unterteilungen erlaubt. Diese sind für feinere physikalische Untersuchungen sogar unbedingt notwendig.

Greifen wir ein Beispiel heraus: Eine besondere Arbeitsrichtung in der Astronomie untersucht die Helligkeitsänderungen bestimmter Sterntypen (Veränderliche Sterne). Die Analyse derartiger Intensitätsschwankungen vermag bei den sogenannten „Bedeckungsveränderlichen“ sogar Anhaltspunkte über die wahren räumlichen Dimensionen dieser Sterne zu liefern. Sie vermittelt damit dem Astronomen einen entscheidenden, sonst wegen der großen Entfernungen nicht möglichen Einblick in die Beschaffenheit kosmischer Objekte. Bei diesen Untersuchungen kommt es oft darauf an, die jeweiligen Helligkeitswerte bis auf etwa $0^m,001$ genau zu bestimmen. Ein geübter Beobachter kann mit besonders ausgearbeiteten Schätzmethode, also ohne wirklich objektiv zu messen, in visueller Beobachtung Sternhelligkeiten auf etwa $0^m,1$ genau angeben. Geht man aber zur objektiven Helligkeitsmessung mit Photometern über, so kann man eine Genauigkeit von $0^m,01$ bis $0^m,001$ erreichen. Als Meßelemente der besonders empfindlichen lichtelektrischen Photometer dienen Photozellen, deren Konstruktion mit dem „Sekundärelektronen-Vervielfacher“ ihren derzeitigen Höchststand erreicht hat. Photozellen werden aber nicht nur bei Untersuchungen im integralen (unzerlegten) Licht verwendet, sondern vor allem auch als Empfangselemente für Intensitätsregistrierungen im spektral zerlegten Licht.

In jüngster Zeit gewinnen weiterhin die elektronenoptischen Hilfsmittel in der astronomischen Beobachtungs- und Meßtechnik an Bedeutung. Es handelt sich dabei um Verfahren, wie sie ähnlich auch in der Fernstechnik gebräuchlich sind. Die

Verstärker- und Speichereigenschaften hochentwickelter elektronenoptischer Bildröhren eröffnen dem Astronomen ein völlig neues Arbeitsfeld. Unter anderem kann man bei der Aufzeichnung von einzelnen Himmelsobjekten oder ganzer Felder mit sogenannten „Bildwandlern“ Effekte erzielen, die die Leistungsfähigkeit der Fernrohre in ungeahntem Maß steigern und vielfach die klassischen Verfahren der Himmelsfotografie weit in den Schatten stellen. Mit einigen besonderen Kunstgriffen gelingt es sogar, die bei der Bildaufzeichnung störende Luftunruhe weitgehend zu unterdrücken. Dieses neue Verfahren wird in Zukunft sicherlich in der astronomischen Beobachtungstechnik einen zunehmenden Rang einnehmen.

Zur Zeit ist das bewährteste und universellste Hilfsmittel des astronomischen Beobachters aber immer noch die Fotografie, wenn sich auch für bestimmte Untersuchungen wegen der wachsenden Genauigkeitsforderung immer mehr die lichtelektrischen Methoden durchsetzen. Mit der Fotografie hat die astronomische Forschung überhaupt erst ihre größten Fortschritte erzielt. Zahllos sind die Bilddokumente, die auch dem Fachunkundigen die Schönheit und Vielgestaltigkeit der Strukturen gas-, staub- und sternförmiger Materie im Weltall erschließen. Die Möglichkeit, mit einer Aufnahme den Zustand der Beobachtungsobjekte oder ihre Anordnung zueinander für alle Zeiten dokumentarisch festzuhalten, zeichnet die Himmelsfotografie vor allen anderen Methoden der Beobachtung aus. Noch nach vielen Jahren oder Jahrzehnten läßt sich zum Beispiel aus einer Himmelsaufnahme mit äußerster Genauigkeit die Position eines winzigen Sternpünktchens ableiten, dessen Bedeutung als Spur eines besonderen Planetoiden erst viel später auf Umwegen erkannt wurde. Nicht anders ist es mit Spektralaufnahmen, deren Vergleich bei hinreichend zeitlichem Abstand der einzelnen Aufnahmen vielleicht wichtige physikalische Einblicke in den Strahlungsmechanismus einer fernen Sonne vermittelt.

Außerdem hat die besondere Fähigkeit der fotografischen Schichten, nämlich schwächste Lichteindrücke über längere Einwirkzeit zu summieren und somit noch solche Objekte sichtbar zu machen, die man mit dem Auge am Fernrohr niemals sehen könnte, die optische Eindringtiefe in das Weltall gegenüber der visuellen Beobachtung ganz beträchtlich erweitert. Die schwächsten mit fotografischen Hilfsmitteln noch erfaßbaren Himmelsobjekte gehören etwa zur 23. Größenklasse und sind rund drei Größenklassen lichtschwächer als die in den gleichen Instrumenten mit dem Auge sichtbaren Objekte. Die für derartig weitreichende Aufnahmen notwendigen Belichtungszeiten dauern allerdings einige Stunden. Bei Spektralaufnahmen besonders lichtschwacher Spiralnebel kam man sogar auf Belichtungen bis zu hundert Stunden. Dabei mußte man jeweils am Ende einer Nacht die Belichtung unterbrechen, um sie dann zu Beginn der nächsten Nacht fortzusetzen. In solchen Fällen werden die Anforderungen an die Standfestigkeit der Apparaturen besonders groß. Das Fernrohr muß seinen Standort unveränderlich beibehalten, während es bei der Belichtung der scheinbaren Bewegung des Objektes über den Himmel (Ursache: Erdrotation) folgt. Aber auch für diese Aufgaben beginnt sich auf Grund lichtelektrischer und elektronenoptischer Verfahren ein neuer und wesentlich vorteilhafter Weg der Untersuchungen abzuzeichnen.

Etwas über Radioteleskope

Die systematische Erforschung der Möglichkeiten, die das Radiofenster als „Ausblick“ ins Weltall bietet, begann erst nach dem zweiten Weltkrieg. Zu dieser Zeit war die allgemeine Entwicklung funkt technischer Arbeitsmethoden und Hilfsmittel so weit gediehen, daß günstige Voraussetzungen auch für den neuen Anwendungsbereich bestanden. Allerdings entdeckte man schon wesent-

lich früher, im Jahre 1932, daß aus dem extraterrestrischen Raum auch radiofrequente Strahlung zur Erdoberfläche gelangt. Bei der Untersuchung von Störungen der Funkwellenausbreitung fand der amerikanische Wissenschaftler Karl Jansky eine Radiostrahlung, die offensichtlich von der Milchstraße ausging. Man maß dieser Entdeckung zunächst wenig Bedeutung bei. Erst als 1942 bei den Versuchen mit militärischen Funkmeßverfahren festgestellt wurde, daß auch die Sonne eine Quelle radiofrequenter Strahlung ist, begann man sich mehr für diese Erscheinungen zu interessieren. Seither hat sich die Radioastronomie zu einem außerordentlich bedeutenden Hilfsmittel der Weltraumforschung herausgebildet.

Unter dem Begriff „Radioastronomie“ faßt man meist zwei Arbeitsrichtungen zusammen, die von recht unterschiedlichen Voraussetzungen ausgehen. Die eine verfolgt den mit der Entdeckung von Jansky begonnenen Weg, die radiofrequente Strahlung zu empfangen, die von kosmischen Strahlungsquellen ausgesandt wird; hierfür wäre also der Begriff „Radioastronomie“ in strengerem Sinne angebracht. Die andere Arbeitsrichtung erweitert die von der See- und Luftverkehrstechnik her bekannten Verfahren der Radio-Echo-Methode (Funkmeßverfahren, Radar) auf die Untersuchung außerirdischer Objekte. Die Radiostrahlung wird dabei auf der Erde erzeugt und als gerichtetes Bündel auf das zu untersuchende Objekt abgestrahlt. Nur der von diesem Objekt (Mond, Planet) reflektierte Anteil kann dann auf der Erde wieder aufgefangen und gemessen werden. Für diese Verfahren ist die Bezeichnung „Radar-Astronomie“ angebracht. Der größte Vorteil der funkt technischen Beobachtungsverfahren besteht darin, daß sie auch am Tage anwendbar sind. Das Instrumentarium des Radioastronomen ähnelt äußerlich kaum noch dem seines Kollegen aus dem optischen Bereich. Seine „Fernrohre“ sind nach dem bewährten Schema – Antenne, Emp-



fänger, Anzeigesystem – aufgebaute funkttechnische Anlagen. Lediglich bei den sogenannten „Radiospiegeln“ besteht eine gewisse Ähnlichkeit mit den Spiegelteleskopen der klassischen Astronomie. So wie ein Spiegelteleskop die ankommende Lichtstrahlung auf einen Punkt konzentriert, wirkt auch der Parabolreflektor des Radioteleskopes als Strahlungssammler. Im Brennpunkt des Reflektors befindet sich die eigentliche Antenne des Emp-

fangssystems. Die im Empfänger einlaufenden hochfrequenten Schwingungen werden dort umgewandelt und verstärkt. Das Ausgangssignal gelangt schließlich auf eine Registrier- und Schreibanlage. Die Empfänger verarbeiten für die Signalregistrierung nur sehr schmale Frequenzbänder aus der ankommenden Strahlung. Demzufolge muß nicht nur ihre Verstärkung extrem konstant sein, sondern sie verlangen auch eine

außerordentliche Empfindlichkeit. Größte Schwierigkeiten bereitete anfangs vielfach das sogenannte „Eigenrauschen“ der Empfänger, ein Problem, das neuerdings jedoch durch die Einführung heliumgekühlter Molekularverstärker (MASER) erfolgreich gelöst werden konnte.

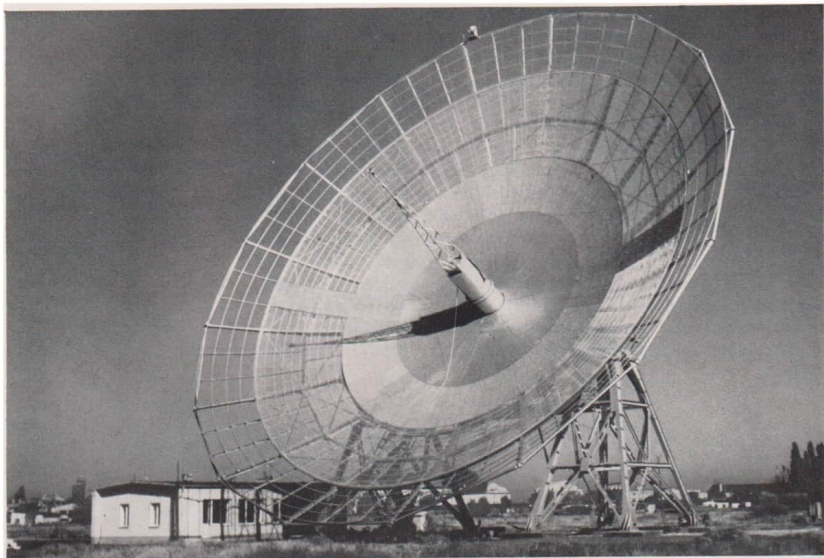
Sowohl in der optischen Astronomie als auch in der Radioastronomie kann man sich nicht allein mit der Feststellung begnügen, daß irgendwoher aus dem kosmischen Raum Strahlung zur Erde gelangt. Man muß die genaue Position einer Strahlungsquelle bestimmen können. In der Funktechnik macht man sich zu diesem Zweck die Beziehung zunutze, die zwischen der Abmessung einer Antennenanlage und der Wellenlänge der ankommenden Strahlung besteht. Bei einer Antenne mit Parabolreflektor ist es also ebenso wie in der Optik. Je größer der Durchmesser der strahlungssammelnden Anlage (Optik, Reflektor) im Verhältnis zur Wellenlänge ist, desto größer ist auch die „Abbildungstrennschärfe“ des Systems. Die extrem kurzen Lichtwellen ermöglichen schon bei geringsten Fernrohröffnungen eine scharfe und annähernd punktförmige Abbildung. Dagegen fordern die wesentlich längeren radiofrequenten Wellen aus dem Kosmos Reflektordurchmesser von gewaltigem Ausmaß und liefern selbst dann nur recht „verschwommene“ Abbilder der anvisierten kosmischen Strahlungsquellen. Der bisher größte bewegliche Radiospiegel der Erde hat einen Durchmesser von 76 m (Jodrell Bank, England). Würde man an diesem Instrument mit Wellenlängen von etwa einem Meter arbeiten, so würde die von ihm gelieferte „punktförmige“ Abbildung am Himmel immer noch eine Fläche von rund 1° Durchmesser erfassen. Der Radiospiegel im Heinrich-Hertz-Institut der Deutschen Akademie der Wissenschaften in Berlin-Adlershof hat einen Reflektordurchmesser von 36 m.

Das Ringen der Radioastronomie um ein besseres „Auflösungsvermögen“ ihrer Instrumente ist daher allzu verständlich. Nicht nur die Untersuchung der

von Sonne, Mond und Planeten ausgehenden radiofrequenten Strahlung macht dies erforderlich. Auch die Lokalisierung von Radioquellen im Raum außerhalb des Sonnensystems ist für die Erforschung des Weltalls von größtem Interesse. Außer einer aus allen Gebieten des Himmels ziemlich gleichmäßig einfallenden Radiofrequenzstrahlung – von der Intensitätssteigerung im Bereich der Milchstraße sei dabei abgesehen – hat man nämlich schon zahlreiche Strahlungsquellen gefunden, die örtlich enger begrenzt sind und die man daher früher vielfach fälschlich als „Radiosterne“ bezeichnete. Ihre Identifikation mit eventuell auch optisch erfaßbaren Objekten ist für die Forschung außerordentlich wichtig.

Der Bau von großen Radiospiegeln ist aber sehr kostspielig. Die Reflektoren bestehen zwar meist nur aus einfachen Gitterkonstruktionen, die bei kleineren Geräten mit dünnem Blech oder bei größeren (wegen des unter Umständen zu erwartenden großen Winddruckes) mit einem engmaschigen Drahtnetz ausgelegt sind. Aber die technischen Hauptprobleme entstehen auch hier dadurch, daß sie sicher aufgestellt und leicht beweglich sein müssen. Diese Schwierigkeit ist im Prinzip nicht geringer als bei großen optischen Geräten. Eine zweite große Gruppe von Radioteleskopen behilft sich daher mit Antennensystemen, die aus vielen nebeneinander angeordneten und zusammengeschalteten Dipolantennen verschiedenster Konstruktion bestehen. Hinter ihnen befindet sich eine reflektierende ebene Maschendrahtwand. Derartige „Dipolwände“ werden meist fest auf der Erdoberfläche installiert. Mit ihnen lassen sich ganz beträchtlich große Empfangsflächen erzielen, wenn man auch auf Beweglichkeit verzichten muß.

Das Auflösungsvermögen verbesserte sich entscheidend, als man auch bei Radioteleskopen das gleiche Interferenzprinzip anwendete wie in der Optik. Dieses Prinzip besagt, daß sich die Schwingungen einer Strahlungsquelle bei unter-



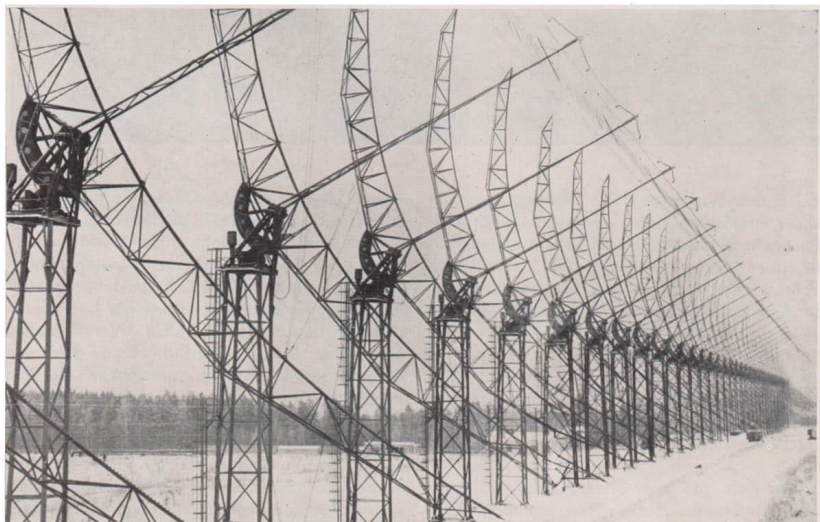
schiedlicher Weglänge durch Überlagerung entweder auslöschen oder verstärken. Durch eine geeignete Schaltung von zwei weiter auseinanderliegenden Antennensystemen (es können auch mehrere sein) auf einen Empfänger, kann man die Überlagerung (Interferenz) der Strahlungswellenzüge, die in die einzelnen Antennen mit einer Wegdifferenz einfallen, ausnutzen, um eine scharfe Richtwirkung in der Verbindungslinie der Antennen zu erhalten. Das Auflösungsvermögen dieser Radiointerferometer hängt vom Verhältnis der Wellenlänge zum Antennenabstand ab. Errichtet man auch hier wieder die Gesamtanlage fest auf der Erdoberfläche, so kann man Interferometerbalken von mehreren Kilo-

metern Länge aufbauen. Durch eine größere Anzahl von Einzelantennen läßt sich außerdem die Empfindlichkeit der Anlage entsprechend steigern. Da ein auf der Erdoberfläche befindlicher Interferometerbalken unbeweglich ist, muß der Ort kosmischer Radioquellen nach einer besonderen Methode bestimmt werden: Ein Antennenbalken liegt genau in Ost-West-Richtung. Er zeigt wie ein optisches Durchgangsinstrument mit der ihm möglichen Schärfe den Zeitpunkt des Durchganges der Radioquelle durch den Meridian des Beobachtungsortes an. Damit hat man von den zur Ortsbestimmung benötigten astronomischen Koordinaten zunächst die „Rektaszension“ (entspricht der geographischen Länge im Erdgrad-

netz). Zur Bestimmung der „Deklination“ (analog zur geographischen Breite) im Himmelsgradnetz baut man noch einen zweiten Interferometerbalken auf, der genau senkrecht zum ersten verläuft (Mills-Kreuz). Das ideale radioastronomische Instrument ist eine schwenkbare Interferometerkreuzanordnung, die von großen Parabolreflektoren gebildet wird und mit Molekularverstärkern arbeitet. Mit diesen Hilfsmitteln liefert die Radioastronomie in zunehmendem Maße wertvolle Beiträge für die Bereicherung unseres Wissens vom Aufbau des Weltalls.

Den in diesem Kapitel begonnenen groben Überblick über einige Methoden und Hilfsmittel der erdgebundenen Weltraumforschung wollen wir damit abschließen. Mit weiteren Einzelheiten werden

wir uns noch von Fall zu Fall vertraut machen. So vorbereitet, können wir aber jetzt den Fragen nachspüren, die sich mit den Wechselwirkungen zwischen Strahlung aus dem außerirdischen Raum und den geophysikalischen Erscheinungen befassen. Wie wir wissen, spielt dabei die Sonne die maßgeblichste Rolle. Ohne die wichtigsten Erscheinungen auf der Sonne zu verstehen, kann man auch keinen befriedigenden Einblick in eine Reihe geophysikalischer Vorgänge erhalten, die am Komplex „Wetter“ beteiligt sind. Setzen wir also unsere Exkursion durch die Weltraumforschung zunächst mit einigen Erkenntnissen über die Sonne fort, zu denen die Wissenschaft noch mit ihren gewöhnlichen erdgebundenen Forschungsmethoden gelangte!



Unser „Stern“ - die Sonne

Die Sonne setzt dem Versuch, sich über ihre Oberflächenbeschaffenheit durch die direkte Anschauung zu informieren, zunächst ein wirksames und charakteristisches Hindernis entgegen: ihre große Helligkeit. Die intensive Leuchtkraft der Sonne läßt selbst die „strahlende“ Festbeleuchtung großstädtischer Einrichtungen, falls sie bei Tage eingeschaltet wird, zu einer armselig trüben Illumination verblasen. Durch diese Strahlenfülle der Sonne erlitten in den ersten Jahren nach der Erfindung des Fernrohrs nicht wenige Forscher schwere Augenschäden. Sie versuchten mit noch unvollkommenen Methoden, der Sonne ihre Geheimnisse zu entreißen. Es muß daher immer wieder mit allem Nachdruck davor gewarnt werden, mit unbewaffnetem Auge oder gar durch ein Fernrohr die Sonne zu betrachten, wenn nicht hinreichende Maßnahmen getroffen sind, die die Sonnenstrahlung schwächen. Im einfachsten Fall schützt schon hinreichend eine berußte Glasscheibe oder ein Stück geschwärzten Films die Augen. Betrachtet man mit diesem Hilfsmittel die Sonne, so kann man feststellen, daß ihre scheinbare Größe etwa der eines Tennisballs im Abstand von 7,5 m entspricht. Sie ist damit scheinbar gleichgroß wie der Mond. Im Winkelmaß ausgedrückt beträgt der scheinbare Sonnendurchmesser etwa $0,5^\circ$. Selbstverständlich sagt der Winkeldurchmesser noch nichts über die wahren Dimensionen eines Himmelskörpers aus. Erst bei bekannter Entfernung läßt sich der metrische Durchmesser errechnen. Damit wird offenbar, daß der exakten Bestimmungsbestimmung in der Astronomie allergrößte Bedeutung zukommt. Das grundlegende Verfahren dazu ist der Landvermessung (Geodäsie) entlehnt. Es verwendet die Berechnungsmethoden der Trigonometrie und wurde schon im Altertum dazu benutzt, um die Entfernungen von Mond und Sonne zu bestimmen. Trotz der noch recht rohen Verfahrensweise kam man dabei wenigstens für den Mond schon zu einem recht brauchbaren Annäherungswert.

Kosmische „Elle“ und Sonnensteckbrief

Will man die Sonnenentfernung ermitteln, muß man den Winkel bestimmen, unter dem ein Beobachter auf der Sonne den Erddurchmesser bei mittlerer Entfernung Sonne – Erde sehen würde. Dieser Winkel wird als „Sonnenparallaxe“ bezeichnet. Seiner möglichst exakten Bestimmung haben ganze Generationen von Astronomen Jahre sorgfältigster Arbeit gewidmet. Wie bedeutungsvoll diese Bemühungen sind, kann man daran ermesen, daß die ermittelte durchschnittliche Entfernung Erde – Sonne sozusagen die Rolle einer kosmischen „Elle“ spielt. Sie liefert als „Astronomische Einheit“ (AE) den Schlüssel zur Berechnung aller Entfernungen im Sonnensystem. Als Wert für die Sonnenparallaxe gilt heute allgemein der Winkel von 8,8 Bogensekunden; die Astronomische Einheit ist mit 149,6 Millionen km festgelegt. Der wahre Durchmesser der Sonne läßt sich daraus zu 1,39 Millionen km berechnen. Damit erweist sich die Sonne als wahrhaft gigantischer Himmelskörper. Der Vergleich mit dem Durchmesser der Erde (am Äquator: 12 756 km) zeigt, daß erst rund 109 aneinandergereihte Erdkugeln den Sonnendurchmesser ergeben würden. Dieses Verhältnis sollte man sich immer vor Augen halten, wenn man Abbildungen von Oberflächeneinheiten der Sonne betrachtet. Zu noch phantastischeren Zahlen kommt man allerdings, wenn man die Rauminhalte von Erde und Sonne vergleicht. In einem Hohlkörper von Sonnengröße könnte man rund 1,3 Millionen Erdkugeln unterbringen! Aus der Masse der Sonne ließen sich jedoch nur etwa 333 000 Kugeln mit der Masse der Erde aufbauen, da die Sonnenmaterie im Mittel wesentlich weniger dicht gepackt ist als das Material, aus dem die Erde besteht. Während die Erde eine mittlere Dichte von $5,52 \text{ g/cm}^3$ aufweist, hat die Sonne eine mittlere Dichte von $1,41 \text{ g/cm}^3$. Aus der ungeheuren Größe der Sonne und ihrer gewaltigen Masse wird ihre beherrschende Stellung

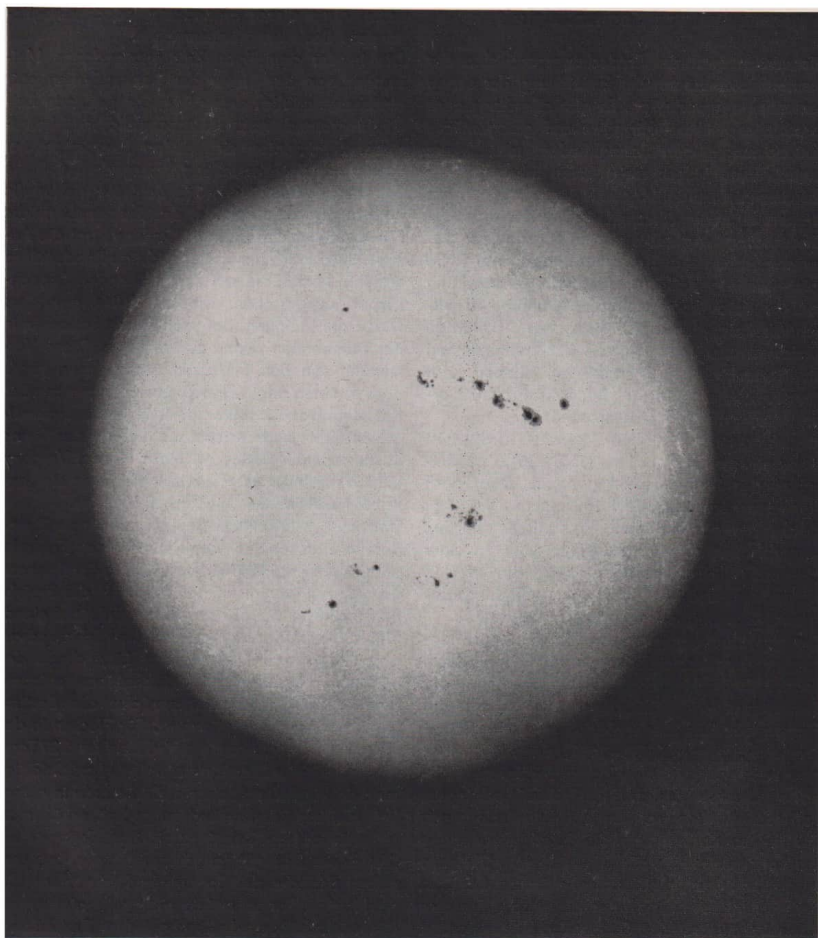
lung im Planetensystem hinreichend verständlich. Immerhin übertrifft ihre Masse die aller Planeten zusammen noch um das etwa 750fache. Die von der Sonnenmasse ausgehende riesige Anziehungskraft bestimmt noch weit über die Bahn des äußersten Planeten Pluto (mittlere Entfernung von der Sonne: 39,5 AE) hinaus das Bewegungsspiel der zum Sonnensystem gehörenden Körper. Eine Vorstellung von der Anziehungskraft der Sonne läßt sich auch aus dem Vergleich der Geschwindigkeitszunahme (Beschleunigung) herleiten, die ein frei fallender Körper einerseits in unmittelbarer Nähe der Erdoberfläche und andererseits – theoretisch natürlich – unmittelbar über der Sonnenoberfläche erfährt. Für die Erde ergibt sich dabei eine Fallbeschleunigung von $9,81 \text{ m/s}^2$, für die Sonne dagegen von rund 274 m/s^2 . Gäbe es eine feste Sonnenoberfläche, deren niedere Temperatur ein solches Experiment zuließe, so würden auf der Sonne landende irdische Raumfahrer dort unter einem Gewichtsandruck stehen, der etwa 28mal größer wäre als an der Erdoberfläche. Die unvorstellbare Last des Eigengewichts (2100 kp statt vielleicht 75 kp) würde für sie jede Lebensmöglichkeit ausschließen.

Nimmt man bei der Sonnenbeobachtung ein Fernrohr zu Hilfe, in dem Blenden, Filter oder ähnliche Einrichtungen für die notwendige Lichtminderung sorgen, so erscheint die Sonne als kreisrunde und scharfbegrenzte helle Scheibe, die zum Rand hin merklich dunkler wird. Diese „Randverdunklung“ sorgt für einen gewissen plastischen Effekt, der die Sonne im Fernrohr als Kugel wirken läßt. Die Ursache dieser Erscheinung führt uns schon mitten in den Sonnenaufbau hinein.

Wie Strahlungsmessungen zeigen, ist die Sonne ein Körper, in dessen oberflächennahen Schichten eine mittlere Temperatur von 5785°K herrscht. Die äußere Schicht, aus der der Hauptanteil der optisch beobachtbaren Strahlung kommt („Photosphäre“ swv. Lichthülle), verhält sich trotz des intensiven Leuchtens wie eine durchsichtige Schicht,

das heißt, das Licht aus tieferen Regionen wird abhängig von der Weglänge absorbiert. In der Mitte der Sonnenscheibe dringt somit der Blick am weitesten in tiefere und damit auch heißere und hellere Schichten vor. Mit zunehmender Annäherung an den Sonnenrand verläuft der Blick immer flacher durch die Photosphäre und erreicht bei gleicher Eindringtiefe nur noch weniger intensiv leuchtende Gebiete. Aus genauen Messungen des Verlaufes der Randverdunklung läßt sich auch die Dicke der Photosphäre ableiten. Sie beträgt nur einige hundert Kilometer und ist im Vergleich zu dem gewaltigen Sonnenkörper nicht mehr als eine ganz dünne Haut. Übrigens ist es auf diese geringe Dicke der Photosphäre zurückzuführen, daß man den Sonnenrand so bemerkenswert scharf begrenzt sieht und nicht mit einem diffusen (verschimmenden) Übergang, wie man es bei einer Gaskugel erwarten könnte.

Die Photosphäre kann man sich somit optisch als Oberfläche der Sonne erklären. Sie bildet aber gleichzeitig auch das unterste Stockwerk der Sonnen-„Atmosphäre“. Ehe wir jedoch den Problemen der Sonnenstruktur weiter nachgehen, wollen wir erst noch das Bild der im Fernrohr sichtbaren Sonnenoberfläche vervollständigen. Abgesehen von relativ seltenen Ausnahmen wird man bei jeder Beobachtung der Sonne als erstes markante dunkle Flecken finden, die in die hellstrahlende Oberfläche eingebettet sind. Diese „Sonnenflecken“ treten einzeln und in Gruppen auf. Ihre Größe reicht von der winzigen dunklen „Pore“ in der Sonnenoberfläche bis zu den Gebieten mit vielfachem Erddurchmesser. Es sind schon Sonnenfleckengruppen aufgetreten, deren Ausdehnung ein Zehntel des Sonnendurchmessers betrug. Man konnte sie daher sogar mit bloßem Auge beobachten. Unter besonderen Umständen gelingt dies sogar ohne künstliche Lichtdämpfung; nämlich dann, wenn die Sonne beim Auf- oder Untergang durch den Horizontdunst hinreichend geschwächt wird.



Sonnenflecken und Sonnentätigkeit

Die wissenschaftliche Entdeckungsgeschichte der Sonnenflecken ist mit der Entwicklung der ersten Fernrohre eng verknüpft. Es gibt allerdings auch verschiedene ältere Hinweise auf gelegentliche Beobachtungen von Sonnenflecken mit bloßem Auge, denen jedoch meist kaum Erkenntniswert beigemessen wurde. Man sah damals die dunklen Flecken entweder als zur Lufthülle der Erde gehörend an oder glaubte gar an Täuschungen der verschiedensten Art. Eine ausschlaggebende Rolle spielte dabei vor allem die überlieferte Vorstellung von der durch keine weltlichen Einflüsse zu trübenden Reinheit des „Weltenauges“. Derartige Ansichten, die jeden Hinweis auf Sonnenflecken als Gotteslästerung betrachteten, blieben noch längere Zeit ein ernstes Hindernis für die Darlegung der wahren Zusammenhänge.

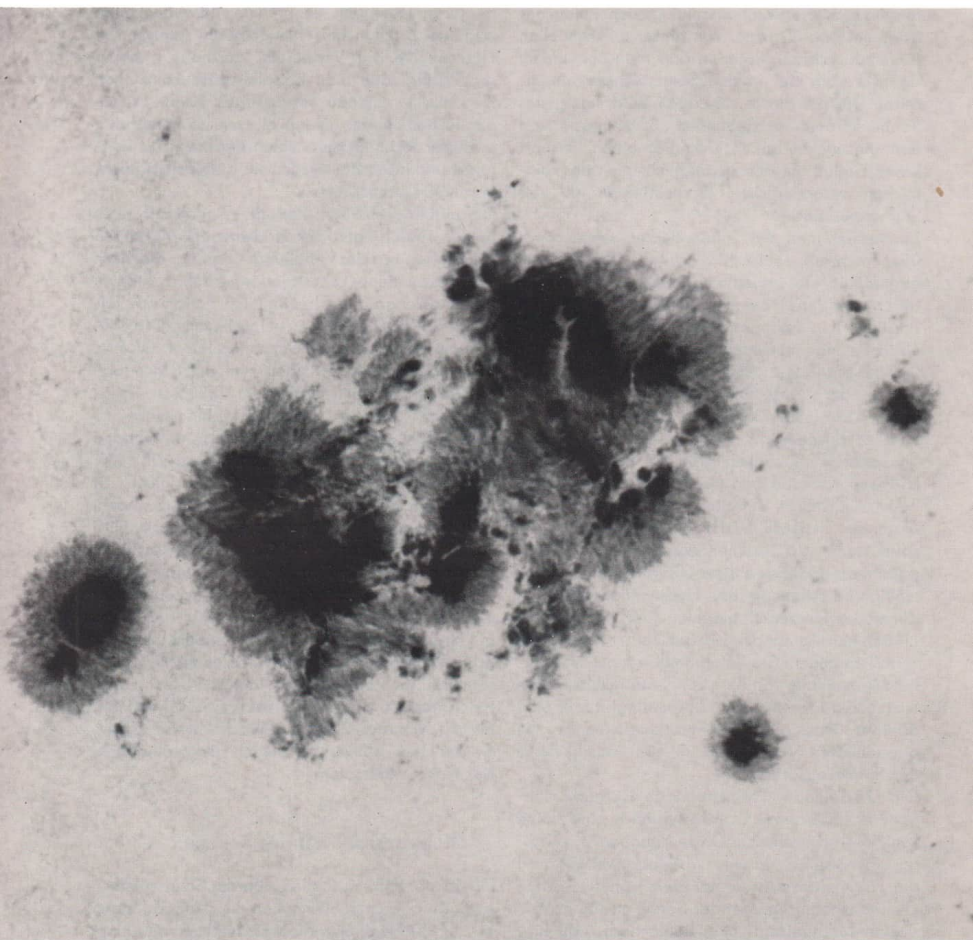
In der wissenschaftlichen Literatur wird meist Johannes Fabricius (1587–1617) als Entdecker der Sonnenflecken genannt. Doch auch hier ist es wahrscheinlich, daß mehrere Forscher gleichzeitig zu ähnlichen Ergebnissen kamen. Immerhin hat aber Fabricius als erster in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung, die 1611 in Wittenberg erschien, über die Auffindung des neuen Naturphänomens genauer berichtet.

Die von ihm wahrgenommenen Positionsänderungen der Sonnenflecken wurden bald durch andere Beobachter bestätigt. Sie bildeten sogar die entscheidende Stütze der Ansicht, daß die Flecken zur Sonnenoberfläche gehören. Christoph Scheiner (1573–1650), der wenige Monate nach Fabricius die Flecken der Sonne beobachtete, konnte nämlich den Nachweis erbringen, daß sich die beobachteten Positionsänderungen der Flecken eindeutig auf die Rotationsbewegung des Sonnenkörpers zurückführen lassen. Übrigens geht aus einem Schriftwechsel zwischen Scheiner und Galilei hervor, daß der italienische Forscher schon im August 1610 Sonnenflecken beobachtet

hatte, ohne dieser Entdeckung jedoch eine besondere Bedeutung beizumessen.

Die in der damaligen Zeit entstandenen Meinungen von der Natur der Sonnenflecken entsprachen natürlich dem allgemein geringen Entwicklungsstand naturwissenschaftlicher Erkenntnisse. So konnten sich einige Interpreten nur schwer mit der Vorstellung befreunden, daß die Sonne „unreinlich“ sei. Sie deuteten daher die Flecken als ganz nah bei der Sonnenoberfläche kreisende dunkle Gestirne. Kepler vertrat die Ansicht, daß es sich um undurchsichtige Rauchwolken handeln könne, die von dem glühenden Sonnenkörper ausgestoßen würden. Wieder andere waren der Meinung, daß man es mit Schlacken in der brennenden Sonne zu tun hätte. Diese Vorstellung von den Schlacken brachte man sogar noch in einen originellen Zusammenhang mit den Kometen. Danach sollten die leuchtenden Schweifsterne nichts anderes sein als die von der Sonne ausgestoßenen Schlacken. Nach diesem Vorgang konnte das leuchtende Zentralgestirn wie ein „gebutztes Kertzenlicht“ wieder hell strahlen.

Doch zurück zu unserer Sonnenexkursion mit modernen Hilfsmitteln! Schon ein kleines Fernrohr erlaubt ein aufschlußreiches Studium der Sonnenflecken. Am wenigsten gefährlich ist die Projektionsmethode, bei der das Sonnenbild auf einem hinter das Okular montierten hellen Schirm scharf abgebildet wird. Das tägliche Einzeichnen der Sonnenflecken in eine Kreisschablone entsprechender Größe gestattet zunächst die Bestimmung der Sonnenrotationszeit. Für Flecken in der Nähe des Sonnenäquators wird man rund 27 Tage als Dauer einer Rotation feststellen. Berücksichtigt man dabei, daß sich aber auch die Erde in dieser Zeit in ihrer Bahn weiterbewegt hat, erhält man als tatsächliche Rotationszeit der Sonne etwa 25,4 Tage. Das gilt jedoch nur für die äquatornahen Bereiche der Sonnenoberfläche, denn die gasförmige Sonne rotiert nicht wie ein starrer Körper. In höheren heliographischen Breiten ver-



längert sich die Rotationszeit. An den Polen beträgt sie etwa 30 Tage. Von dieser differentiellen (unterschiedlichen) Rotation darf man annehmen, daß sie auch tief in den Sonnenkörper hineinreicht. Die bei dieser ständigen Verdrehung des Sonnenkörpers entstehenden Strömungs- und Reibungseffekte haben sicherlich einen wesentlichen Einfluß auf das Zustandekommen der zahlreichen veränderlichen Erscheinungen an der Sonnenoberfläche.

Beobachtet man die Sonnenflecken systematisch über mehrere Jahre hinweg, so erkennt man augenfällig ein periodisches Auftreten. Das betrifft einmal ihre Häufigkeit und zum anderen ihre Positionen in heliographischer Breite. Die periodischen Häufigkeitsschwankungen der Sonnenflecken entdeckte 1843 nach langjährigen Arbeiten der Dessauer Apotheker Heinrich Schwabe (1789–1875). Er fand, daß es sehr deutlich ausgeprägte Maxima und Minima der Sonnenfleckenhäufigkeit gibt, die sich in einem mittleren Abstand von etwa 11 Jahren wiederholen. Schwabes Arbeiten setzte der Züricher Astronom Rudolf Wolf (1816–1893) fort. Er schuf durch die „Sonnenfleckenrelativzahl“ eine auch heute noch brauchbare Grundlage zur zahlenmäßigen Festlegung der Fleckenhäufigkeit. Die Kurve der Fleckenrelativzahlen ließ sich anhand älterer Aufzeichnungen bis zum Jahre 1745 zurück vervollständigen. Sie liefert seither eine anschauliche Vorstellung von der „Sonnentätigkeit“ in den letzten 200 Jahren. Unter diesem Begriff faßt man darüber hinaus alle Erscheinungen zusammen, die die zeitlichen Variationen im Funktionsrhythmus der Sonne ausdrücken.

Die Ursache der Fleckenperiode ist noch weitgehend unbekannt. Es gibt lediglich eine Reihe von Arbeitshypothesen. Diese Situation ist durchaus verständlich, da wir es hierbei zweifellos mit der Folge eines sehr komplizierten physikalischen Geschehens im Inneren der Sonne zu tun haben, dessen Mechanismus man heute noch nicht hin-

reichend erkennen kann. Die Schwierigkeiten zeigen sich schon bei einer feineren Analyse der Fleckenkurve. Ihr Verlauf ist durchaus nicht so regelmäßig, daß man beispielsweise kommende Fleckenzyklen genau voraussagen kann. Erst in den letzten Jahren gelang es, gewisse Fortschritte in dieser Richtung zu erzielen und zunächst Zeitpunkt und Intensität des jeweils nächsten Fleckenmaximums abzuschätzen.

Die elfjährige mittlere Periode spiegelt sich auch in den Änderungen der Fleckenverteilung wider. Abgesehen von der Verteilungsstreuung, die durch die verschiedene Lebensdauer einzelner Flecken und Fleckengruppen bedingt ist, ergibt sich folgendes Bild: Die Flecken treten bevorzugt in zwei Gürteln beiderseits des Sonnenäquators auf. Ihre Lebensdauer liegt zwischen einigen Tagen und mehreren Wochen. Flecken in größeren heliographischen Breiten als $\pm 40^\circ$ zählen dabei zu den Seltenheiten. Zu Beginn eines elfjährigen Zyklus tauchen zunächst Flecken in etwa 30° nördlicher und südlicher Breite auf. Die Gürtel, in denen die Flecken entstehen und verschwinden, werden zunächst breiter und ziehen sich schließlich langsam zum Äquator hin. Gegen Ende des Zyklus liegen sie fast am Äquator an, während in den höheren Breiten unter Umständen schon wieder die ersten Flecken des neuen Zyklus entstehen. Ein eindrucksvolles Bild von der Periodizität dieser Zonenwanderung der Sonnenflecken vermittelt das sogenannte „Schmetterlingsdiagramm“. In ihm wird jeder Fleck durch einen vertikalen Strich markiert, dessen Mitte jene heliographische Breite angibt, wo der Fleck auftritt, und dessen Länge die Größe des Flecks widerspiegelt.

„Kältemaschine“ auf der Sonne

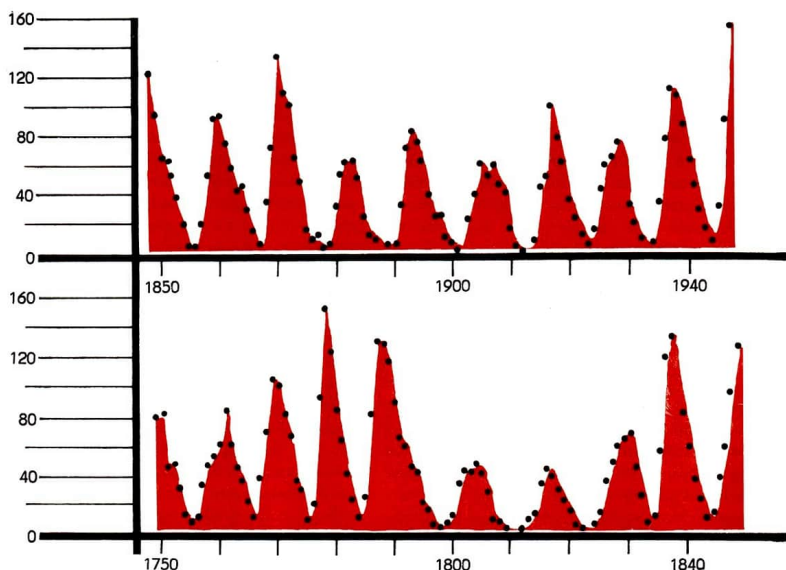
Ein tieferer Einblick in die Natur der Sonnenflecken läßt sich gewinnen, wenn man die Beobachtungen bis auf die Feinheiten eines Einzelflecks oder einer

Fleckengruppe ausdehnt. Allerdings ist dafür ein kleines Fernrohr kaum noch geeignet.

Sehr leicht erkennbar sind jedoch die sogenannten Fackeln, die man fast immer im Bereich des etwas dunkleren Sonnenrandes und in unmittelbarer Nachbarschaft von Sonnenflecken beobachten kann. Es handelt sich dabei um helle aderförmig verzweigte Gebilde, deren Häufigkeitskurve ebenfalls dem elfjährigen Rhythmus unterliegt. Man bringt sie mit der Entstehung von Sonnenflecken in ursächlichen Zusammenhang.

Mit größeren Beobachtungsschwierigkeiten ist dagegen die Feinstrukturuntersuchung der Sonnenoberfläche in unmittelbarer Nähe der Flecken ver-

bunden. Nur mit sehr großen Instrumenten und unter besten Luftbedingungen wird man eine merkwürdige winzige „Pflasterstein“-Struktur der Sonnenoberfläche erkennen können. Der Astronom bezeichnet diese Feinstruktur, die sich auf der ganzen Oberfläche der Sonne nachweisen läßt, als „Granulation“ (Körnung). Zu ihrer Deutung müssen wir uns noch einmal an die Eigenschaft der Photosphäre, nämlich Grundschicht der Sonnenatmosphäre zu sein, erinnern. Davon ausgehend kann man sich die einzelnen Granulationselemente als Zellen stürmischer Zirkulation vorstellen, ähnlich den kleineren Strömungszellen in der Erdatmosphäre. Allerdings haben diese

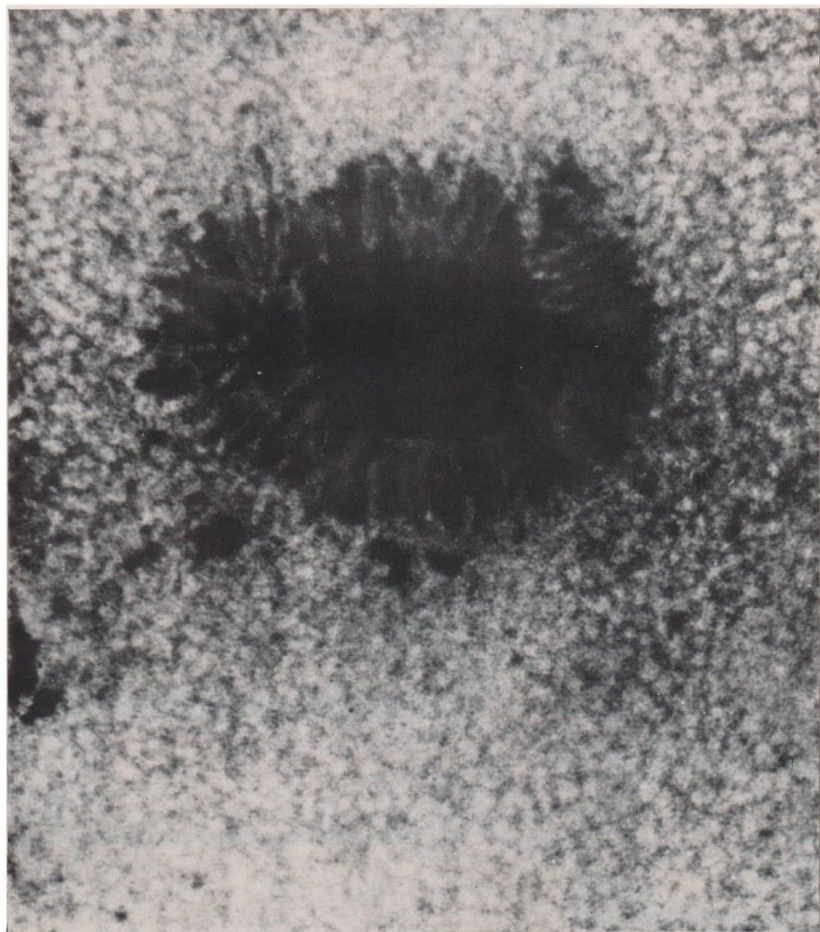


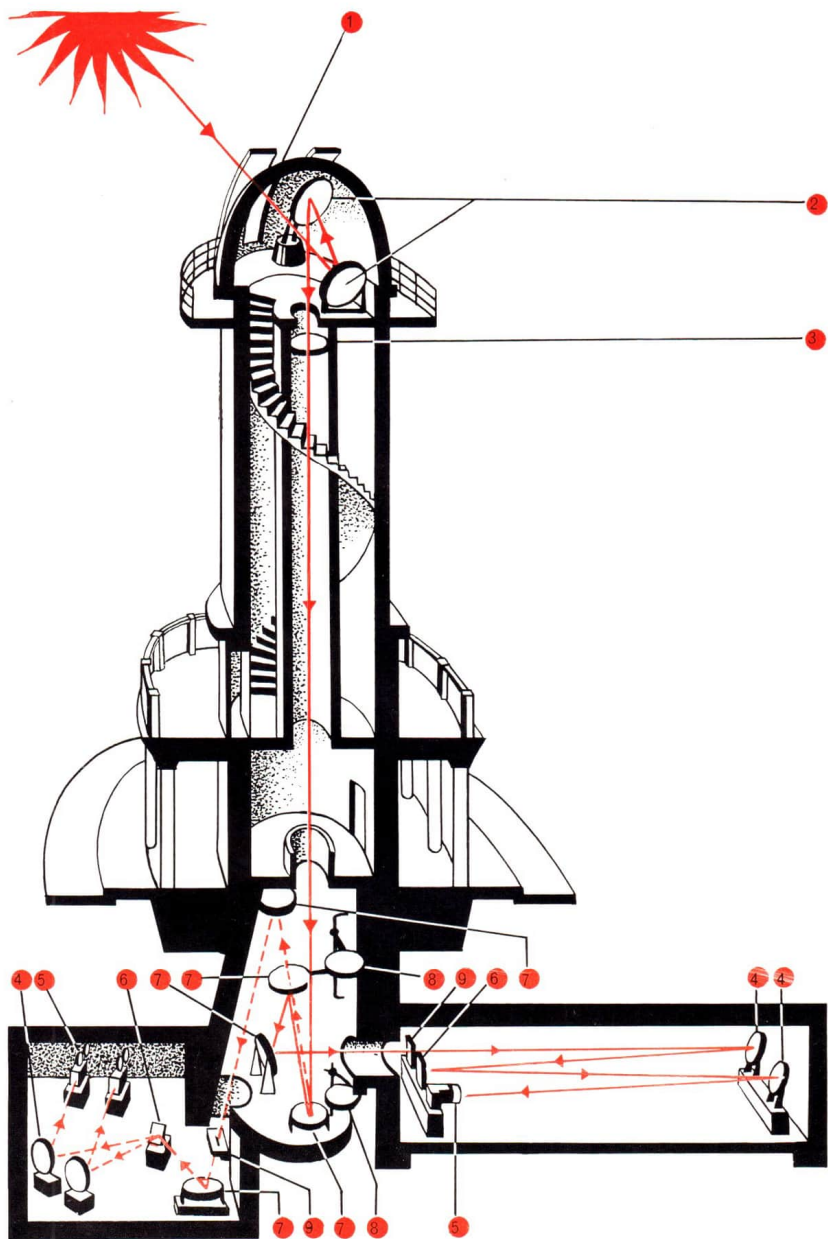
„atmosphärischen“ Gebilde auf der Sonne eine Ausdehnung von etwa 600 bis 1500 km! Ihre vertikalen Strömungsgeschwindigkeiten betragen einige Kilometer in der Sekunde! Diese stürmische Zirkulation in der Sonnenatmosphäre sorgt dafür, daß sich Gebiete von der Ausdehnung Mitteleuropas innerhalb weniger Minuten vollkommen umbilden. Unter irdischen Maßstäben kann man sich also sehr gut die gigantischen Kräfte vorstellen, die das Geschehen im Glutgasball, wie es die Sonne darstellt, regieren.

Ein in dieses Granulationsfeld der Sonnenoberfläche eingebetteter Sonnenfleck von „Normalstruktur“ zeigt neben einem dunklen Kerngebiet, der „Umbra“ (Schatten), eine weniger dunkle Randzone von meist faseriger oder zerfetzter Feinstruktur, die sogenannte „Penumbra“ (Halbschatten). Der Durchmesser eines voll ausgebildeten Einzelflecks kann zwischen 10 000 und 50 000 km liegen. In der Mehrzahl ist die Form der Flecken sehr zerrissen. Das läßt sich besonders in Fleckengruppen erkennen. Eine aufschlußreiche Feststellung wird man aber treffen, wenn man einen absolut dunklen Körper vor der Sonnenscheibe vorbeiwandern sieht (Mond bei einer Sonnenfinsternis, Venus- oder Merkurdurchgang). Dann bemerkt man deutlich, daß die Sonnenflecken in Wirklichkeit gar nicht dunkel im Sinne von „schwarz“ sind. Sie erscheinen lediglich infolge der Kontrastwirkung gegenüber der noch helleren normalen Sonnenoberfläche dunkel. Ein einfaches Experiment vermag anschaulich zu zeigen, wie groß die Lichtmenge ist, die von einem „dunklen“ Sonnenfleck immer noch ausgeht. Man braucht dazu nur mit einer entsprechend großen Zentralblende in der Brennebene des Fernrohrs die helle Sonnenscheibe abzudecken und ein kleines Loch in dieser Blende in den Bereich eines Sonnenflecks zu legen. Wenn man die zuvor verwendeten lichtschwächenden Hilfsmittel ausschaltet, dann wird die aus dem Loch in der Blende dringende Lichtfülle nachweisen, daß Sonnen-

flecken weder Abkühlungsschlacken noch dunkle Rauchwolken des Sonnenkörpers sein können. Durch präzise Intensitätsmessungen an den Sternwarten München und Potsdam wurde schon vor mehreren Jahrzehnten der Nachweis geführt, daß die Flächenhelligkeit eines Sonnenfleckenkerns immerhin noch ein Drittel der Helligkeit der Photosphäre erreicht.

Als man diese Messungsergebnisse durch spektroskopische Temperaturbestimmungen ergänzte, fand man die Temperaturen in der Umbra eines normalen Sonnenflecks um etwa 1500 grd niedriger als in der ungestörten Photosphäre. Die Wissenschaftler standen also bei dieser Entdeckung einem ganz ungewöhnlichen und einmaligen Naturphänomen gegenüber. In einer Umgebung, deren Temperatur weit über den irdischen Höchsttemperaturen liegt, die man also mit chemischen Verbrennungsprozessen oder mit gewöhnlichen elektrischen Lichtbögen experimentell erreichen kann, funktioniert auf der Sonne eine geheimnisvolle und gigantische „Kältemaschine“. Sie kann in einem Gebiet mit vielfachem Erdvolumen eine Temperatursenkung von 1500 grd für beträchtliche Zeit aufrechterhalten. Auch heute bestehen immer noch große Schwierigkeiten, diese Vorgänge physikalisch in allen Einzelheiten zu erfassen. Um die Problematik dieser Forschungsaufgabe zu verstehen, müssen wir uns kurz mit den Methoden der astrophysikalischen Forschung beschäftigen, vor allem soweit sie in der Sonnenforschung angewendet werden. Grundlage aller physikalischen Erkundungen der Sonne sind spektralanalytische Untersuchungen des Sonnenlichtes, wenn man sich zunächst einmal auf diesen Teil des elektromagnetischen Schwingungszentrums beschränken will. Die ständig steigenden Anforderungen an Genauigkeit und die immer komplizierter werdenden Methoden der physikalischen Meßtechnik erfordern einen großen apparativen Aufwand sozusagen „hinter“ dem eigentlichen Fernrohr. Normale astronomische Fernrohre bieten durch ihre





- 1 Kuppelspalt;
- 2 Heliostat;
- 3 Objektiv;
- 4 opt. Hilfsspiegel;
- 5 Aufnahmeapparat;
- 6 Beugungsgitter;
- 7 Umlenkspiegel;
- 8 Hilfslinsen;
- 9 Spektrographenspalt

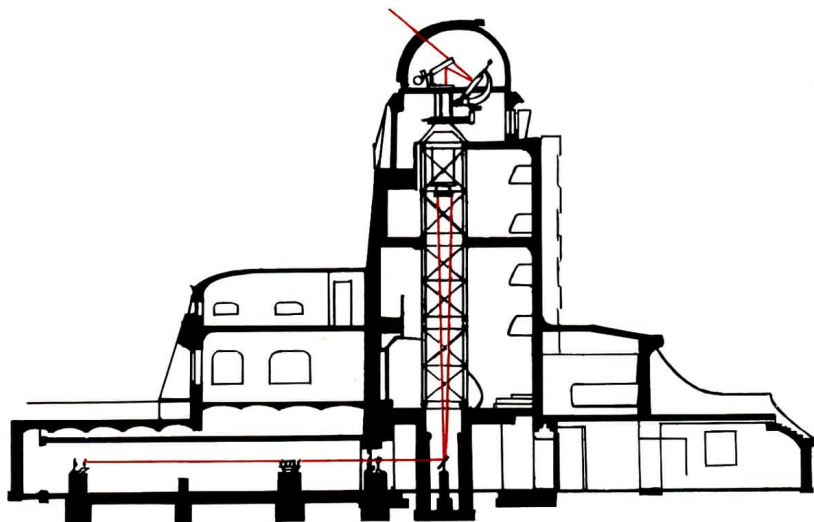
Montierung, mit der sie auf den Himmel gerichtet und der Bewegung der Gestirne nachgeführt werden können, nur sehr beschränkte Möglichkeiten, Meßeinrichtungen anzubringen. Daher hat man für die Sonnenforschung einen Spezialtyp geschaffen, das „Turmteleskop“.

Turmteleskop und Sonnenphysik

Das Verfahren ist recht einfach: Man stellt das Fernrohr senkrecht fest auf und lenkt das Sonnenlicht über ein Spiegelsystem in das Objektiv des Fernrohrs. Die völlig ebenen und mit einer Aluminiumschicht bedampften Hilfsspiegel setzt man dabei mit dem Fernrohrobjektiv zusammen auf turmartige Gebäude – wobei eine drehbare Kuppel für Schutz sorgt –, um aus der besonders schlierenverseuchten Nähe des Erdbodens herauszukommen. Das horizontal liegende Objektiv ist meist sehr langbrennweitig und hat seinen Brennpunkt in einem kellerartigen Unterbau des Teleskopturmes. Bei dieser Konstruktion müssen Spiegel und Objektiv gegen unerwünschte mechanische Schwingungen besonders gut geschützt werden, deren Ursache vor allem der Wind sein kann. Daher setzt man das Traggerüst für Hilfsspiegel und Objektiv entweder in einem umhüllenden Schutzbau auf ein separates Fundament oder führt es bei Gittertürmen ebenso getrennt innerhalb der äußerlich sichtbaren Konstruktion empor. Eines der baulich beeindruckendsten und in seinen wissenschaftlichen Leistungen berühmtesten Turmteleskope befindet sich im Astrophysikalischen Observatorium auf dem Telegraphenberg bei Potsdam. Es ist der 1920/22 erbaute „Einsteinurm“, der unter anderem dazu dienen sollte, von Albert Einstein (1879–1955) vorausgesagte relativistische Effekte auf der Sonne nachzuprüfen. Der Kellerraum eines Turmteleskopes, in dem das Fokalbild der Sonne entsteht, ist als physikalisches

Laboratorium eingerichtet. Ebene Spiegel gestatten das Einlenken des Sonnenlichtes in die verschiedensten Untersuchungs- und Meßeinrichtungen, unter denen spektrographische Apparaturen die wichtigsten sind. Die spektrale Zerlegung des Sonnenlichtes findet in einem besonderen temperaturregulierten Spektrographenraum statt, der entweder horizontal an den Laboratoriumskeller anschließt oder sich direkt vertikal als Schacht darunter befindet. Das bewährte Prinzip des Prismenspektrographen wurde dabei in den letzten Jahrzehnten in zunehmendem Maß durch solche Spektrographen verdrängt, bei denen ein sogenanntes „Beugungsgitter“ für die Zerlegung des Lichtes sorgt. Es handelt sich bei dem Kernstück dieser Anlagen um eine Spiegelmetall- oder verspiegelte Glasplatte, in deren Oberfläche ganz dicht beieinander liegende, gerade Furchen geritzt sind. Der gewünschte Effekt wird allerdings nur erzielt, wenn der Diamant mehrere hundert Linien auf ein Millimeter Breite einschneidet. In der Regel haben hochwertige Beugungsgitter etwa 600 Linien/mm. Auftreffendes weißes Licht wird dann so zerlegt, daß seine Bestandteile in Abhängigkeit von der Wellenlänge nach verschiedenen Richtungen reflektiert werden. Die Auflösungskraft eines Beugungsgitters (Streckung des Spektrums) ist von der Gesamtzahl der Gitterfurchen abhängig. Heute werden Gitter verwendet, deren geteilte Fläche bis zu 25 cm lang ist. Die Herstellung derartiger Gitter zählt zu den bewundernswürdigen Leistungen des modernen optischen Gerätebaues.

Unter den spektroskopischen Verfahren zur Untersuchung der Sonne nimmt die „Spektroheliographie“ eine Sonderstellung ein. Dieses Verfahren gestattet es, sozusagen „optische Tiefenschnitte“ durch die Sonnenatmosphäre zu legen. Um 1890 hatten fast gleichzeitig und unabhängig voneinander der Amerikaner George E. Hale (1868–1938) und der Franzose Henri Deslandres diesen genialen Einfall. Sie gingen



Schnitt durch den Einsteinturm

davon aus, daß in den Absorptionslinien des Sonnenspektrums die weniger intensive Strahlung von kühleren Schichten der Sonnenatmosphäre wirksam ist, die oberhalb der heißeren Photosphärenschichten liegen. Diese Linien sind also nicht dunkel im Sinne von absolut lichtlos. In ihrem Wellenlängenbereich gelangt lediglich eine geringere Strahlungsintensität in die Apparatur als im Bereich der aus tieferen und heißeren Gebieten kommenden, benachbarten Kontinuumsstrahlung. Würde man also außerhalb einer bestimmten Absorptionslinie das übrige Sonnenspektrum abblenden, so müßte die Linie ihrerseits in der Spaltblende hell erscheinen.

Der „Spektroheliograph“ besteht im Prinzip aus einer fest verbundenen Kombination von zwei Spalten mit einer dazwischenliegenden Spektrographenoptik (Prismen, Linsen). Mit dem Eintrittsspalt wird das von einem Fernrohr gelieferte Fokalbild der Sonne abgetastet, während der Austrittsspalt das Licht einer ganz bestimmten Linie des Sonnenspektrums hindurchtreten läßt. Hinter dem zweiten Spalt befindet sich eine unbewegliche Fotoplatte. Läßt man jetzt den Eintrittsspalt über das Sonnenbild wandern, so bewegt sich der Austrittsspalt in gleichem Tempo an der Fotoplatte vorbei, und damit erhält man auf der Platte ein Abbild der Sonne in dem von der Spektrallinie ausgehenden Licht. Hat man beispielsweise eine Wasserstofflinie gewählt, so ergibt sich eine Sonnenaufnahme, auf der nur die Gebiete hell erscheinen, in denen sich zwar kühlerer, aber doch noch leuchtender Wasserstoff oberhalb der Photosphäre befindet. Je kräftiger (dunkler) die gewählte Absorptionslinie ist, desto höhere Schichten der Sonnenatmosphäre wird man erfassen. Rückt man mit dem zweiten Spalt in die Randpartien einer Linie, so erhält man ein Bild der tieferen Schichten der über der Photosphäre lagernden Atmosphäre. Je weiter man den Spalt jedoch nach der Mitte der Linie verschiebt, desto höhere Schichten werden von der Aufnahme erfaßt. Durch

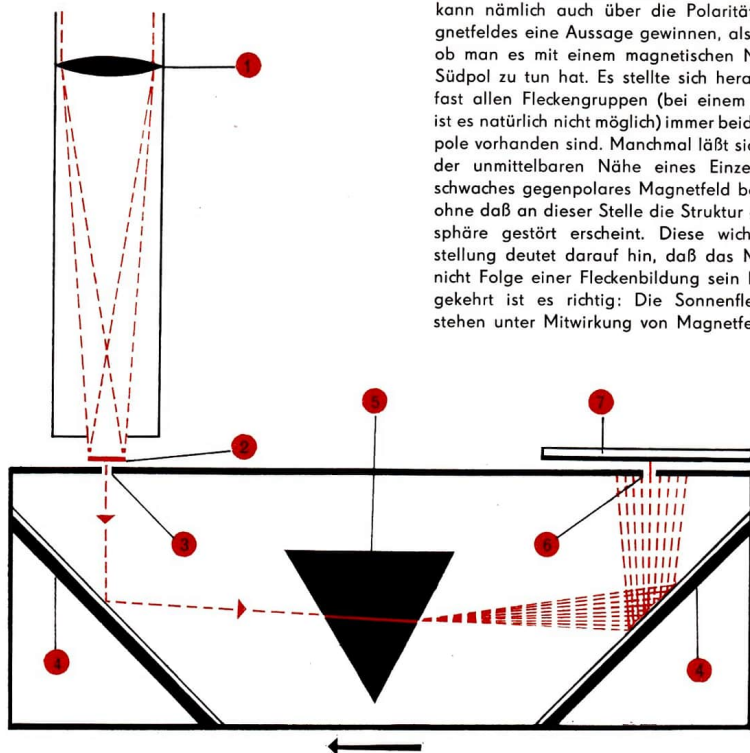
die Wahl von Linien verschiedener Elemente hat man darüber hinaus – wie erwähnt – die Möglichkeit, die Verteilung dieser Elemente in der Sonnenatmosphäre zu studieren. Die auf diesem Wege gewonnenen „Spektroheliogramme“ geben ein wesentlich aufschlußreicheres Bild von der Struktur der Sonnenoberfläche, als es mit den Mitteln der herkömmlichen Aufnahmetechnik zu erhalten wäre. Besonders in unmittelbarer Umgebung der Sonnenflecken führten sie zu bemerkenswerten Feststellungen. Wasserstoff-Spektroheliogramme zeigen dort eine ausgeprägte Wirbelstruktur mit einer Anordnung der Sonnenmaterie, wie sie bei den berühmten Versuchen mit Eisenfeilspänen in der Nähe von Magnetpolen beobachtet werden kann. Die Vermutung liegt also nahe, daß am Sonnengeschehen, vor allem am Mechanismus der Fleckenentstehung, magnetische Kräfte mitwirken.

Auf diesen Gedanken kam schon George E. Hale, nachdem er die ersten Wasserstoff-Spektroheliogramme angefertigt hatte. Die Wirbelstruktur im Bereich der Sonnenflecken brachte ihn auf den Gedanken, daß es sich dabei um Folgeerscheinungen von elektrischen Wirbelströmen handeln könne, die zwangsläufig mit Magnetfeldern verbunden sein müßten. Hale begann also nach den vermuteten Magnetfeldern in Sonnenflecken zu suchen. Der praktische Weg dazu wurde ihm von einer Entdeckung gewiesen, die der holländische Physiker Pieter Zeeman (1865–1943) gerade zu dieser Zeit (1896) auf Grund einer theoretischen Voraussage seines Landsmanns Hendrik A. Lorentz (1853–1928) gemacht hatte. Dieser „Zeeman-Effekt“ besteht darin, daß lichtaussendende Atome, sofern sie sich in Magnetfeldern befinden, doppelt und dreifach aufgespaltene Spektrallinien ergeben. Aus der Größe der Aufspaltung kann man auch auf die Stärke des Magnetfeldes schließen. Wenn das Magnetfeld nicht stark genug ist, verschiebt oder verbreitert sich die Linie nur. Durch einen besonderen Kniff, bei dem die Be-

- 1 Fernrohrptik;
- 2 Sonnenbild;
- 3 Eintrittsspalt;
- 4 Spiegel;
- 5 Prisma;
- 6 Austrittsspalt;
- 7 Fotoplatte

vorzugung bestimmter Schwingungsrichtungen des Lichtes – was man als Polarisation bezeichnet – ausgenutzt wird, läßt sich dieser magnetische Aufspaltungseffekt von anderen Linienverschiebungen (zum Beispiel vom Dopplereffekt) trennen. Die Magnetfeldmessungen an Sonnenflecken erbrachten das Ergebnis, daß das Magnetfeld je-

weils im Kerngebiet des Flecks, also in der Umbra, am stärksten ist. Außerdem wächst die Stärke des Magnetfeldes mit der Größe des Flecks. Es gibt Sonnenflecken mit einer Magnetfeldstärke von über $0,3 \text{ Wb/m}^2$. Zum Vergleich sei daran erinnert, daß das irdische Magnetfeld nur etwa $0,00002$ bis $0,00005 \text{ Wb/m}^2$ erreicht. Aufschlußreich erwies sich noch eine andere Feststellung, die sich ebenfalls mit dem Zeeman-Effekt treffen läßt. Man kann nämlich auch über die Polarität des Magnetfeldes eine Aussage gewinnen, also darüber, ob man es mit einem magnetischen Nord- oder Südpol zu tun hat. Es stellte sich heraus, daß in fast allen Fleckengruppen (bei einem Einzelfleck ist es natürlich nicht möglich) immer beide Magnetpole vorhanden sind. Manchmal läßt sich sogar in der unmittelbaren Nähe eines Einzelflecks ein schwaches gegenpolares Magnetfeld beobachten, ohne daß an dieser Stelle die Struktur der Photosphäre gestört erscheint. Diese wichtige Feststellung deutet darauf hin, daß das Magnetfeld nicht Folge einer Fleckenbildung sein kann. Umgekehrt ist es richtig: Die Sonnenflecken entstehen unter Mitwirkung von Magnetfeldern.

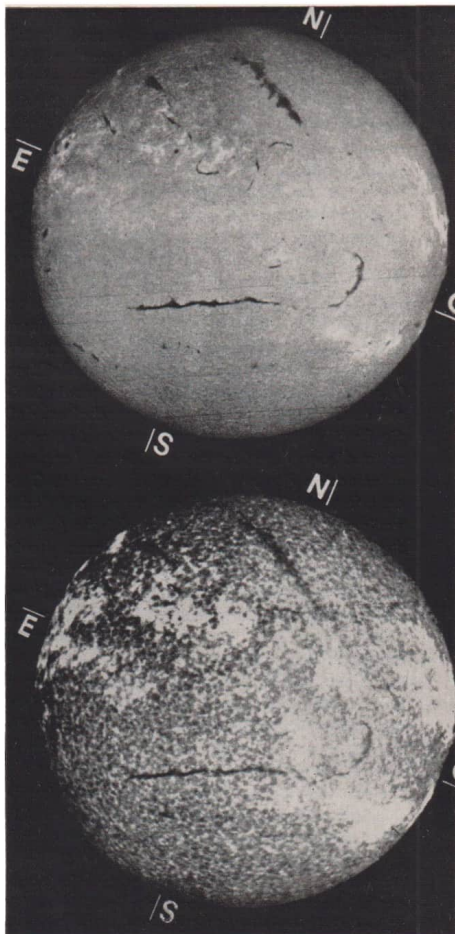


Gleichzeitig aufgenommene Spektroheliogramme;
oben die Sonne im Licht der $H\alpha$ -Linie
(Wasserstoff-Spektroheliogramm),
unten im Licht der K-Linie
(Kalzium-Spektroheliogramm)

Als etwa 1913 die ersten Flecken eines neuen Zyklus in höheren heliographischen Breiten erschienen, machten Hale und seine Mitarbeiter eine weitere überraschende Entdeckung. Auf beiden Hemisphären der Sonne beobachteten sie, daß die Polaritäten in den „bipolaren“ Fleckengruppen des neuen Zyklus gegenüber denen des alten vertauscht waren. Während auf der Nordhalbkugel der Sonne vorher immer der zum Westrand der Sonne voranlaufende Magnetpol ein Nordpol war, lief im neuen Zyklus immer der Südpol voran. Auf der Südhalbkugel der Sonne war es gerade umgekehrt. Diese Erscheinung hat sich seither bei allen Fleckenzyklen immer wieder bestätigt. Sie läßt den Schluß zu, daß die Periodizität des Sonnengeschehens in Wirklichkeit von einem 22jährigen Rhythmus beherrscht wird.

Plasmaphysik — Schlüssel zum Sonneninneren

Trotz zahlreicher theoretischer Ansätze sind die Vorgänge im Sonneninneren, die zur Bildung von Magnetfeldern und folglich auch zur Entstehung der Flecken führen, immer noch unerklärt. Es wirkt sich nachteilig aus, daß man nicht tief genug in den Sonnenkörper hineinsehen kann. Aus den an der Sonnenoberfläche sichtbar werdenden Folgeerscheinungen läßt sich aber nur sehr unvollkommen auf die in größeren Tiefen ablaufenden Prozesse schließen. Für einige Einzelzusammenhänge kann man dagegen bereits brauchbare Erklärungen geben. So scheint es ziemlich sicher, daß die „Kältemaschine“ in den Fleckengebieten dadurch funktioniert, daß die normale Vertikalzirkulation (Granulation) des in der Sonnenatmosphäre in großer Menge vorhandenen Wasserstoffes magnetisch abgebremst wird. Mit dieser Erklärung berühren wir jedoch schon einen besonderen Arbeitsbereich der modernen physikalischen Forschung, die Plasmaphysik. Ihre Bedeutung für



Probleme der kosmischen Physik ist so universell und grundlegend, daß wir uns noch kurz mit einigen ihrer Grundbegriffe vertraut machen müssen. Der große Einblick in die Zusammenhänge des Sonnengeschehens wird sich für die Wissenschaft zweifellos erst aus einem ständig vertieften Verständnis für die Probleme der Plasmaphysik ergeben.

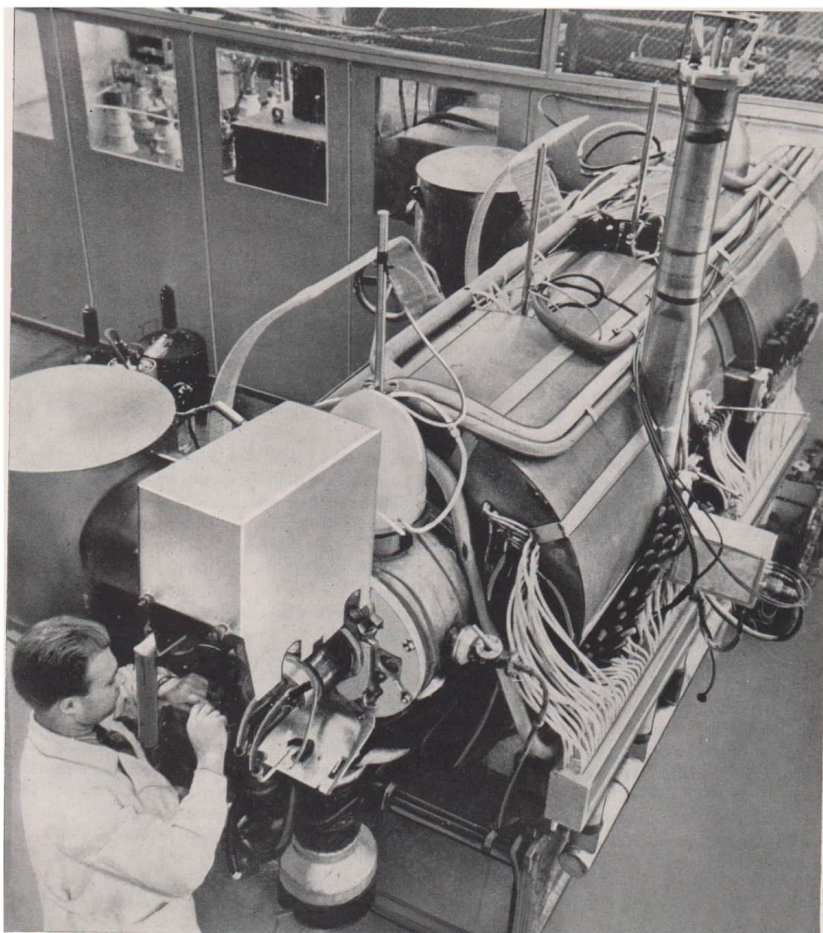
Der Ausdruck „Plasma“ existiert im physikalischen Sprachgebrauch noch nicht sehr lange. Erst in den zwanziger Jahren dieses Jahrhunderts tauchte er in Arbeiten des amerikanischen Physikers Irving Langmuir (1881–1957) über Untersuchungen an Gasentladungen auf. Mit Plasma bezeichnet man seither ein Gas, das aus einem Gemisch von positiven Ionen, freien Elektronen und gegebenenfalls einem Rest neutraler Teilchen (Atome, Moleküle) gebildet wird. Ein derartig ionisiertes Gas hat so besondere Eigenschaften, daß die Physiker sogar von einem „vierten Aggregatzustand“ der Materie sprechen. Die von Langmuir untersuchten Plasmen in elektrisch erregten Gasentladungsrohren waren allerdings nur mehr oder weniger schwach ionisiert. Die praktische Anwendung seiner Erkenntnisse findet man heute in Leuchtstofflampen, Kaltkathoden-Glimmrohren, Ionenröhren und Lichtbogenanlagen wieder. Hierbei besteht der überwiegende Teil des Plasmas noch immer aus neutralen und angeregten Atomen und Molekülen.

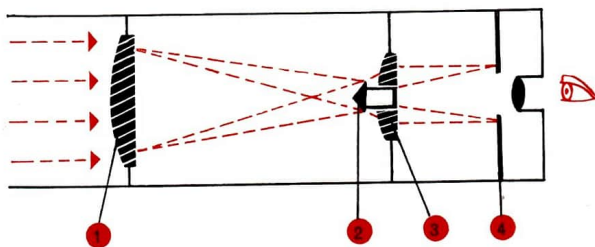
Wenn man jedoch vollionisierte Plasmen erzeugen will, in denen keine neutralen Teilchen, sondern nur noch gleich viel positive Ionen und freie Elektronen existieren, dann muß man mit Temperaturen von vielen Millionen Grad Kelvin arbeiten. Die von der hohen Temperatur angeregte intensive Stoßionisation bewirkt die Plasmabildung. Bis vor etwa anderthalb Jahrzehnten konnte der Mensch solche Temperaturen nicht erzeugen. Erst die Fortschritte auf dem Gebiet der Kernphysik (Kernexplosionen, Wasserstoffkernfusion) eröffneten für dieses Gebiet neue Möglichkeiten. Die Existenz

von praktisch vollionisierten Plasmen, in denen die ungewöhnlichen Eigenschaften dieses Materiezustandes erst umfassend wirksam werden, wurde jedoch schon viel früher durch astrophysikalische Forschungen nachgewiesen. Untersuchungen an der Sonne, den Fixsternen, Gasnebeln und Sternsystemen hatten in groben Umrissen ergeben, daß im Inneren der Sterne so ungewöhnlich hohe Temperaturen herrschen müssen, wie sie zur Ausbildung eines Vollplasmas Voraussetzung sind. Heute wissen wir, daß rund 99 Prozent der Materie des Universums im Plasmazustand verschiedenster Prägunge vorliegen, daß also der „vierte Aggregatzustand“ beim Aufbau des Weltalls dominiert.

An diesem Beispiel läßt sich das fruchtbare Zusammenwirken verschiedener physikalischer Disziplinen deutlich erkennen. So wird das Geschehen in und auf der Sonne erst dann erklärbar, wenn die in der Astrophysik gewonnenen Einsichten über die Natur außerirdischer Plasmen durch die irdischen Versuche der Kernphysiker ergänzt werden. Andererseits erlangen die Erfahrungen und Erkenntnisse der Astrophysiker an Wert, um das auf der Erde immer dringlicher werdende Problem der Energieerzeugung durch gesteuerte Wasserstoffkernfusion zu lösen. Im weiteren ergibt sich die zwingende Einsicht, daß die Forschungen über den Aufbau und die Wechselwirkungen der Materie nicht auf die irdische Laboratoriumsarbeit beschränkt bleiben können. Die Möglichkeiten des großen Laboratoriums „Kosmos“ müssen unbedingt genutzt werden, denn noch für lange Zeit werden die im kosmischen Raum gegebenen extremen physikalischen Bedingungen die experimentellen Möglichkeiten auf der Erde in vielen Punkten weit übertreffen.

Außer der vertieften Kenntnis kosmischer Zusammenhänge, besonders der Wechselbeziehungen Sonne-Erde, sowie der Erschließung neuer und fast unerschöpflicher Energiequellen beginnt das komplexe Gebiet der modernen Plasmaphysik, noch zahlreiche andere Möglichkeiten zu eröffnen,





um den vierten Aggregatzustand zu nutzen. Für unsere augenblicklichen astrophysikalischen Überlegungen sind einige charakteristische Eigenschaften vollionisierter Plasmen besonders wichtig. So haben beispielsweise Plasmen dieser Art einen äußerst kleinen spezifischen Widerstand. Dadurch können im Plasma sehr starke Ströme fließen (Bewegung der freien Elektronen), die ihrerseits wieder sehr kräftige Magnetfelder erzeugen. Durch die Kopplung des Stromsystems mit dem Magnetfeld sind stoffliche Materie und Magnetfeld so eng miteinander verhaftet, daß die Physiker gelegentlich auch sagen, das Magnetfeld sei in der Materie „eingefroren“. Dieser Vergleich ist zwar bildhaft, aber mit Vorsicht zu handhaben, denn die Temperatur eines vollionisierten Plasmas läßt wohl kaum die Vorstellung von „einfrieren“ zu. Eine wichtige Folgerung dieses Tatbestandes ist jedoch, daß im bewegten Plasma ein einmal entstandenes Magnetfeld mitwandert, so wie ein bewegter Hufeisenmagnet sein Magnetfeld mitnimmt. In der Sonne sorgen außerdem die großen Dimensionen der entstehenden Stromsysteme sowie die enorme Leitfähigkeit des Sonnenplasmas für eine lange Lebensdauer der Magnetfelder. Weiterhin können die massearmen Elektronen eines Plasmas durch elektrische Kräfte der positiven Ionen und durch Magnetfelder in kreisähnliche Bewegung versetzt werden, die das Aussenden einer besonderen Strahlung (Synchrotronstrahlung) hervorrufen. Eine solche Strahlung wird, wie der Name zeigt, vor allem bei Laboratoriumsversuchen mit Teilchenbeschleunigern beobachtet. Diese elektromagnetische Wellenstrahlung reicht von der kurzwelligen Röntgenstrahlung bis zu den Zentimeterwellen. Damit läßt sich ihr langwelliger Anteil also durch Radioteleskope nachweisen.

Auf der Grundlage der hier nur kurz andeutbaren Erfahrungen auf dem Gebiet der Plasmaphysik wird man auch das komplizierte Geschehen in und auf der Sonne schließlich vollkommen verstehen lernen. Natürlich werden dabei die physik-

kalischen Untersuchungen der Sonne selbst die wichtigsten Ausgangs- und Kontrolldaten für alle weiteren theoretischen Überlegungen liefern. Außer den bisher geschilderten Untersuchungsmethoden gibt es dazu noch einen außerordentlich wichtigen Erfahrungsbereich, den wir einem ganz besonderen Naturphänomen verdanken. Es verhalf den Sonnenphysikern zu den grundlegendsten Kenntnissen über den Aufbau speziell der Sonnenatmosphäre.

Mond als Helfer der Sonnenforschung

Aus dem Zusammenspiel des Mondumlaufes um die Erde mit der Lage und räumlich festen Orientierung der Mondbahn sowie den annähernd gleichen scheinbaren Größen von Mond und Sonne entsteht bekanntlich das herrliche Naturschauspiel der Sonnenfinsternisse. Während der „Totalität“ (der Mond bedeckt die Sonnenscheibe völlig) sind hinter dem Rand der dunklen Mondscheibe Erscheinungen sichtbar, die eindeutig der Sonnenatmosphäre angehören. Ihre Beobachtung außerhalb der Totalität ist ohne besondere Hilfsmittel nicht möglich, weil sie von der hellen Sonnenscheibe überstrahlt werden. Für ihr Sichtbarwerden bei der Finsternis ist wesentlich, daß der Mond die annähernd gleiche scheinbare Größe wie die Sonne hat und dadurch wie eine nahezu ideale Kreisblende bedeckt. Aus dieser Tatsache rührt das kuriose Bild her, daß wir einen großen Teil der wichtigsten Erkenntnisse über die Sonne eigentlich dem Mond verdanken. Da aber die Totalität an einem bestimmten Beobachtungsort nur wenige Minuten dauert, totale Finsternisse außerdem lediglich zwei- oder dreimal im Jahr auftreten und die Beobachtungszonen für die Totalität ständig wechseln, waren die Sonnenphysiker schließlich mehr als dankbar, als 1930 dem französischen Astronomen Bernard Lyot (1897–1952) die Konstruktion eines Spezialfernrohres („Koronograph“) gelang, mit dem der Effekt

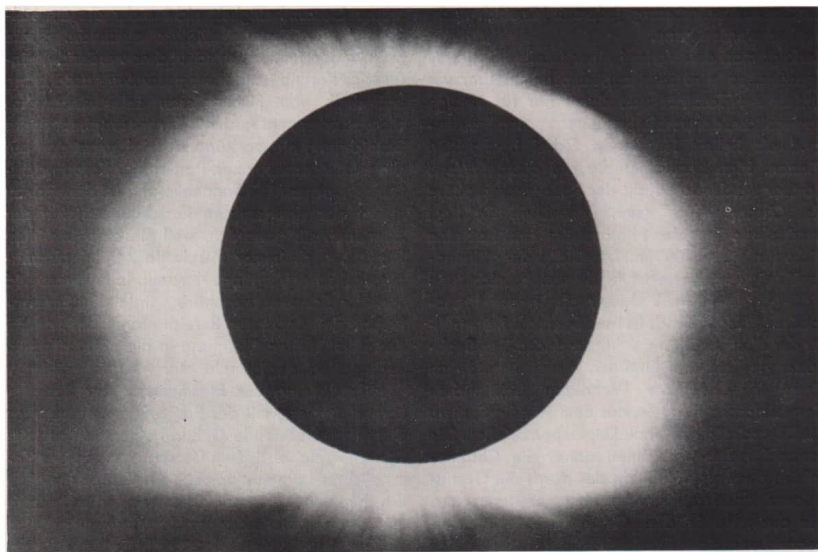
- 1 Objektiv;
- 2 Kegelblende;
- 3 Hilfslinse;
- 4 Irisblende

der Sonnenverfinsterung jederzeit künstlich nachgeahmt werden kann.

Verfolgt man den Verlauf einer totalen Finsternis genauer, so wird man zunächst unmittelbar vor Eintritt der Totalität und damit nur für wenige Augenblicke, den verbleibenden schmalen Sonnenrand als hellrot leuchtende Sichel beobachten können. Man bezeichnet die auf diesem Wege sichtbar werdende Schicht der Sonnenatmosphäre als „Chromosphäre“ (svw. Farbhülle). Sie liegt unmittelbar über der Photosphäre und hat eine Dicke von etwa 10 000 km. Die Dichte der glühend-gasförmigen Materie ist in diesem Bereich rund 1000- bis 10 000 mal kleiner als in der Photosphäre. Aufschlußreich ist besonders die Feinstruktur der dünnen Chromosphärenschicht. Der Beobachter gewinnt den Eindruck, als ob es sich um einen in dauernder Wandlung befindlichen Flammenozean handle, aus dem ständig Spritzer mit Überschallgeschwindigkeit emporsteigen. Die Sonnenforscher bezeichnen daher die Chromosphäre auch als die Gischt des durch die Granulationszirkulation wogenden Photosphärenozeans. Die chromosphärischen Gase erhalten ihre Bewegungsenergie offensichtlich durch Stoßwellen aus der Photosphäre. Das Bild der Chromosphäre läßt sich übrigens auch durch Beobachtungen außerhalb von Finsternissen vervollständigen. Man braucht sich nur an die bereits beschriebenen Spektraheliogramme zu erinnern. Diese Aufnahmen zeigen bekanntlich die dicht oberhalb der Photosphäre liegenden Gassichten und weisen als wesentlichste Bestandteile dieses Bereichs der Sonnenatmosphäre die Elemente Wasserstoff und Kalzium nach.

Die eindrucksvollste Erscheinung bei einer Sonnenfinsternis kann man aber erst nach Eintritt der völligen Totalität bewundern. Es ist der als „Sonnenkorona“ oder einfach nur als „Korona“ bezeichnete silberweiße, fast unwirklich erscheinende Strahlenkranz, der weit über die dunkle Mondscheibe in den Raum hinausreicht und in

seiner Gesamthelligkeit nicht mehr als ein Millionstel der Sonnenhelligkeit ausmacht. Diese nach außen immer lichtschwächer werdende feinfaserige Korona ist in ihrer gesamten Ausdehnung außerhalb von Finsternissen selbstverständlich nicht zu erkennen. Auch die Koronographen, deren Bezeichnung nun verständlich wird, vermögen nur die relativ sonnennahen Partien der Korona sichtbar zu machen. Die Sonnenkorona ist dennoch zu einem der erregendsten Forschungsobjekte der Sonnenphysik geworden, weil sie eine in vielen Punkten noch immer rätselhafte Region plasmaphysikalischer Vorgänge darstellt. In unserem Bild von der Sonnenatmosphäre würde die Sonnenkorona den äußersten Bereich einnehmen, da sie den allmählichen Übergang in die physikalischen Bedingungen des interplanetaren Raumes bildet. Die Entdeckung der Plasmanatur der Sonnenkorona war eng mit der Frage verknüpft, woraus dieses zartleuchtende Gebilde eigentlich besteht. Die spektralanalytischen Untersuchungen des Koronalichtes zeigten einerseits ein Kontinuum ähnlich dem des Sonnenspektrums. Andererseits fand man aber an Stelle der dunklen Absorptionslinien im Koronaspektrum etwa 20 helle Emissionslinien. Diese hellen Linien ließen sich jedoch mit keiner der Linien bekannter Elemente identifizieren. So glaubte man schon, diese Linien einem neuen und auf der Erde nicht vorkommenden Element, dem „Koronium“, zuschreiben zu müssen. Dem schwedischen Physiker Edlén gelang es jedoch theoretisch und praktisch zu zeigen, daß die Elemente Eisen, Nickel, Kalzium und Argon mit den „Koronalinien“ identische Spektrallinien erzeugen, wenn man ihnen zuvor einen größeren Teil ihrer Elektronen aus den Atomhüllen raubt, sie also sehr stark ionisiert. Die bei diesem Prozeß frei werdenden Elektronen bewegen sich mit großer Geschwindigkeit durch das ionisierte Gas und bilden mit ihm zusammen ein Plasma. Daneben sorgen die Elektronen durch Streuung des von der Sonnenoberfläche kommenden Lichtes für die Ent-



stehung des Kontinuums im Koronaspektrum, ähnlich wie eine lichtstreuende Staubwolke.

Die von Edlén entdeckte außerordentlich starke Ionisation der Koronagase (so fehlen den Eisenatomen bis zu 13 Elektronen) kann nur eine Folge der ungewöhnlich hohen Temperatur des Plasmas sein. Sie liegt im Bereich von 1 Million bis 4 Millionen $^{\circ}\text{K}$ und darüber. Der Grund dafür, daß die Korona trotz dieser enormen Temperatur nicht heller leuchtet, liegt in der geringen Dichte des Plasmas. Es erreicht selbst in den sonnennächsten und damit dichtesten Regionen nur etwa ein Hundertmilliardstel der Atmosphärendichte nahe der Erdoberfläche. Die Geschwindigkeit, mit der die Plasmateilchen durcheinander wirbeln, liegt

für Protonen ungefähr bei 200 und für Elektronen sogar bei etwa 8000 km/s. Lange Zeit blieb es jedoch völlig rätselhaft, wodurch das Koronagas auf seine ungewöhnlich hohe Temperatur gebracht wird. Die einzige vorhandene „Heizplatte“, die Photosphäre, wies ja nur eine Temperatur von rund 5800 $^{\circ}\text{K}$ auf. Doch auch diese Frage konnte inzwischen beantwortet werden. Ähnlich wie bei der Chromosphäre sind es auch für die Korona Stoßwellen mit extremer Überschallgeschwindigkeit, die als Hauptenergiequelle für das Koronaplasma wirken. Doch bis in alle Einzelheiten ist dieser Vorgang noch längst nicht geklärt. Der Kreis der bei verfinsteter Sonne sichtbar werdenden Erscheinungen schließt sich mit den

„Protuberanzen“. Wie der Name schon andeutet, handelt es sich dabei um Gebilde, die wie bizarr geformte Wolken oder Fontänen über den dunklen Mondrand hinwegragen. Ihre Farbe ist leuchtend rot wie die der Chromosphäre. Ihre Helligkeit ist dieser ebenfalls vergleichbar. Das Spektroskop zeigt, daß es sich hierbei um Wasserstoffmassen handelt, die zum Teil weit in den Bereich der Korona vordringen. Maximalhöhen von einigen hunderttausend Kilometern über der Sonnenoberfläche sind keine Seltenheiten. Wenn man über einen längeren Zeitraum hinweg beobachten kann (Koronograph), zeigen sich recht bemerkenswerte Einzelheiten im Verhalten der Protuberanzen. So können bei einigen von ihnen die normalen langsamen Veränderungen sehr plötzlich in meist radial verlaufende explosionsartige Strömungsvorgänge übergehen, durch die das glühende Wasserstoffgas sogar bis zu einer Million Kilometer und weiter in den kosmischen Raum hinausgeschleudert wird. Diesen Typ bezeichnet man als „eruptive“ Protuberanzen.

Lange Zeit war man der Meinung, daß die Protuberanzenmaterie ausschließlich durch derartige explosionsartige Vorgänge aus der Chromosphäre heraus transportiert wird. Zeiträuferaufnahmen, die an Koronographen gewonnen wurden, ergaben jedoch noch ein anderes Bild. Danach scheinen sich im Bereich der sogenannten „ruhenden“ Protuberanzen die Wasserstoffgaswolken in großen Höhen durch eine Art „Kondensation“ in der Korona zu bilden und anschließend zur Sonnenoberfläche herabzuströmen. Von ganz besonderer Bedeutung war aber die Feststellung, daß die Protuberanzenmaterie dabei nicht einfach vertikal „herabregnet“, sondern auf gekrümmten Bahnen herabfließt, die man nur als die unsichtbaren Kraftlinien gewaltiger Magnetfelder deuten kann. Auch hierbei zeigt sich wieder die Auswirkung der Plasmanatur der Sonnenmaterie. Gelegentlich konnte man auch beobachten, wie ein im Bereich einer ruhenden Protuberanz mit einer Geschwin-

digkeit von mehreren hundert Kilometern in der Sekunde emporschießender Materiespritzer die ursprünglich vorhandenen Protuberanzenwolken zerstörte und zu fast völligem Abregnen brachte.

Sonnenblitze und Strahlungsstürme

Wenn man das bisher betrachtete vielfältige Geschehen auf der Sonnenoberfläche und in der Sonnenatmosphäre zusammenfaßt, drängt sich ein Vergleich mit gewissen Geschehnissen in der Erdatmosphäre auf. Obwohl dieser Vergleich die tiefgreifenden Unterschiede nicht verwischen soll, so kann man mit einer gewissen Freiheit vielleicht doch von einer Art „Wetter“ auf der Sonne sprechen. Allerdings spricht die Natur der daran beteiligten Vorgänge eigentlich mehr für den Begriff „Unwetter“. Keine der beschriebenen Erscheinungen ist aber alleinige und primäre Ursache der anderen. Das allen gemeinsame Anregungszentrum liegt vielmehr tief im Inneren des Sonnenkörpers und wird für einen einzelnen, örtlich gebundenen Komplex aller zusammenhängenden Erscheinungen als „Aktivitätszentrum“ bezeichnet. Die Lebensdauer derartiger Zentren des Sonnenwetters beträgt viele Monate. Die Summe der von allen Aktivitätszentren zeitgleich hervorgerufenen Erscheinungen und Wirkungen wird dann unter dem schon erwähnten Begriff der Sonnenaktivität zusammengefaßt.

Wenn wir uns mit der Formulierung „Sonnenwetter“ schon auf das Gebiet der Vergleiche begeben haben, so lassen sich in diesem Zusammenhang auch Erscheinungen benennen, die man dann als die „Blitze“ eines solaren Unwetters bezeichnen könnte. Da ein Aktivitätszentrum an der Sonnenoberfläche meist durch die magnetischen Wirbelstörungen einer Sonnenfleckengruppe angezeigt wird, lassen sich „Sonnenblitze“ besonders in diesen Bereichen erwarten. Tatsächlich kann man gelegentlich mit dem Spektroheliographen

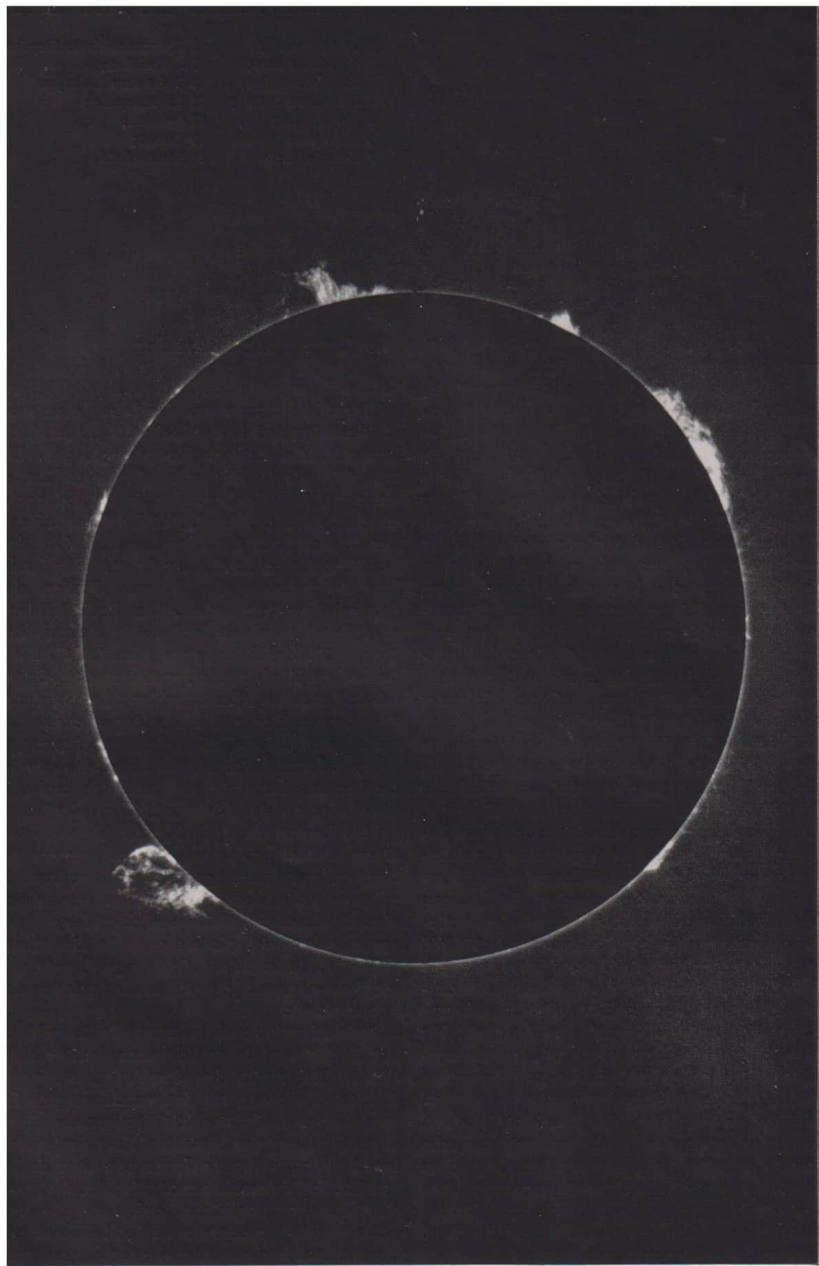
im Lichte der H_{α} -Linie (die langwelligste einer Serie von Linien des Wasserstoffes) plötzliche intensive Lichtausbrüche beobachten, die in unmittelbarer Nähe eines Sonnenflecks oder direkt in einer Fleckengruppe auftreten. Man nennt diesen Vorgang eine „chromosphärische Eruption“, ohne damit jedoch einen Auswurf stofflicher Materie andeuten zu wollen. Chromosphärische Eruptionen sind ausschließlich als Strahlungsausbrüche anzusehen, bei deren Zustandekommen wiederum magnetische und elektrische Kräfte ausschlaggebend sind; das haben neuere Untersuchungen eindeutig erwiesen.

Übrigens wird bei der modernen spektroheliographischen Untersuchung der Sonnenoberfläche an Stelle des zuvor geschilderten, mit Spalt und Gitter ausgerüsteten Gerätes immer häufiger das von Lyot erfundene Interferenzfilter verwendet. Diese Lyot-Filter lassen jeweils nur das Licht einer einzigen Linie des Sonnenspektrums (zum Beispiel H_{α} -Linie) hindurchtreten und zeigen damit ohne weiteren apparativen Aufwand sofort die Sonnenoberfläche im Lichte der gewählten Spektrallinie. Bei fotografischen Arbeiten gestatten sie gegenüber dem Spektroheliographen, die Belichtungszeit von einigen Minuten bis auf ein fünfzigstel Sekunde und weniger zu verkürzen. Da aber die chromosphärischen Eruptionen meist nur einige Minuten andauern (größere sind manchmal auch über Stunden hinweg zu beobachten), erlauben möglichst kurz belichtete Aufnahmen eine wesentlich feinere Analyse der Vorgänge in einem „Sonnenblitz“. Einzelne, besonders starke Eruptionen können allerdings so hell aufleuchten, daß man sie sogar bei einer Sonnenbeobachtung im unzerlegten Licht und ohne andere dämpfende Hilfsmittel minutenlang direkt auf der hell leuchtenden Sonnenoberfläche sehen kann.

Die chromosphärischen Eruptionen sind jedoch nicht nur für die spezielle Sonnenforschung von Bedeutung. Ihre Wirkungen reichen weit über den Bereich der Sonne hinaus und lassen sich bis zur

Erde hin verfolgen. Sie üben sogar von allen kosmischen Faktoren, nach dem gleichförmig von der Sonne auf die Erde gelangenden Licht- und Wärmestrom, den größten Einfluß auf das geophysikalische Geschehen aus. Innerhalb der bei einer Eruption frei werdenden Wellenstrahlung ist nämlich der Anteil an kurzwelligem Ultraviolett- und an Röntgenstrahlung besonders groß, und diese sporadisch auftretende solare Strahlung bewirkt maßgebliche Veränderungen im physikalischen Zustand der irdischen Hochatmosphäre. Damit kommen wir nun wieder zu den Problemen zurück, die mit den Wechselbeziehungen zwischen physikalischen Vorgängen und Erscheinungen im Kosmos und geophysikalischen Effekten verknüpft sind. Es wird aber auch erneut offenbar, daß es unbedingt notwendig ist, sich mit der Sonnenphysik zu beschäftigen, wenn man die physikalischen Vorgänge im erdnahen Raum und vor allem in der irdischen Atmosphäre verstehen will. Ehe wir uns jedoch wieder diesem Bereich der Erde und deren Hochatmosphäre zuwenden, müssen wir unser Bild von der Physik der Sonne noch etwas weiter vervollständigen.

Wir wissen schon, daß bei chromosphärischen Eruptionen eine intensive Wellenstrahlung auftritt. Darüber hinaus ist ein solches Aktivitätsgebiet auch die Quelle verschiedenartiger Teilchenstrahlungen, deren Nachweis allerdings mehr indirekten, aber darum nicht weniger zuverlässigen Beobachtungsverfahren vorbehalten bleibt. Die ausgeschleuderten Atomteilchen (Protonen, Ionen oder Elektronen) können beim Ausbruch selbst nicht beobachtet werden. Sie beeinflussen jedoch die darüberliegende Korona sehr stark. Außerdem können aber auch sie die Erde erreichen und sich dort durch physikalische Störeffekte bemerkbar machen. So ruft die solare Teilchenstrahlung Störungen des Erdmagnetfeldes hervor, beeinflußt die Struktur der Hochatmosphäre und veranlaßt die Bildung der Polarlichter. Außer diesen relativ langsamen Partikeln, deren Ausbreitungsgeschwin-



- | | |
|----------------------|------------------------------|
| 1 Sonneninneres; | 8 Chromosphärische Eruption; |
| 2 Konvektionszone; | 9 Sonnenfleck; |
| 3 Konvektionszellen; | 10 Dicke etwa 15 000 km; |
| 4 Dicke etwa 500 km; | 11 Chromosphäre; |
| 5 Photosphäre; | 12 Spiculen; |
| 6 Dicke etwa 100 km; | 13 Korona; |
| 7 Granulation; | 14 Koronastrahl |

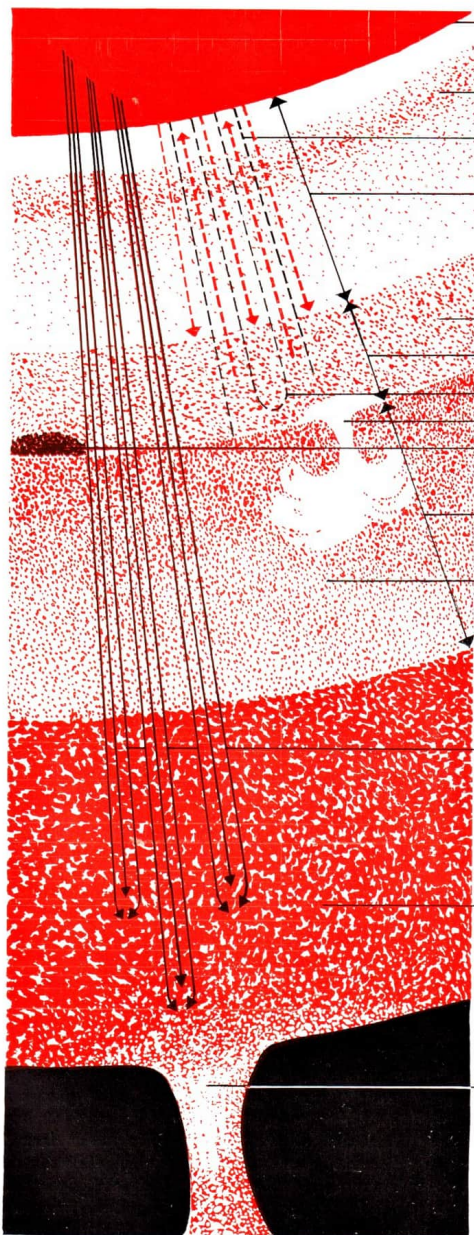
digkeiten von einigen hundert bis mehreren tausend Kilometern je Sekunde reicht, werden sehr energiereiche Teilchen (vornehmlich Protonen) mit nahezu Lichtgeschwindigkeit aus einem Eruptionsgebiet herausgeschleudert. Sie bilden die „solare Komponente“ der allgemein aus dem kosmischen Raum kommenden „Kosmischen Strahlung“, die ebenfalls in vielfältige Wechselwirkungen mit der Erdatmosphäre gerät. Angesichts dieser großen Zahl unterschiedlicher Verknüpfungen beginnt man zu ahnen, vor welchen ungewöhnlichen Schwierigkeiten die Wissenschaft steht, wenn sie das komplizierte geophysikalische Gesamtgeschehen aufklären will.

Erst wenn also einigermaßen hinreichende Kenntnisse über die Physik der Sonne vorliegen, wird man auch manche Probleme der Geophysik besser oder sogar vollständig lösen können. Aus diesen und anderen Gründen nimmt die Sonnenforschung eine bedeutende Stellung in der kosmischen Physik ein. So wurde das Internationale Geophysikalische Jahr deswegen in den Zeitraum 1957/58 gelegt, weil man alle solaren und solarerterrestrischen Zusammenhänge erstmalig während eines Aktivitätsmaximums der Sonne in größerem Maßstab erfassen wollte. Aus den gleichen Erwägungen heraus wurde dann das nächste große internationale Forschungsvorhaben für den Zeitraum 1964/65 vereinbart, um damit die Untersuchungen auf die Periode eines Minimums der Sonnenaktivität auszudehnen. Dies kam auch in der Bezeichnung „Jahre der ruhigen Sonne“ zum Ausdruck. Mit allen Hilfsmitteln der modernsten Beobachtungstechnik ging man den Geheimnissen der Sonne nach. Außer Spezialfernrohren und automatischen Meßgeräten in Raketen, künstlichen Satelliten und Raumsonden wurden auch radioastronomische Geräte in verstärktem Maße verwendet, da sich in der Vergangenheit die Untersuchung der solaren Radiostrahlung als wertvoller Wegweiser für das Verständnis zahlreicher physikalischer Probleme im Bereich der Sonnenatmosphäre erwies.

Die Sonne als Radiostrahler

Während der geringsten Sonnenaktivität (Fleckenminimum) kann man von der Sonne eine recht gleichmäßige und in der Wellenlängenverteilung kontinuierliche Radiostrahlung empfangen. Die Intensität dieser „ungestörten“ solaren Radiostrahlung ist allerdings ebenso wellenlängenabhängig wie die kontinuierliche Lichtstrahlung der Sonne. Auch der Ursprung ist bei beiden Strahlungsbereichen ähnlich: Er ist in den Strahlungseigenschaften der äußeren Partien des Sonnenkörpers zu suchen. Die Radiostrahlung wird dabei in einem Wellenlängenbereich von 15 m (20 MHz) bis zu etwa 1 cm (30 000 MHz) beobachtet. Eine besonders erwähnenswerte Eigenschaft der solaren Radiostrahlung besteht darin, daß die verschiedenen Wellenlängen aus unterschiedlichen Tiefen der Sonnenatmosphäre zu uns dringen. So zeigt sich beispielsweise, daß man im Zentimeterwellenbereich eine Strahlung empfängt, die ebenso wie das sichtbare Licht aus der Photosphäre kommt, wogegen Strahlungen von etwa 50 cm Wellenlänge an aufwärts nur noch aus der inneren Korona zu uns gelangen können. Dadurch erfassen Radioteleskope im Meterwellenbereich eine „Radio Sonne“, die wesentlich größer und bizarrer geformt ist als die normale Lichtsonne. Gäbe es Lebewesen mit „Radioaugen“, so kämen diese zu einem völlig anderen Eindruck von der Sonne als wir.

Die gleichförmige und ungestörte Radiostrahlung der Sonne wird in zeitlich wechselnder Stärke durch eine zusätzliche Strahlungskomponente überlagert, die eng mit den verschiedensten Erscheinungen der Sonnenaktivität zusammenhängt. Diese Strahlung der „gestörten“ Sonne zeigt eine innerhalb von mehreren Tagen schwankende Intensität. Es können aber auch plötzlich sehr intensive Strahlungsausbrüche auftreten, die nur Stunden, Minuten oder gar wenige Sekunden andauern. Im Sprachgebrauch der Radioastronomie



1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14



werden derartige Strahlungsausbrüche als „bursts“ bezeichnet. Die weniger heftigen täglichen Schwankungen erfaßt man vor allem im Zentimeterwellenbereich. Sie stimmen bemerkenswert gut mit der Fleckenrelativzahl überein, so daß man auch bei bewölktem Himmel allein aus den radioastronomischen Beobachtungen Anhaltspunkte für die Fleckentätigkeit der Sonne gewinnen kann. Die „bursts“ dagegen zeigen bevorzugt einen Zusammenhang mit den chromosphärischen Eruptionen, wenn auch nicht in jedem Fall ein „burst“ eine Eruption voraussetzt. Die Intensität derartiger Strahlungsausbrüche kann jedoch so stark ansteigen, daß sie sich sogar mit einem normalen UKW-Empfänger nachweisen läßt. Die Registrierung der bei einem „burst“ frei

werdenden Strahlung bietet eine gute Möglichkeit, die Vorgänge in der Sonnenatmosphäre zu untersuchen. Es hat sich herausgestellt, daß derselbe Strahlungsausbruch (optisch angezeigt durch eine chromosphärische Eruption) in verschiedenen Radiofrequenzbereichen auch zu unterschiedlichen Zeiten auf der Erde registriert wird. Dabei wird zuerst ein intensiver Intensitätsanstieg beispielsweise auf 200 MHz (1,5 m) beobachtet, dem etwa zwei Minuten später ein analoger Anstieg auf 100 MHz (3 m) und schließlich mit etwa 6 Minuten Verzögerung bei 60 MHz (5 m) folgt. Aus dem zu diesen Wellenlängen gehörenden Höhengniveau innerhalb der Korona läßt sich schließen, daß die Quelle der Radiostrahlung beweglich sein muß und daß sie sich mit einer Geschwindigkeit

von rund 500 km/s von der Sonnenoberfläche entfernt hat. Mit großen Radiointerferometern, deren Auflösungsvermögen sehr hoch ist, läßt sich dieses Wandern einer Radioquelle in der Sonnenkorona sogar direkt beobachten. Den inneren Mechanismus dieser Erscheinungen bis in alle Einzelheiten aufzuklären ist noch nicht befriedigend gelungen. Sicher dürfte jedoch sein, daß bei der Entstehung der wandernden „burst“-Quellen die schon früher erwähnten Hyperschallstößen aus der Photosphäre und der Chromosphäre eine ausschlaggebende Rolle spielen.

„Atomofen“ Sonne

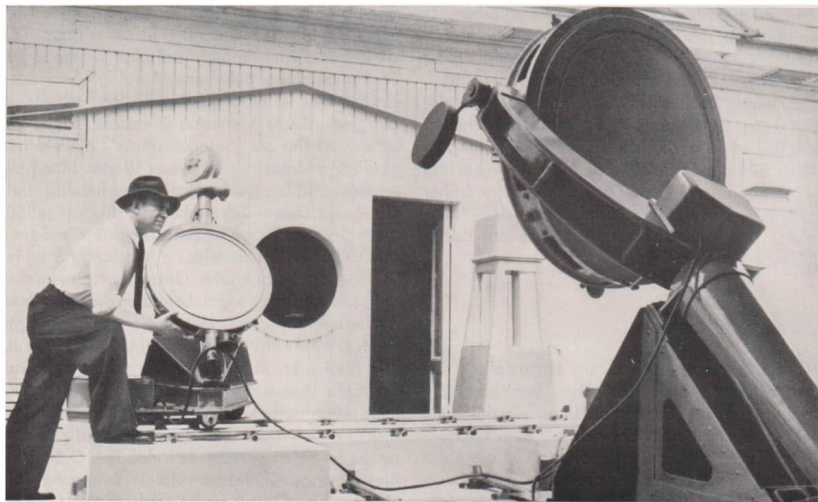
Wenden wir uns nach dieser kurzgefaßten Exkursion durch die wichtigsten Beobachtungserfahrungen der Sonnenforschung abschließend dem Problemkreis zu, der sich mit dem Energiemechanismus der Sonne beschäftigt! Alle auf der Sonne beobachtbaren Erscheinungen und Vorgänge, gleichgültig ob sie normal sind oder Störungen darstellen, können nur Ausdruck gewisser energetischer Prozesse im Inneren des Sonnenkörpers sein. Bisher konnten allerdings die Erkenntnisse über die Struktur des Sonnenkörpers und der in seinen Tiefen ablaufenden Prozesse nur durch indirekte Methoden oder theoretische Überlegungen gewonnen werden. Dennoch haftet dem Gesamtbild ein hohes Maß von Zuverlässigkeit an. Lediglich in einigen Details und vor allem bei den feinsten Einzelheiten werden sich in der Zukunft sicher noch gewisse Änderungen ergeben. Es erübrigt sich daher auch, auf alle theoretischen Varianten der Physik des Sonnenkörpers einzugehen. Für unsere Betrachtungen hier dürfte es ausreichend sein, sich mit den wichtigsten, allgemeinen Forschungsergebnissen vertraut zu machen.

Um sich von der gewaltigen Energieausstrahlung der Sonne eine Vorstellung zu verschaffen, muß

man davon ausgehen, daß in Erdentfernung von der Sonne (rund 150 Millionen km) immer noch etwa 1,4 kW Strahlungsenergie auf eine senkrecht zur Sonnenstrahlung gehaltene, 1 m² große Fläche einfällt. Das ist etwa gleichbedeutend mit einem Energiedurchsatz von rund 2 cal/cm² min. Man bezeichnet ihn als „Solarkonstante“, obwohl geringfügige Unterschiede dieses Wertes innerhalb der Beobachtungsgenauigkeit wahrscheinlich sind; die gemessenen Schwankungen liegen jedoch unter 1 Prozent und sagen aus, daß die Sonne somit als ziemlich zuverlässig konstanter Strahler (für die durchschnittliche Gesamtenergieabgabe) angesehen werden kann. Legt man die genannten Zahlen zugrunde, so strahlt die Sonne eine Energie von fast 400 Trilliarden Kilowatt ($400 \cdot 10^{21}$ kW) aus! Wie die Untersuchungen an Versteinerungen auf der Erde beweisen, gibt aber die Sonne schon mindestens seit mehr als einer Milliarde Jahren ihre Energie unverändert in den kosmischen Raum ab. Es ist daher verständlich, daß das Geheimnis dieser ungewöhnlichen Naturerscheinung die Physiker schon seit über einhundert Jahren außerordentlich beschäftigt. Aber erst der modernen Kernphysik blieb es vorbehalten, eine Lösung für dieses kosmische Rätsel zu finden.

Wie gewaltig der Energievorrat der Sonne sein muß, zeigen schon einfache Vergleichsrechnungen. So würde die vollkommene Verbrennung einer aus bester Kohle bestehenden Kugel von der Masse der Sonne die geforderte Energieausstrahlung bestenfalls für etwa 8000 Jahre decken können.

Mitte des vorigen Jahrhunderts taten die Physiker Hermann von Helmholtz (1821–1894) und Lord William Kelvin (1824–1907) einen ersten Schritt auf dem Wege physikalisch ernstzunehmender Erklärungen der Energieerzeugung in der Sonne. Sie wiesen darauf hin, daß sich die Sonne durch ständige Zusammenziehung aufheizen könne, wobei die enorme Gravitationswirkung der Sonnenmasse die Kontraktion des Sonnengases bewirken würde. Diese Deutung kam in manchem



dem tatsächlichen Sachverhalt nahe, obwohl eine reine Kontraktion den Energiebedarf der Sonnenstrahlung nur für 20 bis 30 Millionen Jahre decken könnte.

Die gewaltige Gravitationskraft der Sonnenmaterie ist jedoch in der Tat für das Geschehen im Sonneninneren bedeutsam. Sie ist eine Gegenkraft zu dem von innen nach außen wirkenden Gasdruck der Sonnenmaterie und sorgt für ein Gleichgewicht, das dem Sonnenkörper zu einem dauerhaft stabilen Zustand verhilft. Dabei wird der Gasdruck im Sonneninneren zusätzlich noch durch den „Strahlungsdruck“ verstärkt. Bisher wurde immer nur einfach von Energieerzeugung und -abstrahlung gesprochen. Aus der Physik ist aber bekannt, daß Strahlung auch einen mechanischen Druck auszuüben vermag. Die Intensität

dieses „Strahlungsdruckes“ ist von der Energie der Strahlung und deren Dichte abhängig. Bei sehr massereichen Fixsternen kann der Strahlungsdruck sogar eine mit dem Gasdruck vergleichbare Größe erreichen. Im Sonneninneren ist der Strahlungsdruck gegenüber dem Gasdruck allerdings von untergeordneter Bedeutung. Zwischen Kontraktion (Schwerkraft) und Expansion (Gasdruck) stellt sich also ein Gleichgewichtszustand ein. Daraus läßt sich berechnen, daß die Temperatur im Kerngebiet der Sonne etwa 15 Millionen Grad Kelvin betragen muß. Nur bei dieser enormen Temperatur können Gas- und Strahlungsdruck die ungeheure Schwerkraft im Sonneninneren ausgleichen. Das Zusammenwirken dieser Kräfte ergibt für die Dichte der Sonnenmaterie im Kern einen Wert, der etwa einhundertmal größer

ist als die Dichte des Wassers auf der Erde. Schon eine Stoffmenge aus dem Sonnenkern, die in einer Streichholzschatel untergebracht werden kann, würde einer Masse von etwas mehr als einem Kilogramm entsprechen.

Zur Erklärung der gewaltigen Energieentwicklung in der Sonne kamen die Physiker Hans Albrecht Bethe (geb. 1906) und Carl Friedrich von Weizsäcker (geb. 1912) im Jahre 1938 auf den entscheidenden Gedanken. Sie fanden, daß nur die in den Atomkernen der Materie gefesselten Kräfte den enormen Energiebedarf der Sonnenausstrahlung und ihre bewundernswerte Konstanz über Jahrmilliarden hinweg zu erklären vermögen. Das von Albert Einstein formulierte Prinzip der Gleichwertigkeit von Energie E und Masse m ($E = m \cdot c^2$, c = Lichtgeschwindigkeit) bildete dabei den eigentlichen Schlüssel ihrer Erkenntnis. Danach entspricht ein einziges Gramm Masse der phantastischen Energiemenge von rund 25 Millionen Kilowattstunden. Jedoch werden die Atomkerne auch im Inneren der Sonne nicht vollständig in Strahlungsenergie umgewandelt. Es genügt völlig, wenn nur ein kleiner Teil der einzelnen Atommassen umgewandelt wird, um die beobachtete Gesamtenergie freizusetzen.

Wie wird nun diese Energie freigesetzt? Bei der Umwandlung von Atomkernen eines leichteren Elementes in die eines schwereren entstehen „Massendefekte“, das heißt Unterschiede in den Atomgewichten zwischen Ausgangs- und Endprodukt. Die „verloren“ gegangene Masse tritt als freiwerdende Energie in Erscheinung. Auf der Suche nach einem im Inneren der Sonne möglichen Kernumwandlungsprozeß fanden Bethe und Weizsäcker zunächst einen Umwandlungszyklus, in dem über mehrere Zwischenstationen aus vier Wasserstoffatomkernen ein Heliumatomkern aufgebaut wird. Der bei diesem Fusionsprozeß anfallende Massendefekt zwischen den vier Wasserstoffkernen und dem einen Heliumkern ergibt je Kilogramm Wasserstoff eine Energiemenge von

180 Millionen Kilowattstunden. Da in dem Bethe-Weizsäcker-Zyklus Kohlenstoff- und Stickstoffatome als Umwandlungsträger mitwirken, bezeichnet man ihn auch als „Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus“. Wie sich aber bald zeigte, kann bei der Temperatur im Sonneninneren dieser Prozeß nur eine untergeordnete Rolle für die Energieerzeugung spielen. Im wesentlichen entsteht die Energie in der Sonne durch einen Umwandlungsprozeß, in dem Protonen – also Wasserstoffatomkerne – unmittelbar miteinander reagieren und Heliumatomkerne aufbauen. Ganz allgemein überwiegt in Sternen mit mehr als zwei Sonnenmassen der Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus, in den masseärmeren Sternen und im Kern weniger heißer Objekte – wie in der Sonne – dagegen die Proton-Proton-Reaktion.

Vom Entstehungsmechanismus der Sonnenenergie kommt man also ganz folgerichtig zu der Frage nach der chemischen Zusammensetzung der Sonne und ihrem allgemeinen Aufbau. Für die erwähnten Kernumwandlungsprozesse wird offensichtlich das Vorhandensein bedeutender Mengen Wasserstoff in der Sonne gefordert, und als „Asche“ dieser „Verbrennung“ müßten sich größere Mengen Helium in der Sonne nachweisen lassen. Das trifft in der Tat zu, wie spektroskopische Untersuchungen ergaben. In abgerundeten Prozentzahlen besteht die Sonne aus etwa 63 Prozent Wasserstoff, 36 Prozent Helium und 1,4 Prozent restlicher Elemente, unter denen Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff, Magnesium, Silizium, Kalzium und Eisen noch am häufigsten sind. Die Sonne ist also eigentlich eine gewaltige glühende Wasserstoffkugel wie übrigens auch die meisten der nächtlich zu beobachtenden Fixsterne.

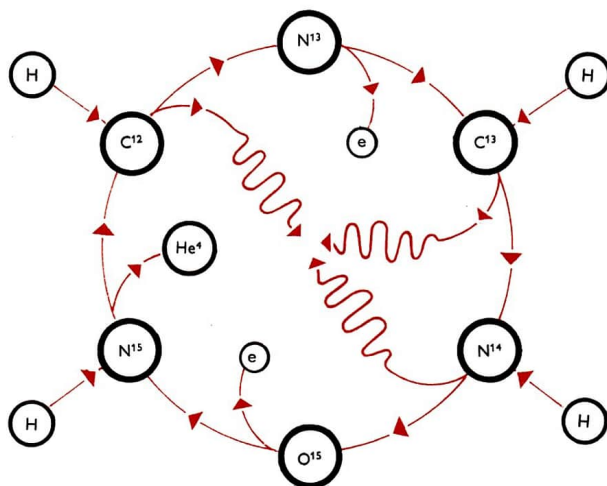
Aber nicht nur in den Atmosphären ferner Fixsterne sind die Elemente in einem ähnlichen Häufigkeitsverhältnis anzutreffen wie in der Sonne, sondern darüber hinaus deutet auch die Zusammensetzung der kosmischen Ultrastrahlung – das sind Atomteilchen, die aus allen Richtungen

des Weltraumes mit annähernd Lichtgeschwindigkeit auf die Erde treffen – ein annähernd gleiches Verhalten der beteiligten Atomkerne an. Daraus läßt sich schließen, daß die chemischen Elemente überall im Bereich des unseren Beobachtungen zugänglichen Weltraumes im wesentlichen der gleichen großräumigen Häufigkeitsverteilung unterliegen. Diese Feststellung untermauert die Vorstellung von der materiellen Einheitlichkeit des Weltaufbaues und der Gültigkeit grundlegender Naturgesetze bis in die fernsten Tiefen des kosmischen Raumes.

Der Bereich der energieerzeugenden Prozesse im Sonneninneren kann also nur dort sein, wo die Randbedingungen für den Ablauf der Kernumwandlungsprozesse vorhanden sind. Die wichtigsten Voraussetzungen für dauerhaft ablaufende Reaktionen zwischen Atomkernen sind aber in jedem

Fall hohe Temperaturen und große Materiedichten. Beide Bedingungen sind für die Sonne in ihrem Kerngebiet erfüllt, wo die Temperatur 15 Millionen Grad Kelvin und die Dichte rund 100 g/cm^3 erreicht. Dadurch wird ein hinreichend intensiver Kontakt zwischen den Reaktionspartnern möglich. Man nimmt an, daß die gesamte freiwerdende Energie aus einem Zentralgebiet der Sonne stammt, das nicht mehr als etwa ein Viertel des Sonnenradius erfaßt. Durch die große Dichte der Sonnenmaterie in diesem Gebiet sind dort jedoch rund 40 Prozent der gesamten Sonnenmasse konzentriert.

Die im Kerngebiet entstandene Strahlungsenergie in Gestalt von Röntgen- und der noch kurzwelligeren harten Gammastrahlung strömt im Sonnenkörper radial nach außen. Mit zunehmendem Abstand vom Sonnenmittelpunkt verändern



Aufbau der Sonne (schematisch).

- | | |
|---------------------------------|--------------------------|
| 1 Chromosphäre; | 7 untere Chromosphäre |
| 2 Photosphäre; | (spektroheliographisch); |
| 3 Brodelgebiet; | 8 obere Chromosphäre |
| 4 Gebiet des Energietransportes | (spektroheliographisch); |
| durch Röntgenstrahlung; | 9 Fackeln; |
| 5 Kernregion; | 10 innere Korona; |
| 6 Photosphäre | 11 Protuberanzen |
| im integralen Licht; | |



sich dabei die physikalischen Bedingungen des Sonnengases, die Temperatur wird langsam niedriger und die Dichte nimmt ebenfalls ab. In einem Mittelpunkt Abstand von knapp einem Dreiviertel des Sonnenradius beträgt die Temperatur nur noch etwa $130\,000\text{ }^{\circ}\text{K}$; die Dichte ist auf $0,07\text{ g/cm}^3$ zurückgegangen. Dadurch verändern sich die Gesamtbedingungen so weit, daß der Energietransport nicht mehr allein von der Strahlung bewältigt werden kann. Von dieser Mittelpunktentfernung an bis hinauf zur Sonnenoberfläche beginnt daher die Sonnenmaterie wie Wasser in einem Teekessel zu brodeln. Sie transportiert durch die Strömungsbewegung („Konvektion“) Wärme- und Strahlungsenergien an die Sonnenoberfläche. In der „Konvektionszone“ sinkt dann die Temperatur des Sonnengases auf die bekannte Oberflächentemperatur von rund $5800\text{ }^{\circ}\text{K}$ ab. Die Materiedichte geht auf etwa $0,01\text{ g/cm}^3$ zurück. In der Oberflächenschicht der Photosphäre geht das ungeordnete Brodeln schließlich in die Zirkulationsströmung der einzelnen Granulationszellen über. Aus der Photosphäre gelangt die Sonnenenergie endlich, zum überwiegenden Teil in Form elektromagnetischer Wellenstrahlung, in den kosmischen Raum und zur Erde.

Das von den Sonnenphysikern entworfene Modell des Sonnenaufbaues ist natürlich in seinen Einzelheiten noch viel komplizierter. Außerdem ist man in manchen Details unterschiedlicher Ansichten. Aber das hier in groben Zügen skizzierte Bild der Sonne als gigantischer „Atomofen“, dessen Strahlungskraft alles auf der Erde Vorstellbare weit übertrifft, dürfte wohl hinreichen, um die grundlegenden physikalischen Zusammenhänge zwischen Sonne und Erde zu verdeutlichen. Besondere Aufmerksamkeit ist grundsätzlich allen Erscheinungen zu widmen, die als Störungen des normalen Strahlungshaushaltes der Sonne aufzufassen sind. In immer stärkerem Maße setzt sich die Erkenntnis durch, daß gerade sie den Hauptbeitrag zu komplizierten Rückwirkungen auf die geophysikalischen

Bedingungen liefern. In diesem Zusammenhang verdient nun ganz besondere Beachtung, daß die Sonne nicht nur Quelle elektromagnetischer Wellenstrahlung verschiedenster Frequenzen ist, sondern vornehmlich aus den Störungsgebieten auch Wolken und Ströme von elektrisch geladenen Materieteilchen in den kosmischen Raum sendet.

Es genügt daher nicht, nur die von den Wechselwirkungen zwischen solarer Wellenstrahlung und Erdatmosphäre abhängigen Einflüsse auf das Erdgeschehen zu beachten. Man muß bei den „solarerterrestrischen Beziehungen“ noch einen Komplex physikalischer Vorgänge zwischen Materieteilchen in der Hochatmosphäre sowie außerhalb davon und darüber hinaus magnetische Erscheinungen im Inneren der Erde berücksichtigen. Erst dann läßt sich die ganze immense Vielfalt der außerirdischen oder konkreter, der solaren Einflüsse auf den Gesamtmechanismus der Erdatmosphäre, einschließlich ihres „Wetters“, vollständig erfassen. Zur Zeit steht die Wissenschaft allerdings noch ganz am Anfang dieses Weges. Es wird jedoch immer deutlicher, daß das geophysikalische Geschehen mit all seinen Rückwirkungen auf das menschliche Dasein nur dann voll verstanden werden kann, wenn man es im Rahmen einer umfassenden kosmischen Physik betrachtet. Wie die jüngsten Erfahrungen gezeigt haben, werden dabei vor allem physikalische Untersuchungen in der irdischen Hochatmosphäre und im daran anschließenden erdnahen kosmischen Raum eine wichtige Rolle spielen.

Um diese Feststellung zu erhärten und unsere früheren Betrachtungen über Eigenschaften und Aufbau der Erdatmosphäre zu erweitern, wollen wir uns zunächst etwas näher mit den wichtigsten, teilweise schon länger bekannten wissenschaftlichen Erfahrungen über die Hochatmosphäre der Erde bekannt machen. In diesem irdischen „Vorzimmer zum Weltraum“ enden viele der Bahnen, auf denen Strahlungsenergie und Materieteilchen die Sonne verlassen haben.

Vorzimmer zum Weltraum

Es gehörte zweifellos noch bis vor wenigen Jahrzehnten zu den bemerkenswertesten wissenschaftlichen Kuriositäten, daß man zwar über die physikalischen Gegebenheiten in fernen und fernsten Tiefen des kosmischen Raumes schon recht brauchbare Vorstellungen und Kenntnisse besaß, über die physikalischen Vorgänge und Beziehungen in der viel näher gelegenen irdischen Hochatmosphäre jedoch kaum zu einem befriedigenden Bild gelangt war. Über die Bedingungen oberhalb von 10 bis 15 km Höhe gab es bis weit in unser Jahrhundert hinein vielfach nur Hypothesen und manchmal sogar sehr vage Vermutungen. Dies hatte man nicht zuletzt darauf zurückzuführen, daß das Beobachtungsmaterial trotz aller Bemühungen recht unvollständig geblieben war. Der tiefere Grund lag einfach darin, daß die Hochatmosphäre (Stratosphäre, Mesosphäre, Ionosphäre, Exosphäre) für direkte Messungen entweder kaum oder nur schwer zugänglich ist.

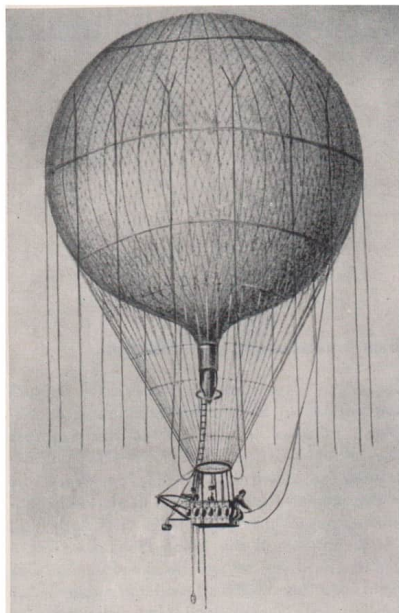
Die Steighöhen für aerodynamische und aerostatische Flugkörper sind begrenzt. Auch für die neuerdings eingesetzten raketengetriebenen Meßgeräteträger ist der Aufenthalt in dem außerordentlich interessanten Bereich von 50 bis 150 km Höhe zeitlich beschränkt. So kommt es, daß die Wissenschaftler mit den Informationsmöglichkeiten aus diesem erdnächsten Teil des kosmischen Raumes noch längst nicht zufrieden sind, zumindest soweit es sich um direkte Untersuchungen oder Messungen handelt. Der Umweg über indirekte Forschungsmethoden und Sekundärerscheinungen – Funkwellenausbreitung und Polarlichtuntersuchungen seien als Beispiele genannt – vermag nicht alle diese Lücken zu schließen. Mit dem Verfahren der gegenseitigen Ergänzung beider Wege zur Erforschung des „Vorzimmers zum Weltraum“ sowie den wichtigsten dabei erzielten Ergebnissen wollen wir uns jetzt beschäftigen. Wobei jedoch feststeht, daß diese Methoden auch weiterhin Beiträge liefern, die sie neben den modernsten direkten Wegen unentbehrlich machen.

Erste Erkundungen im Freiballon

Den ersten wissenschaftlich begründeten Versuch zum Vorstoß in höhere Schichten der Erdatmosphäre machten im Jahre 1784 der Franzose Jean Pierre Blanchard (1753–1809) und der amerikanische Arzt John Jeffries. Wenn die beiden kühnen Aeronauten bei ihrem Freiballonaufstieg mit 2740 m Gipfelhöhe auch noch nicht einmal annähernd die halbe Höhe der Troposphäre erreichten, so war für die damalige Zeit allein schon beachtenswert, daß Jeffries bei diesem Aufstieg erste bescheidene wissenschaftliche Informationen zu gewinnen suchte. Er maß die Temperatur in verschiedenen Höhen und beobachtete die Luftströmungen, um die Theorie der Winde zu verbessern. Der Freiballon blieb dann auch weiterhin bis in die ersten Jahrzehnte unseres Jahrhunderts hinein das einzige Hilfsmittel, Meßgeräte und Beobachter in immer größere Höhen über der Erdoberfläche zu befördern.

Als man in Höhen über 7000 m vorzustoßen begann, mußte man natürlich auch die Versorgung mit Atemluft gewährleisten. Immerhin hatte der Aufstieg von Gaston Tissandier, Sivel und Crocé-Spinelle am 15. April 1875 mit dem Ballon „Zenith“ aus diesem Grunde ein tragisches Ende genommen. Da ihnen künstliche Atmungs-hilfsmittel nicht zur Verfügung standen, wurden die drei Forscher in etwa 7500 m Höhe von einer Ohnmacht befallen. Nach dem Absinken des Ballons in tiefere Regionen konnte sich nur Tissandier wieder erholen, verlor aber sein Gehör. Seine beiden Reisegefährten fanden den Tod.

Nachdem dann A. Berson mit dem Ballon „Majestic“ am 4. Dezember 1895 die Höhe von 9155 m erreicht hatte, schien es zunächst so, als sei damit für bemannte Ballone das Optimum erreicht. Bei einem Aufstieg Bersons und Sürings im Jahre 1901 wurde zwar erstmalig die 10000-Meter-Grenze überschritten (10800 m). Aber auch bei diesem Versuch wurden beide Ballonfahrer ohn-



mächtig. Berson hielt 22 Jahre lang den absoluten Höhenrekord. Erst im Jahre 1923 übertraf der Franzose Sadi-Lecointe mit einem Flugzeug die Rekordmarke, er gewann 11 145 m Höhe. Trotz dieser Bemühungen blieb man mit bemannten Luftfahrzeugen immer noch im Bereich der Troposphärenobergrenze. Den direkten physikalischen Messungen war somit die untere Stratosphäre noch nicht zugänglich, von der eigentlichen Hochatmosphäre ganz zu schweigen. Der Gedanke, unbemannte und damit unter Umständen wesentlich steigfähigere Ballone (Ballonsonden) als Träger automatischer Meßgeräte zu verwenden, wurde erst lange nach den Aufstiegen Bersons verwirklicht. Zunächst mußte die Meßgeräte- und Meßwertübertragungstechnik einen entsprechenden Entwicklungsstand erreicht haben.

Geheimnisvolle Höhenstrahlung

Die Bemühungen um ein Vordringen in immer größere Höhen wurden aber nicht nur von dem prinzipiellen Anliegen der Wissenschaftler, den Aufbau der höheren Atmosphäre kennenzulernen,

gefördert. Um die Jahrhundertwende kam eine völlig neue Triebfeder hinzu: Einige Wissenschaftler glaubten, aus Beobachtungen an der Erdoberfläche und in deren unmittelbaren Nachbarschaft den Schluß ziehen zu können, daß aus großen Höhen ständig eine ganz besondere Art von Strahlung herniederprasselt. Diese Strahlung ähnelte teilweise den zu dieser Zeit bei atomphysikalischen Versuchen gerade entdeckten Strahlungen. Das Interesse an dieser sonderbaren Naturerscheinung war natürlich sehr groß, ihre Herkunft blieb jedoch zunächst unklar. Während sich einige Forscher nur darauf beschränkten, sie einfach als „Höhenstrahlung“ zu bezeichnen, taten andere mit dem Namen „Kosmische Strahlung“ schon einen bedeutsamen Vorgriff auf die endgültige Deutung dieser Erscheinung. Ganz allgemein ergaben sich aber aus dem ständig wachsenden Interesse für die Kosmische Strahlung außerordentlich anregende Impulse zum direkten Vorstoß in immer größere Höhen.

Nach der grundlegenden Entdeckung der deutschen Physiker J. Elster und H. Geitel sowie des Engländers C. T. R. Wilson (1869–1959) im Jahre 1900, daß sich Luft in geschlossenen Ionisationsmeßkammern nicht wie ein Isolator verhält, sondern offenbar unter der Wirkung einer noch unbekannten Strahlung eine gewisse Leitfähigkeit bekommt, begann man nach der Herkunft dieser Strahlung zu suchen. Es bereitete anfänglich große Schwierigkeiten, aus den in den Meßapparaturen auftretenden Effekten den Anteil einer möglichen kosmischen Komponente dieser Strahlung herauszufinden. Der einzige Hinweis auf das Vorhandensein einer außerirdischen Komponente lag zunächst in der großen Durchschlagskraft, der „Härte“, eines gewissen Strahlungsanteils, die nicht durch die Annahme einer natürlichen radioaktiven Strahlungsquelle im Bereich der Erdoberfläche erklärt werden konnte. Eine endgültige Entscheidung über die Herkunft der durchdringenden Strahlung konnten aber erst

Messungen erbringen, die bei Ballonaufstiegen angestellt wurden. Lag die Strahlungsquelle am Erdboden oder in der bodennahen Atmosphäre, so mußte die Strahlungsintensität mit der Höhe abnehmen, bei außerirdischem Ursprung mußte sie dagegen mit zunehmender Höhe anwachsen. Schwierigkeiten mit den Meßmethoden und den verwendeten Apparaturen gestalteten jedoch auch diesen Weg nicht einfach. Es kam zunächst zu sehr widersprüchlichen Meßreihen. Aber die von dem Österreicher Viktor Franz Hess (1883–1964) bei einem Aufstieg im Jahre 1911 (1070 m) gewonnenen Ergebnisse sprachen schließlich doch für einen extraterrestrischen Ursprung der durchdringenden Strahlung. Die letzten Zweifel an der Deutung dieser Untersuchungen beseitigte dann W. Kohlhörster, der mit einem verbesserten Instrumentarium im Ballon bis auf 9300 m stieg und insgesamt fünf derartige Aufstiege unternahm. Auch andere Forscher bestätigten immer überzeugender diesen Befund. Von Jahr zu Jahr vervielfachte sich die Zahl der wissenschaftlichen Arbeiten, die sich mit dem Problem „Kosmische Strahlung“ beschäftigten. Heute stellt es eines der wichtigsten Teilgebiete innerhalb der modernen Kernphysik dar. Nachdem die Frage der extraterrestrischen Herkunft zunächst prinzipiell gelöst war, interessierten sich die Physiker vor allem für die Natur und die Eigenschaften dieser außergewöhnlichen Strahlungserscheinung. In den ersten Überlegungen und Untersuchungen suchte man, die durchdringende Höhenstrahlung als sehr energiereiche Wellenstrahlung (Gammastrahlung) zu betrachten. Die Entdeckung der Partikelnatur der Kosmischen Strahlung war daher von ebenso großer Bedeutung wie die Feststellung, daß man außerdem zwischen einer Primär- und einer Sekundärstrahlung unterscheiden müsse. Die Entstehung der Sekundärstrahlung konnte dabei schon als Folge der Wechselwirkungen zwischen den Partikeln der Primärstrahlung und den Gasatomen der Hochatmosphäre gedeutet werden.

Gerade diese Wechselwirkungen zwischen ungewöhnlich energiereichen Strahlungsteilchen und Atomkernen der Erdatmosphäre fanden seither das meiste Interesse der Kernphysiker. Sie boten außergewöhnliche Möglichkeiten, die Kernkräfte und die Eigenschaften der Kernbausteine zu studieren. Zahlreiche der heute bekannten Kernteilchen und Elementarbausteine wurden bei der Untersuchung der Kosmischen Strahlung entdeckt. Um ähnlich energiereiche Teilchenstrahlungen künstlich zu erzeugen, muß in den Kernforschungslaboratorien ein ganz beträchtlicher energetischer und technischer Aufwand getrieben werden. Außerdem überschreiten die im Einzelfall bei kosmischen Strahlungsteilchen auftretenden Energien auch heute noch bei weitem alle in irdischen Laboratorien gegebenen Möglichkeiten. Die ungewöhnlich hohen Energien einzelner Strahlungsteilchen haben häufig eine besondere Folgeerscheinung, die man als „Schauerbildung“ bezeichnet. Dabei zerschlagen die aus dem extraterrestrischen Raum kommenden Primärteilchen den Kern eines Gasatoms mit solcher Wucht, daß gleich ein Schwarm (Schauer) von Kernsplintern entsteht. Man hat schon Schauer registriert, in denen mehrere hundert, ja in einzelnen Fällen sogar Tausende von Kerntrümmern, anzutreffen waren. Die Schauerteilchen können ihrerseits weitere Schauer auslösen, eine Erscheinung, die man „Kaskadenbildung“ (Kaskadenschauer) nennt. In Kaskadenschauern findet man ausschließlich Elektronen als Sekundärteilchen, während bei anderen Reaktionen zumeist die sogenannten „Mesonen“ entstehen. Bei den Primärteilchen handelt es sich in der überwiegenden Mehrzahl um schnellfliegende Protonen, also Wasserstoffatomkerne. Daneben gibt es auch Atomkerne schwererer Elemente, die keine Elektronenhülle mehr besitzen, und zwar bemerkenswerterweise etwa in der schon erwähnten Häufigkeitsverteilung der Elemente im Kosmos. Nur ein verschwindender Bruchteil der primären Strahlungsteilchen gelangt zur Erdober-

fläche, alle anderen bleiben in der Hochatmosphäre stecken. Die durchdringende Strahlung an der Erdoberfläche besteht also fast ausschließlich aus Sekundärteilchen. Diese können schließlich nicht nur bis zur Erdoberfläche, sondern sogar bis über 1000 m tief in den Erdboden oder unter den Meeresspiegel vordringen.

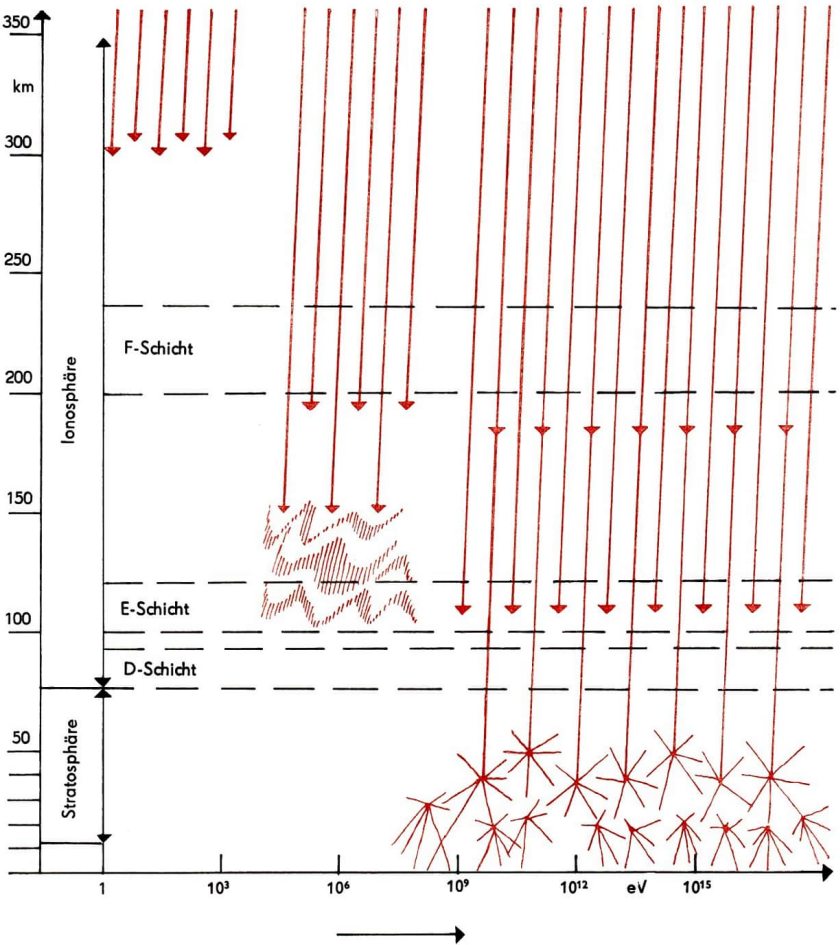
Die Erdatmosphäre spielt somit in diesem Wechselgeschehen eine bedeutsame Rolle, und zwar einerseits als Strahlungsschirm und Bremssubstanz gegenüber der kosmischen Primärstrahlung, andererseits aber auch als kernphysikalisches Großlaboratorium zum Studium von Kernumwandlungsprozessen. An die Einwirkung der Sekundärstrahlung hat sich freilich das organische Leben auf der Erde schon längst in vollem Umfang angepaßt. Die energetischen Rückwirkungen der Kosmischen Strahlung auf die Erdatmosphäre sind dem Absolutbetrag nach nur sehr gering, da die Teilchen- und Reaktionsdichte im Verhältnis zur Masse der atmosphärischen Gase viel zu klein ist, um beispielsweise in der unteren Atmosphäre größere Effekte zu erzielen.

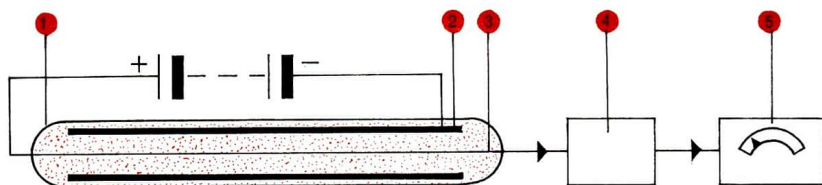
Diese Bemerkung gilt jedoch lediglich für die „echte“ Kosmische Strahlung, die wirklich aus den Tiefen des kosmischen Raumes kommend, als Primärstrahlung mit gleicher Intensität und aus allen Richtungen, zur Erde gelangt. Es gibt jedoch, wie bereits erwähnt, eine kosmische Teilchenstrahlung, die zusätzlich zu der genannten Strahlung im Raum um die Erde anzutreffen ist und die ihren Ursprung in der Sonne hat. Diese Strahlung bezeichnet man als solare Partikelstrahlung. Nach neueren Untersuchungen kommt dieser Komponente der kosmischen Teilchenstrahlung besondere Beachtung zu. So scheint sich der Energietransport von der Sonne zur Erde nicht allein durch Wellenstrahlung zu vollziehen, wie man noch bis vor wenigen Jahren annahm, sondern in einem beachtlichen Umfang auch durch diese Teilchenstrahlung. Die Wechselwirkungen mit der Hochatmosphäre können dabei sehr intensiv sein.

Werkzeuge der Strahlungsforschung

Für die ersten Untersuchungen der aus dem Kosmos zur Erde gelangenden Teilchenstrahlungen dienten sogenannte „Ionisationskammern“. Ihr schematischer Aufbau zeigt einen gasgefüllten Behälter, in dem sich aufgeladene Kondensatorplatten gegenüberstehen. Das eingeschlossene Gas wird von der hindurchtretenden Strahlung ionisiert und damit elektrisch leitend, so daß sich der Kondensator langsam entladen kann. Aus diesem Entladungseffekt lassen sich dann Rückschlüsse auf die Eigenschaften der ionisierenden Strahlung gewinnen. Später kam das 1928 von Hans Geiger (1882–1945) und W. Müller erfundene „Geiger-Müller-Zählrohr“ oder kurz „Zählrohr“ zum Instrumentarium des Strahlungsforschers hinzu. Dieses Gerät hat mit der Ionisationskammer eine gewisse Ähnlichkeit. Es besteht im Prinzip aus einem gasgefüllten Zylinder, mit einer in der Zylinderachse verlaufenden und von der Zylinderwandung isolierten Drahtelektrode. Der Druck des Füllgases ist allerdings wesentlich geringer als bei einer Ionisationskammer. Zwischen Zählrohrwandung und Drahtelektrode legt man eine Spannung von mehr als 1000 V. Wird das Zählrohr von einem Strahlungsteilchen getroffen, so entsteht in der Drahtelektrode ein kurzer Stromstoß, der als elektrischer Impuls von einer besonderen Zählapparatur aufgenommen wird. Durch besondere räumliche Anordnungen und raffinierte Schaltungen kann man mehrere dieser Zählrohre auch zu einem sogenannten „Zählrohrteleskop“ vereinigen. Mit seiner Hilfe lassen sich die Richtungen der ankommenden Teilchen sowie andere Auswahleffekte bestimmen.

Als außerordentlich wertvolles Hilfsmittel für die Untersuchung kosmischer Strahlungen erwies sich eine Erfindung des schon genannten schottischen Physikers Wilson. Mit der nach ihm benannten „Wilsonschen Nebenkammer“ kann man sogar die Bahnen einzelner Strahlungsteilchen sichtbar





machen. Man nutzt dabei die „Kondenssstreifen“-Bildung aus, zu der die ionisierenden Strahlungen in wasserdampfübersättigter Luft Anlaß geben. Am Anfang konnte man die feinen Nebelspuren der Teilchen nur fotografieren. Inzwischen ist es gelungen, die Apparatur so weit zu verbessern, daß sich die Vorgänge auch filmen lassen. Für verschiedene Untersuchungen erweist es sich fernerhin als zweckmäßig, die Wilsonkammer in ein künstliches Magnetfeld zu setzen, um so Aussagen über Energie und Ladungsvorzeichen der beobachteten Teilchen zu erhalten. In anderen Fällen kann man eine Nebelkammer auch mit Zählrohren so zusammenschalten, daß diese die optische Aufnahmeapparatur automatisch und für kombinierte Messungen steuern. Als modernste Weiterentwicklung des Nebelkammerprinzips kann man bis zu einem gewissen Grade die sogenannte „Blasenkammer“ ansehen, bei der die Teilchenspuren als Dampfblasenkette in einer Flüssigkeit sichtbar werden.

Bei modernen Strahlungsuntersuchungen werden außerdem noch zwei andere Verfahren angewendet. Die erste Methode, nämlich Teilchenspuren in besonderen fotografischen Emulsionen (Kernspuremulsionen) aufzuzeichnen, dient fast nur für Untersuchungen der Kosmischen Strahlung in großen Höhen (durch unbemannte Ballonsonden, künstliche Satelliten mit Rückführung) und zur Dauerregistrierung. Die Verwendung fotografischer Emulsionen beruht wiederum auf einer Ausnutzung des Ionisationseffekts, der längs der Teilchenbahn die lichtempfindlichen Schichtkörner wie „belichtet“ reagieren läßt. Die besonders dicken Kernspuremulsionen zeigen nach der fotochemischen Entwicklung die Teilchenbahnen als feine schwarze Spuren, aus deren Stärke und Verlauf der Fachmann dann Anhaltspunkte über Art und Energie der Partikel gewinnen kann. Wechselwirkungen mit den Atomen der Emulsionsschicht zeigen sich als Knicke und Verästelungen der Teilchenspuren. In Fällen von explosionsartigen Kerntreffern bilden

sich „Sterne“ aus bis zu einigen hundert Schwärzungsspuren, von denen jede einzelne einen der Kernsplitter markiert.

Für das zweite Verfahren werden die nach dem sowjetischen Physiker Pawel Tscherenkow (geb. 1904) benannten Teilchenzähler verwendet. Gegenüber der zuvor genannten Untersuchungsmethode, bei der vor allem die Auswertung außerordentlich zeitraubend ist, ergeben sie sofort auswertbare Informationen. Außerdem haben sie den Vorteil einer vielseitigen Verwendbarkeit bei gleichzeitig höchster Empfindlichkeit der Registrierungen. Die Funktion der Teilchenzähler beruht auf einer Erscheinung, die man als „Szintillationseffekt“ bezeichnet und für die Tscherenkow auch erstmalig eine theoretische Deutung gab. Es entstehen nämlich dann einzelne winzige Lichtblitze, wenn Strahlungsteilchen mit extrem hohen Geschwindigkeiten in einen besonderen Kristall eintreten. Die Lichtblitze werden mit hochempfindlichen Sekundärelektronen-Vervielfachern (Fotozellen) registriert. Tscherenkow-Zähler erwiesen sich als besonders wertvoll für die Ausrüstung von künstlichen Satelliten und Raumsonden.

Vorstoß in die Stratosphäre

Das ständig steigende Interesse der Physiker an der geheimnisvollen Kosmischen Strahlung führte schließlich zu manchmal recht abenteuerlichen Unternehmen – zu den benannten Stratosphärenflügen im Dienste der Forschung. Selbstverständlich gab es auch andere wissenschaftliche Probleme, die nur dann gelöst werden konnten, wenn man Meßgeräte und Beobachter in immer größere Höhen über der Erdoberfläche brachte. So begann sich die Bedeutung von physikalischen Vorgängen oberhalb der Troposphäre während der allgemeinen meteorologischen Forschungen in den ersten Jahrzehnten dieses Jahrhunderts immer deutlicher abzuzeichnen. Verschiedene Unter-

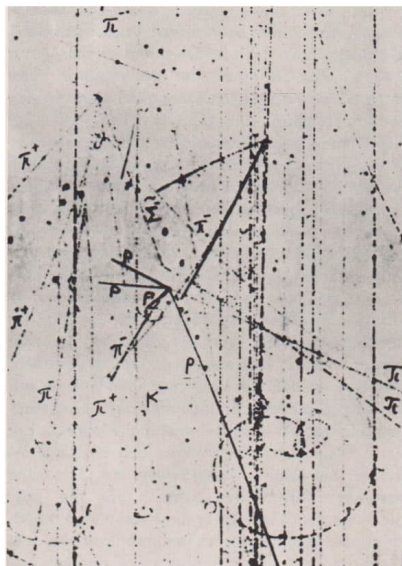
- 1 Glaskolben;
- 2 Silberbelag;
- 3 Drahtelektrode;
- 4 Verstärker;
- 5 Zähler

Kernspuremulsion
mit Schwärzungsspuren
der Bahnen
von Strahlungsteilchen

suchungen und Überlegungen hatten immerhin gezeigt, daß sich die Erdatmosphäre offenbar viele hundert Kilometer in die Höhe erstreckt. Die von Berson, Süring, Kohlhörster und anderen erreichten Höhen um 10 000 m nahmen sich dagegen recht bescheiden aus und sogar noch viel bescheidener im Verhältnis zur Größe der Erde. An einem Erdglobus von 1 m Durchmesser betragen die von diesen Pionieren der Höhenforschung erreichten Gipfelhöhen nur 0,7 mm.

Dennoch konnte der Weg in die Stratosphäre zunächst auch weiterhin nur mit dem Freiballon gegangen werden. Flugzeuge blieben von dieser Konkurrenz ausgeschlossen. Obwohl Spezialmaschinen die Ballonrekorde anfangs um einige hundert Meter übertrafen, konnten sie zu dieser Zeit niemals eine für wissenschaftliche Untersuchungen hinreichend lange Verweilzeit in Gipfelhöhe erzielen. Außerdem mußten sich die unvermeidbaren Vibrationen des Flugkörpers auf die mitzuführenden hochempfindlichen Geräte nachteilig auswirken. Der Freiballon war dagegen eine fast ideal ruhige Beobachtungsplattform. Wollte man allerdings beim bemannten Ballon bleiben, so mußten neue technische Anforderungen erfüllt werden. Sie gingen weit über diejenigen hinaus, mit denen sich die Forscher Anfang des Jahrhunderts zu beschäftigen hatten. So konnten die angestrebten stratosphärischen Höhen nur erreicht werden, wenn man das Volumen der Ballonhülle beträchtlich vergrößerte. Dies brachte anfangs den Herstellern erhebliche technische Schwierigkeiten. Weiterhin war für die Konstruktion der Ballongondel eine besondere Lösung zu finden, da in Höhen über etwa 12 000 m Atemgeräte allein nicht mehr die Lebensfähigkeit der Passagiere garantieren konnten. Die Gondel mußte deshalb als hermetisch abgeschlossene Kabine ausgebildet werden, die vor allem Einrichtungen zur Regeneration der Atemluft enthielt und trotz weiterer technischer und wissenschaftlicher Ausrüstungen nicht zu schwer sein durfte.

Immerhin dauerte es bis zum Jahre 1929, ehe zum erstenmal der Gedanke an bemannte Stratosphärenballone feste Gestalt annahm. Es war der bekannte Schweizer Physiker und Ballonfahrer Auguste Piccard (1884–1962), der auf Grund seiner Berechnungen und Konstruktionsanweisungen schließlich den ersten Stratosphärenballon für bemannte Aufstiege bauen ließ. Sein „FNRS“ (Abkürzung für belg. „Nationale Stiftung für wissenschaftliche Forschung“) übertraf mit rund 14 000 m³ wesentlich das Volumen der gewöhnlichen Freiballone (etwa 6000 m³). Als Füllgas diente Wasserstoff, um mit diesem leichtesten aller Gase eine möglichst große Tragkraft zu gewinnen.

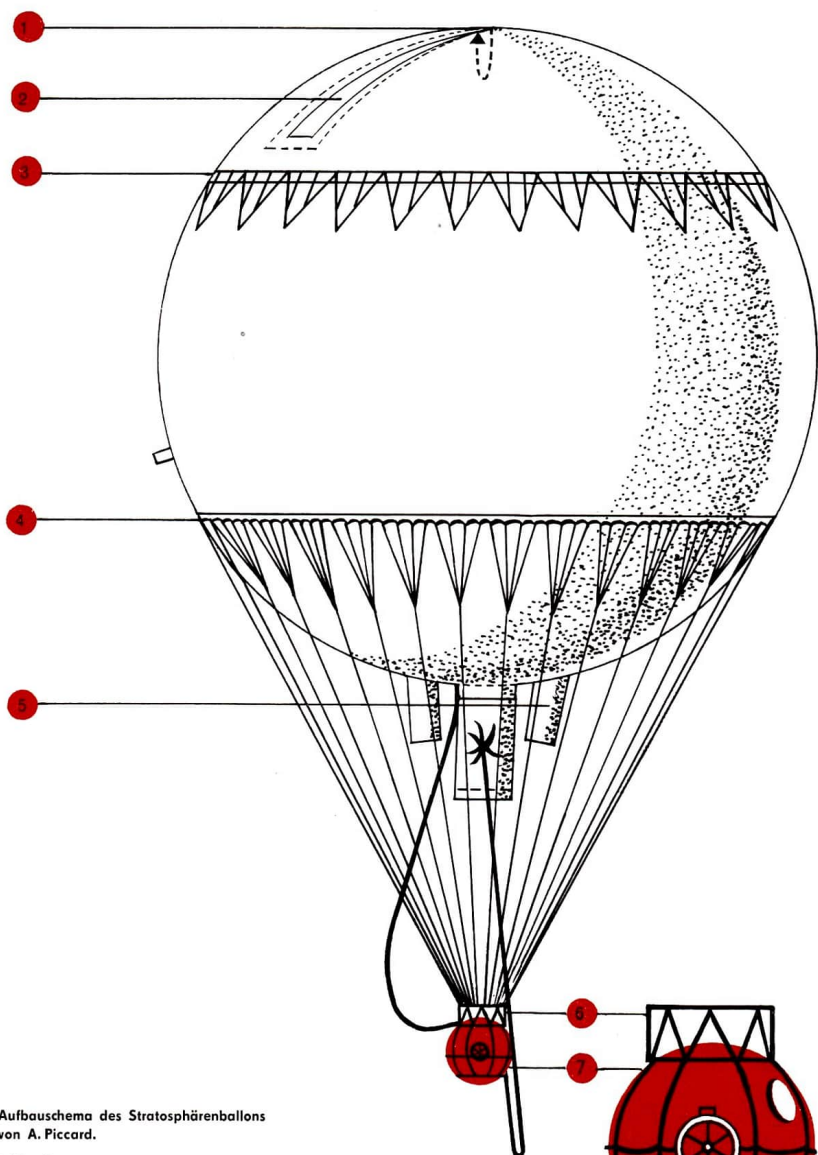


Der am Boden nur etwa zu einem Viertel gefüllte Ballon kam in der „Prallhöhe“ durch Ausdehnung des Gases auf einen Hüllendurchmesser von 30 m. Das System Ballon-Tragvorrichtung-Gondel hatte im Füllzustand schließlich eine Höhe von rund 50 m. Zur Verstärkung der Reißfestigkeit war das relativ dünne Gewebe der Hülle teilweise gummiert und teilweise mit einem Kautschuküberzug versehen worden.

An einer besonderen Tragseilkonstruktion hing die für zwei Passagiere vorgesehene Gondel. Sie war eine hermetisch verschließbare Höhenkabine und hatte ohne Besatzung, aber mit voller Ausrüstung, eine Masse von etwa 1000 kg. Aus Gründen der Masseersparnis bestand sie aus nur 3,5 mm starkem Aluminiumblech. Sehr viel Bewegungsfreiheit ließ diese Stratosphären-„Konservendose“ den darin befindlichen Wissenschaftlern allerdings nicht, denn ihr Durchmesser betrug nur 2,10 m. Zur Sicherheit der Ballonfahrer hatte Piccard einen speziellen Gondelfallschirm in das System eingefügt und außerdem für jeden der Teilnehmer einen Personenfallschirm vorgesehen. Die noch etwas primitive Luftregenerationsanlage der „FNRS“-Gondel beruhte auf einem einfachen Prinzip. Sie bestand im wesentlichen aus zwei getrennten Anlagen, um frischen Sauerstoff einzuspeisen, und mehreren Kalipatronen, um das ausgeatmete Kohlendioxid aufzufressen. Die eine Sauerstoffanlage lieferte das lebenserhaltende Gas aus Druckflaschen, wogegen mit der anderen flüssiger Sauerstoff zum Verdampfen gebracht werden konnte. Das zuletzt genannte Verfahren war zwar wegen der sehr niedrigen Temperatur des verdampfenden Sauerstoffes recht problematisch, bot jedoch durch seine schnelle Wirksamkeit – vor allem in Gefahrenlagen und bei Undichtwerden der Kabine – Aussichten auf Hilfe. Eine besondere Abscheidevorrichtung für die ausgeatmete Feuchtigkeit war nicht vorhanden, ebenso fehlte eine automatische Temperaturregulierung. Die Kabineninnentemperatur sollte dadurch be-

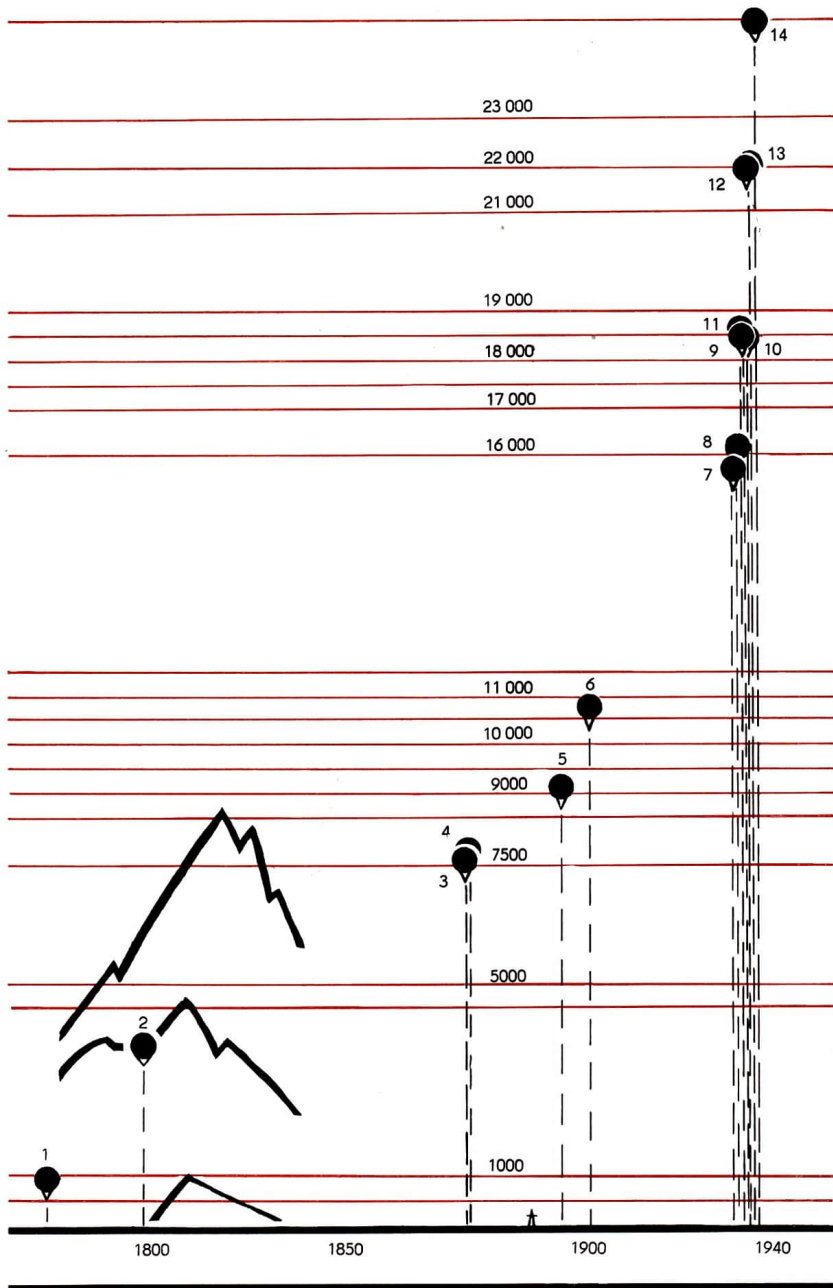
einflußt werden, daß die Gondel zur einen Hälfte mit einem schwarzen und zur anderen mit einem weißen Anstrich versehen war. Ein kleiner Motor mit Propeller sollte schließlich die Gondel drehen können, um so durch die Regelung von Absorption und Reflexion der Sonnenstrahlung die Innentemperatur nach Belieben zu verändern. Leider versagte dieser Mechanismus. Die Forscher mußten später beim Aufstieg sehr frieren. Die überschüssige Feuchtigkeit schied sich während des Aufstieges infolge der sehr niedrigen Temperatur der von der Sonne abgekehrten Gondelwandung in Form von Kondenswasser ab. Die wissenschaftliche Ausrüstung der Gondel bestand aus Instrumenten und Geräten für luftelektrische Messungen, einer Ionisationskammer und einem Geigerzählrohr für Untersuchungen der Kosmischen Strahlung.

Nach Überwindung einiger Anfangsschwierigkeiten, von denen wohl ein Erstlingsunternehmen zum Vorstoß in wissenschaftliches Neuland kaum jemals frei sein wird, startete Auguste Piccard schließlich am 27. Mai 1931 zusammen mit Paul Kipfer zu seinem historischen Stratosphärenflug. Vom Startplatz Augsburg aus fuhr der „FNRS“-Ballon in südlicher Richtung auf die Alpen zu, überquerte sie fast ganz und landete schließlich nach 17 Stunden und 4 Minuten in der Nähe von Meran auf dem Gurgl-Gletscher. Die erwartungsvolle Spannung in aller Welt löste sich beim Eintreffen der ersten Meldungen von der glücklichen Landung unter ungewöhnlichen Bedingungen. Ein unerhörtes wissenschaftliches Abenteuer war geglückt. Zum erstenmal waren Menschen in ein neues, höheres „Stockwerk“ der Erdatmosphäre, in die Stratosphäre, vorgestoßen und hatten dort in rund 16 000 m Höhe Beobachtungen angestellt und Messungen über Strahlungen und andere physikalische Effekte vorgenommen. Der Erfolg Piccards löste damit auch in der wissenschaftlichen Welt beträchtliche Anteilnahme aus. Außer zahlreichen persönlichen Ehrungen konnte der



Aufbauschema des Stratosphärenballons
von A. Piccard.

- 1 Ventil;
- 2 Reißbahn;
- 3 Lochtaschengurt;
- 4 Traggurt;
- 5 Stutzen;
- 6 Korbring;
- 7 Kabine mit Rillenscheiben und Mannloch



- 1 Pilatre de Rozier;
- 2 Gay Lussac;
- 3 Sivel und Crocé-Spinelle;
- 4 Tissandier;
- 5 Berson;
- 6 Berson und Süring;
- 7 A. Piccard und Kipfer;
- 8 J. Piccard;
- 9 Steevens, Anderson und Kepner;
- 10 Prokofjew, Birnbaum und Godunow;
- 11 Settle und Fordney;
- 12 Fedessenkow, Wasienko und Usyskin;
- 13 Steevens und Anderson;
- 14 Radiosonden

kühne Gelehrte vor allem – wie wir noch sehen werden – einen weltweiten Siegeszug seiner technisch-wissenschaftlichen Ideen verzeichnen.

Höher und höher

Inzwischen hatten andere Forscher auf die Möglichkeit hingewiesen, unbemannte Ballonsonden für Messungen in der Hochatmosphäre zu verwenden. Mit Erfolg wurden auch erste praktische Versuche unternommen. Dem amerikanischen Physiker Robert A. Millikan (1868–1953) waren Aufstiege in Höhen über 20 km geglückt. Zur Zeit des „FNRS“-Aufstieges näherte sich der deutsche Geophysiker Erich Regener mit seinen Registrierballonen schon der 30-Kilometer-Grenze. Aber verschiedene meßtechnische Probleme ließen es doch zu dieser Zeit zweckmäßig erscheinen, den von Piccard gewiesenen Weg zu gehen und den bemannten Ballonflug vorzuziehen.

Den klaren Blick ihrer Forscher und Staatsmänner für zukunftsfruchtige wissenschaftliche Entwicklungen, die einmal mit dem Vorstoß bemannter Flugkörper bis in die Tiefen des kosmischen Raumes fortzusetzen sein würden, bewies die Sowjetunion schon im Jahre 1933. Als erste konstruierte man dort nach Piccardschem Vorbild einen weiteren Stratosphärenballon. Der gigantische „CCCP“ hatte ein Volumen von über 24 000 m³ und gestattete drei Wissenschaftlern die Teilnahme am Aufstieg. Am 30. September 1933 trug der „CCCP“ die drei Forscher G. A. Prokofjew, E. K. Birnbaum und K. D. Godunow bis auf eine Höhe von 18 500 m empor. Als Strahlungsmeßgeräte dienten Ionisationskammern und Zählrohre. Dieser Erfolg der sowjetischen Wissenschaft erregte weltweites Aufsehen.

Noch im gleichen Jahr beteiligten sich dann auch die USA an Vorstößen in die Stratosphäre. Mit dem rund 17 000 m³ fassenden Ballon „Century of Progress“ erreichten die Amerikaner Settle

und Fordney eine Höhe von 18 665 m. Zu ihrer wissenschaftlichen Ausrüstung für Strahlungsmessungen gehörte neben einer Ionisationskammer erstmalig auch ein Zählrohrteleskop.

Der zweite sowjetische Stratosphärenaufstieg mit dem fast 25 000 m³ großen „Ossoawiachim“, am 30. Januar 1934, führte die Wissenschaftler P. F. Fedessenkow, A. B. Wasienko und J. D. Usyskin zwar in die sensationelle Höhe von 22 000 m, endete aber mit dem tragischen Tod der kühnen Ballonfahrer. Wie sich dieser erste Unfall in der Stratosphäre im einzelnen abgespielt hatte, konnte nicht mehr ermittelt werden. Sicher ist nur, daß die Gondel aus sehr großer Höhe im freien Fall zur Erde raste und daß unterdessen die eingeschlossenen Gelehrten in heldenmütigem Einsatz bis zuletzt versuchten, den mit 24 Schrauben gesicherten Mannlochdeckel zu öffnen. Als man die zerschmetterte Gondel fand, waren erst sieben Schrauben gelöst worden. Da kein Gondelfallschirm den Absturz bremsen konnte, verblieb den drei Insassen bis zum Aufprall keine Zeit, um alle Schrauben zu lösen.

Ein ähnlich unglückliches Ende hätte um ein Haar auch der Aufstieg der Amerikaner Anderson, Steevens und Kepner mit dem monströsen Ballonriesen „Explorer-I“ (85 000 m³) genommen. Der Aufstieg fand am 28. Juli 1934 statt. Man hatte schon über 15 000 m Höhe erreicht. Kepner berichtete als Reporter für Millionen Rundfunkhörer ständig vom Verlauf des Unternehmens. Plötzlich riß die Ballonhülle, und der Ballon begann zu sinken. Die im unteren Teil aufgerissene Ballonhülle wirkte anfangs wie ein Fallschirm. Später zerriß die Hülle völlig, und die Gondel stürzte ab. Kaltblütig berichtete der Reporter trotz allem von dem katastrophalen Geschehen. Während des rasenden Sturzes gelang es dann Anderson und Steevens, die Mannlochschrauben zu lösen. Die Kabine war schließlich bei etwa 3500 m Höhe offen. Kepner blieb als letzter in der Gondel. Er schilderte noch, wie seine beiden Gefährten

mit Fallschirmen die Kabine verließen, ehe er endlich selbst in kaum mehr als 1000 m Höhe „ausstieg“. Alle drei Ballonfahrer landeten wohlbehalten an ihren Fallschirmen. Auch die wissenschaftlichen Instrumente, die man über Bord geworfen hatte, kamen mit einem Lastfallschirm unbeschädigt zur Erde. Von einer wissenschaftlichen Ausbeute dieses Unternehmens konnte natürlich keine Rede sein, da sich unter den ungewöhnlichen Umständen des Aufstieges selbstverständlich keine brauchbaren Meßreihen gewinnen ließen. Das Sensationsbedürfnis der amerikanischen Öffentlichkeit war dafür um so mehr befriedigt worden. Der Ausruf Kepners, den er zur Beruhigung seiner Frau unmittelbar vor seinem „Aussteigen“ als letztes über den Bordsender gab: „Reg dich nicht auf, Marion! Ich komme gleich wieder!“, wurde für Millionen Amerikaner zu einem geflügelten Wort.

Nach einem weiteren sowjetischen Versuch mit dem „CCCP Ibis“ (25 000 m³), der nach einem Aufstieg bis in 16 000 m Höhe ebenfalls mit dem Absprung der Besatzung (Warigo, Christofel und Pilszki) endete, meldeten sich noch einmal die amerikanischen Wissenschaftler zum Wort. Mit dem gigantischen Ballon „Explorer-II“, dessen Volumen rund 105 000 m³ betrug, sollte vor allem auch der Höhenrekord des verunglückten „Ossoawjachim“ überboten werden. Am 11. November 1935 starteten die unverwundlichen Piloten Anderson und Stevens zu einem neuen Vorstoß in die Stratosphäre. Er brachte sie auf eine Höhe von 22 066 m und wurde nach 8 Stunden und 12 Minuten mit einer normalen Landung beendet. Berücksichtigt man die Unsicherheiten bei Höhenbestimmungen, so kann man sagen, daß nach dem Aufstieg des „Explorer-II“ also kaum entschieden war, wer nun den absoluten Höhenweltrekord in Besitz hatte. Von besonderem wissenschaftlichen Interesse bei dem amerikanischen Stratosphärenflug war, daß außer dem Instrumentarium für Untersuchungen der Kosmischen Strah-

lung erstmalig auch ein Spektrograph mitgeführt wurde, mit dem speziell der ultraviolette Teil des Sonnenspektrums untersucht werden sollte.

Ozonosphäre — Spezialfilter der Hochatmosphäre

Mit diesem Experiment begab man sich also zum erstenmal auch in den Problemkreis der Wechselwirkungen zwischen solarer Wellenstrahlung und Hochatmosphäre. Die Begrenzungen des optischen Fensters der Erdatmosphäre waren damals immerhin schon bekannt. Man wußte sogar über die Ursachen dieses Effektes rein theoretisch recht gut Bescheid. So gab es beispielsweise kaum einen Zweifel daran, daß die ziemlich abrupte Beschneidung des Sonnenspektrums im Ultraviolett, wie sie bei Beobachtungen an der Erdoberfläche zu beobachten ist, nur an der Absorption der kürzeren Wellenlängen in Höhen von etwa 20 bis 50 km durch den atmosphärischen Sauerstoff liegen konnte. Die absorbierte Strahlungsenergie hat nämlich das „Zusammenhämmern“ von Sauerstoffatomen zu dem sonst sehr seltenen dreiatomigen Sauerstoffmolekül „Ozon“ zur Folge, so daß in den genannten Höhen eine mit diesem Ozon angereicherte Atmosphärenschicht angetroffen werden muß. Es wurde schon früher darauf hingewiesen, daß wir dieser Ultraviolett-Absorption in der Atmosphäre den Bestand des organischen Lebens auf der Erde verdanken.

Über die Existenz einer „Ozonosphäre“ bestand also nicht mehr der geringste Zweifel. Lediglich über ihre Struktur und Höhenverteilung hatte man noch nicht genügend Klarheit. Außerdem waren die Sonnenphysiker sehr daran interessiert, die genaue Struktur der solaren Ultraviolettstrahlung kennenzulernen. Die ersten Unterlagen über das an der Erdoberfläche nicht mehr zugängliche Ultraviolett des Sonnenspektrums und über den Einfluß der Arbeitshöhe des Spektrographen

lieferten Versuche, die Erich Regener und sein Bruder Viktor Regener im Jahre 1934 mit den erwähnten unbemannten Ballonsonden anstellten. Es gelang ihnen unter anderem am 31. Juli 1934, einen automatisch arbeitenden Ultraviolett-Spektrographen (mit Quarzoptik, da Quarz für Ultraviolett durchlässig ist, Glas aber nicht) mit einem Meßballon bis auf eine Höhe von 31 km zu bringen. Die Verlängerung des Sonnenspektrums ins Ultraviolett hinein war schon merklich. Zahlreiche neue Spektrallinien konnten erfaßt und gemessen werden. Diese Arbeiten wurden dann bei dem Aufstieg des „Explorer-II“ fortgesetzt. Seine geringere absolute Höhe verringerte allerdings die Reichweite ins Ultraviolett. Weitere Ergebnisse in dieser Richtung erbrachten vor allem unbemannte Ballonsonden.

Es zeichnete sich bei diesen Versuchen jedoch immer deutlicher ab, daß man mit dem Ballon als Träger wissenschaftlicher Instrumente und Beobachter nur ein recht beschränktes Hilfsmittel zur Erforschung der Hochatmosphäre zur Verfügung hatte. Seine Steighöhe blieb prinzipiell begrenzt. Nur unbemannte Ballonsonden vermochten mit relativ kleinen Nutzmassen hin und wieder das Maximum der Ozonkonzentration (25 bis 30 km) zu erreichen oder um ein wenig zu übersteigen. Großangelegte Versuche mit bemannten Stratosphärenballonen wurden daher nach 1935 für lange Zeit eingestellt. Erst im November 1956 fand in den USA der nächste und erfolgreiche Schritt in dieser Richtung statt (M. Bors und M. Lewis bis in 23 164 m Gipfelhöhe). Zur gleichen Zeit erreichte man mit unbemannten Meßballonen Gipfelhöhen, die die Versuche Regeners merklich übertrafen.

Zuvor wurde der Kampf um größere Gipfelhöhen im wesentlichen durch eine Erscheinung behindert, die in der Versuchstechnik lag. Die Ballonsonden platzten nämlich in jedem Fall schon beträchtlich unterhalb der theoretisch möglichen Gipfelhöhe. E. Regener gelangte zu der

Ansicht, daß die zu seiner Zeit verwendeten dünnwandigen und meist gummierten oder ganz aus Gummi gefertigten Ballonhüllen unter der Einwirkung des Ozons vorzeitig zerstört würden. Wie man jedoch ermittelt hat, kommen zu der Ozonwirkung noch die niedrige Temperatur in diesen Höhen, wodurch Gummi spröde wird wie Glas, und die nur noch wenig geschwächte Ultraviolettstrahlung hinzu. Erst als die nach dem zweiten Weltkrieg sich stürmisch entwickelnde Chemie der Kunststoffe neue Materialien lieferte, brach auch für die Ballonaufstiege in die Stratosphäre eine neue Ära an.

Doch schon lange bevor diese neuen Möglichkeiten gegeben waren, wurde die Meßballontechnik auch zu einem unentbehrlichen Hilfsmittel der praktischen Meteorologie. Während die Aufstiege zur Untersuchung der Kosmischen Strahlung oder der solaren Wellenstrahlung speziell die Geo- und Astrophysiker interessierten, versuchten die Meteorologen, mit ihren „Radiosonden“ Meßwerte über Druck, Temperatur und Luftfeuchtigkeit aus möglichst großen Höhen in der freien Atmosphäre zu erhalten. Wie schon erwähnt, waren Aufstiege bis in Höhen von 30 km bald keine Seltenheit mehr. Heute gibt es in der Meteorologie ein spezielles Netz von Radiosondenstationen, wobei tägliche Aufstiege bis in zwanzig und mehr Kilometer Höhe schon zur Routinearbeit gehören.

Die Radiosonden bestehen aus einem sehr leichten und relativ einfach aufgebauten Meßgerätesatz zur Erfassung der atmosphärischen Zustandsgrößen (Druck, Temperatur, Luftfeuchtigkeit) sowie einem kleinen Radiosender, der die Meßwerte in Form verschlüsselter Funksignale an die Bodenstation übermittelt. Die Anforderungen an die Funktionstüchtigkeit dieser Geräte stehen allerdings im umgekehrten Verhältnis zu ihrer Größe. Präzise Einhaltung der Meßskalen und Konstanz der Funkübertragungsdaten sind Grundvoraussetzungen, die die erstaunlich kleinen Bauelemente unbedingt erfüllen müssen. Außer der



Meßwertübertragung bieten die Radiosonden auch noch die Möglichkeit, Luftströmungen in großen Höhen zu ermitteln. Man versieht das Tragseil des Meßgerätesatzes dazu mit einem besonderen Funkwellenreflektor und mißt während des Aufstieges mit Radargeräten die Positionen des Ballons sowie seine Entfernung von der Bodenstation. Aus Richtung und Entfernung läßt sich dann leicht der räumliche Verlauf der Aufstiegsbahn errechnen.

So trugen also bemannte und unbemannte Freiballone wesentlich zu neuen wichtigen Informationen über die Hochatmosphäre und die verschiedenen aus dem kosmischen Raum zur Erde gelangenden Strahlungen bei. Das Bild von der Struktur der Stratosphäre und die Vorstellungen von dem physikalischen Geschehen in großen Höhen begann sich abzurunden. Unter anderem mußte man sehr bald die ursprüngliche Vorstellung von der Stratosphäre als einem relativ strömungsarmen Bereich der Hochatmosphäre revidieren. Heute wissen wir, daß es dort außerordentlich heftige Höhenwinde gibt. Dennoch blieb das Gesamtbild unbefriedigend, weil die Höhen über 40 km auch weiterhin für direkte Messungen unzugänglich blieben. Lediglich einige indirekte Schlüsse, die aus besonderen Beobachtungen gezogen werden konnten, lieferten spärliche Anhaltspunkte für die physikalischen Bedingungen in noch größeren Höhen.

Von der „Zone des Schweigens“ zum „Nachtimmelslicht“

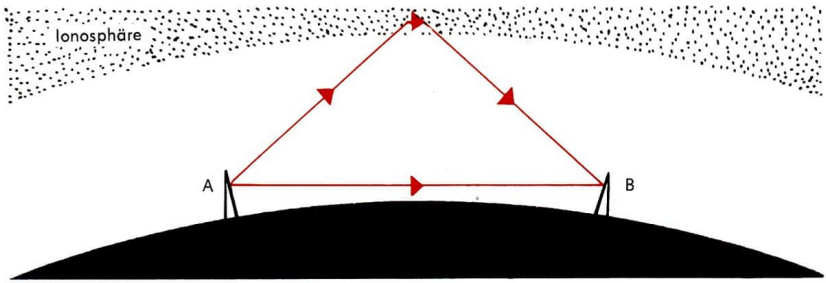
So führte das Phänomen der sogenannten „Zone des Schweigens“ zu der Annahme, daß zwischen 30 und 60 km Höhe eine Schicht liegen müsse, in der die Temperatur der Luft auf beträchtliche Werte ($+80^{\circ}\text{C}$ oder etwa 350°K) ansteigt, obwohl sie in tieferen Regionen der Stratosphäre schon auf Werte um -50°C abgesunken war.

Leuchtstreifen
am horizontnahen Nordwesthimmel,
aufgenommen an der Sternwarte
der Deutschen Akademie der Wissenschaften
in Sonneberg (Thür.)

Die Zone des Schweigens ist eine Erscheinung anormaler Schallausbreitung, wie sie bei großen Explosionen (zum Beispiel bei der Sprengung Helgolands 1947) schon mehrfach beobachtet werden konnte. Die in großer Entfernung vom Schallzentrum hinter dieser „schalltoten“ Zone bemerkbaren Schallwellen lassen sich nur dadurch erklären, daß sie an einer hochliegenden Atmosphärenschicht von hoher Temperatur zur Erdoberfläche reflektiert werden. Die Ursache für die relativ hohe Temperatur des Gebietes zwischen 30 und 60 km Höhe bildet die „Heizplattenwirkung“ der oberen Schicht der Ozonosphäre. Die solare

Ultraviolettstrahlung führt nämlich zunächst zur O_3 -Bildung. Das so entstandene Ozon absorbiert nun weiterhin Strahlung und setzt sie in Wärme um. Die Temperatur eines Gases drückt sich in der Bewegungsenergie seiner Gasmoleküle aus. In einem Gas mit höherer Temperatur bewegen sich also die Gasteilchen mit einer größeren mittleren Geschwindigkeit durcheinander als in einem kühleren Gas gleicher Zusammensetzung. Unsere normalen Zimmerthermometer würden allerdings in einer Höhe von etwa 40 km nicht die erwähnten $+80^\circ\text{C}$ anzeigen, da die Luftdichte dort schon viel zu gering ist, um noch genügend Wärmeenergie





auf das Thermometermaterial zu übertragen. Zu den beobachteten Erscheinungen, die über Vorgänge und physikalische Bedingungen an der Obergrenze der Stratosphäre und in den unmittelbar darauf folgenden Gebieten weiterhin einigen Aufschluß gegeben haben, zählen noch die Sternschnuppen oder Meteore, ferner die sogenannten „Leuchtstreifen“ am Nachthimmel, die „leuchtenden Nachtwolken“, das „Nachthimmelslicht“ und schließlich die „Polarlichter“.

Die als kosmische Kleinkörper mit teilweise sehr hohen Geschwindigkeiten in die Erdatmosphäre einschießenden Meteorite heizen durch Stauwirkung die atmosphärischen Gasteilchen vor ihrer Stirnfront so stark auf, daß ihre Einschubbahnen als Leuchtspuren sichtbar werden. Bei der Vermessung ihrer Bahnen konnte die wirksame Abbremshöhe in der Atmosphäre mit etwa 100 bis 120 km für die kleineren Körper und mit 40 bis 60 km für die größeren („Feuerkugeln“) berechnet werden. Daraus ergaben sich Rückschlüsse auf Dichte und Temperatur in diesen Höhen. Allerdings sollte sich später herausstellen, daß fast alle Dichtebestimmungen nach den indirekten Methoden für die Hochatmosphäre zu niedrige Werte lieferten.

Über die Natur der relativ selten zu beobachtenden Leuchtstreifen gingen die Ansichten in der Vergangenheit stark auseinander. Es handelt sich um streifenförmig angeordnete Erhellungen des nächtlichen Himmels offenbar in 100 bis 200 km Höhe. Nach Ansicht des deutschen Astronomen Cuno Hoffmeister (geb. 1892), der sich seit Jahrzehnten mit diesen Erscheinungen besonders eingehend beschäftigt, entstehen sie dadurch, daß feinsten kosmischer Staub in die Erdatmosphäre einbricht. Die Staubteilchen sollen dabei in intensive Wechselwirkung mit denjenigen Prozessen geraten, die sich in solchen Höhen zwischen den atmosphärischen Gasteilchen und der Sonnenstrahlung abspielen. Beispielsweise sorgt die Sonnenstrahlung am Tage dafür, daß sich Elek-

tronen von den Gasmolekülen und -atomen trennen, während nachts wiederum eine teilweise Vereinigung stattfindet. Bei dieser „Rekombination“ (Wiedereinfangen) wird Energie frei, die sich als „Nachthimmelslicht“ zeigt. Der Leuchtvorgang tritt also in jeder Nacht auf. Wegen seiner geringen Intensität kann er aber nur mit empfindlichen Geräten nachgewiesen werden. Nach Hoffmeister soll er im Bereich der Staubeinbrüche verstärkt werden und somit die seltenen, aber ebenfalls selbstleuchtenden „Leuchtstreifen“ herbeiführen. Der langsam absinkende kosmische Staub verdichtet sich danach allmählich so weit, daß er in Höhen um 80 km am Abendhimmel als „leuchtende Nachtwolken“ erkennbar wird, diese sind jedoch nicht mehr selbstleuchtend; sichtbar werden sie nur durch die Reflexion des Lichtes, das von der unter dem Horizont stehenden Sonne kommt.

Aus der Untersuchung des Nachthimmelslichtes und der Leuchtstreifen mit Spektroskopen konnte man wesentliche Anhaltspunkte über die Zusammensetzung der Hochatmosphäre gewinnen. Es zeigte sich, daß in diesen Höhen zwar immer noch Sauerstoff und Stickstoff dominieren, obwohl ältere Theorien mehr für die Anwesenheit leichter Gase (Wasserstoff, Helium) plädierten, daß aber die an der Erdoberfläche anzutreffende Molekülform von Sauerstoff und Stickstoff (O_2 und N_2) mit zunehmender Höhe mehr und mehr in die Atomform (O und N) übergeht. Da außerdem diese Moleküle und Atome nicht im elektrisch neutralen Zustand, sondern wegen des Fehlens einzelner Elektronen als Ionen (zum Beispiel O^+ , N_2^+) vorliegen, ergeben sich sehr wichtige Folgerungen für die Physik der hohen Atmosphäre. Sowohl die Dissoziation der Moleküle in Atome als auch ihre Ionisation rühren demnach eindeutig aus der Absorption solarer Strahlungsenergie her. Beide Vorgänge stellen damit wichtige Faktoren für den Energiehaushalt der Erdatmosphäre dar. Ebenso wie die tiefer liegende Ozonschicht ist somit auch der Dissoziations- und Ionisationsbereich ge-

wissermaßen ein Energiespeicher. Seine Rückwirkungen auf das physikalische Gesamtgeschehen in der irdischen Lufthülle mußte man bis in alle Einzelheiten kennenlernen, wenn man die Auswirkungen auf das Wettergeschehen richtig beurteilen wollte. Eine entsprechende Vertiefung des Einblicks ließ sich nur von einer direkten meßtechnischen Erkundung dieser Bereiche erwarten.

Ionosphäre und solar-terrestrische Beziehungen

Recht aufschlußreiche Ergänzungen des Bildes von der „Ionosphäre“ – wie man das Gebiet oberhalb von etwa 80 km wegen der Ionisation der Gaspartikelchen nennt – waren allerdings auch schon durch Untersuchungen von der Erdoberfläche aus möglich. Die ersten Hinweise auf das Vorhandensein einer hochliegenden Schicht in der Erdatmosphäre, in der Ionen und freie Elektronen einen hohen Anteil haben müssen, erhielt man schon vor der theoretischen Deutung des Nachthimmelslichtes im Jahre 1902 durch Beobachtungen der Funkwellenausbreitung. Der Amerikaner Kennelly und der Engländer Heaviside suchten eine Erklärung für die verschiedentlich festgestellten übergroßen und nach den damals geltenden Theorien unverständlichen Reichweiten von drahtlosen Stationen. Ihre Überlegungen führten zu dem Schluß, daß in großer Höhe eine Schicht stark ionisierter Gase liegen müsse, an der die Funkwellen wie an einem Spiegel reflektiert würden. Diese Ansicht wurde in der Folgezeit durch alle Untersuchungen bestätigt. Die Schicht bezeichnete man früher nach den beiden Forschern als „Kennelly-Heaviside-Schicht“. Sehr bald zeigte sich nun, daß die Reflexionsfähigkeit der Ionosphäre wellenlängenabhängig ist. Funksignale aus dem Mittelwellenbereich werden von tieferen Partien der Ionosphäre reflektiert, solche aus dem Kurzwellenbereich da-

gegen erst in höheren Gebieten. Damit entstand die Vorstellung eines schichtförmigen Aufbaues der Ionosphäre, der durch die Bezeichnung „D-“, „E-“ und „F-Schicht“ charakterisiert wurde. Der Ionisationsgrad erwies sich in der am höchsten liegenden F-Schicht als am stärksten. Außerdem ermöglichte der theoretisch entschlüsselte Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Ionisationsgrad Aussagen über die Stärke der Ionisation in verschiedenen Höhen, also über die sogenannte Elektronendichte.

Ein besonderes Verfahren für derartige Untersuchungen der Ionosphäre sind die „Ionosphärenechos“. Man strahlt dabei Meßimpulse wechselnder Frequenzen senkrecht nach oben und registriert die von der Ionosphäre zurückgeworfenen Funkwellen. Aus der Laufzeit dieser Echos läßt sich – in Abhängigkeit von der Wellenlänge – ein aufschlußreiches Bild von der Schichtstruktur der Ionosphäre gewinnen, das heißt von der Elektronendichte in den einzelnen Höhenstufen. Die Bezeichnung „Kennelly-Heaviside-Schicht“ trifft danach eigentlich nur noch für die in etwa 100 bis 120 km Höhe gelegene E-Schicht zu. Die komplizierter aufgebaute F-Schicht, die gelegentlich auch in eine F₁- und eine F₂-Schicht aufgespalten ist, wird dagegen nach ihrem Entdecker Sir Edward Appleton (geb. 1892) manchmal als „Appleton-Schicht“ bezeichnet.

Besonders interessant ist aber eine Schicht in etwa 60 bis 80 km Höhe. Diese D-Schicht zeigt den Reflexionseffekt nur für sehr lange Wellen (Frequenzen um 30 kHz), für Kurzwellen (etwa 3 bis 30 MHz) tritt dagegen eine besonders starke Absorptionswirkung auf. Wenn die D-Schicht sehr kräftig ausgebildet ist, dann können die Kurzwellen nicht mehr bis zu den reflektierenden F-Schichten durchdringen. Der Fernempfang im Kurzwellenbereich wird dadurch empfindlich gestört und sogar völlig zum Erliegen gebracht. Die Störungen im Kurzwellenempfang sind somit ein eigenartiges Kriterium für die Beschaffenheit

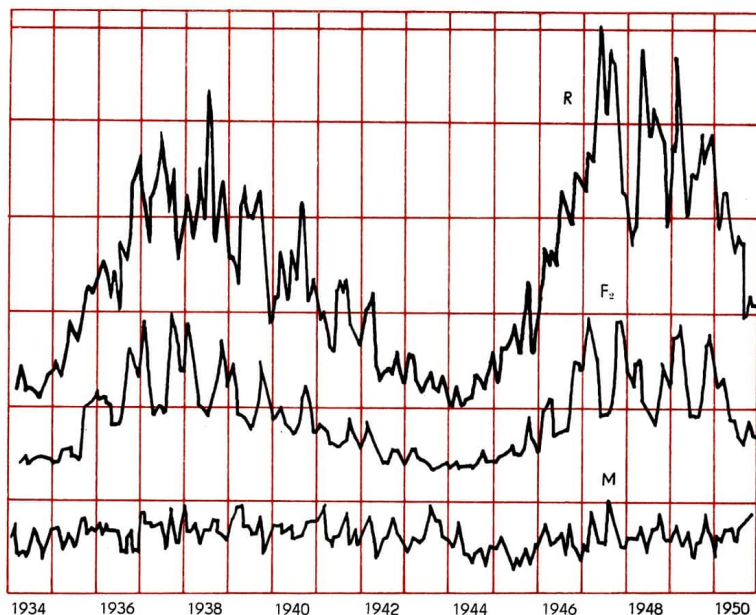
der D-Schicht. Die Hauptbedeutung dieser Erscheinung liegt nun darin, daß die chromosphärischen Eruptionen auf der Sonne und die Störungen des Kurzwellenempfanges eng zusammenhängen. Die sehr intensive Ultraviolettstrahlung der Eruptionen liefert nämlich die Ionisationsenergie für die D-Schicht. Die absorbierte Strahlung ist dabei so kurzweilig, daß man sie schon zur Röntgenstrahlung rechnen muß. Das ist also erneut ein Beweis für die Koppelung solaren Geschehens mit Vorgängen in der Erdatmosphäre. Wenn man die Ursachen der Schwunderscheinungen im Kurzwellenfernempfang (auch Mägel-Dellinger-Effekt genannt) kennt, dann wird man leicht einsehen, welche praktische Bedeutung eine regelmäßige Sonnenüberwachung hat. Ohne intensive Zusammenarbeit zwischen Ionosphärenphysikern und Sonnenforschern würde man kaum zum vollen Verständnis der Vorgänge in der Hochatmosphäre kommen. Man könnte auch keine wirksamen Maßnahmen ergreifen, die den weltweiten Überseefunkverkehr mit Kurzwellenstationen verbessern und sichern. Außer dem Mägel-Dellinger-Effekt hat man noch eine ganze Reihe von funkttechnisch wirksamen Erscheinungen gefunden, die eindeutig mit der Sonnenaktivität zusammenhängen. So ergab sich beispielsweise, daß die „Grenzfrequenz“ – das ist die höchste Frequenz, die zu einem bestimmten Zeitpunkt gerade noch von der Ionosphäre reflektiert wird – einen erstaunlich genauen Gleichlauf mit der Kurve der Sonnenfleckenzahl zeigt. Dadurch kann man in der Funktechnik schon vorausschauend Sendefrequenzen auswählen, die weniger störanfällig sind. Die Grenzfrequenz gibt darüber hinaus dem Geophysiker Anhaltspunkte über Elektronendichte, Elektronentemperatur und bis zu einem gewissen Maße auch über die allgemeine Zusammensetzung der Ionosphäre. Die Fülle der einzelnen Zusammenhänge zwischen Sonne und Ionosphäre läßt sich mit diesen Beispielen jedoch nur andeuten.

Polarlichter

Eine weitere Möglichkeit, Einblick in den Aufbau der Hochatmosphäre zu erhalten, ohne die Erdoberfläche zu verlassen, bieten die „Polarlichter“. Diese in den polaren Gebieten der Erde fast ständig vorkommenden prächtigen hochatmosphärischen Leuchterscheinungen (Nordlicht, Südlicht) verdanken ihre Entstehung ebenfalls dem Einfluß der Sonne. Am durchsichtig klaren Nachthimmel bilden sich herrlich leuchtende Bögen, zueinander strebende Strahlenbündel (Nordlichtkrone), wallende Vorhänge (Draperien) oder nur flächenhafte, pulsierende Leuchterscheinungen. Selbst der gleichmütigste Beobachter ist von dem wunderbaren Farbenspiel zwischen grünlichsilbrigem Blauweiß und intensivem Rot begeistert.

Für die nüchterne, wissenschaftliche Betrachtung stehen natürlich sachliche Fragen im Vordergrund. Man forscht nach der Höhe der Leuchterscheinung oder der spektralen Zusammensetzung des von ihr ausgehenden Lichtes. Die Höhe von Polarlichtern wird nach dem Triangulationsverfahren durch optische Anschnitte (meist fotografisch) von zwei oder mehreren Bodenstationen aus bestimmt. Man fand dabei einen Bereich größter Häufigkeit in Höhen zwischen 90 und 150 km. Einzelne Polarlichter treten aber auch in einer Höhe von 60 km auf. Wieder andere Erscheinungsformen (einzelne Polarlichtstrahlen) erreichten dagegen Höhen um 1000 km. Dieser weitgestreckte Bereich bietet noch immer große Schwierigkeiten, um das Zustandekommen der Polarlichter präzise zu deuten. Deshalb gibt es bis heute noch keine zuverlässige und umfassende Theorie für diese erregende Naturerscheinung. Allgemein steht jedoch fest, daß die auslösende Ursache nicht in der Wellenstrahlung, sondern in der Partikelstrahlung der Sonne zu suchen ist. Dieser Schluß konnte schon vor fast hundert Jahren gezogen werden, weil man keine andere plausible Erklärung dafür fand, daß die Polar-

Zusammenhang zwischen
Sonnenfleckenzahl (R),
Grenzfrequenz für die F_2 -Schicht (F_2)
und erdmagnetischer Charakteristik (M)



lichter im allgemeinen nur in hohen Breiten auftreten und die statistisch erfaßten Zonen gleicher Polarlichthäufigkeit konzentrisch zu den geomagnetischen Polen liegen. Zunächst war man der Meinung, daß es von der Sonne ausgesandte Elektronen sein müßten, die auf Grund ihrer elektrisch negativen Polarität bei der Annäherung an die Erde von dem Magnetfeld so abgelenkt würden, daß sie nur in bevorzugten Regionen nahe der Geomagnetenpole in die hohe Erdatmosphäre eindringen könnten. Dort sollten sie durch Energieübertragung die hochverdünnten Gase

zum Leuchten anregen. Von dieser durchaus plausiblen Annahme ausgehend, konnte der norwegische Polarlichtforscher C. Störmer in Modellrechnungen und -versuchen von 1904 bis 1907 recht erstaunliche Übereinstimmungen zwischen Theorie und Beobachtung nachweisen.

Die Anregung zu seinen Arbeiten erhielt Störmer durch Experimente seines Landsmannes Birke-land. Dieser schuf kurz zuvor eine kleine „Modellerde“, in deren Inneren ein kleiner Elektromagnet untergebracht wurde. Das Modell erhielt einen Überzug aus einem Stoff, der beim



Auftreffen von Elektronen aufleuchtet. Den Körper hängte Birkeland in einem Gehäuse auf, das so weit wie möglich luftleer gepumpt wurde. Es sollte den „Weltraum“ darstellen. Zur Imitation der Sonne als Elektronenquelle diente eine mit dem Gehäuse verbundene Katodenstrahlröhre. Den Ablauf des Versuches und die überraschenden, aufsehenerregenden Ergebnisse beschrieb Birkeland wie folgt:

„Wenn der kleine Erdkörper unmagnetisch war, so leuchtete nur die Hälfte, die den Kathodenstrahlen ausgesetzt war, und zwar in regelmäßig verteiltem Licht.

Schaltete man dagegen den Magnetismus ein, so wurde die Erscheinung ganz anders. Die Kathodenstrahlen wurden vor der Oberfläche der Kugel zurückgelenkt, mit Ausnahme von gewissen Stellen in der Polargegend. Man sieht hier am Nordpol wie am Südpol, daß die Kathodenstrahlen als schräge Lichtkeile mit strahlenförmiger Struktur an die kleine Erde herankommen, und man kann sie im Raum um die Kugel bis zu einem Abstand von 5 Zentimetern von ihrer Oberfläche wahrnehmen. Diese zwei leuchtenden Keile treffen die Oberfläche der kleinen Erdkugel und erzeugen zwei schmale leuchtende Bänder, eins in der Nähe des Nordpols und eins in der des Südpols.“

So denkwürdig die Ergebnisse der Birkelandschen Versuche auch waren, alle Fragen vermochten sie nicht zu beantworten. Heute weiß man beispielsweise, daß nicht nur Elektronen, sondern vor allem Protonen an der Erzeugung der Polarlichter beteiligt sind. Damit hat sich das Bild von den Vorgängen in der Hochatmosphäre weiter kompliziert. Doch die solare Herkunft der Polarlicht-Partikelströme bestätigte sich eindeutig durch den absoluten Gleichlauf der Häufigkeitskurven für Sonnenflecken und Polarlichter.

Der direkte Nachweis von Protonen als Bestandteile der von der Sonne kommenden Partikelströme gelang durch die Analyse der Polarlicht-

spektren. Die schwachen Linien des Wasserstoffes in den Spektren besonders intensiver Nordlichter – als Folge der Rekombination der Protonen mit Elektronen – zeigten sich ganz beträchtlich aus ihrer Normallage nach dem violetten Teil des Spektrums hin verschoben. Diese Verschiebung kann nur als Doppler-Effekt gedeutet werden, das heißt, daß sich die ursprünglich solaren Protonen mit 2000 bis 3500 km/s der Erde nähern. Diese Geschwindigkeiten stehen jedoch in einem gewissen Widerspruch zu Feststellungen, aus denen man indirekt auf die Reisegeschwindigkeit der Partikel zwischen Sonne und Erde schließen kann. Es handelt sich dabei um die Zeitdifferenz zwischen einer chromosphärischen Eruption, die man als Quelle der Partikelstrahlung ansehen darf, und dem Einsetzen erdmagnetischer Störungen. Wenn man diese Störungen als Auswirkung des Partikelstroms in Erdnähe betrachtet, dann ergeben sich im Mittel etwa 1500 km/s als „Marschgeschwindigkeit“ für die geladenen Teilchen. Man könnte diesen Widerspruch sehr leicht lösen, wenn man annimmt, daß die Partikel in Erdnähe durch elektrische Kräfte sozusagen „nachbeschleunigt“ werden.

Magnetstürme und Partikelströme

Weiterhin darf die Deutung erdmagnetischer Störungen als Folge von Einbrüchen solarer Partikelströme in den erdnahen Raum als erwiesen gelten. Diese gelegentlich sehr heftigen Störungen des erdmagnetischen Feldes (auch als „Magnetstürme“ bezeichnet) treten nämlich bevorzugt etwa 1 bis 2 Tage nach großen chromosphärischen Eruptionen auf. Selbst die Magnetenadeln gewöhnlicher Kompass führen dann in höheren geographischen Breiten einen wahren Hexentanz auf. Es kann in den gleichen Gegenden sogar vorkommen, daß durch Induktionswirkung der Magnetfeldänderungen auf elektrische Leiter das

Stromversorgungs- und Telegrafennetz empfindlich gestört werden. Der Zusammenhang ist leicht einzusehen. Die bei dem solaren Ausbruch herausgeschleuderten geladenen Teilchenwolken verhalten sich elektrisch wie große Metallkörper. Dringt eine solche Wolke in das Erdmagnetfeld ein, so wird in ihr ein Strom induziert. Dieser Strom erzeugt nun selbst wieder ein Magnetfeld, das sich dem primären als Störung überlagert.

Wenn man das erdmagnetische Geschehen richtig erfassen will, muß man also berücksichtigen, daß zu dem ständig mit dem Erdkörper verbundenen (permanenten) Magnetfeld auch noch von außen wirksame und ständig veränderliche Überlagerungen kommen. Andererseits übt damit aber auch das permanente Magnetfeld der Erde einen wesentlichen Einfluß auf das physikalische Geschehen in der Hochatmosphäre und im erdnahen kosmischen Raum aus. Hier haben wir wiederum ein Beispiel für die vielfältigen Verknüpfungen gefunden, die letztlich den gesamten physikalischen Mechanismus der Erdatmosphäre bestimmen. Als besonders bedeutungsvoll erwiesen sich dabei immer wieder die chromosphärischen Eruptionen. Wie wir sahen, sorgen die bei einer Eruption ausgesandten extrem kurzwelligen elektromagnetischen Strahlungen für anomale Ionisationseffekte in der Hochatmosphäre und für Beeinträchtigungen des Funkverkehrs. Die ausgestoßenen Wolken elektrisch geladener Partikel geben sich später in Erdnähe durch heftige Störungen des erdmagnetischen Feldes und in der Hochatmosphäre durch Polarlichter zu erkennen. Der schweizerische Sonnenforscher M. Waldmeier hat in diesem Zusammenhang den originellen Vergleich geprägt, daß man von dem „Abschuß“ der Partikelstrahlung auf der Sonne zunächst das „Mündungsfeuer“ beobachten könne (Spektroheliograph oder Lyot-Filter) und daß der „Einschlag“ der kosmischen Geschosse etwa 17 bis 30 Stunden später durch die Reaktionen von Erdmagnetfeld und Hochatmosphäre zu verzeichnen sei.

Außer den sporadischen, von chromosphärischen Eruptionen ausgehenden Partikelwolken gibt es aber offenbar noch kontinuierliche solare Ströme, in denen die Teilchen nur mit Geschwindigkeiten von einigen hundert Kilometern in der Sekunde durch den Raum fliegen. Sie führen zu länger anhaltenden, weniger heftigen erdmagnetischen Störungen. Diese Störungen zeigen eine Wiederholungstendenz im Rhythmus der Sonnenrotation (27 Tage), woraus sich auf relativ langlebige Ursprungsherde (bis zu einem Jahr) schließen läßt. Eine Zuordnung dieser hypothetischen Partikelherde, man nennt sie „M-Regionen“, zu sichtbaren Erscheinungen der Sonnenoberfläche ist bisher jedoch nicht möglich gewesen.

Aus der Beschäftigung mit den Beziehungen zwischen solaren Strahlungsausbrüchen und geophysikalischen Erscheinungen zog man schließlich noch einen besonders erwähnenswerten Schluß. Wir erinnern uns, daß der Widerspruch in den Reisegeschwindigkeiten für Protonen aus Eruptionen nur dann geklärt werden könnte, wenn man eine Nachbeschleunigung der Teilchen in einem elektrischen Feld unterstellt. Diese Nachbeschleunigung müßte jedoch schon in einem Abstand von mehreren Erdradien stattfinden. Es schien zunächst schwierig, eine plausible Erklärung für die Existenz elektrischer Felder in diesem Bereich zu geben. Aber aus theoretischen Betrachtungen folgerten 1931 S. Chapman und 1947 D. F. Martyn, daß ein elektrischer Ringstrom die Erde etwa in der Äquatorebene umgeben müsse. Man nahm an, daß er etwa 5 Erdradien von der Oberfläche entfernt sei. Sein Durchmesser sollte etwa das Doppelte des Erddurchmessers betragen. Für die Entstehung dieses entgegen der Erdrotation fließenden Stromsystems machte man die Ablenkung des normalen Erdmagnetfeldes auf ankommende solare Korpuskeln und eine anschließende Ladungstrennung verantwortlich. Der Beweis für die Richtigkeit dieser kühnen Behauptung konnte allerdings nur von Raumflugkörpern

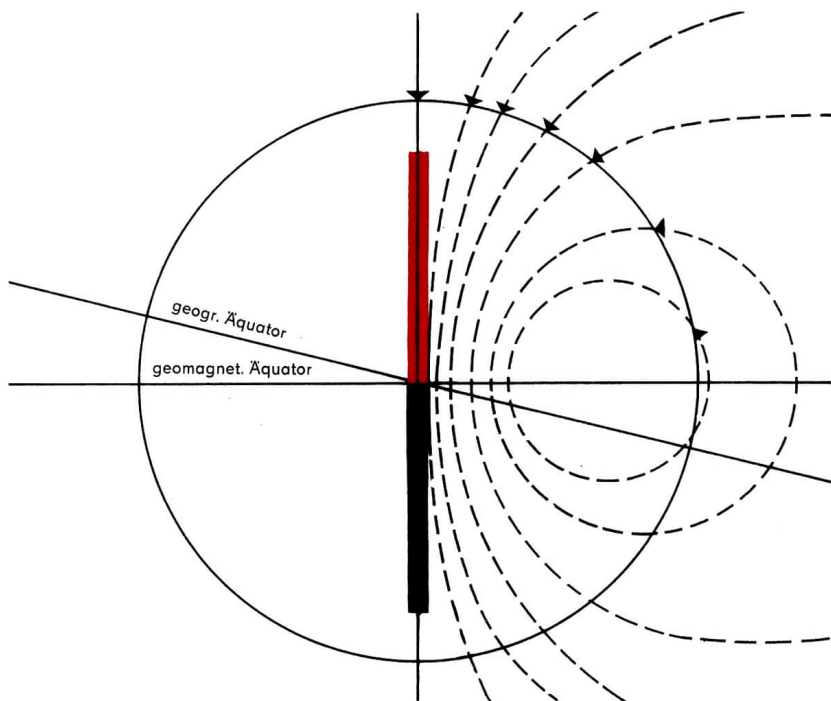
erwartet werden, die mit entsprechenden Meßgeräten bis in diese Bereiche vorzudringen vermochten. Mit welchem Erfolg dieser Weg beschritten wurde, darüber wird noch ausführlich zu berichten sein.

Alle Untersuchungen und Erkenntnisse, von denen bisher die Rede war, ergeben schließlich für die Hochatmosphäre, für die physikalischen Bedingungen im erdnahen Raum und für die solar-terrestrischen Beziehungen noch längs kein abgerundetes Bild. Dennoch ist es erstaunlich und bewundernswert, was die Wissenschaftler auf diesen Wegen in mühevoller und scharfsinniger Kleinarbeit an bedeutsamen Erkenntnissen über diese Räume zusammengetragen haben. Dabei standen ihnen bis Mitte der vierziger Jahre keinerlei Hilfsmittel zur Verfügung, mit denen man direkte Messungen dort vornehmen konnte. Die bis dahin alleinige Möglichkeit, direkte Information aus der Hochatmosphäre durch Ballonaufstiege zu gewinnen, konnte das allgemeine Bild zwar um viele wichtige neue Einzelheiten bereichern, im Prinzip aber blieb die Beobachtungs- und Meßtechnik an die Erdoberfläche gefesselt.

Eine wirklich neue Qualität in der Erforschung der Hochatmosphäre, des kosmischen Raumes sowie der solar-terrestrischen Beziehungen und anderer physikalischer Erscheinungen brachte erst die Raketen- und Raumflugtechnik.

Moderne Stratosphärenaufstiege

Nachdem um das Jahr 1947 die ersten neuen unbemannten Ballone aus hauchdünnem Plastmaterial Höhen von über 30 000 m erreichten, versuchte man, die gewonnenen Erfahrungen für bemannte Aufstiege auszunutzen. Aber erst etwa 10 Jahre später kam es zu einem praktischen Versuch in den USA. Das Hauptanliegen bei diesem Projekt „Man High“ bestand jedoch mehr in einer Erprobung von Kabinenkonstruktionen und Ein-

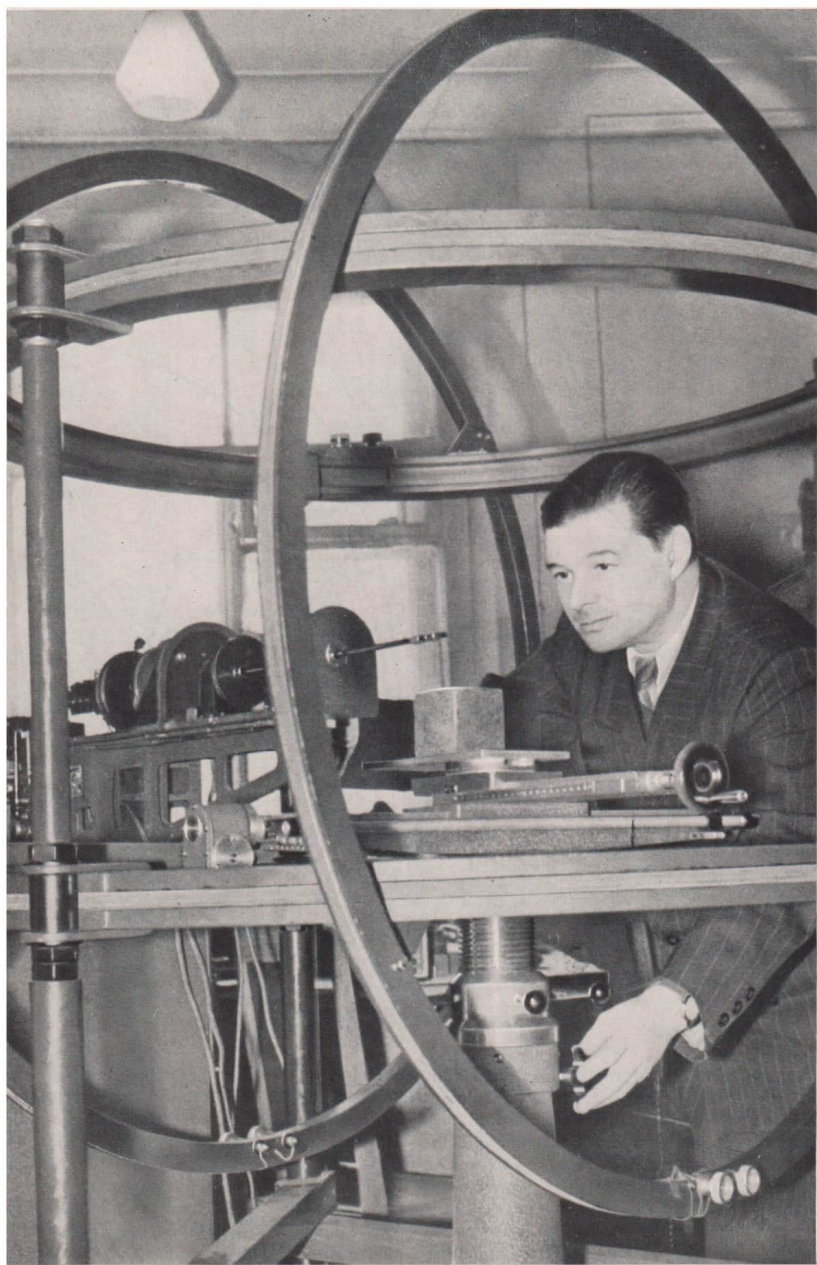


richtungen für Raumflugzwecke. Darüber hinaus hatte der im „Alleingang“ startende Ballonführer D. Simons ein umfangreiches wissenschaftliches Programm zu erfüllen, das hauptsächlich Luftfahrtmediziner, Meteorologen und Astronomen zusammengestellt hatten.

Simons war Raumfahrtbiologe; er hatte zuvor bei der amerikanischen Luftwaffe eine Spezialausbildung als Ballonfahrer erhalten. Auch hierbei be-

gann sich wieder die allgemeine Tendenz einer Verschiebung zu militärischen Interessenträgern für avantgardistische technisch-wissenschaftliche Experimente abzuzeichnen, wie sie besonders nach dem zweiten Weltkrieg in zunehmendem Maße in den USA in Erscheinung trat.

Der „Man-High“-Ballon, mit dem Simons am 19. August 1957 aufstieg, hatte ein Fassungsvermögen von 85 000 m³ und einen Durchmesser von



rund 61 m. Die Ballonhülle bestand aus einem speziell für den Stratosphärenflug geschaffenen Polyäthylen-Film von nur rund 0,04 mm Dicke. Dieser Film war selbst bei tiefen Temperaturen noch sehr flexibel. Das Kernstück der Gondel bildete eine sehr kleine zylindrische Kapsel, die hermetisch verschließbar war und aus warmvergütetem Aluminiumguß bestand. Die Kabine war so eng, daß sich der Pilot in seinem Sitz kaum rühren konnte, von einem Aufstehen ganz zu schweigen. Die Verbindung zwischen Ballon und Gondel schuf ein großer Lastfallschirm, der in jedem Fall eine sichere Landung der Gondel garantierte. Darüber hinaus hatte der Pilot noch einen eigenen Rettungsfallschirm.

Der Ballon erreichte nach etwa 2 Stunden und 18 Minuten eine Gipfelhöhe von rund 30 000 m. Obwohl Störungen an seiner Funkanlage auftraten, entschloß sich Simons, die Nacht in der Stratosphäre zu verbringen. Wegen der Abkühlung seiner Gasfüllung sank der Ballon in der Nacht bis auf etwa 21 000 m ab; nach Sonnenaufgang stieg er wieder auf 27 400 m Höhe. Bald darauf mußte Simons freilich die Landung einleiten, da er durch den langen Höhengedächtnis Schwierigkeiten mit seiner Atemluftanlage bekam. Nach einer Gesamtflugdauer von 32 Stunden und 10 Minuten gelang eine sichere Landung.

Da die „Man-High“-Gondel mit optischen Ausblicken und einem Teleskop (12,5 cm Objektivöffnung) ausgerüstet war, konnte Simons auf seiner Stratosphärenexpedition Beobachtungen machen, zu denen vor ihm noch kein Mensch in der Lage war. So zeigten die Sterne durch das Teleskop ein praktisch völlig szintillationsfreies Bild. Der Horizont wurde verschiedentlich derart klar, daß der Beobachter die Erdkrümmung deutlich sehen konnte. Mit einem Spezialphotometer registrierte Simons die Leuchtdichte des Himmels, und mit anderen Meßelementen nahm er eine Reihe von Strahlungsmessungen vor. Um für raumfahrtmedizinische Zwecke die Wirkung der kos-

mischen Strahlungen auf das menschliche Blut kennenzulernen, wurden Simons in bestimmten Abständen automatisch Blutproben entnommen.

Simons Rekordhöhe für bemannte Ballonaufstiege überbot am 16. August 1960 der amerikanische Fliegerhauptmann J. Kittinger. Er sollte prüfen, auf welche Weise ein Fallschirmspringer, der gezwungenermaßen viele Kilometer im freien Fall überwinden muß, vor Erfrieren und Sauerstoffmangel geschützt werden kann. Derartige Probleme können für Rettungsabsprünge von Raumfahrern bedeutungsvoll werden. Kittinger stieg in einer offenen Gondel bis auf eine Höhe von 31 330 m. Er trug keinen geschlossenen Druckanzug, sondern eine Kombination, die den Körper stellenweise unter Druck hielt, und dazu einen Druckhelm. Nach seinem Absprung in Gipfelhöhe legte Kittinger 26 000 m im freien Fall zurück. Er erreichte dabei eine maximale Fallgeschwindigkeit von 200 m/s. Zur Stabilisierung während des 4 Minuten und 38 Sekunden dauernden freien Falls konnte er einen 2 m großen Hilfsfallschirm benutzen.

Fernrohre am Ballon

Von größerer Tragweite für die Weltraumforschung als diese von amerikanischen Militärdienststellen veranstalteten Unternehmungen waren aber Bemühungen wissenschaftlicher Kreise, die moderne Ballontechnik und die Fortschritte der Gerätetechnik in den Dienst speziell astronomischer Forschungsaufstiege zu stellen. Der französische Astronom A. Dollfus stieg am 30. Mai 1954 mit einem kleinen, 7000 m³ fassenden Ballon auf eine Höhe von allerdings nur 6850 m. Aber zum erstenmal wurde dabei ein Spezialspiegelteleskop von 28 cm Durchmesser (Konstrukteur: B. Lyot) mitgeführt. Dieser Versuch sollte lediglich den Nachweis erbringen, daß der Freiballon auch für astronomische Beobachtungszwecke verwendbar ist. Das Resultat war so befriedigend, daß derartige



Aufbauschema des Ballonteleskops „Stratoscope-II“.

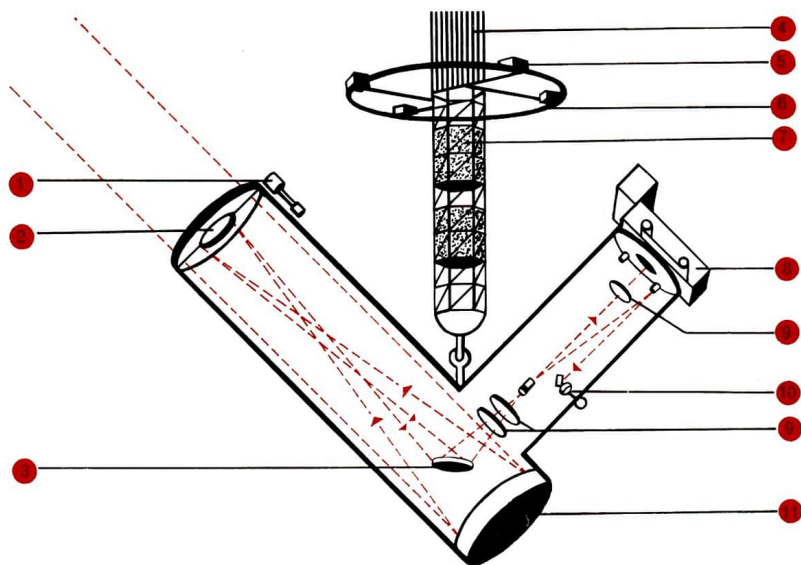
- | | |
|-------------------------|-----------------------------|
| 1 Sucher-Fernsehkamera; | 7 Elektronik; |
| 2 Sekundärspiegel; | 8 Filmkassette; |
| 3 Coudé-Spiegel; | 9 Hilfslinse; |
| 4 Tragseile; | 10 Fernseh-Feineinstellung; |
| 5 Batterie; | 11 Hauptspiegel |
| 6 Schleppring; | |

Arbeiten mit zunehmender Intensität fortgesetzt wurden. Bei zwei weiteren Aufstiegen in den Jahren 1956 und 1957 wurden insgesamt 1000 Sonnenaufnahmen gemacht, auf denen Details von 200 km Ausdehnung scharf erkennbar waren; bis zu diesem Zeitpunkt ließen die besten Aufnahmen von der Erdoberfläche aus lediglich Feinheiten der Sonnenoberfläche mit etwa 500 km Durchmesser deutlich sichtbar werden.

Anschließend konstruierte Dollfus eine geschlossene Leichtmetallgondel, an der sich ein Spiegelteleskop von 50 cm Öffnung befand. Als Trägersystem griff er auf eine Idee Piccards zurück, der dieser schon viel früher die Bezeichnung „Plejaden“-Technik gegeben hatte. An die Stelle

eines einzelnen Riesensballons trat eine „Traube“ kleinerer Ballone, und zwar 104 Stück. Eine ähnliche Methode verwendete übrigens auch schon Regener bei den Aufstiegen seiner Ballonsonden. Am 22. April 1959 erreichte Dollfus mit diesem System eine Höhe von 13 200 m. Die Ergebnisse dieses Aufstieges waren jedoch nicht sehr befriedigend. Die Nachteile eines bemannten Ballons machten sich nämlich insofern stark bemerkbar, daß allein schon die Atembewegungen des Beobachters unvermeidbar den Teleskopträger in Unruhe brachten.

Erst durch die Fortsetzung solcher Versuche mit unbemannten Ballonen konnten diese Schwierigkeiten von vornherein vermieden werden. Das



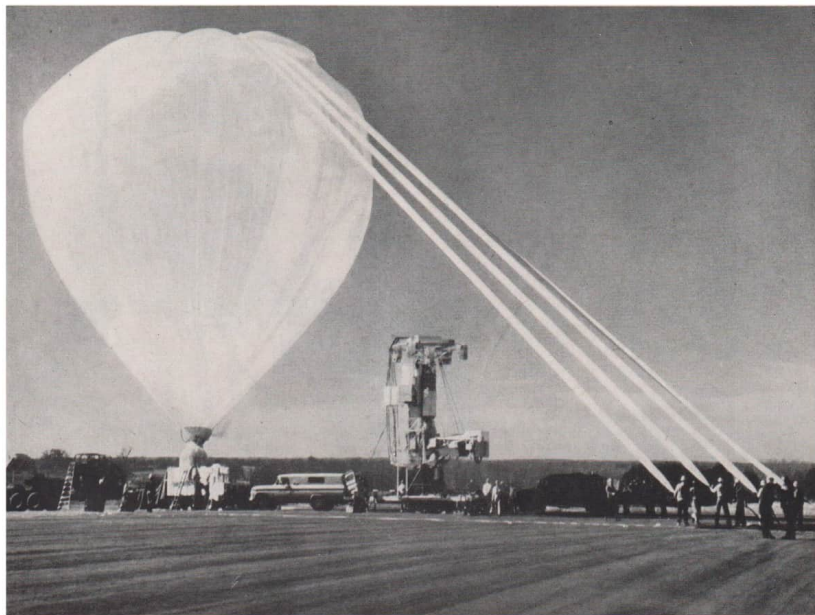
Projekt „Stratoscope“ des deutsch-amerikanischen Astronomen Martin Schwarzschild (Sohn des Astrophysikers Karl Schwarzschild (1873 bis 1916), nach dem die Sternwarte in Tautenburg bei Jena benannt wurde) setzte sich zum Ziel, mit einem automatisch arbeitenden Observatorium die Feinstruktur der Sonnenoberfläche aus Höhen von 25 000 m und darüber zu erforschen. Später sollten auch Planetenuntersuchungen in das Arbeitsprogramm einbezogen werden. Das erste Beobachtungssystem bestand aus einem „Skyhook“-Ballon („Himmelshaken“, wegen seiner langen Verweilzeit in Gipfelhöhe) und einem 30-cm-Spiegelteleskop mit 240 cm Brennweite. Der Spiegel war aus Quarz, weil dieses Material gegen wechselnde Temperatur weniger empfindlich ist als gewöhnliches Glas. Die Fernrohrkonstruktion hatte eine Masse von 135 kg. Der Durchmesser des Sonnenbildes im Newton-Fokus betrug etwas mehr als 2 cm; durch ein vor der Aufnahmekamera befindliches System wurde es aber auf etwa 54 cm nachvergrößert. Die Ausrichtung des Teleskopes auf die Sonne besorgten vier Photozellen und eine entsprechende automatische Steuerung.

Nach einem Probeaufstieg gelangte Stratoscope-I am 25. September 1957 in eine Höhe von 26 000 m, in der das kleine Sonnenobservatorium rund 4 Stunden und 45 Minuten verblieb. Nachdem rund 8000 Aufnahmen von Ausschnitten der Sonnenoberfläche gemacht worden waren, trennte sich das Beobachtungssystem vom Ballon und gelangte nahezu unbeschädigt wieder zur Erdoberfläche zurück. Die Aufnahmen ließen teilweise in den inneren Strukturen der Sonnenflecken Feinheiten erkennen, wie sie bis zu diesem Zeitpunkt auch nicht annähernd erreicht werden konnten. Ein gewisser Nachteil der Konstruktion bestand allerdings darin, daß die Auswahl der Ausschnitte weitgehend dem Zufall überlassen blieb. Schwarzschild verbesserte daher die Apparatur durch ein Fernsehsystem, das dem auf der Erdoberfläche arbeitenden Astronomen die Auswahl besonders

interessierender Bildausschnitte ermöglichte. Bei einem Aufstieg mit dieser Anlage am 17. August 1959 gelangen Sonnenaufnahmen von einmaliger Schärfe, die noch Feinheiten bis zu 150 km Durchmesser zeigten.

Aus diesen Erfahrungen heraus schuf Schwarzschild später Stratoscope-II, das vornehmlich für Untersuchungen an Planeten gedacht war. Für das Teleskop von 91 cm Öffnung wurde wieder ein Quarzspiegel hergestellt, der bei einer Dicke von 14 cm eine Masse von 185 kg hatte; es war gleichzeitig die bis dahin größte Optik dieser Art. Das vollständige Instrument hatte eine Masse von 1820 kg. Es erreichte ein Auflösungsvermögen, das noch eine Trennung zweier 30 cm voneinander entfernter Lichtquellen auf eine Beobachtungsentfernung von 500 km gestattete. Das System Stratoscope-II war beim Flug mit Ballon und Lastfallschirm insgesamt rund 200 m hoch.

Nach verschiedenen fehlgeschlagenen Startversuchen gelang der erste erfolgreiche Aufstieg von Stratoscope-II am Abend des 1. März 1963. Der Ballon erreichte eine Höhe von rund 24 000 m und trieb dort etwa 12 Stunden lang. Das Ziel dieses Unternehmens waren Untersuchungen an Planeten Mars, dessen scheinbarer Durchmesser in der Opposition Anfang Februar 1963 mit 14 Bogen Sekunden allerdings kaum mehr als die Hälfte desjenigen betrug, der bei günstigen Periheloppositionen möglich ist. Zur Einstellung des Fernrohrs auf den Mars dienten zwei Fernsehanlagen, die das Fernrohrbild zu einem „Kommandowagen“ übertrugen, der dem Ballon während seiner Drift von 1120 km ständig folgte. Außer fotografischen Aufnahmen des Planeten auf Infrarot-Film wurden vor allem Spektraluntersuchungen im gleichen Wellenlängenbereich angestellt. Zu den bemerkenswerten Ergebnissen zählte vor allem der erstmalig eindeutig gelungene Nachweis von Wasserdampf in der Marsatmosphäre. Die Landung des kostbaren Instrumentariums (2,2 Millionen US-Dollar) verlief absolut zufriedenstellend,



so daß das Teleskop unbeschädigt geborgen werden konnte.

Mit diesen Hinweisen auf moderne Unternehmungen, bei denen man im „Vorzimmer zum Welt-raum“, in der Hochatmosphäre, auf „klassischen“ Wegen nach neuen Ausgangspositionen und Erkenntnissen für die praktische Weltraumforschung sucht, wollen wir unseren Ausflug durch diesen Bereich abschließen. Es war in dem hier gewählten Rahmen nicht möglich, auch nur einen annähernd vollständigen Überblick zu geben. Und doch liegt schon jetzt eine fast beängstigende Fülle von Tat-

sachen und Problemen vor uns, durch die sich das Bild kosmischer, vor allem solarer Einflüsse auf das geophysikalische Geschehen weiter abrundete. Sicherlich war auch zu erkennen, daß mit dem so gewonnenen Informationsmaterial noch längst nicht befriedigende Antworten auf alle Fragen gefunden werden können.

Für die Untersuchung vieler Probleme hat die Wissenschaft kaum mehr als ein paar Anhaltspunkte oder gar nur Andeutungen erhalten. Besonders deutlich trat dieser Mangel auf, als es um Informationen über sehr hochliegende Bereiche



der Erdatmosphäre ging. Über die Exosphäre war kaum mehr auszusagen, als daß sie oberhalb der Ionosphäre beginnen, freie Ladungsträger (Elektronen, hochionisierte Atomreste, Protonen) mit starken Temperaturbewegungen enthalten und in etwa 1000 bis 1200 km Höhe allmählich in den interplanetaren Raum übergehen sollte. Eine echte Übergangsgrenze zwischen Ionosphäre und Exosphäre ließ sich dabei ebenso schlecht bestimmen, wie zwischen Exosphäre und dem freien interplanetaren Raum.

Es war damit offenkundig, daß sich die Fesseln

und Hindernisse für den „klassischen“ Beobachterstandpunkt auf oder nahe der Erdoberfläche immer deutlicher abzuzeichnen begannen. Erst von einer bisher völlig unbekannten Beobachtungsposition aus, nämlich oberhalb von 50 km Höhe und im freien Weltraum, konnte man noch entscheidende Ergänzungen dieses Bildes erwarten. Den einzig möglichen Weg dazu bot die Raketen- und Raumflugtechnik. Nur mit ihrer Hilfe ist es möglich, Meßinstrumente und gegebenenfalls auch Wissenschaftler direkt in das große Laboratorium „Kosmos“ zu bringen.

Der Schritt über die Schwelle

Die theoretischen und praktischen Grundlagen der Raketentechnik sollen uns nur soweit interessieren, als sie zum Verständnis der Eigenschaften und Besonderheiten von Trägerraketen für Höhenforschung und Raumflugtechnik notwendig sind. Unter „Höhenforschung“ ist der Aufgabenkreis zu verstehen, der auch im Sinne der zuvor betrachteten Methoden die Untersuchung der Hochatmosphäre und der geophysikalischen Erscheinungen im erdnahen Raum zum Ziel hat. Der Einsatz von Raketen und Meßsatelliten für die Höhenforschung erweitert und ergänzt also gewissermaßen logisch die klassischen Verfahren, wogegen die mit künstlichen Erdsatelliten eingeleitete Raumflugtechnik darüber hinaus noch völlig neue wissenschaftliche Möglichkeiten erschließt.

Das Raketenprinzip

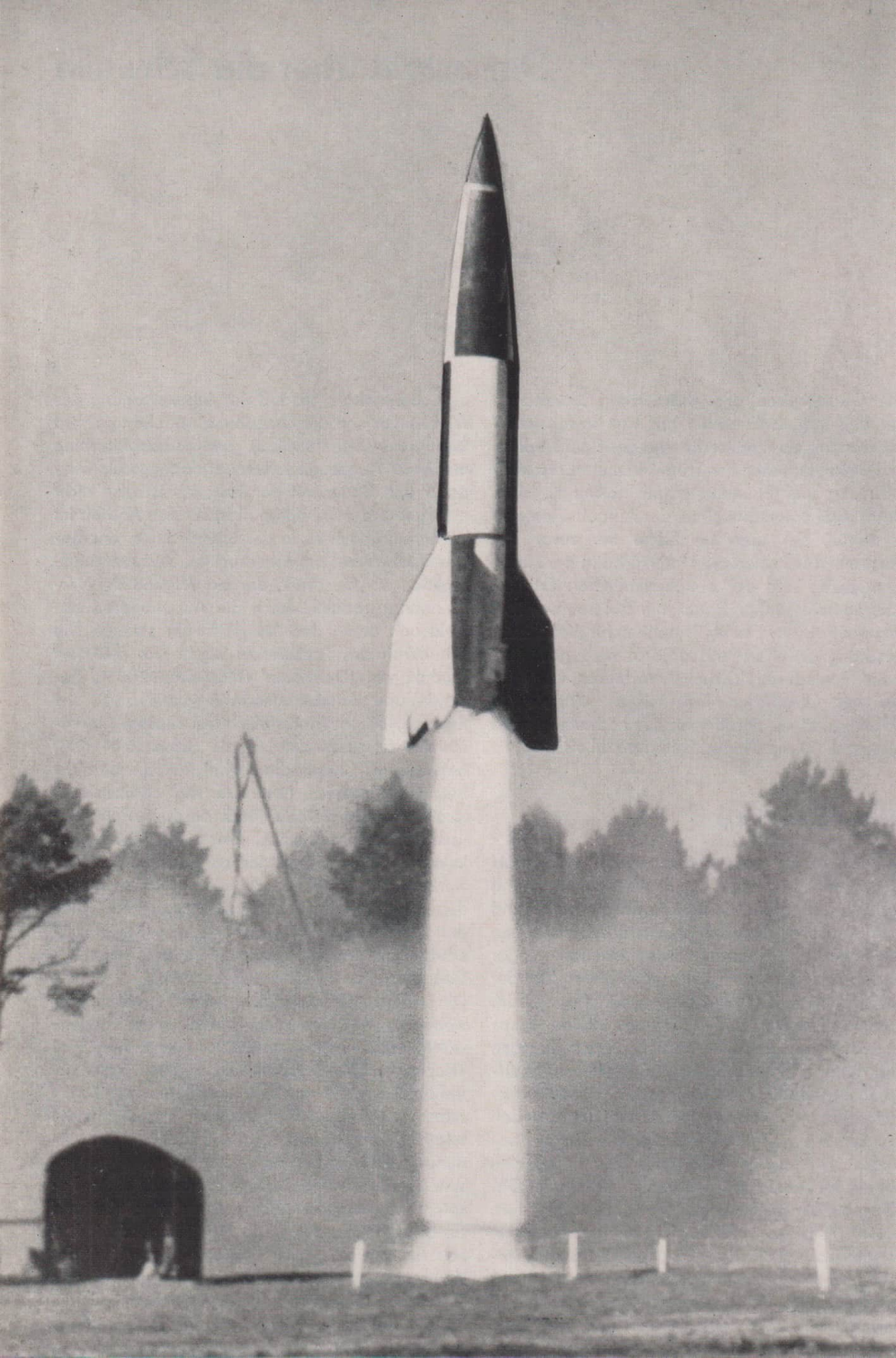
Die epochemachende Bedeutung der Rakete als Hilfsmittel der Höhen- und Weltraumforschung liegt darin begründet, daß die Rakete auf Grund ihres Antriebes Bereiche jenseits der Gipfelhöhen von Ballon und Flugzeug sowie im weiteren sogar den kosmischen Raum und fremde Himmelskörper der direkten Untersuchung zugänglich macht. Während Ballon und Flugzeug infolge aerostatischer bzw. aerodynamischer Kräfte aufsteigen und daher ihre Aufstiegshöhen objektiven, natürlichen Begrenzungen unterliegen, ist das Antriebsverfahren der Rakete von einer umgebenden Atmosphäre völlig unabhängig. Die Rakete bewegt sich – nach dem Rückstoßprinzip – durch den Impuls der Masse eines mit einer bestimmten Geschwindigkeit austretenden „Antriebsstrahls“ fort. Dieser Antriebsstrahl kann auf verschiedenen Wegen erzeugt werden. Das bisher übliche Verfahren beruht auf einer chemischen Verbrennung von Treibstoffen. Diese werden von der Rakete in Vorratsbehältern mitgeführt und sind stets eine Kombination von „Oxydator“ (Sauerstoffträger)

und „Brennstoff“, so daß der Arbeitsvorgang des Triebwerkes von der Umgebung unabhängig wird (autogener Strahlantrieb). Die Luftstrahltriebchine moderner Flugzeuge verwendet dagegen als Oxydator den Sauerstoff der Luft; sie ist also nicht autogen und demzufolge nicht für den Antrieb im Weltraum geeignet. In der Brennkammer des Raketenriebwerkes entsteht durch die Verbrennungsreaktion ein Gasdruck, der ein Ausstoß der Verbrennungsprodukte durch die Ausströmdüse bewirkt und damit den Antriebsstrahl erzeugt. Die Schubkraft des Triebwerkes ergibt sich aus dem Produkt von „Durchsatz“ (Massenausstoß je Sekunde) und „Ausströmgeschwindigkeit“.

Raketen, deren Triebwerke nach diesem Grundschema arbeiten, werden als „chemische“ oder genauer, als „thermochemische“ Raketen bezeichnet. Grundsätzlich läßt sich die „Stützmasse“ (Treibstoff) zum Beispiel auch durch kernphysikalische Prozesse aufheizen, aber bisher gibt es noch keine im Einsatz befindlichen Kernenergetriebwerke. So konnten unter anderem aus verschiedenen kernphysikalischen und technischen Gründen (Strahlungsschutz) bisher nur geringe Fortschritte im entscheidenden Verhältnis von Antriebsmasse zu Schub erzielt werden.

Die in Höhenforschung und Raumflugtechnik verwendeten Antriebssysteme sind daher gegenwärtig noch immer ausschließlich thermochemische Triebwerke. Diese haben jedoch für die Raketentechnologie einen im wahrsten Sinne des Wortes „schwerwiegenden“ Nachteil, der letztlich auf die relative Energiearmut der chemischen Verbrennungsreaktionen zurückzuführen ist.

Wie bereits erwähnt, hängt der Schub eines Raketenriebwerkes von Ausströmgeschwindigkeit und Treibstoffdurchsatz ab. Die Ausströmgeschwindigkeit ist ihrerseits aber wieder von der bei der Verbrennungsreaktion frei werdenden Energie (Temperatur und Druck in der Brennkammer) abhängig. Selbst die energiereichsten Treibstoffe ergeben nur maximale Ausströmgeschwindigkeiten



Flächensatz nach Kepler

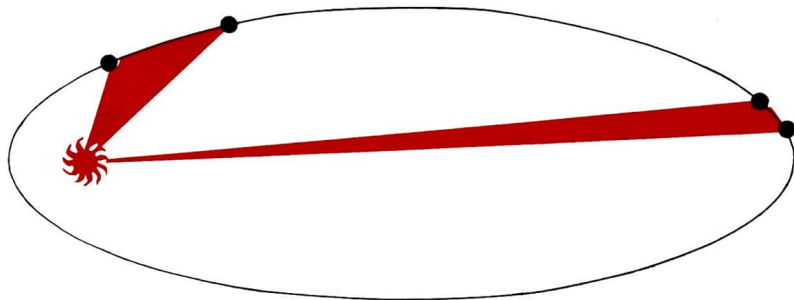
von etwa 4000 bis 4500 m/s. Deshalb sind zur Erreichung großer Schubkräfte, wie sie für die Beförderung von massereichen Raumflugkörpern benötigt werden, beträchtliche Massendurchsätze erforderlich. Thermochemische Raketen als Trägersysteme für Raumfahrtzwecke müssen daher in jedem Fall über einen im Verhältnis zur eigentlichen wissenschaftlichen Nutzmasse enorm großen Treibstoffvorrat verfügen. Die zunächst noch etwas beziehungslos dastehende Forderung nach großen Schubkräften hat selbstverständlich ihre natürliche Ursache in der Anziehungskraft der Erde. Diese muß ja beim Aufstieg durch die Antriebskraft einer Rakete überwunden werden, und es ist leicht einzusehen, daß die Antriebskraft um so größer sein muß, je größer die Startmasse der Rakete ist.

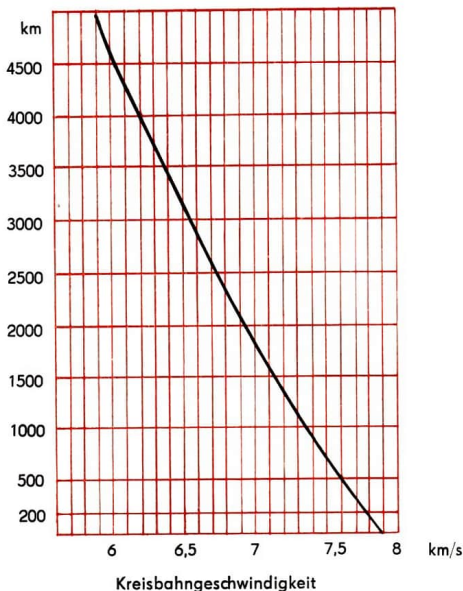
Bahnmechanik und Bahngeschwindigkeit

Die Antriebserfordernisse, die eine Rakete für Raumflugzwecke erfüllen muß, lassen sich sehr anschaulich aus den Geschwindigkeiten herleiten, die für den Einflug der jeweiligen Nutzmasse (Raumflugkörper) in eine astronautische Freiflugbahn erreicht werden müssen. In verall-

gemeinernden Darstellungen ist dabei von den sogenannten „astronautischen Geschwindigkeiten“ die Rede, und zwar von einer „ersten“ astronautischen Geschwindigkeit (7,9 km/s) für den Einflug in eine Erdsatellitenbahn sowie von einer „zweiten“ astronautischen Geschwindigkeit für das Verlassen des Erdgravitationsfeldes. Diese summarischen Definitionen entsprechen jedoch nicht den tatsächlichen, praktischen Gegebenheiten. Sie beziehen sich vielmehr auf rein theoretische Sonderfälle und können daher keine universelle Gültigkeit haben, wie es vielleicht die sehr absolut klingenden Formulierungen „erste“ bzw. „zweite astronautische Geschwindigkeit“ auszudrücken scheinen. Zu völlig verwirrenden Vorstellungen kann es führen, wenn in diesem Zusammenhang sogar von „kosmischen Geschwindigkeiten“ gesprochen wird.

Ein klares Bild läßt sich nur in einer umfassenderen Betrachtung grundlegender Beziehungen für die Bahnmechanik von Raumflugkörpern (Astrodynamik) gewinnen. Zunächst wäre der Begriff „Bahngeschwindigkeit“ zu klären. Man versteht darunter allgemein die Geschwindigkeit eines Raumflugkörpers relativ zu dem Himmelskörper, von dem entweder seine Bahn ausgeht oder in dessen Gravitationswirkungssphäre sie als ge-





schlossene Umlaufbahn verläuft. Ist letzteres der Fall, so wird die Bahngeschwindigkeit zur „Umlaufgeschwindigkeit“. Für die Kinematik eines Raumflugkörpers gelten nun stets die Gesetze der Himmelsmechanik, also die Gesetze, die auch die Bewegung der natürlichen Himmelskörper bestimmen. Im einfachsten Fall handelt es sich um ein sogenanntes „Zweikörper-Problem“ (Zentralkörper – Raumflugkörper), bei dem die Umlaufbewegung durch die drei berühmten Keplerschen Gesetze beschrieben wird.

Eines dieser Gesetze besagt, daß die Umlaufgeschwindigkeit nur im Fall einer idealen Kreisbahn während des gesamten Umlaufs konstant ist. Für elliptische Bahnen ergibt sich aus diesem Keplerschen Gesetz eine stetig veränderliche Umlaufgeschwindigkeit. Sie ist danach im Peripunkt (geringster Abstand zum Gravitationszentrum) der Umlaufbahn jeweils größer als in der Apopunkt (größter Abstand zum Gravitationszentrum), wobei der Geschwindigkeitsunterschied von der Elliptizität (Exzentrizität) der Bahn maßgeblich bestimmt wird. Zur Vereinfachung sollen im weiteren nur noch kreisförmige Bahnen betrachtet werden. Die jeweiligen Bahngeschwindigkeiten erhalten dann die spezielle Bezeichnung „Kreisbahn“- oder „Zirkulargeschwindigkeit“.

Nach einem anderen Keplerschen Gesetz zeigt sich weiterhin, daß die Kreishbahngeschwindigkeit mit wachsender Entfernung vom Umlaufzentrum abnimmt. Die Masse des Zentralkörpers spielt insofern eine Rolle, als bei gleicher Entfernung des umlaufenden Körpers die Kreishbahngeschwindigkeit um so größer wird, je größer die Masse des Zentralkörpers ist.

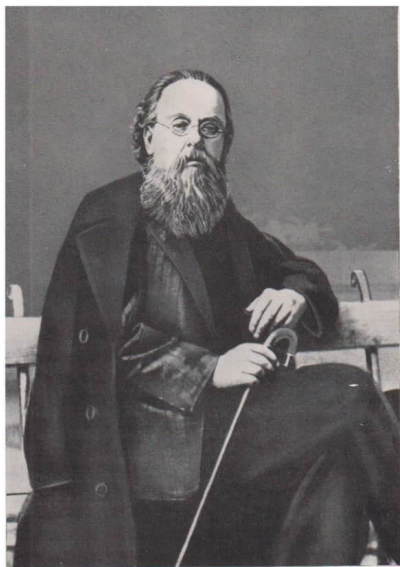
Für eine unmittelbar an der Erdoberfläche gelegene Kreisbahn, die in der Astrodynamik als „Minimum-Kreisbahn“ bezeichnet wird, würde sich also nach dem eben erwähnten Keplerschen Gesetz die theoretisch größtmögliche Kreishbahngeschwindigkeit eines Erdsatelliten ergeben. Sie läßt sich zu rund 7,9 km/s berechnen und ist

identisch mit der vielzitierten „ersten astronautischen Geschwindigkeit“. Da aber ein Satellitenumlauf unter diesen Bedingungen praktisch unmöglich ist, allein schon der Luftwiderstand würde dies verhindern, kommt diesem Zahlenwert eben nur spezielle, theoretische und auf keinen Fall verallgemeinerte, praktische Bedeutung zu. Um diese Zusammenhänge für grundlegende Betrachtungen mit der notwendigen Klarheit zum Ausdruck zu bringen, wird in der Astrodynamik der eindeutige Begriff „Minimumkreisbahn-Geschwindigkeit“ verwendet, wobei übrigens die exakte Formulierung „Minimumkreisbahn-Geschwindigkeit der Erde“ zu lauten hat; denn für jeden Himmelskörper ist eine eigene Minimumkreisbahn-Geschwindigkeit zu definieren. Für den Erdmond beträgt sie beispielsweise rund 1,7 km/s, für die Planeten Venus und Mars 7,3 bzw. 3,6 km/s. Es wäre also auch schon aus diesem Grunde unzweckmäßig, bei dem alten und so absolut klingenden Begriff der „ersten astronautischen Geschwindigkeit“ zu bleiben, da man dann das recht verwirrende Bild von entsprechend vielen „ersten“ astronautischen Geschwindigkeiten erhält. In der Praxis liegen nun alle Erdsatellitenbahnen, unabhängig ob kreisförmig oder elliptisch, wesentlich höher als die Minimumkreisbahn, und die zugehörigen mittleren Umlaufgeschwindigkeiten sind demzufolge kleiner als 7,9 km/s. Das

heißt, die jeweiligen Satellitenträgerraketen brauchen bei kreisähnlichen Umlaufbahnen durchaus nicht die Geschwindigkeit von 7,9 km/s zu erreichen oder gar zu übertreffen. Es wäre aber dennoch falsch, wollte man aus dem Vorangegangenen den Schluß ziehen, daß entferntere Umlaufbahnen antriebstechnisch eben deswegen vorteilhafter wären, weil sie geringere Umlaufgeschwindigkeiten erfordern. Man darf nämlich die zu erreichende Umlaufgeschwindigkeit nicht als das alleinige Äquivalent für die aufzuwendende Antriebsarbeit ansehen.

Die Gesamtenergie, die für den Einflug in eine Satellitenbahn erforderlich ist, setzt sich aus zwei Teilen zusammen: aus dem Energieaufwand, der allein für das Erreichen der gewünschten Umlaufgeschwindigkeit benötigt wird (kinetische Energie), und aus dem Energieaufwand für das bloße Heben der Satellitenmasse auf die vorgesehene Bahnhöhe (potentielle Energie). Während der kinetische Energieanteil wegen des Zusammenhangs zwischen Bahnhöhe und Umlaufgeschwindigkeit mit zunehmender Höhe kleiner wird, steigt der potentielle Energieanteil mit wachsender Bahnhöhe so stark an, daß die Gesamtantriebsarbeit mit steigender Bahnhöhe ebenfalls laufend zunimmt. Um diesen Sachverhalt auch zahlenmäßig leichter fassen zu können, wurde der Begriff „Antriebsbedarf“ geprägt. Man errechnet zunächst, welche Geschwindigkeit die Rakete im kräftefreien Raum (keine Anziehungswirkung, kein Luftwiderstand) erhalten würde, wenn die für das Heben auf die Umlaufbahn notwendige Antriebskraft ausschließlich zur Beschleunigung eingesetzt würde. Diese Äquivalentgeschwindigkeit faßt man mit der zugehörigen Umlaufgeschwindigkeit zu einer Summe zusammen, die schließlich entweder als „Antriebsbedarf“ oder gelegentlich auch als „charakteristische Geschwindigkeit“ bzw. „Vergleichsgeschwindigkeit“ bezeichnet wird. Man kann auch sagen, daß der Antriebsbedarf angibt, welche

Endgeschwindigkeit die Trägerrakete im kräftefreien Raum erreichen würde, und erhält so eine brauchbare Vergleichsgröße für die Antriebsforderungen bei verschiedenen Raumflugunternehmen. In der Praxis müssen dabei allerdings noch die Verluste durch den Luftwiderstand berücksichtigt werden. Unter Vernachlässigung der Wirkung der Erdatmosphäre würde somit der Antriebsbedarf für die Minimum-Kreisbahn 7,9 km/s betragen, für eine 557 km über der Erdoberfläche liegende Kreisbahn beispielsweise etwa 8,2 km/s und für eine Kreisbahn in 1670 km Höhe rund 8,7 km/s. Auch für die „zweite astronautische Geschwindigkeit“ gelten ähnlich einschränkende Überlegungen. Man bezeichnet damit die kleinstmögliche Geschwindigkeit, die einem Körper an der Erdoberfläche – bei Vernachlässigung der Erdatmosphäre – mitgeteilt werden muß, um ihn für immer aus dem Anziehungsbereich der Erde hinauszuschicken. In der Astrodynamik wird dafür treffender die Bezeichnung „Flucht-“ oder „Entweichgeschwindigkeit“ verwendet. Der Zahlenwert hierfür von rund 11,2 km/s hat jedoch wiederum nur rein theoretische Bedeutung, da die realen Bedingungen einen solchen Abflug für Raumflugkörper praktisch unmöglich machen. Es läßt sich aber aus den Gesetzen der Bahnmechanik ein sehr wichtiger allgemeiner Zusammenhang herleiten. Für einen in einer bestimmten Höhe über der Erdoberfläche liegenden Ausgangspunkt (zum Beispiel Brennschlußpunkt einer Trägerrakete) hängt nämlich die Fluchtgeschwindigkeit ebenso von der Entfernung vom Massenzentrum der Erde ab wie die für diese Höhe geltende Kreisbahngeschwindigkeit. Die zu einer vorgegebenen Ausgangshöhe gehörende Fluchtgeschwindigkeit läßt sich aus der entsprechenden Kreisbahngeschwindigkeit durch Multiplikation mit dem Faktor $\sqrt{2} = 1,414$ leicht berechnen. Daraus folgt für die Minimumkreisbahn, also Abflug ab Erdoberfläche, die schon genannte Fluchtgeschwindigkeit von rund 11,2 km/s. Für jede höher



liegende Kreisbahn ist die Fluchtgeschwindigkeit entsprechend niedriger. Beispielsweise beträgt sie für eine Ausgangshöhe von etwa 620 km nur noch rund 10,6 km/s.

So kann man also praktisch nicht mehr von der Fluchtgeschwindigkeit schlechthin sprechen, sondern erhält eine Vielfalt von höhenabhängigen Fluchtgeschwindigkeiten. Daraus folgt dann auch der geringere Informationswert des Begriffs „zweite astronautische Geschwindigkeit“. Für den Fall dieser wieder nur rein theoretisch interessierenden Fluchtgeschwindigkeit ab Erdoberfläche muß dann die korrekte Bezeichnung „Fluchtgeschwindigkeit für Minimumkreisbahnhöhe der Erde“ verwendet werden. In allen anderen Fällen muß die Beziehungshöhe der jeweiligen Fluchtgeschwindigkeit oder der umgekehrte Zusammenhang beachtet werden. Darüber hinaus gelten für die Anwendung dieser Überlegungen auf andere Himmelskörper die schon bei der Kreisbahngeschwindigkeit dargelegten Verhältnisse. Hinsichtlich der beim Start von interplanetaren Raumflugkörpern – bei ihnen wird in jedem Fall das Überschreiten der Fluchtgeschwindigkeit erforderlich – zu leistenden Antriebskraft, gelten im übrigen ebenfalls die schon bei Umlaufbahnen betrachteten Zusammenhänge.

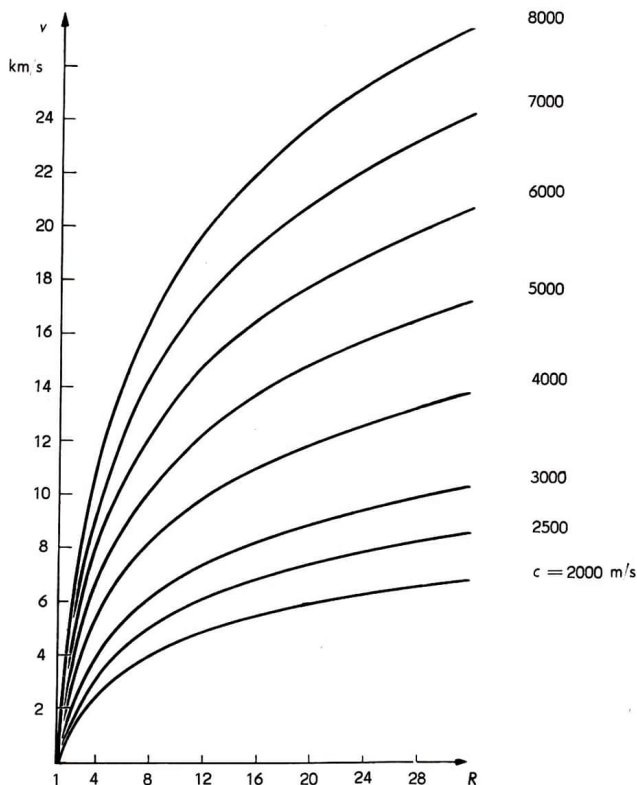
Der Vollständigkeit halber sei noch kurz die sogenannte „dritte astronautische Geschwindigkeit“

erwähnt. Man erhält sie als Fluchtgeschwindigkeit ab Erdoberfläche für das Verlassen des Sonnensystems. Dabei läßt sich die Erdbahn analog zu den Umlaufbahnen der Erdsatelliten behandeln. Die „Kreisbahngeschwindigkeit“ der Erde beträgt rund 30 km/s und die zugehörige Fluchtgeschwindigkeit beläuft sich auf etwa 42 km/s. Dieser zusätzliche Geschwindigkeitsbedarf von 12 km/s ergibt mit der Fluchtgeschwindigkeit für Minimumkreisbahnhöhe der Erde (11,2 km/s) nach dem Additionsprinzip für Bewegungsenergien den theoretischen Wert von rund 16,8 km/s. Bisher spielt jedoch diese wiederum nur theoretische „Sonnenfluchtgeschwindigkeit für Erdentfernung und Minimumkreisbahnhöhe“ in der praktischen Raumflugtechnik noch keine Rolle.

Grundgleichung der Raketentechnik

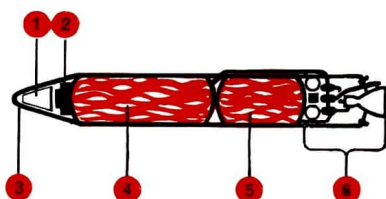
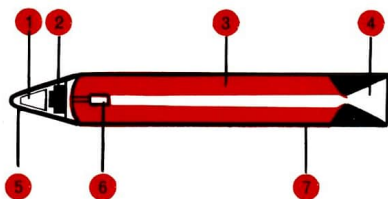
Kehren wir wieder zur Raketentechnik zurück! Die für Raumflüge erforderlichen hohen Geschwindigkeiten können von einer thermochemischen Rakete nur über eine mehr oder weniger lange Beschleunigungsperiode erreicht werden. Die Länge der Beschleunigungsperiode (Antriebszeit) hängt unter anderem auch von dem Verhältnis Schubkraft zu Raketenmasse ab. Im Schub sind aber Ausströmgeschwindigkeit und Massenverbrauch miteinander verknüpft. So muß sich also letztlich in der im kräftefreien Raum von einer Rakete erzielbaren Endgeschwindigkeit die Beziehung zwischen Raketengesamtmasse, Treibstoffanteil und Ausströmgeschwindigkeit widerspiegeln. Die mathematische Lösung dieses Problems stammt von dem russisch-sowjetischen Mathematiker Konstantin E. Ziolkowski (1857–1935). Wegen seiner kühnen Überlegungen und geistreichen Erfindungen wurde er darüber hinaus zum Begründer der wissenschaftlichen Raumfahrt, der Astronautik. Ziolkowski fand 1903 für die „Grundgleichung der Raketentechnik“ folgenden Zu-

Zusammenhang
zwischen Massenverhältnis (R)
und idealer Endgeschwindigkeit (v)
in Abhängigkeit
von der Ausströmgeschwindigkeit (c)



sammenhang: Die von einer Rakete im kräftefreien Raum erreichbare Höchstgeschwindigkeit (ideale Endgeschwindigkeit) ist das Produkt von Ausströmgeschwindigkeit und natürlichem Logarithmus des sogenannten „Massenverhältnisses“. Als Massenverhältnis gilt das Verhältnis von Start-

masse der Rakete zu deren Leermasse. Die Differenz zwischen Startmasse und Leermasse ist demnach die Treibstoffmasse. In dieser Grundgleichung wird die Bedeutung der Ausströmgeschwindigkeit und damit der Treibstoffenergie deutlich erkennbar.



Setzt man in die Ziolkowskische Grundgleichung die praktisch realisierbaren Ausströmgeschwindigkeiten thermochemischer Raketenantriebe ein und fordert weiterhin Raumflug-Endgeschwindigkeiten, so kommt man auf Massenverhältnisse, die den bedeutsamen Nachteil thermochemischer Raketenantriebe klar zutage treten lassen. So werden beispielsweise bei einer Ausströmgeschwindigkeit zwischen 3000 und 3500 m/s und einer idealen Endgeschwindigkeit von etwa 8000 m/s schon etwa 92 Prozent der Startmasse allein für den Treibstoff gebraucht. Die verbleibenden 8 Prozent Startmasse sind jedoch nicht nur reine Nutzmasse, sondern bilden vor allem den zur technischen Konstruktion von Rakete und Triebwerk gehörenden Massenanteil. Aus verschiedenen konstruktiven, vor allem materialtechnischen Gründen sind dem Massenverhältnis bestimmte Grenzen gesetzt, so daß sich die Raketenkonstrukteure immer nur einer optimalen Kompromißlösung nähern können. Thermochemische Trägerraketen für Raumfahrtzwecke werden stets bis zu einem gewissen Grad gewaltige Treibstoffbehälter sein, deren große Füllmasse dann auch eine solche Schubkraft erfordert, daß das Gesamtsystem von der Erdoberfläche abgehoben und anschließend bis auf die gewünschte Endgeschwindigkeit beschleunigt wird.

Aus der Grundgleichung geht somit hervor, daß sich für „einstufige“ thermochemische Raketen aus technisch-konstruktiven Gründen kaum ökonomisch brauchbare Lösungen finden lassen, wenn mit ihnen größere Nutzmassen auf Raumfluggeschwindigkeiten gebracht werden sollen. Unter einstufig versteht man einen Raketenantrieb, bei dem das Antriebssystem den gesamten Treibstoffvorrat in einer ununterbrochenen Brennperiode mit gleichbleibendem Durchsatz verbraucht. Wie wir noch sehen werden, ist man aber durch mehrstufige Antriebe in der Lage, das Verhältnis von Startmasse zu Nutzmasse zu verbessern, ohne damit allerdings das Grundprinzip – gewaltiger

Treibstoffaufwand und große Schubkräfte bei relativ geringem Nutzmasseanteil – ganz durchbrechen zu können.

Die von allen Antriebsstufen eines Trägersystems bei fortlaufendem Betrieb im kräftefreien Raum erzielbare tatsächliche Endgeschwindigkeit bezeichnet man als das „Antriebsvermögen“. Für ein Raumflugunternehmen ist also ein Trägerraketen- und Raumflugsystem nur dann geeignet, wenn sein „Antriebsvermögen“ zumindest dem geforderten Antriebsbedarf entspricht. Mit anderen Worten: In die technischen Berechnungen nach der Grundgleichung muß als ideale Endgeschwindigkeit immer der betreffende Gesamtantriebsbedarf eines Unternehmens eingesetzt werden. Es ist klar, daß sich dabei die geschilderten energetischen Nachteile thermochemischer Antriebe noch unangenehmer bemerkbar machen.

Etwas Raketentechnik

Die technischen Probleme bei der Konstruktion chemischer Raketenantriebe sollen hier nur in groben Umrissen skizziert werden. Von Bedeutung ist zunächst, ob Treibstoffe in fester Form (Feststoffraketen) oder in flüssiger Form (Flüssigkeitsraketen) verwendet werden. Feststoffraketen haben den Vorteil eines einfacheren Aufbaues und sind relativ anspruchslos in ihrer Betriebstechnik. Treibstoffbehälter und Brennkammer sind bei ihnen identisch. In Flüssigkeitsraketen hingegen müssen außer einer separaten Brennkammer auch noch getrennte Behälter für die Komponenten des Treibstoffgemisches (Oxydator und Brennstoff) vorhanden sein. Es wird daher eine zusätzliche Einrichtung gebraucht, die mit eigenem Antrieb und entsprechenden Regleinrichtungen den Treibstoff in die Brennkammer befördert. Die eigentliche Triebwerksanlage wird also recht kompliziert und aufwendig. Die gegenwärtig meist verwendeten Festtreib-

Prinzipieller Aufbau von Feststoffraketen (links) und Flüssigkeitsrakete (rechts).

Links:

- 1 Nutzmasse;
- 2 Steuerungsgeräte;
- 3 Festtreibstoff;
- 4 Ausströmdüse;
- 5 Nasenkonus;
- 6 Zünder;
- 7 Brennkammergehäuse.

Rechts:

- 1 Nutzmasse;
- 2 Steuerungsgeräte;
- 3 Nasenkonus;
- 4 Brennstoff;
- 5 Oxydator;
- 6 Triebwerk

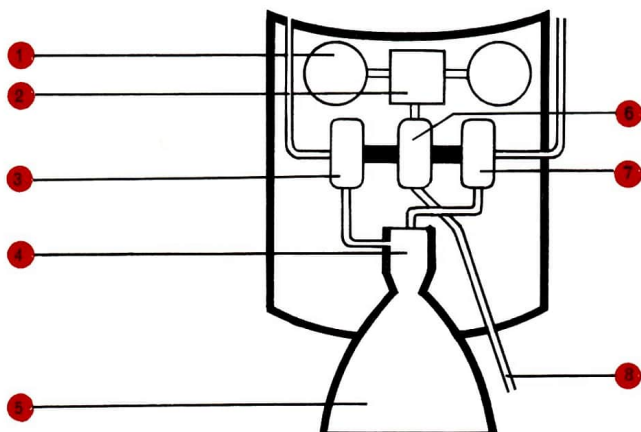
Schema eines Flüssigkeitstriebwerkes.

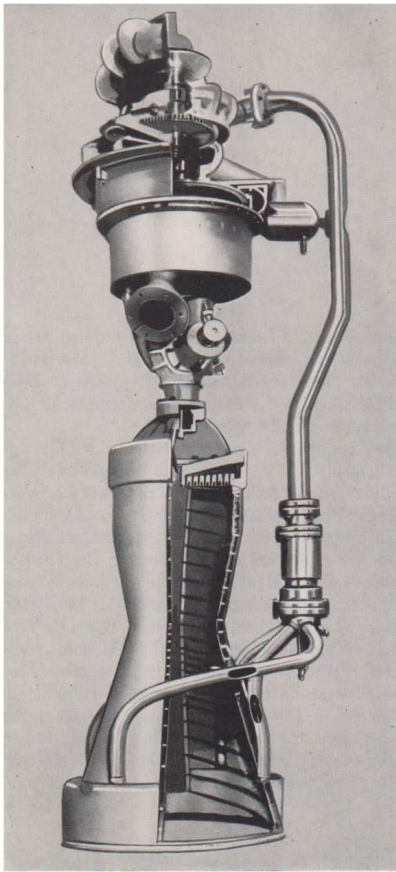
- | | |
|------------------------------|------------------------|
| 1 Arbeitsmittel für Turbine; | 5 Ausströmdüse; |
| 2 Gasgenerator; | 6 Turbine; |
| 3 Oxydatorpumpe; | 7 Brennstoffpumpe; |
| 4 Brennkammer; | 8 Turbinenabgasleitung |

stoffe gehören zur Gruppe der zusammengesetzten Treibstoffe. Sie werden im Prinzip durch mechanische Mischung eines Sauerstoffträgers mit einem geeigneten Brennstoff gewonnen und bilden eine einheitliche und bis zur Zündung dauerhafte Masse. Aus ihr stellt man die „Treibsätze“ her, mit denen die Brennkammer gefüllt wird. Früher bereitete die Produktion großer Treibsätze außerordentliche Schwierigkeiten. Heute kann man schon Feststoffsätze von 5 bis 6 m Durchmesser und einigen hundert Tonnen Masse produzieren. Dadurch und wegen einer allgemeinen Leistungssteigerung der festen Treibstoffe wurden die Feststoffraketen in letzter Zeit eine ernsthafte Konkurrenz für die Flüssigkeitsgroßraketen, nachdem diese das Feld jahrelang allein beherrschten. Zu den bekanntesten Sauerstoffträgern für zusammengesetzte Feststoffe gehören vor allem Verbindungen auf Perchlorat- und Nitratbasis (zum Beispiel Kaliumperchlorat und Kaliumnitrat). An Brennstoffen bietet sich eine

breite Auswahl brennbarer Stoffe an, von denen gegenwärtig aber vor allem Produkte der Plastikchemie (Polyäthylen, Polybutadien) wegen ihrer Gießbarkeit und dauernden Verformbarkeit bevorzugt verwendet werden.

Die Auswahl von „Zweistoffsystemen“ für Flüssigkeitsraketen ist nicht nur von energetischen Erwägungen, die selbstverständlich immer eine Vorrangstellung genießen, abhängig, sondern auch von zahlreichen anderen Gesichtspunkten. Da es sich vor allem bei den Oxydatoren um Flüssigkeiten handelt, deren chemische und physikalische Eigenschaften nicht gerade denen des harmlosen Wassers entsprechen, muß man vor allem die Produktionstechnik, aber auch Lagerfähigkeit, Transport, Verhalten gegenüber verschiedenen Materialien sowie toxische Wirkung der Treibstoffdämpfe und -verbrennungsgase beachten. Als Beispiele mit solchen besonderen Eigenschaften können aus der Reihe schon bewährter Oxydatoren Flüssigsauerstoff (extrem niedrige Temperatur)





und Salpetersäure (chemische Aggressivität) erwähnt werden und von den noch nicht im Einsatz befindlichen, aber möglichen Hochleistungsoxydatoren Ozon (explosive Zerfallsneigung) und Fluor bzw. Fluorverbindungen (extreme chemische Aggressivität). Als Brennstoffe werden in der Praxis ausschließlich wasserstoffreiche chemische Verbindungen (zum Beispiel Alkohole, Kerosin, Anilin, Hydrazine, Ammoniak) benutzt. Aus thermodynamischen Gründen bildet reiner Wasserstoff den leistungsfähigsten Brennstoff. Wegen seiner im flüssigen Zustand extrem niedrigen Temperatur (-253°C) bereitete er jedoch lange Zeit große technische Schwierigkeiten. Inzwischen konnten alle damit zusammenhängenden Pro-

bleme befriedigend gelöst werden, und die Kombination Flüssigsauerstoff-Flüssigwasserstoff dient heute als hochenergetischer Raketentreibstoff vor allem in Oberstufen von Trägerraketen.

Oxydator und Brennstoff getrennt unterzubringen ist aus verschiedenen Gründen notwendig, auch dann, wenn beide Treibstoffkomponenten nicht zu spontanen („hypergolen“) Reaktionen miteinander fähig und damit selbstzündlich wären. Hypergole Reaktionsfähigkeit mancher Treibstoffkombinationen (zum Beispiel Salpetersäure und Anilin) bietet unter Umständen Vorteile, da in diesem Fall eine besondere (elektrische bzw. pyrotechnische) Zündeinrichtung unnötig und der Zündvorgang in der Brennkammer zuverlässiger und leichter regelbar wird. Zu den meist verwendeten Treibstoffkombinationen in Flüssigkeitsgroßraketen gehören Flüssigsauerstoff-Kerosin (Benzinderivat), Salpetersäure-Hydrazinderivate und Stickstofftetroxid-Hydrazinderivate.

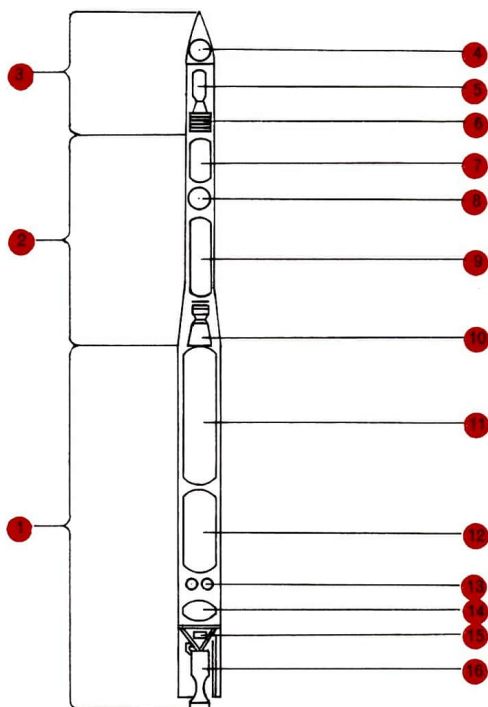
Für die Konstruktion von Flüssigkeitstriebwerken sind zwei Forderungen maßgebend. Erstens sollen trotz extremer Leichtbauweise höchste Schubkräfte erzielt werden. Zweitens soll das Triebwerk außerordentlich betriebszuverlässig und präzise regelbar sein. Beiden Anforderungen, die sich zwangsläufig gegenseitig erheblich beeinflussen, gerecht zu werden, stellt praktisch eines der Hauptprobleme der modernen Großraketen-technik dar. Beim Ringen um eine günstige spezifische Antriebsmasse kommt es unter anderem auf die Auslegung der Treibstoffförderanlage an (Pumpen, Pumpenantrieb usw.), da diese eigentlich als reine „Totmasse“ gewertet werden muß. So sucht man nach immer raffinierteren technischen Lösungen, um das Fördersystem möglichst leicht zu machen. Ein Vorschlag sieht beispielsweise vor, einen kleinen Teil der in der Brennkammer entstehenden Verbrennungsgase „abzuzapfen“, mit etwas verminderter Temperatur in die Förderanlage zu leiten und dort als Arbeitsmedium für die Antriebsturbine der Förderpumpen zu nutzen.

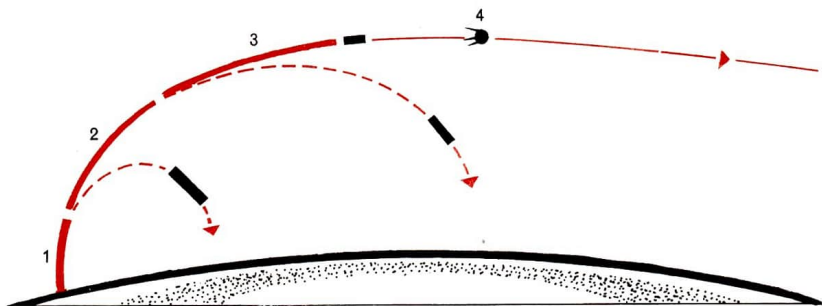
Auch für den Leichtbau von Brennkammer und Ausströmdüse mußte man besondere Verfahren erarbeiten. Die Verbrennungsreaktionen erzeugen in modernen Hochleistungstriebwerken immerhin Brennkammertemperaturen um etwa 3000 bis 3500 °C bei Gasdrücken zwischen 30 und 70 at. Diesen gewaltigen Belastungen muß die Brenn-

kammerwandung etliche Minuten standhalten. Eine mangelhafte konstruktive Lösung für diesen besonders wichtigen Triebwerkteil würde sich mit katastrophalen Folgen rächen. So mußte man beispielsweise zur Verminderung der Temperaturbelastungen von Brennkammerwand und Düse spezielle Kühlverfahren ersinnen. Man führt dabei

Schema einer Dreistufenrakete.

- 1 Erste Stufe;
- 2 Zweite Stufe;
- 3 Dritte Stufe;
- 4 Nutzmasse;
- 5 Feststofftriebwerk;
- 6 Steuerungsgeräte;
- 7 Oxydatorbehälter;
- 8 Druckgasbehälter;
- 9 Brennstoffbehälter;
- 10 Flüssigkeitstriebwerk;
- 11 Brennstoffbehälter;
- 12 Oxydatorbehälter;
- 13 Druckgasbehälter;
- 14 Arbeitsmittel für Turbine;
- 15 Turbopumpenaggregat;
- 16 Brennkammer





eine Kühlflüssigkeit, meist eine der Treibstoffkomponenten, in einem Kühlmantel um die Brennkammerinnenwand (Regenerativkühlung). Außerdem läßt man in besonderen Fällen die Kühlflüssigkeit durch entsprechend verteilte feine Öffnungen aus dem Kühlmantel direkt an die Brennkammerinnenwand gelangen, wo sich dann ein Kühlfilm ausbreitet (Schleierkühlung). Ganz allgemein ist natürlich die Frage des Brennkammerwerkstoffs von entscheidender Bedeutung. Brennkammer und Düse werden heute meist aus parallel angeordneten und miteinander verschweißten Röhrchen gefertigt, für die Hochtemperatur-Legierungen auf Chrom-Nickel-Basis verwendet werden.

Die entscheidende Idee: das Stufenprinzip

Wie bereits begründet wurde, können einstufige thermochemische Trägerraketen bei größeren wissenschaftlichen Nutzmassen den für Raumflüge erforderlichen Antriebsbedarf kaum mit technisch und ökonomisch vertretbarem Aufwand erreichen. Senkrecht aufsteigende Einstufenraketen gelangen daher lediglich in eine bestimmte Gipfelhöhe, die von Startmasse, Nutzmasse und Triebwerksleistung abhängig ist, und stürzen danach zur Erdoberfläche zurück. Für kurzzeitige Sondierungsvorstöße in große Höhen sind sie somit durchaus brauchbar, und als „Höhenraketen“ haben sie tatsächlich einen wichtigen Platz in der Höhenforschung gefunden. Will man jedoch in den Bereich der Raumfluggeschwindigkeiten gelangen, so muß man bei thermochemischen Raketen zu mehrstufigen Antrieben übergehen.

Die Vorteile des „Stufenprinzips“ für astronautische Zwecke erstmalig durchdacht und veröffentlicht zu haben ist ebenfalls ein Verdienst Ziolkowskis. In den von ihm skizzierten „Raketenzügen“ waren schon alle wichtigen Grundgedanken enthalten. Das klassische Stufenprinzip geht davon aus, als Nutzmasse einer großen und leistungs-

fähigen „Startrakete“ (Startstufe) eine entsprechend kleinere Rakete zu verwenden (2. Stufe). Diese trägt ihrerseits entweder die eigentliche wissenschaftliche Nutzmasse oder eine weitere kleinere Rakete (3. Stufe). Diese „Endstufe“ übernimmt dann die weitere Beschleunigung der dann allerdings nochmals verringerten Nutzmasse. Auch hier zeichnet sich zwar das mißliche Verhältnis von relativ kleiner Nutzmasse zu großem technischem Aufwand ab, aber der entscheidende Vorteil besteht darin, daß man nach Verbrauch eines bestimmten Treibstoffanteils die jeweils leergebrannte Stufe abtrennt und so für den Rest der Antriebsperiode die überflüssige Totmasse entsprechend vermindert. Auf diese Weise kann die Endgeschwindigkeit wesentlich leichter bis in den Bereich des Raumflugantriebsbedarfs gesteigert werden. Bei dreistufigem Aufbau braucht jede einzelne Stufe beispielsweise nur ein Antriebsvermögen von 3000 m/s aufzubringen, um der Nutzmasse eine ideale Endgeschwindigkeit von 9000 m/s zu vermitteln.

Die praktische Anwendung des Stufenprinzips bringt eine große Anzahl neuer Probleme mit sich. In einer umfassenden mathematischen Analyse muß zunächst die energetisch optimale Lösung für die Stufenanzahl, die Antriebs- und Massenaufteilung auf die einzelnen Stufen sowie für das Zeitprogramm der Stufentrennung unter Berücksichtigung von Erdanziehung, Luftwiderstand und Lenkprogramm bestimmt werden. Ganz allgemein sollte die Anzahl der Stufen immer möglichst klein sein. Dann müssen die technischen Probleme für die Konstruktion der einzelnen Stufen geklärt werden. Am Schluß der Entwicklungsarbeit stehen schließlich die technischen Lösungen für die komplizierten Betriebsfunktionen des Gesamtsystems während der Antriebsperiode.

Nicht in jedem Fall hat sich dabei das eben dargestellte „klassische“ Schema des Stufenprinzips, nämlich eines Stufenaufbaues in „Reihenschaltung“, als das günstigste Verfahren erwiesen.

- Aufstiegsbahn**
 einer Dreistufenrakete (schematisch).
 1 Antriebsbahn 1. Stufe;
 2 Antriebsbahn 2. Stufe;
 3 Antriebsbahn 3. Stufe;
 4 Nutzmasse in Freiflugbahn

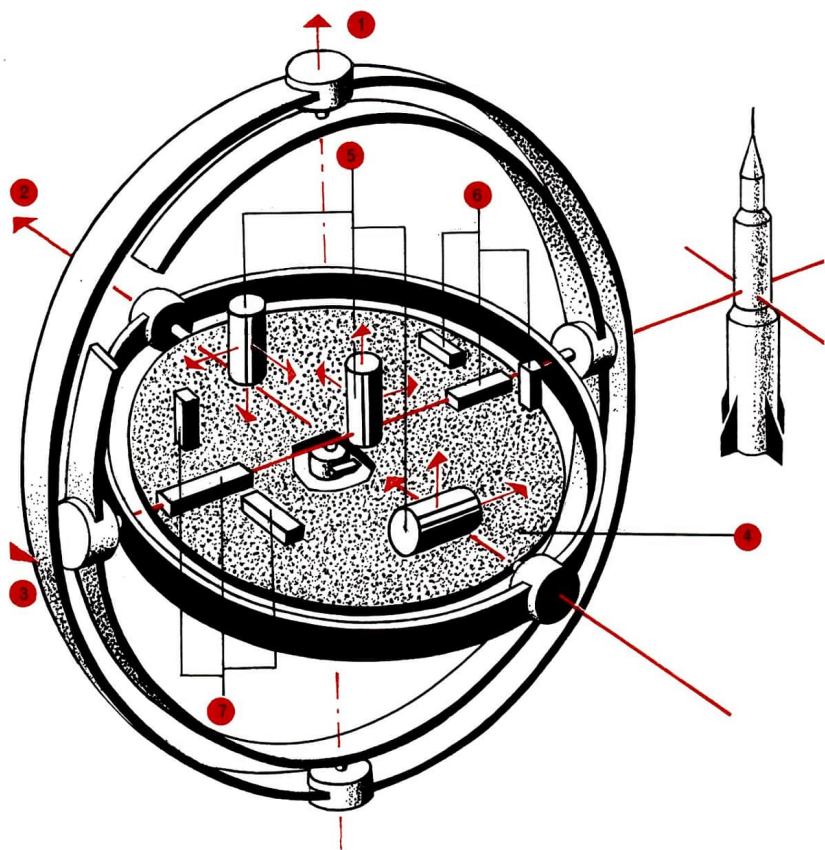
Grundsätzlich kann man eine Stufenteilung auch dadurch erzielen, daß man schon gleich beim Start mehrere Raketentriebwerke zündet und in „Parallelschaltung“ arbeiten läßt. Einige Einzeltriebwerke werden nach bestimmter Zeit und in Abhängigkeit vom Treibstoffverbrauch abgeschaltet, während die übrigen weiterbrennen. Die abgeschalteten Triebwerke können dann allein oder zusammen mit zugehörigen leeren Treibstoffbehältern abgeworfen werden. Man kann auf diese Weise ein wesentlich kontinuierlicheres und störungsfreieres Schubprogramm aufbauen. Bei sehr großen Zweitstufen-Schubkräften ist dies von erheblicher Bedeutung. Derartige Stufenteilungen werden daher in der modernen Großraketen-technik auch häufiger angewendet, nicht zuletzt deshalb, weil man damit außerdem etlichen Triebwerksproblemen ausweichen kann. Anfangs bereiteten nämlich Konstruktion und Betrieb von Einzeltriebwerken mit einigen hundert Megapond Schub beträchtliche Schwierigkeiten. Ein Ausweg ließ sich finden, als man mehrere kleinere Triebwerke von gleichem Gesamtschub „bündelte“. Obwohl natürlich auch der Betrieb von Bündeltriebwerken Probleme aufwirft, haben die bisherigen Erfolge der sowjetischen und amerikanischen Raumflugtechnik die Brauchbarkeit dieses Verfahrens vielfach erwiesen.

Steuerung und Lenkung

Der zielgerichtete Einsatz von großen Träger- raketen ist jedoch nicht allein eine Frage der reinen Antriebstechnik. In jedem Fall stellt die Beförderung einer wissenschaftlichen Nutzmasse in eine vorgegebene Höhe oder sogar in eine astronautische Freiflugbahn mehr als einen bloßen „Kraftakt“ dar. Erst die Steuerungs- und Lenk- technik sichert den programmgemäßen Ablauf eines derartigen Experiments. Es beginnt damit, den Aufstieg einer Einstufen-Höhenrakete so zu

steuern, daß er nach Möglichkeit absolut vertikal verläuft, weil erst dann die gesamte Antriebskraft der Rakete für den Höhengewinn voll ausgenutzt werden kann. Da aber Raketen mit „Heckantrieb“ ausgerüstet sind, ist die Bewältigung dieser Auf- gabe doch wesentlich schwieriger, als man ge- meinhin annimmt. Die Lagestabilisierung von Raketen auf der Antriebsbahn einschließlich etwaiger programmgemäßer Bahnänderungen hat darum den Raketen-technikern anfänglich auch viel Kopfzerbrechen bereitet. Heute ist sie in vollem Umfang gelöst. Dies ist vor allem auf die all- gemein großen Fortschritte der Gerätetechnik zurückzuführen.

Als bordeigenes Bezugssystem für alle Aufgaben der Lagestabilisierung oder sonstigen Fluglage- regelung dienen meist drei nach einem recht- winkligen, dreiachsigen Koordinatensystem aus- gerichtete Meßkreisel. Sie sind in einem speziellen Geräteblock untergebracht, der als „kreiselstabi- lisierte Meßplattform“ bezeichnet wird. Die be- kannte Eigenschaft eines freibeweglichen Kreisels, nämlich eine einmal vorgegebene Richtung seiner Drehachse auch dann beizubehalten, wenn sich die Aufhängung seines kardanischen Halte- rungsrahmens dreht, gibt bei allen programm- und unprogrammgemäßen Bewegungen der Ra- kete die gewünschte Lageinformation. Auf der Meßplattform werden außerdem Beschleunigungs- messer angebracht, mit deren Hilfe sich Ge- schwindigkeit und Ort der Rakete in der An- triebsbahn bestimmen lassen. Ein solches Ge- rätensystem, zu dem noch eine ganze Reihe anderer Einrichtungen gehören, wird als „Träg- heitsnavigationssystem“ bezeichnet, weil man die benötigten Daten über den Bahnverlauf aus Wir- kungen von Trägheitskräften (Beschleunigungen) ableitet. Die Auswertung der Meßdaten für das Lenkprogramm, als dessen einfachste Form man die Lagestabilisierung der Rakete bei Vertikalauf- stiegen ansehen kann, findet entweder in der Ra- kete selbst statt (Selbstlenkung); sie kann aber



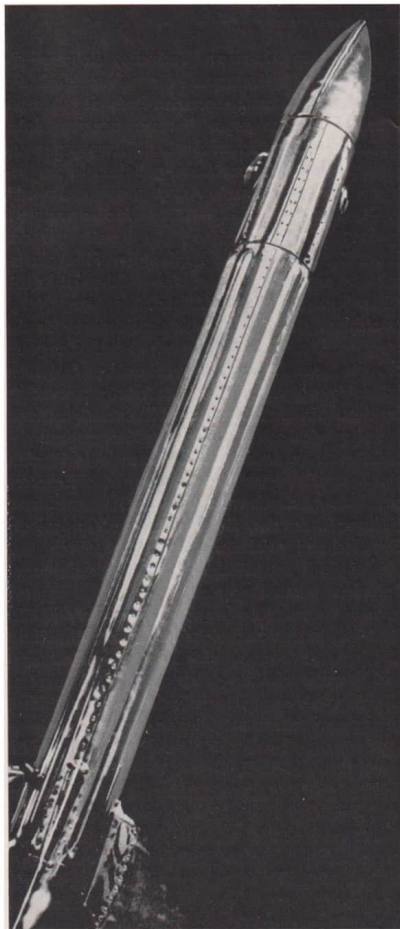
Prinzip einer Kreiselplattform.

- 1 Roll-Achse;
- 2 Gier-Achse;
- 3 Stampf-Achse;
- 4 Geräteplattform;
- 5 Kreisel;
- 6 Lotrichtungsanzeige;
- 7 Beschleunigungsmesser

Erste sowjetische Flüssigkeitsrakete
GIRD (aus dem Jahr 1933)

auch in einer Bodenstation vorgenommen werden, wobei dann das Ergebnis per Funk der Raketensteuerung übermittelt wird (Fernlenkung). Die Kontrolle und die Beeinflussung des Lenkprogramms wird bei Raumfahrtträger Raketen meist durch kombinierte Selbst- und Fernlenksysteme ausgeübt. Dabei können im allgemeinen optische und funktechnische Ortungen der aufsteigenden Rakete, die von Bodenmeßstationen vorgenommen werden, zusätzlich zur Bahnbestimmung herangezogen werden.

Die Lenkkommandos werden als elektrische Signale von einem Programmgeber (an Bord oder in der Bodenstation) auf die Stellmotoren der Lenkorgane des Trägersystems übertragen. Das gleiche gilt auch für die eventuell notwendigen Bahnkorrektursignale. Als Lenkorgane dienten anfänglich sogenannte „Strahlruder“, hitzebeständige und bewegliche Ablenkflächen, die vor der Düsenmündung der Triebwerke angebracht waren. Sie ergaben durch Strahlablenkung den gewünschten Dreheffekt für die Rakete. Inzwischen ist man meist dazu übergegangen, die Brennkammern schwenkbar anzubringen und somit ebenfalls durch Richtungsänderungen des Antriebsstrahls die gewünschten Lenkeffekte zu erzeugen. Bei gebündelten Triebwerken übernehmen stets mehrere, symmetrisch zur Raketenhauptachse angeordnete Brennkammern die sonst von Lenkorganen wahrgenommenen Funktionen. Dabei werden sie gelegentlich durch wesentlich kleinere Hilfstriebwerke („Vernier“-Triebwerke), die nicht unbedingt am Heck der Trägerrakete installiert sein müssen, unterstützt. Man kann sich also ohne weiteres vorstellen, wie sorgfältig, umsichtig und weitläufig die Arbeiten für einen Raumraketenauflstieg sein müssen. Eine enorme Fülle von Einzelfunktionen der Antriebs- und Lenkeinrichtungen muß von dem Steuerprogramm mit größtmöglicher Präzision erfaßt werden, und nur das fehlerlose technische Zusammenspiel aller einzelnen Faktoren garantiert schließlich den Erfolg.



Der Weg in die Praxis

Die systematischen Versuche, Raketen als Träger von Nutzmassen für wissenschaftliche Zwecke einzusetzen, begannen Ende der vierziger Jahre. Die wichtigsten Voraussetzungen dafür hatten allerdings schon die Bemühungen der Raketenpioniere früherer Jahre geliefert. In der Sowjetunion waren es die Arbeiten von Ziolkowski, F. A. Zander (1887–1933), Tichonrawow (geb. 1900) und anderen, die bereits um das Jahr 1933 die ersten flugfähigen Flüssigkeitsraketen entstehen ließen, deren Schubkräfte bis 65 kp betrugen und die Gipfelhöhen von 4500 m erreichten. Dabei war es kennzeichnend für die junge aufstrebende Sowjetunion, daß die großartigen Ideen Ziolkowskis und anderer Gelehrter frühzeitig aufgegriffen und tatkräftig unterstützt wurden. Wirtschaftlichkeit und Zielstrebigkeit entwickelten sich schon damals zu Kennzeichen des sozialistischen Aufbaues. 1924 wurde in Moskau ein Zentralbüro zur Untersuchung des Raketenproblems geschaffen; im gleichen Jahr gründeten Ziolkowski, Zander, Tichonrawow und andere die Gesellschaft für Raketenverkehr. Drei Jahre später fand in der sowjetischen Hauptstadt die erste Raumfahrtausstellung statt.

In den USA hatte Robert H. Goddard (1882 bis 1945) in den zwanziger Jahren mit ähnlichem Ziel eine Reihe bemerkenswerter Entwicklungs- und Versuchsarbeiten geleistet, deren Ergebnisse allerdings bis nach seinem Tode der Öffentlichkeit weitgehend unbekannt blieben.

Die deutschen Raketenpioniere Hermann Oberth (geb. 1894), Max Valier (1895–1930) und Rudolf Nebel (geb. 1894) legten ebenfalls um 1930 den Grundstein für die ersten praktischen Raketenversuche, die auch mit bescheidenen Erfolgen belohnt wurden (Gipfelhöhen maximal etwa 1500 m, 1932). Die Ausnutzung der Raketen-technik für die von ihnen angestrebte wissenschaftliche Erschließung des Weltraumes wurde jedoch von

den faschistischen Machthabern nach 1933 unterbunden. Alle weiteren Arbeiten auf diesem Gebiet übernahm – unter strengster Geheimhaltung – der faschistische Militärapparat. Das Endprodukt dieser verhängnisvollen Entwicklung im damaligen Raketenversuchszentrum Peenemünde war die als Terrorwaffe gegen britische und belgische Städte eingesetzte „Vergeltungswaffe-2“ (V-2). Es handelt sich um eine Flüssigkeitsrakete von 14 m Länge, mit einer Startmasse von rund 13 t und einem Startschub von etwa 26 000 kp. Diese Rakete ist auch unter der Entwicklungsbezeichnung „A-4“ (Aggregat-4) bekannt geworden.

Nach Beendigung des Krieges wurde von den Siegermächten eine größere Anzahl nachgebauter oder erbeuteter A-4-Raketen bei Versuchsaufstiegen verwendet. Diese Experimente dienten aber nicht nur rein raketentechnischen Erprobungen, man versuchte auch zum erstenmal neue Wege der Höhenforschung zu beschreiten. Das A-4 vermochte Nutzmassen bis zu etwa 1000 kg in Höhen zwischen 150 und 200 km zu tragen. Auf dem amerikanischen Raketenversuchsgelände White Sands Proving Grounds fanden in der Zeit vom April 1946 bis zum Juni 1951 über 60 Starts mit A-4-Höhenraketen statt. Fast 70 Prozent der Aufstiege lieferten auswertbare Ergebnisse. Die wissenschaftliche Ausrüstung bestand in der Mehrzahl aus Strahlungsmeßgeräten und Apparaturen zur Messung der Luftdichte und der Zusammensetzung der Atmosphäre. Die Rückführung der Raketen-„Meßköpfe“ war dabei anfangs noch recht primitiv. Man ließ sie einfach im freien Fall herabstürzen und suchte dann nach dem Aufschlag, Filmkassetten und andere Einrichtungen mit Meßregistrierungen aus den Trümmern mühselig zu bergen. Später kam allgemein das Verfahren zur Fallschirmbergung auf.

Die sowjetischen Raketenpezialisten um den erfahrenen Chefkonstrukteur Sergei P. Koroljow (1906–1966) gingen auf der Basis ihrer eigenen Arbeiten in ihrem Entwicklungsprogramm für

Höhen- und Raumfahrtforschung wesentlich zielstrebigter vor als die amerikanischen Fachleute. Sie hatten die kommende große Bedeutung einer wissenschaftlichen Entwicklung, die auch den Welt- raum direkt zum Experimentierfeld der Wissen- schaft macht – wie angedeutet –, schon sehr früh- zeitig und mit all ihren weitreichenden Konse- quenzen erkannt. Für diese vorausschauenden Überlegungen fanden sie bei Partei und Staat weitgehendes Verständnis sowie umfassende Unterstützung. Die fortschrittliche Gesellschafts- ordnung in der Sowjetunion bietet schließlich auch die besten Voraussetzungen für eine geistige und materielle Basis, um kühne Ideen im Interesse der Menschheit in die Tat umzusetzen. Als die weni- gen amerikanischen Raumfahrtwissenschaftler noch einen verzweifelten Kampf um Anerkennung und Unterstützung ihrer Bemühungen zu führen hatten, eilten ihre zahlreichen sowjetischen Kol- legen schon mit Riesenschritten den ersten auf- sehererregenden Erfolgen entgegen.

Schon bei den ersten Versuchsaufstiegen in den Jahren 1946/48 packten die sowjetischen Raketen- und Raumfahrtspezialisten eine ganze Reihe neuer und für die weitere Entwicklung wichtiger Probleme an und lösten sie zufriedenstellend. Dabei stand zunächst die Frage der zerstörungs- freien Rückführung von massereichen Nutzkörpern aus sehr großen Höhen im Vordergrund. Die Lö- sung dieser Aufgabe war nicht nur rein wissen- schaftlich-meßtechnisch oder ökonomisch bedeu- tungsvoll, sondern mußte auch den Schlüssel zu einem der Hauptprobleme der Raumfahrt liefern, nämlich die sichere Rückführung von bemannten Raumflugkörpern zur Erdoberfläche. So feilte man die Rückführungstechnik allmählich aus und be- gann, Brems- und Lastfallschirme sowie aero- dynamische Stabilisierungs- und Bremsklappen zu kombinieren und an ihnen die Raketenmeßköpfe herabsteigen zu lassen. Wie stark sich die so- wjetischen Wissenschaftler von vornherein auf Unternehmen mit bemannten Raumflugkörpern



ausgerichtet hatten, läßt sich daran erkennen, daß bereits in den ersten Jahren nach 1946 zahlreiche Höhengaufstiege unternommen wurden, bei denen sich außer den Meßeinrichtungen für aerologische Forschung auch Spezialkabinen für Tiere (Hunde) im Nutzmassekopf der Rakete befanden. Diese Versuch dienten sowohl dazu, das Verhalten der Tiere bei Beschleunigungsandruck und Schwere-

losigkeit zu ermitteln, als auch vor allem, die technischen Erfahrungen über das Rückführungsproblem zu erweitern. Die Tierkabinen wurden während des Abstieges aus dem Raketenkopf herauskatapultiert und schließlich an einem separaten Fallschirm gelandet. Zweifelloso erbrachten diese Versuche die ersten grundlegenden Erfahrungen für die später bei der Rückführung sowjetischer Raumschiffe und ihrer Piloten angewandte Technik.

Höhenraketen

Von den in der Sowjetunion für Höhenforschungszwecke entwickelten Raketen ist zunächst die meteorologische Standardrakete MR-1 von Interesse. Diese mit einer Feststoffstartstufe ausgerüstete Flüssigkeitsrakete gelangt bei einer Startmasse von 725 kg und einer Nutzmasse von 45 kg auf Gipfelhöhen um 100 km. Sowjetische Wissenschaftler bezeichnen Raketen, deren maximale Gipfelhöhen zwischen 100 und 120 km liegen, als „meteorologische“ und solche, die über 120 km hinaufsteigen, als „geophysikalische“ Raketen. Die sowjetische meteorologische Standardrakete hat sich seit ihrer Einführung (im Rahmen des internationalen Geophysikalischen Jahres) ausgezeichnet bewährt. Sie startete sowohl unter besonders harten arktischen Bedingungen als auch von Schiffen aus.

Über die noch leistungsfähigeren sowjetischen geophysikalischen Raketen sind zwar keine technischen Daten bekannt geworden, aber aus den von ihnen erzielten Ergebnissen konnte der Fachmann sehr schnell erkennen, daß diese Flüssigkeitsraketen ihren zeitgleichen amerikanischen Konkurrenten um ein beachtliches Stück voraus waren. Eine Rakete dieser sowjetischen A-Serie (A-2, A-3 und A-5) brachte im Mai 1957 eine wissenschaftliche Nutzmasse von insgesamt 2200 kg in eine Höhe von 212 km. Die Meßgeräte zur

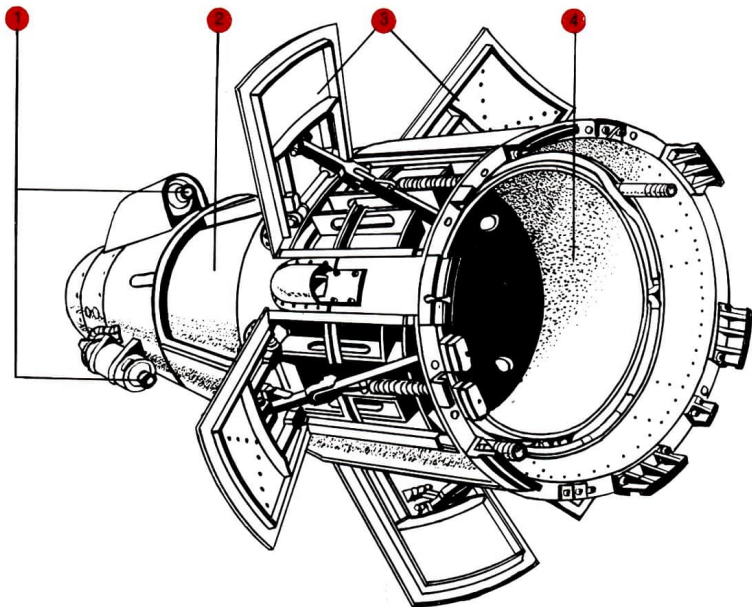
Untersuchung von Luftdichte und -zusammensetzung hatte man bei diesem Aufstieg aus dem eigentlichen Meßkopf der Rakete herausgenommen und in besonderen Behältern („Container“) untergebracht, die sich außen am Raketenkörper befanden. Die je 360 kg umfassenden Container wurden bald nach Brennschluß der Rakete aus ihrer Halterung herauskatapultiert, so daß sie antriebslos bis zur Gipfelhöhe aufsteigen und in hinreichendem Abstand von der Rakete und dem ebenfalls abgetrennten Meßkopf herabsinken konnten. Der Grund dafür lag in prinzipiellen Schwierigkeiten, die ein Messen der Luftdichte bei früheren Aufstiegen beeinträchtigt hatten. Die Rakete und der aufgesetzte Meßkopf trugen nämlich atmosphärische Gase aus den dichteren bodennahen Schichten mit empor und verfälschten trotz laufender Entgasung beim Aufstieg erheblich die Meßwerte der eingebauten empfindlichen Manometer und Vakuummeter. Die mit dem Container-Verfahren gewonnenen Meßwerte sowjetischer Höhenraketen bildeten bis zum Einsatz der ersten Meßsatelliten die präziseste Grundlage für Dichtetabellen und Modellvorstellungen über die Hochatmosphäre.

Am 21. Februar 1958 — die ersten künstlichen Satelliten zogen also schon um die Erde — stieg eine weitere einstufige Rakete der sowjetischen A-Serie mit einer Nutzmasse von 1520 kg bis auf die Rekordhöhe von 473 km. Die Mitteilung vom Start eines anderen Gerätes dieser Leistungsklasse, das am 27. August 1958 außer der übrigen Meßausrüstung auch zwei Hunde bis in eine Höhe von 452 km trug, wurde von der Fachwelt als weitere Spitzenleistung der sowjetischen Raketechnik verzeichnet. Rakete und Meßgeräteteil waren bei diesem Unternehmen sowohl im Aufstieg als auch während des Abstieges vollständig lagestabilisiert. Damit wurde in der meßtechnisch wichtigsten Phase des Fluges jede unprogrammgemäße Lageänderung verhindert. Als Stabilisierungsorgane dürften dabei aerodynamische Hilfs-

- 1 Kameras;
- 2 Meßgerätebehälter;
- 3 aerodynamische Bremsklappen;
- 4 Raum für Fallschirm

und Leitflächen sowie druckgasgespeiste Strahldüsen die wesentlichste Rolle gespielt haben. Mit diesem erfolgreichen Unternehmen demonstrierten die sowjetischen Steuerungs- und Lenkspezialisten auch außerhalb ihres Satellitenprogramms den hohen Entwicklungsstand ihrer Technik. Die Vorteile, die in dem von ihnen gezeigten Verfahren stecken, liegen klar auf der Hand: Eingebaute Strahlungsmeßgeräte und optische Aufnahmeapparaturen können einmal automatisch auf die Strahlungsquelle (zum Beispiel Sonne) oder das Aufnahmeobjekt (zum Beispiel Sonne oder Erd-

oberfläche) ausgerichtet und zum anderen so lange an sie „gefesselt“ werden, wie es die Freiflugzeit des Nutzmasseteils maximal zuläßt. Natürlich liegt in der nur wenige Minuten dauernden Freiflugzeit einer einstufigen Vertikalrakete ein für die Höhenforschung schwerwiegender Nachteil, den schließlich nur die Meßsatelliten überwinden konnten. Höhenraketen erwiesen sich dennoch, also trotz der zeitlichen und räumlichen Beschränkung des Meßprogramms, als außerordentlich wertvoll für die Untersuchungen der Hochatmosphäre und solar-terrestrischen Beziehungen. Immerhin wur-





den erstmals während des Internationalen Geophysikalischen Jahres von sowjetischer und amerikanischer Seite an den verschiedensten Punkten unseres Erdballs einige hundert kleinere und größere Höhenraketen (Raketensonden) gestartet. Ihre Meßergebnisse lieferten einen entscheidenden Beitrag zu den äußerst wertvollen Ergebnissen des IGJ. Aus diesen Anfängen bildete sich schließlich ein Netz von ständigen Stationen heraus, die auch nach Umwandlung der IGJ-Arbeiten in den Status der „Internationalen Geophysikalischen Zusammenarbeit“ (IGC) und später der „Jahre der ruhigen Sonne“ (JQSY) die Höhenforschung mit Raketen fortsetzten und der Wissenschaft seither zu einem außerordentlich umfangreichen Informationsmaterial verhelfen. Die Bedeutung dieser Arbeiten liegt vor allem in einer nun schon mehrjährigen Kontinuität. Mit den kleineren meteorologischen Raketen ging man dabei seit dem IGJ sogar mit großem Erfolg in die arktischen und antarktischen Gebiete und startete sie außerdem in großer Zahl von Schiffen (zum Beispiel „Ob“, UdSSR; „Norton Sound“, USA). Aus transport- und wartungstechnischen Gründen erwiesen sich dabei besonders Feststoffraketen als vorteilhaft, deren Steighöhen man durch zusätzliche Starthilfsraketen (Booster) meist noch wesentlich verbesserte.

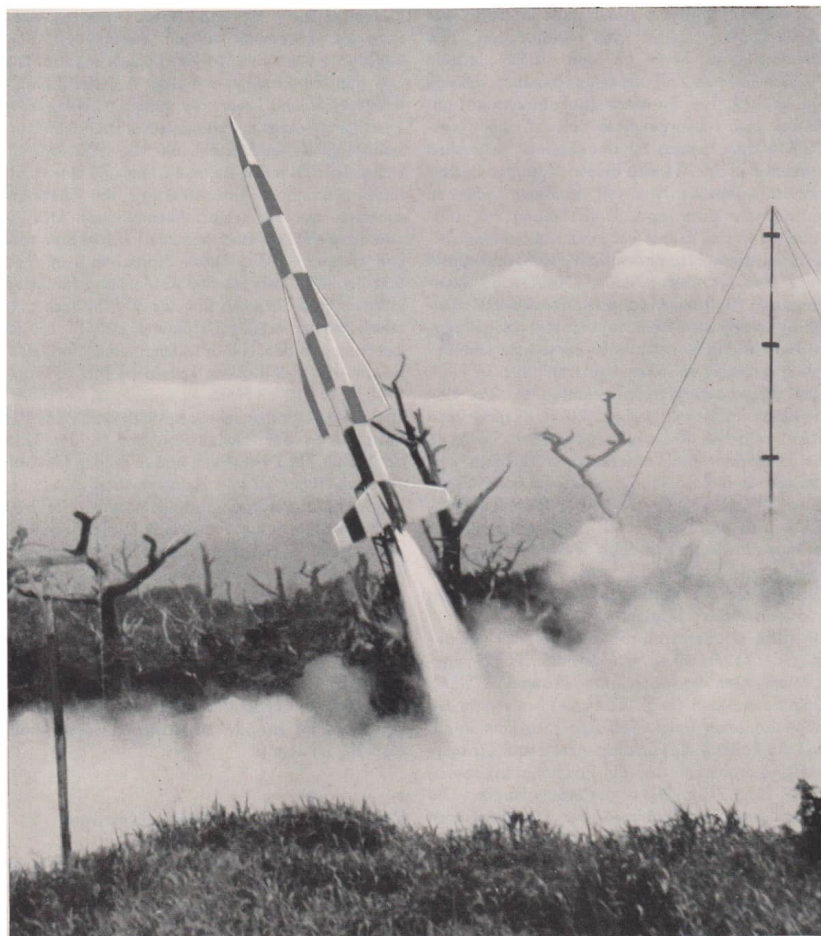
Ein nicht uninteressantes Verfahren zur Steigerung der Gipfelhöhen von kleineren Forschungsraketen waren die sogenannten „Rockoons“ (USA). Kleinere Raketen (engl. Rockets) hatte man mit Höhenballonen (engl. Balloons) so kombiniert, daß die Ballone die Funktion einer ersten „Trägerstufe“ übernahmen und die Raketenantriebe erst in 12 bis 17 km Höhe gezündet wurden. Die eigentlichen Standardtypen der amerikanischen Höhenforschung waren nach 1947 die Flüssigkeitsraketen „Aerobee“, „Aerobee-Hi“ und „Viking“. Die beiden erstgenannten wurden mit Feststoff-Boostern aus besonderen Starttürmen aufgelassen. Die „Aerobee“ konnte mit etwa 70 kg Nutzmasse

Höhen zwischen 100 und 120 km erreichen, während die verbesserte Version „Aerobee-Hi“ Vorstöße in Höhen um 300 km möglich machte. Die aus den Erfahrungen mit dem A-4 heraus entwickelte „Viking“ war die erste amerikanische Flüssigkeitsrakete mit kardanischer Brennkammerhalterung als Lenksystem. Sie war 13,8 m lang, hatte einen Durchmesser von 81 cm und eine maximale Startmasse von 6800 kg. Ihr Triebwerk arbeitete mit der Treibstoffkombination Flüssigsauerstoff-Alkohol und erzeugte in einer Brennzeit von maximal 103 s einen Startschub von rund 9600 kp. Mit dieser bis zum IGJ leistungsfähigsten Höhenrakete der USA konnten Nutzmassen zwischen 350 und 400 kg in Höhen von 200 bis 250 km gebracht werden. Noch einmal zum Vergleich: Sowjetische A-3-Raketen kamen im Mai 1957 mit 2200 kg in 212 km Höhe.

Die Raketensondentechnik hat sich durch das IGJ nicht nur in der Sowjetunion und in den USA auf breiter Basis entwickelt und in beiden Ländern ein Arsenal großer und kleiner Höhenraketen erbracht; heute verfügen auch kleinere Länder (beispielsweise in Japan, Frankreich, England, Italien) über eigene Typen und Typenreihen von Höhenforschungsraketen. Es handelt sich dabei meist um ein- oder zweistufige Feststoffraketen, die im allgemeinen Nutzmassen von 5 bis 100 kg in einen weiten Höhenbereich zwischen 50 und etwa 6000 km zu transportieren vermögen. Die Anzahl der Raketensondenaufstiege an den verschiedensten, geophysikalisch interessanten Punkten der Erde erreicht gegenwärtig schon mehr als 1000 im Jahr.

Raketensonden als Meßgeräteträger

Die Ausrüstung der Höhenraketen war und ist so vielfältig wie ihre Aufgabenstellung. Teilweise konnte man zwar bei den konstruktiven Lösungen an Erfahrungen der klassischen aerologischen



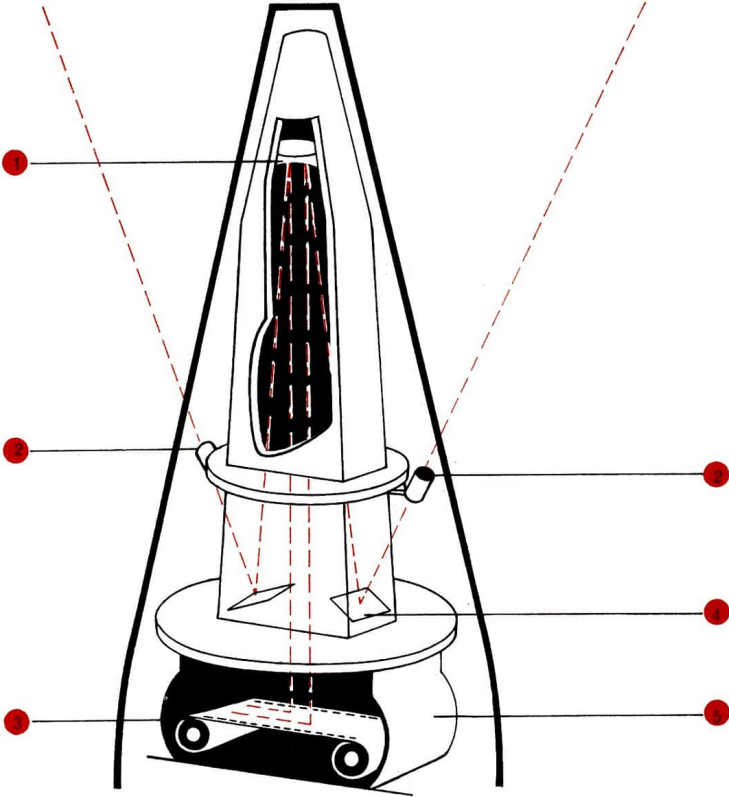
Forschung anschließen. Aber in noch viel breiterem Umfang mußten neue Wege beschritten werden, zu denen man durch die ungewöhnlichen physikalischen Bedingungen in Höhen von 50 km und darüber gezwungen wurde. Außerdem spielten anfangs auch Probleme der besonderen Träger-technik eine Rolle. Immerhin ist es ja kein geringer Unterschied, ob ein empfindliches Meßgerät auf einem festen und erschütterungsfreien Laboratoriumstisch aufgebaut oder ob es in einer Rakete untergebracht werden soll. Die erheblichen Erschütterungen während der Brennpériode des Raketentriebwerkes und der bei Feststoffantrieb besonders heftige Beschleunigungsdruck zwingen vielfach zu neuen konstruktiven Lösungen. Um weiterhin den erwähnten Nachteil einer relativ kurzen Verweilzeit der Meßausrüstung in der Arbeitshöhe soweit als möglich auszugleichen, muß man vor allem bemüht sein, die Nutzmassekapazität optimal auszunutzen. Daher sollte der Raketenmeßkopf so konstruiert werden, daß eine möglichst große Anzahl von Informationen je Aufstieg gewonnen werden kann. Die einzelnen Meßgerätekomplexe müssen daher nach Größe und Masse so sparsam wie möglich aufgebaut sein. So lassen sich massereiche Registriereinrichtungen einsparen, wenn wie in der Radiosondentechnik, die Meßdaten während des Aufstieges auf dem Funkwege an Bodenstationen übermittleit werden. Allerdings sollten die optimal kleinen und massearmen funktednischen Anlagen zugleich in der Lage sein, bis zu einigen tausend Meßwerte in der Sekunde zu übertragen.

Die Zusammenstellung der Meßgerätekomplexe für Höhenraketen wird jedoch nicht nur von der jeweiligen Nutzmassekapazität der Rakete beeinflusst. Man hat außerdem auch darauf zu achten, daß sich einzelne Baugruppen in ihren Funktionen nicht gegenseitig beeinträchtigen. Das kann beispielsweise zwischen Magnetometern und Antennen des Bordsenders sehr leicht der Fall sein. So kommt es, daß man bei den einzelnen

Aufstiegen immer nur eine bestimmte Anzahl aufeinander abgestimmter Untersuchungen veranlaßt. Große Schwierigkeiten bereiten vor allem die direkten Messungen von Druck und Dichte in Höhen über 100 km. Hier hat man es mit extrem niedrigen Gasdichten zu tun, die die ausgefeiltesten Methoden der Vakuummeßtechnik erfordern. In einer Höhe von etwa 300 km befinden sich immerhin etwa zehnmilliardenmal weniger Gasteilchen in einem Kubikzentimeter als an der Erdoberfläche. Im Druckbereich von etwa 20 Torr bis zu ungefähr 10^{-2} Torr bedient man sich der Pirani-Vakuummeter, während im anschließenden Bereich bis etwa 10^{-8} Torr ausschließlich Ionisationsvakuummeter verwendet werden.

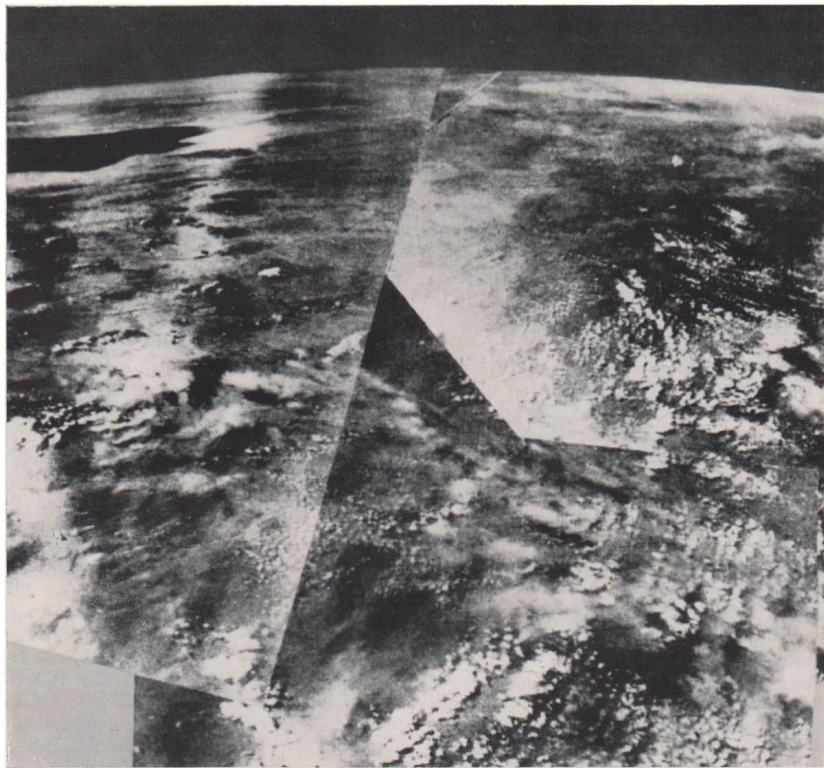
Auch über die Zusammensetzung der Hochatmosphäre konnte man mit Höhenraketen die ersten direkten Informationen erhalten. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Höhenverteilungskurve der Dissoziation von Sauerstoff und Stickstoff, da man daraus Rückschlüsse auf die strahlungsenergetischen Vorgänge in diesen Höhen ziehen kann. Daneben interessierte es, ob mit zunehmender Höhe ein wachsender Anteil der leichten Gase Wasserstoff und Helium nachzuweisen ist, weil sich daraus Anhaltspunkte für eine Theorie der Exosphäre herleiten lassen. Die zuverlässigsten Messungen auf diesem Gebiet lieferten Hochfrequenz-Massenspektrometer, in denen die hochatmosphärischen Gasteilchen nach ihren Molekulargewichten geordnet registriert werden können. Auch diese Messungen sind sehr kompliziert. Sie führten nicht immer zu widerspruchsfreien Meßreihen.

Zu einem außerordentlich wichtigen Hilfsmittel wurden die Höhenraketen natürlich vor allem für die Strahlungsforschung. Mit SpeziaIspektrographen ging man schon bei den ersten Aufstiegen an die Erforschung der solaren Wellenstrahlung. Diesen Untersuchungskomplex ergänzte man außerdem durch Photonen-zähler und Filter-Photozellen-Kombinationen, die auf ausgewählte



- Raketenspektograph (schematisch).
 1 konkaves Beugungsgitter;
 2 Silizium-Fluoridperlen (Lichteintritt);
 3 Filmstreifen;
 4 Hilfsspiegel;
 5 Kassette

Erste Aufnahme der Erdoberfläche
 durch eine Höhenrakete



Wellenlängenbereiche abgestimmt waren. So erhielt man wichtige Informationen über die bis dahin unzugänglichen Bereiche des Sonnenspektrums. Auch gelang beispielsweise der Nachweis der Wasserstofflinie Lyman-Alpha im Ultraviolett-

bereich, deren Existenz schon lange theoretisch vorausgesagt war. Kameras mit Spezialfiltern und -emulsionen lieferten schließlich sogar Aufnahmen der Sonne im fernen und fernsten Ultraviolett- bis zum Röntgenstrahlungsbereich. Zur Unter-

suchung der verschiedensten kosmischen Korpuskularstrahlungen dienten außer einfachen Zählrohren und Tscherenkow-Zählern auch Zählrohrteleskope und kleinere Nebelkammern. Die Auswertung dieser ersten Untersuchungen in großen Höhen ergab, daß die Intensität der Partikelstrahlung ganz allgemein in einer Höhe von etwa 20 km ein Maximum erreicht (Sekundärstrahlungseffekt) und darüber dann offenbar ziemlich gleich bleibt. Das auf diese Weise gewonnene Bild war allerdings noch sehr mangelhaft fundiert. Es wurde von vornherein angezweifelt und später dann mit der Satelliten- und Raumsondentechnik wesentlich korrigiert.

Eine besonders reizvolle Aufgabe für Höhenraketen war zweifellos die Fotografie der Erdoberfläche. Die emporgetragenen Kameras lieferten die ersten Anblicke der Erde sozusagen „aus kosmischer Sicht“. Gegen die Ansichten einiger ewiger „Weltbildverbesserer“ erbrachten diese Aufnahmen nebenbei den überzeugenden Beweis, daß unsere Erde tatsächlich eine Kugel ist, da sie die Erdkrümmung unwiderlegbar deutlich zeigten. Der wissenschaftliche Inhalt dieser Fotografien sprach aber vor allem die Meteorologen an. Für sie erwuchsen hier weitreichende Perspektiven. Schon die ersten Aufnahmen aus 100 bis 200 km Höhe erfaßten Ausschnitte der Erdoberfläche von vielen tausend Quadratkilometern Ausdehnung. Damit ergeben sich noch nie dagewesene Möglichkeiten zu einer umfassenden und praktisch lückenlosen Übersicht über die großräumige Verteilung von Wolkenfeldern. Wie wir wissen, stellen aber Wolkenverteilung und Wolkenarten charakteristische Folgeerscheinungen des allgemeinen Wettergeschehens dar. Somit ließ sich aus einer Analyse der Höhenraketenfotos eine wertvolle Ergänzung der von Bodenstationen gewonnenen Wetterkarten herleiten. Vor allem für Gebiete, in denen das Netz der Bodenstationen nicht besonders dicht sein konnte (zum Beispiel auf dem Meer), zeichneten sich da-

mit völlig neue Wege der Wetterbeobachtung ab. Obwohl sich auf dieser Basis nur das Wetterelement „Wolken“ erfassen ließ, konnten schon sehr bald reiche Erkenntnisse gesammelt werden. So erhielt man beispielsweise erstmalig das erregende Bilddokument einer Sturmzyklone, auf dem deutlich die großräumige Wirbelstruktur der Luftströmungen zu erkennen war. Damit rückte auch der sehnlichste Wunsch der Mitarbeiter von Sturmwarndiensten, nämlich die frühzeitige Entdeckung von neugebildeten Wirbelstürmen über dem Meer, in greifbarere Nähe.

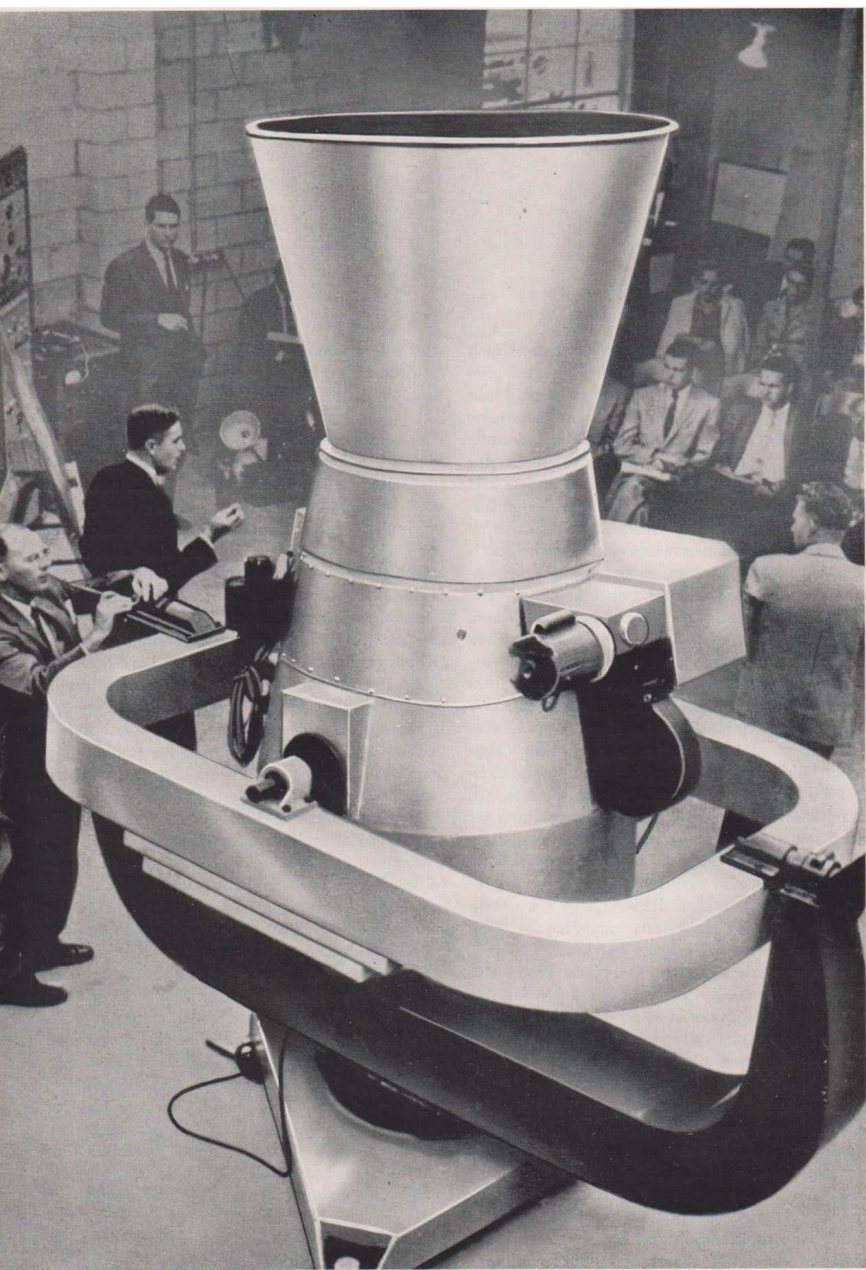
Einige dieser Arbeiten und Bemühungen mit Höhenraketen erbrachten schon vor dem Internationalen Geophysikalischen Jahr den überzeugenden Beweis, daß Raketen als Träger automatischer Meß- und Beobachtungseinrichtungen von großer praktischer Bedeutung für die Wissenschaft sind. Als man das Programm zum Internationalen Geophysikalischen Jahr ausarbeitete, bezog man daher zwangsläufig die Höhenraketen mit ein. Wie schon erwähnt, wurden Starts von einigen hundert meteorologischen und geophysikalischen Raketen vorgesehen. Verwirklichen konnten dieses Teilprogramm verständlicherweise nur die beiden in der Raketechnik seinerzeit am weitesten fortgeschrittenen Länder, die Sowjetunion und die USA. Darüber hinaus verkündeten aber ihre wissenschaftlichen Vertreter 1955 fast gleichzeitig eine aufsehenerregende Erweiterung ihrer Arbeitsprogramme über Höhen- und Weltraumforschung durch künstliche Erdsatelliten. Die bis zu diesem Zeitpunkt schon erreichten großen Fortschritte in der Entwicklung mehrstufiger Großraketen und die vielseitigen meßtechnischen Erfahrungen mit Höhenraketen bildeten die Voraussetzungen für diese epochemachend neue Zielsetzung. Wenn die Weltöffentlichkeit von diesen Ankündigungen zunächst auch nur wenig Notiz nahm, so sollten die ersten praktischen Erfolge um so nachhaltigeren Eindruck in allen Teilen der Erde hinterlassen.

Künstliche Erdsatelliten

Wenn vom Standpunkt der reinen Höhenforschung die künstlichen Satelliten zunächst lediglich den langgehegten Wunsch verwirklichen helfen, Meßgeräteträger langfristig in ausgedehnte Meßräume innerhalb der Hochatmosphäre und des erdnahen kosmischen Raumes zu versetzen, so führte das dabei angewendete Prinzip weit über dieses Ziel hinaus. Mit den Starts der ersten künstlichen Satelliten vollzog sich der entscheidende Schritt zu einer prinzipiell neuen wissenschaftlichen Qualität. Sie demonstrierten, daß technisch-wissenschaftliche Voraussetzungen bestanden, einen der kühnsten Träume der Menschheit zu verwirklichen. Der freie Flug in den kosmischen Raum, mit allen daraus erwachsenden Konsequenzen für eine Vertiefung wissenschaftlicher Erkenntnisse und ihrer Nutzung für die menschliche Gesellschaft, war möglich geworden. Wie weitreichend diese Konsequenzen sind, ist auch heute noch nicht abzusehen. Als richtungweisend für die zukunftssträchtige Bedeutung der Raumflugtechnik muß jedoch angesehen werden, daß sich die Sowjetunion als Land mit der fortschrittlichsten Gesellschaftsform gleich vom ersten Tage an einer führenden Rolle auf diesem Gebiet versicherte.

Wie wir schon gesehen haben, liegt die untere Grenze des Antriebsbedarfs zum Flug in einer astronautischen Freiflugbahn bei etwa 9000 m/s. Als geometrisch einfachste Bahnform ergibt sich dann eine Kreisbahn in einer Höhe von 200 bis 300 km, in der sich der künstliche Satellit mit einer Umlaufgeschwindigkeit von rund 7800 m/s bewegt. Das Erreichen einer nahezu kreisförmigen Umlaufbahn bereitet allerdings einige steuerungs- und lenktechnische Schwierigkeiten, so daß die Satellitenbahnformen anfangs stets mehr oder weniger elliptisch waren. Je nach der Geometrie der projektierten Umlaufbahn und in Abhängigkeit vom Stufenantriebsprogramm der Träger Rakete erfordert ein Satellitenaufstieg mehrere Antriebsabschnitte, die durch einzelne, mehr oder weniger lange antriebslose Freiflugstrecken ge-

trennt sein können. Bei Brennschluß der letzten Antriebsstufe müssen jedoch Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung den Bedingungen für den Eintritt in die geforderte Umlaufbahn entsprechen. Die weitere antriebslose Bewegung des Satelliten, der als Meßgeräteträger meist von der letzten Antriebsstufe getrennt wird, vollzieht sich nach den schon erwähnten Gesetzen der Himmelsmechanik. Im Bereich der Hochatmosphäre ist freilich der Bremsseffekt zu berücksichtigen, den die atmosphärischen Gase hervorrufen und der zu Bahnänderungen führt. Umgekehrt lassen sich aus der Bremswirkung natürlich auch Informationen über die Dichteverteilung in der Bahnhöhe des Satelliten gewinnen. Die Bahn selbst liegt dabei in einer Ebene, die durch den Massenmittelpunkt der Erde geht und die man zunächst in grober Näherung als „raumstabil“ ansehen kann. So bezeichnet man eine Umlaufbahn, die unabhängig von der Bewegung des Zentralkörpers (Rotation, Translation) ihre Orientierung gegen den Fixsternraum beibehält. Wie gesagt, gilt dies für eine Erdsatellitenbahn nur in grober Näherung. Unsymmetrien (Anomalien) des Erdgravitationsfeldes, die in Form und Struktur des Erdkörpers begründet liegen, sorgen im Laufe der Zeit für einige merkliche Störungen in Lage und Form der Satellitenbahn. Auch hier ergeben sich aus der Umkehrung des Zusammenhanges besondere Möglichkeiten für im wahrsten Sinne des Wortes „tiefgehende“ geophysikalische Untersuchungen. Unabhängig von der speziellen instrumentellen Ausrüstung eines Meßsatelliten kann man also allein schon aus Vermessung und Berechnung seiner Umlaufbahn Angaben über die Struktur der Hochatmosphäre und des Erdkörpers gewinnen. Die Satelliten werden sowohl mit optischen Geräten – zu deren weitreichendsten heute vor allem große Spezialkameras vom Super-Schmidt-Typ und ähnlich beschaffene Kinotheodoliten gehören – als auch auf funktechnischem Wege beobachtet. Die funktechnischen Messungen haben



zwar den Vorzug, daß sie weitgehend unabhängig sind von Tageszeit und Bewölkung, in ihrer Genauigkeit sind sie den optischen Positionsmessungen jedoch im allgemeinen unterlegen.

Das modernste Verfahren für aktive Peilungsmessungen zur Satellitenortung beruht auf Laserstrahlen. Es kann jedoch zur Zeit noch nicht auf beliebige Satelliten angewendet werden, sondern nur auf solche, die mit speziellen optischen Reflektoren ausgerüstet sind.

Abgesehen von der Radartechnik, die allerdings in der Satellitenortung anfänglich nur eine untergeordnete Rolle spielte, setzen die funktechnischen Satellitenbeobachtungen voraus, daß der betreffende Satellit über einen Sender verfügt. Seine Signale können von den Bodenstationen registriert oder direkt zur Peilung benutzt werden. Bekanntlich hängt aber bei bestimmten Sendefrequenzen die Signalausbreitung besonders von den Bedingungen in der Ionosphäre ab. Wenn man daher die Sendefrequenz des Satellitensenders entsprechend günstig wählt, kann man aus der Intensität und verschiedenen Besonderheiten der an der Erdoberfläche registrierten Signale einen umfassenden Einblick in die jeweiligen ionosphärischen Gegebenheiten gewinnen. Die großen Vorzüge einer solchen „Ionosphärensonde“ liegen darin, daß sich der Sender sowohl direkt in der zu untersuchenden Schicht als auch darüber und darunter bewegen kann. Dazu ist nur notwendig, der Satellitenbahn eine entsprechende Lage zu geben. Außerdem ist das zu untersuchende Gebiet viel ausgedehnter, als es bei der herkömmlichen Ionosphärenmethode der Fall sein kann, da Stationen in ganz verschiedenen Entfernungen vom jeweiligen Satellitenort die Signale gleichzeitig empfangen können.

Die Probleme des Funkempfangs von Satellitensignalen sind aber auch über diese spezielle wissenschaftliche Bedeutung hinaus von Einfluß auf Raumflugexperimente. Von der Meßwertübertragung aus einem nur wenige Kilogramm

Nutzmasse betragenden Meßsatelliten bis zum Funkverkehr zwischen Bodenstationen und tonnenschweren bemannten Raumflugkörpern muß in jedem Fall die Nachrichtenverbindung mit äußerster Präzision funktionieren. Unvorhergesehene Störeinflüsse auf der Verbindungsstrecke Raumflugkörper-Bodenstation können den wissenschaftlichen Wert eines Unternehmens in Frage stellen oder sich sogar verhängnisvoll auswirken. Aus diesem Grund wurden bereits bei den ersten Satellitenunternehmen funktechnische Erprobungen zu einem der Schwerpunkte des Arbeitsprogrammes gemacht.

Mit den schon vorher erwähnten Möglichkeiten zur wissenschaftlichen Auswertung von Satellitenflügen gewann man schließlich eine klare Konzeption für die zweckmäßigste Auslegung der ersten Satellitenexperimente. Als Schwerpunkte wissenschaftlicher Untersuchungen kamen in Betracht:

- allgemeiner Dichteverlauf in der Hochatmosphäre;
- Struktur des Erdgravitationsfeldes;
- funktechnische Übertragungsmöglichkeiten.

Beim zuletzt genannten Programmpunkt ließ sich noch die Übertragung bestimmter Betriebsdaten aus dem Satelliteninneren (zum Beispiel Temperatur an verschiedenen Punkten) zur Kontrolle der Satellitenkonstruktion vorsehen. Nach diesem anfänglichen Minimalprogramm boten sich für äußere Form und Ausrüstung der ersten Satelliten als beste Lösung ein hermetisch dichter Kugelkörper und in seinem Inneren eine hinreichend leistungsfähige und darum unter Umständen relativ massereiche funktechnische Ausrüstung für verschiedene Frequenzen an. Hinzu kamen noch Außenantennen, die jedoch strömungstechnisch den Vorteil des kugelförmigen Satellitenkörpers nicht allzu merklich beeinträchtigen durften. Der Grund für die Zweckmäßigkeit der Kugelform ist der: Trotz der sicher zu erwartenden Drehbewegungen des Satelliten bleibt seine Querschnittfläche praktisch

stets gleich, so daß die Dichte der Hochatmosphäre aus deren Bremswirkung leicht bestimmt werden kann. Tatsächlich zeigten dann auch die ersten Veröffentlichungen über verschiedene Satellitenkonstruktionen den maßgeblichen Einfluß dieser Grundgedanken.

Sputnik-1 — Aufbruch ins Raumfahrtzeitalter

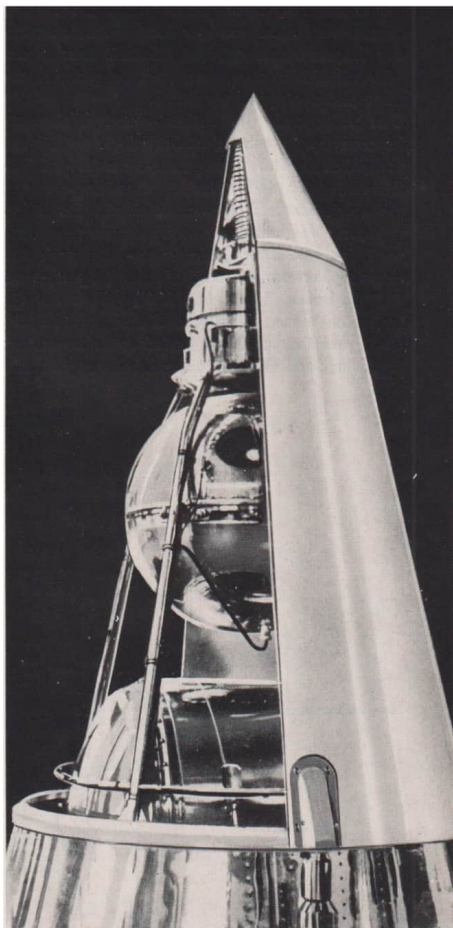
An sich wollten die USA mit einem großangelegten Projekt „Vanguard“ („Vorhut“) ihre führende Rolle in der Raumfahrtforschung und damit ganz allgemein in der modernen Technik demonstrieren. Aber schließlich waren es doch die sowjetischen Raumfahrtwissenschaftler, die mit dem sensationellen Start ihres Sputnik-1 am 4. Oktober 1957 das Zeitalter der Raumfahrt eröffneten und Maßstäbe setzten. Als wesentlichstes Kriterium des sowjetischen Satellitenprogrammes war bald das Streben nach maximaler ökonomischer Ausnutzung der kostspieligen Trägerraketentechnik zu erkennen. Das kam vor allem sehr augenfällig in der anfänglich relativ sparsamen Aufstiegsfolge bei gleichzeitig optimalem Nutzmasstransport zum Ausdruck. So hatten die sowjetischen Raumfahrtwissenschaftler schon bis Mitte 1958 mit drei Aufstiegen eine wissenschaftliche Gesamtnutzmasse in Umlaufbahnen gebracht, die die USA-Raumforscher bei fast zwei Dutzend Aufstiegen auch vier Jahre später noch nicht erreicht hatten. Ein sehr großer Teil der amerikanischen Satellitenaufstiege und der Hauptteil der dabei in Umlaufbahnen gebrachten Nutzmassen dienten bis zum heutigen Tage militärischen und halb-militärischen Zielen. Einzelheiten derartiger Projekte und Unternehmungen brauchen hier nicht genannt zu werden, da uns ausschließlich Experimente zur friedlichen Erschließung des Weltraumes interessieren. Im übrigen wird es zur Erleichterung einer Übersicht über die für wissenschaftliche

Zwecke wesentlichsten Satellitenversuche zweckmäßig sein, unabhängig von der chronologischen Reihenfolge einige charakteristische Projektgruppen im Zusammenhang darzustellen. Die wesentlichsten Ergebnisse dieser Unternehmen werden wir im nachfolgenden Kapitel betrachten.

Die erste Etappe der sowjetischen Satellitenexperimente zur Untersuchung der Hochatmosphäre sowie geophysikalischer Erscheinungen im erdnahen kosmischen Raum umfaßte den Einsatz der Meßsatelliten Sputnik-1 bis Sputnik-3.

In Übereinstimmung mit der schon behandelten Grundkonzeption war Sputnik-1 ein kugelförmiger Versuchssatellit mit einer Nutzmasse von 83,6 kg. Sein größter Massenteil entfiel auf die chemischen Stromquellen zur Versorgung des eingebauten Senders. Dieser Sender arbeitete auf zwei Frequenzen, von denen die eine (20,005 MHz) eine vorzügliche „Ionosphärensonde“ abgab, während die andere (40,002 MHz) den notwendigen Kontrollen diente. Außer der Sendeanlage befanden sich in der hermetisch abgeschlossenen Satellitenkugel noch mehrere Meßfühler für Innentemperatur und Innendruck. Zur Sicherung des funk- und meßtechnischen Betriebes gegen störende Temperatureinflüsse enthielt der Innenraum des Satelliten ein neutrales Füllgas (Stickstoff). Aus den Anzeigen der erwähnten Meßfühler konnte man die gewünschten Angaben über die Betriebsfunktionen der Gesamtanlage erhalten. Zur Abstrahlung der Funksignale befanden sich außen am Satelliten vier Stabantennen. Der Sendebetrieb dauerte bis zum 27. Oktober 1957 und endete mit dem Energievorrat der chemischen Batterien. Die Bahn von Sputnik-1 lag zwischen 227 und 946 km Höhe, die „Lebensdauer“ dieses ersten künstlichen Satelliten betrug 92 Tage. Die Bahnvermessungen während dieser Zeit erbrachten erste direkte Informationen über die Hochatmosphäre. Unter der Einwirkung des Brems-effektes der Erdatmosphäre verglühte Sputnik-1 am 4. Januar 1958 in deren tieferen Schichten.

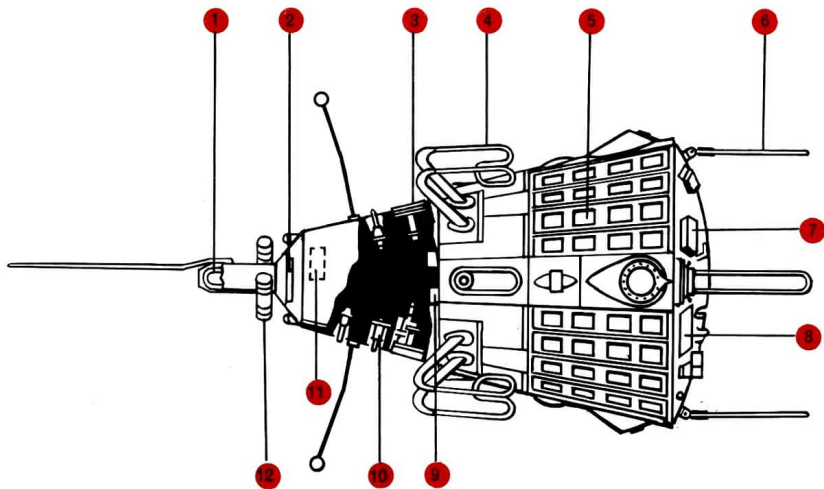
Die Aufgaben für den schon am 3. November 1957 gestarteten nächsten sowjetischen Satelliten Sputnik-2 (Bahnhöhe 225 bis 1670 km) waren weitaus umfassender. Dies drückte sich auch in seiner Nutzmasse von 508,3 kg aus. Mit einem Teil seiner Meßausrüstung wurden die Angaben von Sputnik-1 kontrolliert, und zusätzliche Meßgeräte erweiterten das Programm für Höhen- und Weltraumforschung. So befanden sich an Bord von Sputnik-2 Meßgeräte zur Untersuchung der solaren Ultraviolett- und Röntgenstrahlung und außerdem zwei Meßinstrumente zur Registrierung der Kosmischen Strahlung. Der Schwerpunkt des Unternehmens Sputnik-2 lag aber zweifellos auf dem Gebiet der Raumfahrtphysiologie. In einer hermetischen Spezialkabine wurde die Hündin „Laika“ als erstes höherentwickeltes Lebewesen in eine astronautische Freiflugbahn gebracht und damit den extremen Bedingungen des Weltraumfluges ausgesetzt. Der mehr als überraschend frühe Termin und die beispiellose Kühnheit dieses Experimentes fanden ein vielfältiges und stürmisches Echo in aller Welt. Es zeigte die weitgesteckten und auf den absoluten Gipfelpunkt der wissenschaftlichen Raumfahrt, den bemannten Weltraumflug, abgezielten Entwicklungen der sowjetischen Raumfahrtforschung. In der mit Klimaregelung und Nahrungsvorräten ausgerüsteten Tierkabine blieb die Hündin etwa eine Woche am Leben. Die Übertragung der physiologischen Meßwerte war von großer Bedeutung für die gesamte weitere Vorbereitung auf den Flug eines Menschen in den Kosmos. Da eine Rückführung der Tierkabine noch nicht möglich war, wurde das Versuchstier nach dem Abschluß des Untersuchungsprogramms auf schmerzlosem Wege getötet. Die Sender von Sputnik-2 arbeiteten wiederum auf den Frequenzen 20,005 und 40,002 MHz; die Meßwertübertragung dauerte aber wegen der höheren Energieforderungen des umfangreichen Betriebsprogrammes nur bis zum 10. November 1957. Zu diesem Zeitpunkt waren



die chemischen Stromquellen erschöpft. Der in diesem Fall nicht von der letzten Antriebsstufe des Trägersystems getrennte Satellit tauchte am 14. April 1958 in den tieferen Schichten der Hochatmosphäre ein und verglühte.

Den Höhepunkt im Höhen- und Weltraumforschungsprogramm der Sputnik-Serie bildete schließlich der Start von Sputnik-3 am 15. Mai 1958 (Bahnhöhe 225 bis 1879 km). Mit ihm übersprangen die sowjetischen Wissenschaftler alle bis dahin gültigen Vorstellungen von einfachen Meßsatelliten. Mit einer Umlaufmasse, die nach Abtrennung von der letzten Stufe des Trägersystems 1327 kg betrug, von denen 986 kg allein auf die instrumentelle Ausrüstung entfielen, stellte Sputnik-3 praktisch ein automatisches Laboratorium im Kosmos dar. Die Breite des Arbeitsprogrammes

spiegelte sich in der umfangreichen Meßausrüstung wider. Dazu gehörten 2 Ionisationsmanometer, 1 Magnetmanometer, 1 Massenspektrometer, 2 Kugelgitter-Ionenfallen, 1 Magnetometer, 1 Tscherenkow-Zähler, 2 Lumineszenzzähler, 1 Zählrohr für Partikelstrahlung, verschiedene elektrostatische Ladungsmesser und 4 piezoelektrische Meteoritenzähler. Zu dieser Ausrüstung kamen noch die üblichen Meßfühler für die Betriebsfunktionen innerhalb des Satelliten und mehrere Empfangselemente zur Umwandlung von Sonnenstrahlung in elektrische Energie (Solarzellen). Der Sendebetrieb auf 20,005 und 40,002 MHz basierte auf chemischen Batterien und elektrischen Sammlern, die teilweise durch die Solarzellen aufgeladen werden konnten. Nachdem die chemischen Stromquellen am 25. Mai 1958 erschöpft



Aufbauschema**des sowjetischen Meßsatelliten Sputnik-3.**

- 1 Magnetometer;
- 2 Solarzellen;
- 3 Teilchendichtemesser;
- 4 Antennen;
- 5 Temperaturregelblende;
- 6 Stabantennen;
- 7 Mikrometeoritenzähler;
- 8 Solarzellen;
- 9 Meßgerät für primäre Kosmische Strahlung;
- 10 Ionisationsmanometer;
- 11 Photonen-zähler;
- 12 Meßgerät für solare Wellenstrahlung

waren, sorgten die Solarbatterien bis zum 6. April 1960 für die Übermittlung eines reduzierten Meßprogrammes. Von besonderem raumflugtechnischem Interesse war bei diesem Satelliten außerdem ein automatisches Temperaturregelssystem, das mit jalousieartigen Blenden an der Außenwandung des Satelliten arbeitete. Sputnik-3 führte insgesamt 10 037 Erdumläufe aus und verglühte am 6. April 1960. Die durch ihn gewonnenen Informationen über Hochatmosphäre und erdnahen kosmischen Raum waren so umfangreich, daß ihre Auswertung mehrere Jahre in Anspruch nahm.

Erste Forschungsatelliten der USA

Im Vergleich zu diesen aufsehenerregenden Erfolgen der sowjetischen Raumflugtechnik waren die ersten praktischen Ergebnisse der USA mehr als bescheiden. Da das offizielle Projekt „Vanguard“ sich mehr oder weniger als Fehlentwicklung erwies und da aus Prestige Gründen den sowjetischen Erfolgen unbedingt in kürzester Zeit ein amerikanischer Satellitenaufstieg entgegen gestellt werden sollte, gab man einem anderen Projekt den Vorrang. Deshalb hieß der erste amerikanische Meßsatellit Explorer-1, der am 1. Februar 1958 in eine Umlaufbahn (360 bis 2549 km Höhe) um die Erde gelangte. Trotz aller gerätetechnischen Raffinesse blieb er mit seiner wissenschaftlichen Nutzmasse von nur 8,2 kg doch weit hinter den Möglichkeiten seiner beiden sowjetischen Vorgänger zurück. Hinzu kam, daß er von der Formgebung her wenig ideal war. Man hatte ihn als einfache zylinderröhrige Verlängerung einer kleinen Feststoffrakete gebaut, die als letzte Stufe des Antriebssystems fungierte und mit dem Meßgerätekörper auch nach Brennschluß verbunden blieb. Als wichtigster Teil der Meßausrüstung war ein Zählrohr für kosmische Partikelstrahlungen anzusehen. Daneben sollten kleine

empfindliche Mikrophone den Aufprall von meteoritischen Teilchen registrieren, Drahtwiderstandszellen die Verteilungsdichte von Mikrometeoriten zu erfassen gestatten und Meßfühler außen und innen Temperaturangaben liefern. Die anfallenden Meßwerte wurden auf 108,00 und 108,03 MHz mit einer Sendeleistung von nur 60 und 10 mW übertragen.

Diesem ersten amerikanischen Meßsatelliten folgten bis Ende 1966 noch fast 40 weitere Explorer-Satelliten. Nach Aufbau, Aufgabenstellung und Ausrüstung waren dabei in einem ersten Programm block drei Gruppen zu unterscheiden. Zur ersten gehörten neben Explorer-1 die Satelliten mit den Seriennummern 3 und 4, während 2 und 5 als Startversager ausfielen. Die größte Nutzmasse hatte Explorer-4 mit 11,7 kg. Auf Grund der noch immer sehr beschränkten meßtechnischen Möglichkeiten galt die Untersuchung der kosmischen Partikelstrahlung als Hauptziel dieser Satellitengruppe. Die zweite Gruppe umfaßt die Explorer-Satelliten 6, 7, 8, 10, 11 und 12, deren Nutzmassen schon zwischen 40 und 64 kg lagen. Die Meßausrüstungen dieser Satelliten waren außerordentlich vielseitig; sie hatten die Kosmische Strahlung und die Meteoritenverteilungsdichte zu erkunden, Temperatur zu messen, Solarzellen zu erproben usw. sowie Spezialexperimente im solaren Ultraviolett- und Röntgenstrahlungsbereich anzustellen und Strahlungsmessungen zur Bestimmung der Strahlungsbilanz der Erde vorzunehmen.

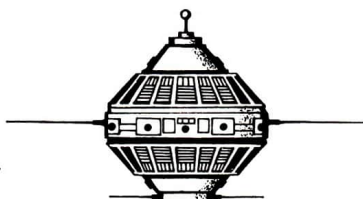
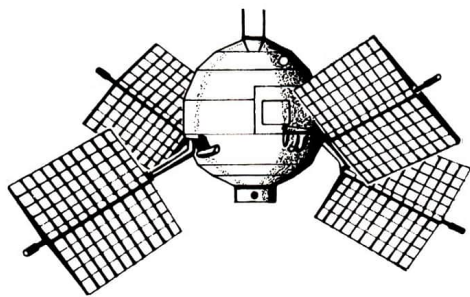
Das Programm dieser Gruppe bildete praktisch auch das Skelett für die Aufgaben der meisten Explorer-Satelliten bis zur Gegenwart, wobei noch spezielle Ionosphärenstudien, Direktmessungen der Hochatmosphären dichte und -zusammensetzung sowie Untersuchungen des „Sonnenwindes“ hinzukamen. Unter „Sonnenwind“ versteht man den Fluß von Partikeln des Sonnenplasmas, die praktisch ständig und gleichförmig nach allen Richtungen mit relativ geringen Geschwindigkeiten (einige hundert Kilometer in der

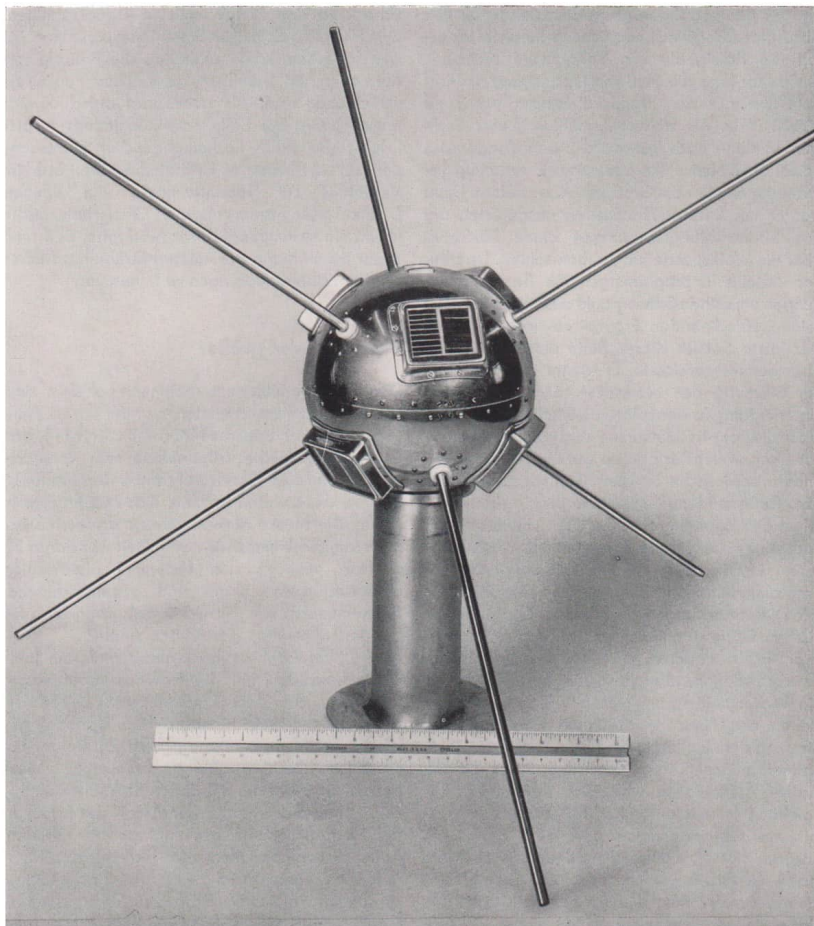
Sekunde) radial nach außen durch den interplanetaren Raum strömen. Über die geophysikalische Bedeutung dieser Erscheinung wird später noch zu sprechen sein.

Von besonderem wissenschaftlichem Interesse waren die Explorer-Satelliten 6, 10 und 12, die wegen ihrer außerordentlich exzentrischen Bahnen (zum Beispiel Explorer-10: 160 bis 230 000 km) sehr weit in den erdnahen kosmischen Raum vorstießen und damit günstige Möglichkeiten boten, die kosmische Partikelstrahlung, die Struktur des Erdmagnetfeldes und ihre Zusammenhänge zu erforschen. Sie bildeten damit die Vorläufer der sogenannten IMP-Satelliten (IMP = Interplanetary Monitoring Platform, swv. interplanetare Warnungsplattform), von denen der erste (Explorer-18) am 27. November 1963 gestartet wurde (193 bis 198 000 km Bahnhöhe). Diese Satelliten sollen vor allem sporadische solarische Partikelströme frühzeitig entdecken und somit einen „Frühwarndienst“ für bemannte Raumflüge gestatten. Gleichzeitig werden mit diesen Satelliten Magnetfeldmessungen und Untersuchungen des Sonnenwindes vorgenommen. Die beiden Satelliten der dritten Gruppe, Explorer-9 und Explorer-13, dienen enger begrenzten Sonderuntersuchungen. Ex-

plorer-9 war der Vorläufer einer Reihe von Ballonsatelliten von 3,6 m Durchmesser, deren Bahnänderungen es erlauben, die Luftdichte zu bestimmen. Explorer-13 stellte vor allem spezielle Untersuchungen über Häufigkeit und Masse der Mikrometeoriten an, die dann später mit weiteren Satelliten dieser Serie (zum Beispiel Explorer-23) fortgesetzt wurden.

Mit dem Projekt „Vanguard“ kamen die amerikanischen Wissenschaftler erstmalig am 13. März 1958 doch noch zu einem bescheidenen Erfolg. Nach zwei Fehlversuchen gelang der Aufstieg eines kleinen Testsatelliten (Vanguard-1) mit 1,5 kg Nutzmasse. Einzige Ausrüstung waren zwei winzige Sender (108,00 und 108,03 MHz) mit 5 und 10 mW Sendeleistung und 6 Solarzellen zur Speisung des einen Senders. Der andere wurde für kurze Zeit durch chemische Stromquellen gespeist. Wissenschaftliche Informationen waren von diesem Zwergsatelliten nur wenig zu erwarten. Lediglich aus seinen Bahnänderungen konnten einige wertvolle Rückschlüsse auf die Struktur des Erdgravitationsfeldes gezogen werden. Viel unangenehmer war jedoch eine funktechnische Auswirkung seiner Existenz. Da man nicht mit einer langen Lebensdauer der Solarzellen gerechnet





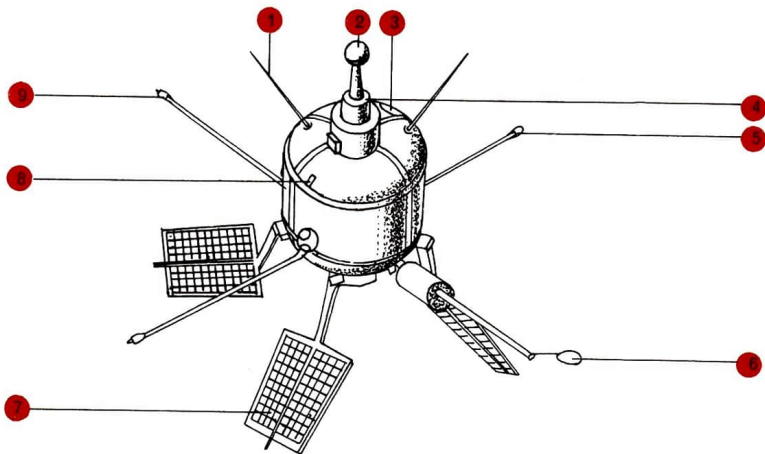
und für den von ihnen gespeisten Sender keinen Abschaltmechanismus vorgesehen hatte, blockierten die Peilsignale von Vanguard-1 mehr als fünf Jahre lang die Meßwertübertragung anderer Satelliten auf der Standardfrequenz von rund 108,00 MHz. Als weitere Satelliten dieser Serie wurden dann noch Vanguard-2 und Vanguard-3 gestartet. Dabei sollte Vanguard-2 erstmalig Informationen über die Großwetterlage liefern. Dazu war er mit Infrarot-Photozellen ausgerüstet, die aus Rückstrahlungsmessungen einen Überblick über die Wolkenverteilung geben sollten. Da aber der Satellit unprogrammgemäße Taumelbewegungen um seinen Schwerpunkt ausführte, konnten keine befriedigenden Ergebnisse erzielt werden. Der letzte Satellit dieser Serie war mit 22,7 kg auch der massereichste. Er diente in erster Linie der Messung des Magnetfeldes der Erde und Untersuchungen der solaren Röntgenstrahlung. Über die sehr bedeutsamen Versuche mit Wettersatelliten wollen wir ebenso wie über Einzelheiten anderer sowjetischer und amerikanischer Satelliten- bzw. Raumsondenunternehmen erst in den nachfolgenden Kapiteln sprechen. Hier sollen uns nur noch einige besondere Satelliten bzw. Satelliten-serien interessieren, die mit ihrem Forschungsprogramm im wesentlichen an die bisher betrachteten Untersuchungen anschließen. Die amerikanischen Ballonsatelliten vom Typ „Echo“ sollten zwar ganz anderen, nämlich funkttechnischen Zwecken dienen, aber sie erwiesen sich auch für die Weltraumforschung von Wichtigkeit. Sie bestehen aus einer hauchdünnen Kunststoffhülle, die nach dem Einflug in die Umlaufbahn zu einem ballonförmigen Körper von rund 30 m Durchmesser aufgeblasen wird. Die Oberfläche des Satelliten ist mit einer hochreflektierenden Aluminiumschicht überzogen und wirkt daher als ausgezeichnete Funkwellenreflektor. Außerdem macht sie auch wegen ihres großen Durchmessers die am dunklen Abend- oder Morgenhimmel dahinziehenden sonnenbelegten Echo-1 und

Echo-2 zu den bisher hellsten Dauersatelliten. Der Hauptzweck dieser Satellitenexperimente ist, wie der Name schon andeutet, die Prüfung von Methoden, ob Satelliten als passive Funkrelais verwendbar sind. Als unerwartet aufschlußreich erwiesen sich die Ballonsatelliten jedoch zusätzlich in der Rolle hochempfindlicher Dichtesonden für die extreme Hochatmosphäre. Ihre im Verhältnis zur Satellitenmasse von einigen Dutzend Kilogramm enorme Querschnittsfläche macht sie so empfindlich für Störkräfte, daß man sogar die Wirkung des solaren Strahlungsdruckes an ihren Bahnänderungen verfolgen kann.

Der Kreis wird größer

Das erste Satellitenunternehmen, bei dem zwei Länder zusammenarbeiteten, war der am 26. April 1962 gestartete britische Meßsatellit Ariel-1, den eine amerikanische Trägerrakete vom Versuchszentrum auf Kap Canaveral (heute Kap Kennedy) in eine Umlaufbahn brachte. Das Meßprogramm dieses der Masse nach etwa den schwersten Explorern gleichkommenden Satelliten war darum so wertvoll, weil es zum erstenmal gleichzeitige Untersuchungen solarer und geophysikalischer Phänomene vorsah. Ähnliches galt dann auch für den im Jahre 1964 gestarteten Ariel-2. Ariel-1 und Ariel-2 führten unter anderem Ionisationskammern mit, die besonders auf solare Strahlung aus dem kurzwelligsten Ultraviolett (Lyman-Alpha-Bereich) ansprechen. Daneben gehörten zur Instrumentierung noch Zählrohre, um die solare Röntgenstrahlung zu messen, und insgesamt drei Geräte, mit denen Elektronentemperatur und -dichte sowie der Anteil der Ionen in der Hochatmosphäre bestimmt werden konnten. Außer diesen speziellen solar-terrestrischen Meßaufgaben dienten Ariel-1 und Ariel-2 noch Untersuchungen über kosmische Partikelstrahlungen. Dazu waren sie mit Tscherenkow-Zähler und

- 1 Antenne;
- 2 Massenspektrometer;
- 3 Lyman-Alpha-Meßgerät;
- 4 Meßgerät für kosmische Strahlung;
- 5 Ausleger mit Gegengewicht;
- 6 Meßgerät für Elektronendichte;
- 7 Ausleger mit Solarzellen;
- 8 Meßgerät für solare Röntgenstrahlung;
- 9 Temperaturmeßsonde



Geiger-Zählrohr ausgerüstet. Hauptaufgabe bei diesen Messungen war, die Abhängigkeit der Strahlungsphänomene vom Erdmagnetfeld zu ermitteln. Damit sollten Anhaltspunkte dafür gewonnen werden, wie das irdische Magnetfeld durch das interplanetare beeinflusst wird.

Die im September 1962 und November 1965 von der amerikanischen Air-Force-Base in Vandenberg (Kalifornien) gestarteten Satelliten vom Typ „Alouette“ waren ebenfalls „Ausländer“, da sie im Auftrage des kanadischen Verteidigungsministeriums gebaut wurden. Damit wurden die wissenschaftlichen Ergebnisse dieser Unternehmen, deren Ziel die Erforschung bestimmter ionosphärischer Bedingungen in der Polarlichtregion war, von vorn-

herein durch militärische Interessen wesentlich eingeschränkt. Da aber die Satellitensender für die Ionosphärenuntersuchungen Funkimpulse im Frequenzband von 1,6 bis 11,5 MHz abstrahlten und die Satellitenbahnen eine Neigung von rund 80° gegen den Erdäquator hatten, konnten auch nichtmilitärische Beobachtungsstationen Meßdaten empfangen. Bemerkenswert war, daß die Sendeanlage zur Ionosphärensondierung doppelt vorhanden war, so daß bei Ausfall einer Sendeanlage sofort auf die andere umgeschaltet werden konnte. Dieses Verfahren (Redundanz) wurde übrigens ganz allgemein weitgehend zu einem Grundprinzip bei der Ausrüstung kostspieliger unbemannter und vor allem bemannter Raumflug-

experimente. Besondere Meßgeräte in den Alouette-Satelliten konnten weiterhin die radiofrequente Strahlung aus der Milchstraße und aus der Ionosphäre messen sowie die kosmischen Teilchenstrahlungen untersuchen.

Als drittes Land trat 1965 Frankreich in den Kreis der Mächte ein, die mit eigenen Trägermitteln Raumflugkörper in Freiflugbahnen bringen können. Der erste Versuch, einen Meßsatelliten („A-1“, „Asterix“) von 42 kg in eine Umlaufbahn zu bringen (26. November 1965, Trägerrakete „Diamant“), gelang zwar, aber der Sender des Satelliten fiel schon nach kurzer Zeit aus. Ein voller Erfolg war den französischen Raumfahrtspezialisten jedoch in einem Gemeinschaftsunternehmen mit den USA (Dezember 1965) beschieden. Mit einer amerikanischen „Scout“-Rakete kam der Meßsatellit „FR-1“ (61 kg) in eine etwa 750 km hoch liegende Umlaufbahn. Der einwandfrei funktionierende Satellit lieferte Meßdaten für ionosphärische Untersuchungen, vor allem über die Ausbreitung von Funkwellen sehr niedriger Frequenz (16,8 und 24,0 kHz). Es zeigte sich das bemerkenswerte Ergebnis, daß sich diese Wellen annähernd längs der Kraftlinien des erdmagnetischen Feldes ausbreiten. Der Satellit gestattete noch Messungen des Erdmagnetfeldes sowie der Elektronendichte in seiner Umgebung. Am 17. Februar 1966 gelang den französischen Wissenschaftlern dann auch zum erstenmal ein selbstständiges Satelliten-Unternehmen. Eine „Diamant“-Rakete brachte den Satelliten „D-1“ bzw. „Diapason A“ (40 kg) in eine Umlaufbahn von 500 bis 2700 km Höhe. Auch dieser Satellit diente vornehmlich Ionosphärenuntersuchungen.

Satelliten als Spezialisten

Als erster Spezialsatellit für geodätische Zwecke, also zur exakten Bestimmung interkontinentaler Entfernungen, von Inselpositionen usw., der Erd-

gestalt und des Schwerfeldes unseres Planeten, wurde im Oktober 1962 der 158 kg schwere amerikanische Satellit ANNA-1 B gestartet. Seine wesentlichste Funktion bestand darin, in bestimmten Zeitabständen helle Lichtblitze auszusenden, die von Bodenstationen am klaren Nachthimmel als Positionsmarkierungen fotografisch festgehalten werden konnten. Zur technischen Ausrüstung dieses „Blinkfeuer“-Satelliten gehörten daher vier Blitzlicht-Xenonlampen, von denen jede einzelne beim Aufblitzen eine Helligkeit von rund 8 Millionen Candela erzeugt. Wie erwartet, ließen sich aus den Beobachtungen des ANNA-Satelliten die Entfernungen zwischen den Kontinenten auf der Erde mit einer Genauigkeit von 30 m und weniger bestimmen. Bisher galten durchschnittlich 150 m schon als ausgezeichnete Fehlergröße, in Einzelfällen mußten sogar 1000 m und mehr in Kauf genommen werden. Wenn man bedenkt, daß von den präziseren Werten interkontinentaler Entfernungen auch die Steuerungs- und Lenktechnik für Fernkampfmittel (strahlgetriebene Flug- und Wurfkörper) profitiert, dann konnte es nicht verwundern, wenn an diesem amerikanischen Satellitenexperiment vor allem militärische Stellen maßgeblich beteiligt waren. Darauf wies schließlich auch der Name des Satelliten hin; er setzt sich nämlich aus den Anfangsbuchstaben von Army, Navy, NASA und Air Force zusammen.

Für geodätische Vermessungen wurden später auch verschiedene Satelliten der Explorer-Reihe eingesetzt, von denen Explorer-29 (November 1965) als erster Vertreter der speziellen „Geos“-Gruppe ein ähnliches optisches Signalsystem mitführte wie der ANNA-Satellit. Die Satelliten vom Typ „Secor“ dienten zwar ebenfalls geodätischen Zwecken, gehörten jedoch zu einem Forschungsprogramm der US-Air Force und waren ausschließlich für funktionische Ortungsverfahren eingerichtet. Als erster geodätischer Spezialsatellit einer anderen Gruppe des NASA-Programms wurde im Juni 1966 Pageos-1 gestartet (Pageos = Passive Geodeti-



cal Satellite). Es handelt sich dabei um Ballonsatelliten nach Art und Größe der Echo-Satelliten, die sich ebenso wie diese als Funkwellenreflektoren für spezielle Verfahren der funktechnischen Bahnortung eignen.

„Kosmos“-Satelliten —

Weg zur Vielseitigkeit

Im Gegensatz zu der anfangs durch verschiedene Interessengruppen verursachten Entwicklungs- und Projektzersplitterung des amerikanischen Satelliten- und Raumfahrtprogrammes verliefen die wissenschaftlichen Arbeiten der sowjetischen Raumfahrtspezialisten in wesentlich kontinuierlicheren und rationelleren Bahnen. Ihre Grundkonzeption hat vor allem, wie schon einmal erwähnt, größtmöglichen informativen Nutzen jedes einzelnen der an sich kostspieligen Raumfahrtexperimente und damit eine Beschränkung auf minimal notwendige Startfrequenzen zum Ziel. Nach einer gründlichen Auswertung aller Erfahrungen mit Raumflugkörpern bis Ende 1961 wurde schließlich das Programm für einen neuen wichtigen und umfassenden Forschungsabschnitt ausgearbeitet. Das Ergebnis bildete die 1962 begonnene Serie der „K o s m o s“-Satelliten, die mit 170 Objekten bis zum August 1967 die bisher umfangreichste Satellitenserie überhaupt darstellte.

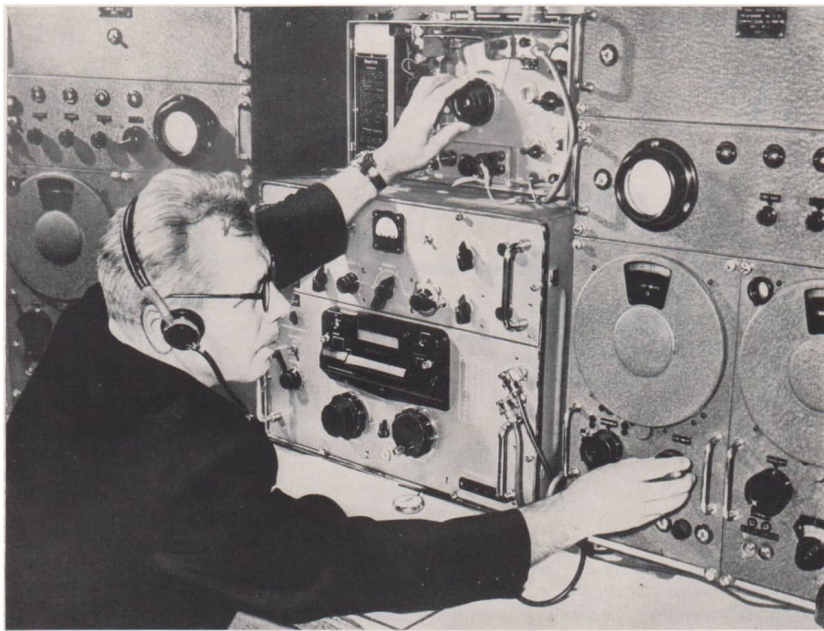
Anlaßlich des Starts von Kosmos-1 (16. März 1962) wurden die Hauptpunkte des Arbeitsprogrammes dieser Satellitenserie veröffentlicht. In kurzer Zusammenfassung handelt es sich dabei um folgende Untersuchungen bzw. Messungen:

- Elektronen- und Ionendichte in der Ionosphäre sowie ihre zeitlichen und räumlichen Veränderungen;
- chemische Zusammensetzung der Hochatmosphäre und ihre möglichen Veränderungen;
- solare Partikelstrahlung niederer Energien;

- solare Ultraviolett- und Röntgenstrahlung mit zusätzlichen Messungen im gleichen Strahlungsbereich, aber anderen kosmischen Strahlungsquellen;
- energetische Zusammensetzung von Strahlungsteilchen in bevorzugten Gebieten des erdnahen kosmischen Raumes (Strahlungsgürtel);
- Energiespektrum der primären Kosmischen Strahlung;
- Erdmagnetfeld, vor allem seine Variationen über verschiedene geographische Längen und Breiten;
- Häufigkeit (Verteilungsdichte) und Energien meteoritischer Teilchen;
- sonstige meteorologische Beobachtungen.

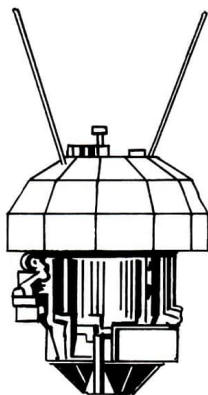
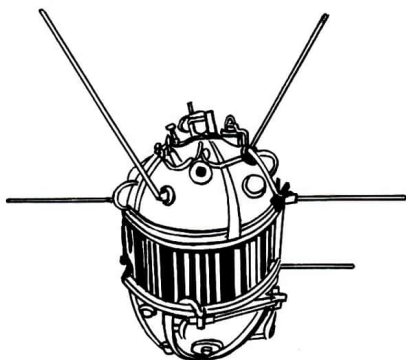
Zu diesem umfassenden Grundprogramm des Komplexen Höhen- und Weltraumforschung traten von Fall zu Fall noch spezielle Aufgaben, die in enger Beziehung zur Vorbereitung weiterer bemannter Raumflüge standen. Dazu gehörten offenbar Versuche zur Verbesserung des Strahlungsschutzes von Lebewesen bei längerem Aufenthalt im Kosmos und die gleichzeitige Erprobung neuer Verfahren der Raumflugtechnik.

Die Satelliten der Kosmos-Serie zeigen daher keinen einheitlichen konstruktiven Aufbau. Er wird jeweils den speziellen Aufgaben angepaßt. Die Nutzmassen reichen von einigen hundert Kilogramm für einfache Meßsatelliten bis zu einigen Tonnen für unbemannte Raumflugkörper von der Größenordnung bemannter Raumschiffe. Die Vielseitigkeit des Kosmos-Programms läßt sich darüber hinaus bis zu einem gewissen Grade auch aus den Differenzierungen in der räumlichen Lage (Bahnneigung, -höhe) der Umlaufbahnen erkennen. So haben offenbar zwei Satellitengruppen, bei denen Bahnneigungen von rund 65° bzw. 51° gegeben sind, unter anderem eine enge Beziehung zu raumflugtechnischen Erprobungen größerer und komplizierterer Raumflugkörper, wie beispielsweise unbemannte Prototypen späterer bemannter Raumschiffe usw. Die meisten Satelliten



dieser beiden Gruppen (Bahnhöhen im allgemeinen zwischen etwa 170 und 500 km) beendeten noch vor Ablauf ihrer natürlichen Lebensdauer (atmosphärische Bremsung) ihr Flugprogramm. Es läßt sich daraus schließen, daß sie nach Erfüllung ihrer Aufgaben über Funkfernsteuerung zur Erdoberfläche zurückgeführt wurden. Mit einigen Satelliten dieser Gruppen werden auch bioastronautische Untersuchungen angestellt, wie das Beispiel von Kosmos-110 (Februar 1966) zeigt; denn zwei Hunde nahmen als Versuchstiere an einem

22-tägigen Raumflug teil und kehrten danach wohlbehalten zur Erdoberfläche zurück. Der 65°-Gruppe gehört auch der erste sowjetische Satellit an (Kosmos-122, Juni 1966), der speziell für die Übertragung von Wolkenaufnahmen eingerichtet wurde. Die meisten der übrigen Satelliten des Kosmos-Programmes lassen sich zu Gruppen mit 49°- bzw. 56°-Bahnneigung zusammenfassen; sie haben verschiedene Meßprogramme zu erfüllen. Beispielsweise sollten die im April bzw. Mai 1962 gestarteten Kosmos-3 und Kosmos-4 speziell die



geoaktive Partikelstrahlung der Sonne erkunden. Die umfassende Auswertung des mit Kosmos-Satelliten gewonnenen immensen Informationsmaterials wird sicher in vielen Punkten noch beträchtliche Zeit in Anspruch nehmen.

Damit wollen wir nun die etwas knapp gefaßten Betrachtungen über die ersten praktischen Schritte zur Erweiterung der Methoden und Möglichkeiten in der Höhen- und Weltraumforschung abschließen. Es ist in dem hier gewählten Rahmen ohnehin nicht möglich, jedes einzelne Unternehmen darzustellen oder gar in allen technischen Einzelheiten zu schildern. Im weiteren sollen uns deshalb in erster Linie die Ergebnisse derartiger Experimente beschäftigen. Doch auch hierbei werden wir auf Vollständigkeit verzichten müssen. Die Raketen- und Raumfahrttechnik als Hilfsmittel der

modernen Weltraumforschung hat in einer so kurzen Zeit so großartige Fortschritte gemacht und teilweise geradezu sensationelle Entdeckungen ermöglicht, daß selbst die optimistischen Prophezeiungen vergangener Jahre weit übertroffen wurden. Dabei wollen wir nicht vergessen, daß diese Ergebnisse gegenwärtig nicht mehr als ein ermutigender Anfang sind. Einige der wichtigsten Ergebnisse sollen im folgenden herausgegriffen werden, um unser bisher entworfenes Bild, von den physikalischen Erscheinungen und Bedingungen im kosmischen Raum und ihren Wechselwirkungen mit dem Erdgeschehen, in den wesentlichsten Punkten zu ergänzen. Dabei werden wir auch Gelegenheit haben, die bedeutsamsten der bisher noch nicht erwähnten Satelliten- oder sonstige Raumflugunternehmen zu erläutern.

Erste Entdeckungen und Erfolge

Schon die ersten Ergebnisse von Höhenraketen- und Satellitenaufstiegen im Internationalen Geophysikalischen Jahr ließen erkennen, daß derartige Forschungsmittel trotz des teilweise beträchtlichen technischen Aufwandes von allergrößtem Wert sind. Aus diesem Grund stieg die Anzahl der wissenschaftlichen Raumflugkörper seither von Jahr zu Jahr ständig an. 1965 entsandte beispielsweise allein die Sowjetunion 64 Raumflugkörper für wissenschaftliche Zwecke in eine Freiflugbahn, darunter befanden sich 57 Erdsatelliten und 7 Mond- bzw. Planeten- und Raumsonden. Die USA brachten im gleichen Jahr 91 Objekte in eine Raumflugbahn, von denen allerdings nur 24 für wissenschaftliche Zwecke der US-amerikanischen Luft- und Raumfahrtbehörde (NASA) und die übrigen für militärische oder halb-militärische Belange gestartet wurden.

Die Fülle der Einzelergebnisse ist zur Zeit kaum noch überschaubar, und obwohl ständig mit höchster Intensität an der Auswertung der Meßdaten gearbeitet wird, liegen darum auf verschiedenen Teilgebieten noch längst keine endgültigen Befunde vor. Dennoch wurde bisher unser Wissen schon beachtlich erweitert. Es kam in verschiedenen Fällen sogar zu echten wissenschaftlichen Sensationen und Überraschungen. Am eindrucksvollsten sind dabei die Fortschritte, die in der Hochatmosphäre und im angrenzenden Übergangsgebiet zum erdnahen kosmischen Raum erzielt wurden.

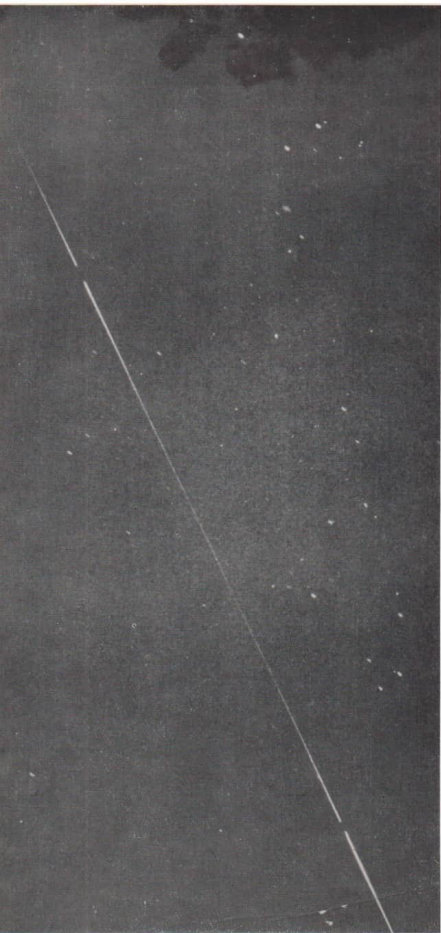
Erdatmosphäre in neuer Sicht

Den Reigen der überraschenden Entdeckungen eröffneten sogleich die sowjetischen Satelliten Sputnik-1 und Sputnik-2. Nach der Bahnmechanik von Satelliten werden diese bei elliptischen Bahnen innerhalb der Hochatmosphäre zwar im Bereich des Perigäums (Erdnähe) am stärksten aerodynamisch abgebremst, aber der resultierende Höhen-

verlust wird erst im Apogäum (Erdferne) am deutlichsten erkennbar. Eine ursprünglich elliptische Satellitenbahn wird somit allmählich immer kreisförmiger, wobei die mittlere Bahnhöhe laufend abnimmt. Aus den Bahnmessungen an Sputnik-1 und Sputnik-2 gelang es nun schon 1958 zu zeigen, daß die Luftdichte im Bereich der Umlaufbahnen wesentlich größer sein muß, als man bis dahin annehmen konnte. Die aus Ballon- und Höhenraketen aufstiegen abgeleiteten Dichtewerte erwiesen sich also für eine Modellatmosphäre in Höhen über 200 km als wenig geeignet. Obwohl eigentlich niemand daran gezweifelt hatte, daß den vorangegangenen Raketenmessungen ein gewisser Unsicherheitsfaktor anhaftete, waren die Wissenschaftler von dem Ausmaß der notwendigen Korrektur doch sehr überrascht.

Die Dichte der Atmosphäre war in 250 km Höhe rund um das Zehnfache, in 600 km Höhe um das Hundertfache und in 1000 km Höhe sogar um das fast Zehntausendfache größer, als man erwartet hatte. Damit rückte auch der Übergang zwischen Atmosphäre und interplanetarem Raum wesentlich weiter in den Raum hinaus. Während er zuvor bei etwa 1000 km angenommen wurde, schien er 1957/58 in rund 3000 km Entfernung von der Erdoberfläche zu liegen.

Diese aufsehenerregende Entdeckung führte sofort zu tiefgreifenden Schlußfolgerungen. Die größeren Luftdichten in den einzelnen Niveaus kann man leicht durch höhere Temperaturen der darunter liegenden Luftschichten erklären. Während man zuvor für 500 km Höhe gaskinetische Temperaturen um 1000 °K annahm, konnte man aus den genaueren Luftdichtewerten auf etwa 2500 °K schließen. Diese gaskinetischen Temperaturen sind ein objektives physikalisches Maß für die Bewegungsenergie von Gasteilchen. Auch bei sehr geringen Luftdichten läßt sich dadurch also noch eindeutig eine Temperatur des Gases definieren. Ein gewöhnliches Thermometer würde in dieser Umgebung – das Fehlen einer direkten



Sonneneinstrahlung vorausgesetzt – wegen der geringen Gasdichte praktisch keine Temperaturanzeige mehr liefern.

Die Ursache für den unerwartet kräftigen Aufheizungseffekt mußte in der Absorption solarer Strahlung gesucht werden. Sein relatives Ausmaß (der Absolutbetrag ist wegen der geringen Luftdichte nicht sehr groß) war allerdings nicht mit den bis dahin gültigen Vorstellungen in Einklang zu bringen. Die Ansicht einiger Forscher, daß daran nicht nur die kurzwellige solare Strahlung allein beteiligt sein könne, hat sich durch neuere Untersuchungen bestätigt, die sich vor allem mit dem Energietransport durch solare Partikelstrahlung befassen. Besonders aufschlußreich waren in diesem Zusammenhang schon erste Untersuchungen an Sputnik-3. Danach war die Luftdichte in 225 km Höhe am Äquator nur halb so groß wie am Pol. Für noch größere Höhen nahm das Dichtegefälle vom Pol zum Äquator noch weiter zu, was aber gleichbedeutend ist mit einem Temperaturgefälle in gleicher Richtung. Die besonders hohen Temperaturen an den Polen ließen sich durch die Wirkung des erdmagnetischen Feldes erklären, die zu einem bevorzugten Aufprall geladener Strahlungsteilchen in Polnähe führt.

Die weiteren Satellitenexperimente sollten dann vor allem Aufschlüsse über Änderungen der Dichte in der Hochatmosphäre erbringen. Erste Anhaltspunkte für zeitliche Dichteschwankungen lieferten schon Sputnik-2 und Sputnik-3. So ließen sich aus etwa 1100 Bahnmessungen an Sputnik-2 unregelmäßige Schwankungen in der Abnahme der Umlaufzeit feststellen. Sie wurden von verschiedenen Wissenschaftlern bestätigt und zwangsläufig als Folge von Dichteänderungen gedeutet. Der gleiche Effekt konnte auch bei Sputnik-3 und vielen späteren Satelliten mehr oder weniger ausgeprägt nachgewiesen werden. Aus zusammenfassenden Bearbeitungen der Meßergebnisse an mehreren Objekten ließ sich schließlich ein recht aufschlußreiches Bild über das Dichteverhalten

der Hochatmosphäre zeichnen. So verglich man unter anderem die Umlaufzeitschwankungen von Vanguard-1 mit Messungen der solaren 20-cm-Strahlung, die das Heinrich-Hertz-Institut in Berlin-Adlershof vorgenommen hatte. Es ließ sich dabei erstmalig ein eindeutiger Gleichlauf beider Meßgrößen nachweisen. Aus theoretischen Betrachtungen kam man zu dem Schluß, daß die in der Sonnenkorona entstehende 20-cm-Strahlung von einer Emission kurzwelliger Ultraviolett- und Röntgenstrahlung begleitet wird, die ihrerseits die eigentliche Ursache für den Aufheizungseffekt in der Hochatmosphäre darstellt.

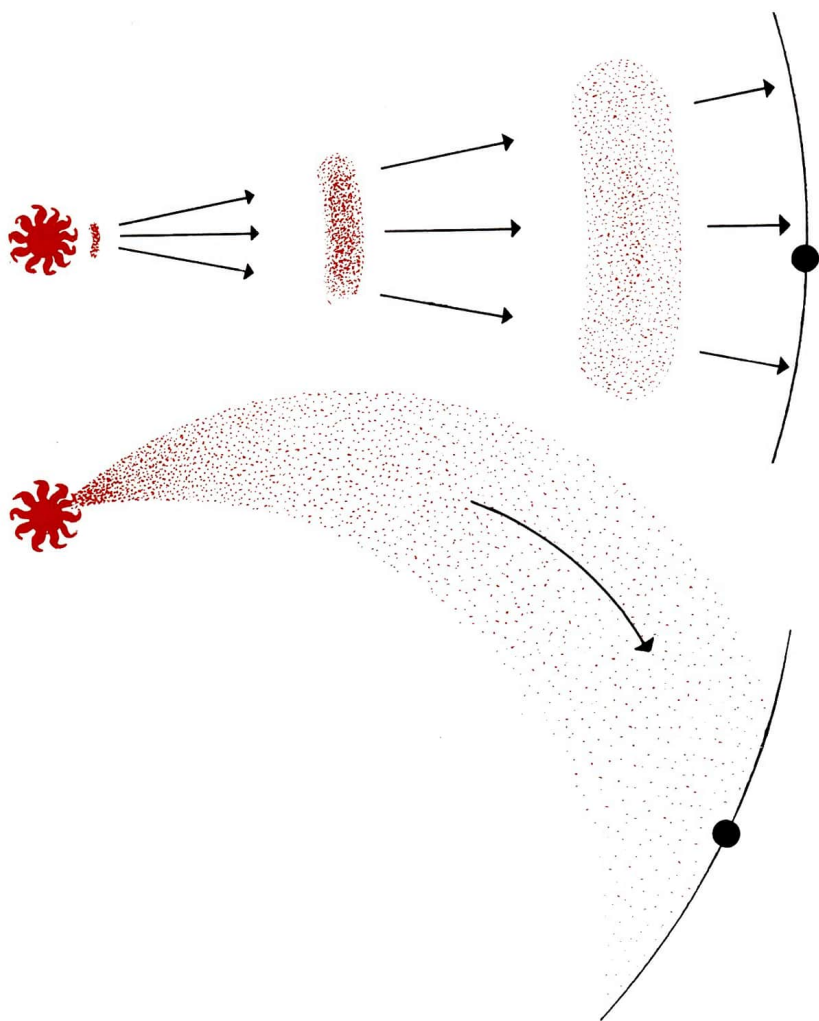
Die Analyse ließ weiterhin einen deutlichen Zusammenhang zwischen geomagnetischen Stürmen und Dichteschwankungen der Hochatmosphäre erkennen. Zum erstenmal wurde dieser Effekt schon an der Trägerrakete von Sputnik-3 am 8./9. Juli 1958 nachgewiesen. Wie wir wissen, ist die Ursache für die geomagnetischen Stürme in den Teilchenwolken zu suchen, die bei solaren Eruptionen herausgeschleudert werden. Die Sonnenobservatorien hatten tatsächlich am 7. Juli 1958 eine sehr starke Sonneneruption registriert. Nach einer Laufzeit von 2,2 Tagen erreichte die Teilchenwolke die Erde und löste hier die erwähnten Effekte aus. Die Luftdichte nahm dabei in der Bahnhöhe des Satelliten um etwa 30 bis 40 Prozent zu. Spätere Beobachtungen bestätigten diesen Zusammenhang. Damit ergab sich zugleich ein weiteres Argument für die Ansicht, daß an der Aufheizung der Hochatmosphäre auch die solare Partikelstrahlung einen merklichen Anteil hat.

In einer sehr ausführlichen Untersuchung grenzte schließlich der westdeutsche Physiker H. K. Paetzold im Jahre 1961 zwei Gruppen von Effekten mit außerirdischen Ursachen für hochatmosphärische Dichteschwankungen ab. Die erste Gruppe umfaßt zwei Teileffekte der solaren Wellenstrahlung, und zwar einmal den Einfluß der allgemeinen solaren Aktivität und zum anderen den Tag-Nacht-Effekt. In die zweite Gruppe ordnete

Paetzold zwei Korpuskulareffekte ein, wobei er außer dem Einfluß der mit geomagnetischen Störungen verbundenen Strahlung noch einen Einfluß des interplanetaren Plasmas vermutete. Auf den Zusammenhang zwischen Sonnenaktivität, solarer Wellenstrahlung und Dichteänderungen haben wir schon in Verbindung mit der solaren 20-cm-Radiostrahlung hingewiesen. In diesem Ablauf prägt sich daher auch besonders deutlich der Rhythmus der Sonnenrotation aus. Die ständige Sonneneinstrahlung bewirkt eine einseitige Aufheizung (Tag-Nacht-Effekt) und sorgt dadurch für eine dauernde „Aufblähung“ der Hochatmosphäre zur Sonne hin.

Über den ersten Korpuskulareffekt wurde schon an anderer Stelle gesprochen. Paetzold kam aber zu der bemerkenswerten Feststellung, daß die oben erwähnte Aufblähung der Atmosphäre durch solare Teilchenstrahlung nur wenig von der geomagnetischen Breite abhängig ist. Zur Annahme eines interplanetaren Plasma-Effektes gelangte Paetzold deshalb, weil die periodischen Dichteänderungen der Hochatmosphäre in jährlichem und halbjährlichem Rhythmus ablaufen. Er vermutete, daß die im interplanetaren Raum vorhandenen Ladungsträger (Plasmawolke) nicht symmetrisch um die Sonne verteilt sind. Dies könnte seine Ursache in der Bewegung des Sonnensystems im interstellaren Raum haben. Bei der Bewegung der Erde um die Sonne würde dadurch das interplanetare Plasma ständig gegen die Hochatmosphäre anströmen, und die Unsymmetrie der Plasmawolke könnte den Jahres- und Halbjahresrhythmus der Dichteschwankungen hinreichend erklären. Wir sehen an diesem Beispiel sehr deutlich, wie weitläufig die Beziehungen zwischen kosmischen Erscheinungen und Erdgeschehen sind.

Mit diesen Erkenntnissen über die Dichte in der Hochatmosphäre begannen sich auch völlig neue Konsequenzen über die Dynamik der Gesamtatmosphäre abzuzeichnen. Wenn sich die hori-



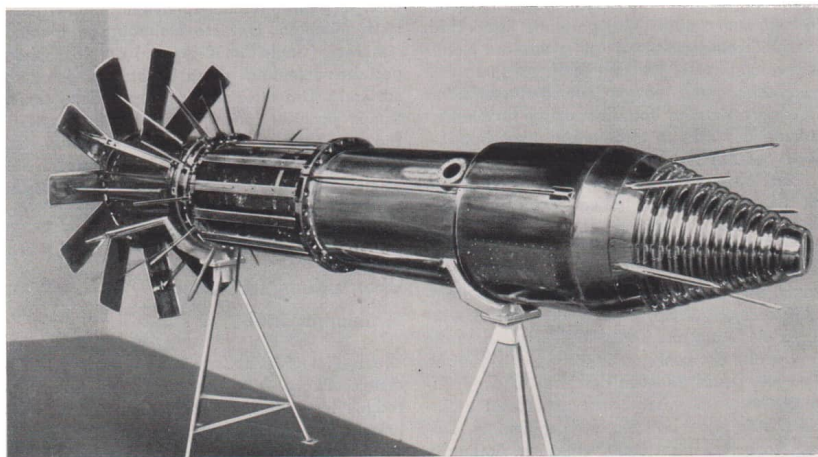
Meßgerätebehälter (Container)
einer sowjetischen Höhenrakete
für besonders präzise Dichtemessungen
in der Hochatmosphäre

zontalen Dichteunterschiede und zeitlichen Dichteschwankungen in der Hochatmosphäre auch nicht in ähnlicher Größe und unmittelbar auf die tieferen Atmosphäreschichten auswirken, so müssen sie doch zwangsläufig kräftige Strömungsbewegungen in großen Höhen hervorrufen. In der Ionosphäre oberhalb 200 km Höhe wären also aus dynamischen Gründen sehr starke Winde mit ost-westlicher Richtung, außerdem kräftige Turbulenzströmungen zu erwarten. Zur Untersuchung dieser Vermutung wurde schließlich eine spezielle Methode erdacht. Man schickte Raketen in eine Höhe zwischen 100 und 700 km, wo sie Wolken von Natrium- und Lithiumdampf ausstießen. Unter der Einwirkung des Sonnenlichtes leuchteten diese Wolken auf und konnten so von der Erdoberfläche aus fotografisch verfolgt werden. Aus den Strukturänderungen der Leuchtwolken ergab sich ein anschauliches Bild über die hochatmosphärischen

Strömungen. Bei einem Aufstieg im Mai 1961 wurden in Höhen bis 110 km vertikale Geschwindigkeiten (Turbulenz) zwischen 3 und 7 m/s gemessen. Die Beobachtung einer Natriumdampfwolke in 370 km Höhe lieferte im Dezember 1961 horizontale Windgeschwindigkeiten von etwa 80 m/s.

Erdfigur und Ionosphäre

Weitere bemerkenswerte Resultate ergaben sich, als man aus den Bahnanalysen die Figur des Erdkörpers ermittelte. Wie schon erwähnt, bleibt eine Satellitenbahn nur in erster Näherung raumstabil. In der Praxis sorgt die Erdatplattung für eine langsame Lageänderung der Satellitenbahnebene, was man als „Präzession“ bezeichnet. Umgekehrt kann dann auch von der beobachteten Präzession



einer Satellitenbahn auf die Abplattung des Erdkörpers geschlossen werden. Nun zeigte sich schon bei Sputnik-2 und Explorer-1, daß die tatsächliche Präzession etwas unter dem theoretischen Wert lag. Zur Erklärung dieses Effektes würde es erforderlich, den bis dahin gültigen Wert für die Erdabplattung von $1/297,1$ auf $1/298,1$ zu verkleinern. Das macht für den Unterschied von Pol- zu Äquatorhalbmesser immerhin rund 70 m aus! Weiterhin haben Änderungen der Bahnexzentrizität verschiedener Satelliten erkennen lassen, daß der Erdkörper nicht genau symmetrisch zum Äquator gestaltet ist. Es deutete sich eine leichte Birnenform an, mit dem „Stielende“ am Nordpol der Erdachse. Die Bahnuntersuchungen an dem amerikanischen Miniatur-Satelliten Vanguard-1 führten zu einer schon angedeuteten weiteren Überraschung. Wegen der relativ großen Entfernung seiner Umlaufbahn von der Erde und seiner geringen Masse machte Vanguard-1 den Einfluß des Strahlungsdruckes der Sonne deutlich erkennbar. Dies war eine Erscheinung, mit deren Wirkung man zunächst nicht gerechnet hatte. Noch wesentlich ausgeprägter zeigte sich diese Naturerscheinung später bei den Ballonsatelliten vom Typ „Echo“, deren Massen-Querschnittsverhältnis besonders günstige Voraussetzungen für die Einwirkung des solaren Strahlungsdruckes bot.

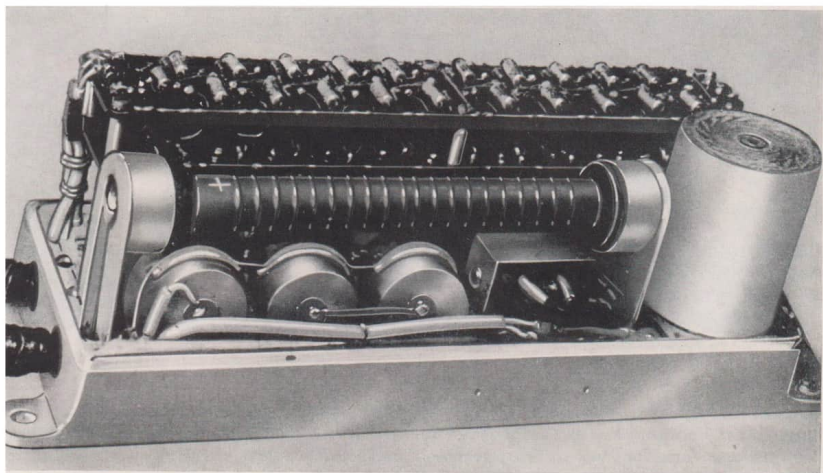
Auch das Wissen um die Elektronendichte in großen Höhen förderten Ionosphärensondierungen mit künstlichen Erdsatelliten entscheidend. Die geschickte Wahl der Sendefrequenzen bei den sowjetischen Meßsatelliten erfüllte alle in sie gesetzten Erwartungen. Während die 20-MHz-Frequenz als außerordentlich empfindliche Ionosphärensonde wirkte, konnte die 40-MHz-Frequenz als Bezug und Kontrolle dienen. Schon die Auswertung der Funksignale von Sputnik-1 ergab ein völlig neues Bild von der Struktur der Ionosphäre, das im wesentlichen bei späteren Satellitenaufstiegen bestätigt werden konnte. Danach kann man nicht mehr von einem Aufbau in

irgendwie streng getrennten Schichten sprechen. Die Ionosphäre bietet vielmehr das Bild einer einzigen geschlossenen Schicht elektrischer Ladungsträger, in der die D-, E- und F-Schicht als Bereiche relativ verstärkter Elektronendichten „eingebettet“ liegen. Das absolute Maximum der Elektronendichte liegt in etwa 300 bis 350 km Höhe. Es entspricht damit ungefähr der Position der F-Schicht. Weiterhin zeigte sich, daß der Anstieg der Elektronendichte unterhalb dieses Maximums wesentlich steiler ist als der Abfall im darüberliegenden Bereich. Dort wurde noch in Höhen von 700 bis 800 km eine solche Elektronendichte gemessen, die etwa den Werten in der D-Schicht entspricht. Weil die absolute Elektronendichte mit der Höhe langsamer abnimmt als die Dichte der Luftatome und -moleküle, steigt die relative Ionisation mit zunehmender Höhe an. Nach ersten Untersuchungen soll sie in 6000 km Entfernung von der Erdoberfläche schließlich sogar 50 Prozent ausmachen. Damit könnte sich ein allmählicher Übergang zum interplanetaren ionisierten Wasserstoff andeuten. Gewisse kleinräumige Inhomogenitäten (Ungleichmäßigkeiten) der Ionosphäre gestalten allerdings diese Untersuchungen recht schwierig. Die direkten Messungen der Konzentration positiver Ionen in der Hochatmosphäre, wie sie erstmalig erfolgreich Sputnik-3 und auch sowjetische geophysikalische Raketen (zum Beispiel am 21. Februar 1958) anstellten, bestätigten durchaus befriedigend die aus Funksignalbeobachtungen abgeleiteten Elektronendichten.

Überraschung im Kosmos:

Strahlungsgürtel

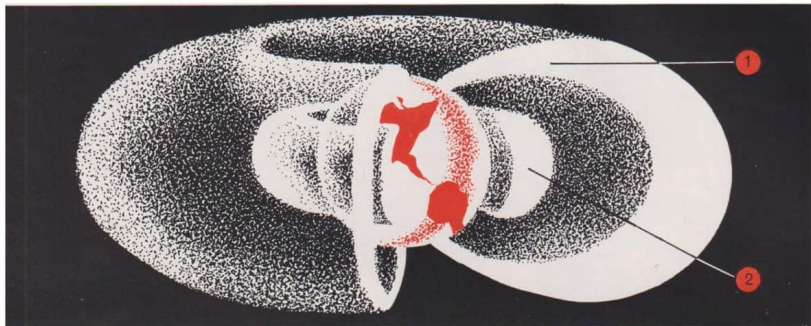
Die zweifellos sensationellste Entdeckung in der ersten Phase der angewandten Raumflugtechnik lag jedoch auf dem Gebiet der Strahlungsforschung. Das große Interesse der Wissenschaftler an Untersuchungen der kosmischen Par-



tikelstrahlungen hatte bereits von Sputnik-2 an zu entsprechenden meßtechnischen Satellitenausrüstungen angeregt. Ganz gegen alle Erwartungen zeigten die Messungen der ersten künstlichen Satelliten ein Verhalten der Strahlung in großen Höhen, das zunächst außerordentlich schwer deutbar schien. So registrierten erstmalig die Instrumente von Sputnik-2, dessen Bahn in einer Neigung von rund 65° gegen den Erdäquator verlief, über den höheren geographischen Breiten jeweils ein starkes Ansteigen der Teilchenanzahl. Dieser Befund führte in den Bereich der Theorie Birkelands und Störmers, die für die Bewegung geladener Partikel in Erdnähe im wesentlichen den Einfluß des erdmagnetischen Feldes verantwortlich machten. Noch überraschender waren aber die Angaben, die Explorer-1 lieferte. Seine Bahnneigung betrug nur rund 33° . Er konnte daher

gar nicht in so hohe geographische Breiten vordringen wie Sputnik-2. Dennoch meldete auch er jeweils bei Annäherung an das Apogäum oberhalb von etwa 1500 km einen enormen Anstieg der Teilchenanzahl. Die registrierte Strahlungsintensität überstieg sogar die Zählkapazität der Meßeinrichtung, so daß diese an einer ordnungsgemäßen Arbeit gehindert wurde. Die amerikanischen Wissenschaftler glaubten anfangs an eine technische Störung.

Die Klärung dieser überraschenden Entdeckungen brachten dann die Satelliten Sputnik-3, Explorer-3 und Explorer-4. Es zeigte sich, daß die Erde symmetrisch zur Äquatorebene von einem torusförmigen Gebiet umgeben ist, in dem das Erdmagnetfeld kosmische Strahlungsteilchen wie in einem Käfig gefangenhält. Aus einer Analyse des amerikanischen Geophysikers J. Van Allen schien



zunächst die Existenz von zwei derartigen „Strahlungsgürteln“ hervorzugehen. Die anfänglich noch recht unklaren Vorstellungen von der Natur dieser Phänomene konnten dann vorerst durch Sputnik-3 weiter präzisiert werden. So erwies sich, daß die erstmalig von Sputnik-2 registrierten Strahlungsteilchen zu dem vom Erdmagnetfeld weit in die polaren Regionen hinein gekrümmten äußeren Gürtel gehörten. Außerdem ergaben die Messungen, daß es sich hauptsächlich um schnellfliegende Elektronen handelt, die beim Auftreffen auf die Außenhaut eines Raumflugkörpers eine harte Röntgenstrahlung erzeugen. Die ersten graphischen Darstellungen zeigten dieses Strahlungsgebiet mit einem Intensitätsmaximum zwischen etwa 13 000 und 20 000 km Entfernung von der Erdoberfläche. Für den inneren Strahlungsgürtel fand man bei den ersten Auswertungen die untere Grenze des Gebietes maximaler Strahlungsintensität in einer Höhe von etwa 500 bis 1000 km; für seine Obergrenze wurden rund 5000 km Höhe angenommen. Sehr wesentlich war die Erkenntnis, daß sich das Intensitätsmaximum des inneren Gürtels nur etwa zwischen 35° nörd-

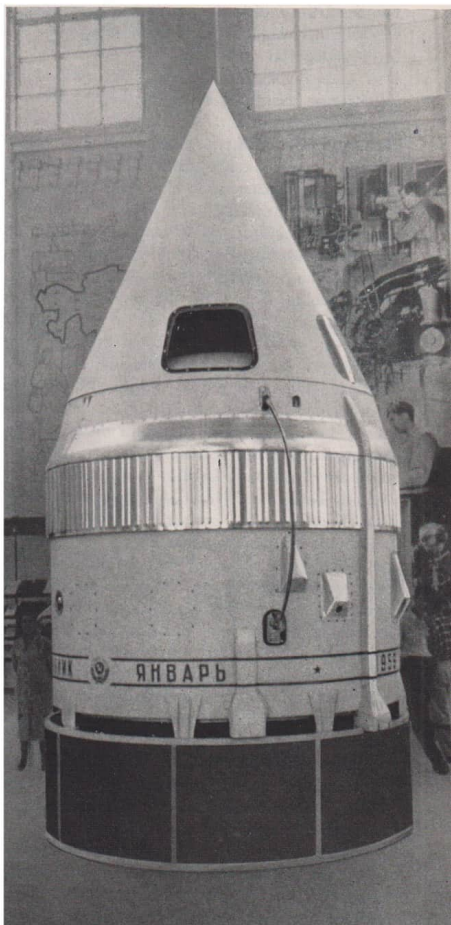
licher und 35° südlicher geomagnetischer Breite erstreckt, die höheren geomagnetischen Breiten somit strahlungsfrei bleiben. Für den bemannten Weltraumflug war diese Feststellung deshalb von erheblicher Wichtigkeit, weil der innere Strahlungsgürtel aus sehr energiereichen Protonen besteht, die auf lebende Organismen schon bei kurzer Verweilzeit tödliche Folgen haben. Die im äußeren Strahlungsgürtel zu erwartenden Strahlungswirkungen sind dagegen nur gering. Sie können gegebenenfalls durch der Masse nach vertretbare Strahlungsschutzmittel (Abschirmung) weiter vermindert werden.

Die Entdeckung der Strahlungsgürtel fand ein außerordentliches, lebhaftes Echo in Fachkreisen. Ihre Bedeutung wurde unmittelbar nach den ersten Verlautbarungen darüber von allen Geophysikern sowie Weltraum- und Raumfahrtforschern erkannt. Hier begann sich das Bild einer völlig neuen Qualität im Zusammenwirken kosmischer und geophysikalischer Erscheinungen abzuzeichnen. Weil naturgemäß anfangs nur wenige Angaben vorlagen, konnte man zwar zunächst nur die groben Züge dieses Bildes skizzieren, aber

Endstufe
der sowjetischen Lunik-Trägerrakete

daraus eine verwirrende Vielfalt neuer überraschender Erkenntnisse ahnen. Der weitere Weg der Forschungen war damit vorgezeichnet. Es galt, unter veränderten Bedingungen und auf breiter Basis mit verbesserten Meßgeräteträgern die Feinstruktur der Strahlungsgürtel unserer Erde und die Zusammenhänge mit dem Erdmagnetfeld zu untersuchen und darüber hinaus nach der Existenz ähnlicher Erscheinungen bei anderen Himmelskörpern (Mond, Nachbarplaneten) zu forschen.

Die ersten weitergehenden Informationen über die äußere Struktur der Strahlungsgürtel wurden gewonnen, als amerikanische Raumfahrtwissenschaftler mit den automatischen Raumsonden der „Pioneer“-Serie in die Nähe des Mondes und in den interplanetaren Raum vorzustoßen versuchten. Nach einem totalen Fehlstart (August 1958) sollte am 11. Oktober 1958 die Raumsonde Pioneer-1 mit einer dreistufigen Trägerrakete auf eine interplanetare Flugbahn gebracht werden. Weil das Antriebssystem teilweise versagte, zeitigte dieses Experiment jedoch nicht den gewünschten Erfolg. Pioneer-1 erreichte in einer langgestreckten Ellipsenbahn lediglich eine Entfernung von etwa 114 000 km von der Erde. Er stürzte anschließend wieder in die Erdatmosphäre zurück und verglühte nach rund 43 stündigem Flug. Seine wissenschaftliche Nutzmasse war mit 19,7 kg zwar relativ gering, da aber zu seiner Meßausrüstung auch Teilchenzähler gehörten, konnte bei seinem „Auf- und „Abstieg“ ein recht aufschlußreiches Schnittbild der Strahlungsgürtel gewonnen werden. Die ebenfalls vom Raketenversuchsgelände auf Kap Canaveral (heute Kap Kennedy) gestartete Raumsonde Pioneer-2 kam nur bis in eine Höhe von 1580 km über der Erdoberfläche, da die dritte Stufe des Thor-Able-Trägersystems nicht zündete. Erst das Unternehmen mit Pioneer-3 war wieder erfolgreicher. Allerdings auch nur in einer Kategorie wie Pioneer-1; denn diesmal wurde durch zu geringe Brennschlußgeschwindigkeit der letzten Antriebsstufe nur eine Entfernung von 102 000 km



von der Erde erreicht. Immerhin kam auch hierbei wieder ein aufschlußreiches Schnittdiagramm der Strahlungsgürtel zustande.

Den ersten vollen Erfolg einer interplanetaren Raumsonde konnten die sowjetischen Raumfahrt-spezialisten verbuchen. Am 2. Januar 1959 startete vom Kosmodrom Baikonur eine mehrstufige Träger-rakete, die einen automatischen Raumflugkörper von 361,3 kg Nutzmasse in eine Bahn brachte, auf der er erst in unmittelbarer Nähe des Mondes vorbeifliegen und danach in eine Umlaufbahn um die Sonne einbiegen sollte. Mit diesem Raum-flugexperiment wurden zwei Ziele angestrebt: Einmal wollte man erstmalig einen künstlichen Planetoiden schaffen, zum anderen das Magnet-feld und die Strahlung im Raum zwischen Erde und Mond sowie in unmittelbarer Mondnähe messen. Dieses Doppelziel prägte sich offenbar auch in der Namensgebung für den Raumflug-körper aus. So wurde er einerseits als künstlicher Planetoid „Metscha“ („Traum“), andererseits aber auch als Mondsonde Lunik-1 (neuerdings auch Luna-1) bezeichnet. Unter der meistverwendeten Bezeichnung Lunik-1 soll er in unseren Betrachtungen weiter geführt werden.

Lunik-1 näherte sich nach rund 34 Stunden Flug-zeit programmgemäß dem Mond bis auf eine Ent-fernung von etwa 5000 bis 6000 km (Monddurch-messer rund 3480 km). Zur Kontrolle der Flug-bahn war von der am interplanetaren Flug teil-nehmenden letzten Stufe des Trägersystems am 3. Januar um 3 Uhr 56 Minuten 20 Sekunden eine Natriumdampf-wolke ausgestoßen worden, deren Auf-leuchten von den Bodenstationen optisch ver-messen werden konnte. Die Rakete befand sich zu diesem Zeitpunkt in einer Entfernung von rund 113 000 km von der Erde. Der kugelförmige Raum-sondenkörper enthielt außer umfangreichen funk-technischen Anlagen und Energieversorgungsein-richtungen eine Apparatur zur Untersuchung kos-mischer Teilchenstrahlungen, Instrumente zur Untersuchung des interplanetaren Gases, Impuls-

geber zur Registrierung aufrallender Mikro-meteoriten. Außerdem trug er an einem stab-förmigen Ausleger ein empfindliches Magneto-meter. Diese meßtechnische Ausrüstung lieferte umfangreiches Material über die Teilchenenergien innerhalb der Strahlungsgürtel, über solare Teilchenströme im Raum Erde-Mond und die damit verbundenen magnetischen Effekte sowie erste Hinweise auf das völlige Fehlen oder die nur sehr geringe Stärke eines Mondmagnetfeldes.

Mit ihrer am 3. März 1959 gestarteten Raum-sonde Pioneer-4 kamen schließlich auch die amerikanischen Wissenschaftler zu ihrem ersten künstlichen Planetoiden. Allerdings blieb ihr Gerät mit einer Nutzmasse von nur rund 6 kg beträcht-lich hinter seinem sowjetischen Vorgänger zurück. Die Meßausrüstung bestand lediglich aus zwei Geiger-Zählrohren, die Strahlungsintensitäten bis zu etwa 100 r erfassen konnten. Ein winziger mit Quecksilber-Monozellen betriebener Sender über-trug die Meßwerte auf einer Frequenz von 960 MHz. Auch das Flugprogramm von Pioneer-4 sah eine Annäherung an den Mond vor, die ihn bis auf etwa 25 000 km an den Erdtrabanten heran-bringen sollte. Aus einer eventuellen Anhäufung von Ladungsteilchen in Mondnähe hätte man auf ein Mondmagnetfeld schließen können. Dieser Punkt des wissenschaftlichen Programmes konnte jedoch nicht erfüllt werden, weil die Raumsonde in etwa 60 000 km Entfernung am Mond vorbei-zog. Die mäßige meßtechnische Ausrüstung von Pioneer-4 lieferte dabei nicht allzuviel neue Informationen über die Strahlungsgürtel der Erde.

Wesentlich mehr Bedeutung in der Erforschung der Strahlungsgürtel erlangte dagegen das amerikanische Raumflugexperiment mit dem im August 1959 gestarteten Explorer-6. Es gelang, programmgemäß den Satelliten in eine stark ellip-tische Umlaufbahn zu bringen, die ihn an jedem Tag zweimal durch die Strahlungsgürtel führte. Erreicht wurde dies durch eine geringste Bahn-

höhe (Perigäum) von 253 km und größte Entfernung von der Erdoberfläche (Apogäum) von 42 485 km. Mit 64,5 kg war Explorer-6 außerdem der bis zu diesem Zeitpunkt massereichste und damit leistungsfähigste wissenschaftliche Satellit der USA. Die Meßgerätezelle war annähernd kugelförmig und hatte einen Durchmesser von ungefähr 70 cm. Die Energieversorgung der Meßgeräte und funkttechnischen Anlagen besorgten Speicherbatterien und 8000 Silizium-Solarzellen, die sich auf vier ausklappbaren Flächen befanden. Diese Ausleger gaben dem Satelliten ein etwas ungewöhnliches Aussehen. Man gab ihm daher auch die Sonderbezeichnung „Paddle-wheel“- („Schaufelrad“-) Satellit. Seine wissenschaftliche Ausrüstung bestand aus Mikrofonen zur Registrierung von Mikrometeoriten, zwei Magnetometern zur Messung des erdmagnetischen Feldes, einem photoelektrischen Gerät zur Bestimmung der räumlichen Orientierung des Satelliten, mehreren Temperaturfühlern, einer Anlage zur Untersuchung der Ausbreitung von Radiowellen und einem Meßgerätesatz zur Untersuchung der Strahlungs- und Ionendichte. Der zuletzt genannte Meßkomplex umfaßte eine mit einem Geigerzählrohr gekoppelte Ionen-Zählkammer, einen besonders empfindlichen Tscherenkow-Zähler sowie ein aus sieben Zählrohren bestehendes Zählrohr-Teleskop, das mit einer schwachen Bleiabschirmung der Ausgerüstet war.

Die von Explorer-6 übermittelten Strahlungsmessungen zeigten, daß die früheren Vorstellungen von einer relativ einfachen Struktur der Strahlungsgürtel revidiert werden mußten. So erwies sich vor allem die Annahme von nur zwei Zonen maximaler Strahlungsintensität nicht mehr haltbar. Es ließen sich mehrere Bereiche mit Protonen und Elektronen verschiedener Energie unterscheiden, die sich teilweise sogar noch gegenseitig überlagern. Die Vorgänge innerhalb der einzelnen Zonen sind dabei so kompliziert und tiefgreifenden zeitlichen Veränderungen unterworfen, daß ihre restlose

Aufklärung auch heute noch nicht abgeschlossen ist und sicher noch einer langwierigen Reihe von Meßexperimenten bedarf. So registrierte Explorer-6 im August 1959 eine weitaus schwächere Strahlungsintensität als Pioneer-3 am 6. Dezember 1958 und Pioneer-4 am 3. März 1959. Ende August begannen sich dann die äußeren Strahlungszonen anscheinend mit Strahlungsteilchen (Elektronen) „aufzufüllen“. Die Messungen zeigten wieder Intensitäten, die denen von Pioneer-3 vergleichbar waren. Das Ansteigen des Strahlungspegels fiel eigenartigerweise mit einem ungewöhnlich starken und lang anhaltenden Ausbruch solarer Radiostrahlung zusammen. Der genaue Zusammenhang blieb auch hier ebenso wie bei der Feststellung einer größeren Häufigkeit energiearmer Strahlungsteilchen an Tagen mit starker Sonnenaktivität ungeklärt.

„Magnetosphäre“ — ein neuer Begriff

Wie nicht anders zu erwarten, begann sich mit den verfeinerten Untersuchungen immer deutlicher der außerordentlich starke Einfluß der Sonnenaktivität auf Vorgänge in den Strahlungsgürteln abzuzeichnen. So konnten beispielsweise in den äußeren Bereichen regelrechte „Löcher“ im Strahlungsfeld registriert werden, die von Zeit zu Zeit entstehen und wieder verschwinden. Noch merkwürdiger waren allerdings Feststellungen, die auf einen engen Zusammenhang zwischen Veränderungen in den Strahlungsgürteln und Polarlichtern hindeuten. Danach werden offenbar beim Eintreffen einer von der Sonne ausgestoßenen Teilchenwolke die Elektronen der äußeren Zone zum „Abregnen“ gebracht. Sie fließen entlang den magnetischen Kraftlinien in Richtung auf die Pole der Erde und erzeugen dort in der Hochatmosphäre die Polarlichter. Anschließend füllt sich der Elektronengürtel wieder auf, und zwar weit über seinen normalen Umfang hinaus.



Über den Entstehungsmechanismus der Strahlungsgürtel hat man auch gegenwärtig noch immer keine vollkommen abgerundeten Vorstellungen. Einfache Wechselwirkungen zwischen solaren oder anderen kosmischen Strahlungspartikeln und erdmagnetischem Feld scheinen – das ist so gut wie sicher – ihre Existenz nicht erklären zu können. Man nimmt vielmehr an, daß die Protonen und Elektronen auf dem Umweg über atomare Umwandlungsprozesse aus der primären Kosmischen und solaren Strahlung entstehen. Direkte Einfangmöglichkeiten bestehen vielleicht nur bei den sehr energiearmen Elektronen der äußersten Strahlungszone. Die Bedeutung des Erdmagnetfeldes als Grundlage des magnetischen „Käfigs“, in dem die umgewandelten oder eingefangenen Teilchen festgehalten und konzentriert werden, wird jedoch nicht angezweifelt. Zur Erklärung aller Erscheinungen reicht es aber nicht aus, nur die Wirkung des permanenten, von der Erde selbst ausgehenden Magnetfeldes zu berücksichtigen. Zusätzlich muß offenbar noch ein „äußeres“ Magnetfeld wirksam sein, das bei der Bewegung elektrischer Ladungsträger im permanenten Erdmagnetfeld entsteht. Die mannigfaltige gegenseitige Beeinflussung aller Erscheinungen macht die Klärung der Probleme so unerhört schwierig. Der Bewegungsmechanismus der Strahlungsteilchen in den einzelnen Zonen dürfte allerdings weitgehend geklärt sein. Die einzelnen Partikel pendeln nämlich entlang den magnetischen Kraftlinien zwischen gewissen maximalen geomagnetischen Breiten nördlich und südlich des geomagnetischen Äquators hin und her. Sie laufen dabei in Windungen um die Kraftlinien, wobei die „Steighöhe“ der Windungen mit zunehmender geomagnetischer Breite immer geringer wird, bis an einem bestimmten kritischen Punkt eine „Spiegelung“ und damit Bewegungsumkehr stattfindet. Die Untersuchungen an den Strahlungsgürteln der Erde zogen sich seit 1957 wie ein roter Faden

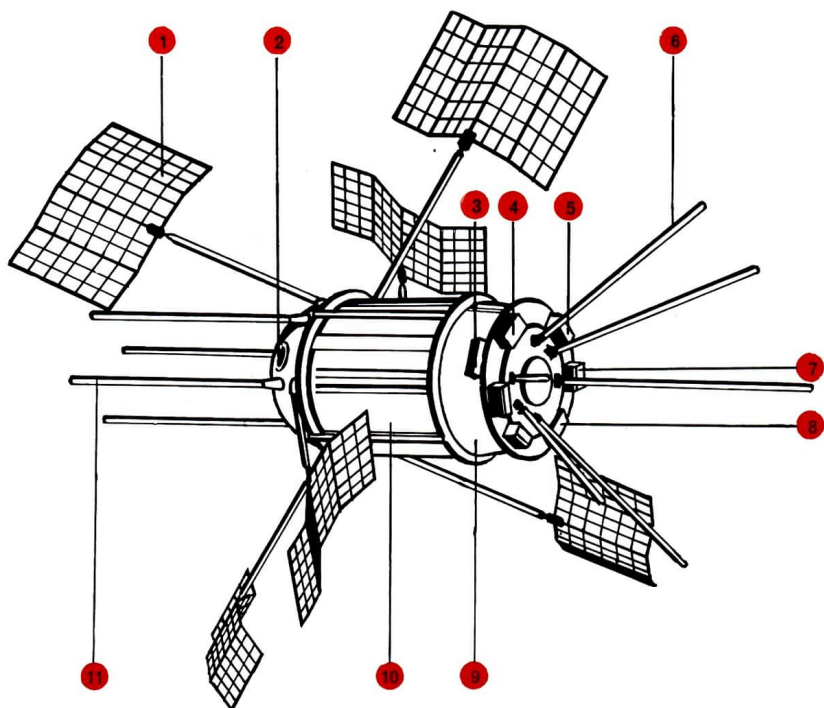
durch zahlreiche Raumflugexperimente. Die Ergebnisse bestätigten zunächst im allgemeinen den dargelegten groben Umriß der sehr komplizierten Strahlungsvorgänge im erdnahen kosmischen Raum. Dazu lieferten sowohl die sowjetischen Mondsonden Lunik-2 und Lunik-3 als auch verschiedene Satelliten der Explorer-Serie weitere wichtige Beiträge. Die Messungen des im August 1961 gestarteten Explorer-12, der mit besonders empfindlichen Instrumenten ausgerüstet war, deuten es offenbar als sinnvoller an, überhaupt nicht mehr von getrennten Strahlungsgürteln zu sprechen, sondern praktisch ein einziges, geschlossenes, allerdings sehr vielfältig aufgebautes und pulsierendes Strahlungsgebiet anzunehmen. In ihm stellen die früheren Van-Allen-Gürtel nur die mehr oder weniger stabilen, energiereichsten Regionen dar. Für das gesamte Strahlungsgebiet, in dem also die Erscheinungen und Vorgänge zum überwiegenden Teil vom Erdmagnetfeld beeinflußt werden, hat sich inzwischen der Begriff „Magnetosphäre“ eingebürgert.

Sehr detaillierte Untersuchungen der Magnetosphäre und des Strahlungsgürtels ermöglichten dann vor allem außer den IMP-Satelliten der Explorer-Serie die sowjetischen Meßsatelliten vom Typ „Elektron“. Es handelt sich dabei jeweils um zwei Satelliten, die zwar mit einer einzigen Trägerrakete gestartet, aber durch eine besondere Manövertchnik auf sehr unterschiedliche Umlaufbahnen gebracht wurden. Mit diesem erstmalig in der Raumfahrt demonstrierten Verfahren kam der eine Satellit des Paares in eine Umlaufbahn, die hauptsächlich im Bereich der inneren Zone maximaler Strahlungsintensität verlief, während der andere bis über die Grenzbereiche der äußeren Strahlungszone vorstoßen konnte. Beim ersten Versuch (Januar 1964) erreichte Elektron-1 eine Bahn zwischen etwa 400 und rund 7100 km Höhe, sein Partner Elektron-2 eine Bahn, die zwischen 460 und 68000 km Höhe lag. Das im Juli 1964 gestartete zweite Satellitenpaar hatte

fast gleiche Bahnwerte, was nicht zuletzt die außerordentliche Präzision in der Beherrschung dieser Technik nachweisen. Die Bedeutung dieses bemerkenswerten Verfahrens lag vor allem darin, daß erstmalig synchrone Untersuchungen in den verschiedenen Bereichen maximaler Strahlungsintensität angestellt werden konnten.

Die meßtechnische Ausrüstung der Elektron-Satelliten war außerordentlich vielseitig. Zur

Untersuchung der kosmischen Strahlung dienten verschiedene Apparaturen, einmal zur Registrierung von Elektronen im Energiebereich von 40 keV bis 10 MeV, zum anderen zur Untersuchung von Protonen im Energiebereich von 2 MeV bis 200 MeV sowie schließlich zur Messung von hochenergetischen Photonen im Energiebereich größer als 50 keV. Diese Anlagen bestanden im wesentlichen aus Tscherenkow-Zählern, Zählrohrteleskopen und



Links Elektron-1:

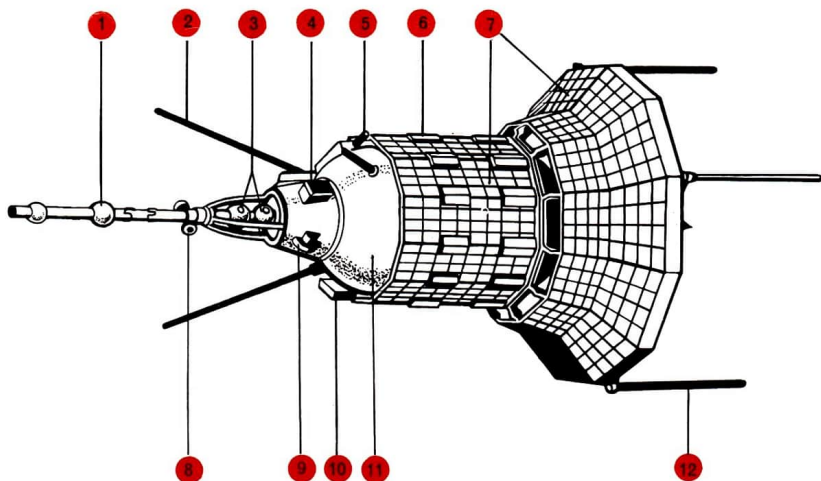
- 1 Ausleger mit Solarzellen;
- 2 Massenspektrometer;
- 3 Meßgerät für Teilchenstrahlung;
- 4 Mikrometeoriten-Detektor;
- 5 Satellitenzelle;
- 6 Temperaturregelblende;
- 7 Antennen;

Rechts Elektron-2:

- 1 Magnetometer;
- 2 Antennen;
- 3 Meßgerät für Teilchen niedriger Energien;
- 4 Meßgerät für Elektronenenergien;
- 5 Meßgerät für solare Röntgenstrahlung;
- 6 Temperaturregelblende;
- 7 Solarzellen;
- 8 Sonnensensoren;
- 9 Ionenfalle;
- 10 Meßgerät für solare Röntgenstrahlung;
- 11 Satellitenzelle;
- 12 Antennen

Sekundärelektronen-Vervielfacher. Alle vier Satelliten verfügten ferner über ein Massenspektrometer zur Untersuchung der chemischen Zusammensetzung des Ionenanteils in der Ionosphäre, wobei Teilchen mit Atomgewichten zwischen 1 und 34 erfaßt werden konnten. Die beiden tieffliegenden Satelliten waren außerdem mit Meßgeräten ausgerüstet, die Teilchen mit sehr geringer Energie (bis herab zu 100 eV) zu registrieren ge-

statteten. Des weiteren besaßen Elektron-1 und Elektron-3 piezoelektrische Registriereinrichtungen zur Untersuchung von Mikrometeoriten. Elektron-2 und Elektron-4 waren mit speziellen kugelförmigen Analysatoren ausgerüstet, mit denen vor allem die sehr niederenergetischen Elektronen in den äußeren Regionen des Strahlungsgürtels in verschiedenen Energiebereichen zwischen 100 eV und 10 keV registriert werden konnten. Beide Sa-



telliten hatten ferner je zwei verschieden empfindliche Magnetometer, von denen das eine noch Feldstärken von 2 bis 3 Gamma erfassen konnte, während das andere für Registrierungen im erdnäheren Teil der Umlaufbahn diente und einen Meßbereich bis maximal 1200 Gamma aufwies. Außerdem verfügten diese Satelliten über Anlagen, um die solare Röntgenstrahlung zu erkunden, sowie Spektrometer, um die chemische Zusammensetzung der kosmischen Strahlung, speziell der primären Strahlung interstellarer Herkunft, zu bestimmen. Zwei in den Bereichen von 725 kHz und 1525 kHz arbeitende Empfangsanlagen dienten Untersuchungen der galaktischen Radiostrahlung; die Meßwerte konnten entweder direkt übertragen oder vorübergehend auf Band gespeichert werden.

Das zweifellos bedeutsamste Ergebnis, das in den letzten Jahren bei der Erforschung der Magnetosphäre erzielt werden konnte, war ein völlig neues Bild von der räumlichen Grobstruktur des irdischen „Strahlungskäfigs“. Die anfängliche Vorstellung von einem weitgehend symmetrischen torusförmigen Gebilde mußte danach für die äußeren Bereiche des Strahlungsgebietes fallengelassen werden. Es zeigte sich, daß die Magnetosphäre in den Außenbezirken auf der der Sonne zugewandten Seite ziemlich stark eingebuchtet ist, während sie auf der gegenüberliegenden Seite in Form einer schweifartigen Verlängerung weit in den kosmischen Raum hinausreicht. Als Ursache für diese Deformation der Magnetosphäre wurde der schon früher erwähnte „Sonnenwind“ erkannt. Das ständige Anströmen dieser solaren Partikel bewirkt auf der der Sonne zugewandten Seite der Magnetosphäre eine kegelförmige Stoßfront, hinter der sich zunächst ein Gebiet turbulenter Partikelbewegungen ausbildet und das anschließend in die deformierten äußeren Partien des Strahlungsgürtels übergeht. Die Konsequenzen aus diesen neuen Erkenntnissen sind vorläufig noch nicht ab-

zusehen, sie werden jedoch von tiefgehender Bedeutung für das Verständnis der Zusammenhänge zwischen kosmischen Umwelteinflüssen und Erdgeschehen sein. Daher werden die Untersuchungen auf diesem Gebiet noch für längere Zeit auf dem Programm der Raumflug - Weltraumforschung stehen.

Spezialisten für Geo- und Sonnenphysik

Eine interessante Ergänzung zu den Vorstellungen von den Vorgängen in der Magnetosphäre deuteten Magnetometermessungen des schon erwähnten Explorer-6 an. Bei jedem Vorstoß des Satelliten in seine Apogäumshöhe ließen sich großräumige Störungen erkennen. Die Bearbeiter der Messungen schlossen auf die Existenz eines ringförmigen Stromsystems im Außenbereich des Strahlungsgürtels. Zum Unterschied von den Strahlungszonen bewegen sich die Ladungsträger in einem derartigen Stromsystem nicht in meridionaler Richtung, sondern etwa parallel zum magnetischen Äquator. Aus den näheren Untersuchungen erkannte man Form und Intensität des angenommenen Stromsystems. Es ergab sich ein Abstand von etwa 10 Erdradien (Erdradius ~ 6378 km) zwischen Ringsymmetrieachse und dem Erdmittelpunkt, eine Breite des Stromringes von rund 6 Erdradien und eine Stromstärke von ungefähr 5 000 000 A. Eine Bestätigung dieses Sachverhalts lieferten zunächst die Magnetfeldmessungen der Raumsonde Pioneer-5, die im März 1960 gestartet wurde und eine selbständige Umlaufbahn um die Sonne erreichte, sowie verschiedene spätere Meßsatelliten und Raumsonden. Wir wiesen schon darauf hin, daß Störmer 1911 ein derartiges Stromsystem vorausgesagt hatte. Für die Theorie der Magnetosphäre ist die Existenz eines Ringstromes insofern bedeutungsvoll, als er die Erklärung für zusätzliche magnetische Effekte („äußeres“ Magnetfeld) zu liefern vermag.

Strukturschema der Magnetosphäre

nach neueren Vorstellungen.

obere Hälfte:

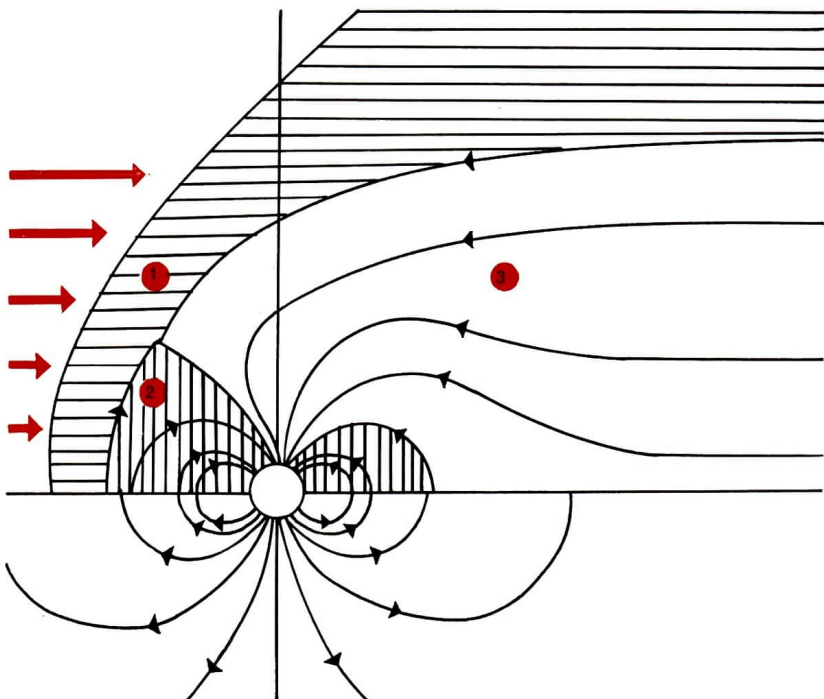
1 Turbulenzgebiet mit Stoßfront zum anströmenden Sonnenwind;

2 gestauchter Bereich der Magnetosphäre;

3 Schweifbildung.

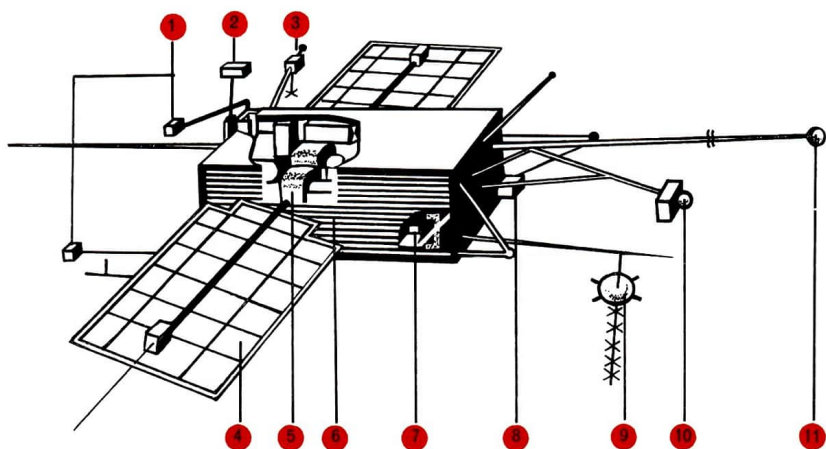
untere Hälfte:

ungestörter symmetrischer Verlauf
des Erdmagnetfeldes



Von der Breite und Intensität, in der man sich gegenwärtig mit der Aufklärung der Zusammenhänge zwischen dem Geschehen auf der Sonne und den geophysikalischen Bedingungen beschäftigt, zeugt nicht zuletzt die noch immer wachsende jährliche Anzahl spezieller Meß- und Beobachtungssatelliten. Während die Sowjetunion für alle einschlägigen Raumflugkörper die einheitliche Programmbezeichnung „Kosmos“ verwendet, ist die Fülle der Typenbezeichnungen in den USA recht verwirrend geworden. So gibt es beispielsweise die sogenannten „OGO“-Satelliten (Orbiting Geophysical Observatory), die ab 1964 im Stile des schon 1958 gestarteten sowjetischen geo-

physikalischen unbemannten Raumlaboratoriums Sputnik-3 für sehr komplexe solar-terrestrische Untersuchungen eingesetzt werden. Die beiden ersten Satelliten dieser Serie (September 1964, Oktober 1965) hatten Ausrüstungen für 20 bzw. 19 verschiedene, meist geophysikalische Experimente an Bord. Andere Satelliten, die als „OSO“ (Orbiting Solar Observatory) bezeichnet werden, sind vornehmlich für die Untersuchung der Sonne selbst eingerichtet. Technisch interessant ist an diesen Geräten (200 bis 250 kg Masse), daß sie aus zwei Bauteilen bestehen, von denen der eine ständig mit den Sonnenforschungsinstrumenten auf die Sonne ausgerichtet bleibt, während der



Geophysikalischer Meßsatellit vom Typ „OGO“.

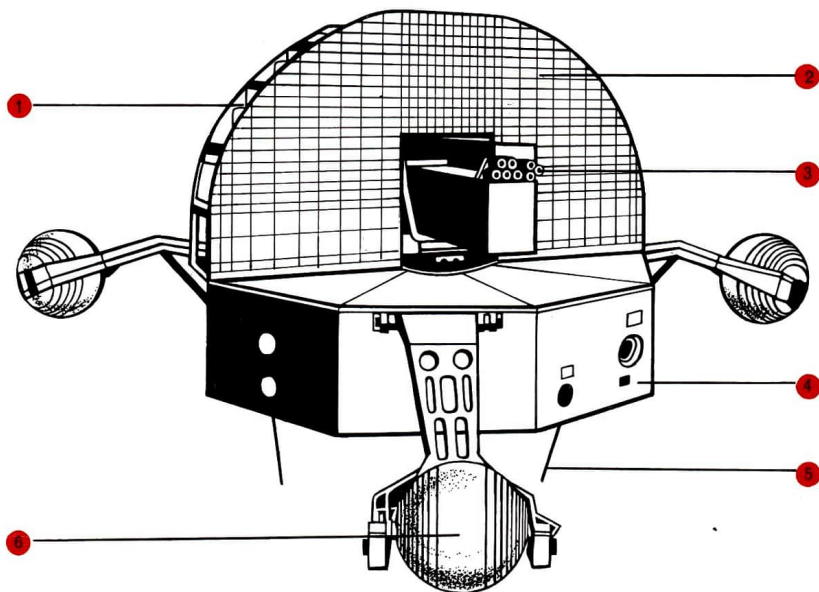
- 1 Strahlungsmeßgeräte;
- 2 Teilchenzähler;
- 3 Elektronendichtemesser;
- 4 Ausleger mit Solarzellen;
- 5 Meßwertspeicher;
- 6 Temperaturregelblende;
- 7 Elektronik;
- 8 Horizontonsucher;
- 9 Antenne;
- 10 Ionenfalle;
- 11 Magnetometer

Meßsatellit vom Typ „OSO“ für Sonnenuntersuchung.

- 1 fest auf die Sonne ausgerichteter Teil des Satelliten;
- 2 Solarzellen;
- 3 optischer Meßkomplex;
- 4 rotierender Teil des Satelliten;
- 5 Antennen;
- 6 Druckgasbehälter des Lageregelungs- und Stabilisierungssystems

andere, schachtelförmige Teil zur Stabilisierung der räumlichen Lage des Satelliten mit etwa 30 U/min um die Verbindungsachse beider Teile rotiert. Es existieren in den USA verschiedene Satellitenserien, die zwar ausschließlich für die Untersuchung der solaren Strahlung, aber nicht alle für das NASA-Programm bestimmt sind. Vielfach starten sie auch als Teilobjekte von militärischen Mehrfachsatelliten. Diese Raumflugkörper mit den Bezeichnungen „Lofti“, „Injun“, „Solrad“ und „Radose“, um nur einige zu nennen, lieferten verschiedentlich dennoch schon recht bemerkenswerte Beiträge für eine Analyse der Sonnenaktivität. So berichteten amerikanische

Wissenschaftler 1966 auf dem 7. COSPAR-Symposium (COSPAR = Committee on Space Research, internationale Dachorganisation für Weltraumforschung) über die Ergebnisse ihrer Untersuchung der solaren Röntgenstrahlung (5 bis 0,05 nm) mit „Solrad“-Satelliten, vornehmlich mit dem im November 1965 gestarteten Satelliten dieser Reihe. Aus den Messungen des Solrad-8 (auch unter der Bezeichnung Explorer-30 registriert) und seiner Serien-Vorläufer seit 1960 kamen die amerikanischen Wissenschaftler Kreplin und Friedmann zu einer wichtigen Prognose über die Stärke des Maximums der Sonnenaktivität, das nach dem allgemeinen Periodizitätsrhythmus



1969 zu erwarten wäre. Diese Voraussage ist insofern von Interesse, als gerade in dem Zeitraum etwa die ersten Flüge bemannter Raumschiffe zum Mond vorgesehen sind.

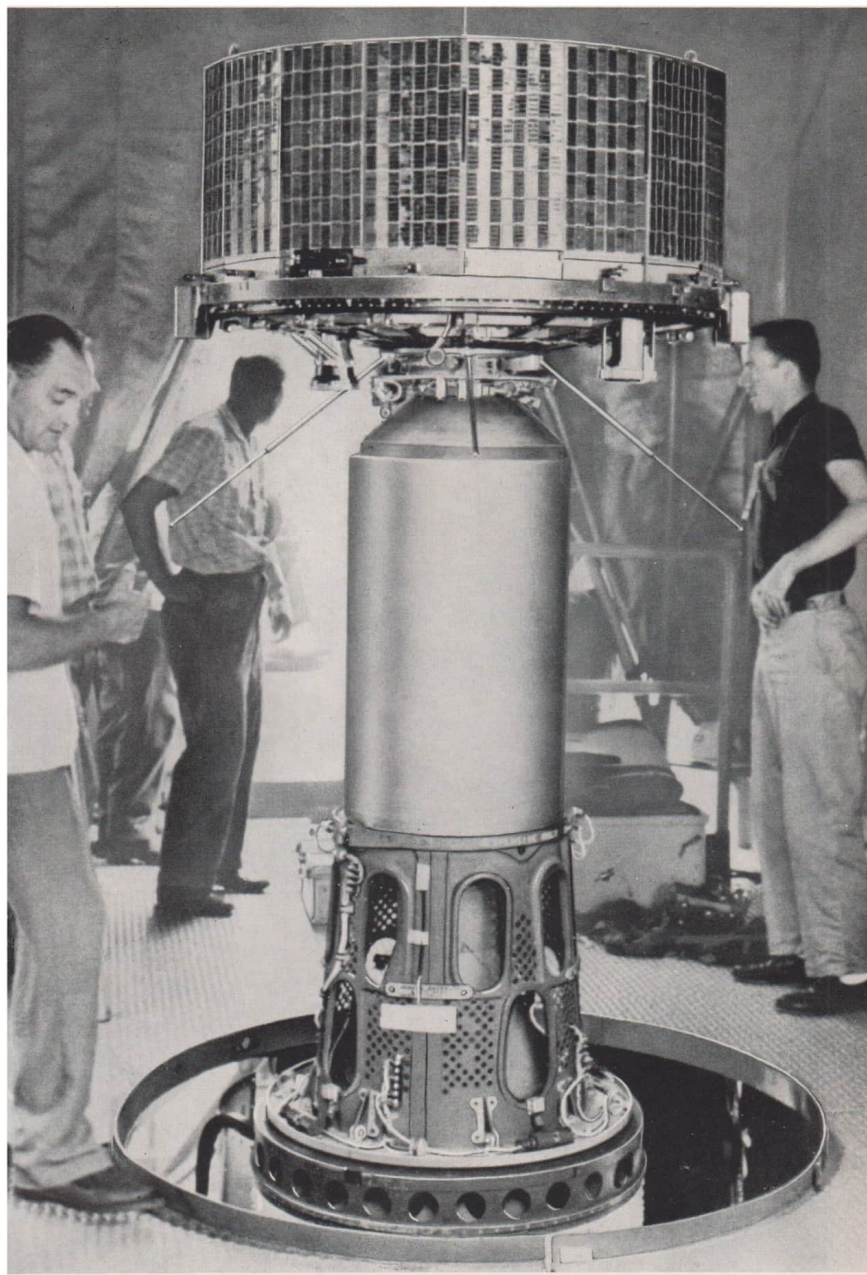
Die „Solrad“-Registrierungen zeigten nämlich, daß die Intensität der weichen Röntgenstrahlung der Sonne – die 1964 (Aktivitätsminimum) auf etwa ein Zehntel derjenigen von 1957/58 (letztes Maximum) abgefallen war und ungefähr der des Minimums von 1953/54 entsprach – 1966, also knapp zwei Jahre nach dem letzten Minimum, bereits wieder auf 50 Prozent des maximalen Wertes von 1957/58 angestiegen ist. Aus einer Extrapolation des bisherigen Kurvenverlaufes der solaren Röntgenstrahlungsaktivität, die allgemein als guter Maßstab für die Gesamtsonnenaktivität angesehen wird, läßt sich nun schließen, daß das Maximum der Sonnenaktivität 1969 höchstwahrscheinlich noch stärker ausfallen wird als das von 1957/58. Dieses war aber schon das stärkste Maximum der letzten hundert Jahre.

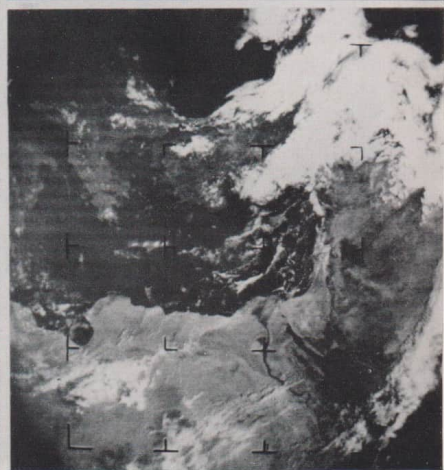
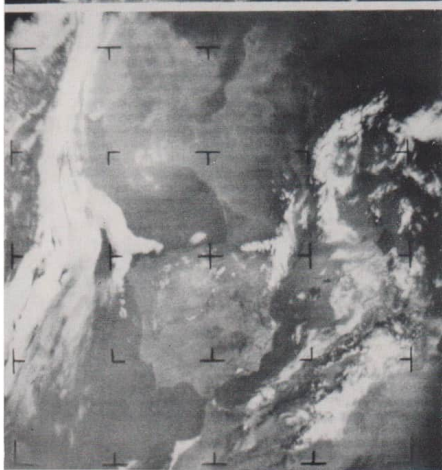
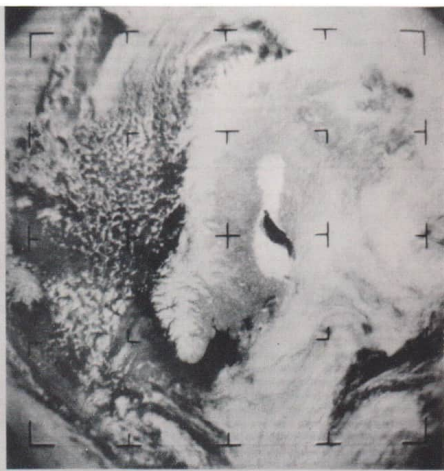
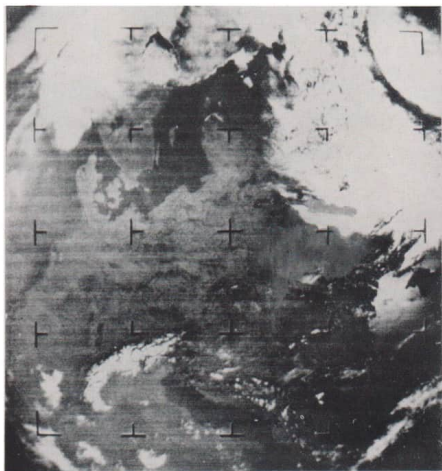
Wettersatelliten

Außer dieser sowjetischen und amerikanischen Routinearbeit mit Meßsatelliten läuft schon seit 1960 eine von den USA begonnene Versuchsreihe mit Wettersatelliten. Die Hauptaufgabe dieser „Tiros“-Satelliten (Tiros = **T**elevision and **I**nfra-**R**ed **O**bservation-**S**atellite) bestand in einer direkten optischen Beobachtung der globalen Wolkenverteilung und einer zusätzlichen Strahlungsmessung hauptsächlich im Infrarotbereich. Letzteres ist unter anderem zur Bestimmung des Wärmeumsatzes auf der Erde bedeutungsvoll. Für die optischen Beobachtungen hatte jeder Satellit zwei Fernsehkameras an Bord. In den ersten beiden Satelliten dieser Serie waren die Kameras jeweils mit Objektiven verschiedener Bildwinkel ausgerüstet, während die späteren nur noch Weitwinkelobjektive hatten. Übertragen wurden die

einzelnen Aufnahmen (Belichtungszeit 1,5 ms) nach magnetischer Zwischenspeicherung von 32 Bildern mit einer Abtastung in 500 Zeilen. Diese Methode bewirkte ausgezeichnete Bildwiedergaben auf den Fernsehschirmen der Bodenstationen. Die Abbildungen wurden dann fotografisch festgehalten und mit den Wetterkarten der Beobachtungsstationen des meteorologischen Netzes verglichen. Die vergleichende Auswertung erbrachte zwar für die Meteorologen keine absoluten Sensationen, aber aus den mit Weitwinkelobjektiven gewonnenen Bildern der großräumigen Wolkenverteilung (Gebiete mit etwa 1,4 Millionen km² Ausdehnung wurden erfaßt) ließen sich wertvolle Ergänzungen ableiten, um Wetterkarten zu deuten, und damit Ansätze finden, um langfristige Vorhersagen zu verbessern. Deshalb sahen die Meteorologen die Fortsetzung dieser Arbeiten mit ständig verbesserten Satelliten durchaus als lohnend an.

Der technische Aufbau aller sechs bis Ende 1962 gestarteten Tiros-Satelliten ähnelt sich im Prinzip weitgehend. Ihre wissenschaftlichen Nutzmassen lagen etwa zwischen 120 und 130 kg. Alle hatten die Form eines achtzehneckigen, nahezu zylinderförmigen Pyramidenstumpfes, dessen Basis einen Durchmesser von 107 cm hatte. Die Höhe betrug 48 bis 56 cm. Die Kameraobjektive befanden sich in der Basisfläche des Satelliten, während man an seiner Peripherie mehrere lichtempfindliche Zellen installiert hatte. Mit ihrer Hilfe konnte die Lage des Flugkörpers zur Erde bestimmt werden. Die Stromversorgung aller technischen und wissenschaftlichen Einrichtungen oblag Solarbatterien, die durch rund 9200 Empfangselemente auf der Außenwand des Satelliten gespeist wurden. Die Meßwert- und Bildübertragung besorgten bis zu fünf Sender in einem Satelliten. Die Lagestabilisierung der Tiros-Satelliten geschah durch Rotation um die Zylinderachse; der Anfangsimpuls wurde dem Satelliten mit 126 U/min schon von der letzten Stufe des Trägersystems mitgegeben.





Vier Aufnahmen,
die der Wettersatellit ESSA-2
vom Gebiet Europa Nordafrika
lieferte.
links oben Mitteleuropa;
rechts oben Skandinavien;
links unten Iberische Halbinsel;
rechts unten Nordafrika / östliches Mittelmeergebiet

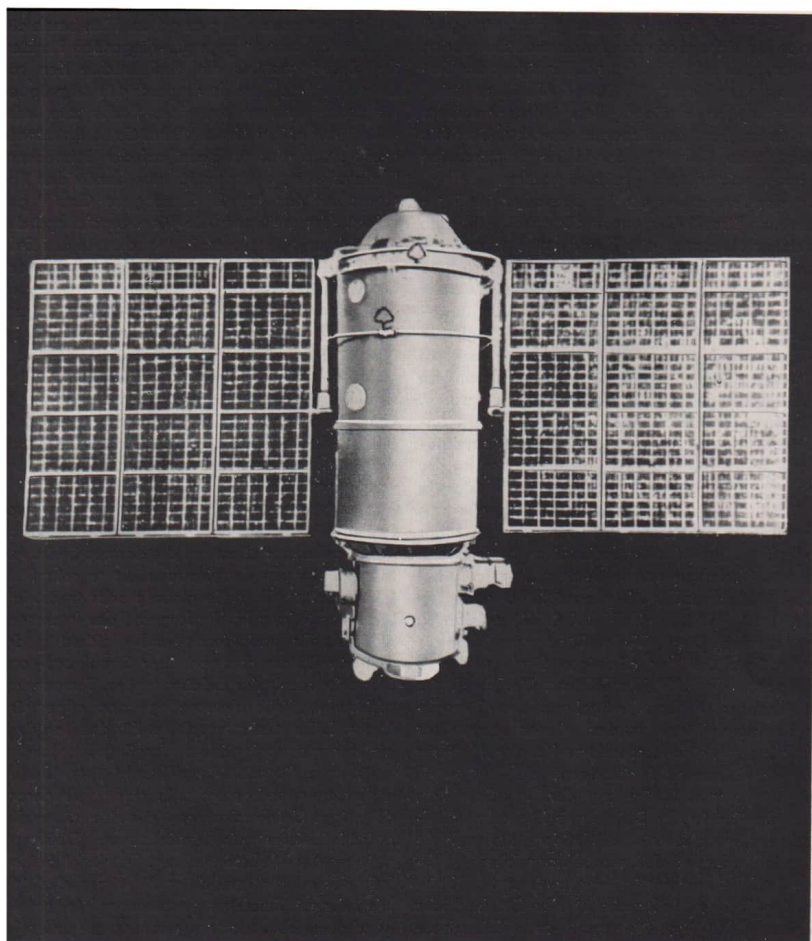
Da aber bei dieser Umdrehungsgeschwindigkeit keine hinreichend scharfen Aufnahmen zu erwarten waren, mußte die Rotation nach Erreichen der Umlaufbahn auf etwa 12 bis 14 U/min reduziert werden. Man erreichte dies, indem entweder außen am Satellitenkörper angebrachte Gewichte abgestoßen (Tiros-1) oder kleine Bremsraketen (Tiros-2 und spätere) gezündet wurden.

Bei der Ausrüstung des im Dezember 1963 gestarteten Tiros-8 führte man dann erstmalig eine wichtige Neuerung ein. Zuvor hatten nur einige wenige, mit Spezialempfanganlagen ausgestattete Bodenstationen auf Abrufkommandos die Wetterfotos empfangen können. Deren Auswertungsgang bis zur Übermittlung an weit entfernte Wetterzentralen und -stationen konnte mehrere Stunden dauern, so daß dadurch der besondere Wert des Verfahrens erheblich gemindert wurde. Tiros-8 erhielt daher eine sogenannte APT-Anlage (APT = Automatic Picture Transmission, automatische Bildübertragung), die den Empfang der vom Satelliten laufend abgestrahlten Bildsignale mit einfachen und daher leicht zu handhabenden Geräten erlaubte. Ja, teilweise führten sogar behelfsmäßige Amateuraufbauten zum Erfolg. Dieses Verfahren wurde dann später auch bei den amerikanischen Wettersatelliten vom Typ „Nimbus“ (1964) und „ESSA“ (1966) erfolgreich angewendet. Die ESSA-Satelliten unterstehen als erste Satelliten der alleinigen Regie und den Aufgaben des USA-Wetterbüros. Sie ähneln im allgemeinen Aufbau weitgehend den Tiros-Erprobungssatelliten, wurden diesen gegenüber jedoch durch einen besonderen Kunstgriff in ihrer Effektivität wesentlich gesteigert.

Durch die raumstabile Lage der Tiros-Satelliten, die um ihre in der Bahnebene liegende Mittelachse rotierten, konnten die beiden Kameraobjektive im Bodendeckel des Satellitengehäuses während eines Umlaufes immer nur einen verhältnismäßig kleinen Teilausschnitt der Erdoberfläche erfassen. Mit Tiros-9 versuchte man daher erst-

malig einen neuen Weg zu gehen. Man baute die beiden Kameras an gegenüberliegenden Punkten des Zylindermantels ein und brachte den rotierenden Satelliten durch geschickte Lageänderungsmanöver nach Art eines Rades zum „Abrollen“ auf seiner Umlaufbahn. Seine Rotationsachse stand also senkrecht auf der Bahnebene. Dadurch war praktisch stets eine der beiden Kameras auf das jeweils überflogene Gebiet gerichtet. Um weiterhin die für normale optische Aufzeichnung „unproduktive“ Nachtseite der Erde zu vermeiden, richtete man die Umlaufbahn des Satelliten so ein, daß sie stets „sonnensynchron“ über dem Terminator (Tag-und-Nacht-Grenze) verlief. Da sich dieser Weg als brauchbar erwies, brachte man auch die ESSA-Satelliten in der gleichen Weise in Umlauf. Die Wettersatelliten vom Typ „Nimbus“ haben außer den Fernsehkameras unter anderem noch hochempfindliche Infrarot-Radiometer, die es gestatten, auch von der Nachtseite der Erde ausgezeichnete Wolkenverteilungsbilder zu gewinnen.

Das sowjetische Forschungsprogramm mit meteorologischen Satelliten stützt sich von Anfang an offensichtlich vor allem auf die Kosmos-Serie. Anfänglich standen dabei auch nicht so sehr Bildinformationen über die globale oder territoriale Wolkenverteilung im Vordergrund des Interesses, als vielmehr umfassende und gleichzeitig detaillierte Untersuchungen über Strahlungs- und Wärmehaushalt der Erdatmosphäre, Temperaturschichtung, Strömungsvorgänge und allgemeine Dynamik der Hochatmosphäre. Für das Verständnis der meteorologischen Vorgänge, besonders wenn man die mittel- und langfristigen Wettervorhersagen verbessern will, sind aber gerade derartige Untersuchungen teilweise wesentlich aufschlußreicher als großräumige Dokumentationen der Wolkenverteilung. Damit soll keinesfalls der außerordentlich große wissenschaftliche Wert der mit Satelliten gewonnenen Wolkenfotos herabgemindert werden, aber deren voller In-



formationsgehalt läßt sich letztlich doch nur in enger Verbindung mit den zuvor genannten Angaben ausschöpfen. So begannen die sowjetischen Wissenschaftler schließlich ab 1965/66 ihr Forschungsmaterial auch durch Satelliten-Wolkenaufnahmen zu ergänzen. Außer Satelliten des Typs „Molnija-1“, die eigentlich in der Hauptsache nachrichtentechnischen Versuchen dienten und sozusagen nur nebenbei mit Aufnahmekameras bestückt waren, wurde Kosmos-122 (Juni 1966) als erster spezieller Wettersatellit der Sowjetunion zum Träger dieses Programms.

Die Auswertung der heute in den Archiven schon nach Hunderttausenden zählenden Wolkenaufnahmen durch Satelliten war und ist auch mit modernsten Methoden kaum zu bewältigen, da von einem einzelnen Satelliten in der Woche bis zu 4000 Aufnahmen gewonnen werden konnten. So mußte man sich aus arbeitsökonomischen Gründen dazu entschließen, verschiedentlich nur noch eine Grobauswertung des laufend anfallenden Bildmaterials vorzunehmen. Hinzu kam, daß die Meteorologen nach dem Start von Tiros-1 (April 1960) überhaupt erst lernen mußten, die Bilder der großräumigen Wolkenverteilung in ihrem feineren Zusammenhang mit der Großwetterlage zu deuten. Von den an Bodenstationen erfaßbaren Wetterelementen (Luftdruck, Temperatur, Bewölkung, Niederschläge usw.) sowie deren Änderungstendenzen konnte ein meteorologischer Beobachtungssatellit vorerst nur die Bewölkung als einzigen Faktor der Wetterentwicklung erfassen. Daraus allein auf die Entwicklung der Großwetterlage zu schließen bereitete anfangs große Schwierigkeiten. Weiterhin gelang es zunächst nur unbefriedigend, aus den Tiros-Bildern die einzelnen Wolkenarten zu erkennen. Wir wissen jedoch von früheren Betrachtungen, daß ein enger Zusammenhang zwischen Wolkenformen und Wetterentwicklung besteht. Inzwischen konnten diese Schwierigkeiten überwunden werden, so daß die Satelliten-Wolkenbilder in zunehmen-

dem Maße einen sehr wichtigen Platz unter den Wetterinformationen einnehmen.

Für den Unwetterwarndienst haben sich die meteorologischen Beobachtungssatelliten von geradezu unschätzbarem Wert erwiesen. Im Juli 1961 wurde Tiros-3 gestartet. Man hatte diesen Zeitpunkt gewählt, um mit den Aufnahmen des Satelliten vor allem die „Wirbelsturmsaison“ vor der nordamerikanischen Küste zu beobachten, die jeweils in den Spätsommer und den Frühherbst fällt. In den ersten Septembertagen entdeckte man an Hand der Tiros-3-Bilder weit draußen auf dem Atlantik einen gerade entstehenden Hurrikan, der den Namen „Carla“ erhielt. Dieser Wirbelsturm wurde im Laufe weniger Tage zu einem der gewaltigsten, die in diesen Gegenden jemals getobt haben. Er bewegte sich um den 10. September zum Golf von Mexiko, wo er sich mit verheerender Wucht auf die Küstengebiete von Louisiana und Texas stürzte. Durch einen schon zwei Tage vor der Wirbelsturmkatastrophe ausgelösten Hurrikan-Alarm konnten über 300 000 Menschen rechtzeitig aus den gefährdeten Küstenstädten evakuiert werden. Diese Maßnahme rettete sicher vielen Menschen wenigstens das Leben. Die Unwetterwarnungen enthielten präzise Angaben über Entstehungsort des Wirbelsturmes, seine Zuggeschwindigkeit und Zugrichtung sowie über die Stärke des zu erwartenden Orkans. Der tatsächliche Verlauf entsprach dann auch den Vorausagen. Den wichtigsten Beitrag lieferte dazu die Entdeckung und spätere Überwachung des Hurrikans durch Tiros-3. Seither haben Wettersatelliten in jedem Jahr hervorragenden Anteil daran, daß sich Wirbelstürme oder sonstige schwere Unwetter nicht so katastrophal auswirken wie früher. 1964 schätzte man in den USA allein die materielle Werterhaltung durch Satelliten-Unwetterwarnungen schon auf mehrere Milliarden US-Dollar, so daß damit im Grunde der gesamte Entwicklungsaufwand und die laufenden Kosten für Träger- raketen, Satelliten sowie Bodeninstallationen mehr



als ausgeglichen wurden. Abgesehen von derartigen speziellen Möglichkeiten werden weiterhin meteorologische Beobachtungs- und Meßsatelliten ganz allgemein noch zahlreiche wichtige Beiträge zur Erforschung des Wettergeschehens liefern.

Gewichtige Strahlungsforscher

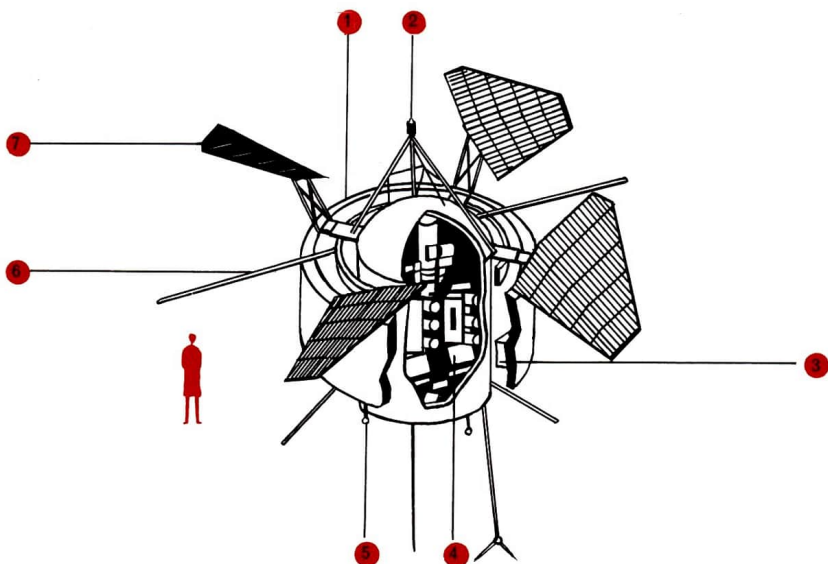
Die Erweiterung des Forschungsprogrammes für wissenschaftliche Satelliten ist selbstverständlich sehr eng mit den Fortschritten der Trägerraketen- und Raumflugtechnik gekoppelt. Die ständig leistungsfähiger werdenden Trägerraketen schaffen die Voraussetzung für die Entsendung immer größerer Nutzmassen in Erdumlaufbahnen, wobei auch die zunehmend verfeinerte Geräte- und Ausrüstungstechnik laufend neue Möglichkeiten erschließt. Damit tauchen dann auch völlig neue Forschungsprobleme auf, die zum Teil weit über die Themen hinausgehen können, die unmittelbar mit dem erdnahen Raum oder den solar-terrestrischen Beziehungen verbunden sind. Den in dieser Hinsicht absoluten Spitzenbeitrag zur Weltraumforschung leistete die Sowjetunion 1965 mit ihrer „Proton“-Satellitenserie. Am 16. Juli 1965 wurde der erste Vertreter dieser neuen, sehr speziellen Strahlungsmeßsatelliten mit der sensationellen Nutzmasse von 12 200 kg in eine Erdumlaufbahn gebracht (Perigäumshöhe 190 km, Apogäumshöhe 627 km). Zwei weitere Proton-Satelliten folgten im November 1965 und im Juli 1966 auf ähnlichen Bahnen.

Abgesehen von dem Rückschluß, daß die Sowjetunion über außerordentlich leistungsfähige Trägerraketen verfügt, gaben so umfangreiche Forschungsmittel den Auftakt zu einer völlig neuen Qualität in der Weltraumforschung mit unbemannten Raumflugkörpern. Die enorme Nutzmasse der Satelliten erlaubte es, die wissenschaftliche Ausrüstung in ganz großem Stil anzulegen und damit die ersten automatischen Weltraum-

Nördlich des Baikalsees
sich ausbreitende Wirbelbewölkung
eines Tiefdruckgebietes,
aufgenommen von Kosmos-122
am 26. Juli 1966

Strahlungsmeßsatellit vom Typ „Proton“.

- 1 äußere Zellenstruktur;
- 2 Sensoren des Lageregelungs- und Stabilisierungssystems;
- 3 chemische Batterien;
- 4 Ionisationskalorimeter;
- 5 Sensoren des Lageregelungs- und Stabilisierungssystems;
- 6 Antennen;
- 7 Ausleger mit Solarzellen



laboratorien für Hochenergiephysik zu schaffen. Im Mittelpunkt des „Proton“-Arbeitsprogrammes stand die Untersuchung der kosmischen Strahlung extrem hoher Energien, wie sie aus den Tiefen des Weltraumes zur Erde oder in den erdnahen Raum gelangt. Im einzelnen gehörten dazu die Untersuchungen des Energiespektrums und der Zusammensetzung der kosmischen Primärstrahlung im Energiebereich bis zu 100 Billionen eV und der Wechselwirkungen zwischen kosmischen Teilchen mit Energien bis zu 1 Billion eV. Weiterhin konnten Untersuchungen über die solare Teilchenstrahlung, die von ihr ausgehende biologische Strahlungsgefahr, das Energiespektrum und die absolute Intensität der Elektronenstrahlung galaktischer Herkunft sowie über die galaktische Gammastrahlung mit Energien von mehr als 50 MeV angestellt werden.

Der materialtechnische Aufwand für derartige Forschungen ist außerordentlich hoch, und entsprechende umfangreiche Anlagen konnten zuvor nur in erdgebundenen Laboratorien installiert werden. Kernstück des Meßgerätekomplexes war ein sogenanntes „Ionisationskalorimeter“. Es bestand aus zwei Blöcken mit einer großen Anzahl übereinander angeordneter Stahlplatten und Zwischenschichten aus Lumineszenzplaten, einem Polyäthylen- und einem Graphitblock, die sich jeweils über einem der Stahlplatten-Plast-Blöcke befanden, sowie aus verschiedenen Lumineszenzzählern und Zählrohren. Der Hauptteil der Satellitenmasse entfiel auf die meterhohen kompakten Schichtblöcke. Die zu untersuchenden Strahlungsteilchen gelangten über die als Bremssubstanzen wirkenden Graphit- bzw. Polyäthylenblöcke in die Stahlplatten-Plast-Blöcke, wobei die Zerfalls- und Wechselwirkungsprozesse durch die Zählaggregate registriert wurden.

Mit der Verlegung ihrer Meßlaboratorien vom Typ „Proton“ über die dichteren Schichten der Erdatmosphäre sahen die sowjetischen Forscher bedeutsame Möglichkeiten für Fortschritte in der

Physik hochenergetischer Teilchen voraus, wie sie in irdischen Laboratorien in absehbarer Zeit kaum zu erwarten sein würden. Die Ergebnisse dieser im einzelnen noch längst nicht abgeschlossenen Untersuchungen werden aber nicht nur für die Physik der Elementarteilchen von Bedeutung sein, sondern darüber hinaus auch kosmologische Fragen (Ursprung der hochenergetischen kosmischen Strahlung usw.) wesentlich klären helfen. Bisher haben wir uns ausschließlich mit dem Teil der Raumflugtechnik befaßt, der die Entsendung unbemannter wissenschaftlicher Raumflugkörper in Erdumlaufbahnen zum Ziel hat, und mit einigen Ergebnissen dieser neuen Weltraumforschungsmethode. Da ja aus technischen Gründen am Anfang des Raumfluges zwangsläufig nur unbemannte Geräte entsandt wurden und mehrere Jahre lang das Feld allein beherrschten, schien es wohl angebracht, zunächst diesen Komplex geschlossen zu behandeln. Wir sind dabei natürlich auch schon bis in die Gegenwart vorgedrungen, in der bekanntlich das Bild nun nicht mehr von unbemannten Raumflugkörpern allein geprägt wird. Die stürmischen Fortschritte der Raketen- und Raumflugtechnik sowie der Raumfahrtmedizin und Raumfahrtbiologie führten – übrigens wesentlich schneller, als es selbst Optimisten für möglich gehalten hätten – zu neuen und schier überwältigenden Möglichkeiten in der wissenschaftlichen Erschließung des kosmischen Raumes.

Am 12. April 1961 begann mit dem welterregenden Flug des sowjetischen Kosmonauten Juri Gagarin die grandiose Erfüllung eines alten Menschheitstraumes, die Epoche des Menschenfluges in den Kosmos. Die Kenntnis von den wichtigsten Grundlagen dieser Entwicklung und von einigen ihrer ersten Ergebnisse sowie näheren und fernerer Perspektiven bildet eine Voraussetzung, um die Bedeutung dieses aufwendigen und vielfach abenteuerlich anmutenden Zukunftsweges der Weltraumforschung zu begreifen.

Die Beteiligung des beobachtenden und messenden Menschen an Raumflügen eröffnet der Wissenschaft, vor allem der Weltraumforschung, völlig neue Möglichkeiten. Es besteht tatsächlich heute kein Zweifel mehr darüber, daß die höchste Vollendung bei Forschungen im kosmischen Raum nur unter unmittelbarer Teilnahme des Menschen erreicht werden kann. Automatische Einrichtungen können ihn dabei zwar unterstützen, entlasten oder seine begrenzten manuellen Fähigkeiten ergänzen, aber ihn wohl kaum jemals ersetzen. Nur die hochentwickelte bewußte Entscheidungsfähigkeit des menschlichen Gehirns vermag eine Programmierung wissenschaftlicher Arbeiten selbstständig aufzustellen oder abzuändern. Automatische Apparaturen können immer nur im Rahmen eines vom Menschen vorgegebenen Programms reagieren. Unerwarteten Situationen oder Aufgaben verstehen sie sich nicht oder nur begrenzt anzupassen. Vor allem aber bei technischen Zwischenfällen bzw. Störungen sind nur dem entsprechend geschulten menschlichen Urteilsvermögen gegebenenfalls sinnvolle Eingriffe möglich. Für die wissenschaftliche Raumfahrt ist diese Feststellung um so schwerwiegender, als die Erforschung des kosmischen Raumes und vor allem der Himmelskörper weitgehend mit Vorstößen in wissenschaftliches Neuland verbunden ist. Überraschende Erscheinungen und Situationen wird es mehr als genug geben.

Allen Bemühungen zur Verwirklichung der bemannten Raumfahrt kommt daher wegen dieser weitgesteckten Ziele der modernen Weltraumforschung ganz besondere Bedeutung zu. Aus diesem Grunde müssen wir uns auch mit einigen der wichtigsten Faktoren dieser Entwicklung beschäftigen, obwohl die bisherigen Unternehmen mit bemannten Raumflugkörpern eigentlich noch keine besonders gewichtigen Beiträge zu dem uns hier hauptsächlich interessierenden Bereich der Weltraumforschung geliefert haben. Der bemannte Raumflug ist im einzelnen mit so zahl-

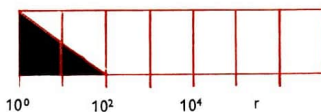
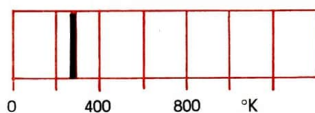
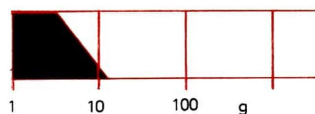
reichen Problemen aus den verschiedensten Wissensgebieten verknüpft, daß hier unmöglich eine auch nur halbwegs vollständige Darstellung aller Zusammenhänge gegeben werden kann. So haben sich unter anderem neue wissenschaftliche Disziplinen entwickelt, wie beispielsweise die Raumfahrtbiologie und -physiologie. Diese beschäftigen sich mit dem Aufenthalt des Menschen in Raumschiffen oder auf anderen Himmelskörpern, und die Raumfahrtmedizin erarbeitet Methoden, mit denen schädliche Auswirkungen der dabei auftretenden Belastungen verhindert werden können.

Physiologische Zwangsjacke

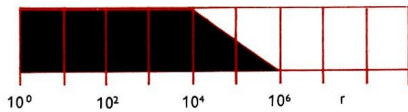
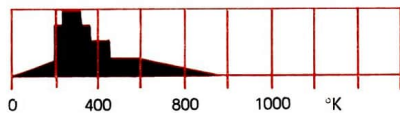
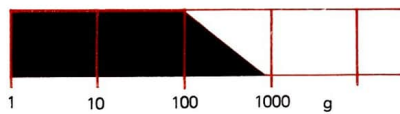
Der Aufenthalt im kosmischen Raum ist mit vielen Problemen verbunden. Zu den wichtigsten gehören die Schaffung und Erhaltung zuträglicher Umweltbedingungen in hermetischen Kabinen und Schutzanzügen, die Atemluftversorgung und Klimaregelung sowie der Schutz gegen Strahlungseinwirkungen. Die größten physiologischen Belastungsfaktoren sind der Beschleunigungsandruck in der Antriebsphase und die Schwerelosigkeit während des antriebslosen Fluges. Auch die psychischen Belastungen müssen berücksichtigt werden, denn in Zukunft werden sich Raumfahrer sehr lange Zeit in einer verhältnismäßig engen Kabine aufhalten müssen.

Fassen wir einige dieser Probleme noch etwas näher ins Auge. In der Beschleunigungsverträglichkeit zeigt sich, daß der Mensch senkrecht zu seiner Längsachse Beschleunigungen bis etwa 15 g ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$) einige Minuten lang ertragen kann. In Richtung seiner Körperlängsachse können schon 5 g in kurzer Zeit zur Bewußtlosigkeit und zu schweren Schädigungen führen. Diese Werte gelten auch nur unter Berücksichtigung eines speziellen Anpassungstrainings, das jedoch mit weitgehenden technischen Raffinessen (zum Beispiel in vollständigen Raumkabinen mit Klimaanlage

Mensch



Automat



usw.) auf Großzentrifugen absolviert werden kann. Die in der Startphase von Raumfahrtsträgerraketen auftretenden Beschleunigungen überschreiten allerdings im allgemeinen kaum 3 bis 4 g während in der Eintauchphase bei der Rückführung zur Erdoberfläche allerdings Werte von 8 bis 10 g auftreten können. Elektronische Systeme vermögen hingegen bei geeignetem Aufbau (zum Beispiel Vergießen mit einer Stützsubstanz) Beschleunigungen vom hundert- bis tausendfachen Betrag auszuhalten. Da aber, wie schon erwähnt, die Starts von Großraketen und auch Rückführungsvorgänge mit relativ niedrigen Beschleunigungswerten verbunden sind, erfordert die Beteiligung des Menschen in dieser Hinsicht keinen besonderen Aufwand, es sei denn, man denkt an den speziellen Andruck-Konturensessel. Was die Schwerelosigkeit anbetrifft, so zeigt sich hier eine ziemlich einschneidende Schwäche des menschlichen Organismus. Wenn auch nach den bisherigen Erfahrungen entsprechend vorbereitete

Raumfahrer ständige Schwerelosigkeit bis zu etwa 30 Tagen Dauer in arbeitsfähigem Zustand ertragen könnten, so dürften doch wesentlich längere Zeiträume kaum noch zu bewältigen sein. Technische Anlagen werden dagegen in ihren Grundfunktionen auch während eines mehrjährigen schwerelosen Zustandes nicht im mindesten beeinträchtigt. Allerdings benötigen sie einen zusätzlichen technischen Aufwand, um die Wärmemengen abzuführen, die auch unter den Bedingungen der Schwerelosigkeit durch die Stromversorgung entstehen (Temperaturregelsystem). Um auch für den Menschen längere Raumaufenthalte als etwa einen Monat möglich zu machen, müßten besondere technische Lösungen gefunden werden, deren Ziel die Aufhebung der Schwerelosigkeit ist. Dies könnte entweder durch Einbau von Kleinzentrifugen in den Raumflugkörper geschehen oder durch Ausnutzung des infolge Eigenrotation auftretenden Fliehkraftandrucks. Bei interplanetaren Raumflügen ließe sich außerdem noch eine

Widerstandsfähigkeit
von Mensch und Automat
gegenüber verschiedenen
äußeren Einflüssen
(oben Beschleunigung;
Mitte Temperatur;
unten Strahlung)

Schwerelosigkeits-Simulation
beim Parabellflug



freilich nur sehr geringe Schwerkraftsimulation durch Dauerbeschleunigung mittels elektrischer Raumfahrtantriebe erzielen.

Eine nicht zu vernachlässigende raumfahrtmedizinische Bedeutung hat auch die Temperaturabhängigkeit des menschlichen Organismus. Im Normalfall muß die unmittelbare Umgebung des Menschen (hautnaher Bereich) eine Temperatur haben, die von ungefähr 280 °K bis etwa 310 °K (7 °C bis 37 °C) reicht, das heißt, wenn der Mensch über längere Zeit arbeitsfähig bleiben soll. Der Temperaturbereich technischer Systeme hängt von vielen Parametern ab. Er ist aber im allgemeinen wesentlich größer als der zuträgliche Temperaturbereich für den Menschen. Selbstverständlich läßt sich das Verträglichkeitsintervall des menschlichen Organismus durch eine entsprechende Schutzbekleidung und das der technischen Geräte unter anderem durch Thermostaten erweitern. Diese Maßnahmen erfordern jedoch in jedem Fall zusätzliche technische Hilfsmittel und vergrößern demzufolge auch den Massenaufwand des jeweiligen Raumflugkörpers.

Schließlich ist noch eine von außen einwirkende Belastung zu untersuchen, nämlich die Strahlungsgefährdung. Auch hierin zeigt wieder der menschliche Organismus ganz beträchtliche Schwächen. In der Raumfahrt interessieren praktisch nur die kosmischen Partikelstrahlungen, da für die verschiedenen Wellenstrahlungen schon die normalen Konstruktionsmaterialien der Raumflugkörper einen hinreichenden Schutz bieten. Als Teilchenstrahlung kommen die normale solare Partikelstrahlung, die primäre Kosmische Strahlung, die Strahlung in der Magnetosphäre und die sporadischen Strahlungsausbrüche der Sonne in Betracht. Wie sich gezeigt hat, sind die Intensitäten der normalen solaren und der primären Kosmischen Strahlung wenig gefährdend.

Anders liegen die Dinge jedoch mit der Strahlung in der Magnetosphäre und den solaren Strahlungsausbrüchen. Die Strahlungsintensität

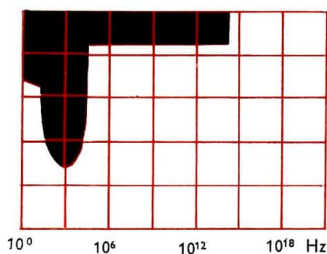
ist in den energiereicheren Teilen des Strahlungsgürtels immerhin so hoch, daß ein ungeschützter Organismus schon bei relativ geringer Aufenthaltsdauer (einige Stunden) lebensgefährliche Strahlungsdosen empfängt. Man wird daher die Bahnen und Flugprogramme von bemannten Raumflugkörpern entsprechend auswählen müssen. Noch ungünstiger wird es bei den solaren Strahlungsausbrüchen. Deren Intensität kann solche Ausmaße annehmen, daß sogar schon innerhalb weniger Minuten tödliche Strahlungsdosen vom menschlichen Organismus aufgenommen würden. Um dieser Strahlungsgefahr zu begegnen, müssen wahrscheinlich mehrere Wege beschritten werden. Erstens wäre es unbedingt zweckmäßig, länger dauernde Flüge (zum Mond, zu den Planeten) in die Zeit geringerer Sonnenaktivität zu legen; zweitens könnte auf der Basis vervollkommener sonnenphysikalischer Erkenntnisse eine Art „Vorhersagedienst“ für Strahlungsausbrüche eingerichtet werden; drittens muß man technische und biologische Verfahren eines verbessert wirkenden Strahlungsschutzes schaffen.

Die Vorversuche starten

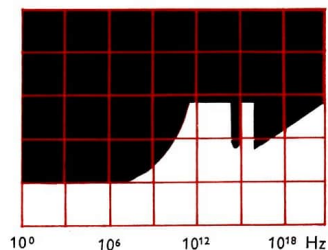
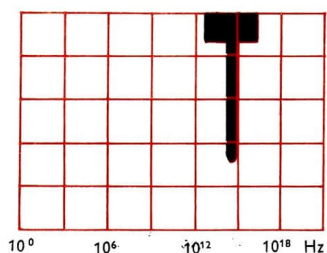
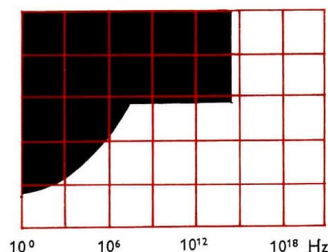
In Abhängigkeit von dem jeweiligen Erfahrungsstand auf den erwähnten Gebieten ergibt sich also in vielen Punkten ein enger Zusammenhang mit den technisch-konstruktiven Lösungen für den Aufbau und die Ausrüstung bemannter Raumflugkörper. Große Entwicklungsschritte haben sich ausschließlich mit diesen Fragen zu beschäftigen und gangbare Lösungen vorzuschlagen, die mit den Nutzmassekapazitäten der Trägerraketen und einem physiologisch günstigen Antriebsverlauf in Einklang gebracht werden müssen.

Darüber hinaus werfen Unternehmen mit bemannten Raumflugkörpern auch für die Flugführung und damit technisch eine ganze Reihe neuer Probleme auf. Kann man bei unbemannten Raum-

Mensch



Automat



flugkörpern unter Umständen noch darauf verzichten, sie nach erfülltem Arbeitsprogramm wieder unzerstört zur Erdoberfläche zurückgelangen zu lassen, so fordert jedes bemannte Raumflugunternehmen zwangsläufig die unversehrte Rückkehr der Besatzung. Zumindest muß bei der Ausarbeitung und Programmierung des Unternehmens dieser Forderung maximal Rechnung getragen werden. Aus diesem Grunde stellt die Entwicklung von Verfahren zur sicheren Rückführung von Raumflugkörpern ein Schlüsselproblem der Raumfahrt dar. Selbstverständlich wirkt diese Forderung ebenfalls ganz wesentlich auf die konstruktiven

Lösungen der Raumflugkörper ein. Man muß Bremstriebwerke, aerodynamische Brems- und Landehilfen sowie Schutzeinrichtungen gegen Wärmeüberbelastung beim Eintauchen in die dichteren Schichten der Atmosphäre installieren. Nicht weniger wichtig sind die extremen Forderungen, die man an die optimale Funktionstüchtigkeit aller technischen Einrichtungen eines bemannten Raumflugkörpers stellen muß. Schon das Versagen eines winzigen Bauelementes, beispielsweise der Steuerungsgeräte, kann einen katastrophalen Ausgang des Unternehmens verursachen. Die Zuverlässigkeit technischer Geräte und Systeme muß daher

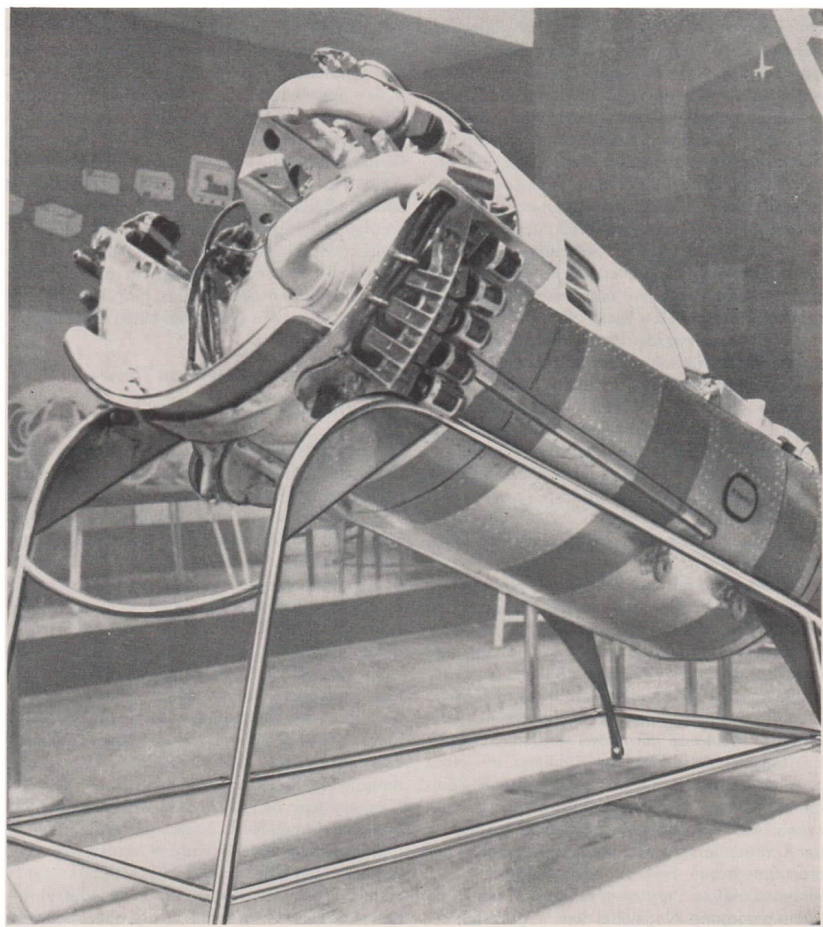
ständig weiter gesteigert werden, wenn der Einsatz bemannter Raumflugkörper zu verantworten sein soll.

Das Zusammenspiel all dieser Voraussetzungen und Forderungen verlangt ein klar durchdachtes und weitvorausschauendes Entwicklungsprogramm und zwangsläufig etliche Vorversuche und Zwischenerprobungen. Die ersten erfolgreichen Schritte in dieser Richtung ging die Sowjetunion. Mit der Serie ihrer „Raumschiff“-Satelliten erprobten die sowjetischen Raumfahrtspezialisten alle grundlegenden technischen Lösungen, die für den ersten Raumflug eines Menschen notwendig waren. Schon die Nutzmasse dieser Raumflugkörper, die etwa zwischen 4500 und 4700 kg lag, zeigte deutlich, daß die sowjetischen Wissenschaftler von vornherein jeglichen gewagten Experimenten mit technisch „unterentwickelten“ Lösungen aus dem Wege gingen. Nebenbei wurde damit demonstriert, daß die Sowjetunion über weit leistungsfähigere Trägerraketen verfügte als die USA. Mit dem am 15. Mai 1960 gestarteten Raumschiff-Satellit-1 wurden allein schon 1475 kg wissenschaftlicher Ausrüstung in eine nahezu kreisförmige Umlaufbahn gebracht. Dieser erste Versuch diente vornehmlich der Erprobung des Kabinensystems, in dem sich als „Passagier“ eine Pilotenimitation von entsprechender Masse befand. Der Versuch zur Rückführung des Kabinenteils mißlang allerdings durch eine Störung des Orientierungssystems. Nach gründlicher Auswertung dieses Experimentes wurde der Start eines weiteren Raumschiff-Satelliten für den 19. August 1960 vorbereitet.

Dieses Unternehmen wurde in vollem Umfang zu einem großen Erfolg der sowjetischen Raumflugtechnik. Zum erstenmal gelang es, Lebewesen nach eintägigem Raumaufenthalt wohlbehalten wieder zur Erdoberfläche zurückzuführen. In einer Spezialkabine des Raumschiff-Satellit-2 (4590 kg) befanden sich die beiden Hunde „Belka“ und „Strelka“ sowie eine große Anzahl kleinerer Ver-

suchstiere. Nach 18 Erdumläufen leitete man die Rückführung durch das Zünden der Bremstriebwerke ein. Die Kabine gelangte ebenso unbeschädigt und sicher zur Erdoberfläche wie der übrige Raumschiffkörper, von dem sie während des Abstieges getrennt worden war. Damit war das Kernproblem bemannter Raumflüge zum erstenmal praktisch gelöst worden. Außer diesen technischen Erprobungen zum Rückführungsproblem diente der Flug von Raumschiff-Satellit-2 vor allem raumfahrtbiologischen Untersuchungen und umfangreichen Strahlungsmessungen. Zum Studium der physiologischen Belastungen bediente man sich vor allem der beiden Hunde, deren Körperfunktionen und -reaktionen als Meßwerte zu den Bodenstationen übertragen wurden. Außerdem gestattet zwei eingebaute Fernsehkameras, das Verhalten der Tiere auch direkt zu beobachten. Die Strahlungseinflüsse auf Lebewesen untersuchte man mit Hilfe zahlreicher kleinerer Versuchstiere, zu denen auch mehrere hundert Insekten (*Drosophila* u. a.) gehörten. Außerdem befanden sich Pflanzensamen, *Chlorella*-Algen und eine große Anzahl von Bakterien- und Bakteriophagenkulturen in der Kabine.

Die Ausrüstung für Strahlungsmessungen im Raumschiff-Satellit-2 war ebenfalls außerordentlich vielseitig. Der Analyse der primären Kosmischen Strahlung dienten mehrere Tscherenkow-Zähler, die durch Geiger-Zählrohre gesteuert wurden. Dabei konnte man eine Strahlung erfassen, die Atomkerne mit den Kernladungszahlen 4 bis 16, das heißt die Elemente Helium und Sauerstoff, enthält. In einer anderen aus Tscherenkow-Zählern bestehenden Meßapparatur ließen sich durch verschieden abgestufte Abschirmungen Primärteilchen mit den Kernladungszahlen 5, 15 und 30 getrennt registrieren. Diese Messungen führten zu der sonnenphysikalisch außerordentlich wichtigen Feststellung, daß die Sonne auch als Strahlungsquelle für schwere Atomkerne angesehen werden muß. Ein dritter Komplex zur



Strahlungsuntersuchung bestand aus einem Block von Kernspuremulsionspaketen. Die Kernspurplatten wurden nach zehnstündiger Belichtungszeit noch während des Fluges auf automatischem Wege entwickelt. Man wählte dieses Verfahren, um die Zuverlässigkeit der Identifikation einzelner Kernspuren zu steigern. Bei einigen der Emulsionsblöcke hatte man außerdem durch abgestufte Abschirmungen eine Selektivität (Trennschärfe) für Strahlungsteilchen verschiedener Energien herbeigeführt. Neben diesen drei Meßgruppen gab es noch eine Reihe weiterer Strahlungsmeßgeräte, die an verschiedenen Stellen des Raumflugkörpers untergebracht waren und mit denen die Gesamtstrahlungsintensität der kosmischen Teilchenstrahlung gemessen werden konnte. Erstmals wurden einige Geiger-Zählrohre, die für besondere Zwecke mit Beryllium-Fenstern versehen waren, durch künstlich um ihre Halterung erzeugte Magnetfelder und besondere Blendensysteme gegen den Störeinfluß von Elektronen aus den Strahlungsgürteln geschützt. Die umfangreiche wissenschaftliche Ausrüstung des Raumflugkörpers schloß schließlich noch verschiedene Gerätegruppen zur Untersuchung der solaren Ultraviolett- und Röntgenstrahlung ein.

Zur Erweiterung der mit dem Raumschiff-Satellit-2 gesammelten Erfahrungen startete im Dezember 1960 der dritte Raumflugkörper dieser Serie. Seine Ausrüstung und Aufgaben waren weitgehend identisch mit denen seines Vorgängers. Nach gelungenem Start konnten während des annähernd vierundzwanzigstündigen Raumfluges eine Fülle wichtiger Meßwerte gewonnen werden. So ergab sich beispielsweise aus den Zählimpulsen eines parallel geschalteten Paares von Geiger-Zählrohren, die mit Glimmerfenstern ausgestattet waren, daß ein enger Zusammenhang zwischen der Korpuskularstrahlung und den Anomalien des erdmagnetischen Feldes besteht. Nachdem das wissenschaftliche Programm erfüllt und der Rückführungsvorgang eingeleitet war, ergab sich für

den Abstieg allerdings ein so ungünstiger Bahnverlauf, daß der Raumflugkörper beim Eindringen in die dichteren Schichten der Erdatmosphäre durch aerodynamische Aufheizung verglühte. Die sorgfältige Auswertung dieses Versuches trug sicher nicht unwesentlich dazu bei, daß die sowjetischen Wissenschaftler mit den im März 1961 gestarteten Raumschiff-Satellit-4 und Raumschiff-Satellit-5 in jedem Fall das gesamte Flugprogramm vollendet zum Abschluß bringen konnten. In beiden Raumschiffen befanden sich je ein Versuchshund und umfassende meßtechnische Ausrüstungen. Da es vornehmlich um die Überprüfung aller Systeme des Rückführungsprogrammes ging, beschränkte man sich in beiden Fällen auf einen Erdumlauf.

Juri Gagarin und German Titow — erste Menschen im Kosmos

Das Ergebnis der Versuchsreihe mit unbemannten Raumschiff-Satelliten war insgesamt so zufriedenstellend ausgefallen, daß man sich schon knapp drei Wochen nach dem Flug von Raumschiff-Satellit-5 zum Start des ersten bemannten Raumflugkörpers entschloß. Der 12. April 1961 brachte den weltbewegenden Auftakt zur bedeutendsten Etappe der Raumfahrtforschung. Von einer Mehrstufenrakete mit 600 Mp Schub wurde Wostok-1 auf eine Erdumlaufbahn zwischen 181 und 327 km Höhe gebracht. In der hermetischen Kabine des Raumflugkörpers befand sich als erster Kosmonaut der Erde der Fliegermajor Juri A. Gagarin (geb. 1934). Der Start fand vom Kosmodrom Baikonur aus statt und führte das 4725 kg Masse betragende Raumschiff auf eine Bahn, die eine Neigung von $64,95^\circ$ und eine Umlaufzeit von 89,1 min hatte. Nach einmaliger Erdumrundung und insgesamt 108 min Flugzeit landete Wostok-1 wohlbehalten bei Smelowka (Gebiet Saratow) im vorausberechneten Raum. Um technische Einzelheiten des Landeverfahrens zu erproben, hatte sich

Juri Gagarin während des Abstieges in wenigen tausend Meter Höhe mit seinem Pilotensitz aus der Raumkabine herauskatapultiert. Er landete völlig sicher am Fallschirm. Der Verlauf dieses kühnen Unternehmens war eine wissenschaftliche Sensation ersten Ranges, wie sie die Welt in dieser Wirksamkeit wohl kaum jemals zuvor erlebt hatte. In allen Teilen der Erde löste dieser großartige Erfolg der sowjetischen Wissenschaft stürmische Bewunderung und Anerkennung aus.

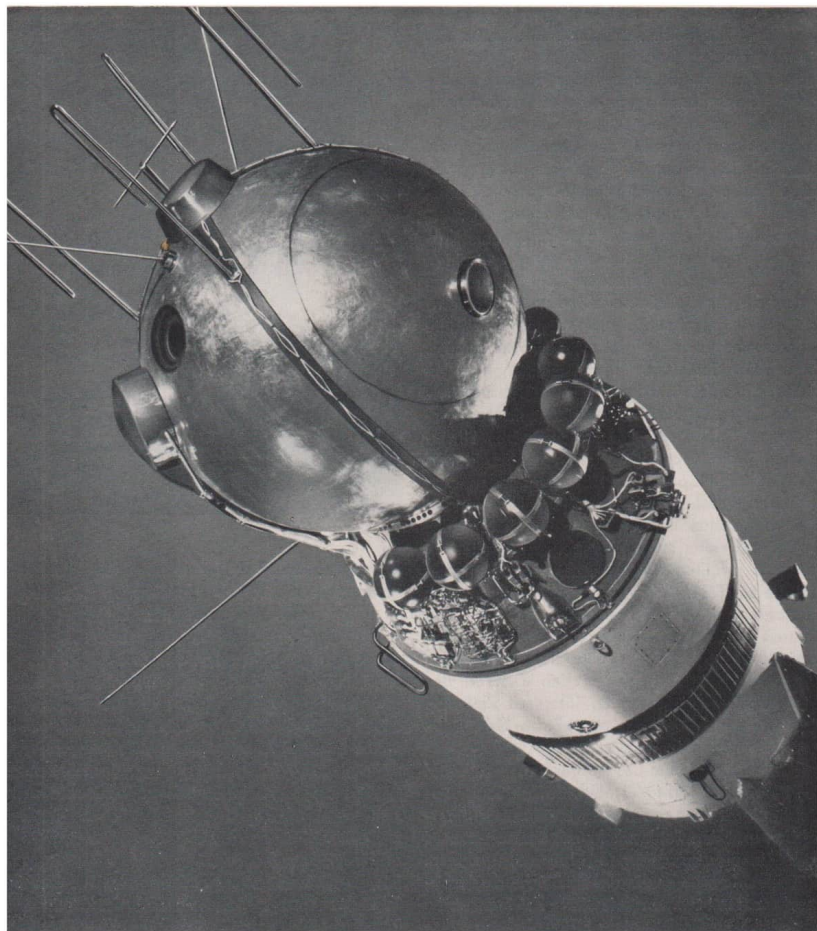
Während des Fluges bestand zwischen dem Kosmonauten und den Erdstationen eine zweiseitige Funkverbindung auf verschiedenen Frequenzen. Außerdem war die Pilotenkabine mit einer Fernseh-Übertragungsanlage ausgerüstet, durch die der Kosmonaut ständig beobachtet werden konnte. Seine Körperfunktionen und -reaktionen übermittelte ein funktechnisches Meßwertübertragungssystem. Es ermöglichte so, den Zustand des Kosmonauten laufend zu kontrollieren. Das Unternehmen war so angelegt und technisch durchgestaltet, daß Gagarin bei Störungen den Flug an jeder beliebigen Stelle seiner Umlaufbahn hätte abbrechen können. Wie der Verlauf des Fluges und seine ständige Überwachung jedoch bewiesen, erfüllten die technischen Vorkehrungen und die sorgfältigen Trainingsvorbereitungen des Kosmonauten alle Voraussetzungen für den sicheren vollen Ablauf des Unternehmens. Besonders wichtig war die Feststellung, daß auch der menschliche Organismus den Zustand der Schwerelosigkeit über einen längeren Zeitraum ohne störende oder gar gefährliche Nebenwirkungen ertragen kann.

Das Arbeitsprogramm des Kosmonauten während des Fluges war recht vielseitig. So hatte er ständig die Funktionen der Bordapparaturen zu überwachen und den Funkverkehr mit Bodenstationen nach einem vorgegebenen Plan aufzunehmen. Außerdem konnte er die Erdoberfläche direkt beobachten. Drei temperaturisolierte Kabinenfenster ermöglichten dies. Mit einer Handkamera machte



er entsprechende Aufnahmen. Seine unmittelbaren Eindrücke sprach er auf Tonband. Zu einem im Programm vorgeschriebenen Zeitpunkt nahm er Trinkwasser und speziell zubereitete Nahrungsmittel aus Tuben zu sich, um den Ablauf dieser physiologischen Funktionen unter den Bedingungen der Schwerelosigkeit zu überprüfen. Alle seine Wahrnehmungen hatte er schließlich noch in einem Logbuch festzuhalten. Die Schlußphase des Fluges, die Rückkehr, hätte er sogar selbst durch Betätigung einer Handsteuerung einleiten können. Aus verschiedenen Erprobungsgründen überließ man aber diese Funktion den dafür vorgesehenen automatischen Systemen.

Die Begeisterung über diesen sensationellen Erfolg der sowjetischen Raumfahrtforschung war kaum abgeklungen, als sich der zweite bemannte

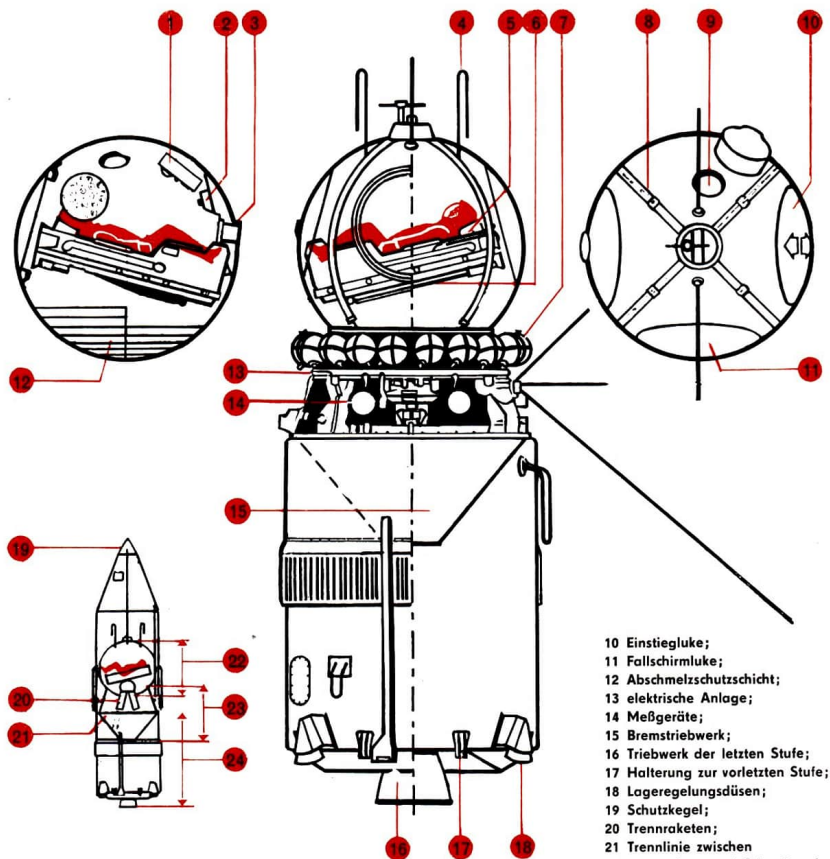


Raumflugkörper der Sowjetunion zum Satellitenflug um die Erde erhob. Am 6. August 1961 startete in Baikonur der Fliegermajor German St. Titow (geb. 1935) mit Wostok-2. Sein Flugauftrag lautete, rund 24 Stunden in der Bahn zu verbleiben und dann nach etwas mehr als sieben Erdumkreisungen in einem vorgegebenen Zielraum auf dem Territorium der Sowjetunion zu landen. Das erweiterte wissenschaftliche Programm sollte nachweisen, daß der Mensch den Einwirkungen der Schwerelosigkeit zumindest für die Dauer eines Tages ohne Schaden ausgesetzt werden kann. Die Ansichten der Experten gingen darüber zu dieser Zeit noch weit auseinander. Einige hielten wesentliche Beeinträchtigungen des Wohlbefindens und damit auch der Leistungsfähigkeit für wahrscheinlich. Andere widersprachen dieser Ansicht. Sie sahen in einem zweckentsprechenden Spezialtraining der Piloten hinreichende Möglichkeiten, negative Auswirkungen der Schwerelosigkeit sogar für mehrere Tage und noch längere Zeiträume zu vermeiden. Eine eindeutige Entscheidung dieser Frage vermochte allerdings der Flug Titows noch nicht zu erbringen. Der Kosmonaut verspürte in der Anfangs- und Endphase des Unternehmens keine negativen Wirkungen der Schwerelosigkeit, war aber im Mittelabschnitt des Fluges zeitweilig empfindlichen Störungen des Orientierungsvermögens und des Gleichgewichtssinnes ausgesetzt. Ausgelöst wurden diese Erscheinungen durch relativ schnelle Kopfdrehungen. Die eingehende Analyse dieses Teils der wissenschaftlichen Untersuchungen beim Flug von Wostok-2 führte für die sowjetischen Raumfahrtphysiologen zu neuen und wesentlich verbesserten Methoden in der Trainingsvorbereitung von Raumpiloten. Alle technischen und wissenschaftlichen Systeme von Wostok-2 funktionierten einwandfrei. Die zweiseitige Funkverbindung mit den Bodenstationen in der Sowjetunion konnte auch dann noch aufrecht erhalten werden, als sich das Raumschiff in seiner größten Entfernung zum Territorium

der UdSSR befand. In der Schlußphase des Rückführungsmanövers und des Abstieges ließ sich der Kosmonaut wieder aus seiner Kabine katapultieren. Er landete ebenso unversehrt am Fallschirm wie die Raumkabine.

Die Raumflugkörper vom Typ „Wostok“ bestanden jeweils aus einer für die Rückkehr ausgebildeten kugelförmigen Raumkabine, die mit vier Spannbändern auf einer Gerätezelle befestigt war. Außerdem schuf ein mit zahlreichen Abreißkontakten versehener Haltebügel eine Verbindung zu den elektrischen, elektronischen und funkttechnischen Anlagen der Gerätezelle. Diese blieb bis zum Einflug in die Umlaufbahn mit der letzten Stufe der Trägersrakete verbunden. Am Übergangsteil von Gerätezelle zur Raumkabine waren ringförmig Druckgasbehälter für die Klimaanlage und Druckgasdüsen des Lageregelungssystems angeordnet. Die Gerätezelle enthielt die Energieversorgungsanlage, Steuerungseinrichtungen, Anlagen für den Rückführungsvorgang, Druckgasbehälter des Lageregelungssystems, Meßwertübertragungs- und Bahnverfolgungspeilsender sowie Fernseh- und sonstige Funksysteme mit ihren Antennen. Die Gerätezelle und die mit ihr verbundenen Anlagen wurden nach dem Einleiten des Rückkehrmanövers von der Raumkabine getrennt und verglühten beim Eintritt in die dichteren Schichten der Erdatmosphäre.

Die einschließlich der letzten Antriebsstufe in die Umlaufbahn transportierte Masse betrug 6170 kg, wovon 4730 kg auf das Wostok-System entfielen. Die kugelförmige Rückkehrkabine hatte eine Masse von 2400 kg und einen Durchmesser von 2,3 m. Mit Endstufe und Gerätezelle ergab sich eine Gesamtlänge von 7,35 m. Die Kugelkabine war außen mit einer besonderen Abschmelz- und Wärmeisolationsschicht überzogen, die während des Eintauchens in die dichteren Schichten der Erdatmosphäre die gefährliche aerodynamische Aufheizung von der eigentlichen Kabinenstruktur fernhielt. Im Kabinenkörper befanden sich drei



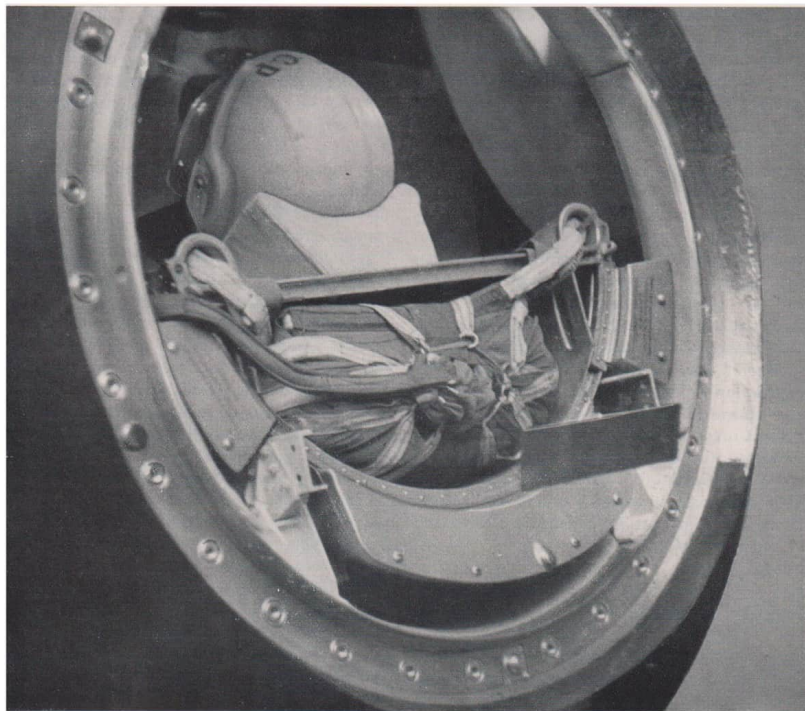
1 Instrumentenbrett;
2 Fernsehkamera;
3 Bullauge;

4 Antenne;
5 Konturensessel;
6 Katapulteinrichtung;

7 Druckgasbehälter;
8 Spannbänder;
9 Bullauge;

10 Einstiegluke;
11 Fallschirm Luke;
12 Abschmelzschuttschicht;
13 elektrische Anlage;
14 Meßgeräte;
15 Bremstriebwerk;
16 Triebwerk der letzten Stufe;
17 Halterung zur vorletzten Stufe;
18 Lageregelungsdüsen;
19 Schutzkegel;
20 Trennraketen;
21 Trennlinie zwischen
letzter Stufe und Schutzkegel;
22 Kugelschale;
23 Gerätezone;
24 letzte Antriebsstufe

Blick durch die Einstiegluke
einer „Wostok“



größere Luken, die während des Raumfluges durch glatt eingepaßte Deckel verschlossen waren, sowie drei kleinere Sichtfenster aus hitzebeständigem Glas. Durch die Einstiegluke der Kabine konnte sich der Kosmonaut in der letzten Phase des Abstieges (etwa 7000 m über der Erdoberfläche) hinauskatapultieren und anschließend am Fall-

schirm landen. Eine Automatik sorgte selbstverständlich vorher für das Absprengen des Luken- deckels. Der Raum hinter der zweiten Luke enthielt den Bergungsfallschirm für die Kabine, der in etwa 4000 m Höhe in Funktion trat, während die dritte Luke technologischen Zwecken diente. Aus Sicherheitsgründen waren die Kosmonauten

jeweils mit einem im Notfall hermetisch abschließenden Raumanzug bekleidet, der eine separate Anlage zur Atemluftversorgung hatte. Sie ruhten in einem Andruck-Konturensessel, mit dem sie sich bei der Landung auch katapultieren konnten. Mit der Sitzeinheit waren außerdem das Klimasystem für den Raumanzug, Funk- und Peilgeräte, Notproviant sowie ein zusammengelegtes Schlauchboot und andere Ausrüstungen verbunden, von denen der Kosmonaut nach der Landung gegebenenfalls Gebrauch machen konnte. Mit der übrigen, außerordentlich umfangreichen Ausrüstung der Kugelkabine (Klimaanlage, Nahrungsreserven, Assanierungsanlage, Anzeige- und Steuerungseinrichtungen, Fernsehkameras, Funk- und Peilgeräte, Meßwertübertragungssystem, Tonbandgerät usw.) betrug die Gesamtmasse aller installierten Anlagen rund 800 kg. Die Kabinenklimaanlage arbeitete mit normaler Luftzusammensetzung unter normalem Druck, wobei die Lufttemperatur beliebig zwischen 12 °C und 25 °C und die Luftfeuchtigkeit zwischen 30 Prozent und 70 Prozent geregelt werden konnten. Alle Systeme waren auf eine maximale Funktionsdauer von 10 Tagen ausgelegt.

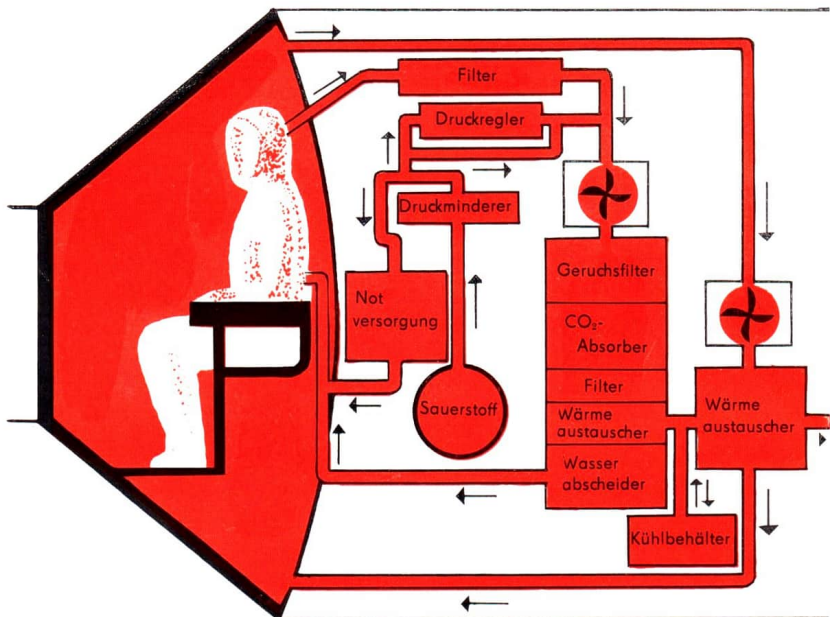
Projekt „Mercury“

Nach den glänzenden Erfolgen der sowjetischen Raumflugtechnik steigerten die USA ihre Bemühungen bis zum äußersten, um im bemannten Raumflug unbedingt den Anschluß zu halten. Der beträchtliche Rückstand ihrer Trägerraketentechnik ergab allerdings in der Anfangsphase Lösungen und Experimente, bei denen Zuverlässigkeit und Sicherheit noch nicht restlos zu überzeugen vermochten. Die geringe Nutzmassekapazität der Trägerraketen führte zu einer in mancher Hinsicht beängstigend „unterentwickelten“ Konzeption für den ersten bemannten amerikanischen Raumflugkörper. Schon die Gesamtmasse dieser

Raumkapseln des Projekts „Mercury“, sie lag bei etwa 1300 kg, ließ keine derart vollkommenen Lösungen erwarten, wie es bei den wesentlich massereicheren Wostok-Raumflugkörpern der Fall war. Auf Vergleiche technischer Einzelheiten kann hier verzichtet werden. Es genügt darauf hinzuweisen, daß eigentlich jedes der Mercury-Experimente mit mehr oder weniger schwerwiegenden technischen Mängeln in Konstruktion und Ausrüstung der Raumkapsel behaftet war. Als besonders kritisch erwiesen sich die automatische Lagestabilisierung der Raumkapseln während des Fluges und die Klimaregelung im hermetisch abgeschlossenen Innenraum.

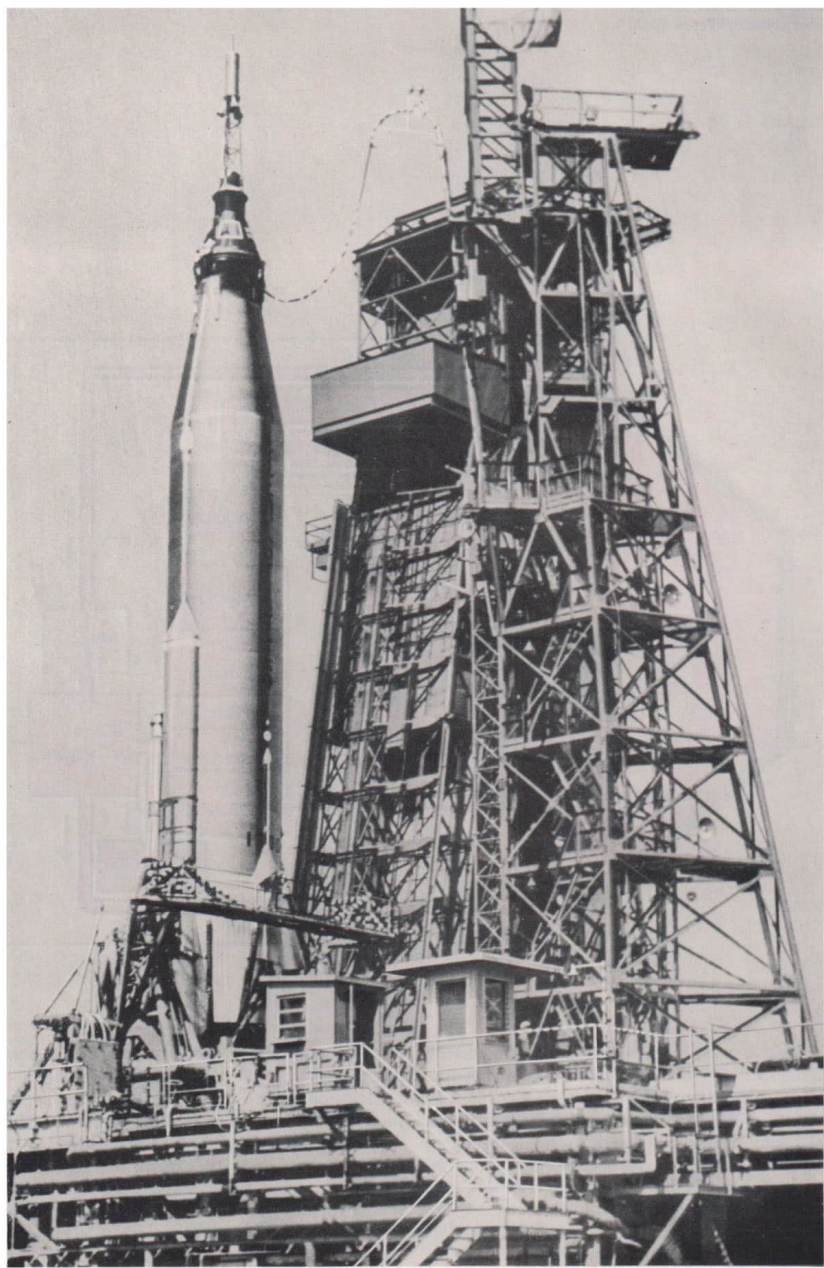
Als Trägerrakete verwendete man die für militärische Zwecke geschaffene zweistufige „Atlas“, da sie als einzige der vorhandenen amerikanischen Raketen die erforderliche Gesamtantriebsleistung aufzubringen vermochte. Nach einem Freiflugtest ohne Pilot, bei dem die Rakete 65 s nach dem Start explodierte, wick man zunächst auf eine Zwischenlösung mit der Mittelstreckenrakete „Redstone“ aus. Diese Rakete ermöglichte jedoch nur kurzzeitige ballistische Flüge über Entfernungen von einigen hundert Kilometern. Auch hierbei war der erste Versuch wieder ein Mißerfolg. Mit dem zweiten Experiment gelang schließlich der erste Teilerfolg. Als „Passagier“ wirkte in diesem Fall der Schimpanse „Ham“ mit. Bei einem erneuten Versuch mit einer „Atlas“ am 21. Februar 1961 kam eine unbemannte Mercury-Kapsel auf eine ballistische Flugbahn, die eine Entfernung von rund 2300 km überbrückte. Doch schon beim nächsten Versuch im Mercury-Atlas-Programm (25. April 1961) mußten die amerikanischen Wissenschaftler wieder einen Mißerfolg in Kauf nehmen. Ein Fehler im Lenksystem zwang den Sicherheitsoffizier der Leitzentrale, die Trägerrakete nach 30 s zu sprengen.

Um aber auf jeden Fall dem inzwischen von der Sowjetunion mit Wostok-1 erzielten Erfolg ein gelungenes amerikanisches Experiment an die Seite



zu stellen, griff man erneut auf Mercury-Redstone zurück. Am 5. Mai 1961 erhob sich der amerikanische Pilot Alan B. Shepard mit der MR-3 zu einem ballistischen Flug über eine Entfernung von 483 km; die dabei erreichte Flughöhe betrug 184 km. Dieses Unternehmen war raumflugtechnisch selbstverständlich nicht mit der Erdumkreisung Gagarins zu vergleichen. Eine Wiederholung des Experimentes am 21. Juli 1961 mit MR-4 und dem Piloten Virgil J. Grissom (1926–1967) endete

dann beinahe mit einer Katastrophe. Grissom konnte sich nur mit Mühe aus der im Atlantik versinkenden Kapsel retten. Die Wasserlandungen ihrer Raumkapseln bildeten übrigens für die USA aus geographischen und bahnmechanischen Gründen einen charakteristischen Bestandteil der Flugprogramme. Der wissenschaftliche Wert beider Mercury-Redstone-Flüge war auf Grund der kurzen Flugdauer (etwa 15 min) allerdings nicht mit dem der sowjetischen Unternehmen zu vergleichen.



Nach dem ersten erfolgreichen Satellitenflug einer allerdings unbemannten Mercury-Atlas am 13. September 1961 bildete der Flug von MA-5 am 29. November, bei dem die Kapsel mit dem Schimpansen „Enos“ an Bord zwei Erdumkreisungen ausführte, den Abschluß der amerikanischen Versuche im Jahre 1961.

Die Vorbereitungen auf den ersten Satellitenflug eines amerikanischen Astronauten wurden im Jahre 1962 mehrmals durch technische Schwierigkeiten und ungünstiges Wetter unterbrochen. Der Start gelang schließlich am 20. Februar 1962 mit MA-6. In der auf den Namen Friendship-7 getauften Raumkapsel umkreiste der damals 40-jährige Pilot John N. Glenn (geb. 1921) die Erde dreimal, ehe er nach einem Flug von 4 Stunden und 56 Minuten auf dem Atlantik niederging. Es dauerte weitere 18 Minuten, bis die Friendship-7 von einem Zerstörer der amerikanischen Marine an Bord genommen werden konnte. Beim Flug zeigten sich deutlich einige der Unzulänglichkeiten des Raumflugkörpers, auf die schon hingewiesen wurde. So mußte Glenn zur Unterstützung des versagenden automatischen Stabilisierungssystems selbst mit der Handsteuerung eingreifen. Durch Fehlfunktionen der Klimaanlage hatte er außerdem zeitweilig Temperaturen bis etwas über 40 °C zu ertragen.

Als zweiter amerikanischer Astronaut startete dann am 24. Mai 1962 Malcolm S. Carpenter (geb. 1925) in der Mercury-Kapsel Aurora-7 mit MA-7 zu einer ebenfalls dreimaligen Umkreisung der Erde. Eine Verzögerung beim Zünden der Bremsraketen führte dazu, daß die niedergehende Raumkapsel den vorgesehenen Zielort im Atlantik um etwa 350 km überflog und erst 42 min nach der Landung aufgefunden und geborgen werden konnte. Außer der Flugüberwachung hatte Carpenter ein umfangreiches Beobachtungsprogramm zu bewältigen. Es betraf verschiedene Sicht- und Erkennungsuntersuchungen im Außenraum, den der Pilot über ein Periskop beobachten konnte.

Wostok-3 und Wostok-4 im Gruppenflug

Während diese amerikanischen Experimente zum bemannten Raumflug in ihrer technischen Perfektion und wissenschaftlichen Ausbeute noch beträchtlich hinter dem letzten sowjetischen Unternehmen mit Wostok-2 zurückblieben, rüsteten sich die Raumfahrtspezialisten in der Sowjetunion schon zu einem qualitativ neuen Experiment. Nach sorgfältigen Auswertungen und Vorbereitungen starteten sie am 11. August 1962 ihren dritten bemannten Raumflugkörper mit dem Kosmonauten Andrijan G. Nikolajew (geb. 1929) an Bord. In aller Welt rechnete man schon fast von vornherein mit einer mehrtägigen Dauer des Unternehmens. Die Sensation wurde aber perfekt, als am 12. August die Meldung vom Start eines weiteren bemannten Raumflugkörpers mit Pawel R. Popowitsch (geb. 1930) als Piloten um die Erde eilte. Die raumflugtechnische Bedeutung dieses Doppelunternehmens wurde sofort klar, als verlautete, daß die Bahn von Wostok-4 nahe mit der Anfangsbahn von Wostok-3 übereinstimmte. Lediglich eine durch die Erdrotation bedingte Verschiebung ergab einen gewissen Unterschied in der räumlichen Lage beider Bahnen. Durch diese günstigen bahnmekanischen Bedingungen gelang es, die Raumflugkörper unmittelbar nach dem Einflug von Wostok-4 in seine Umlaufbahn einander bis auf etwa 6,5 km nahe zu bringen. Im weiteren Verlauf des Unternehmens wurde dieser Abstand allerdings wieder sehr schnell größer. Doch hatten die sowjetischen Raketen-techniker damit eine der sehr wesentlichen Ausgangspositionen zur Lösung eines wichtigen Problems der Raumflugtechnik, des sogenannten Rendezvousproblems, erreicht. Die grundlegenden Gedanken zum Rendezvousproblem gehen schon auf die Pionierzeit der Astronautik zurück. Man hatte bei Betrachtungen über Antriebsleistungen und Nutzmassekapazitäten von chemischen Raketen schon sehr bald erkannt,



daß deren begrenztes Leistungsvermögen für größere Raumflugkörper, wie sie für weitgesteckte Ziele der Raumfahrt (zum Beispiel Planetenexpeditionen) unbedingt nötig werden, zu technisch kaum noch realisierbaren Trägerraketen führen müßten. Den Ausweg sah man darin, die Gesamtmasse der geplanten großen Raumflugeinheit (zum Beispiel bemannte Großsatelliten der Erde, Raumschiffe mit vielköpfigen Besatzungen) in mehrere vorgefertigte Baugruppen aufzuteilen. Die kleineren Bauteile sollen dann als Nutzmasse von leichter realisierbaren Trägerraketen in den Raum gebracht und dort schließlich zusammen-

montiert werden. Die Einschätzung der Grenzen chemischer Antriebe erwiesen sich später nach praktischen Erfahrungen als weitgehend richtig. Die Raumfahrtwissenschaftler stehen damit heute vor der Aufgabe, das Problem im geschilderten Sinne technisch zu lösen. Selbst wenn man zunächst von allen zusätzlichen Problemen einmal absieht, wie sie die Teilnahme von Menschen an derartigen Experimenten mit sich bringt, erwachsen hieraus für die Raumflugtechnik ganz ungewöhnliche Anforderungen. Gilt es doch, zwei oder noch mehr getrennt beförderte Nutzmassekörper so in möglichst ähnliche Freiflugbahnen zu bringen, daß

sie durch nachfolgende Bahnkorrekturen einander bis zum unmittelbaren Kontakt angenähert werden können. Zu einem solchen „Rendezvous“ im Weltall sind nicht nur absolut zuverlässige Träger- raketen notwendig, die größten Anforderungen werden vor allem an die Steuerungs- und Lenk- technik für das Annäherungsmanöver gestellt. Sie liegen in mancher Hinsicht noch höher als bei den meisten anderen Raumflugexperimenten der gegenwärtigen Entwicklungsetappe.

Der Doppelflug von Nikolajew und Popowitsch brachte außerdem wichtiges raumfahrtbiologisches Material. Nikolajew stellte immerhin mit 94 Stunden 25 Minuten einen neuen Rekord für den Dauer- aufenthalt eines Menschen unter Raumflugbedin- gungen auf. In seiner Wostok-3 umkreiste er die Erde 64mal. Sein Kamerad Popowitsch brachte es mit Wostok-4 programmgemäß auf 70 Stunden 59 Minuten bei insgesamt 48 Erdumkreisungen.

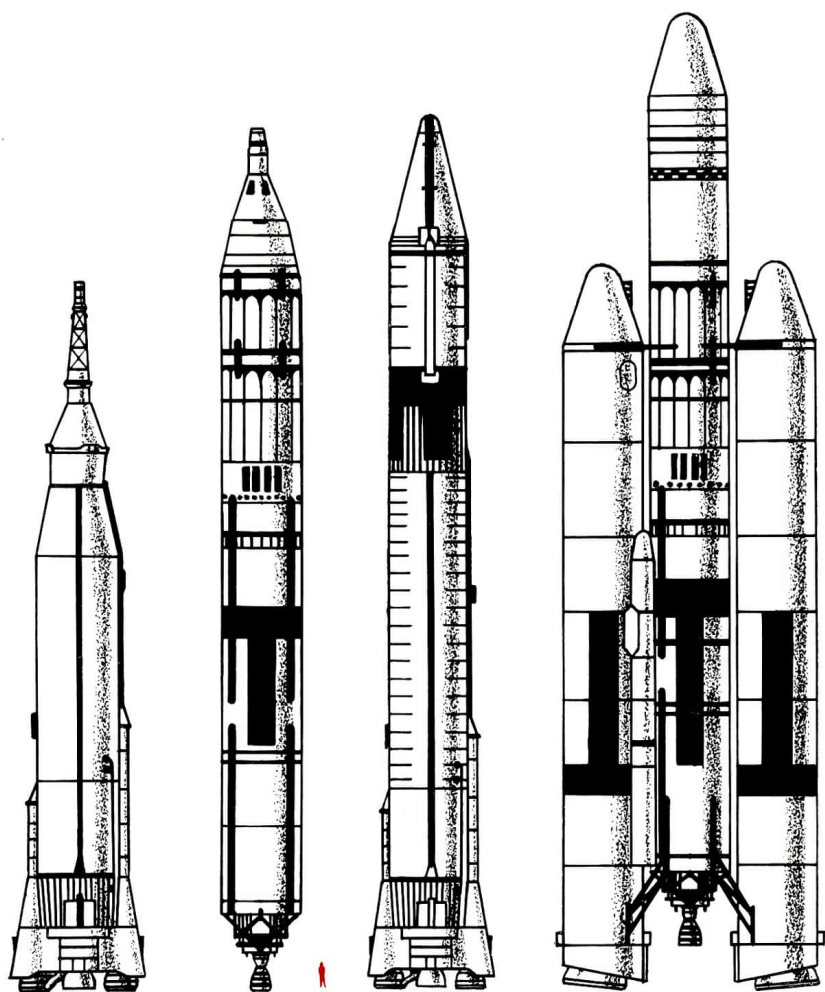
Im einzelnen wollten Raumfahrtmediziner zusätz- liche Angaben über den Einfluß von Weltraum- bedingungen bei lang dauernden Raumflügen, speziell über die Arbeitsfähigkeit des Menschen unter anhaltendem Schwerelosigkeitseinfluß er- langen. Beide Raumpiloten hatten aus diesem Grunde ein umfangreiches Arbeitsprogramm zu erfüllen; dazu gehörten der laufende Funk- und Funksprechverkehr mit Bodenstationen und von Raumflugkörper zu Raumflugkörper, verschiedene wissenschaftliche Beobachtungen und koordinierte Handlungen beider Kosmonauten unter Einschalt- ung ihrer Bord-Bord-Verbindung. Da sich beide Piloten unter nahezu gleichen Raumflugbedin- gungen befanden, bot sich den Wissenschaftlern, die durch Meßwertübertragung und Fernsehbeob- achtung von der Bodenstation aus die Kosmonauten überwachten, eine ausgezeichnete Möglichkeit zu vergleichenden Untersuchungen. Es wurden Puls- und Atmungsfrequenz, Bioströme des Herzens, des Gehirns und der Augenmuskeln sowie galvanische Hautreaktionen registriert. Wie die Messungen zeigten, ergaben sich für Nikolajew

und Popowitsch keine wesentlichen Unterschiede in den physiologischen Reaktionen gegenüber den Erfahrungen bei Gagarin und Titow.

„Mercury“-Abschluß

Die Reihe der Unternehmen mit bemannten Raum- flugkörpern schloß für das Jahr 1962 mit dem Aufstieg des amerikanischen Piloten Walter M. Schirra (geb. 1923) ab. In der Mercury- Kapsel Sigma-7 gelangte er am 3. Oktober 1962 in eine erdnahe Umlaufbahn. Kurz vor der dritten Erdumkreisung traf man in der Leitzentrale nach Zustimmung des Piloten die Entscheidung, daß Sigma-7 weitere dreimal die Erde umfliegen sollte, womit sich die Flugdauer auf 9 Stunden 13 Minuten erhöhte. 21 Minuten nach Zündung der Brems- raketen landete die Raumkapsel diesmal im Pa- zifik, und zwar rund 450 km nordöstlich der Midway-Insel. Auch bei diesem Flug zeigten sich wieder Störungen in der Klimaanlage, die zu einem beträchtlichen Temperaturanstieg im Raum- anzug des Piloten führten. Schirra gelang es aber während des Fluges, den Fehler in der Tempe- raturregelungsanlage selbst zu reparieren.

Ihren Höhe- und gleichzeitig Schlußpunkt hatten die Mercury-Versuche im Mai 1963, als Gordon L. Cooper (geb. 1927) in der Kapsel Faith-7 zu einem 34stündigen Raumflug aufstieg. Bei diesem Unternehmen wollte man vor allem noch mehr Informationen über raumfahrtbiologische Pro- bleme (Körperfunktionen, Arbeitsfähigkeit, Ernäh- rung, Strahlungseinwirkungen) als in den eigenen früheren Versuchen sammeln. Außerdem sollten Navigationsprobleme untersucht werden, die sich aus der Rendezvousteknik sowie der Rückführung von bemannten Mondflugkörpern ergeben. Um diese Ziele zu erreichen, mußte man allerdings mit der technisch etwas abgeänderten Raumkapsel Faith-7 bis nahe an die Grenze der Sicherheits- reserve des Mercury-Versorgungssystems gehen.



Diese äußerste Möglichkeit lag für die vorangegangenen Versuche bei 31 bis 35 Stunden in der Atemluftreserve und sogar nur bei 20 Stunden für die Batterie-Stromversorgung.

Der Flug, der insgesamt 34 Stunden 20 Minuten dauerte (23 Umläufe), verlief trotz des vermehrten Risikos einwandfrei. Er erbrachte durch die wesentliche Verbreiterung des Arbeitsprogrammes, zu dessen Bewältigung die ausgezeichnete persönliche Leistung des Piloten wesentlich beitrug, die bis dahin besten Beiträge zum bemannten Raumflug der USA-Astronautik. Die biologischen Untersuchungen wurden dabei erstmalig im Rahmen des Mercury-Programmes durch Fernsehbildübertragungen unterstützt, deren geringe Bildfolge, nämlich alle 2 Sekunden 1 Bild, den Informationsgehalt allerdings wesentlich einschränkte.

Zu einer dramatischen Steigerung kam es in der Schlußphase, die jedoch der Pilot wegen seiner ausgezeichneten Disziplin und ungewöhnlichen Kaltblütigkeit meisterte. Beim 19. Umlauf meldete Cooper plötzlich, daß eine Signallampe auf seinem Armaturenbrett aufgeleuchtet sei, die im Normalfall nach Zündung der Bremsrakete die automatische Einleitung aller Operationen zur Rückführung anzeigen sollte. Fieberhafte Bahnvermessungen zeigten aber, daß von einem Beginn des Abstieges in Wirklichkeit keine Rede sein konnte, da sich die Kapsel noch immer in der normalen Umlaufbahn befand. Die Bodenstationen stellten sofort zwei Kontrollen an, bei denen die Astronauten Glenn und Carpenter ihrem Kameraden in Faith-7 assistierten. Dabei bemerkte man, daß das automatische Programm für die Rückkehrreinrichtung der Kapsel tatsächlich unaufhaltsam ablief. Daraufhin wurde Cooper der Befehl erteilt, den Landevorgang manuell zu steuern. Mit größter Ruhe und Umsicht bewältigte dann der Pilot das notwendige Operationsprogramm mit solcher Exaktheit, daß er die präziseste Landung aller Mercury-Flüge vollbrachte. Nur 6,4 km von dem zur Bergung eingesetzten Flug-

zeugträger „Keasarge“ entfernt setzte seine Raumkapsel auf dem Wasser auf.

Erste Kosmonautin: Valentina Tereschkova

Fast genau einen Monat nach dem Abschluß des Mercury-Programmes, am 14. und 16. Juni 1963, setzten die sowjetischen Raumfahrtspezialisten mit einem zweiten Doppelflug die Reihe ihrer aufsehenerregenden Experimente zum bemannten Raumflug fort. Am 14. Juni startete Valeri F. Bykowski (geb. 1934) mit Wostok-5 zum bis dahin absolut längsten Raumflug eines Menschen. Er umrundete die Erde 81mal und kam dabei auf 119 Flugstunden. Die größere Sensation bildete jedoch zweifellos der Start der ersten Kosmonautin der Erde, Valentina W. Tereschkova (geb. 1937), die am 16. Juni mit Wostok-6 aufstieg. Die in aller Welt bewunderte und gefeierte sowjetische Frau erreichte eine Flugdauer von 71 Stunden und war damit länger in einer astronautischen Freiflugbahn als alle vor ihr gestarteten amerikanischen Astronauten zusammen. Sie umkreiste die Erde rund 48mal. Beide Flüge verliefen mit der für die Wostok-Flüge gewohnten Präzision und endeten mit sicheren Landungen in den vorgesehenen Gebieten etwa auf dem 53. Breitengrad.

Die Ziele dieses Unternehmens setzten folgerichtig die beim ersten Gruppenflug begonnenen Untersuchungen fort. Erstens ging es um weitere Vorerprobungen zur Lösung des Rendezvous-problems; zweitens sollten weitere Studien über die Einflüsse länger dauernder Raumflüge angestellt werden. Besonders von den vergleichenden Betrachtungen über die Reaktionen eines weiblichen und eines männlichen Organismus erwartete man aufschlußreiche Informationen. Hinzu kam ferner die Erprobung neuer medizinisch-biologischer Untersuchungsmethoden. Außer diesem Hauptprogramm gab es für die Kos-

monauten noch ein spezielles Arbeitsprogramm. Dazu gehörten vor allem Beobachtungen der Erdoberfläche und ihrer Wolkenbedeckung sowie Beobachtungen von Sonne, Mond und Sternen. Schon aus den ersten Verlautbarungen nach Beendigung des zweiten Doppelfluges ging hervor, daß wichtige neue Unterlagen über verschiedene raumfahrtbiologische Probleme erhalten werden konnten. So erwies sich auch die Ausrüstung des Raumflugkörpers, die etwas auf seine Führung durch einen weiblichen Kosmonauten abgeändert worden war, als vollauf zweckmäßig und gelungen. Im Rahmen eines speziellen physiologischen Testprogrammes lösten sich Tereschkowa und Bykowski mehrfach aus ihren Haltegurten und erledigten verschiedene Prüfungsaufgaben in freischwebendem Zustand. Nach den dabei zur Bodenstation übertragenen physiologischen Meßwerten zeigten ihre Körperfunktionen keine wesentlichen Unterschiede gegenüber dem Verhalten im angeschnallten Zustand. Auch während der im Programm vorgesehenen Schlafpausen blieben die Meßwerte für beide Kosmonauten zufriedenstellend. Raumflugtechnisch bildete der Doppelflug von Wostok-5 und Wostok-6 eine bedeutsame Ergänzung zu den Vorläuferunternehmen. Obwohl man gegenüber dem Experiment mit Wostok-3 und Wostok-4 eine fast doppelt so große Startzeitdifferenz (46,5 Stunden gegen knapp 24 Stunden) vorgegeben hatte, gelang wiederum eine kurzzeitige räumliche Annäherung, die etwa gleich groß wie bei Wostok-3 und Wostok-4 war.

Woßchod — der Schritt zum Raumfahrtkollektiv

Als logische Fortsetzung dieser ersten Versuchsflüge mit Ein-Mann-Flugkörpern mußten zunächst zur Erweiterung der Erfahrungen in der Raumfahrtmedizin und zur Erprobung neuer raumflugtechnischer Verfahren mehrsitzige Raumschiffe ge-



startet werden. Eingeleitet wurde diese neue Phase wiederum von der Sowjetunion, und zwar mit dem Start von Woßchod-1 am 12. Oktober 1964. Dieser neue Typ hatte eine Masse von 5320 kg und war konstruktiv wesentlich verbessert worden. So war die hermetische Kabine nicht nur geräumig genug, um erstmalig eine dreiköpfige Besatzung aufzunehmen, sie war darüber hinaus technisch so hervorragend gestaltet, daß die Kosmonauten zum erstenmal auch keine speziellen Raumanzüge zu tragen brauchten. Das heißt, die Kabine gewährte

Valentina Nikolajewa-Tereschkowa
während des Vorbereitungstrainings



in allen Phasen des Unternehmens der Besatzung einen ausreichenden Schutz, der vor allem auf einer absolut sicheren Funktion der Lebenserhaltungssysteme (Klimaanlage) beruhte. Damit beschränkten die sowjetischen Raumfahrtwissenschaftler einen für die Zukunft richtungsweisenden Weg.

Die Besatzung von Woßchod-1 setzte sich aus dem Kommandanten Wladimir Komarow (1927 bis 1967), dem Wissenschaftler Konstantin Feoktistow (geb. 1926) und dem Arzt und Raum-

fahrtmediziner Boris Jegorow (geb. 1937) zusammen. Die Teilnahme von Jegorow erlaubte erstmalig, daß ein Mediziner an den Kosmonauten während des Raumfluges unmittelbar physiologische Untersuchungen vornahm, die die auf dem Funkweg übertragenen physiologischen Meßwerte vortrefflich ergänzten. Zur funkttechnischen Ausrüstung zählten außerdem noch Sende- und Empfangsanlagen für den Boden-Bord-Sprechverkehr, Fernsehbildübertragungen, Kommandoempfang und Bahnvermessung.



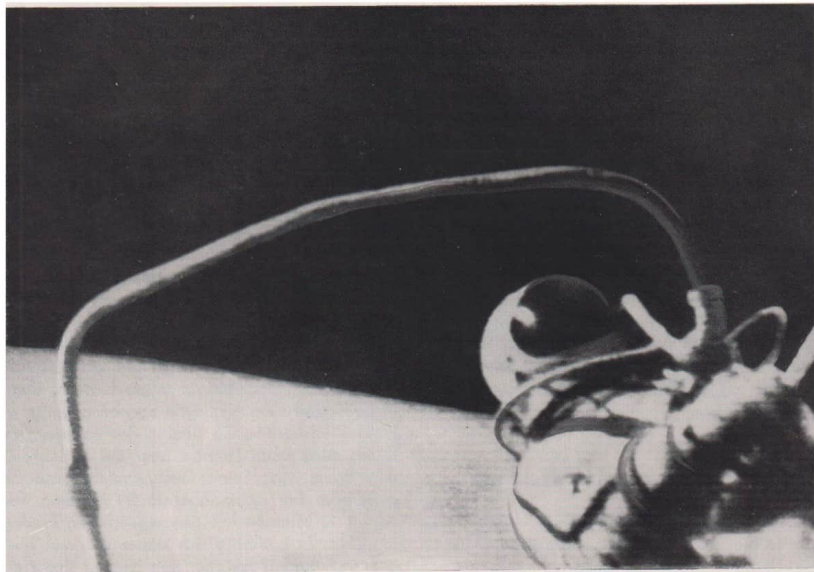
Eine raumflugtechnische Besonderheit war die Erprobung von neuen Systemen für die Fluglage-regelung, zu denen unter anderem auch elektrische Triebwerke gehörten. Um die Sicherheit des Raumflugkörpers bei der Rückführung zu erhöhen, war noch ein zweites, separates Brems-triebwerkssystem installiert worden. Außerdem hatte man ein verbessertes Landeverfahren geschaffen; nämlich unmittelbar vor dem Aufsetzen auf der Erdoberfläche bremsen zusätzlich außen angebrachte Hilfstriebwerke das Raumschiff ab, so daß dieses absolut sanft zu Boden kam. Die drei Kosmonauten konnten somit bis zur Landung in der Kabine verbleiben, wobei nach ihren Aussagen die Berührung mit dem Erdboden kaum zu spüren war. Das präzise arbeitende Landesystem brachte sie nach einer Flugzeit von 24 Stunden 17 Minuten (16 Umläufe) im vorgesehenen Gebiet zur Erde zurück.

Ein Mensch schwebt frei im Weltraum

Nach diesem erfolgreich verlaufenen Unternehmen gingen die sowjetischen Raumfahrtsspezialisten an die Vorbereitung eines außerordentlich kühnen Experimentes. Zum erstenmal sollte ein Mensch während eines Raumfluges die schützende Kabine verlassen und frei im Raum fliegen. Die große Bedeutung dieses Vorhabens war für die weitere Entwicklung der Raumfahrttechnik (Rendezvous-Verfahren, Wartung und Reparatur von Raumflugkörpern, Rettungsmanöver usw.) schon lange unbestritten. Mit einem entsprechend umgebauten Raumflugkörper vom Woßchod-Typ starteten dann am 18. März 1965 die beiden Kosmonauten Pawel Beljajew (geb. 1925) und Alexei Leonow (geb. 1934) zum ersten Unternehmen dieser Art. Die spezielle Neuerung an Woßchod-2 war eine Ausstiegsschleuse; sie erlaubte ein Verlassen der Kabine, ohne daß deren hermetischer Abschluß aufgegeben zu werden brauchte; bei

den späteren amerikanischen Gemini-Flügen war dieses aus Gründen einer zu geringen Konstruktionsmasse stets erforderlich.

Luftdruck und -zusammensetzung entsprachen in der Woßchod-Kabine während des gesamten Fluges etwa den irdischen Normalbedingungen. Beide Kosmonauten waren wieder mit Raumanzügen ausgerüstet, die diesmal speziell den Bedingungen einer freien Bewegung im Vakuum angepaßt waren. In einer einstündigen Übergangszeit stellten sich Beljajew und Leonow bei geschlossenen Anzügen über eine separate Klimaanlage auf reine Sauerstoffatmung (0,4 atm) um. Eine Druckreduktion der Anzugluft war notwendig, um die flexiblen Raumanzüge im Vakuum beweglich genug zu halten. Beljajew war als Kommandant während des Ausstiegsmanövers ebenfalls an den Sauerstoffkreislauf angeschlossen, damit er im Notfall seinem ausgestiegenen Begleiter zu Hilfe eilen konnte. Zu Beginn des zweiten Umlaufes stieg dann Leonow über die Schleuse in den Raum aus. Seine Gesamtaufenthaltsdauer außerhalb der Kabine betrug 20 Minuten, von denen 10 Minuten auf den eigentlichen Freiflug entfielen. Er entfernte sich dabei maximal etwa 5 m vom Raumflugkörper, mit dem er durch ein Sicherungskabel verbunden blieb. Zur Atemluftversorgung war er mit einem autonomen „Klimatornister“ ausgerüstet. Während des Freifluges führte Leonow Bewegungs- und Orientierungsübungen aus, stellte verschiedene Beobachtungen an und arbeitete mit einer Handkamera. Nachdem Leonow sein Ausstiegsprogramm erfüllt hatte, montierte er noch eine außen am Raumflugkörper angebrachte automatische Filmkamera ab, deren Bildstreifen ein erregendes Dokument dieses sensationellen Experimentes lieferte. Zur Beobachtung des Ausstiegsmanövers war außerdem eine Fernsehkamera eingebaut worden, die ihre Bilder auf einen Bildschirm in der Kabine und gleichzeitig zur Bodenstation übertrug. Die beiden Kosmonauten bewältigten während ihres



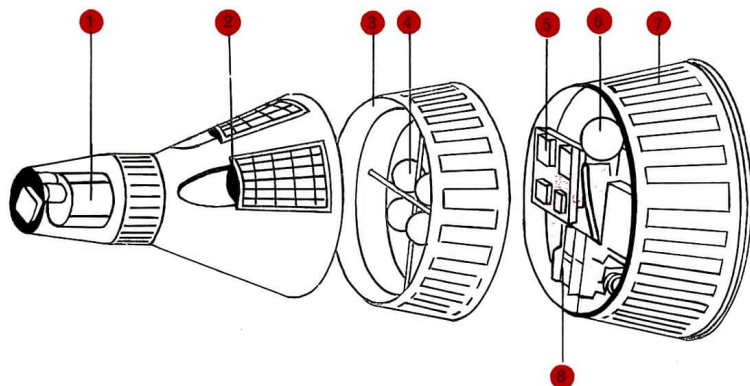
Raumfluges noch ein umfangreiches Beobachtungs- und Meßprogramm. Die Rückführung aus der Umlaufbahn sollte nach dem ursprünglichen Flugprogramm während des 17. Umlaufes eingeleitet werden; da jedoch eine Störung des Sonnensensors im Orientierungssystem auftrat, mußte die automatische Rückführungssteuerung abgeschaltet werden. Nach einem weiteren Umlauf führte Beljajew den Raumflugkörper mit der Handsteuerung zur Erdoberfläche zurück. Diese Handsteuerung wirkte auf die Fluglageregelung (Ausgangsposition für das Bremsmanöver) und die Einleitung des Zündeinsatzes der Bremstriebwerke.

„Geminí“ löst Rendezvousproblem

Nachdem die Sowjetunion mit ihren beiden Woßchod-Unternehmen in vielen Punkten neue Maßstäbe bei der Erprobung bemannter Raumflugkörper und damit ganz allgemein in der Raumflugtechnik gesetzt hatte, nahmen auch die USA ähnliche Experimente energisch in Angriff. Mit den Raumflugkörpern ihrer „Geminí“-Serie mußten sie sich jedoch der beträchtlich geringeren Nutzmassekapazität ihrer „Titan“-Trägerrakete anpassen. So betrug die Masse der Zwei-Mann-Raumflugkörper (daher „Geminí“, lat. Zwillinge)

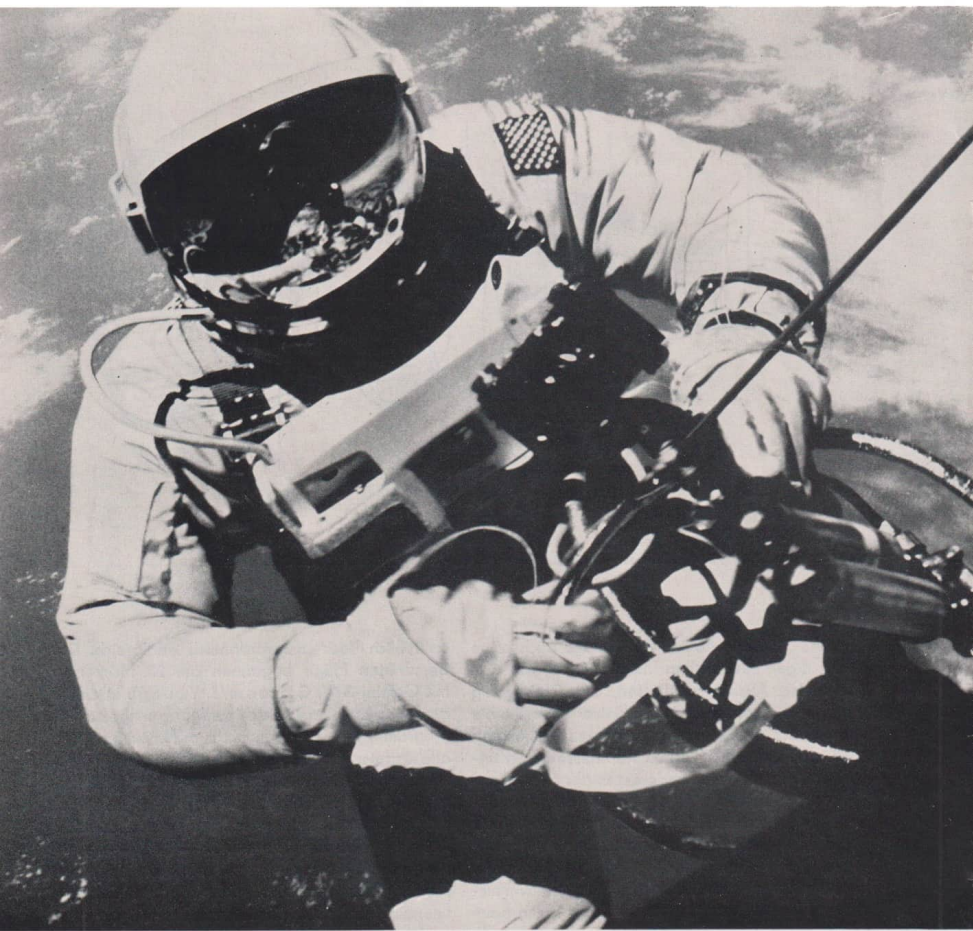
Aufbauschema der US-amerikanischen
„Geminii“-Raumflugkörper.

- 1 Landefallschirm;
- 2 Sichtfenster der Einstiegluke;
- 3 erster Adapter;
- 4 Bremstriebwerke;
- 5 funkttechnische Ausrüstung;
- 6 Treibstoffbehälter;
- 7 zweiter Adapter;
- 8 Bordenergieanlage



nur rund 3100 kg und ließ demzufolge auch keine aufwendigen zusätzlichen Installationen, wie beispielsweise Ausstiegsschleusen, zu. Gleichzeitig wurde man sowohl in konstruktiver Hinsicht als auch bei der Ausrüstung zur optimalen Ausnutzung aller greifbaren technischen Raffinessen gezwungen, wobei man unter anderem in der Grundkonzeption der Raumkabine auf die bei der Mercury-Serie gesammelten Erfahrungen zurückgriff. Trotz der durch diese Umstände gesteigerten Abhängigkeit von Funktionsstörungen in verschiedenen Untersystemen (zum Beispiel Bordenergieversorgung, Klimaregelung) verlief dieses Programm

schließlich doch außerordentlich erfolgreich. Die bemannten Flüge begannen am 23. März 1965 mit Gemini-3 (V. Grissom/J. Young). In einem mehrfach auf Terminbeschleunigung umgestellten Programm wurden dann bis zum November 1966 alle vorgesehenen Flüge dieser Serie, insgesamt zehn, abgewickelt. Beim Unternehmen mit Gemini-4 (J. McDivitt/E. White, 3. Juni 1965) unternahm auch zum erstenmal ein amerikanischer Astronaut (Edward White (1930–1967)) ein Ausstiegsmanöver, das eine 20 Minuten dauernde Freiflugphase umfaßte. Da White nicht, wie Leonow, über einen Klimatornister verfügte, blieb



er während des Ausstieges durch eine Schlauch-Kabel-Kombination mit der Klimaanlage und den elektrisch-funktechnischen Systemen der Raumkabine verbunden. Zur Unterstützung seiner Bewegung im freien Raum erprobte White erstmalig ein mit der Hand zu führendes Druckgas-Rückstoßgerät. Weil die Nutzmasse beschränkt war, mußte bei allen Ausstiegen aus den Gemini-Kapseln der hermetische Abschluß aufgegeben werden. In der geschlossenen Kabine herrschte eine Sauerstoffatmosphäre von 0,3 atm. Die gleiche Atmosphäre blieb dann während eines Ausstieges in den geschlossenen Raumanzügen beider Astronauten erhalten.

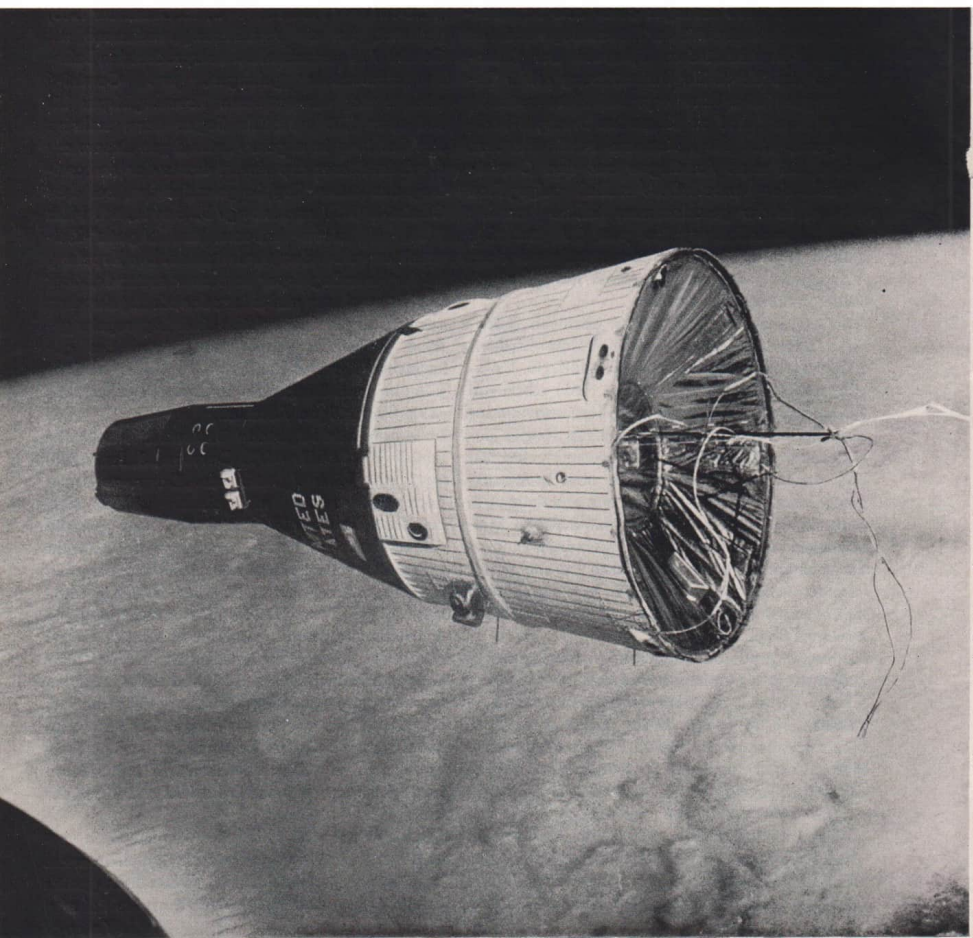
Auf Grund der im allgemeinen positiven Ergebnisse des viertägigen Gemini-4-Unternehmens wurde das Flugprogramm für Gemini-5 (G. Cooper/Ch. Conrad, 21. August 1965) schon auf 7 Tage ausgedehnt, wobei vor allem wertvolle Informationen über die Verträglichkeit länger andauernder Schwerelosigkeit gewonnen werden konnten. Darüber hinaus wurden aber im Arbeitsprogramm der Gemini-5-Besatzung erstmalig auch ganz offen die verschiedenen militärischen Zielsetzungen der Gemini-Serie erkennbar. Es ging dabei unter anderem vornehmlich darum, zu erkunden, inwieweit man später von bemannten militärischen Raumstationen aus die Erde kontrollieren kann.

Nach einer größeren Programmumstellung startete zunächst am 4. Dezember 1965 Gemini-7 (F. Borman/J. Lovell) zu einem bemerkenswerten Langzeitflug von 14 Tagen Dauer. Selbst diese noch kurz zuvor als außerordentlich extrem angesehene Flugzeit unter ständiger Schwerelosigkeit konnte der menschliche Organismus ohne schwerwiegende Folgen ertragen. Diese Feststellung war von großem raumfahrtmedizinischem Interesse, da man als Zeitprogramm für die Mondlandungsflüge bemannter Raumschiffe etwa 8 bis 10 Tage Dauer ansetzen muß. Nachdem sich Gemini-7 schon 11 Tage in Umlauf befand, wurde Gemini-6

(W. Schirra/Th. Stafford, 15. Dezember 1965) gestartet, um ein Annäherungsrendezvous mit Gemini-7 zu versuchen. Die entsprechenden Bahnkorrekturmanöver gelangen, und Gemini-6 näherte sich dem anderen Raumflugkörper bis auf etwa 0,30 m; beide flogen dann mehrere Stunden lang in engem Abstand gemeinsam um die Erde. Dieses Experiment diente der Vorbereitung des ersten Kopplungsrendezvous, bei dem Gemini-8 (N. Armstrong/D. Scott, 16. März 1966) mit einem unbemannten „Agena“-Zielsatelliten verbunden werden sollte. Die Kopplung beider Raumflugkörper kam zwar zustande, aber das Unternehmen mußte kurz danach abgebrochen werden, da die Fehlfunktion einer Lageregelungsdüse gefährliche Taumelbewegungen des gekoppelten Systems hervorrief. Mit einer Notlandung im westlichen Pazifik fand dieses Experiment seinen vorzeitigen Abschluß.

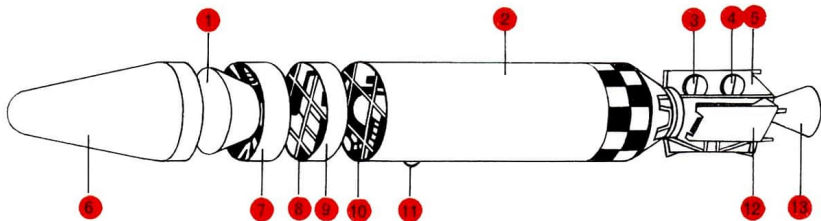
Auch dem nachfolgenden Unternehmen mit Gemini-9 (Th. Stafford/E. Cernan, 3. Juni 1966) war nur ein Teilerfolg beschieden. Das vorgesehene Kopplungsmanöver mit einem „ATDA“-Zielsatelliten konnte nicht stattfinden, weil sich die Abdeckhaube an dessen Kopplungsadapter nicht vollständig gelöst hatte. Der zweite Schwerpunkt des Programmes lag im Bereich der Raumfahrtmedizin. Es sollten weitere Erfahrungen über die Arbeitsmöglichkeiten und Belastungen freifliegender Raumfahrer gesammelt werden. Trotz einiger Schwierigkeiten, zu denen unter anderem das Versagen eines Klimatornistergerätes gehörte, konnte der als zweiter amerikanischer Astronaut ausgestiegene Copilot Eugene Cernan eine Freiflughdauer von 125 min erzielen. Er legte damit erstmalig mehr als einen Erdumlauf außerhalb der Raumkabine zurück.

Die restlichen drei Flüge der Gemini-Serie verliefen im wesentlichen ohne ernste Komplikationen. Das Kopplungsverfahren mit Zielsatelliten gedieh dabei bis zur vollkommenen Routine. Im Rahmen dieser Versuche stiegen Gemini-10 (J. Young/



**Aufbauschema eines US-amerikanischen
„Agena“-Zielsatelliten.**

- | | |
|--|--|
| 1 Kopplungs-(Docking-)Adapter; | 8 Hilfsausrüstung für Steuerung nach Kopplung; |
| 2 Treibstoffbehälter; | 9 Zellenring für Hilfsausrüstung; |
| 3 und 4 Druckgasbehälter (Stickstoff); | 10 Steuerungsgeräte; |
| 5 Lageregelungsdüse; | 11 Horizontsucher; |
| 6 Schutzkegel; | 12 sekundäres Antriebssystem; |
| 7 Radar- und Funkausrüstung; | 13 Haupttriebwerk |



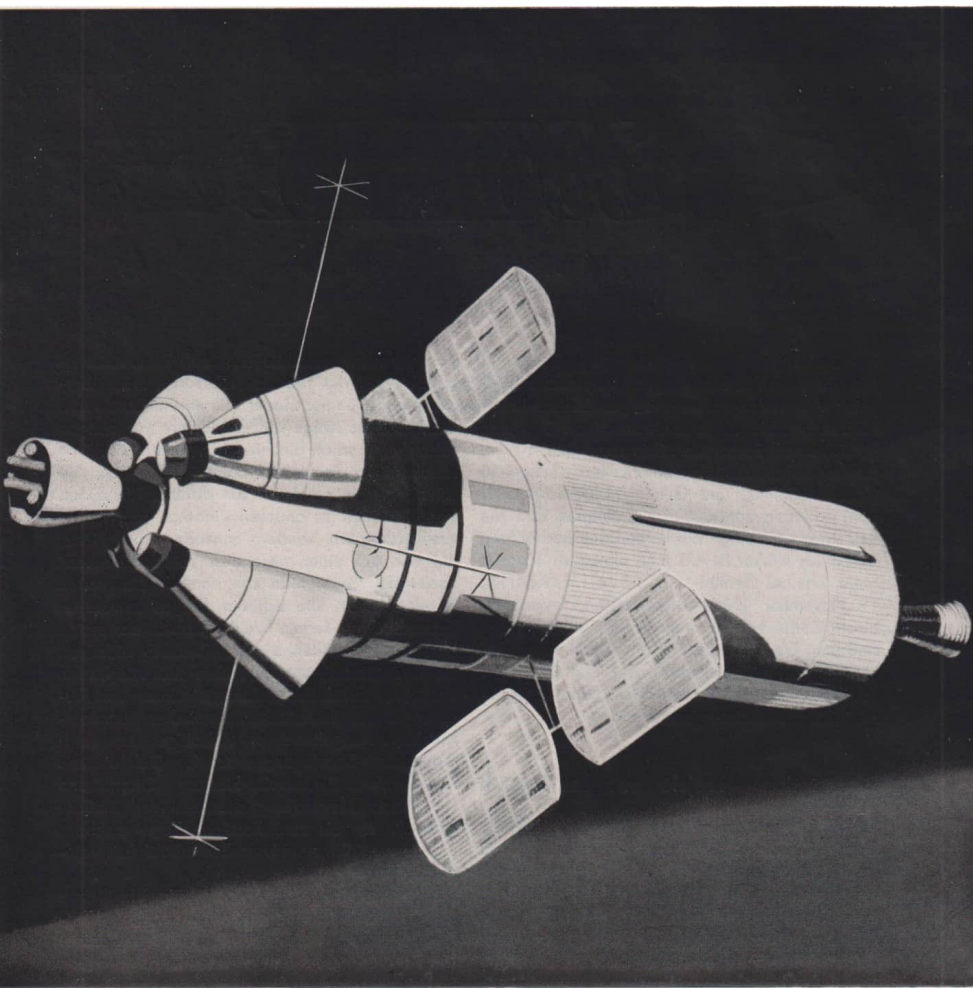
M. Collins, 18. Juli 1966) und Gemini-11 (Ch. Conrad/R. Gordon, 12. September 1966) unter Verwendung des jeweiligen Zielsatelliten-triebwerkes bis in Rekordhöhen von 766 und 1367 km auf. Ferner bemühte man sich, die Erfahrungen bei Ausstiegen zu erweitern. Gemini-10 (Michael Collins) und Gemini-11 (Richard Gordon) schienen zunächst zu bestätigen, daß die Belastung und damit die körperliche Erschöpfung wesentlich stärker ist, als man eigentlich erwartet hatte. Erst bei Gemini-12 (J. Lovell/E. Aldrin, 11. November 1966), dem letzten Experiment dieser Serie, konnte man einen Fortschritt verzeichnen. Der Astronaut Edwin Aldrin vermochte 126 min im Freiflug zu verbringen und dabei verschiedene Arbeiten zu verrichten, ohne unter Erschöpfungserscheinungen zu leiden.

Raumstation — Projekt der nahen Zukunft

Es wurde schon darauf hingewiesen, daß die Gemini-Experimente zu einem wesentlichen Teil dazu dienten, bemannte militärische Raumstationen vorzubereiten. Auch hierbei handelte es sich im Grunde wieder um Ideen der Raumfahrtklassiker. Allerdings schlossen diese fast alle von vornherein jeden Gedanken an einen militärischen Mißbrauch der Raumflugtechnik aus und konzentrierten

sich vielmehr ausschließlich auf Raumstationsprojekte für die friedliche Forschung. Es überrascht dabei immer wieder, mit welcher Breite und Gründlichkeit einige dieser Pioniere vor einigen Jahrzehnten schon die friedliche wissenschaftliche Nutzung der Raumfahrt durchdacht haben. Sie träumten nicht nur kühn von direkten Vorstößen des Menschen zu anderen Planeten und fernen Himmelskörpern, sondern entwarfen auch Pläne, die sich auf einer wesentlich „bescheideneren“ Ebene bewegten. Man sah nämlich die großen Schwierigkeiten, die sich den Flügen bemannter Raumschiffe zu fernen Weltkörpern in der ersten Zeit entgegenstellen würden. Deshalb widmeten sie ihre Studien zunächst dem näherliegenden Problem, nämlich Beobachtungsstationen und Forschungsbasen im erdnahen kosmischen Raum einzurichten. Ausgehend von vielseitigen raumflugtechnischen Überlegungen schufen Gelehrte wie Konstantin E. Ziolkowski, Hermann Oberth und Hermann Noordung die Idee der „Außenstation“, die bis zum heutigen Tage durchaus nichts von ihrer universellen Gültigkeit eingebüßt hat.

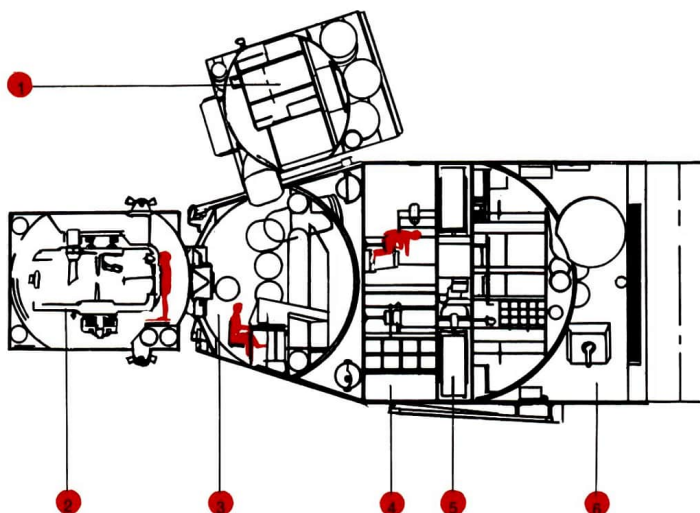
Unter Außenstation (bzw. Raumstation) in diesem klassischen Sinne wird seither in der Raumfahrtforschung jeder bemannte Satellit mit einer längeren bis sehr langen Verweilzeit in seiner Umlaufbahn verstanden, von dem aus die Be-



Projektzeichnung einer für 6 Mann Besatzung
ausgelegten Raumstation,
bei der „Gemini“-Kapseln
als Zubringer- und Rückkehrfahrzeuge
dienen sollen (USA)

Schema einer bemannten
projektierten Raumstation MORL (USA).

- 1 Experimentiereinheit;
- 2 Teleskopeinheit;
- 3 Kommandozentrale;
- 4 Laboratoriumsräume;
- 5 Zentrifuge;
- 6 Hilfsausrüstung für Ausstiegsexperimente



satzung kontinuierlich wissenschaftliche Untersuchungen des kosmischen Raumes und der Himmelskörper anstellen kann. Größere Raumstationen lassen sich darüber hinaus auch noch als Zwischenstation für weiter reichende astronautische Flugprogramme vorsehen. Diese anspruchsvolle Konzeption schließt natürlich eine Reihe von Voraussetzungen und Konsequenzen ein. Denken wir zunächst an die Forderung, daß ein derartiger Raumflugkörper möglichst lange und stabil in seiner Erdumlaufbahn verbleiben soll. Das wäre einerseits aus arbeitsökonomischen

Gründen zweckmäßig, weil damit die umfangreiche wissenschaftliche Ausrüstung am besten ausgenützt würde. Andererseits machen die allgemeinen betriebstechnischen Probleme eine größere Raumstation erst bei langer Betriebszeit wirtschaftlich, da der raketen- und raumflugtechnische Aufwand bei ihrer Einrichtung beträchtlich ist.

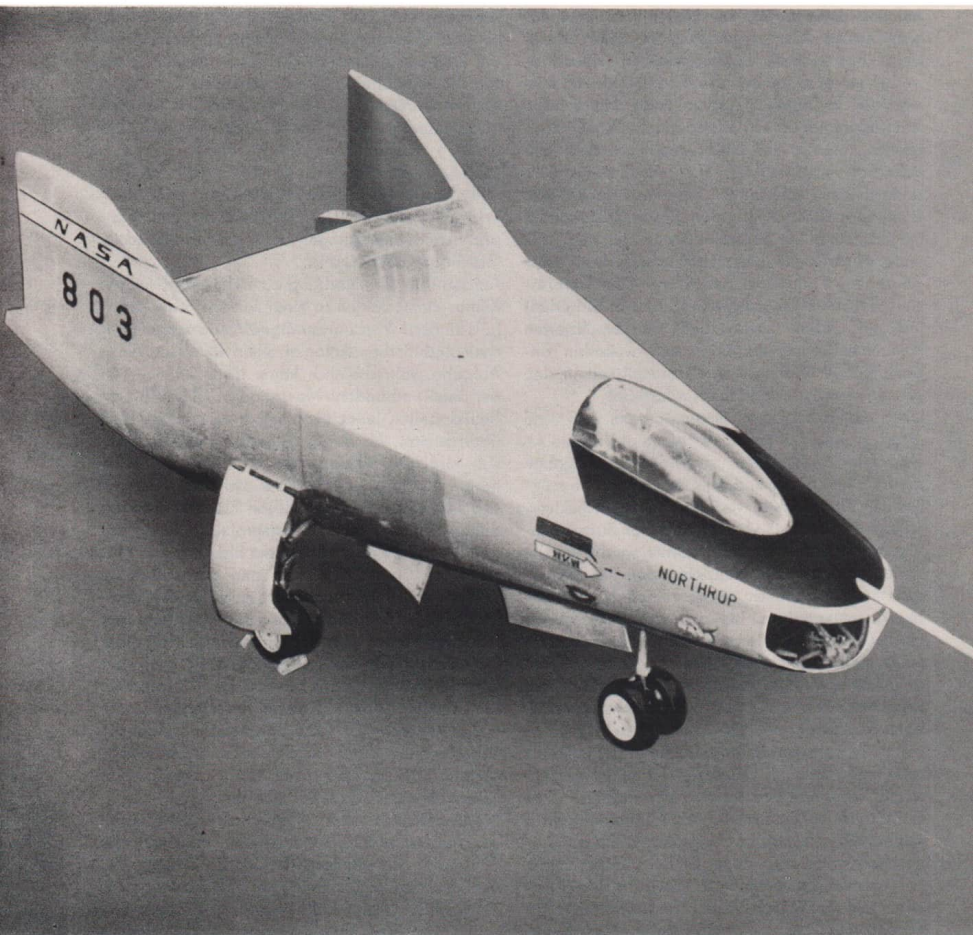
Die Verweilzeit eines künstlichen Satelliten in einer erdnahen Umlaufbahn wird maßgeblich davon bestimmt, wie weit seine Bahn von der Erdoberfläche entfernt ist. Im allgemeinen ist erst ab 1500 km Höhe die abbremsende Wirkung der hochatmo-

sphärischen Gase so gering, daß man bei einem kompakten Körper mit einer für längere Zeit annähernd stabilen Umlaufbahn rechnen kann. Mit größer werdender Bahnhöhe wächst aber auch die Strahlungsgefährdung für die Besatzung durch Annäherung an die unteren Bereiche des Strahlungsgürtels. Will man also eine Raumstation in größeren Höhen als 500 bis 1000 km umlaufen lassen, müssen hinreichend wirksame Schutzmaßnahmen für die Besatzung getroffen werden. Will man dagegen mit einer Raumstation näher an der Erdoberfläche bleiben, so muß man in Abständen oder kontinuierlich mit zusätzlichen Antriebsaggregaten die Bremswirkung der Erdatmosphäre kompensieren. Hilfsantriebe vom Typ der Ionentriebwerke könnten diese Aufgabe durchaus erfüllen. Aber auch in diesem Fall muß man zusätzliche Anlagen und Ausrüstungen in der Außenstation installieren, die die Nutzmasse maßgeblich beeinflussen. Wahrscheinlich wird man in der Praxis einen Kompromiß zwischen den beiden Einflußbereichen suchen, der zu einer optimal ökonomischen Lösung für die Nutzmassebilanz führt.

Die Frage nach dem zahlenmäßigen Umfang der Besatzungen von Raumstationen ist vorläufig nicht sicher zu beantworten. Bei anfänglichen Erprobungen mit kleineren Raumstationen (10 bis 30 t Masse) wird man sich natürlich auf einige wenige Raumpiloten beschränken müssen, um zunächst hinreichende Erfahrungen zu sammeln. Aber bei späteren ausgereiften Lösungen wäre durchaus eine verhältnismäßig zahlreiche Besatzung denkbar. Schon die betriebstechnischen Forderungen für die wissenschaftlichen Funktionen der Station werden sich wohl kaum durch wenige Fachleute, auch wenn ihnen zahlreiche automatische Einrichtungen zur Seite stehen, befriedigend erfüllen lassen. Hinzu kommt eine außerordentlich umfangreiche Reihe von raumflugtechnischen Problemen, die mit dem Betrieb einer solchen Station verbunden sind. Sie werden wahrscheinlich nur mit einem größeren Stab von technischem Spezial-

personal zu bewältigen sein. Das bedeutet, eine leistungsfähige Raumstation muß den Aufenthalt vieler Menschen für längere Zeit möglich machen. Daraus ergeben sich natürlich ganz extrem gesteigerte Anforderungen an den Umfang und die Qualität der technischen Anlagen und Ausrüstungen. Eine Außenstation klassischer Prägung wird also nur ein Großsatellit von entsprechend beträchtlicher Masse sein können. Die Studien zur Projektierung derartiger Großsatelliten ergaben im allgemeinen etwa 30 bis 100 t Umlaufmasse. Berücksichtigt man außerdem, daß eine Außenstation auch räumlich ein sehr umfangreiches Gebilde sein wird, dann läßt sich vielleicht angenähert ahnen, wie hoch die antriebs- und raumflugtechnischen Anforderungen derartiger Projekte tatsächlich sind. Lange Zeit war man der Meinung, daß es kaum jemals möglich sein würde, den für eine große Außenstation benötigten Massenaufwand (50 t und mehr) gleichzeitig mit einer einzigen Trägerrakete in eine Umlaufbahn zu bringen. Heute bewegt sich die Trägerraketentechnik jedoch durchaus schon in Richtung dieser Größenordnung. So vermag die für das „Apollo“-Mondflugprogramm der USA vorgesehene Rakete Saturn-5 etwa 120 t Nutzmasse in eine erdnahe Satellitenbahn zu transportieren.

Wenn man derartige Trägerriesen vermeiden will, dann muß allerdings das Rendezvousproblem perfekt gelöst werden. Ob es sich als zweckmäßiger erweist, die einzelnen Trägerraketen gleichzeitig zu starten oder nacheinander in einem von den Umlaufbedingungen geforderten Rhythmus, wird erst die Zukunft zeigen. Auf jeden Fall werden aber außergewöhnlich hohe Anforderungen an die Präzision des Leitsystems sowie an die gesamte Bodenorganisation gestellt, da die himmelsmechanische „Zwangsjacke“ eines solchen Vorhabens größere Abweichungen der einzelnen Nutzmasseile von der für die spätere Raumstation angestrebten Sollbahn nicht zuläßt. Haben die Baukomponenten-Raumflugkörper ihren



Aufstieg exakt erfüllt, so müssen sie, ohne die gemeinsame Bahn empfindlich zu stören, durch kleine und kleinste Bahnkorrekturen (Hilfstriebwerke) weiter angenähert und schließlich fest miteinander verbunden werden. Außerdem könnte sich noch ein anderes Verfahren anbieten. Danach sollten zunächst Seilverbindungen zwischen den einzelnen Raumflugkörpern geschaffen werden, wodurch ein impulsfreies „Zusammenziehen“ der Bauteile in Richtung auf den Gesamtschwerpunkt möglich wäre. Die Seilverbindungen könnten entweder durch Raumfahrer oder durch kleine raketengetriebene Flugkörper mit Radar- oder Infrarotsuchköpfen hergestellt werden. Mit Sicherheit läßt sich jedoch sagen, daß die komplizierten Zusammenführungsmanöver auch weiterhin unbedingt das Mitfliegen von Raumpiloten in den einzelnen Nutzmassekörpern erfordern.

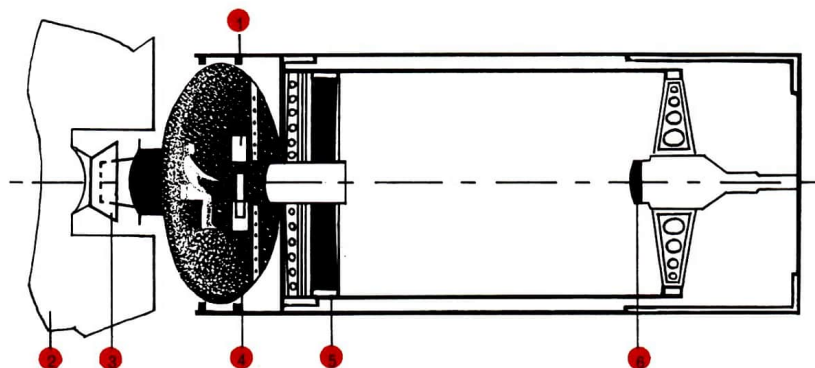
Über die technischen Lösungen beim Auf- und Ausbau einer Außenstation lassen sich heute im einzelnen noch keine verbindlichen Angaben machen. Im Prinzip sind sehr viele Varianten möglich. In den bisher veröffentlichten Projektvorschlägen reichen sie von der einfachen Zusammenfügung abgeschlossener Baueinheiten, die von der Form her den letzten Antriebsstufen des Trägersystems einschließlich seines reinen Nutzmasseanteils entsprechen, bis zu gewagten Spezialkonstruktionen, bei denen ein zunächst zusammenzubauendes Rohgerüst mit einer Kunststoffhaut umgeben wird. Man schlägt weiterhin aufblasbare Kunststoffhüllen als Ausgangsobjekte vor, die nach dem Aufblasen mit Gerüsten versteift werden sollen. In welchem Umfang dabei der frei im Raum arbeitende Mensch mitwirken kann, ist gegenwärtig noch nicht abzusehen. Aber auch nach dem Aufbau der Station und nach ihrer Inbetriebnahme reißen die schwierigen Aufgaben nicht ab. Abgesehen von der sorgfältigen Betriebsüberwachung, der Bahnkontrolle und -stabilisierung bleibt vor allem die Rendezvous-technik auch weiterhin ein Arbeitsgebiet von grundlegender Bedeutung.

Immerhin muß zur Versorgung und aus Sicherheitsgründen ein ständiger „Zubringerverkehr“ von der Erde aus ebenso möglich und garantiert sein wie die Rückführung einer abgelösten Besatzung zur Erdoberfläche. Diesen Pendelbetrieb könnten höchstwahrscheinlich Spezialflugkörper („Raumgleiter“) übernehmen, die in ihren aerodynamischen Eigenschaften den Hyperschallflugzeugen entsprechen. Sie würden es gestatten, in der Rückkehrphase die in vieler Hinsicht günstigen Flug- und Landebedingungen des aerodynamischen Gleitfluges auszunutzen.

Aufbau und Überwachung eines leistungsfähigen Klimasystems zählen in einer Außenstation ebenfalls zu den lebensnotwendigen Vorrichtungen. Mit chemotechnischen Anlagen allein wird man diese Aufgabe wahrscheinlich kaum lösen können, da der damit verbundene Massenaufwand bei langen Betriebszeiten jedes ökonomisch vertretbare Maß überschreitet. Als einzig sinnvoller Ausweg bietet sich hier eine Klimaanlage an, die den natürlichen biologischen Kreislauf zwischen Pflanzen und Menschen ausnutzt. Schon Ziolkowski schlug daher für sein Außenstationsprojekt eine „Orangerie“ vor. Ihre Pflanzen sollten nicht nur den notwendigen Sauerstoff liefern und das schädliche Kohlendioxid binden, sondern auch für die Regelung der Luftfeuchtigkeit und für einen Teil der Nahrung sorgen. An der Entwicklung derartiger biologischer Systeme wird gegenwärtig in der Raumforschung intensiv gearbeitet. Das Interesse der Forscher richtet sich dabei unter anderem auf einige Algenformen (zum Beispiel Chlorella), die sich einerseits durch hohe spezifische Sauerstoffabgabe, andererseits aber auch durch großen Nährstoffgehalt (Eiweiß) auszeichnen.

Weitere beachtenswerte Probleme für den Betrieb von Außenstationen ergeben sich aus dem lang dauernden Raumaufenthalt der Besatzung. Aus ökonomischen Gründen könnte trotz Ablösung die Zeit solcher Aufenthalte für das einzelne Besatzungsmitglied immerhin auf zwei bis drei Wochen

- 1 Lageregelungsdüse;
- 2 Teil der bemannten Raumstation;
- 3 Verbindungsadapter mit Schleuse;
- 4 hermetische Beobachterkabine;
- 5 Cassegrain-Hauptspiegel;
- 6 Sekundärspiegel



bemessen werden. Bekanntlich herrscht aber in einem Körper, der sich auf einer astronautischen Freiflughbahn befindet, Schwerelosigkeit. Nun haben zwar die bisherigen praktischen Erfahrungen gezeigt, daß unter Umständen der menschliche Organismus bis zu 30 Tagen Schwerelosigkeit ohne schwerwiegende Folgen ertragen kann. Doch wäre es zweifellos günstiger, wenn man in der Raumstation auch in dieser Beziehung möglichst irdähnliche Bedingungen schaffen könnte. Es gibt dafür ein einfaches Verfahren. Man braucht dem Stationskörper nur eine Eigenrotation zu geben, und in Abhängigkeit von der Entfernung zum Drehzentrum wird dann ein radialer „Fliehkraft-andruck“ entstehen, der als durchaus brauchbarer Ersatz für die fehlende natürliche Schwere an-

gesehen werden kann. Allerdings wäre es zweckmäßig, die Ausmaße der Raumstation senkrecht zur Rotationsachse nicht zu klein zu wählen, da sonst bei entsprechend schneller Rotation die Besatzung unter unangenehmen physiologischen Störeffekten (Gleichgewichts- und Orientierungsstörungen) leiden würde. Aus diesem Grunde sehen viele Raumstationsprojekte einen entsprechend weiträumigen Aufbau vor, meist in Form eines Ringes oder Rades mit „Achse“, „Speichen“ und hohler „Felge“.

Die Rotation des Stationskörpers würde aber für die meisten wissenschaftlichen Arbeiten an Bord der Raumstation mit recht unangenehmen Folgen verbunden sein. Einige Beobachtungsaufgaben könnten sicherlich gar nicht gelöst werden. Wir

brauchen dabei nur an astronomische Beobachtungen oder die meteorologische Überwachung der Erde zu denken. Hier wäre es unmöglich, von einer rotierenden Beobachtungsplattform aus zu genaueren Feststellungen oder gar Messungen zu kommen. Auch andere Messungen, bei denen eine bestimmte Richtungsbeziehung wesentlich ist (Kosmische Strahlung, Magnetfeld), würden unter dieser Voraussetzung kaum zu befriedigenden Ergebnissen führen. So wird man wenigstens einen Teil der Station, wahrscheinlich einen besonderen Aufbau auf der „Radnabe“, nicht an der Rotation teilnehmen lassen. In diesem raumstabilen Teil kann man die betreffenden Observatorien unterbringen. Technische Lösungen für das unterschiedliche Rotationsverhalten von Teilen der Station sind durchaus möglich. Ein raumstabiler Ansatz an einer Außenstation hätte außerdem den raumflugtechnisch wichtigen Vorteil, daß „anlandende“ Versorgungsflugkörper ohne zusätzliche komplizierte Flugmanöver oder Impulsstörungen mit der Station zusammengebracht werden könnten. Schon Noordung wies aber noch auf eine andere Möglichkeit hin. Er schlägt neben einem rotierenden „Wohnrad“ ein räumlich davon getrenntes „Observatorium“ vor, das nicht rotiert und von den Wissenschaftlern für nur kurze Arbeitsperioden mit kleineren „Raumtaxi“ aufgesucht werden soll. Außer den vorläufig unabsehbar großen Vorteilen, die derartige Großsatelliten der Wissenschaft als Weltraumlaboratorien und Beobachtungsplattformen bieten könnten, sind sie in rein astronautischer Hinsicht von nicht minder großer Bedeutung. Sobald nämlich bemannte Raumschiffe in den interplanetaren Raum geschickt werden sollen, wird man wegen des extrem großen Nutzmasseaufwandes und der relativ geringen Leistungsfähigkeit chemischer Raketenantriebe auf einen Direktstart von der Erdoberfläche verzichten müssen. Dies gilt auch dann, wenn man zur Verbesserung des interplanetaren Flugprogrammes Zusatzantriebe nach Art der später noch zu be-

sprechenden Ionentriebwerke verwenden will. Als einziger Ausweg bietet sich eine Montage-Satellitenbahn an, auf der größere Raumflugsysteme im Rendezvous-Verfahren aus einzelnen Bauteilen zusammengefügt und mit einer entsprechenden Ausrüstung und mit Antriebsmitteln versehen werden könnten. Es würde natürlich vorteilhaft sein, schon auf der Zwischenbahn einen vorhandenen Stützpunkt (Raumstation) einzubeziehen. So könnte man spezielle Leiteinrichtungen für die Außenbordmanöver in Außenstationen installieren sowie die künftigen Expeditionsteilnehmer an Bord der Station weitgehend auf ihre kommenden Aufgaben vorbereiten. Von der Montage-Zwischenbahn aus könnte dann der Abflug in den interplanetaren Raum und damit auch zu anderen Planeten vor sich gehen.

Das wären also in knappen Umrissen die ersten Ergebnisse und einige Aspekte der sowjetischen und amerikanischen Bemühungen um die Technik bemannter Raumflugkörper. Sicherlich ist die Kluft zwischen den Vorstellungen mancher utopischer Schriftsteller zu diesen Problemen und der rauen, nüchternen technischen Wirklichkeit noch riesengroß und wird wohl für lange, vielleicht sogar sehr lange Zeit auch noch recht groß bleiben. Darüber hinaus sollte nicht übersehen werden, daß jedes dieser avantgardistischen Unternehmen mit beträchtlichen Risiken verbunden ist und daß gewiß empfindliche Fehlschläge nicht ausbleiben werden. Aber der Weg, der sich damit abzuzeichnen beginnt, wird der Weltraumforschung im weiteren Verlauf zweifellos zu Möglichkeiten verhelfen, für die man heute noch längst nicht alle Konsequenzen abzusehen vermag. Der Vorstoß des wissenschaftlich forschenden Menschen zu anderen Himmelskörpern ist dabei eine der erregendsten Perspektiven.

Getragen von den ständigen Fortschritten der Raumfahrttechnik, werden der Erfüllung dieses alten Menschheitstraumes zukünftig zweifellos besondere Anstrengungen gewidmet sein.

Was noch vor wenigen Jahrzehnten ausschließlich in den Bereich phantastisch-wissenschaftlicher Spekulation zu gehören schien, hat durch die stürmischen Fortschritte der Raumflugtechnik in den letzten zehn Jahren schneller als erwartet ein technisch-reales Gesicht erhalten. Die Entsendung von Raumflugkörpern zum Mond und zu anderen Planeten (Venus, Mars) ist heute schon mit einer Reihe von erfolgreichen Experimenten auf der Haben-Seite der Raumflugbilanz verbucht. Es waren zwar bisher nur unbemannte Geräte, die für diese Zwecke eingesetzt wurden, aber in zunehmendem Maße bereitet sich auch schon der Mensch selbst auf eine Teilnahme an derartigen Unternehmen vor. Mit dem Vorstoß bemannter Raumfahrzeuge zu anderen Himmelskörpern strebt die Raumflugtechnik dem eigentlichen Höhepunkt des klassischen Raumfahrtgedankens zu – einem Höhepunkt, der durch die so geschaffenen Möglichkeiten der wissenschaftlichen Erschließung des Mondes und der Planeten unseres Sonnensystems ebenso einem Gipfelpunkt der modernen Welt-raumforschung gleichzusetzen wäre.

Das erste große Ziel in dieser Richtung wird zwangsläufig der Mond sein, weil seine mittlere Entfernung von der Erde, verglichen mit den sonst im Planetensystem gegebenen Abmessungen, mit rund 384 400 km immerhin noch außerordentlich „klein“ ist. Wie Projektstudien gezeigt haben, würde eine Mondexpedition mit weicher Landung auf seiner Oberfläche bei minimalem Zeitprogramm nicht mehr als etwa 8 bis 10 Tage in Anspruch nehmen. Funktechnische Verbindungen über diese Entfernung bereiten heute, im Gegensatz zu interplanetaren Entfernungen, keinerlei Schwierigkeiten mehr. Die bahnmekanischen Bedingungen im Raum Erde–Mond sind bis in ihre kleinsten Einzelheiten durchschaubar und liefern für die Flugprogramme eine Fülle von Variationsmöglichkeiten. Der Mond bietet damit in raumflugtechnischer Hinsicht ein geradezu ideales „Übungsfeld“. Außerdem ist er als Forschungs-

objekt selbst hinreichend lohnend und bietet darüber hinaus im Sinne einer „Außenstation“ gute Möglichkeiten und Vorzüge als natürlicher Stützpunkt für Weltraumforschung und Raumflugtechnik. Besonders die zuletzt erwähnte Rolle als außerirdischer Stützpunkt wird dem Mond für alle Zeiten einen bevorzugten Platz in den Projekten und Programmen der Raumfahrtforschung sichern. Aus diesem Grunde lohnt es sich vielleicht auch, einige der damit verbundenen Probleme etwas zu erläutern.

Mond als Raumstation

Zunächst einmal befindet sich der naturgegebene kosmische Stützpunkt „Mond“ in einer weitaus stabileren Bahn als jede künstliche Außen- oder Raumstation. Damit entfallen alle Sorgen mit einer ständigen Lagekontrolle sowie Bahn- und Lagestabilisierung. Außerdem kann man auf zusätzliche technische Kniffe zur Ausschaltung der Schwerelosigkeit verzichten, da der Mond eine Anziehungskraft hat. Sie entspricht an seiner Oberfläche etwa einem Sechstel der Schwerkraft, die auf der Erdoberfläche herrscht. Das „Anlanden“ von Raumschiffen auf dem Mond wirft freilich wesentlich größere Probleme auf als bei einer Raumstation auf erdnaher Umlaufbahn. Während es bei einer Raumstation nur darauf ankäme, ein normales Rendezvous- und Kopplungsmanöver auszuführen, verlangt das Niedergehen auf dem Mond außer kniffligen Flugmanövern vor allem einen erheblichen Aufwand an Treibstoffen und Triebwerken, die das Raumschiff bis zum zerstörungsfreien „weichen“ Aufsetzen auf der Mondoberfläche abbremsen müssen. Ohne eine solche Abbremsung würde ein Mondflugkörper aus bahnmekanischen Gründen mit einer Mindestgeschwindigkeit von etwa 2,5 bis 3 km/s auf dem Mond aufschlagen. Wie die bisherigen Experimente mit unbemannten Mondflug-



geräten vom Typ „Luna“ (Sowjetunion) und „Surveyor“ (USA) gezeigt haben, wurde die Klärung dieses schwierigen Problems jedoch schon mit guten Erfolgen in Angriff genommen.

Auf dem Mond ergeben sich unter anderem für alle Probleme, deren Lösung einen beträchtlichen Bauaufwand erforderlich machen würde (Schutz vor Strahlung und Meteoritentreffern; umfangreiches wissenschaftliches Instrumentarium), verhältnismäßig vorteilhafte Bedingungen. Zweifellos könnte man die vorhandenen natürlichen Baustoffe und Strukturelemente, nämlich das Material der festen Mondoberfläche, für den Ausbau einer Station mit verwenden. Mit Sicherheit wird es am besten sein, die Aufenthalts- und Arbeitsräume der Besatzung unter die Mondoberfläche zu verlegen und nur einige Beobachtungszentren sowie

die notwendigsten raumflugtechnischen Anlagen auf der Oberfläche zu belassen. So wird man dann die Mondstation als System untereinander verbundener, aber nach außen hermetisch abgeschlossener Räume und Anlagen ausführen und entsprechende Luftscheunen für die Verbindung zur atmosphärelosen Mondoberfläche vorsehen.

Wie die bisherige Entwicklung gezeigt hat, ergeben sich heute für Mondflüge mit unbemannten Geräten keine unlösbaren oder übermäßig schwierigen Probleme mehr. Mit großen chemischen Trägersystemen könnten Nutzmassen von einigen Dutzend Tonnen zum Mond gebracht und dort automatisch „weich“ gelandet werden. Auf diesem Wege ließen sich für das Anfangsstadium eines Aufbau- und Versorgungsbetriebes schon günstige Voraussetzungen schaffen. Zur Sicherung der



notwendigen Rückkehrverbindung könnte man auf dem Mond auch ausreichende Treibstoffreserven ansammeln und sonstige technische Zurüstungen (Wartung, Überprüfung und Startvorbereitungen) vornehmen. Außerdem könnte auf der Mondoberfläche ein umfangreiches funktechnisches Leitsystem eingerichtet werden. Ein solches System würde nicht nur die Sicherheit des Zubringerverkehrs erhöhen, sondern auch die Leitbasis für interplanetare Flüge durch ein gekoppeltes Führungssystem Erde—Mond wesentlich günstiger gestalten. Wie groß insgesamt die Vorteile des Starts interplanetarer Raumschiffe von einer umfassend ausgerüsteten Mondstation aus wären, läßt sich aus einem Vergleich mit einem Start von einer erdnahen Umlaufbahn aus (zum Beispiel Montagearbeiten unter Schwerelosigkeit) ohne weiteres

ermessen. Der wesentlichste Nachteil besteht darin, daß auch zum Abflug der bemannten Raumschiffe von der Mondoberfläche wiederum schubkräftige chemische Antriebssysteme notwendig sind. Die geringe Anziehungskraft des Mondes macht jedoch nur einen Antriebsbedarf von etwa 2,4 km/s erforderlich.

Dieser direkten Erschließung des Mondes durch den Menschen muß natürlich ein sorgfältiges Forschungs- und Versuchsprogramm vorausgehen, um die dort herrschenden Bedingungen zuvor möglichst weitgehend kennenzulernen. In der gegenwärtig schon angelaufenen Vorbereitungsphase des Unternehmens „Raumstation Mond“ steht daher der Erdtrabant im Mittelpunkt eines sehr breit angelegten Forschungsprogrammes. In diesem Fall überschneiden sich also astronomische und

astronautische Interessen wieder einmal besonders stark. Anfangs mußten die Astronomen ihren Kollegen von der Raumfahrt mit ihrem Wissen unter die Arme greifen. Sehr bald begann sich jedoch diese Hilfe auszuzahlen. Denn die Astronautiker verhalfen schon mit ihren ersten Mondexperimenten den Mondspezialisten unter den Astronomen zu Erkenntnissen, die zum Teil beträchtlich über den bisherigen Erfahrungsstand der Mondforschung hinausgehen. Die ersten Ansätze für diese gemeinsame Arbeit in der Erforschung des Mondes haben also in unseren Tagen schon begonnen. Wegen dieser gewissen Vorzugsstellung des Mondes unter den Forschungsobjekten des Kosmos, erscheint eine ausführlichere Betrachtung seiner Eigenschaften als Himmelskörper angebracht.

Visitenkarte des Mondes

Mit 3476 km ist der Durchmesser des Mondes im Vergleich zu dem einiger großer Trabanten anderer Planeten (Jupiter, Saturn, Uranus) offenbar als normal anzusehen. Interessant wird das Bild aber, wenn man die Größen der zugehörigen Planeten mitbetrachtet. Dann nimmt nämlich das Paar Erde-Mond eine eindeutige Ausnahmestellung ein. In keinem anderen Fall ist ein Trabant gegenüber seinem Zentralplaneten so ungewöhnlich groß wie hier. Dieser Tatbestand und eine Reihe damit zusammenhängender himmelsmechanischer Besonderheiten des Systems Erde-Mond haben in wissenschaftlicher Hinsicht dazu geführt, die Beziehungen beider Körper zueinander nicht so sehr als ein echtes Planet-Trabant-Verhältnis anzusehen. Man sollte eigentlich eher von einem „Doppelplaneten“ Erde-Mond sprechen. Diese Interpretation ist vor allem für die heute noch längst nicht klar erkannte Entstehungsgeschichte beider Himmelskörper bedeutungsvoll. Für allgemeinere Betrachtungen ist es nach wie vor zu-

lässig, den Mond als Trabanten oder Satelliten der Erde zu bezeichnen.

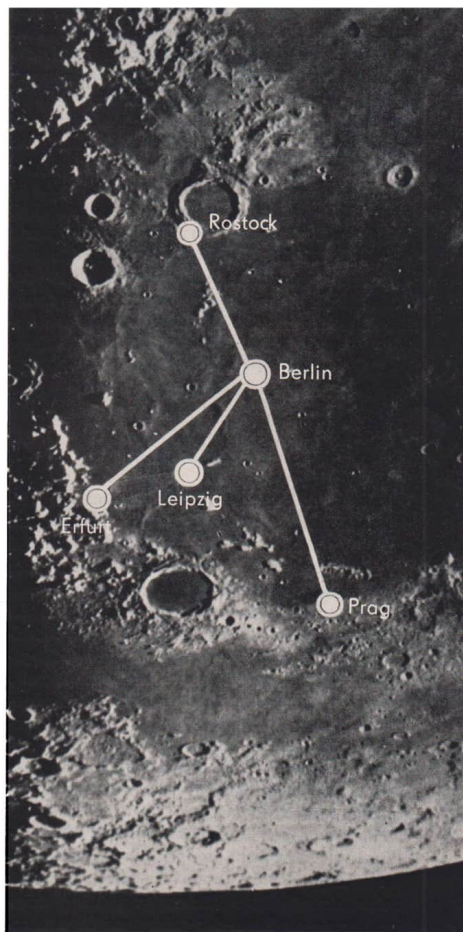
Bezieht man die Bewegung des Mondes auf die Erde, so ergibt sich eine kreisähnliche Ellipse als Umlaufbahn mit einer mittleren Erdentfernung von rund 384 400 km. Seine größte Erdnähe (Perigäum) erreicht der Mond mit 356 400 km, seine Erdferne (Apogäum) mit 406 700 km. Bei einem einfachen Vergleich kann man also die Mondentfernung mit etwa 30 Erddurchmessern ansetzen. Die auf raumfeste Koordinaten an der Fixsternsphäre bezogene „siderische“ Umlaufzeit des Mondes beträgt 27,322 Tage. Dem in der Kalenderrechnung gültigen „Monat“ liegt dagegen die „synodische“ Umlaufzeit des Mondes zugrunde, die auf die Verbindungslinie Erde-Sonne abgestimmt ist und 29,531 Tage umfaßt. Die Neigung der Mondbahnebene zur Ekliptik (Erdbahnebene) beträgt rund 5° . Sie ist die Ursache dafür, daß nicht bei jedem Mondumlauf eine Sonnen- bzw. Mondfinsternis entsteht. Der Vorbeigang des Mondes vor der Sonnenscheibe ist nämlich für einen irdischen Beobachter immer nur dann zu sehen, wenn sich der Erdrabant zur Neumondzeit in der Nähe seines Bahnknotens befindet; das ist der Schnittpunkt seiner Umlaufbahn mit der Erdbahnebene. Ebenso kann der Mond auch nur dann in den Erdschatten eintreten, wenn er sich zur Vollmondzeit in der Nähe des anderen Bahnknotens bewegt.

Ein besonderes Kuriosum der Mondbewegung ist seine „gebundene“ Rotation, das heißt, seine Rotationszeit ist mit der Umlaufzeit identisch. Dadurch können wir von der Erde aus, von kleinen Librationen des Mondkörpers abgesehen, immer nur eine Hälfte unseres Trabanten beobachten. Als „Librationen“ des Mondes bezeichnet man himmelsmechanisch bedingte Pendelbewegungen einer „mittleren“ Mondscheibenmitte um die Verbindungslinie Erdmittelpunkt – Mondmittelpunkt, wodurch etwa 59 Prozent der Mondoberfläche von der Erde aus sichtbar werden. Die gebundene Ro-

tation läßt sich nur so erklären, daß eine ursprünglich vorhandene, wahrscheinlich schnellere Rotation des Mondkörpers durch die von der Erdgravitation ausgeübten Gezeitenwirkungen allmählich abgebremst wurde. Vermutlich spielte bei diesem Vorgang eine gewisse Plastizität des noch nicht erstarrten Mondkörpers eine Rolle.

Die (astronomisch gesehen) große Nähe des Mondes läßt natürlich recht eingehende Detailstudien seiner Oberflächenbeschaffenheit zu. Mit den Rieseninstrumenten der Gegenwart sind noch Gebilde von einigen hundert Metern Ausdehnung als feinste Einzelheiten der Grobstruktur erkennbar. Dabei werden die Oberflächengebilde durch streifend einfallendes Sonnenlicht (Schattenwurf-effekt) besonders gut deutlich gemacht. Hinzu kommt, daß der Mond keine merkliche Atmosphäre hat. Daher können mit Ausnahme der Trübungen und Schlieren in der Erdatmosphäre keine weiteren Störungen den Lichtweg Mond-Fernrohr behindern. Das Bild des Mondes im Fernrohr gehört damit zu den schönsten und bewegendsten Eindrücken, die die Himmelsbeobachtungen zu bieten haben. Noch bis vor wenigen Jahrzehnten war auch im wesentlichen den Augen geschulter Beobachter am Fernrohr der größte Beitrag zu unserem Wissen von der Topographie der Mondoberfläche zu verdanken. Eine objektive Darstellung der Oberflächenstrukturen des Mondes erwies sich jedoch als so schwierig, daß es vielfach zu widersprüchlichen Deutungen mancher Erscheinungen kam. Erst die in den letzten Jahren beträchtlich gesteigerte Leistungsfähigkeit fotografischer Methoden und lichtstarke Instrumente unter günstigen atmosphärischen Bedingungen (zum Beispiel Sternwarte auf dem Pic du Midi) gestatteten wesentliche Fortschritte in der objektiven Beurteilung selenographischer Probleme.

Die Geschichte der Selenographie (kartographische Aufnahme und Beschreibung der Mondoberfläche) reicht bis in die Zeit zurück, in der zum erstenmal ein Fernrohr auf den Mond gerichtet wurde. Sie



beginnt 1610, als Galilei in seinem „Sidereus nuntius“ die Entdeckung veröffentlichte, daß es auch auf dem Mond Gebirgsformen gäbe, die denen auf der Erde ähnlich seien. Die Bemühungen der Astronomen um eine zeichnerische Darstellung des Mondoberflächendetails erbrachten zusammen mit der immer besseren optischen Qualität der Fernrohre im Laufe der Jahrhunderte immer genauere Mondkarten. Julius Schmidt gab im Jahre 1878 eine Karte heraus, die den Mond schon mit einem Durchmesser von 195 cm darstellte und insgesamt 32 856 Einzelheiten enthielt. Die modernsten kartographischen Darstellungen der Mondoberfläche beruhen auf Maßstäben, in denen der Monddurchmesser mit vielen Metern wiedergegeben wird (zum Beispiel 7,72 m bei der Karte des Engländers H. P. Wilkins). Ihr Detailreichtum ist kaum noch zu beziffern.

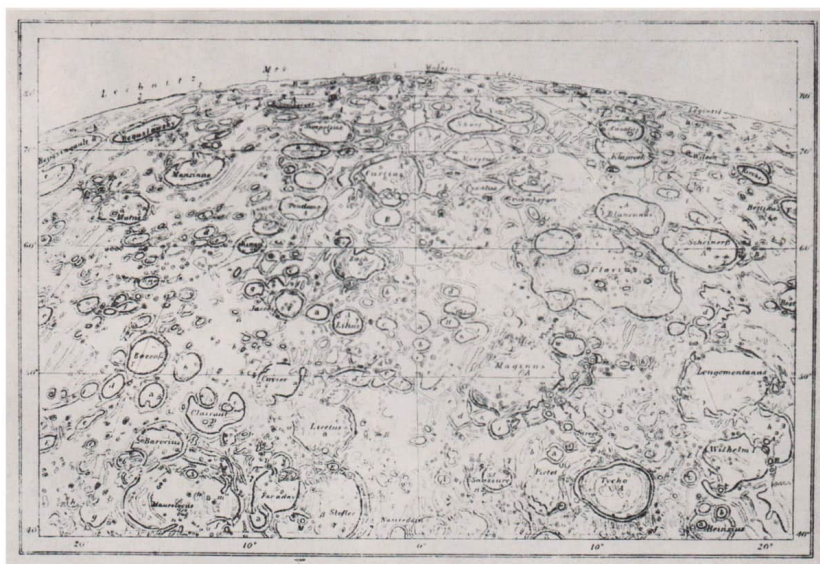
Selenographische Fundamente

Mit den selenographischen Fortschritten verfeinerten sich natürlich auch die Vorstellungen von der Natur der Mondoberflächengebilde, ohne daß es jedoch gelang, zu eindeutigen Ansichten über ihre Entstehungsgeschichte zu kommen. Waren Galilei und seine Zeitgenossen zumeist noch der Meinung, daß die bergige Struktur der Mondoberfläche gewisse Parallelen zu den Gebirgsformen der Erde zeigt, so ließ sich doch schon sehr bald erkennen, daß man es auf dem Mond offenbar mit völlig anders gearteten Erscheinungsformen der festen Oberfläche eines Himmelskörpers zu tun hat. Immerhin fanden schon die ersten Beobachter heraus, daß die in Anlehnung an ältere Vorstellungen als „Mare“ (Meere) bezeichneten großen Dunkelflächen nichts weiter als ausgedehnte, trockene und meist sehr detailarme Niederungen sind. Diesen dunklen Gebieten stehen dann hellere Flächen gegenüber, deren Struktur sie als Reste der gebirgigen Urgesteins-

rinde des Mondes ausweist. Die Niederungen müssen als später entstandene Einbruchsfächen angesehen werden, die von dem in tieferen Regionen noch plastischen Mondmaterial überflutet wurden. Offene Wasserflächen hat es auf dem Mond sicherlich niemals gegeben, da seine geringe Anziehungskraft eine ständige Atmo- oder Hydrosphäre nicht zuläßt.

Die Bezeichnungen „hell“ und „dunkel“ sind natürlich nur als relative Begriffe gemeint. Gewiß ist es zunächst überraschend, wenn man hört, daß die im Fernrohr so grell „weiß“ erscheinende Mondoberfläche von der auftreffenden sichtbaren Strahlung der Sonne im Mittel nicht mehr als 7 Prozent reflektiert. Mithin ist die Mondoberfläche so „weiß“ wie eine sonnenbeschienene Koksfläche. Diese geringe Albedo (Rückstrahlungsvermögen) des Mondoberflächenmaterials, in den „hellen“ Gebieten steigt sie etwa auf 0,15 bis 0,17 an, ließ selbstverständlich erste Rückschlüsse auf die Art der Mineralien zu, aus denen sich die feste Mondoberfläche zusammensetzt. Mit weiteren optischen Untersuchungsmethoden (Polarisationsmessungen; Reflexionsmessungen in verschiedenen Wellenlängenbereichen) konnte aus Vergleichen mit irdischen Mineralien ermittelt werden, daß die Mondoberfläche wahrscheinlich in erster Linie aus vulkanischen Tiefen- und Ergußgesteinen (basalt- und lavaähnlich) besteht. Durch radioastronomische Untersuchungen wurde dies weitgehend bestätigt. Man fand dabei auch zusätzliche Anhaltspunkte für eine wahrscheinlich stark poröse Beschaffenheit des Mondgesteins, wie sie bei lavaartigen Mineralien auch auf der Erde angetroffen wird. Einige Überlegungen und Untersuchungen führten darüber hinaus zu dem bemerkenswerten Schluß, daß zumindest in einigen Bereichen der Mondoberfläche mit einem staubförmigen Belag von vorläufig noch unbestimmter Dicke zu rechnen sein könnte.

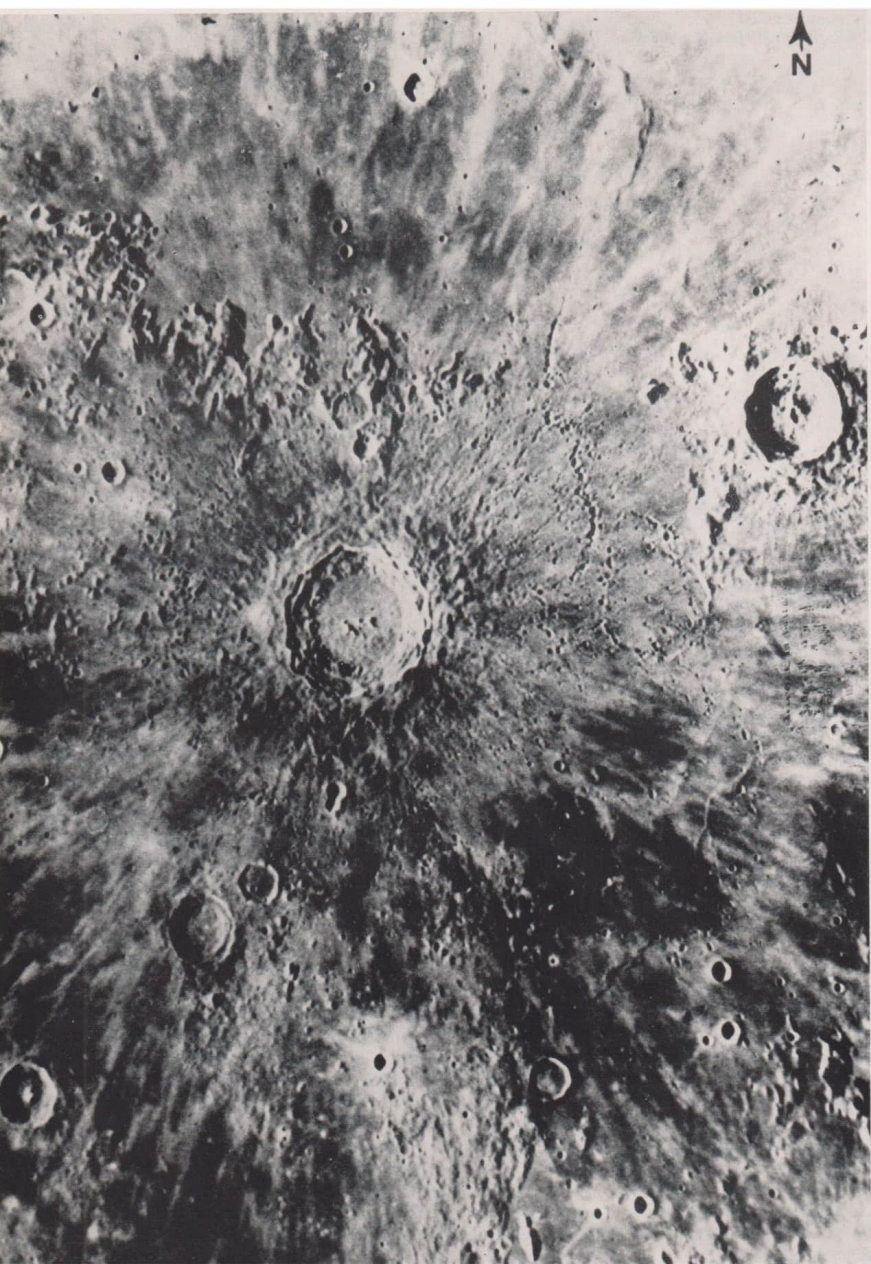
In den helleren, gebirgigen Partien der Mondoberfläche lassen sich auch einige Bildungen fest-



stellen, die irdischen Gebirgen einigermaßen zu ähneln scheinen. Aber während auf der Erde große Faltengebirge das Bild beherrschen, sind es auf dem Mond Schollengebirge, die offenbar aus Verschiebungen und Überlagerungen bei großräumigen Einbrüchen in Nachbargebieten hervorgegangen sind. Relativ zu den tiefer gelegenen Einbruchsf lächen erreichen die größten Erhebungen in diesen Mondgebirgen, denen willkürlich und ohne jegliche Analogien Johannes Hevel, latinisiert Hevelius (1611–1687), die Namen „Mondalpen“, „Mondappeninen“ usw. gab, im Mittel Höhen um 3000 m. Es gibt jedoch extreme Ausnahmefälle, in denen sich bei eng benach-

barten Gebieten Höhenunterschiede um 8000 m ergeben. Ein Vergleich mit der Erde ist an sich schwierig, da auf dem Mond keine ozeanischen Wasserflächen ein Normalniveau vorgeben. Trotzdem kann man sagen, daß die Höhenunterschiede auf unserem Trabanten relativ zu seinem Durchmesser im allgemeinen doch merklich stärker ausgeprägt sind als auf der Erde.

Die augenfälligsten charakteristischen Formen der Mondoberfläche aber sind die „Ringgebirge“. Für sie hat sich aus älteren Zeiten her auch die Bezeichnung „Krater“ erhalten, obwohl man sich längst im klaren ist, daß diese Gebilde entstehungsgeschichtlich eine völlig andere Beziehung



zu vulkanischen Vorgängen haben, wie wir sie gegenwärtig von der Erde her kennen. Schon ein Vergleich des Schnittprofils der Mondkrater mit dem irdischer Vulkankrater zeigt deutlich den großen Unterschied zwischen beiden Gebirgsformen. Während irdische Krater meist eine mehr oder weniger ausgeprägte Kegelform mit einer relativ winzigen Kratergrube aufweisen, sind die Ringgebirge des Mondes schüsselförmige Gebilde, deren tiefer gelegene Innenfläche einen Durchmesser hat, der die Wallerhebung um ein Vielfaches übertrifft. Bei den besonders großen Ringgebirgen, die man als „Wallebenen“ bezeichnet, wird dieses außerordentlich eindrucksvoll. So erreichen die Randerhebungen beim „Clavius“, dessen Durchmesser über 200 km beträgt, nur eine Höhe von etwa 2000 m. Für die großen Ringgebirge ergibt sich übrigens der bemerkenswerte Effekt, daß man wegen der starken Krümmung der Mondoberfläche von der Höhe des Ringwalles aus den gegenüberliegenden Teil der Randerhebungen nicht mehr sehen könnte; dieser würde schon unter dem Horizont liegen. In einigen der großen Ringgebirge (zum Beispiel „Copernikus“) lassen sich allerdings kegelförmige Zentralberge erkennen, die zu Vergleichen mit irdischen Vulkankegeln herausfordern könnten. Aber auch unter Berücksichtigung dieser Sonderfälle zeigen eingehendere Untersuchungen, daß der Entstehungsmechanismus der Ringformen des Mondes auf einem einheitlichen Prinzip beruhen muß, das offenbar für den irdischen Vulkanismus in der gleichen Form nicht gültig ist.

Selbstverständlich läßt sich die Frage nach der Entstehung der Mondkrater überhaupt nur im Zusammenhang mit dem umfassenderen Problem der Herausbildung der gesamten Mondoberflächenstruktur betrachten. Dazu gehört nämlich noch außer den „Meeren“, Gebirgszügen und Ringgebirgen eine Vielzahl von weiteren Einzelheiten, wie kettenartige Reihen winziger Kratergruben, Bruchgräben, Verwerfungen, die Mond-„Rillen“

sowie die merkwürdigen „Strahlensysteme“ einiger großer Ringgebirge. Eine in allen Punkten befriedigende Hypothese über die Entstehung der Mondoberflächenformationen gibt es bis heute noch nicht. Noch immer stehen sich eine Reihe von Ansichten zum Teil scharf gegenüber. Die Erklärungsversuche reichen von der noch heute gelegentlich weiter verfochtenen ältesten Hypothese (R. Hock, 1667), wonach die Struktur der Mondoberfläche aus dem Platzen riesiger Gasblasen in dem heißen plastischen Mondmaterial herrühre, über die Annahme eines „Mondvulkanismus“ in den verschiedensten Variationen bis zur Einbeziehung von Gezeitenkräften und Meteoritenaufschlägen. Schließlich führt man auch tektonische Ursachen sowie verschiedene Kompromisse zwischen einigen der genannten Grundhypothesen an. Eine endgültige Antwort auf diese auch für die Geowissenschaften außerordentlich bedeutsame Frage wird man allerdings erst nach ergänzenden und eingehenden Forschungsarbeiten erwarten dürfen, die auf dem Mond selbst angestellt werden. Die Arbeiten zukünftiger Forschergruppen auf dem Mond werden darum sowohl in ihrer Anlage als auch in ihrer Bedeutung sehr komplex sein.

Unwirtliche Mondoberfläche

Bei den ersten astronautischen Sondierungen auf dem Mond wird man auch eine andere Frage endgültig beantworten können. Es ist zu klären, ob an der Mondoberfläche tatsächlich die Gasdichte des interplanetaren Raumes, also praktisch ein Höchstvakuum mit verschwindend geringen Resten an freien Elektronen und Ionen vorliegt oder ob doch eine, wenn auch extrem dünne „Mondatmosphäre“ vorhanden ist. Nach den Untersuchungen von der Erde aus könnte die Dichte der freien Teilchen über der Mondoberfläche im Mittel nicht größer sein als etwa ein Billionstel der atmo-

sphärischen Dichte an der Erdoberfläche. Danach wären an der Mondoberfläche bestenfalls 1000 bis 10 000 Elektronen oder Ionen je Kubikzentimeter anzutreffen. Das schließt jedoch nicht aus, daß an einigen besonderen Stellen, vornehmlich in der Nachbarschaft von Rillen und tektonischen Brüchen, für begrenzte Zeit höhere Teilchendichten vorkommen können. Es muß als gesichert angesehen werden, daß gelegentlich Gasaustritte aus tieferen Regionen der Mondrinde stattfinden können. Dem sowjetischen Astronomen N. A. Kosyrew gelang beispielsweise in der Nacht vom 3. zum 4. November 1958 der spektroskopische Nachweis eines solchen Gasausbruches innerhalb des Ringgebirges „Alphonsus“.

Für die Raumflugtechnik ist der Mond aber auf jeden Fall als atmosphärelös anzusehen. Das bedeutet einmal, daß bei allen Landevorgängen keine aerodynamischen Hilfsmittel verwendbar sind. Eine weiche Landung ist also nur durch bremsende Triebwerkskräfte zu erzielen. Weiterhin wird damit für den Aufenthalt von Menschen außerhalb hermetisch abgeschlossener und entsprechend belüfteter Räume (Raumschiffkabinen, Stationsräume) das Tragen von hermetischen Schutzanzügen zwangsläufig notwendig. Dafür ließen sich aber Erprobungsarbeiten an allen Spezialtriebwerken, die zu ihrer Funktion ein Hochvakuum voraussetzen (elektrische Raumfahrtantriebe), auf der Mondoberfläche besonders vorteilhaft erledigen.

Für den Aufenthalt von Menschen auf der Mondoberfläche wären aber noch zwei andere Probleme bedeutungsvoll: erstens die Temperatur und zweitens die Einwirkung kosmischer Partikelstrahlungen. Das von keiner Atmosphäre behinderte Auftreffen der solaren Wellenstrahlung bewirkt im Extremfall (vertikaler Sonnenstand) ein Aufheizen des Gesteins bis auf etwa $+120^{\circ}\text{C}$, während die ebenso ungehinderte nächtliche Ausstrahlung die Temperatur bis auf etwa -140°C absinken läßt. Diesen Oberflächentemperaturen stehen aber

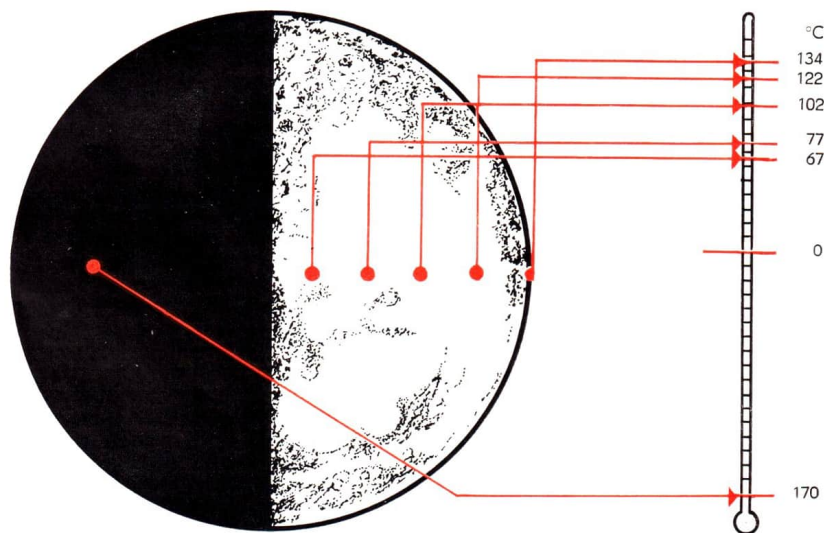
nach neueren Untersuchungen wahrscheinlich wesentlich geringere Temperaturschwankungen in etwas tieferen Schichten gegenüber, so daß für Anlagen unter der Mondoberfläche schon nicht mehr mit so extremen Temperaturbelastungen zu rechnen wäre. Außerdem besteht die Möglichkeit, mit einer ständigen Station in die weniger intensiv bestrahlten Gebiete nahe der Mondpole auszuweichen. In äquatornahen Oberflächengebieten müßte natürlich in allen Anlagen für besonders wirksame Temperaturisolationen gesorgt werden. Das gleiche trifft für die Schutzanzüge der Menschen zu.

Da der Mond nach den bisherigen Untersuchungen offenbar auch kein oder nur ein sehr schwaches Magnetfeld hat und außerdem die spezifische Schutzwirkung einer dichteren Gashülle (Atmosphäre) fehlt, fallen auf die Mondoberfläche zwangsläufig mehr kosmische Strahlungspartikel ein als auf die Erdoberfläche. Vor allem die kräftigen Strahlungsschauer, die als Folge solarer Eruptionen entstehen, finden keine Gelegenheit, sich in größerer Entfernung von der Mondoberfläche „abzureagieren“. Im erdnahen Raum geschieht dies durch die primären und sekundären Magnetfelder, durch die Bildung des Strahlungsgürtels und deren Wechselwirkungen mit der Hochatmosphäre. Auch in dieser Hinsicht wird es also vorteilhaft sein, die Daueraufenthaltsräume einer Mondstation unter die Mondoberfläche zu verlegen. Man kann dann in gewissem Umfang die zusätzliche Abschirmwirkung des Mondgesteins sinnvoll ausnutzen. Bei intensiven solaren Strahlungsschauern werden sich in jedem Fall alle auf der Mondoberfläche befindlichen Stationsmitglieder unbedingt in die tiefer gelegenen und daher besser geschützten Stationsräume zurückziehen müssen. Ein entsprechendes Strahlungswarnsystem ließe sich zweifellos ohne weiteres leicht mit dem ständigen Sonnenüberwachungsdienst eines astronomischen Observatoriums auf dem Mond verbinden.

Forschungsaufgaben einer Mondstation

Über die vielseitigen wissenschaftlichen Arbeitsprogramme für laufend besetzte Mondstationen läßt sich vorläufig nur eine allgemeine summarische Übersicht geben. Viele zu Programmweiterungen führende Einzelheiten werden den Erfahrungen der ersten Betriebszeit entspringen. Sicher ist aber, daß auf dem Mond, allein schon von der Breite des möglichen technischen Aufwandes her, die Forschungsaufgaben einen wesentlich größeren Umfang haben können, als es eine erdnahe Raumstation gestattet. So werden außer den laufenden Untersuchungen über die Beschaffenheit des Mondes die Arbeiten zweifellos auf astronomischem

und astrophysikalischem Gebiet Vorrang haben. Mit den an der Mondoberfläche gegebenen hervorragenden Bedingungen zur Beobachtung des freien Weltraumes sind auch für die herkömmlichen Methoden der astronomischen Forschung neue Möglichkeiten von großer Tragweite zu erwarten. Technisch wäre es nämlich durchaus denkbar, sehr leistungsfähige optische und radioastronomische Instrumente unter günstigen mechanischen Bedingungen auf der Mondoberfläche zu installieren. Sicherlich wird die Sonnenforschung, mit allen Folgerungen für die Kernphysik, die Physik des interplanetaren Raumes sowie die solar-terrestrischen Beziehungen, eine hervorragende Rolle spielen. Aber auch unser Wissen um die Be-





schaffenheit der Körper unseres Planetensystems und der Fixsternwelt dürfte auf diesem neuen Weg beträchtlich erweitert werden.

Mit optischen (Beobachtungsteleskopen), elektronenoptischen (Bildwandlern, Fernsehbildübermittlung), spektroskopischen und anderen Strahlungsmeßverfahren wird auch das Studium meteorologischer Vorgänge in der Erdatmosphäre vom Mond aus zu neuen Erkenntnissen führen. Vermutlich wird nur eine ständige Analyse und Kontrolle des Strahlungshaushaltes der Erde „von außen“ erlauben, einige Grundprobleme der Physik der Atmosphäre restlos zu klären. In diesem Zusammenhang sei noch auf ein besonders aktuelles Problem hingewiesen. Immer wieder bereitet es außerordentliche Schwierigkeiten, die radiofrequenten Strahlungsmessungen an anderen Planeten zu deuten, sei es auf magnetische oder ionosphärische Effekte hin, sei es zur Temperaturbestimmung des betreffenden Planeten. Mit radioastronomischen Untersuchungen der Erde vom Mond aus könnte man die erforderlichen „Eichbeziehungen“ für die Auswertung der Messungen an anderen Planeten herleiten. Außerdem würden derartige radioastronomische Untersuchungen der Erde einen weiteren Beitrag zur Weltraumforschung darstellen, wie er auf keinem anderen Wege erreichbar wäre.

Bei den wissenschaftlichen Arbeiten in einer Mondstation wird auch die Untersuchung der kosmischen Strahlung eine Rolle spielen. Ohne durch ein kräftiges Magnetfeld gestört zu werden, wie es auf der Erde der Fall ist, und ohne sich durch die ebenfalls störenden Sekundärteilchen und Schauer behindern lassen zu müssen, wird man auf dem Mond ein abgerundetes Bild über die Primärkomponente der Kosmischen Strahlung gewinnen. Aus dem Ergebnis dieser Untersuchungen sind aber wieder Rückschlüsse auf die Entstehungs- und Entwicklungsgeschichte des Kosmos und eine Bereicherung der Kernphysik zu erwarten. Die Vorteile, die die physikalische Forschung aus den

ungewöhnlichen „Laboratoriumsbedingungen“ an der Mondoberfläche (verringerte Schwere, Höchstvakuum, dauerhafte Tieftemperaturen) ziehen wird, lassen sich vorläufig ebenso wenig abschätzen wie die Ergebnisse, die unter den gleichen Voraussetzungen von Chemie, Biologie und Medizin erarbeitet werden könnten. Gewiß werden diese wissenschaftlichen Disziplinen durch die Forschungsprogramme künftiger Mondstationen zahlreiche Resultate erzielen, die sich unter irdischen Laboratoriums- und Versuchsbedingungen nur schwer oder gar nicht erreichen lassen. So deuten sich hier interessante Aspekte für eine Einwirkung der wissenschaftlichen Raumfahrt auf Forschungsbereiche an, die außerhalb des Sektors „Weltraumforschung“ liegen.

Vorstufen der Monderschließung

Die Erschließung des raumflugtechnischen „Übungsfeldes“ Mond, verbunden mit der direkten wissenschaftlichen Erkundung unseres Erdtrabanten, begann im Jahre 1959. Den Auftakt bildeten drei sowjetische Unternehmen („Lunik“-Mondsonden), die eine Fülle von Problemen der Bahnmechanik, der Antriebs- sowie Leit- und Steuerungstechnik erstmalig erfolgreich lösen halfen. Die Stellung dieser Lunik-Experimente läßt sich daraus ermessen, daß es der amerikanischen Raumfahrtforschung erst 1963 gelang, ähnliche Unternehmen mit Erfolg zu starten.

Lunik-1 (2. Januar 1959) gehörte zunächst noch zu einem Erprobungsprogramm, das die bahnmekanischen und raumflugtechnischen Rahmenbedingungen von Mondflügen erstmalig praktisch überprüfen sollte. Die letzte Stufe der Träger-rakete (Leermasse 1111 kg) beschleunigte den eigentlichen Raumflugkörper (361,3 kg) auf eine Geschwindigkeit, die etwas über der für die Brennschlußhöhe gültigen Fluchtgeschwindigkeit lag. Dadurch ergab sich eine stärker gestreckte, hyper-

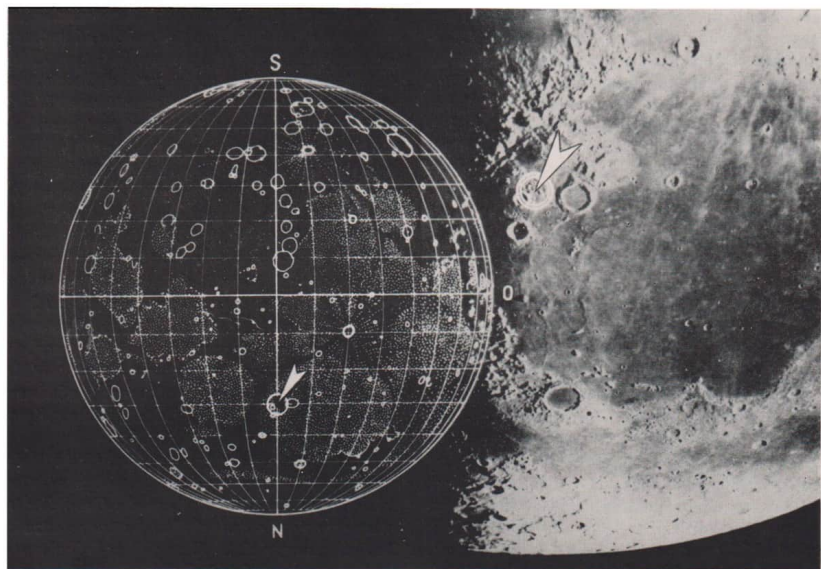
bolische Flugbahn, auf der Lunik-1 nach rund 34 Stunden Flugzeit den Raum des Mondes erreichte. Der Raumflugkörper passierte dann den Erdtrabanten in einer Entfernung von 5000 bis 6000 km und trat anschließend als erster künstlicher Planetoid in eine Sonnenumlaufbahn ein. Zur Unterstützung des funkttechnischen Ortungsverfahrens stieß die Raketenstufe in 113 000 km Entfernung von der Erde eine Natriumdampf-Leuchtwolke aus. Der kugelförmige Lunik-Raumflugkörper war zuvor von der letzten Antriebsstufe getrennt worden. Er trug außen vier Stabantennen sowie einen Ausleger mit einem Magnetometer. In dem Meßgerätebehälter waren Apparaturen zur Untersuchung der kosmischen Strahlung, des interplanetaren Gases, der Verteilungsdichte von Mikrometeoriten, ferner ein Meßwertübertragungssystem sowie funkttechnische Anlagen zur Bahnvermessung untergebracht. Während des Fluges im interlunaren Raum (Bereich Erde-Mond) konnten vor allem Strahlungsmessungen gewonnen werden, die unter anderem die Vorstellungen über die Magnetosphäre der Erde (Strahlungsgürtel) präzisierten.

Lunik-2 startete am 12. September 1959 vom Kosmodrom Baikonur. Ziel des Unternehmens war, zum erstenmal mit einem Raumflugkörper die Mondoberfläche zu erreichen. Als Flugbahn war wiederum eine sehr gestreckte Kurve gewählt worden, die durch ein Überschreiten der Fluchtgeschwindigkeit um etwa 1 Prozent erreicht werden konnte. Auf dieser Flugbahn gelangte Lunik-2 schon nach 36stündigem Flug zum Mond, wo der Raumflugkörper schließlich im Bereich des „Palus Putredinis“ nahe dem Krater „Autolycus“ aufschlug. Ein unvergleichlicher Triumph menschlichen Geistes war damit vollbracht! Zum erstenmal in der Geschichte hatte ein von Menschenhand geschaffenes Gebilde die Oberfläche eines anderen Weltkörpers erreicht.

Ebenso wie bei Lunik-1 wurde auch in diesem Fall der kugelförmige Meßgerätebehälter wäh-

rend des Freifluges von der letzten Stufe des Antriebssystems getrennt. Lunik-2 ähnelte weitgehend seinem Vorgänger, hatte aber mit 390,2 kg eine etwas größere Nutzmasse. Seine meßtechnische Ausrüstung umfaßte verschiedene Apparaturen zur Untersuchung der kosmischen Partikelstrahlung sowie ein Magnetometer, mit dem vor allem bei Annäherung an den Mond Informationen über ein eventuell vorhandenes Mondmagnetfeld gesammelt werden sollten. Weiterhin befanden sich in der Mondsonde Druck- und Temperaturfühler, die die Betriebsfunktionen in dem Meßgerätebehälter kontrollierten, und eine umfangreiche funkttechnische Anlage zur Meßwertübertragung und Flugbahnvermessung. Zur Unterstützung der Flugbahnkontrolle wurde ebenso wie bei Lunik-1 eine Natriumdampf Wolke ausgestoßen, die eine Position in einer Entfernung von rund 130 000 km markierte. Die letzte Stufe des Antriebssystems wurde ebenfalls als Meßgeräteträger ausgenutzt. Man hatte in ihr eine Anlage zur Untersuchung der primären Kosmischen Strahlung untergebracht und mit einer entsprechenden Sendeinrichtung gekoppelt. Die Meßapparaturen in Lunik-2 arbeiteten bis zum Aufschlag des Gerätes auf der Mondoberfläche einwandfrei. Die übermittelten Daten ließen den Schluß zu, daß der Mond entweder überhaupt kein oder doch nur ein äußerst schwaches Magnetfeld hat. Diese Feststellung war für die Theorie der inneren Struktur des Mondes von großem Interesse. Außerdem fanden sich Anzeichen dafür, daß der Mond zwar keine merkliche Atmosphäre im üblichen Sinn hat, wahrscheinlich aber von einer dünnen Hülle elektrisch geladener Teilchen, also einer Art „Ionosphäre“, umgeben ist.

Dieser aufsehenerregende Erfolg der sowjetischen Raumflugtechnik wurde aber schon rund drei Wochen später von einem weiteren, geradezu sensationellen sowjetischen Raumflugexperiment übertroffen. Am 4. Oktober 1959 brachte eine mehrstufige Trägerrakete einen Raumflugkörper



(Lunik-3) auf seine Bahn, mit dem zum erstenmal sozusagen ein Blick „hinter die Kulissen“ auf die Rückseite des Mondes getan werden sollte. Die für den Flug von Lunik-3 vorgegebene Raumflugbahn erfüllte bahnmechanisch ungewöhnlich komplizierte Anforderungen. Sie sollte einerseits den Raumflugkörper so in der Nähe des Mondes vorbeiführen, daß ohne Antriebskorrektur (also allein durch die einkalkulierte Anziehungskraft des Mondes) ein „Hinterfliegen“ unseres natürlichen Erdtrabanten möglich wurde; dadurch mußte Lunik-3 in die richtige Position für die beabsichtigten Aufnahmen der Mondrückseite gelangen. Andererseits sollte die Bahn die Raum-

sonde über den Nordhimmel wieder in einen relativ geringen Erdbestand zurückbringen, um somit günstige Voraussetzungen für die geplante Bildfunkübertragung zu den auf der nördlichen Hemisphäre der Erde gelegenen sowjetischen Empfangsstationen zu schaffen. Als Resultat ergab sich eine Bahn, die nach ziemlich gestrecktem Anflug beim Passieren des Mondes (geringste Entfernung etwa 7500 km) von dessen gravitatorischer Wirkungssphäre so „umgebogen“ wurde, daß sie sich zu einer steil auf der Mondbahnebene stehenden Erdsatellitenbahn herausbildete. Ihr Apogäum sollte etwa bei 470 000 km, das Perigäum bei 47 000 km Erdbestand liegen.

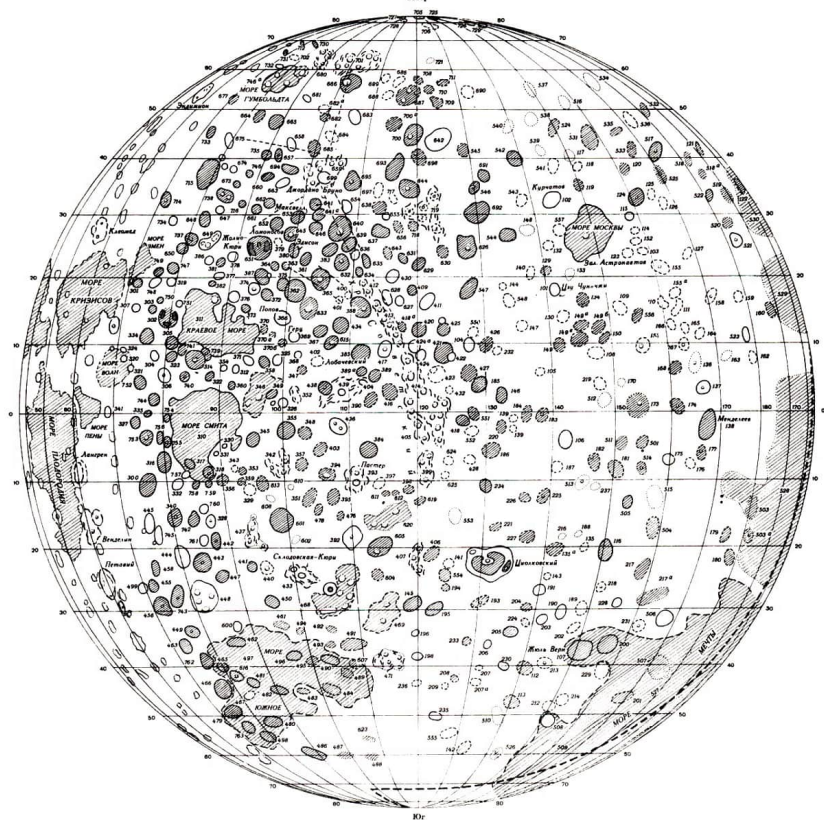
Die tatsächlich von Lunik-3 durchflogene Bahn entsprach weitgehend den theoretischen Überlegungen. In einer Entfernung von rund 60 000 km jenseits des Mondes richtete sich der Raumflugkörper so aus, daß die fotografische Aufnahmeapparatur die erdabgewandte Seite des Erdtrabanten erfaßte. Mit zwei Objektiven von 200 und 500 mm Brennweite wurden einige hundert Bilder des Mondes auf einem 35-mm-Spezialfilm aufgenommen. Das Ausrichten von Lunik-3 auf das Aufnahmeobjekt besorgten kleine Strahldüsen, die mit Druckgas betrieben wurden. Sie erhielten ihre Arbeitskommandos von einem automatisch arbeitenden Orientierungssystem, dessen Photozellen die Richtung zur Sonne und zum Mond fixierten. Nach einer automatischen Entwicklung des Filmmaterials wurden schließlich die Bilder unter Verwendung einer Bildabtaströhre funktetechnisch zur Erde übertragen. Aus Erprobungs- und Kontrollgründen hatte man zwei Übertragungsperioden vorgesehen, einmal bei annähernd größtem Erdabstand von Lunik-3 und zum anderen bei seiner größten Erdnähe. Das erregende Experiment verlief zur vollsten Zufriedenheit. Es lieferte Bilder von der Rückseite des Mondes, die zuvor noch kein Menschenauge gesehen hatte. Damit erhielt man einzigartige wissenschaftliche Dokumente. In mühevoller Auswertungsarbeit, die unabhängig voneinander drei verschiedene sowjetische Institute vornahmen, konnte der erste Atlas der Mondrückseite zusammengestellt werden. Er erregte nach seiner Veröffentlichung im Jahre 1960 in der internationalen Fachwelt verständlicherweise größtes Aufsehen. Für die Mondforschung stellt dieser Atlas einen ersten aufschlußreichen Beitrag dar, da beispielsweise aus der Verteilung der von Lunik-3 entdeckten Oberflächenformationen (Mare, Tiefebene und kraterbedeckte Hochländer) Rückschlüsse auf die Entwicklungsgeschichte des Mondes gezogen werden können.

Außer dieser Hauptaufgabe hatte die Raumsonde

Lunik-3 noch ein zusätzliches wissenschaftliches Programm zu erfüllen, das sich auf die Erforschung der physikalischen Bedingungen im Raum Erd-Mond bezog. Für das umfangreiche Gesamtprogramm stand eine Nutzmassekapazität von 278,5 kg in dem von der letzten Antriebsstufe (Leermasse 1553 kg) getrennten Raumflugkörper zur Verfügung. Weitere 156,5 kg wissenschaftlicher Ausrüstung verblieben wie bei Lunik-2 in der letzten Raketenstufe. Die Stromversorgung aller Geräte geschah zum Teil durch Sonnenbatterien, deren Empfangselemente sich auf einem gürtelartigen Wulst der zylindrischen Meßgerätezelle befanden. Auch für den Schutz strahlungsempfindlicher Substanzen in Raumflugkörpern leisteten die sowjetischen Wissenschaftler mit Lunik-3 Pionierarbeit. Es gelang ihnen, durch technische Hilfsmittel (Abschirmung) jede störende Strahlungsbeeinflussung der fotografischen Emulsion (Schleierbildung, Kernspuren) weitgehend zu unterbinden.

Die von den Flugkörpern der Lunik-Serie übermittelten Messungen der Ionenkonzentration brachten wichtige Hinweise auf die Gasdichte im interplanetaren Raum. Viele Forscher vertraten zuvor die Auffassung, daß im Abstand der Erdbahn von der Sonne mit rund 1000 Teilchen/cm³ zu rechnen sei. Sie stützten sich dabei auf Beobachtungen des Zodiakallichtes, einer schwachen Leuchterscheinung, die sich auf der Erde unter günstigen Beobachtungsbedingungen besonders ausgeprägt kurz nach Sonnenuntergang bzw. vor Sonnenaufgang am West- oder Osthimmel zeigt. Von den Instrumenten der Luniks wurden jedoch in mehr als 22 000 km Entfernung von der Erdoberfläche kaum nach Teilchen des interplanetaren Gases festgestellt. Der sowjetische Wissenschaftler I. Schklowski schloß daraus, daß die Erde von einer Hülle ionisierten Wasserstoffgases umgeben ist, deren Dichte schon bei etwa 15 000 km Entfernung rasch absinkt. Nach seinem Vorschlag wurde diese Wasserstoffhülle, die sich somit an die Exosphäre anschließt, als „Geokorona“ be-

Север



zeichnet. Durch Aufstiege von Raketen, die Spezialphotometer emportrugten, konnte diese Ansicht später gefestigt werden. Dabei wurde ergänzend festgestellt, daß die Geokorona überwiegend aus neutralem Wasserstoff besteht, den die Ionenfallen der Luniks noch nicht nachweisen konnten. Als Grund für die überraschend geringe Dichte des interplanetaren Gases nimmt man gegenwärtig an, daß die von der Sonne bei Eruptionen ausgestoßenen Wolken und Ströme ionisierter Teilchen, denen eine Stoßwelle vorausgeht, den Raum gewissermaßen „leerfegen“. Mit der amerikanischen Raumsonde Pioneer-5 konnte tatsächlich auch zum erstenmal eine derartige Wolke, lange bevor sie die Erde erreichte, weit draußen im interplanetaren Raum erfaßt werden.

Erste Nahaufnahmen des Mondes

Die amerikanischen Versuche, mit speziellen Mondsonden den Erdrabanten zu erreichen oder in seiner Nähe auswertbare Messungen vorzunehmen, begannen etwa zwei Jahre nach den sowjetischen Lunik-Experimenten. Das in den Jahren 1961 bis 1965 mit 9 Starts abgewinkelte „Ranger“-Programm erbrachte jedoch in den ersten sechs Unternehmen mehr oder weniger krasse Fehlschläge. Bei Ranger-1 und Ranger-2 (1961) mißlang jeweils schon die erste Phase des Abflugmanövers, während Ranger-3 (1962) eine zu hohe Geschwindigkeit für die Übergangsbahn erhielt und dadurch in rund 36000 km Entfernung am Mond vorbeiflog. Der Ausfall der Funkverbindung bei Ranger-4 (1962), der Stromversorgung bei Ranger-5 (1962) und der Fernsehbildübertragung bei Ranger-6 (1964) ließ auch diese drei Experimente mißlingen. Ranger-6 war das erste Gerät einer Untergruppe, die mit Fernsehkameras ausgerüstet wurde, um in der letzten Phase des bei diesen Sonden noch gewollten Absturzes auf den Mond Nahaufnahmen von der Mondoberfläche zu erhalten. Von diesen

Bildern erhoffte man sich Aufschlüsse über die Feinstruktur des Mondbodens (Staubbedeckung usw.) zur Vorbereitung auf unbemannte und bemannte Mondlandungen.

Mit dieser Fernsehzusatzrüstung hatten die Ranger-Sonden dieser Gruppe eine Masse von etwa 390 kg. Zwei der insgesamt sechs Kameras waren mit Weitwinkelobjektiven für Übersichtsaufnahmen ausgestattet, die restlichen vier mit Teleobjektiven. Die zu einem Block zusammengefaßte Kamera-Baugruppe (26,7 kg) war unterhalb der Spitze der offenen Rahmenkonstruktion des Raumflugkörpers untergebracht und mit der zentralen Visierachse um 38° gegen die Längsachse des Ranger-Gerätes ausgerichtet. Um die Mondsonde während des Anfluges mit den Kameras auf das jeweilige Auftreffgebiet ausrichten zu können, dienten Kreisel und optische Sensoren als Lagererenzgeber sowie Druckgasstrahldüsen als Lageregelungssystem.

Den ersten vollen Erfolg mit einer Mondsonde konnten die USA schließlich mit Ranger-7 (28. Juli 1964) verbuchen. Die Kameras wurden 17 Minuten vor dem Aufschlag im südöstlich des Kraters „Guericke“ gelegenen Zielgebietes eingeschaltet. Die Entfernung zur Mondoberfläche betrug zu diesem Zeitpunkt etwa 2100 km. Bis zum Aufschlag konnten dann etwa 4300 Bilder übertragen werden, deren Qualität über Erwarten gut war und auf denen sich noch Kratergruben von etwa 90 cm Durchmesser und 30 cm Tiefe erkennen ließen. Ähnlich erfolgreich verlief dann auch das Experiment mit Ranger-8 (17. Februar 1965). Man schaltete dabei die Kameras schon 23 Minuten vor dem Aufprall ein und gewann so über 7000 Aufnahmen, die in ihrer Qualität im allgemeinen noch etwas besser waren als die von Ranger-7. Der Auftreffpunkt lag diesmal im „Mare Tranquillitatis“ nur 29 km von dem vorgesehenen Zielpunkt entfernt.

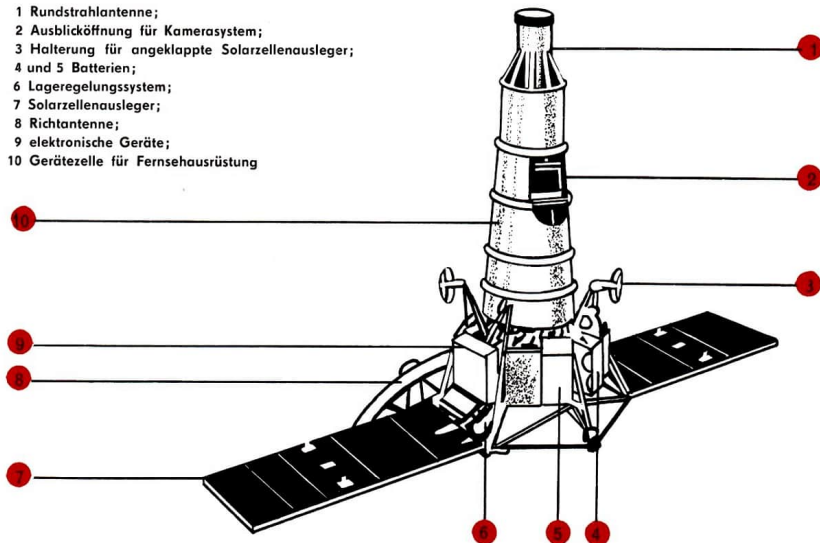
Gestützt auf die positiven Erfahrungen mit den beiden vorangegangenen Unternehmen stellten

sich dann die amerikanischen Raumflugspezialisten mit Ranger-9 (21. März 1965) eine ganz besondere Aufgabe. Das Flugprogramm sollte die Mondsonde erstmalig direkt in einen bestimmten Mondkrater hineinführen, und zwar in den „Alphonsus“. Dieser Krater hatte, wie schon früher erwähnt, insofern eine gewisse Berühmtheit, als mehrfach von der Erde aus Anzeichen für Gasausbrüche in der Nähe seines Zentralberges beobachtet werden konnten. Man erhoffte sich hierüber von Ranger-9 irgendwelche Aufschlüsse. Das Unternehmen gelang auch mit bewundernswürdiger Präzision, da der Auftreffpunkt vom vorgesehenen Zielpunkt nur um etwa 6,5 km abwich. Die Kameras übertrugen insgesamt rund 5800 Bilder von weiter verbesserter

Qualität. Aber auch an Hand dieses Bildmaterials gelang es nicht, das „Rätsel des Alphonsus“ zu klären. Besondere Aufmerksamkeit verdient darüber hinaus, daß über eine weitere Kamera erstmalig eine Direktübertragung der Mondannäherungsbilder auf das öffentliche amerikanische Fernsehnetz vorgenommen wurde.

Für die Mondforschung war das mit den Ranger-Mondsonden gewonnene Bildmaterial schon recht aufschlußreich. So zeigte sich einmal, daß kraterähnliche Strukturen bis zu einem Durchmesser von 0,5 m herab vorkommen, wobei deren Zahl mit abnehmender Größe offenbar stark zunimmt. Zum anderen erwiesen sich auch die Mare-Tiefenebenen, die man ursprünglich für nahezu frei von

- 1 Rundstrahlantenne;
- 2 Ausblicköffnung für Kamerasystem;
- 3 Halterung für angeklappte Solarzellenausleger;
- 4 und 5 Batterien;
- 6 Lageregelungssystem;
- 7 Solarzellenausleger;
- 8 Richtantenne;
- 9 elektronische Geräte;
- 10 Gerätezelle für Fernsehausrüstung





Aufnahme der Mondoberfläche
durch Ranger-9 aus 1240 km Höhe
9 min 18 s vor dem Aufschlag
(am linken Bildrand
Krater „Alphonsus“ mit Zentralberg,
am oberen Bildrand
das sehr flache Innere des Kraters „Ptolemäus“)

Aufnahme der Mondoberfläche
durch Ranger-9 aus 184 km Höhe
1 min 17 s vor dem Aufschlag.
Das Bild zeigt
die Randpartie des Kraters „Alphonsus“
mit einer großen „Rille“ (vgl. Bild oben)

Kleinstrukturen angenommen hatte, als förmlich übersät mit derartigen Kleinstformationen. Über den Entstehungsmechanismus dieses Oberflächen-details konnte damit jedoch noch keine endgültige Klarheit gewonnen werden, obwohl die Hypothese vom Meteoritenaufsturz dadurch sicher einiges Gewicht erhalten haben dürfte. Unbeantwortet blieben Fragen nach der Feinstruktur, Zusammensetzung und Festigkeit des Gesteinsmaterials der Mondoberfläche sowie nach der Existenz des ominösen „Mondstaubes“. Aufschlüsse darüber konnte man also nur noch von direkten Untersuchungen auf der Mondoberfläche erwarten, die allerdings ein zerstörungsfreies, „weiches“ Absetzen von Raumflugkörpern auf dem Mondboden zur Voraussetzung haben.

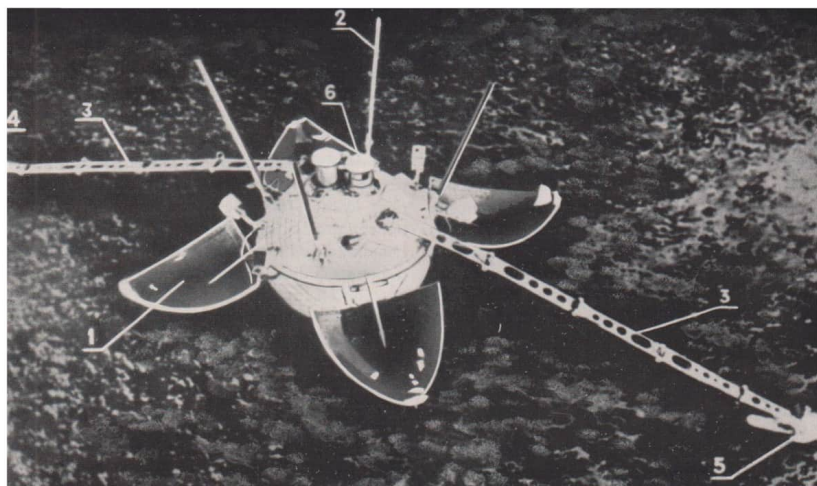
Luna-9 landet weich

Die raumflugtechnischen Schwierigkeiten einer weichen Mondlandung sind recht beträchtlich. Wie schon früher kurz erwähnt, kann ein Raumflugkörper nur durch bremsend wirkenden Triebwerkschub unzerstört auf die Mondoberfläche gebracht werden. Die Geschwindigkeit eines ungebremst auf dem Mond auftreffenden Raumfluggerätes beträgt im Minimalfall etwa 2500 bis 2600 m/s (zum Beispiel Ranger-Mondsonden). Der Bremsvorgang muß die Geschwindigkeit des Raumflugkörpers dicht über der Mondoberfläche so weit vermindert haben, daß der beim Aufsetzen praktisch unvermeidbare Stoß durch spezielle Landehilfsmittel (Dämpfungspolster, Federbeine) hinreichend abgefangen werden kann. Daraus ergeben sich nun ganz ungewöhnlich hohe Anforderungen an die Präzision der Funktionsregelung aller am Brems- und Landevorgang beteiligten Systeme. Ausgangspunkt ist das Erreichen einer genau vorgegebenen Mondflugbahn, damit die Steuerungsfunktionen für das Landeprogramm die richtigen Ausgangswerte erhalten. Für das Bremsmanöver muß der

Raumflugkörper dann mit seinem Triebwerk ganz präzise in die erforderliche räumliche Lage gebracht werden. Ein Radarhöhenmesser steuert anschließend das Regelprogramm für den Schub des Bremstriebwerkes, wobei der Raumflugkörper auch weiterhin eine genau vorgegebene Position zur Mondoberfläche einnehmen muß. Zur Feinregelung der Abbremsung in der letzten Annäherungsphase setzt man zweckmäßigerweise zusätzlich noch kleinere Hilfstriebwerke ein. Dieses Funktionsprogramm ist in seinen Grundzügen für unbemannte und bemannte Mondlandegeräte weitgehend ähnlich. Während aber in einem unbemannten Raumflugkörper das Landeprogramm von einer eingebauten autonomen Programmsteuerung in gewissen Grenzen eines starren Schemas bewältigt werden muß, können bei einem bemannten Mondflugkörper zusätzliche Entscheidungsfunktionen der mitfliegenden Besatzung vorbehalten bleiben.

Die ersten Versuche mit unbemannten Mondlandungs sonden leitete wiederum die Sowjetunion ein. Die ab 12. März 1965 dafür eingesetzten Raumflugkörper der „Luna“-Serie (Lunik-1 bis Lunik-3) gelten dabei als Luna-1 bis Luna-3) brachten nach einer Reihe von Vorversuchen zur Erprobung des Landesystems (Luna-5 bis Luna-8) am 3. Februar 1966 mit Luna-9 (Starttermin 31. Januar 1966) den sensationellen Erfolg der ersten weichen Landung eines von Menschenhand geschaffenen Körpers auf der Mondoberfläche. Um 19 Uhr 45 Minuten 30 Sekunden MEZ ging die kurz vor dem Auftreffen auf der Mondoberfläche vom Bremssystem gelöste Gerätekapsel westlich der Krater „Rainer“ und „Marius“ auf dem Mondboden nieder.

Da man vor dem Flug weder über eine etwaige Staubbdeckung des Mondbodens noch über dessen Tragfähigkeit hinreichende Informationen besaß, wurde bewußt darauf verzichtet, eine Landung unter Verwendung eines Federbeingestells vorzunehmen, wie sie bei späteren Unternehmen



mit bemannten Geräten unbedingt erforderlich sein wird. Die kugelförmige GerätekapSEL (100 kg) war daher auf der einen Hälfte mit einer Stoßdämpfungseinrichtung und auf der anderen mit einer nach der Landung in vier Sektorschalen aufklappenden Schutzhülle versehen. Die geöffneten Sektorschalen sicherten zugleich die richtige Arbeitslage der Mondsonde und ihrer Geräte. Der hermetische Behälter enthielt ein Programmzeitschaltwerk, eine Temperaturregelanlage, wissenschaftliche Geräte, Funkeinrichtungen und Stromquellen. Wichtigster Teil der wissenschaftlichen Ausrüstung war zweifellos eine Fernsehkamera mit Bildübertragungsanlage. Mit dieser Kamera konnten dann über einen drehbaren Spiegel die ersten wirklichen Nahaufnahmen der Mondoberfläche gewonnen werden. Die Übertragung von

Panoramaaufnahmen des Landegebietes begann am 4. Februar 1966. Der niedrige Stand der Sonne über dem Mondhorizont und die hervorragende Qualität des Kamerasystems sowie der Bildübertragungsanlage ergaben Aufnahmen von außerordentlichem Detailreichtum und vorzüglicher optischer Auflösung.

Als wohl wesentlichste Erkenntnis konnte aus diesen Bildern abgeleitet werden, daß zumindest in der Umgebung von Luna-9 das außerordentlich flache Mondrelief kaum merklich von Staub bedeckt ist. Weiterhin zeigte sich, daß die Oberflächenschicht des Mondes relativ fest und mit einzelnen kleineren Trümmerbrocken bedeckt ist. Hierin stimmten die Befunde ganz allgemein mit den Ansichten einiger sowjetischer Wissenschaftler überein, die schon früher aus radioastronomischen

Luna-13 (24. Dezember 1966),
der zweite auf dem Mond weich gelandete sowjetische
Raumflugkörper,
war in seiner Grundkonstruktion
seinem Vorläufer weitgehend ähnlich,
verfügte aber über zusätzliche Einrichtungen
zur Erforschung der Mondoberfläche.

- 1 Schalensegmente;
- 2 Antenne;
- 3 Ausleger für Meßgeräte;
- 4 Meßgerät zur Untersuchung der Bodenfestigkeit;
- 5 Strahlungsmeßgerät;
- 6 Fernsehkamera

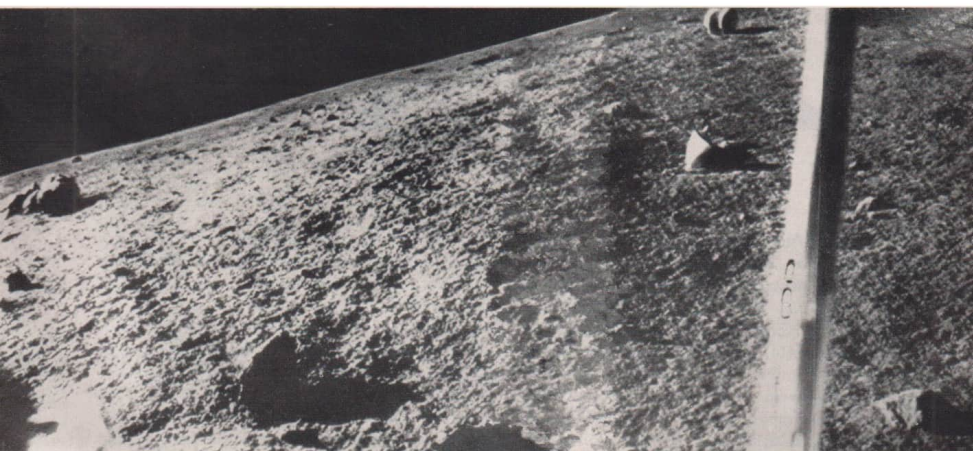
Ausschnitt aus dem von Luna-13
aufgenommenen Mondpanorama

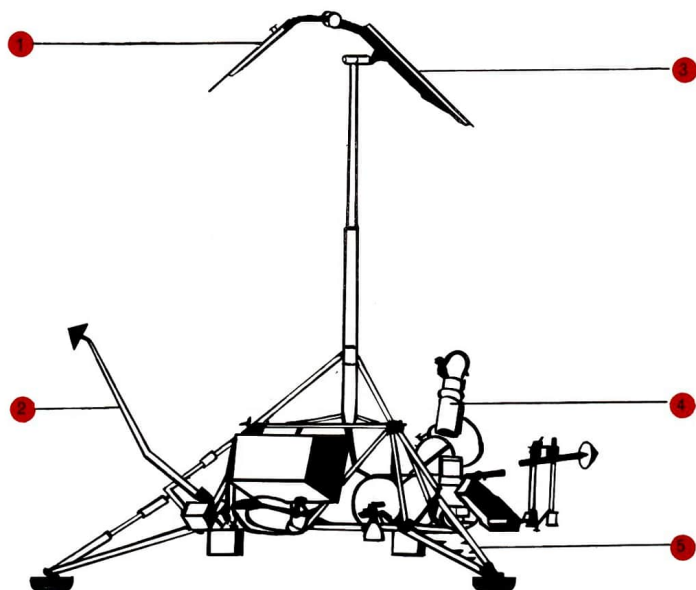
Untersuchungen des Mondes auf eine derartige Struktur der Mondoberfläche und das Fehlen von Staub geschlossen hatten. Aus den Wirkungen des Landungsstoßes auf den Gerätebehälter sowie aus seiner Ruheposition auf dem Mondboden konnte darüber hinaus die Feststellung abgeleitet werden, daß die Mondoberfläche auch für schwerere Körper ausreichend tragfähig ist.

Erste „Drei-Punkt-Landung“ mit „Surveyor“

Vier Monate nach der weichen Landung von Luna-9 gelang auch den USA mit einem Raumfluggerät der „Surveyor“-Serie zum erstenmal das gleiche Experiment. Das Landeverfahren der

am 30. Mai 1966 gestarteten Mondsonde Surveyor-1 entsprach schon weitgehend dem, wie es später bei bemannten Unternehmen ablaufen muß. Das Bremsmanöver begann durch die Zündung eines Haupttriebwerkes (4000 kp Schub) in 84 km Höhe über der Mondoberfläche, wobei die Fluggeschwindigkeit zunächst von 2750 m/s auf 159 m/s verringert wurde. Anschließend übernahmen drei kleinere Hilfstriebwerke das weitere Abbremsen, bis sie in einer Höhe von 5 bis 10 m ausgeschaltet wurden. Die Mondsonde fiel dann das letzte kleine Stück mit etwa 2 bis 3 m/s frei auf die Mondoberfläche hinunter. Ein Federbein gestellt fing den verbleibenden Landestoß sicher ab. Das aus einer offenen Gitterkonstruktion bestehende Landungsgerät (280 kg) hatte eine Höhe von etwa 3 m und mit den drei Federbeinen eine „Spannweite“ von ungefähr 4,30 m.





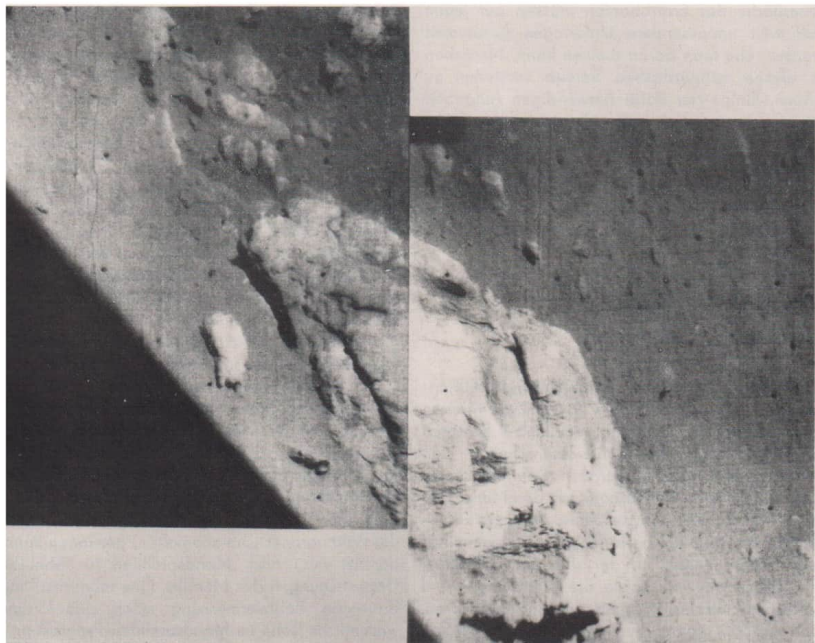
Kernstück der Ausrüstung von Surveyor-1 bildete ebenfalls eine Fernsehkamera, die bis zum 14. Juni 1966 insgesamt 10 338 Aufnahmen, davon jeweils 1000 mit Rot-, Grün- und Blaufiltern, machte und zur Erde übertrug. Ein schwenkbarer Spiegel gestattete, das volle Panorama zu erfassen, und erlaubte Aufnahmen unter verschiedenen Blickwinkeln gegen die Mondoberfläche. Die Optik der Kamera konnte von der Erde aus in der Entfernungseinstellung und in der Weitwinkel-

und Telewirkung gesteuert werden. In der geringsten Aufnahmeentfernung (etwa 1,2 m) zeigten die Bilder noch Einzelheiten von 1 mm Größe. Die Panoramabilder ließen – ähnlich wie die von Luna-9 – ein flaches und von Gesteinstrümmern übersätes Gelände erkennen, dessen Feinstruktur jedoch einige geringe Unterschiede zu der Umgebung der sowjetischen Mondsonde aufwies. Das betraf von allem die Anzahl und die Größenverteilung des Trümmermaterials sowie dessen Lage

Schema der US-amerikanischen
Mondlandungs-sonde „Surveyor“.

- 1 Flächenantenne;
- 2 Rundstrahlantenne;
- 3 Solarzellenfläche;
- 4 Kamera;
- 5 Federbein

Nahaufnahme eines Gesteinsbrockens
von 45 cm Länge
durch die US-amerikanische Mondsonde Surveyor-1



zur Oberflächenkruste. Grundsätzlich konnte der durch Luna-9 erhaltene Befund bestätigt werden, daß die Mondoberfläche offenbar keine geschlossene dickere Schicht frei beweglichen Staubes trägt. Die Festigkeit der Oberflächenschicht konnte aus Messungen beim Aufsetzen von Surveyor-1 (Dehnmeßstreifen an den Federbeinen) zu 2,5 bis 7 kp/cm² ermittelt werden.

Mit diesen ersten weichen Mondlandungen wurde also einerseits die reine Mondforschung um neue

Erkenntnisse bereichert, andererseits kam damit aber auch die Raumflugtechnik wesentliche Schritte auf dem Weg des Menschen zum Mond voran. Allerdings können die derzeitigen Informationen, zumindest für die Vorbereitung von Mondexpeditionen, noch längst nicht als ausreichend angesehen werden. Über die Beschaffenheit der Mondoberfläche – vor allem bevorzugt günstiger Landeplätze – sowie über die physikalischen Erscheinungen im mondnahen Raum bzw. auf der

Oberfläche des Erdtrabanten müssen auf jeden Fall weit umfassendere Unterlagen gesammelt werden, ehe man daran denken kann, Menschen in diesen außerirdischen Bereich vorstoßen zu lassen. Einige der dafür notwendigen Aufgaben können durch unbemannte Mondsatelliten gelöst werden, die mit entsprechenden Meßgeräten und Fernsehkameras ausgerüstet werden müssen. Aus diesem Grunde erhielten derartige Unternehmen inzwischen auch einen festen Platz im Programm der Monderkundung.

Künstliche Mondtrabanten erweitern das Programm

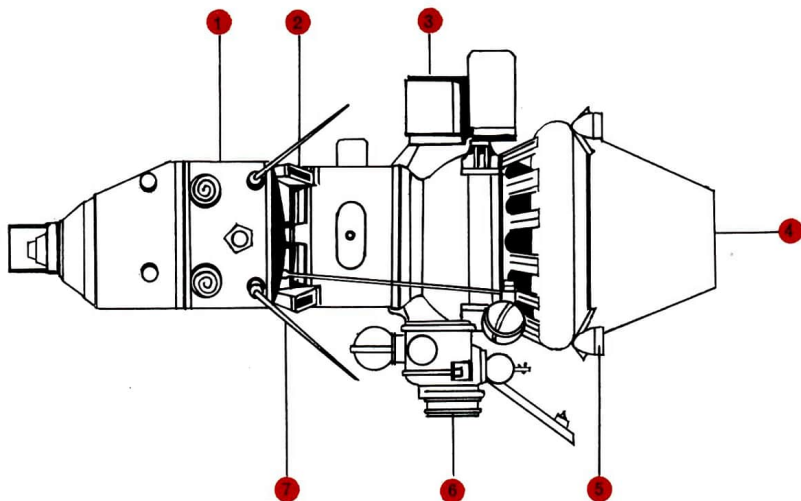
Schon der erste Versuch zu einem Mondsatellitenexperiment wurde ein voller Erfolg. Zwei Monate nach der weichen Landung von Luna-9 brachten die sowjetischen Raumfahrtwissenschaftler den am 31. März 1966 gestarteten Raumflugkörper Luna-10 auf eine Umlaufbahn um den Mond. Der in die Übergangsbahn zum Mond gelangte Raumflugkörper (1600 kg) bestand aus einer raumflugtechnischen Einheit, in der das Bahnkorrektur- und Bremstriebwerk sowie die Steuerungs- und sonstigen Hilfseinrichtungen untergebracht waren, und aus dem eigentlichen Mondsatelliten (245 kg). Dieser wurde 20 Minuten nach dem Bremsmanöver, bei dem man die Bahngeschwindigkeit von 2500 m/s auf 1250 m/s reduzierte und damit die Voraussetzung für den Einflug in die Mondumlaufbahn schuf, von der raumflugtechnischen Einheit getrennt. Das Ergebnis waren also zwei Mondtrabanten, da auch der Triebwerks- und Steuerungsteil des Luna-Systems in eine Mondumlaufbahn eintrat. Für den eigentlichen Mondsatelliten ergab sich eine Bahn mit einer geringsten Entfernung zur Mondoberfläche (Periselenumshöhe) von rund 350 km und einer größten Entfernung (Aposelenumshöhe) von rund 1017 km.

Der hermetisch abgeschlossene Gerätebehälter des Mondsatelliten Luna-10 enthielt außer der üblichen Ausrüstung für die Temperaturregelung und Energieversorgung verschiedene funkttechnische Anlagen zur Bahnvermessung und Meßwertübertragung, Speicherbehälter für das Arbeitsmedium des Systems zur Fluglageregelung sowie eine Reihe von Meßgeräten. Die meßtechnische Ausrüstung zur Untersuchung des Mondes und des mondnahen Raumes umfaßte Mikrometeoritendetektoren, Meßgeräte für solare Teilchenströme, ein Magnetometer, ein Gammastrahlungsspektrometer sowie ein Meßgerät für Infrarotstrahlung. Die wissenschaftliche Ausstattung des am 24. August 1966 gestarteten Luna-11-Mondsatelliten (1645 kg), der die mit Luna-10 begonnenen Untersuchungen erweitern sollte, entsprach offenbar weitgehend der seines Vorgängers. Die Bahn von Luna-11 lag in einer Höhe zwischen 160 km und 1200 km über der Mondoberfläche. Übrigens, ebenso wie man aus den Bahnänderungen eines Erdsatelliten, sofern der Einfluß der Hochatmosphäre ausgeschieden wird, Aufschlüsse über die Form des Erdkörpers und die Struktur des Erdinneren (Dichteanomalien) gewinnen kann, benutzt man auch Mondsatelliten für ähnliche Untersuchungen des Mondes. Eine möglichst lang dauernde Bahnvermessung spielt daher eine wesentliche Rolle im Mondsatelliten-Programm. Noch vor dem Start von Luna-11 kamen auch die USA zu ihrem ersten Erfolg mit einem Mondsatelliten der Serie „Lunar-Orbiter“. Das Besondere an diesen Raumflugkörpern (380 kg), die im übrigen ähnlichen Untersuchungen dienten wie die sowjetischen Mondsatelliten, ist die Ausrüstung mit Bildübertragungseinrichtungen. Die Aufnahmen sollen einerseits Unterlagen zur Auswahl geeigneter Landeplätze für spätere Mondexpeditionen liefern, andererseits aber auch für die allgemeine Mondforschung das Bild einer umfassenden Mondtopographie abrunden (Mondrückseite, Polarregionen des Mondes). Lunar-

Schema des sowjetischen Mondsatelliten

Luna-10 mit Antriebsteil.

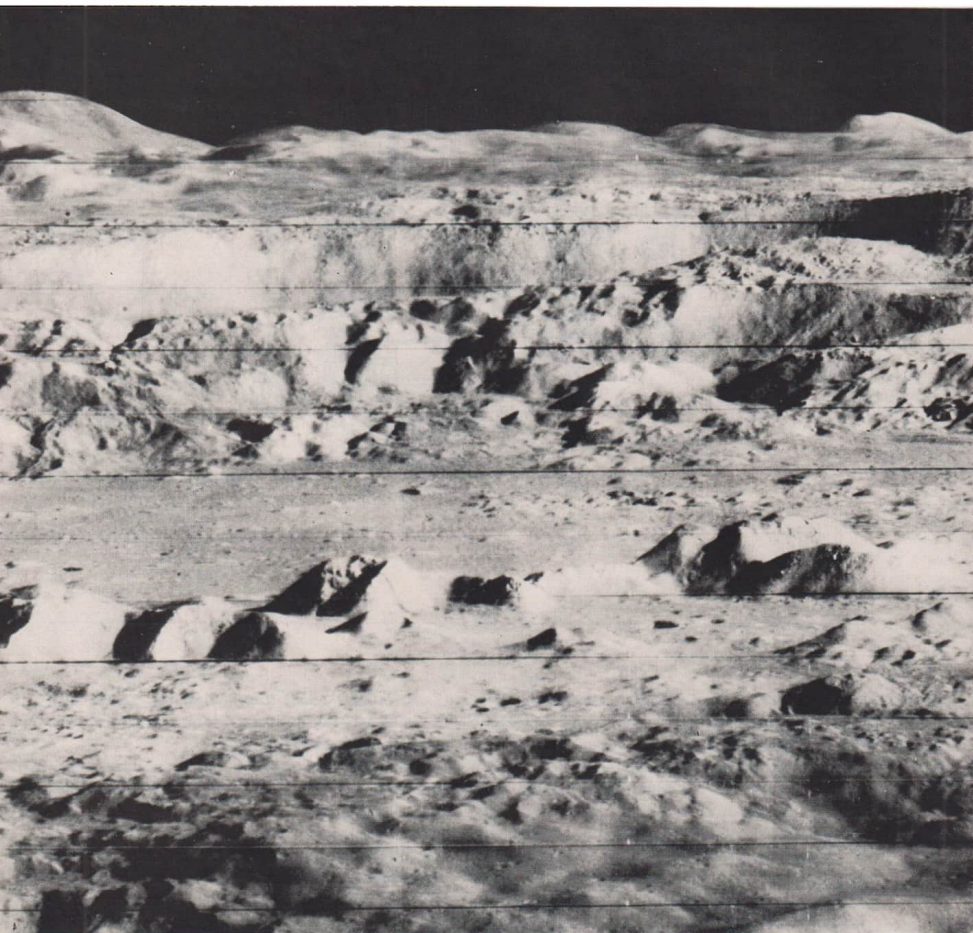
- 1 Gerätezeile Luna-10;
- 2 Trennmechanismus;
- 3 Astronavigationsanlage;
- 4 Korrektur- und Bremsstrahlwerk;
- 5 Lageregelungsdüse;
- 6 funktechnische Ausrüstung;
- 7 Antennen



Orbiter-1 (10. August 1966) erreichte eine Umlaufbahn zwischen 203 km und 1850 km Höhe über der Mondoberfläche. Durch zwei Bahnkorrekturen wurde die geringste Bahnhöhe dann noch auf 58 km bzw. 37 km vermindert, um die Bildqualität, die durch eine Störung im Kameranachführungssystem stark herabgemindert worden war, zu verbessern. Trotzdem erhielt man statt einer erwarteten Detailauflösung von 0,9 m nur eine solche von 4,5 m. In Verbindung mit den ausgezeichneten Aufnahmen, die Lunar-Orbiter-2

(7. November 1966) dann lieferte, ergab sich dennoch ein reichhaltiges Material für die oben skizzierte Aufgabenstellung.

Die Sowjetunion variierte den Typ ihrer Luna-Mondsonden, indem Luna-12 ebenfalls eine Bildübertragungsanlage erhielt. Luna-12 (25. Oktober 1966) war der dritte sowjetische Mondsatellit; er gelangte in eine Umlaufbahn zwischen 100 und 1750 km Höhe über der Mondoberfläche. Die Aufnahmen mit Luna-12 entsprachen durchaus den Erwartungen und zeigten aus einer Höhe



Aufnahme der Mondoberfläche durch den
US-amerikanischen Mondsatelliten Lunar-Orbiter-2
aus einer Höhe von 45 km,
240 km südlich vom Zentrum des Kraters „Copernikus“
(vgl. Bild auf Seite 244).
Die Aufnahme zeigt das Innere des Kraters
aus schräger Sicht
(unterhalb der Bildmitte die Zentralberge des Kraters
mit einer größten Höhe von etwa 300 m;
oberhalb der Bildmitte der nördliche Kraterwall)

von ungefähr 100 km Ausschnitte der Mondoberfläche in der Größe von 100 km², mit einer Detailauflösung, die etwa hundertmal besser war als die auf den besten Mondfotografien irdischer Observatorien. Es lassen sich auf diesen Aufnahmen der Mondvorder- und -rückseite noch Einzelheiten mit einer Ausdehnung von etwa 2 bis 5 m unterscheiden.

Erste Schlußfolgerungen

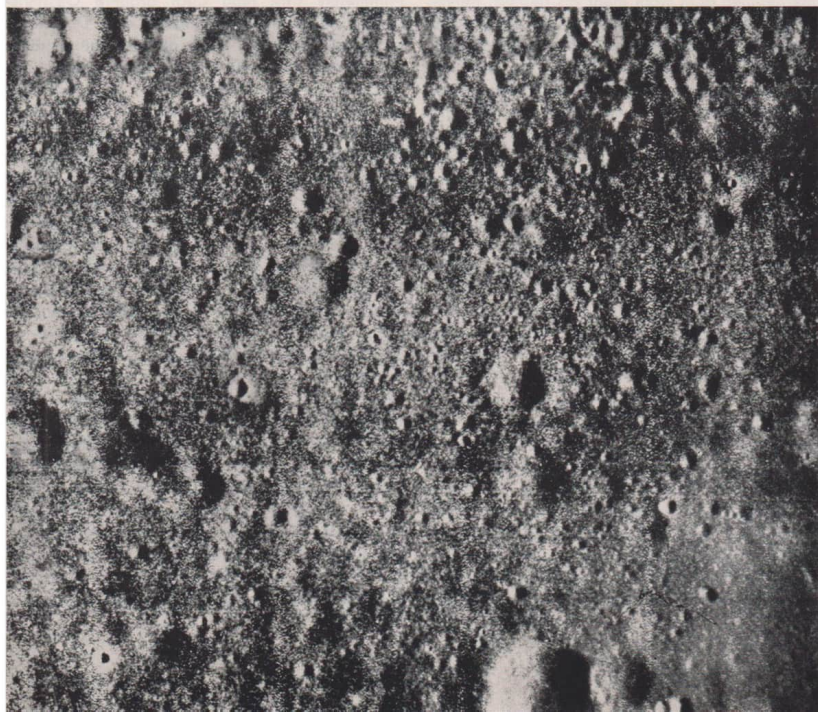
Aus dieser bewußt in gedrängter Fülle gebrachten Aneinanderreihung der bisherigen Mondflugunternehmen geht wohl mehr als deutlich hervor, mit welcher Intensität und vor allem mit welchen rapid angewachsenen praktischen Möglichkeiten die Raumfahrtforschung heute schon auf dem Wege der Erschließung des Mondes voranschreitet. Auf Vollständigkeit dieses Bildes wurde bei unserer Betrachtung noch weitgehend verzichtet, da hier nur die wesentlichsten Züge und Marksteine dieses Weges charakterisiert werden sollen.

Besondere Aufmerksamkeit verdient aber eine erste zusammenfassende Darstellung über die Beschaffenheit des Mondes, wie sie die sowjetischen Wissenschaftler A. Winogradow und J. Surkow nach Auswertung von Meßwerten und Aufnahmen ihrer Mondsonden und Mondsatelliten veröffentlichten. Sie schreiben unter anderem: „Bekanntlich hat sich die oberste Schicht der Mondsubstanz unter Verhältnissen heftiger Temperaturschwankungen, einer geringen Gravitation und eines hohen Vakuums herausgebildet. Von wesentlichem Einfluß erwiesen sich auch der Meteoritenbeschuß, der Sonnenwind und die kosmische Strahlung. Deshalb nahmen viele Wissenschaftler an, die Einwirkung dieser Faktoren habe zu einer Zerstörung der Gesteine und zur Bildung einer mächtigen Staubschicht auf der Mondoberfläche geführt. Doch die von Luna-9 übermittelten Bilder

haben eine solche Vermutung nicht bestätigt, obgleich die Möglichkeit des Bestehens von Staubschichten in einigen Gebieten nicht völlig ausgeschlossen werden kann.

Die eingehende Analyse der Aufnahmen beweist, daß die Mondoberfläche eine komplizierte Struktur besitzt. Wahrscheinlich stellt die einige Zentimeter starke oberste Schicht des Mondgesteins eine stark aufgelockerte Substanz dar, die praktisch die gesamte Oberfläche bedeckt. Ihre rauhe und stark zerfressene Struktur erinnert an schmutzigen tauenden Schnee im Frühjahr. Diese Schicht ist nicht homogen. Zusammen mit kleinsten Teilchen in einer Größe von Bruchteilen eines Millimeters trifft man auch größere Gesteinsbrocken von einigen Zentimetern oder Dutzenden von Zentimetern an. Wahrscheinlich würde diese Schicht, falls man sich darüber bewegt oder geht, etwas einbrechen. Ihre Stärke hat sich offensichtlich mit der Zeit nicht verändert. Beim Aufschlag von Meteoriten auf die Mondoberfläche wird das Material der Oberflächenkruste in den kosmischen Raum hinausgeschleudert. Dabei ist die Menge der vom Mond eingebüßten Substanz größer als diejenige, die durch den Meteoritenfall auf den Mond gelangt. Es ist sehr gut möglich, daß unter der Oberflächenkruste eine Zwischenschicht liegt, die allmählich in eine festere Substanz übergeht, ähnlich den kristallinen Magmagesteinen auf der Erde. Offensichtlich ist es gerade diese Zwischenschicht, welche die Tragfähigkeit des Mondbodens bestimmt.

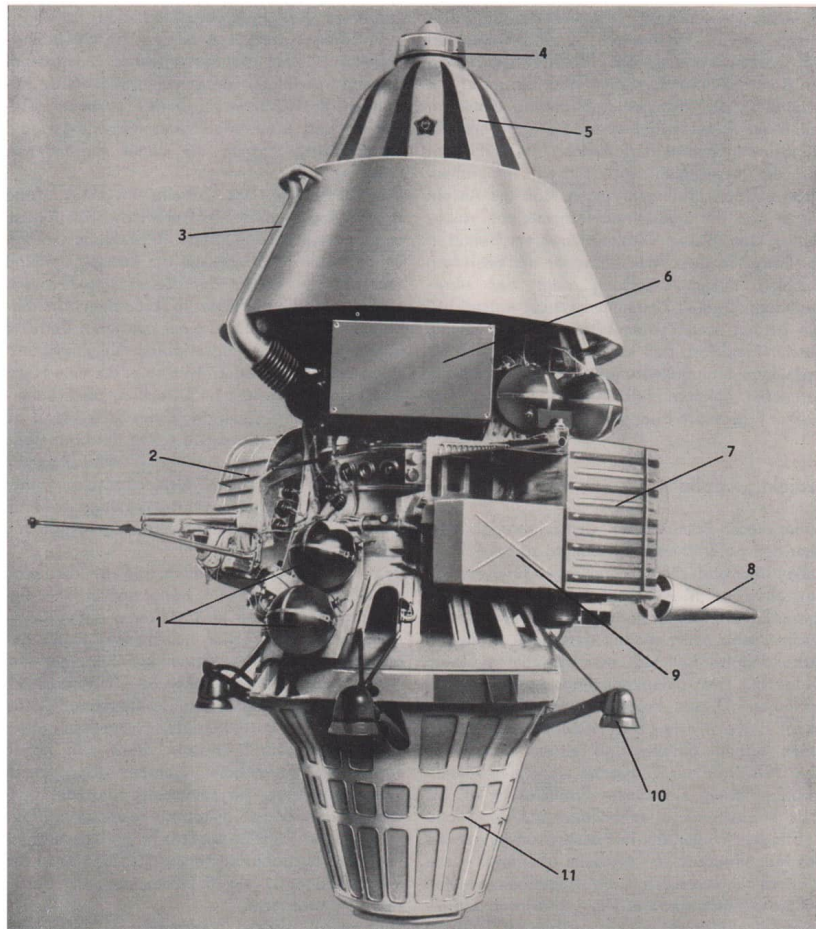
Wie man aus den Gamma-Strahlungsmessungen des Mondsatelliten Luna-10 folgern kann, kommt die Gesamtintensität der Gammastrahlung der Mondgesteine analogen Kennwerten für die Erdkruste nahe. Sie ist nur um das anderthalb- bis zweifache höher als in den Graniten, das heißt in den irdischen Gesteinen mit dem höchsten Gehalt an Uran, Thorium und Kalium. Interessant ist, daß die Spektren der Mond-Gammastrahlung den irdischen nicht gleichen, die nur durch den Gehalt



Aufnahmen der Mondoberfläche durch den sowjetischen Mondsatelliten Luna-12 aus etwa 250 km Höhe. Die beiden Aufnahmen geben jeweils ein etwa 25 km² großes Gebiet aus der Gegend südöstlich des Kraters „Aristarch“ wieder. Der größte Krater hat einen Durchmesser von 600 m

Originalgetreues Modell des sowjetischen Mondsatelliten Luna-12.

- 1 Druckgasbehälter für Lageregelungssystem;
- 2 Kamerasystem;
- 3 Radiator des Temperaturregelungs;
- 4 Radiometer;
- 5 Ausscheidungsvorrichtungen;
- 6 chemische Batterien;
- 7 Astronavigationssystem;
- 8 Antenne;
- 9 Elektronik des Astronavigationssystems;
- 10 Lageregelungsdüsen;
- 11 Korrektur- und Bremstriebwerke



an Uran, Thorium und radioaktivem Kalium bestimmt werden. Es hat sich herausgestellt, daß die Gammastrahlung des Mondes vorwiegend von Kernreaktionen bestimmt wird, die unter der Einwirkung der kosmischen Strahlung eintreten. Auf ihren Anteil entfallen etwa 90 Prozent der Mondstrahlung und nur weniger als 10 Prozent auf die erwähnten radioaktiven Mineralien. Weitere Untersuchungen zeigen, daß die Anzahl der in den Mondgesteinen festgestellten radioaktiven Elemente im Vergleich zu ihrem Gehalt in den irdischen Gesteinen entweder der basischen (Basalt-) Zusammensetzung oder der ultrabasischen (Dunit-) Zusammensetzung entspricht." Die beiden sowjetischen Wissenschaftler stellen abschließend fest, daß es gewiß noch zu früh für endgültige Schlußfolgerungen sei. Die ersten Experimente konnten selbstverständlich nur vorläufige Ergebnisse bringen.

Projekt „Apollo“

Außer diesen Bemühungen, den Erfahrungsschatz über den natürlichen Erdtrabanten zu bereichern, gehen aber auch die Vorbereitungen für die ersten Vorstöße des Menschen zum Mond stürmisch voran. Ein Einblick in die vielfältige raumflugtechnische Problematik, die mit derartigen Vorhaben verbunden ist, läßt sich bis zu einem gewissen Grade aus dem amerikanischen „Apollo“-Projekt gewinnen. Dieses Programm wurde 1961 von John F. Kennedy (1917–1963) zu einer nationalen Aufgabe erhoben und seitdem mit allen in den USA dafür zur Verfügung stehenden Mitteln vorangetrieben. Ziel dieses Projektes ist es, als erste Menschen zwei Amerikaner auf den Mond zu bringen. Wegen der immensen Schwierigkeiten des Mondflugproblems erscheint allerdings – wie wir noch sehen werden – die „Apollo“-Konzeption außerordentlich gewagt. Die technischen Einzelheiten dieses Projektes wurden schon oft und breit

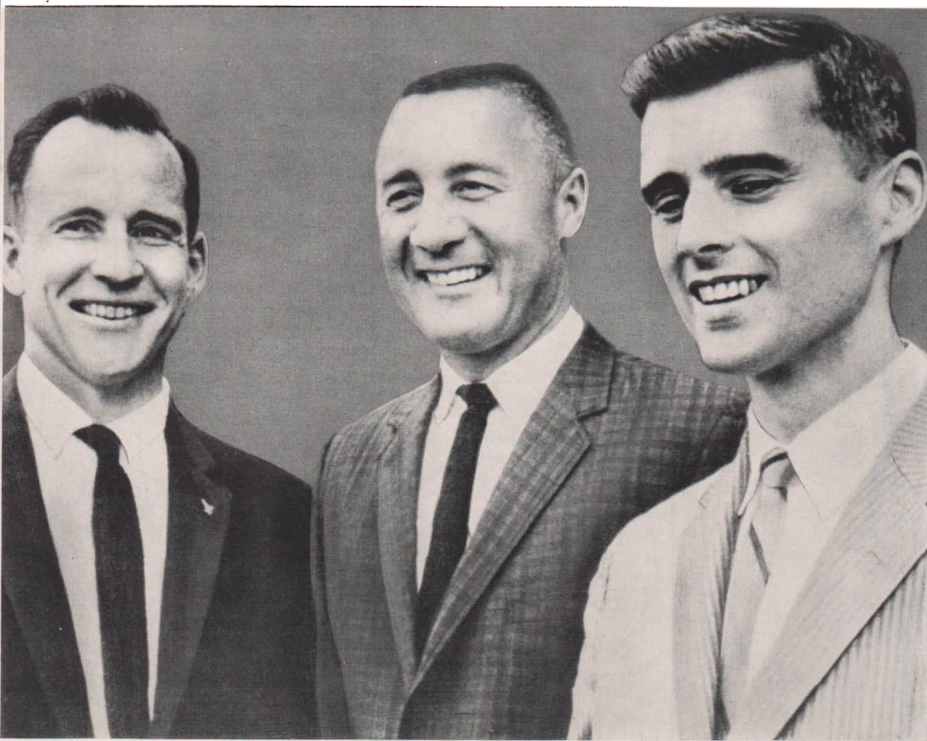
dargelegt. Verlautbarungen zu den raumflugtechnischen Einzelheiten sowjetischer Mondflugprojekte blieben dagegen sehr zurückhaltend. Dennoch verfolgen selbstverständlich auch sowjetische Raumfahrtwissenschaftler in einem systematisch und breit angelegten Forschungs- und Entwicklungsprogramm die damit verbundenen Probleme.

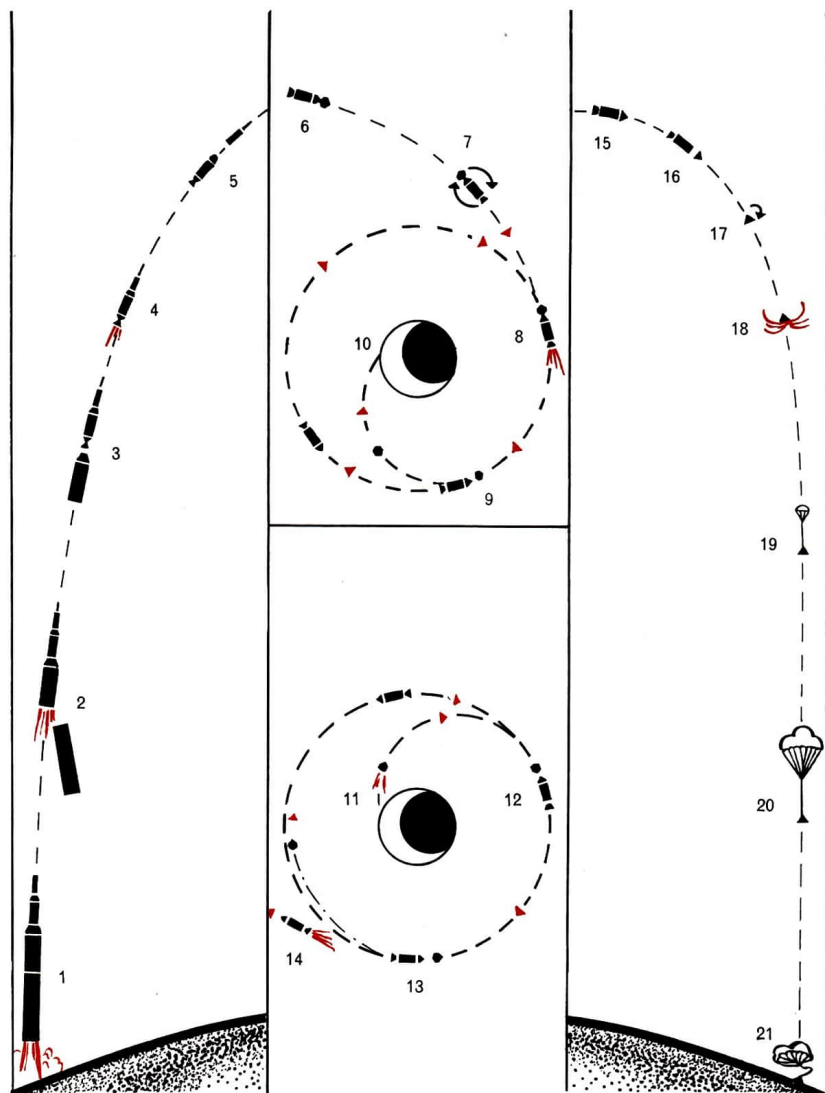
Die Konzeption des „Apollo“-Projektes stand von Anfang an unter der beherrschenden Devise eines extrem beschleunigten Entwicklungstempos. So entschloß man sich, um die kostspielige und zeitraubende Phase der Rendezvous-Montage großer Mondflugsysteme in erdnahen Umlaufbahnen zu umgehen, zu einer gewagten Variante der möglichen Mondflugverfahren. Ausgangspunkt sollte eine neue Trägerrakete sein, die eine Nutzmasse von etwa 40 t im Direktflug ab Erdoberfläche auf eine Übergangsbahn zum Mond zu bringen vermag. Diese 40 t sollen die Grundlage für die konstruktive Auslegung des „Apollo“-Mondflugsystems bilden. Das Einschalten eines „Parkbahn“-Abschnittes vor dem Abflug zum Mond bedeutet daher keine grundsätzliche Änderung des Direktflugverfahrens.

Vom Umfang der Nutzmasse, die auf den Weg zum Mond gebracht wird, hängt nun in jeder Beziehung der Ablauf des weiteren Operationsprogrammes ab. Sollte beispielsweise die gesamte, geschlossene Mondflugeinheit auf der Mondoberfläche weich landen, so müßte sie jedoch bei einer dreiköpfigen Raumschiffbesatzung nicht 40 t, sondern etwa 100 bis 150 t Nutzmasse haben. Dieser Mehrbedarf entsteht durch den hohen Treibstoffverbrauch beim Abbremsen des ganzen Raumflugkörpers, der seinerseits nach der Landung noch über genügend Antriebsmittel verfügen muß, um den Rückflug zur Erde möglich zu machen. Mit einer Ausgangsmasse von 100 bis 150 t wäre ein derartiges Direkt-Mondflugprogramm durchaus zu bewältigen.

Die amerikanischen Wissenschaftler erkannten

Die Brandkatastrophe vom 28. Januar 1967,
bei der die Astronauten
Edward White, Virgil Grissom und Roger Chaffee
(v. l. n. r.) während der Bodenerprobung
einer „Apollo“-Kapsel den Tod fanden,
war nicht zuletzt
auf die überhastete Vorbereitung
des US-amerikanischen Projektes „Apollo“
zurückzuführen





Phasen des US-amerikanischen „Apollo“-Mondflugprogrammes.

- 1 Start;
- 2 Abtrennung der ersten Stufe;
- 3 Abtrennung der zweiten Stufe und Einflug in Parkbahn;
- 4 Abflug aus Parkbahn;
- 5 Abtrennung der dritten Stufe;
- 6 Anflug auf Mondsatellitenbahn;
- 7 Lageänderung zur Vorbereitung auf Bremsmanöver;
- 8 Bremsmanöver;
- 9 Abtrennung des „Mondbootes“;

- 10 Landung des „Mondbootes“;
- 11 Wiederaufstieg;
- 12 Rendezvous mit Kommandoteil;
- 13 Trennung von „Mondboot“-Rest;
- 14 Antrieb zum Rückflug;
- 15 Anflug auf Eintauchbahn;
- 16 Abtrennung der Rückkehrkapsel;
- 17 Drehung der Rückkehrkapsel;
- 18 Eintauchvorgang;
- 19 Stabilisierung durch Hilfsschirm;
- 20 Abstieg am Hauptschirm;
- 21 Landung

nach ausführlichen Vorstudien, daß eine Träger- rakete, die 100 bis 150 t Nutzmasse zum Mond zu befördern imstande ist, nicht in der vorgegebenen Zeit (bis 1969/70) entwickelt und einsatzbereit gemacht werden konnte. Da sie außerdem den ebenfalls zeitraubenden Ausweg über die Rendezvous-Montage kleinerer Nutzmassen nicht gehen wollten, arbeiteten sie auf der Basis von 40 t Mondflugmasse ein recht risikovolles Operationsprogramm für ihr Projekt „Apollo“ aus.

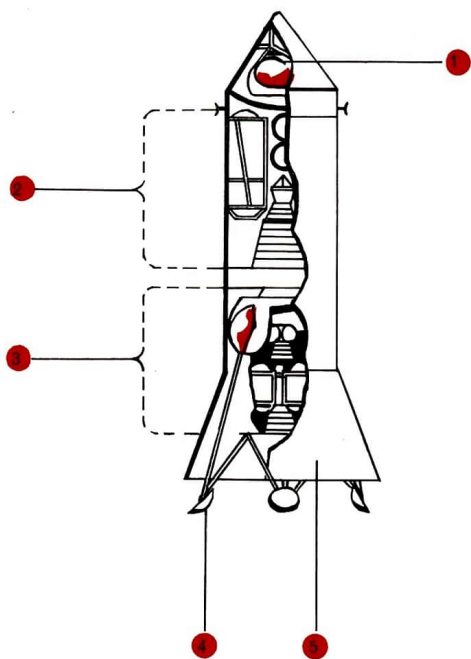
Danach soll die Trägerrakete Saturn-5 mit ihren ersten drei Antriebsstufen das „Apollo“-System (3 Mann Besatzung) zunächst in eine Erdumlaufbahn („Parkbahn“) befördern. Die dritte Stufe bleibt anschließend mit der Mondflugeinheit noch weiter verbunden, bis sie nach letzten Überprüfungen des „Apollo“-Systems erneut gezündet wird. Am Ende dieser letzten Antriebsperiode der Trägerrakete trennt sich das Mond-Raumschiff von der dritten Stufe und tritt in die Übergangsbahn zum Mond ein. Das „Apollo“-System besteht aus drei Hauptkomponenten, nämlich aus der Kommando- und Rückkehrkapsel, dem Antriebsteil und dem sogenannten „Mondboot“ (Lunar Excursion Modul = LEM). In der Kommando- und Rückkehrkapsel befinden sich die drei Astronauten während des größten Teiles des Hin- und während des gesamten Rückfluges; der Antriebsteil soll die An- und Abflugmanöver am Mond ermöglichen; und mit dem „Mondboot“ (etwa 16 t) sollen zwei Astronauten den Abstieg zur Mondoberfläche unternehmen. Der dritte Mann der Besatzung bleibt mit der Kommandokapsel und dem Antriebsteil in einer Mondumlaufbahn, in die das „Apollo“-System zunächst durch ein an Treibstoffen nicht allzu aufwendiges Bremsmanöver eingeflogen wird. Durch diesen Kniff läßt sich der Gesamtaufwand gerade noch in den engen Rahmen der vorgegebenen 40 t Nutzmasse einpassen. Größere Reserven verbleiben bei der sehr differenzierten Masseaufschlüsselung allerdings nicht mehr.

Das „Mondboot“, das in einer engen Kabine ge-

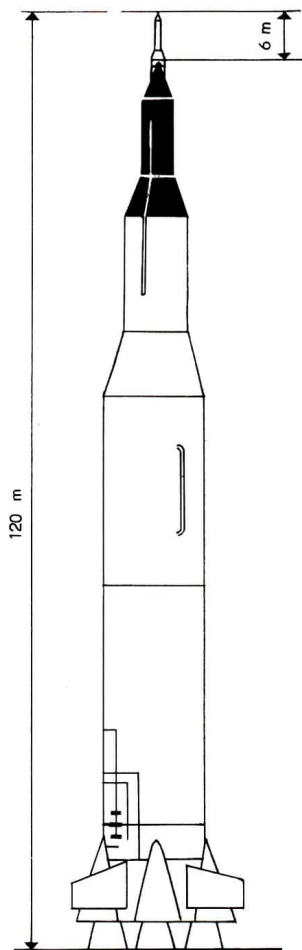
rade zwei Menschen Platz bietet, soll eine Brems- landung mit Aufsetzen auf einem dreibeinigen Landegestell unternehmen. Nach der Landung könnte jeweils ein Mann über eine Ausstiegs- schleuse das Landegerät für einige Zeit verlassen und Erkundungen auf der Mondoberfläche an- stellen. Die gesamte Aufenthaltsdauer auf dem Mond ist mit etwa 16 bis 20 Stunden angesetzt. Danach müssen die beiden Astronauten zur um- laufenden Kommando- und Rückkehrkapsel zurück- kehren, weil das Versorgungssystem des Lande- gerätes einen wesentlich längeren Aufenthalt nicht zuläßt. Das Landegestell und der leere Lande- antriebsteil bleiben auf der Mondoberfläche, und nur die Kabine wird von einem angebauten kleineren Antrieb in die Umlaufbahn der Kom- mandoeinheit gebracht. Dieser Aufstieg verlangt eine außergewöhnliche Präzision, damit das Ren- dezvous der beiden Raumflugkörper gelingt.

Nach dem Kopplungsmanöver sollen die beiden Landungsastronauten wieder in die Kommando- kapsel umsteigen. Der Rest des „Mondbootes“ wird in der Mondumlaufbahn zurückgelassen, und der Rückflug zur Erde beginnt. Da aber die Treib- stoffe nach dem Eintritt in die Übergangsbahn zur Erde praktisch verbraucht sind, kann beim Anflug auf die Erde kein Abbremsmanöver eingeleitet werden. Die von dem nutzlos gewordenen An- triebsteil getrennte Drei-Mann-Kapsel taucht da- her mit einer Geschwindigkeit von annähernd 11 km/s in die Atmosphäre ein und wird lediglich durch deren aerodynamischen Widerstand ab- gebremst. Die „Eintauchbahn“ darf allerdings nicht zu steil verlaufen, da sonst die extrem hohe aero- dynamische Aufheizung und die übermäßige Be- lastung durch Bremskräfte die Rückkehrkapsel zerstören würden. Ebenso darf der Anflug auf die Erdatmosphäre auch nicht zu flach vor sich gehen, weil dann eine ausreichende Abbremsung nicht möglich wäre und die Kapsel die Erdoberfläche nicht erreichen könnte.

Alles in allem zeigt sich also beim „Apollo“-Projekt,



- 1 „Apollo“-Kommandokapsel;
- 2 Antriebseinheit;
- 3 „Mondboot“;
- 4 Federbein;
- 5 Adapter zur dritten Stufe der Saturn-V



geringe raketentechnische Anstrengungen. Die im Rahmen des „Saturn“-Programmes geschaffene Dreistufenrakete Saturn-5 hat eine Startmasse von etwa 2700 t, und ihre fünf gebündelten Starttriebwerke liefern einen Schub von rund 3500 Mp. Die mit dem aufgesetzten „Apollo“-

System ungefähr 120 m hohe Rakete kann etwa 120 t Nutzmasse in eine erdnahe Umlaufbahn tragen; sie schafft damit unter anderem weitreichende Perspektiven für Raumstationsprogramme. Wie ungewöhnlich die Handhabung derartiger Trägerraketen wird, zeigt sich daran, daß Fertigungsbereich und Startplatz weit voneinander getrennt werden mußten. Die serienmäßig in einem 160 m hohen Gebäude fertig aufgerüstete, aber noch nicht betankte Rakete wird auf einer von vier gewaltigen Raupenschleppern gezogenen Plattform über eine rund 7 km lange Strecke zum Startplatz transportiert. Die amerikanischen Raumfahrtexperten bemühen sich mit äußerster Intensität darum, das gesteckte Ziel zumindest bis zum Jahre 1970 zu erreichen.

Raumfahrtprogramme und Raumflugtechnik — Triebfeder der technischen Revolution

Die Fülle neuer Probleme, die bei der Entwicklung der Raketen- und raumflugtechnischen Hilfsmittel für den Mondflug gelöst werden müssen, ist gewaltig. Im Prinzip bleibt es dabei gleichgültig, nach welcher Variante das Operationsprogramm eines solchen Unternehmens abrollen soll. Der Umfang der Arbeit spiegelt sich nicht zuletzt auch in dem enormen geistigen und materiellen Aufwand wider, den diese Bestrebungen gegenwärtig schon umschließen. Wie eine große Anzahl ökonomischer Analysen inzwischen längst nachgewiesen hat, ist dieser Aufwand in seinem allgemeinen Nutzen für die Entwicklung der menschlichen Gesellschaft jedoch mehr als gerechtfertigt. Ihre Beiträge für die Weltraumforschung in er-

kenntnistheoretischer und allgemein naturwissenschaftlicher Hinsicht sind in der Tat nur die eine Seite der Raumflugtechnik. Die andere Seite ist die viel fruchtbarere und anregende Wirkung auf weitest Bereiche von Wissenschaft und Technik. Hier laufen jährlich für die aufgewendeten Mittel schon hohe und höchste Zinsen in Form ökonomisch nutzbarer Erfahrungen bei den an dieser Entwicklung beteiligten Ländern ein. Zahlreiche Faktoren, die in der gegenwärtigen technischen Revolution eine hervorragende Rolle spielen (Automatisierung, elektronische Rechen- und Datenverarbeitungstechnik, Mikroelektronik, hochentwickelte Nachrichtentechnik usw.) wären bisher auf keinen Fall so schnell ökonomisch wirksam geworden, wenn nicht seit Jahren die hochgeschraubten Forderungen der Raumflugtechnik zu erfüllen gewesen wären. Dieser Sachverhalt wird in ständig weiter zunehmendem Umfang die Förderung der Raumfahrt und damit auch den dafür getriebenen Aufwand rechtfertigen.

Die Begründung für die zuletzt getroffene Feststellung ist vor allem dadurch gegeben, daß die Raumfahrtforschung nicht mit bemannten Großsatelliten und Mond-Raumschiffen abgeschlossen sein wird. Dahinter zeichnen sich schon wieder neue anspruchsvolle Aufgabenstellungen ab, die in den Bereich der Planeten unseres Sonnensystems hinausführen. Mit den Mitteln, die sich der Mensch gegenwärtig in Gestalt gewaltiger Trägerraketen und neuer Antriebsverfahren für den Flug im interplanetaren Raum schafft, können derartige Pläne sicher noch vor Ende dieses Jahrhunderts verwirklicht werden. Beschäftigen wir uns daher noch in einem letzten Überblick mit den wesentlichsten Faktoren unseres bisherigen Wissens über dieses Expeditionsfeld von übermorgen!

Venus und Mars - Nahziele des interplanetaren Raumfluges

Noch bis vor wenigen Jahren bildeten Messungen und Beobachtungen der Astronomen die einzige Brücke zu anderen Weltkörpern in den Tiefen des kosmischen Raumes. Auf die naturbedingten Schwierigkeiten dieser Forschungsarbeiten infolge des erdgebundenen Standpunktes der Beobachter wurde schon in einem früheren Kapitel hingewiesen. Trotz der ständig größer und leistungsfähiger werdenden Instrumente und trotz der verbesserten Meßmethoden beginnt sich jetzt eine Grenze der Informationsmöglichkeiten für die klassische Weltraumforschung abzuzeichnen. Besonders deutlich läßt sich dies in der Planeten-astronomie erkennen, die im Laufe der letzten Jahrzehnte kaum noch nennenswerte neue Erkenntnisse zu liefern vermochte. Darüber können auch die großen Erfolge der astronomischen Forschung im Bereich der Fixsternwelt nicht hinwegtäuschen. So haben zwar die Astronomen mit den gewaltigen Fernrohren und Radioteleskopen der Gegenwart neue Einblicke in die Struktur weit entfernter Sternsysteme gewonnen, aber ihr Wissen um die Bedingungen auf den Oberflächen der so „nahen“ Geschwisterplaneten der Erde nicht wesentlich vertiefen können. Gerade in diesem Zweig der Weltraumforschung wären jedoch Fortschritte dringend erwünscht, um die Frage nach der Existenz außerirdischen Lebens zu beantworten. Alle Entdeckungen in dieser Richtung würden tiefgreifende Konsequenzen vor allem für die Naturwissenschaft und die Philosophie zur Folge haben.

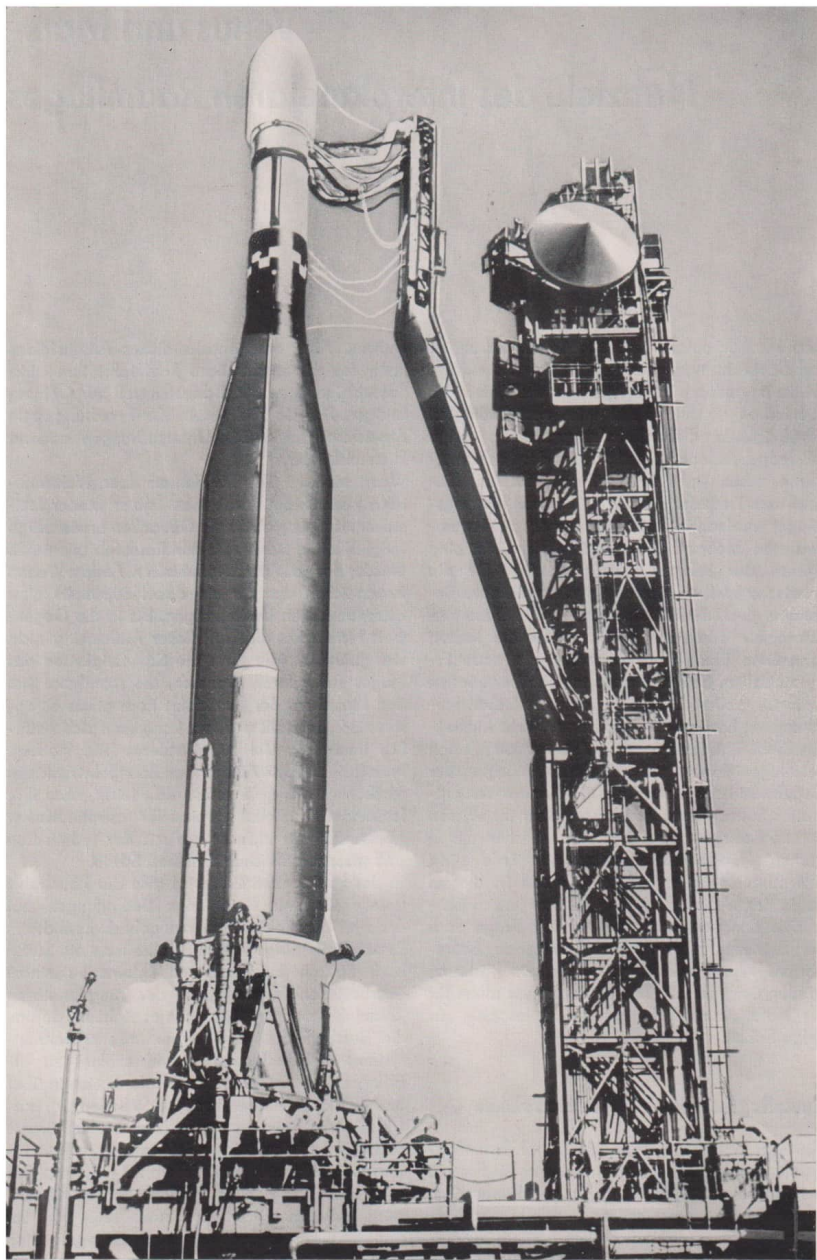
Raumflugtechnik rückt Planeten näher

Mit dem Anbruch des Zeitalters der Raumflugtechnik fallen jetzt auch nach und nach die Fesseln der Planetenforschung. Die Untersuchungen mit Raumflugkörpern im erdnahen Raum bilden schließlich nur einen, wenn auch außerordentlich bedeutenden Teil der Erforschung unserer kosmischen

Umwelt. Aber erst jenseits dieses Arbeitsfeldes kann die wissenschaftliche Raumfahrt ihre wirklich einzigartigen Möglichkeiten voll zur Geltung bringen. Nur sie allein bietet der Forschung reale Aussichten auf direkte Untersuchungen anderer Himmelskörper.

Wenn man in älteren Werken über Weltraumfahrt nachschlägt, kann man immer wieder feststellen, daß es gerade die Gedanken an derartige Möglichkeiten waren, die den Raumfahrt pionieren entscheidende Impulse vermittelten. Andere Welten zu erreichen war für sie das Hauptmotiv aller astronautischen Bestrebungen. Bis in die Gegenwart hinein hat sich an dieser Auffassung nicht viel geändert. Nur über die Schwierigkeiten des Fluges zu anderen Planeten, die manchmal von den Klassikern der Raumfahrt noch etwas zu optimistisch beurteilt wurden, kann man sich natürlich heute ein viel zutreffenderes Bild machen. Phantasiebegabte Autoren von Raumfahrtromanen machen es sich zwar meist recht leicht, aber ihre fesselnde Darstellung reizvoller astronautischer Abenteuer hält nicht immer mit der technischen und wissenschaftlichen Exaktheit Schritt.

In der kommenden Zeit wird also die Raumfahrt unsere Kenntnisse von den Bedingungen auf anderen Himmelskörpern maßgeblich bereichern. Es wäre allerdings verfehlt, wollte man die Suche nach Spuren außerirdischen Lebens zu einem überbetonten Forschungsziel der interplanetaren Raumfahrt machen. Hier geht es vielmehr darum, die Beschaffenheit der Körper unseres Sonnensystems viel umfassender und exakter zu ergründen. Aus entsprechenden Informationen über andere Planeten oder ihre Monde ließen sich aufschlußreiche Beiträge zur Struktur des Erdkörpers erwarten und damit Schlußfolgerungen ziehen, inwieweit Erdkruste und Erdmantel wirtschaftlich noch intensiver genutzt werden könnten. Gleichzeitig würden Oberflächenuntersuchungen auf anderen Planeten auch das Entstehen organischen Lebens auf der Erde klären helfen.



Wie schon angedeutet, darf man allerdings über diesen einzigartigen Perspektiven des Fluges zu fremden Planeten nicht die harten Realitäten aus dem Auge verlieren. Das gilt besonders für das höchste astronautische Ziel, für den bemannten Flug zu den Nachbarn der Erde. Von dem Tage, an dem zum erstenmal ein Mensch einen Nachbarplaneten betritt, trennt uns vorläufig noch eine sehr lange Entwicklungs- und Vorbereitungszeit. Wer schon für das nächste Jahrzehnt mit einem „Sturmloch“ der Raumfahrer durch das Sonnensystem rechnet, wird sich bescheiden müssen. Zur Zeit setzt die Natur noch gewisse Schranken.

An erster Stelle steht die in irdischen Maßstäben kaum noch zu fassende Größe der Entfernungen. Selbst die unmittelbaren Nachbarplaneten, Venus und Mars, sind im günstigsten Fall noch rund 40 Millionen bzw. 56 Millionen km von uns entfernt. Daneben nimmt sich die mittlere Entfernung des Mondes mit rund 384 400 km außerordentlich gering aus, und darum sehen die Raumfahrtwissenschaftler den Erdbegleiter eben auch nur als „Nahziel“ an. Bis zu den beiden äußeren Planeten des Sonnensystems, Neptun und Pluto, sind die Entfernungen sogar noch hundertfach größer als die bis zu Venus und Mars. Diese Zahlen lassen die wahrhaft „astronomischen“ Dimensionen der Planetenräume erst richtig erkennen.

Das zweite Hindernis für Flüge im interplanetaren Raum ergibt sich unmittelbar aus den erwähnten Entfernungen. Es handelt sich dabei um das eigentliche Kernproblem des Planetenfluges, um die monate- oder sogar jahrelange Dauer derartiger Unternehmungen. Für unbemannte interplanetare Raumsonden wäre dieser „interplanetare Zeitfaktor“ zweifellos kein ernsthaftes Hindernis, da die Funktionstüchtigkeit der Raumflugkörper nur bis zum Eintreffen am Zielplaneten garantiert zu sein braucht. Hier wäre lediglich eine befriedigende Meßwert- und Bildsignalübertragung aus einigen hundert bis tausend Millionen Kilometern Entfernung zu gewährleisten. Völlig anders

ist es jedoch, wenn man Planetenexpeditionen mit bemannten Raumschiffen unternimmt. Hierbei müßten alle Einrichtungen des Raumschiffes bis zur geglückten Rückkehr voll funktionstüchtig bleiben. Wie aufwendig aber die technischen Lösungen und wissenschaftlichen Vorbereitungen für den Raumflug des Menschen sind, haben wir schon bei den ersten bescheidenen „Gehversuchen“ im erdnahen kosmischen Raum deutlich erkennen können. Dabei dauerten diese Flüge bisher maximal nur zwei Wochen.

Mit der zunehmenden Dauer des Raum Aufenthaltes hängen außerdem auch biologische, physiologische und sogar psychologische Probleme zusammen. Wie weit sich diese überhaupt mit hinreichender Sicherheit lösen lassen, steht heute in vielen Punkten noch längst nicht fest. Darüber sollten auch die durchaus erfreulichen Anfangsergebnisse der Raumfahrtmedizin nicht hinwegtäuschen. Auf jeden Fall wird immer ein enger Zusammenhang zwischen den raumfahrtmedizinischen Erfordernissen und den technisch-konstruktiven Lösungen im Raumschiff- und Raketenbau bestehen.

Berücksichtigt man nur diese allgemeinen Folgerungen, so zeigt sich, daß das Verhältnis zwischen dem Aufwand für die ersten unbemannten Planeten- und dem für die künftigen Planetenraumschiffe vielfach größer sein wird, als es zwischen dem für die unbemannten Erdsatelliten und dem für die ersten bemannten Raumflugkörper der Fall war. Noch deutlicher wird der große Sprung im raketen- und raumflugtechnischen Aufwand, wenn man die Erfordernisse der Flugprogramme betrachtet. Gehen wir von dem relativ unkomplizierten Flugprogramm eines künstlichen Erdsatelliten aus. Es sieht im Prinzip nur einfach den Aufstieg in eine Umlaufbahn um die Erde vor, wobei in grober Näherung mit einem Antriebsbedarf von etwa 9 bis 10 km/s zu rechnen ist. Mit den gegenwärtig zur Verfügung stehenden thermochemischen Trägerraketen ist diese Auf-

gabe durch das Stufenprinzip in zahlreichen Varianten lösbar. Der Umfang der zu befördernden Nutzmassen wird jeweils von der speziellen Leistungsfähigkeit der Trägerraketen bestimmt. Seine obere Grenze wird in den nächsten Jahren etwa 100 bis 150 t betragen.

Der einfachste Fall für interplanetare Flüge, die Entsendung einer unbemannten automatischen Raumsonde in den Bereich der Planeten Venus und Mars, bedingt jedoch – wie an anderer Stelle erläutert – schon eine Steigerung des Antriebsvermögens des Trägersystems auf etwa 11,5 bis 12,5 km/s. Auch diesen Anforderungen sind die zur Zeit verfügbaren Trägerraketen durchaus gewachsen. Allerdings muß dann eine so beträchtlich verminderte Nutzmasse in Kauf genommen werden, daß damit augenblicklich noch keine bemannten interplanetaren Raumschiffe gestartet werden können, sofern für jeweils ein Unternehmen auch immer nur eine Trägerrakete eingesetzt werden soll. Das gilt selbst für den Fall, daß eine Rakete die Leistung der Saturn-5 aufbringt.

Keplerellipsen und Hohmannbahnen

Geht man von den chemischen Antriebssystemen aus, so schließt sich nach Überschreiten der Entweichgeschwindigkeit für alle interplanetaren Raumflugkörper, ebenso wie bei den künstlichen Erdsatelliten nach Erreichen der Umlaufgeschwindigkeit, die Phase des antriebslosen Bahnfluges an. Analog zu den Satelliten bewegen sich interplanetare Flugkörper nach den Gesetzen der Himmelsmechanik um einen Zentralkörper. Bei den Satelliten wirkt als Zentralkörper die Erde, bei den interplanetaren Flugkörpern hingegen die Sonne. Die grundlegenden Zusammenhänge aller kosmischen Umlaufbewegungen kommen am klarsten in den drei bereits kurz erwähnten Kepler'schen Gesetzen zum Ausdruck, denen das später von Isaac Newton entdeckte Gesetz von der all-

gemeinen Massenanziehung zugrunde liegt. Johannes Kepler formulierte seine Entdeckung über die Planetenbewegung – interplanetare Flugkörper sind als künstliche Kleinplaneten anzusehen – wie folgt:

1. Die Bahn eines Planeten um die Sonne ist eine Ellipse, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.
2. Der Radiusvektor (Verbindungsline zwischen Sonne und Planet) eines Planeten überstreicht bei dessen Bewegung um die Sonne in gleichen Zeiten gleichgroße Flächen.
3. Die Quadrate der Umlaufzeiten der Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen ihrer mittleren Entfernungen von der Sonne.

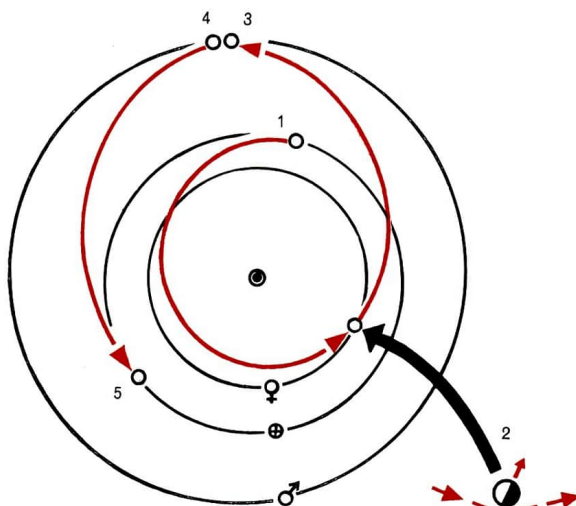
Newton erklärte diese Gesetze als Folge der Anziehungskräfte zwischen Sonne und Planeten, die in ihrer Größe durch das Produkt der Massen von Sonne und vom jeweils betrachteten Planeten bestimmt werden und darüber hinaus dem Quadrat der Entfernung zwischen beiden Körpern umgekehrt proportional sind.

Die Planetensonden und -raumschiffe können sich also nur auf elliptischen Bahnen (Freiflugbahnen) bewegen. Die Bahnen müssen so gewählt werden, daß jeweils ein Teilstück die Entfernung zwischen Erdbahn und Bahn des Zielplaneten überbrückt. Demnach dürfen die beispielsweise für Venus und Mars angegebenen geringsten Entfernungen zur Erde gar nicht den Flugzeitberechnungen zugrunde gelegt werden, weil man dann nämlich eine geradlinige Bewegung der Flugkörper zwischen den Planetenbahnen voraussetzen müßte, was antriebstechnisch und himmelsmechanisch unmöglich ist. Die Reiseellipsen mit dem niedrigsten Antriebsaufwand sind diejenigen, die beim Abflug aus Erdnähe die Erdbahn tangential verlassen und auch die Bahn der Zielplaneten in streifender Annäherung erreichen. In der Astronautik wird eine derartige Bahn als „Berührungsellipse“ bezeichnet. Den Hauptteil des Startimpulses zum Flug auf einer solchen Raumbahn erhält der Flugkörper

- 1 Abflug Erde;
- 2 Vorbeiflug Venus und Bahnänderung;
- 3 Ankunft Mars;
- 4 Abflug Mars;
- 5 Ankunft Erde

schon durch die Umlaufgeschwindigkeit der Erde um die Sonne (etwa 30 km/s). Der Geschwindigkeitsüberschuß nach Überschreiten der Entweichgeschwindigkeit ist dann ausschlaggebend dafür, wie weit der Raumflugkörper in den Bereich der äußeren Planeten hinausgetragen wird oder wie tief er in das Gebiet der inneren Planeten „hineinfallen“ kann. Um nach außen zu gelangen, muß der Geschwindigkeitsüberschuß zur Erdumlaufgeschwindigkeit addiert, im anderen Fall abgezogen werden. Das wird dadurch möglich, daß man den Raumflugkörper entweder in Richtung des Erdumlaufes oder entgegengesetzt dazu abfliegen läßt.

Während also für Berührungsellipsen der jeweilige Antriebsbedarf einen Minimalwert erreicht, ergeben sich für Flugstrecken und -zeiten jeweils Maximalwerte. So konnte der deutsche Ingenieur Walter Hohmann schon 1925 in seinem Buch „Die Erreichbarkeit der Himmelskörper“ nachweisen, daß beispielsweise allein der Hinflug zum Mars unter Annahme energetisch optimaler Berührungsellipsen („Hohmannbahnen“) etwa 260 Tage dauert. Der Rückflug zum Ausgangspunkt auf der Erdbahn würde natürlich noch einmal die gleiche Zeit in Anspruch nehmen. Allerdings träte der Raumflugkörper nach etwa 520 Tagen



Gesamtflugzeit die Erde dort nicht mehr an, da diese in ihrer Umlaufbewegung um die Sonne eine andere Position erreicht hat. Derartige Gegebenheiten werden jedoch die Entsendung unbemannter Planetensonden kaum in Frage stellen. Aber für ein bemanntes Planetenraumschiff sind sie selbstverständlich ausschlaggebend.

Man könnte vielleicht das Flugprogramm so abändern, daß das Raumschiff beim Rückflug erst dann wieder an die Erdbahn herangeführt wird, wenn sich unser Heimatplanet nach mindestens zwei Umläufen erneut seiner bei Abflug des Raumschiffes innegehabten Position nähert. Die Folge wären eine elliptische Freiflugbahn, auf der das Raumschiff allerdings über die Marsbahn hinausfliegt, und eine entsprechend lange Umlaufzeit. Diese Bahn würde also einerseits nur am Mars vorbeiführen und andererseits einen größeren Antriebsaufwand bedingen. Eine andere Variante sieht vor, das Raumschiff zunächst auf einer derartigen „schnittigen“ Ellipse den Mars anfliegen zu lassen und dann in Marsnähe mit zusätzlichen Antriebsmitteln eine Bahnkorrektur vorzunehmen, so daß der Raumflugkörper zu einem künstlichen Satelliten des Mars wird. Nach einer gewissen Verweilzeit in Marsnähe wäre dann ein zeitlich richtig abgestimmter Rückflug zur Erde möglich. Für die wissenschaftlichen Erkundungen wäre selbstverständlich eine solche Variante entschieden sinnvoller als ein einfacher Vorbeiflug, weil man gegebenenfalls aus der Marsumlaufbahn absteigen und landen könnte.

Planetensexpeditionen erfordern aber nicht nur Zeitkalkulationen, bei denen vor allem das Bewegungsspiel zwischen Erde und Zielplaneten berücksichtigt werden muß, sondern auch Überlegungen, ob dem Planetenraumschiff ein hinreichender Treibstoffvorrat verbleibt, um das Gesamtflugprogramm gegebenenfalls erweitern zu können. Die Antriebsenergien können unter Umständen recht beträchtlich sein, beispielsweise dann, wenn man auf dem Mars landen wollte.

Der Gesamtantriebsbedarf für ein derartiges Marsflugvorhaben würde sich aus dem schon bekannten Antriebsbedarf für den Abflug von der Erde und aus den Anteilen für das Einfangmanöver am Mars, für die Landung auf der Planetenoberfläche und den Wiederaufstieg mit anschließendem Rückflug zusammensetzen. So ergibt sich schließlich ein Betrag von etwa 27 bis 28 km/s, das heißt, wenn die Entweichgeschwindigkeit in Erdnähe überschritten ist, müßte der auf die Reise geschickte Raumflugkörper noch weiterhin über Antriebsmittel verfügen, deren Antriebsvermögen die Energie zum Verlassen der Erde sogar erheblich übertrifft.

Die derzeit verfügbaren chemischen Raketenantriebe brauchten für eine solche Aufgabe aber so gigantische Mengen an Treibstoff, daß eine technische Lösung unmöglich wird. Man muß daher den Ausweg über die Rendezvous-technik wählen und die Planetenflugeinheit auf erdnahen Satellitenumlaufbahnen oder sogar erst auf Mondstationen zusammenbauen.

Triebwerke mit Zukunft

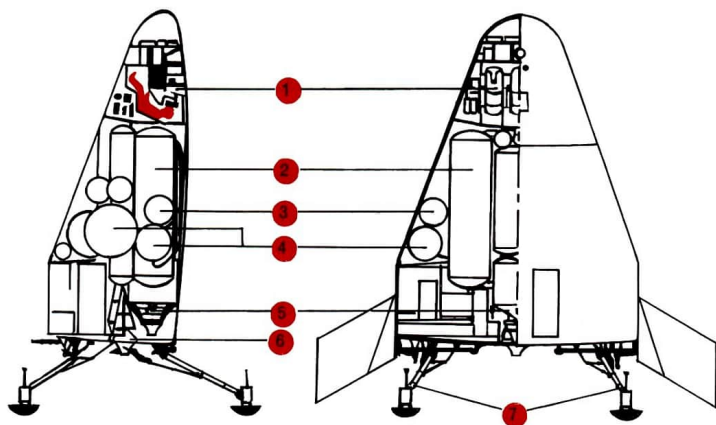
Wie sich damit erneut zeigt, bildet letzthin das Antriebsproblem den entscheidenden Faktor für alle weitgesteckten Ziele der Raumfahrt. Sofern man nur über hinreichend leistungsfähige Antriebsmittel verfügt, läßt sich auch für alle anderen Probleme eine Lösung finden. Die intensiven Bemühungen der Raketentechniker um bessere Antriebsmittel beeinflussen daher die gesamte Perspektive der wissenschaftlichen Raumfahrt. Auf der Suche nach neuen Wegen konzentriert sich das Interesse der Fachleute verständlicherweise auf alle Möglichkeiten zur Erzeugung von Antriebsstrahlen, deren Ausströmgeschwindigkeiten größer sind als die durch chemische Treibstoffreaktionen erzeugten. Es sei noch einmal daran erinnert, daß höhere Ausströmgeschwin-

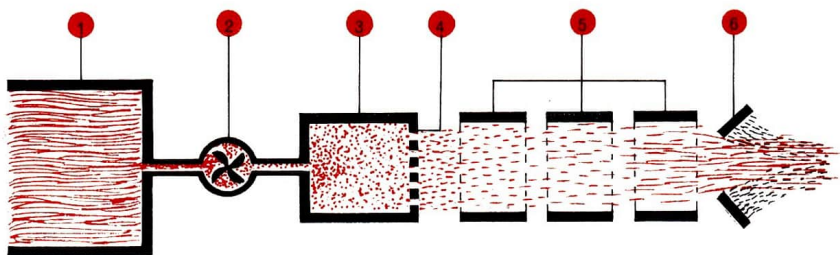
- 1 Kabine;
- 2 Treibstoffbehälter für Aufstiegtriebwerk;
- 3 und 4 Treibstoffbehälter für Landetriebwerk;
- 5 Aufstiegtriebwerk;
- 6 Landetriebwerk;
- 7 Federbeine

digkeiten geringeren Massenverbrauch (Durchsatz) bei gleicher Antriebsleistung bedeuten. In Anlehnung an Gedanken, die schon vor drei bis vier Jahrzehnten von Ziolkowski, Oberth und anderen geäußert wurden, begann man in den letzten Jahren mit einer intensiven Forschungs- und Entwicklungsarbeit auf dem Gebiet der „elektrischen“ Triebwerke.

Antriebsstrahlen sind schließlich nichts anderes als gerichtete Partikelströme, deren Impuls den gewünschten Rückstoßeffekt erzeugt. Gerichtete Partikelströme kann man aber auch auf rein physikalischem Wege erzeugen, wie es beispielsweise in den Linearbeschleunigern der Kernphysik der Fall ist. Dort werden Ströme elektrischer Ladungsträger, also Ionen oder Elektronen, durch

elektrische Felder auf Geschwindigkeiten von vielen zehntausend Kilometern in der Sekunde beschleunigt. In der Raumfahrt würde also ein derartiger Linearbeschleuniger geradezu ideal hohe Ausströmgeschwindigkeiten liefern. Dieses Funktionsprinzip liegt nun auch einem speziellen Typ elektrischer Triebwerke, den „Iontriebwerken“, zugrunde. Die Ionen werden dabei durch thermische Anregung aus den neutralen Atomen einer als Treibstoff mitzuführenden „Stützmasse“ (zum Beispiel Zäsium) gewonnen. Der größte Vorteil dieser Triebwerke besteht darin, daß bei ihnen kaum Abnutzungserscheinungen auftreten, da sie durch den Betrieb weder thermischen noch mechanischen Belastungen unterliegen. Sie bringen somit ideale Voraussetzungen für einen „Dauer-





antrieb" mit. Als ideale, weil dauerhafte Elektroenergiequellen kämen vor allem leistungsfähige Kleinreaktoranlagen in Betracht. Man könnte also ob so vieler Idealmöglichkeiten fast versucht sein zu glauben, daß somit das Problem revolutionärer Raumfahrtantriebe gelöst sei.

Hinter dem eben erwähnten Begriff „Dauerantrieb“ verbergen sich nämlich völlig neue Perspektiven für die Planung und Projektierung von astronautischen Fernflügen. Bei chemischen Antrieben, deren Wirkungsgrad am größten ist, wenn die Antriebsenergien in einer möglichst kurzen Arbeitsphase (Antriebsabschnitt) freigesetzt werden, muß man die weitere Flugbewegung auf antriebsloser Bahn als naturgegebene Folge in Kauf nehmen. Reiseweg, Fluggeschwindigkeit und Flugdauer liegen damit nach den Gesetzen der Himmelsmechanik fest, wodurch sich die schon dargestellten unangenehmen Konsequenzen ergeben. Gäbe es aber einen Antrieb, der nicht nur über Sekunden und Minuten, sondern vielleicht sogar über Wochen und Monate hinweg beschleunigend wirkt, so müßte die Geschwindigkeitszunahme beträchtlich werden und dementsprechend Flugzeit und Flugweg beeinflussen.

Die Beschleunigung brauchte dabei nicht einmal besonders hoch zu sein. Setzt man beispielsweise eine Beschleunigung von nur $0,1 \text{ m/s}^2$ voraus (das ist etwa ein Fünftel der Erdbeschleunigung), dann ergibt sich schon nach etwa 117 Tagen eine Steigerung der Geschwindigkeit um rund 1000 km/s . Ein dauerbeschleunigter Raumflugkörper würde sich in einer Bahn bewegen, die nicht mehr den Gesetzen der klassischen Himmelsmechanik unterworfen ist. Die Bahn verläuft anfänglich etwa spiralförmig (bezogen auf das beherrschende Gravitationszentrum), streckt sich dann immer mehr und führt schließlich fast geradlinig durch den Raum. Schon einfache Übersichtsrechnungen zeigen, wie enorm sich damit die Flugzeiten gerade bei extremen Fernzielen gegenüber dem

antriebslosen Freiflug auf Keplerellipsen verkürzen müßten. Selbstverständlich dürfte man bei dieser Flugmechanik nicht vergessen, den Antrieb rechtzeitig als Bremse wirken zu lassen. Andernfalls könnte bei direktem Zielflug auf einen Himmelskörper der weitere Ablauf der Expedition kaum den erwarteten Erfolg haben.

Die arithmetisch geradezu unwahrscheinlichen Möglichkeiten eines Raumfluges mit Dauerantrieb verführen übrigens sehr leicht dazu, in utopische Spekulationen zu verfallen, die ihre Anlehnungen im Bereich der Relativitätstheorie suchen. Auf dem geduligen Papier kann man nämlich sehr leicht Fluggeschwindigkeiten in der Größenordnung der Lichtgeschwindigkeit ausrechnen. Aber abgesehen davon, daß die erwähnten Ionenantriebe und noch andere elektrische Triebwerke die erforderliche Antriebsarbeit bei großen Raumflugsystemen überhaupt nicht leisten könnten – wir werden die Gründe dafür noch erläutern – und daß leistungstärkere Dauerantriebsverfahren (Photonenantriebe) zur Zeit nur erst in hypothetischen Umrissen zu erkennen sind, spricht die Relativitätstheorie selbst durch das Prinzip der relativistischen Massenzunahme ganz entschieden dagegen, daß es jemals gelingen kann, Raumflugkörper auf annähernd Lichtgeschwindigkeit zu beschleunigen. Damit zerplatzen auch alle utopischen Träume von Flügen über die Grenzen unseres Sonnensystems hinaus wie Seifenblasen; sie sind naturwissenschaftlich nicht zu vertreten. Es lohnt sich daher auch nicht, noch näher auf diese Dinge einzugehen, die leider hin und wieder dazu benutzt werden, in der nichtsachkundigen Öffentlichkeit abenteuerliche „Perspektiven des Weltraumfluges“ zu erwecken.

Doch wieder zurück zu den Ionenantrieben! Den erwähnten Vorzügen stehen bei der praktischen Anwendung auch einige schwerwiegende Mängel gegenüber, die ein Ionenantriebwerk durchaus nicht mehr so ideal erscheinen lassen. Der wesentlichste Nachteil besteht darin, daß aus

Schema eines Ionentriebwerks

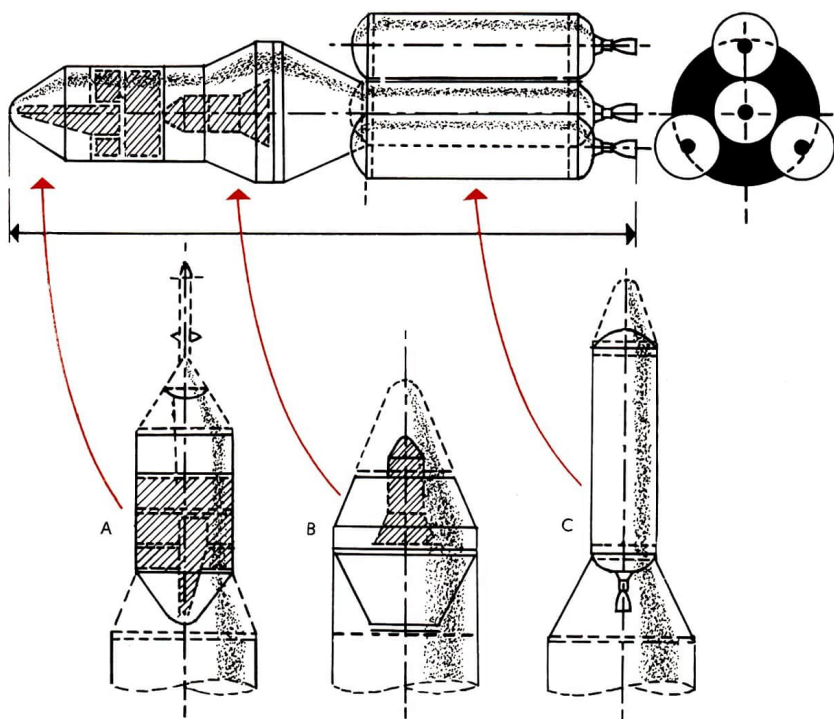
- 1 Behälter mit Stützmasse
- 2 Pumpe
- 3 Verdampferkammer
- 4 Platingitter
- 5 Beschleunigungselektroden
- 6 Neutralisator (Glühkatode)

Kombination eines Marsraumschiffes aus mehreren Rendezvouskomponenten.

- A Ausrüstung mit Marslandungskörper und Zubringerkapsel;
 B Gerätesektor mit Kommandoeinheit und Rückkehrkapsel;
 C Antriebseinheiten (4) für Abflug zum Mars

prinzipiellen elektrotechnischen Gründen der Massendurchsatz bei elektrisch beschleunigten Partikelströmen sehr klein bleibt und deshalb mit den bei chemischen Antrieben erzielbaren Durchsätzen bis zu einigen Tonnen je Sekunde auch nicht annähernd zu vergleichen ist. Der Zusammenhang zwischen Massendurchsatz und Schubkraft

bewirkt, daß folglich ein Ionentriebwerk trotz der enorm hohen Ausströmgeschwindigkeiten geradezu winzige Schubkräfte erzeugt. Die besten der gegenwärtig vorhandenen Ionentriebwerke (etliche Kilogramm Eigenmasse) ergeben einen Schub von kaum mehr als 0,01 kp. Ein solches Triebwerk könnte also noch nicht einmal sich selbst von der



Erdoberfläche emportragen, von der Masse der erforderlichen Elektrogeneratoren oder gar eines vollständigen Raumflugkörpers ganz zu schweigen. Aussichten auf eine wesentliche Verbesserung dieser Antriebsleistung je Triebwerkeinheit sind kaum zu erwarten. Lediglich durch Koppelung mehrerer Ionentriebwerke ließe sich eine größere Gesamtschubkraft erzielen. Demnach eignen sich Ionentriebwerke nicht als Antriebsmittel für Starts von der Erdoberfläche. Noch ein weiterer Umstand würde das verhindern. Die Erzeugung und Beschleunigung von Ionenströmen ist immerhin nur im Vakuum möglich. Damit bleibt die Anwendung von Ionentriebwerken ausschließlich auf den Bereich außerhalb der dichten Schichten der Erdatmosphäre beschränkt. Antriebssysteme, die nur derartig verwendbar sind, werden gelegentlich auch als „Raumtriebwerke“ bezeichnet.

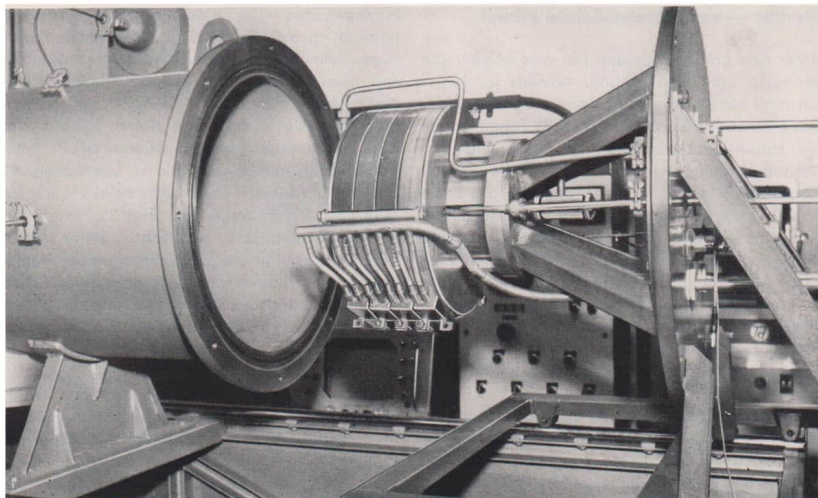
Trotz dieser Einschränkungen ist eine sinnvolle raumflugtechnische Nutzung der günstigen Eigenschaften von Ionentriebwerken durchaus möglich. Man muß sich dazu ein Raumschiff vorstellen, das bereits auf einer Umlaufbahn um die Erde kreist und mit einem kompletten Ionenantriebssystem (Elektrogenerator, Ionentriebwerk und Stützmasse) ausgerüstet ist. Dieses Aggregat würde während des Aufstieges zur Satellitenbahn antriebstechnisch „tote“ Nutzmasse darstellen. Ist diese Bahn erreicht, kann das Ionentriebwerk in Betrieb genommen werden. Selbst wenn dann die Gesamtmasse des Raumflugkörpers im Verhältnis zur Schubwirkung des elektrischen Antriebes sehr groß ist, so muß sich dennoch ein bestimmter, wenn auch sehr kleiner Beschleunigungseffekt ergeben. Bei großen bemannten Raumflugeinheiten dürfte die Beschleunigung allerdings weit unter den erwähnten $0,1 \text{ m/s}^2$ liegen. Im übrigen wäre der weitere Verlauf des Flugprogrammes im Sinn unserer früheren Betrachtungen vorgezeichnet. Es bleibt also nur die Frage zu klären, welche Voraussetzungen für den Aufstieg des Raumflugkörpersystems zur Satellitenbahn gegeben sein

müssen. Diese „Schwerarbeit“ wird man selbstverständlich nur mit Startantrieben bewältigen können, deren Schubkräfte höher sind als die Startmasse des Gesamtsystems, also mit thermochemischen oder kernenergetischen Antrieben. Schon aus diesem Grunde wird man die Entwicklungsarbeit an thermochemischen Raketenantrieben auch in Zukunft fortsetzen.

Unbemannte Planetensonden als Vorhut

Aus unseren Betrachtungen läßt sich die Schlußfolgerung ziehen, daß der Weg zu bemannten Planetenexpeditionen immerhin noch ziemlich weit und mühevoll ist. Erst die praktischen Erfahrungen der nächsten Jahre werden zeigen, bis zu welchem Grade sich derartige Projekte überhaupt verwirklichen lassen. In der gegenwärtigen Etappe der Raumflugära sind von der Antriebsseite her keine anderen Möglichkeiten zu erwarten, als kleinere unbemannte, automatisch arbeitende Raum- und Planetensonden zur „Erkundung des Terrains“ aufsteigen zu lassen. Die Vorstöße dieser ersten Kundschafter zu anderen Planeten könnten schließlich auch ganz entscheidend dazu beitragen, eventuelle spätere Expeditionen vorzubereiten. Es ist durchaus denkbar, daß schon in verhältnismäßig naher Zukunft automatische Meßsonden auf den Oberflächen anderer Planeten oder ihrer Monde weich niedergehen und von dort Direktmessungen und -beobachtungen den Empfangsstationen auf der Erde übermitteln.

Sowjetische und amerikanische Raumfahrtspezialisten leiteten inzwischen die ersten Versuchsprogramme zur Erforschung anderer Himmelskörper ein. Mit unbemannten automatischen Meß- und Beobachtungssonden unternahmen sie Vorstöße in den Nahbereich der Planeten Venus und Mars. Über diese Experimente soll dann kurz berichtet werden, wenn wir uns mit den wichtigsten Erkenntnissen über jene Himmelskörper befassen.



Den engeren „Familienkreis“ unserer Erde im Weltraum und damit ihre engste kosmische Nachbarschaft bilden die Körper des Sonnensystems. In dem von der Gravitationskraft der Sonne beherrschten Raum bewegen sich außer den neun „Großen Planeten“ (Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun und Pluto) eine in die Tausende gehende Anzahl „Kleiner Planeten“ (Planetoiden) sowie eine kaum zu beziffernde Menge kosmischer Kleinstkörper (Meteoriten) und damit verwandte Gebilde (Kometen) nach den bekannten Keplerschen Gesetzen um das Zentralgestirn. Legt man die bereits an anderer Stelle genannte mittlere Entfernung der Erde von der Sonne als „Astronomische Einheit“

(AE) zugrunde, so gewinnt man mit der annähernd vierzigmal größeren Entfernung des äußersten Planeten Pluto vielleicht eine Vorstellung von der an sich kaum faßbaren Größe des interplanetaren Raumes. Wie die sonnenfernsten Bahnpunkte der sehr langgestreckten Umlaufellipsen einiger Kometen zeigen, reicht jedoch der Herrschaftsbereich unserer Sonne noch weit über die Plutobahn hinaus. Obwohl die mit dem Quadrat der Entfernung abnehmende Anziehungskraft sehr schnell absinkt, kann sie sich noch bis in Entfernungen von über 10 000 AE merklich auswirken, da es von dort bis zu den nächsten starken Gravitationszentren, den Fixsternen des Systems Alpha Centauri, noch annähernd dreißigmal weiter ist.



Merkur — der sonnennächste Planet

Unter den großen Planeten hat also Merkur die geringste Sonnenentfernung, nämlich im Mittel nur rund ein Drittel des Abstandes Sonne – Erde. Seine Bahn durchläuft er in rund 88 Tagen, wobei die starke Exzentrizität seiner Bewegung den Sonnenabstand zwischen 0,307 AE im Perihel (sonnennächster Bahnpunkt) und 0,466 AE im Aphel (sonnenfernster Bahnpunkt) schwanken läßt. Nach den Keplerschen Gesetzen ist seine mittlere Bahngeschwindigkeit die größte von allen Planeten (47,9 km/s). Die Umlaufbahn des Planeten ist gegen die Erdbahnebene (Ekliptik) um rund 7° geneigt. Aus der Bahnbewegung des Merkur konnte übrigens eine der ersten und schönsten Bestätigungen für die Relativitätstheorie hergeleitet werden.

Nach dem Newtonschen Gravitationsgesetz erzwingen die störenden Anziehungskräfte der benachbarten Planeten eine langsame räumliche Verlagerung des Perihels einer Planetenbahn (Periheldrehung). Die Relativitätstheorie fordert aber noch einen zusätzlichen Drehungseffekt für die Apsidenlinie (das ist die Verbindungslinie Perihel – Aphel) allein durch die Gravitationswirkung der Sonne. Diese relativistische Periheldrehung ist um so größer, je kleiner der Abstand des Planeten von der Sonne und je größer die Exzentrizität seiner Umlaufbahn ist. Für Merkur war in diesem Zusammenhang je Jahrhundert eine zusätzliche Periheldrehung von rund 43 Bogen Sekunden zu erwarten (Venus 8,6 Bogen Sekunden, Erde 3,8 Bogen Sekunden). Dieser theoretisch geforderte Befund stimmte dann auch tatsächlich recht gut mit einem schon beobachteten, aber bis dahin unerklärlichen Restwert für die Drehung des Merkurperihels überein.

Der geringe Sonnenabstand des Merkur macht physische Beobachtungen des Planeten außerordentlich schwierig. Nur in der Nähe der Elongationen (das sind die Bahnpunkte, wo der Winkel

Merkur – Erde – Sonne seinen größten Wert hat, nämlich etwa 27°) bestehen einigermaßen günstige Bedingungen für derartige Untersuchungen. Aus diesem Grund und weil der Merkur keinen Mond hat, aus dessen Bahnbewegung man entsprechende Rückschlüsse ziehen könnte, sind auch Durchmesser, Masse und Dichte des Planeten gegenwärtig noch nicht exakt zu bestimmen. Als besten Wert für den Durchmesser des Merkur hat man 4840 km erhalten, das sind 38 Prozent des Äquatordurchmessers der Erde. Seine Masse konnte bisher nur aus den Störungen der Venusbewegung errechnet werden, wonach sie 0,053 Erdmassen beträgt. Daraus ergibt sich eine mittlere Dichte des Merkur, die mit $5,3 \text{ g/cm}^3$ nach der Erde die zweitgrößte aller Planeten ist.

Die gelegentlich unter besonders günstigen Bedingungen auf der Oberfläche des Merkur erkennbaren groben Einzelheiten und darauf fußende theoretische Überlegungen ließen bisher für den Planeten eine gebundene Rotation vermuten, das heißt, der Merkur sollte der Sonne immer die gleiche Halbkugel zuwenden, ebenso wie der Erdmond unserem Planeten gegenüber. Nach neueren Messungen mit Radarechos scheint dagegen die Rotationszeit nur rund 59 Tage zu betragen und damit kürzer zu sein als die Umlaufzeit. Die gewaltige Strahlungswirkung der Sonne führt zwangsläufig zu sehr erheblichen Temperaturgegensätzen auf dem Merkur. Auf seiner „Tagseite“ nimmt man bei gebundener Rotation Temperaturen von etwa $+350^\circ\text{C}$, auf seiner der Sonne abgewandten Hemisphäre hingegen von unterhalb -200°C an. Schon diese extremen Gegensätze würden eine dichtere Planetenatmosphäre verhindern. Darüber hinaus trägt aber auch die geringe Schwerkraft an der Merkuroberfläche (etwa 37 Prozent der Schwerkraft an der Erdoberfläche) dazu bei, daß der Planet keine merkliche Atmosphäre hat. Eine weitere Analogie zu unserem Erdmond ergibt sich in der Albedo der Merkuroberfläche für die sichtbare Sonnenstrahlung. Unsere Erde hat bei-

Zeichnungen des Merkur,
wie sie gelegentlich unter
besonders günstigen atmosphärischen Bedingungen
an großen Fernrohren
gewonnen werden konnten.
Die Deutung
der gezeichneten Einzelheiten
blieb jedoch in den meisten Fällen
zweifelhaft

spielsweise für einen außerirdischen Beobachter auf Grund der stets vorhandenen hochreflektierenden Wolkenfelder und polaren Eisregionen eine mittlere Albedo von etwa 40 Prozent. Für Merkur erhält man etwa 6 Prozent, während die Mondoberfläche im Mittel auf etwa 7 Prozent kommt. Mit gewissen Vorbehalten kann man daher auf eine Ähnlichkeit in der Oberflächenbeschaffenheit beider Himmelskörper schließen.

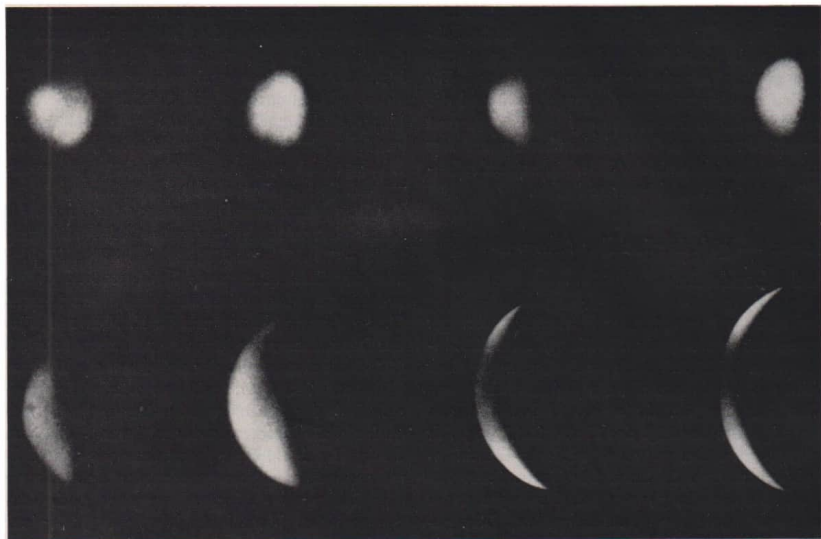
Venus — geheimnisvoller Morgen- und Abendstern

Der nächste Planet in der Reihenfolge von der Sonne aus ist die Venus. Sie läuft in rund 108 Millionen km (0,723 AE) mittlerer Entfernung in einer Bahn um die Sonne, die die kreisähnlichste von allen Planeten ist. Zu einem Umlauf um das Zentralgestirn benötigt der Planet 224,7 Tage. Er bewegt sich dabei mit einer mittleren Geschwindigkeit von rund 35 km/s. Die Venus kann von allen Planeten die geringste Entfernung von der Erde erreichen (etwa 40 Millionen km). Dies geschieht dann, wenn sie zwischen Sonne und Erde hindurchläuft („untere Konjunktion“). Leider wendet sie uns bei diesen Gelegenheiten ihre dunkle Hälfte zu, so daß die Astronomen daraus keinen Nutzen für die Beobachtungen der Venusoberfläche ziehen können. Vor und nach der unteren Konjunktion entfernt sich der Planet für den irdischen Beobachter jedoch hinreichend weit von der Sonne (Elongationen: 47°). Dadurch ergeben sich recht gute Beobachtungsmöglichkeiten. Als „Morgen“- oder „Abendstern“ wird die Venus nach Sonne und Mond zum hellsten und damit eindrucksvollsten aller Himmelskörper. Dennoch ist unser Wissen um die Beschaffenheit dieses Planeten noch immer sehr unbefriedigend. Die Ursache dafür liegt in den physischen Besonderheiten der Venus selbst. Schon Michail W. Lomonossow (1711–1765) erkannte, daß

der Planetenkörper von einem dichten Schleier optisch undurchdringlicher Wolken umgeben ist, die bisher jede Beobachtung des eigentlichen Planetenkörpers von vornherein ausschlossen. Die extreme Detailarmut dieser Gebilde läßt darüber hinaus auch kaum zu, die Wolkenatmosphäre auf spezielle Einzelheiten (zum Beispiel Höhenlage, Höhendichtung, Strömungsvorgänge) zu untersuchen. So beginnen die Unsicherheiten schon mit der Frage nach dem Durchmesser der Venus. Als bester Wert galt bisher — einschließlich der Wolkenhülle — $12\,400 \text{ km} \pm 200 \text{ km}$, das wären 97 Prozent des Erddurchmessers. Nach neueren Untersuchungen der amerikanischen Astronomen G. de Vaucouleurs und D. H. Menzel wäre der Durchmesser der festen Planetenkugel nur mit 12 146 km anzusetzen, der sich durch die Wolkenhülle auf 12 200 km erhöhen würde. Die Unsicherheit der Durchmesserbestimmung wirkt sich auch auf die Errechnung der mittleren Dichte aus. So ergibt sich bei einer Venusmasse von 0,815 Erdmassen mit dem zuerst genannten Durchmesser eine Dichte von $4,95 \text{ g/cm}^3$, wogegen nach Vaucouleurs und Menzel ein Wert von $5,26 \text{ g/cm}^3$ resultieren würde. Auch hierin ähneln sich also Erde ($5,52 \text{ g/cm}^3$) und Venus. Man kann somit auf der Venus etwa die gleiche Schwerkraftwirkung voraussetzen wie auf der Erdoberfläche.

Rätsel der Venusatmosphäre

Über die Beschaffenheit der Venusatmosphäre und ihrer Wolkengebilde bestand trotz aller Bemühungen lange Zeit völlige Unklarheit. Die von der Erdoberfläche aus angestellten spektroskopischen Untersuchungen wurden zwangsläufig durch die Filterwirkung der Erdatmosphäre beeinträchtigt. Weiter kam hinzu, daß man von der Erde aus im wesentlichen nur den Bereich oberhalb der optisch undurchlässigen Wolkenhülle erfassen konnte, nicht aber die tieferen Regionen



und vor allem nicht die Planetenoberfläche. So fand man zunächst, daß sich die Venusatmosphäre vermutlich aus etwa 39 Prozent Stickstoff und 61 Prozent Kohlendioxid zusammensetzt. Anteile von Sauerstoff und Wasserdampf ließen sich anfangs nicht nachweisen. Dieser Befund wurde so gedeutet, daß die intensive Strahlung der Sonne eine fortlaufende Zerlegung (Dissoziation) der eventuell doch vorhandenen Wasserdampfmoleküle in Wasserstoff und Sauerstoff verursacht. Während Wasserstoff auf Grund der starken Temperaturbewegung seiner Moleküle und Atome in den Weltraum entweicht, bindet sich Sauerstoff sofort mit anderen chemischen Elementen, wahrscheinlich bevorzugt mit Kohlenstoff. Doch auch

nach dieser Hypothese müßte noch oberhalb der Wolkenschichten, also in der Venusstratosphäre, Wasserdampf anzutreffen sein; denn erst in diesem Bereich würde die angenommene Dissoziation ihre volle Wirkung erreichen. Von einem bis in 24.000 m Höhe aufgestiegenen bemannten Ballon aus gelang schließlich auf spektroskopischem Wege, Wasserdampf in der Venusatmosphäre zu entdecken. Es ergab sich sogar ein fünffach größerer Wassergehalt der Venusstratosphäre als in der Erdstratosphäre. Diese überraschende Entdeckung könnte man dadurch erklären, daß eine starke Vertikalströmung in der Venusatmosphäre den Wasserdampf ohne restlose Wolkenbildung bis in diese Höhen zu heben vermag. Für die tieferen

Regionen könnte man dann folgern, daß der Wasserdampf eine nicht unbeträchtliche Rolle im Venus-„Wetter“ spielt.

Solange man keine Anhaltspunkte für das Vorhandensein von Wasserdampf in der Venusatmosphäre hatte, blieben alle Versuche, die Wolkenhülle zu erklären, ebenfalls unbefriedigend. Es gab verschiedene Hypothesen, wonach die Wolken als Kondensationen entweder des Kohlendioxids oder sogar einer noch komplizierteren chemischen Verbindung, des Formaldehyds, gedeutet wurden. Andere Forscher sahen in ihnen die Folgen heftigster Staubstürme, die sich auf der extrem wasserarmen Venusoberfläche unter der (viel kräftiger als auf der Erde) aufheizenden Wirkung der Sonnenstrahlung ausbilden sollten. Abgesehen von der neuen Situation, wonach am Aufbau der Wolkenhülle auch Wasserdampf beteiligt ist, bildet die Annahme von Staubstürmen und Staubwolken noch immer ein wichtiges Hilfsmittel für die Erklärung der Erscheinungen in der Venusatmosphäre. Neuere Messungen der Venusalbedo ergaben nämlich den ungewöhnlich hohen Wert von 76 Prozent, der sich sehr gut durch die hohe Reflexionsfähigkeit einer dichten Schicht feinsten Staubpartikel erklären ließe.

Einen wesentlichen Beitrag zur Aufheizung der bodennahen Schichten in der Venusatmosphäre liefert zweifellos der schon bei der Erdatmosphäre beschriebene „Treibhauseffekt“. Er muß auf der Venus wegen des sehr großen Kohlendioxidgehaltes noch viel wirksamer sein als auf unserem Planeten. Die demzufolge zu erwartenden hohen Temperaturen auf der Oberfläche der Venus oder in den darüber lagernden Atmosphärenschichten konnten auch schon durch verschiedene Untersuchungsmethoden nachgewiesen werden. So ergaben sich aus Infrarotmessungen für die Äquatorgegenden der Venus Temperaturen zwischen 100 und 150 °C sowie aus Messungen der Radiostrahlung des Planeten sogar Werte um 300 °C. Allerdings konnte bisher nicht geklärt werden, zu

welchem Höhnenniveau in der Venusatmosphäre diese Temperaturwerte im einzelnen gehören. So viel scheint aber schon sicher zu sein, daß die Temperaturen auf der Venusoberfläche – zumindest in den äquatornahen Gebieten – einen Aufenthalt für Menschen unmöglich machen. Einer eventuellen Venusexpedition würde natürlich eine so andersartige Zusammensetzung der Venusatmosphäre extrem feindlich gegenüberstehen.

Übrigens weiß man heute noch nicht einmal, wo der Äquator unseres Nachbarplaneten zu suchen ist. Da die Wolkenhülle der Venus so lückenlos und strukturarm ist, ließ sich bisher weder die Rotationsdauer, also die Länge eines Venustages, noch die Achsenlage mit hinreichender Sicherheit bestimmen. Die Untersuchungsmethoden hierfür reichten von der wenig ergiebigen visuellen Beobachtung über fotografische Aufnahmen in verschiedenen Spektralbereichen (bevorzugt im Ultraviolett) bis hin zu spektroskopischen Analysen (Doppler-Effekt-Messungen); später kamen Beobachtungen der radiofrequenten Planetenstrahlung sowie Sondierungen mit Radarechos hinzu. 1954 teilte der amerikanische Astronom G. P. Kuiper mit, daß auf Ultravioletttaufnahmen der Venus, die mit dem 2-m-Spiegelteleskop des McDonald-Observatoriums gemacht worden waren, parallele Streifen in der Venusatmosphäre erkennbar seien. Auch der italienische Astronom G. Armellini hatte schon früher gleiche Resultate erzielt. Während aber aus den Kuiperschen Aufnahmen eine Neigung des Planetenäquators gegen die Venusbahnebene von etwa 32° (Erde: 23,5°) hervorzugehen schien, ergab die Auswertung von Aufnahmen, die etwas später mit dem 2,5-m-Spiegel in der Mount-Wilson-Sternwarte gewonnen wurden, nur eine Neigung von etwa 14°. Geklärt werden konnte diese Frage bis heute nicht. Fortschritte wären in dieser Hinsicht nur noch durch den Einsatz von Raumflugkörpern zu erwarten, die im Nahbereich der Venus oder auf dem Planeten selbst Untersuchungen anstellen.



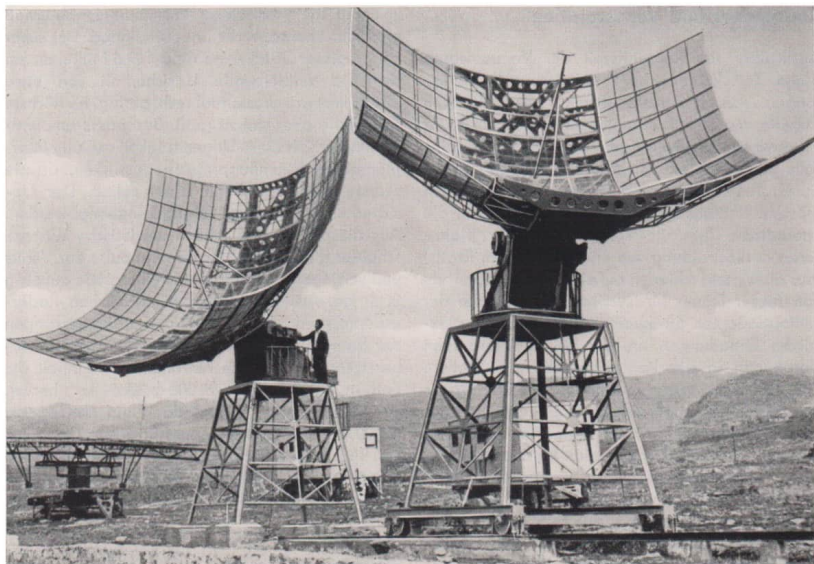
Radarechos und Venusrotation

Auch über die Rotationszeit der Venus waren lange Zeit kaum sichere Anhaltspunkte zu erlangen. Aus spektroskopischen Untersuchungen folgerte man, daß eine kürzere Rotationsdauer als etwa eine Woche unwahrscheinlich sei. Andernfalls hätte sich eine meßbare Verschiebung der Spektrallinien durch den Doppler-Effekt ergeben müssen. Radioastronomische Beobachtungen, die sporadische Intensitätssteigerungen der planetaren Radiostrahlung von etwa 13-tägigem Rhythmus anzeigten, schienen auf eine Rotationsperiode von dieser Dauer hinzuweisen. Als Ursache der radiofrequenten Strahlungsstöße sieht man elektrische Entladungen an, die bei gewitterartigen Vorgängen in der Venusatmosphäre entstehen. Die Annahme einer Rotationsdauer der Venus von 10 bis 15 Tagen glaubte man zunächst auch durch Versuche mit Radarechos erhärten zu können. Die Radarechos erbrachten eine Rotationszeit von etwa 11 Tagen. Dabei wurde vorausgesetzt, daß die Rotationsachse zum Zeitpunkt der Messungen senkrecht zur Verbindungslinie Erde – Venus lag. Verbesserte Radarmessungen aus den Jahren 1964/65 ergaben aber schließlich einen völlig anderen und außerordentlich überraschenden Befund. Danach hätte die Venus eine Rotationsdauer von etwa 247 Tagen, was annähernd eine gebundene Rotation bedeuten würde. Dieses Ergebnis läßt sich aber vorläufig nur schlecht mit unseren Vorstellungen von der Physik der Venusatmosphäre in Übereinstimmung bringen. Die Radarmessungen an der Venus lieferten darüber hinaus noch einen anderen Beitrag für die Weltraumforschung. In der Astronomie liegt allen Entfernungs- und Größenbestimmungen – abgesehen vom Sonderfall Mond – die mehrfach erwähnte Astronomische Einheit, das heißt die mittlere Entfernung der Erde von der Sonne zugrunde. Mit den klassischen Methoden der messenden Astronomie blieb jedoch die Genauig-

keit, mit der man dieses kosmische Einheitsmaß ermitteln konnte, recht unbefriedigend. Bei einer Länge dieser Strecke von rund 149,6 Millionen km war die verbleibende Unsicherheit von etwa 30 000 km zwar prozentual recht gering, für höchste Ansprüche aber viel zu groß. Besonders empfindlich mußte sich diese Ungenauigkeit auf alle interplanetaren Raumflugprojekte auswirken, da sie präzise Planetenanflüge kaum zuließ. Der Unsicherheitsfaktor mußte folglich eingeengt werden. Aus diesem Grunde maßen sowjetische Wissenschaftler die Laufzeit der Radarimpulse zur Venus und verringerten dadurch die Fehlergröße auf etwa 3000 km. Aus Vergleichen mit ähnlichen Radarexperimenten in den USA und Bahnmessungen der Raumsonde Pioneer-5 ging zunächst als verbesserter Wert für die Astronomische Einheit die Entfernung von $149\,599\,000 \pm 3000$ km hervor. 1962 konnte dieses Maß dann auf $149\,598\,000 \pm 500$ km verfeinert werden. Mit dieser Genauigkeit läßt sich die Flugbahn von Planetensonden schon so weit präzisieren, daß gezielte Annäherungen an die Nachbarplaneten möglich werden.

Planetensonden zur Venus

Den ersten Versuch, einen unbemannten Raumkörper gezielt in den Bereich eines anderen Planeten zu bringen, unternahmen die sowjetischen Raumfahrtwissenschaftler am 12. Februar 1961 mit ihrer Planetensonde Venus-1. Dabei erprobten sie den Abflug unter Einschaltung einer Parkbahn. Die wissenschaftliche Nutzmasse des Raumflugkörpers betrug 643,5 kg und umfaßte eine umfangreiche wissenschaftliche Meßausrüstung, chemische Batterien und Solarbatterien sowie ein funkttechnisches Übertragungssystem. Die Bahnmessungen nach Abflug aus der Satellitenbahn zeigten, daß die tatsächlich erreichte Flugbahn der berechneten weitgehend entsprach. Nach diesen Berechnungen kam die Raumsonde in der

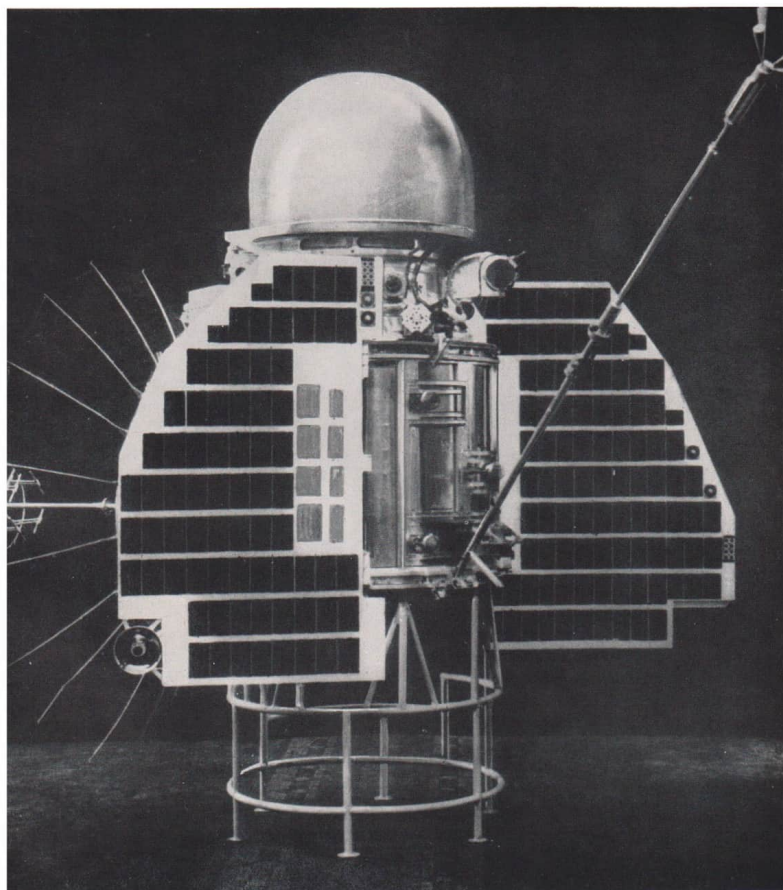


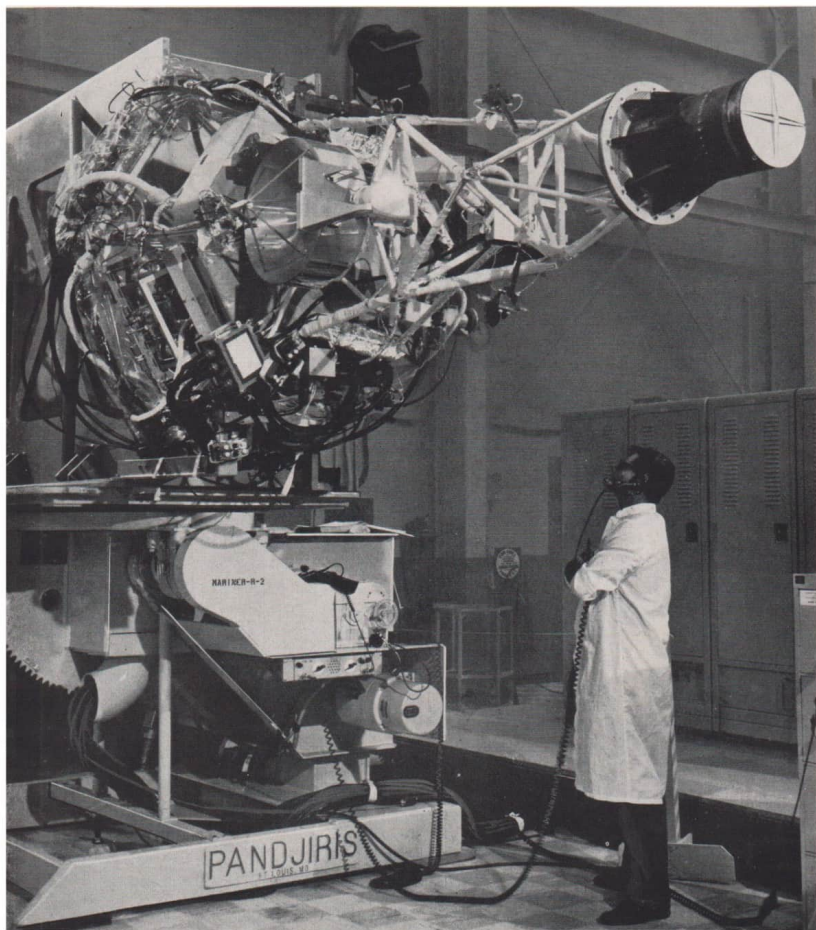
Zeit vom 19./20. Mai 1961 der Venus bis auf etwa 100 000 km nahe, wobei ihre Bahngeschwindigkeit um etwa 2,6 km/s größer war als die des Planeten (34,5 km/s). Eine noch vor der geringsten Annäherung an den Planeten eingetretene Störung, deren Ursache nicht zu ermitteln war, ließ jedoch die Funkverbindung mit dem Raumflugkörper plötzlich abreißen, so daß man aus dem Nahbereich des Zielplaneten leider keine Meßwerte mehr erhalten konnte.

Der erste amerikanische Versuch, eine Venussonde zu starten, gelang am 27. August 1962 mit Mariner-2. Die Planetensonde hatte eine Nutzmasse von 202 kg; ihre Meßausrüstung war auf

Untersuchungen im interplanetaren Raum und besondere Messungen an der Venus ausgerichtet. Nach dem Abflug aus der Satelliten-Parkbahn nahmen Orientierungssystem und Hilfstriebwerk auf Funkkommando am 29. August 1962 eine Bahnkorrektur vor, so daß sich Mariner-2 am 14. Dezember 1962 der Venus bis auf 33 600 km nähern konnte.

Das Meßprogramm lief nach der Bahnkorrektur an. Im einzelnen gehörten dazu Messungen des interplanetaren Magnetfeldes, der solaren Partikelstrahlung, des Sonnenwindes sowie Registrierungen von Mikrometeoriten. Das dreiachsige Magnetometer, das auch Magnetfelduntersuchun-





gen im Nahbereich der Venus vornehmen sollte, sendete schon aus dem interplanetaren Raum bedeutsame Informationen. Das bei früheren Raumsondenflügen festgestellte interplanetare Magnetfeld erwies sich als relativ stabil, mit Feldstärken zwischen 5 und 10 Gamma. Am 12. September 1962 wurden jedoch intensive Schwankungen mit einer Amplitude bis zu 25 Gamma registriert, die zweifellos mit einem Ausbruch solarer Partikel zusammenhängen, dessen magnetische Auswirkungen in der Tat später auch auf der Erde nachgewiesen wurden. Zur Untersuchung der solaren Partikelstrahlung dienten eine Ionisationskammer und drei Geigerzähler. Die Messungen im interplanetaren Raum ergaben einen relativ konstanten Fluß von etwa $650 \text{ Teilchen} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; das entspricht etwa dem Hundertfachen des Teilchenstromes der Kosmischen Strahlung an der Erdoberfläche. Weiter konnte festgestellt werden, daß der Anteil von Teilchen niederer Energie etwa dreimal größer ist als der hochenergetischer Teilchen, wie sie bekanntlich vor allem bei solaren Eruptionen frei werden. Besonders interessant war die Feststellung, daß bei einem Anstieg der hochenergetischen Teilchenstrahlung die Intensität der energieärmeren Teilchen merklich zurückgeht.

Mit der Meßapparatur, die die kontinuierlich von der Sonne ausgesandten Partikel mit Energien von einigen hundert bis maximal etwa 8000 eV untersuchen sollte, konnten relativ starke Schwankungen des solaren Plasmastromes, des Sonnenwindes, registriert werden. Während im allgemeinen die Geschwindigkeit dieser Teilchen zwischen 3 und 7 km/s schwankt, traten auch Maximalwerte bis zu 12,5 km/s auf. Die Verteilungsdichte von Mikrometeoriten im interplanetaren Raum schließlich ermittelte man mit Magnesiumplatten, die mit kleinen Kristallmikrophonen gekoppelt waren. Als bemerkenswertes Ergebnis dieser Untersuchungen wurde festgestellt, daß im freien interplanetaren Raum die Dichte der kosmischen Staubteilchen etwa zehntausend-

mal kleiner ist als in der Nähe der Erde. Danach darf man also annehmen, daß unsere Erde unter anderem auch von einer Wolke feinsten kosmischen Staubes umgeben ist.

Eine Reihe von Untersuchungen, die Mariner-2 an der Venus vornehmen sollte, betrafen Infrarotmessungen in zwei Bereichen. Daneben sollte mit einer Empfangseinrichtung für Mikrowellen versucht werden, Aufschlüsse über den Wasserdampfgehalt der Venusatmosphäre zu erlangen. Aus diesem Grunde arbeitete das Mikrowellenradiometer in zwei Empfindlichkeitsbereichen (13,5 mm und 19 mm Wellenlänge). Die durch thermische Vorgänge auf der Venusoberfläche bedingte 13,5-mm-Strahlung hätte vom Wasserdampf absorbiert werden müssen, während die ungehindert passierende 19-mm-Strahlung als „Eichnormal“ dienen sollte, da sie die Oberflächentemperatur unverfälscht anzeigt.

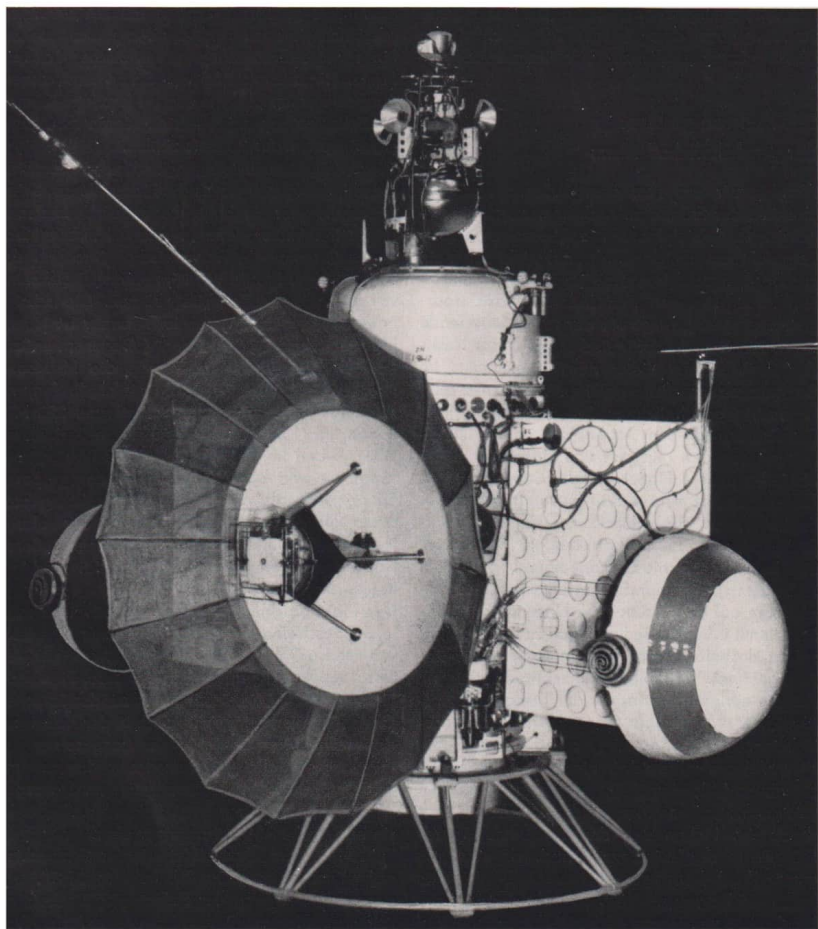
Nach anfänglichen Schwierigkeiten mit der Energieversorgungsanlage von Mariner-2 gelang schließlich die Meßwertübertragung beim Vorbeiflug an der Venus, also aus etwa 58 Millionen km Entfernung zur Erde. Die Auswertung der empfangenen Signale und Deutung der erhaltenen Meßwerte im Infrarotbereich war jedoch recht schwierig und vielfach unsicher. Als erstes Ergebnis der Magnetfeldmessungen wurde bekanntgegeben, daß die Venus offenbar kein so starkes Magnetfeld hat wie die Erde. Dieser Sachverhalt würde die Feststellung über die langsame Rotation unseres Nachbarplaneten stützen; er muß jedoch erst bei weiteren Venusexperimenten geklärt werden. Mit einer jeweils zehnstündigen „Zwei-Weg-Dopplermessung“ am 13. und am 14. Dezember 1962 konnte die Masse der Venus auf 0,81485 Erdmassen (Fehler: 0,015 Prozent) präzisiert werden. Als Meßgröße diente die durch das Gravitationsfeld der Venus hervorgerufene Geschwindigkeitsänderung der Raumsonde. Die Messungen des Mikrowellenradiometers brachten ein aufsehenerregendes und viel diskutiertes Er-

gebnis. Die Temperatur an der Venusoberfläche sollte bis zu 425°C betragen. Würde sich dieser Befund bestätigen, so wären damit alle Spekulationen über Erscheinungsformen lebender Materie auf diesem Planeten hinfällig. Selbstverständlich wäre dann auch kaum daran zu denken, jemals auf der Venusoberfläche zu landen. Einige Wissenschaftler vermuten jedoch, daß unter Umständen auch elektrische Vorgänge in der Venusatmosphäre die Ursache für eine derart starke Mikrowellenstrahlung sein könnten.

Im November 1965 leitete die Sowjetunion ein bisher einmaliges Raumflugunternehmen ein, als nämlich annähernd gleichzeitig zwei Planetensonden auf den Weg zur Venus gebracht wurden. Dabei sollte der zuerst gestartete Raumflugkörper Venus-2 (12. November) nahe am Planeten vorbeifliegen, wogegen Venus-3 (16. November) die Venus direkt erreichen und eine Meßgerätekapsel auf deren Oberfläche bringen sollte. Beide Venussonden (963 und 960 kg) ähnelten in ihrem äußeren Aufbau weitgehend der schon 1962 zum Mars gestarteten Raumsonde Mars-1. Jede bestand aus zwei hermetischen Zellen, von denen die eine (Bahnflugsektion) mit allen während des Fluges zur Venus benötigten raumflug- und funkttechnischen Anlagen ausgerüstet war und die andere jeweils eine Spezialsektion darstellte. Diese Sektion enthielt bei Venus-2 eine Bildübertragungsanlage, Meßgeräte, ein Programmzeitschaltwerk sowie einen Zentimeterwellensender mit Speicherbatterien. Kernstück der Spezialsektion von Venus-3 bildete ein kugelförmiger, als Landungssonde gedachter Behälter von 90 cm Durchmesser. Er war mit Meßgeräten und Dezimeterwellensendern ausgerüstet und hatte einen hitzebeständigen Oberflächenüberzug. Außerdem enthielt die Eintauchkapsel noch eine Hohlkugel, deren Oberfläche die Konturen der Erdkontinente zeigte. Im Innern dieser Kugel befand sich eine Medaille mit einer Darstellung der Planetenbahnen bis zum Mars und dem Wappen der UdSSR. Für das

Niedergehen in der Venusatmosphäre hatte man die vor dem Abflug sorgfältig sterilisierte Gerätekapsel mit einem Fallschirm ausgerüstet.

Das Flugprogramm der beiden Venussonden verlief wie erwartet. Bei Venus-2 konnte man auf jede Bahnkorrektur verzichten, da die erreichte Übergangsbahn für den geplanten nahen Vorbeiflug an der Venus hinreichend genau war. Am 27. Februar 1966 passierte die Sonde den Planeten in einer Entfernung von rund 24 000 km. Allerdings ließ eine ungeklärte Störung der Funkverbindung eine Meßwert- und Bildübertragung während des Anfluges auf die Venus nicht mehr zu, obwohl die Anlagen bis dahin völlig einwandfrei gearbeitet hatten. Die extremen bahnmekanischen Forderungen für den Direktanflug von Venus-3 auf den Planeten machten eine Bahnkorrektur erforderlich, die am 26. Dezember 1965 vorgenommen wurde und den aufsehenerregenden Erfolg dieses Unternehmens mit nahezu idealer Präzision vorbereitete. Aus den weiteren Bahnmessungen ließ sich nämlich berechnen, daß die Planetensonde am 1. März 1966 (7 Uhr 56 Minuten MEZ) tatsächlich die Venus erreichte, wobei die Abweichung des wirklichen Punktes vom berechneten des Eintauchens in die Venusatmosphäre nicht mehr als 450 km betrug. Zum erstenmal war es damit gelungen, einen von Menschenhand geschaffenen Körper auf einen anderen Planeten zu bringen. Über den genauen Verlauf der Schlußphase dieses bewunderswerten Experiments konnten leider keine Informationen gewonnen werden, da auch hier wieder die Funkverbindung noch während des Anfluges auf den Nahbereich der Venus plötzlich abbrach. Verschiedene Wissenschaftler vermuteten daher, daß vielleicht noch unbekannte physikalische Einflüsse im Venusnahbereich dafür verantwortlich gewesen seien. Während ihres mehrmonatigen Fluges durch den interplanetaren Raum hatten beide Raumflugkörper mehrfach umfangreiche Meßreihen über interplanetare Magnetfelder, Mikrometeoriten, kos-



mische Strahlung, Sonnenwind und radiofrequente Strahlung aus dem Kosmos in verschiedenen Übertragungsperioden zur Erde übermittelt.

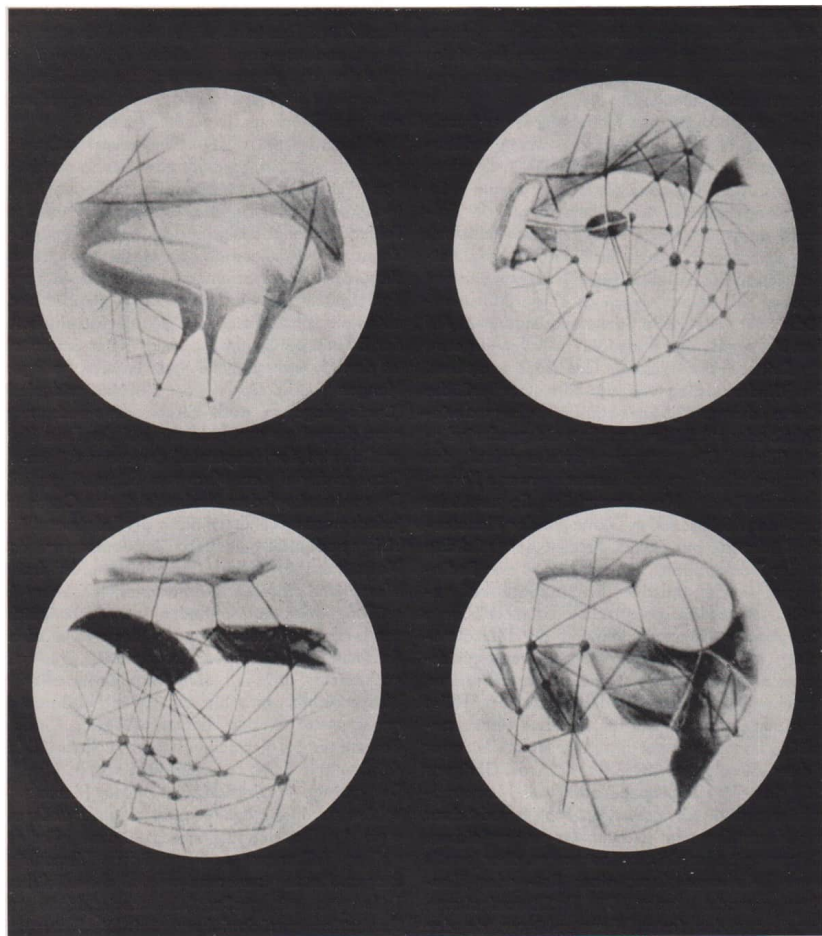
Das Bild von gestern: der „erdähnliche“ Mars

Wenden wir uns nun dem äußeren Nachbarplaneten der Erde, dem noch immer „geheimnisumwitterten“ Zielplaneten zahlloser utopischer Raumfahrtromane, dem Mars, zu! Wohl kaum ein anderer Himmelskörper hat jemals die Gedanken und Phantasien von Fachleuten und Nichtfachleuten so stark bewegt wie der rötlich leuchtende Mars. Die Gründe dafür sind triftig. Unser Nachbar im Weltraum bietet nämlich einerseits im Gegensatz zur wolkenverhüllten Venus trotz aller beobachtungstechnischen Schwierigkeiten und Einschränkungen dem Astronomen ein an Einzelheiten wesentlich reicheres und klareres Bild dar als jeder andere Planet unseres Sonnensystems. Andererseits ist eine exakte Deutung zahlreicher Erscheinungen, die offensichtlich der Marsoberfläche oder der Planetenatmosphäre angehören, bis heute noch nicht befriedigend gelungen. Außerdem scheint manches an unserem Nachbarplaneten auf den ersten Blick eine gewisse Ähnlichkeit mit irdischen Bedingungen zu haben. Nicht zuletzt deshalb wurde der Phantasie ein weites Feld geöffnet. Vor einigen Jahrzehnten verstiegen sich die eifrigsten Verfechter der These vom „erdähnlichen“ Mars sogar bis zur Annahme hochintelligenter Lebewesen. Das technische Genie dieser Wesen sollte sich in einem weitverzweigten Kanalnetz („Marskanäle“) widerspiegeln, das die wüstenhaft trockene Planetenoberfläche scheinbar durchzieht. Haben sich derart extreme Spekulationen in der Zwischenzeit auch als eindeutig unzutreffend herausgestellt, so blieb aber bis heute die Frage ungeklärt, ob nicht doch mit der Möglichkeit von irgendwelchen Lebensspuren auf

dem Mars gerechnet werden muß. Aller Wahrscheinlichkeit nach wird der Mars auch weiterhin für die Entdeckung außerirdischer Lebensformen interessant bleiben. Schon aus diesem Grunde werden astronautische Marsunternehmen zweifellos zu den erregendsten wissenschaftlichen Experimenten der Zukunft zählen.

Die Beobachtungsbedingungen für den Mars sind entschieden günstiger als die für die Venus. Seine außerhalb der Erdbahn liegende Umlaufbahn bringt ihn immer dann in relativ kleinsten Erdabstand, wenn die Erde zwischen ihm und der Sonne hindurchläuft. Wir können dabei auf seine voll beleuchtete „Tagseite“ blicken. Die scheinbare Größe des Planeten im Fernrohr ist jedoch bei derartigen „Oppositionen“ („Gegenschein“ zur Sonne) sehr unterschiedlich, da die Marsbahn ziemlich stark elliptisch ist. Die mittlere Entfernung des Mars von der Sonne beträgt rund 228 Millionen km (1,52 AE). Sie erreicht im Perihel mit 1,38 AE und im Aphel mit 1,67 AE ihre Extremwerte. So wie die Venus wegen der größeren Sonnennähe als die Erde mehr Strahlung aufnimmt als diese, muß die Intensität der solaren Licht- und Wärmestrahlung auf unserem äußeren Nachbarplaneten natürlich beträchtlich niedriger liegen als bei uns.

Der Mars durchläuft seine Bahn mit einer mittleren Geschwindigkeit von 24,14 km/s innerhalb von rund 687 Tagen. Das „Jahr“ ist auf ihm also fast doppelt so lang wie auf der Erde. Eine recht überraschende Übereinstimmung mit den irdischen Gegebenheiten zeigt sich jedoch in der Rotationsdauer des Mars sowie in der Lage seiner Rotationsachse. Die Rotationsdauer konnte mit großer Genauigkeit bestimmt werden. Sie ergab 24 Stunden 37 Minuten 23 Sekunden. Damit ist sie nur rund 41 Minuten länger als die der Erde. Seine Rotationsachse bildet mit der Senkrechten auf seiner Bahn einen Winkel von $25,2^\circ$, wogegen die Neigung der Erdachse $23,5^\circ$ beträgt. Auf dem Mars muß es also wie auf der Erde

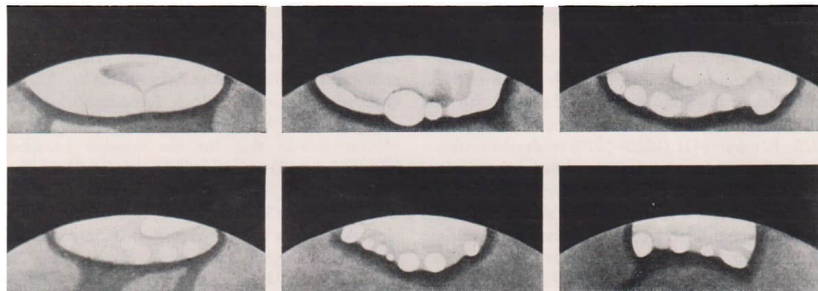


Jahreszeiten und entsprechende jahreszeitliche Effekte im meteorologischen Geschehen geben. Die Beobachtungen des Mars lassen tatsächlich Erscheinungen erkennen, die nicht anders gedeutet werden können.

Wenn wir die physischen Planetendaten zugrunde legen, ergibt sich allerdings ein wenig erdähnliches Bild. So ist der Mars mit einem Durchmesser von rund 6800 km erheblich kleiner als die Erde. Da seine Masse nur etwa einem Zehntel der Erdmasse entspricht, bleibt seine mittlere Dichte mit $3,95 \text{ g/cm}^3$ beträchtlich hinter der unseres Heimatplaneten zurück. Bei zukünftigen Mars Expeditionen ergeben sich daraus allerdings an der Marsoberfläche sehr vorteilhafte Schwerebedingungen. Auf dem Mars gelandete Raumfahrer würden nur etwa ein Drittel ihres irdischen Gewichtes verspüren. Ein Wiederaufstieg von der Planetenoberfläche könnte schon mit $3,6 \text{ km/s}$ zur Kreisbahngeschwindigkeit oder mit $5,0 \text{ km/s}$ zur Entweichgeschwindigkeit führen. Die geringere Anziehungskraft des Mars hat allerdings auch bemerkenswerte Konsequenzen für die Marsatmosphäre. So ermittelte man schon früher deren Dichte an der Planetenoberfläche mit nur etwa 8 Prozent der Luftdichte an der Erdoberfläche. Das hätte etwa den Bedingungen in der irdischen Stratosphäre bei ungefähr 18 km Höhe entsprochen. Dennoch könnte die gesamte Höhenausdehnung der Marsatmosphäre mit der unserer Erdatmosphäre vergleichbar sein, da beim Mars auf Grund der geringeren Anziehungskraft die Gasdichte mit der Höhe langsamer abnimmt als bei uns. Die Marsatmosphäre kann von einer gewissen Höhe ab sogar dichter sein als die Atmosphäre der Erde. Übrigens läßt sich die Höhenausdehnung der Marsatmosphäre auch direkt nachweisen. Man braucht dazu nur Marsaufnahmen miteinander zu vergleichen, die zwar mit dem gleichen Instrument, aber jeweils unter Zwischenschaltung eines Rot- oder Blaufilters gemacht wurden. Die Rotfilteraufnahmen zeigen nur den festen Planetenkörper, da das

langwellige Licht die Marsatmosphäre ungehindert durchdringt. Das kurzwellige, blaue Licht wird dagegen auch von den Gasteilchen der Atmosphäre reflektiert und gestreut, so daß die Blaufilteraufnahmen ein Planetenbild mit entsprechend größerem Durchmesser wiedergeben.

Die Marsatmosphäre ist im allgemeinen im Bereich des sichtbaren Lichtes außerordentlich durchsichtig. Das liegt einerseits an ihrer relativ geringen Dichte in bodennahen Schichten, andererseits an dem Fehlen dichter Wolken, die die Beobachtung der Venus so sehr einschränken. Nach den spektroskopischen Untersuchungen müßte der Wasserdampfgehalt der Marsatmosphäre offenbar noch unterhalb von 5 Prozent des Wasserdampfgehalts der Erdatmosphäre liegen. Auch freier Sauerstoff ist danach wahrscheinlich nur in sehr geringen Mengen vorhanden. Der Kohlendioxidgehalt könnte dagegen nach diesen Untersuchungen etwa doppelt so groß sein wie auf der Erde. Vermutlich wird der Hauptanteil der atmosphärischen Gase auch auf dem Mars vom Stickstoff gestellt. Ein spektroskopischer Nachweis dieses Gases ist jedoch wegen der Filterwirkung der Erdatmosphäre bisher noch nicht gelungen. Die Wasserarmut der Marsatmosphäre läßt darauf schließen, daß freies Wasser auf unserem Nachbarplaneten kaum in größeren Mengen vorhanden ist. Diese Ansicht wurde durch Untersuchungen des sowjetischen Astronomen W. G. Fessenkow gestützt. Er konnte nachweisen, daß auf dem Mars keine offenen Wasserflächen von mehr als 300 m Durchmesser angenommen werden können, weil sonst für den Beobachter am Fernrohr ab und zu Reflexbilder der Sonne in ihnen zu beobachten sein müßten. Der geringe Wasserdampfgehalt der Marsatmosphäre erschwerte den Astronomen unter anderem auch die Deutung von gelegentlichen bläulichen Trübungen und gelblichen Verschleierungen. Heute nimmt man an, daß die gelblichen Trübungen mit großer Wahrscheinlichkeit auf Staubstürme zurückzuführen sind. Die Natur der



bläulich-weißen atmosphärischen Trübungen war dagegen viel schwieriger zu klären. Man wußte nicht, ob man sie als Kondensationen des Kohlendioxids oder des Wasserdampfes ansehen sollte. Neuere Untersuchungen scheinen jedoch diese Frage zugunsten des Wasserdampfes zu entscheiden. Dieser könnte vielleicht auch in der hochverdünnten Marsatmosphäre feine Wolkenschleier vom Typ der irdischen Eisnadel-Zirren ausbilden. Damit steht übrigens das Problem der „Polkappen“ des Mars in engem Zusammenhang. Es handelt sich hierbei um Erscheinungen, die als helle weiße Gebiete an den Marspolen auftreten und deren Aussehen den Vergleich mit den polaren Eis- und Schneekappen der Erde durchaus nahelegt. Diese Ähnlichkeit könnte jedoch nur qualitativ sein, denn die Ausdehnung der Marspolkappen ändert sich im Rhythmus der dortigen Jahreszeiten so stark, daß man unmöglich dickere Schichten von Schnee oder gar Eis in jenen Gebieten annehmen kann. Es sei noch einmal daran erinnert, daß die Intensität der Sonnenstrahlung auf dem Mars nur etwa die Hälfte ihrer Stärke auf der Erde beträgt. Damit bliebe lediglich eine Deutung der Marspolkappen als sehr dünne Schicht eines reifartigen Niederschlages.

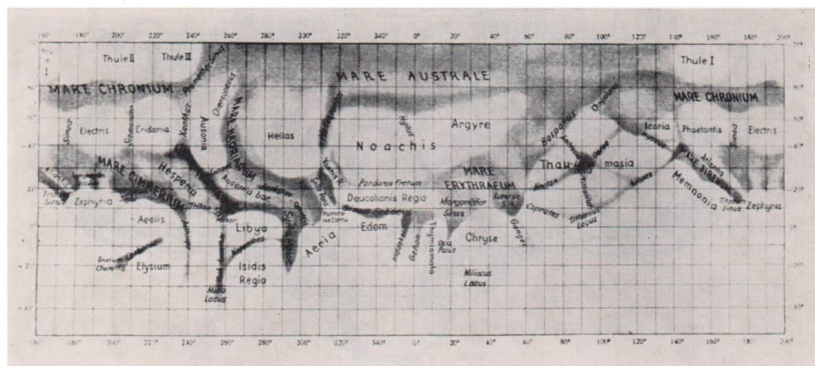
Mit hochempfindlichen Strahlungsmeßgeräten (Thermoelemente, Bolometer), die mit großen Fernrohren gekoppelt wurden, konnte die Temperatur der Marsoberfläche auch direkt gemessen werden. Es ergaben sich für die äquatornahen Gebiete in der Mittagszeit Temperaturen um $+20^{\circ}\text{C}$, denen allerdings beim Sonnenaufgang in den gleichen Gebieten Temperaturen von -40°C gegenüberstanden. Ursache für den schroffen Temperaturgegensatz ist die dünne und kondensationsfreie Atmosphäre, die nur einen geringen Schutz gegen die nächtliche Ausstrahlung bietet. An den Polen des Mars liegen die Temperaturen ständig zwischen -70 und -100°C . Hier ist im Grunde der Unterschied zu den irdischen Bedingungen nicht groß. Besonders fühlbar prägen sich aber die unterschiedlichen Temperaturen zwischen Mars und Erde in den mittleren Jahrestemperaturen aus. Auf dem Mars liegt sie mit -15°C rund 30 Grad niedriger als auf der Erde. Die Mitglieder einer Marsexpedition müßten sich also durch technische Hilfsmittel vor den atmosphärischen und klimatischen Bedingungen des Planeten auf jeden Fall ausreichend schützen. Von anderweitigen gefahrbringenden Einflüssen (Partikelstrahlung usw.) einmal ganz abgesehen.

Mars-„Kanäle“ und Marsvegetation

Die Deutung des im Fernrohr sichtbaren Oberflächendetails des Mars ist auch heute noch in zahlreichen Punkten umstritten. Lediglich für das 1877 von dem italienischen Astronomen Giovanni V. Schiaparelli (1835–1910) entdeckte strukturreiche System haarfeiner Linien, die er ohne tiefere Absicht und nur aus Gründen einer vereinfachten Beschreibung als „Kanäle“ bezeichnete, konnte Klarheit geschaffen werden. Obwohl auch andere Beobachter diese Erscheinungen wahrnahmen, handelt es sich offenbar doch nur um optische Täuschungen, die das Auge am Fernrohr im Bereich feinsten Oberflächenstrukturen erfährt. Bezeichnend war die Tatsache, daß man um so weniger von den feinsten Linien des „Kanalnetzes“ sah, je leistungsfähiger die Instrumente wurden. Die modernen optischen Riesen zeigen dafür unter besten atmosphärischen Bedingungen eine verwirrende Vielzahl winziger dunkler Einzelstellen, die sich im Bereich der als wüstenähnliche Hochebenen angesehenen rötlich-gelben Gebiete der Marsoberfläche ausbreiten. Neuerdings wurden aber mit dem 5-m-Spiegel des Observatoriums auf dem Mt. Palomar einige der größeren Marskanäle doch als echte Oberflächengebilde erkannt. Wahrscheinlich handelt es sich um Bruchgräben, wie wir sie auch von der Erde her kennen.

Die ursprüngliche Deutung der ausgedehnten Dunkelgebiete auf dem Mars als „Meere“ mit „Buchten“ und „Inseln“ muß schon seit längerem als überholt angesehen werden. So glaubte man vor einigen Jahren, für alle diese dunkel gefärbten Regionen eine Erklärung gefunden zu haben, die auf Untersuchungen des sowjetischen Astronomen G. A. Tichow und seiner Schüler zurückgeht. Danach sollten diese Gebiete (einschließlich der separaten kleinen Dunkelflecken) Tiefebene bzw. kleinere Kesseltäler in der Marsoberfläche darstellen, deren charakteristische Färbung von einer

den harten Bedingungen der Marsoberfläche angepaßten niederen Vegetation bestimmt wird. Die spektroskopischen Untersuchungen Tichows und später des amerikanischen Astronomen W. M. Sinton schienen eine solche Annahme durchaus wahrscheinlich zu machen. Zwar würde dieser Marsvegetation das für die meisten irdischen Pflanzen charakteristische Chlorophyll fehlen, aber auf der Erde gibt es ja auch Pflanzen (Flechten und Moose der Polarregionen), die chlorophyllfrei sind. Außerdem wäre es logisch anzunehmen, daß die Entwicklungsbedingungen auf dem Mars zu beträchtlichen Unterschieden gegenüber den organischen Substanzen auf der Erde geführt haben könnten. Die These einer Marsvegetation wurde insofern gestützt, als die Färbung der Dunkelgebiete einen deutlichen Gang mit den Marsjahreszeiten zeigt. Die Annahme von Niederungen als Vegetationsgebiete würde auch deshalb plausibel klingen, weil sich in ihnen die spärliche Feuchtigkeit relativ stark konzentrieren dürfte. Zahlreiche Forscher hegten jedoch große Zweifel gegenüber der These von einer niederen Marsvegetation. Sie halten den Hinweis auf den sehr geringen Sauerstoff- und Wasserdampfgehalt der Marsatmosphäre für ein gewichtiges Argument gegen diese Ansicht. So kamen die Amerikaner C. C. Kiess, S. Karrer und H. K. Kiess zu einer physikalisch-chemischen Deutung der beobachteten Marserscheinungen. Sie gingen davon aus, daß Stickstoffdioxid und Stickstofftetroxid in der Marsatmosphäre vorhanden sein könnten. Sie erklärten die weißen Polkappen als festen Niederschlag des Tetroxids und die jahreszeitlichen Änderungen im Aussehen der Dunkelgebiete als Überlagerungen mit schwerem gasförmigem Tetroxid. Die spezielle Mineralstruktur des Marsbodens soll dabei eine gewisse zusätzliche Rolle spielen. Auch die rein atmosphärischen Erscheinungen glauben sie auf diesem Wege erklären zu können. Die von der Temperatur abhängigen Schwankungen des Gleichgewichtes zwischen Stickstoffdioxid und

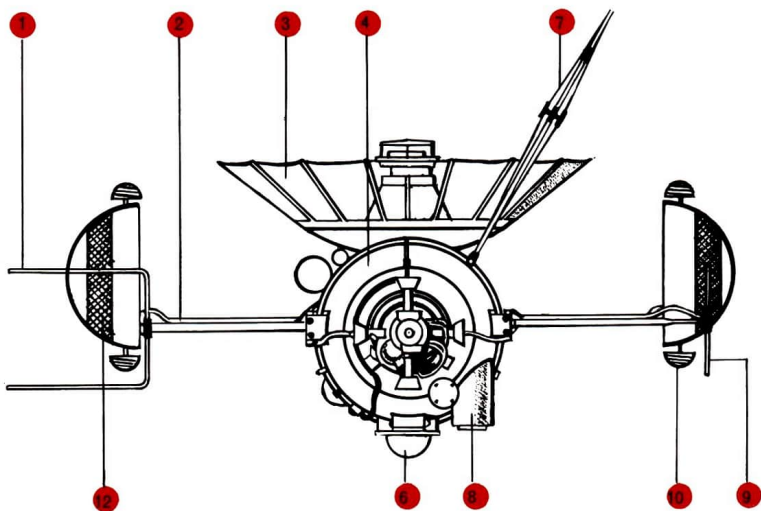
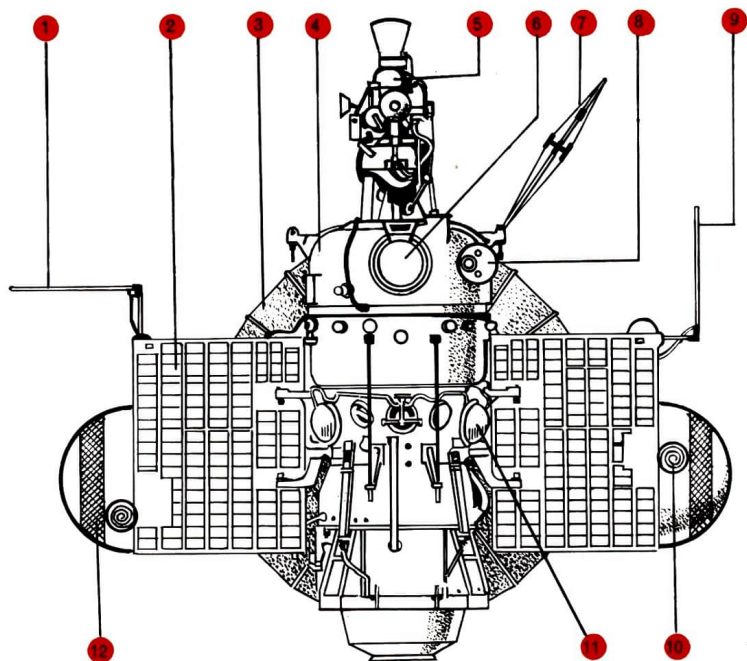


-tetroxid sollen sowohl die bläulich-weißen Schleier und Trübungen als auch die gelblichen Wolken hervorrufen. Auch gegen die Staubsturmhypothese zur Erklärung der sich zeitweilig über weite Gebiete der Marsoberfläche ausbreitenden gelben Wolkenschleier haben sie ein Argument. Sie verweisen darauf, daß man nach dem Absinken des vermeintlichen Staubes (Auflösung der gelben Wolke) noch niemals eine Beeinflussung der Dunkelgebiete bemerkt habe, obwohl der „Staubsturm“ zuvor die betreffenden Gebiete fast völlig verschleierte. Hätten diese Forscher mit ihrer Hypothese recht, dann gäbe es nach unseren Vorstellungen kein organisches Leben auf dem Mars, da Stickstoffoxide außerordentlich giftig sind. Zusammenfassend läßt sich sagen, daß der Mars in der Tat das große Interesse verdient, das ihm die Planetenforschung seit Jahrzehnten entgegenbringt. Gewiß haben schon viele der kühnen Spekulationen vergangener Zeit der wissenschaftlichen Überprüfung nicht standgehalten. Doch auch heute ist noch nicht jede Einzelheit im Bild des Mars klar zu deuten. Soviel scheint jedoch fest-

zustehen, daß seine weitere Erforschung der Wissenschaft unter Umständen noch beträchtliche Überraschungen bereiten kann, und mit Sicherheit läßt sich voraussagen, daß dazu die Mittel der klassischen Astronomie allein nicht mehr ausreichen werden. Erst mit Hilfe der Raumflugtechnik wird es möglich sein, schließlich auch die in vielfacher Hinsicht so bedeutsame Frage nach der Existenz außerirdischen Lebens auf unserem Nachbarplaneten endgültig zu beantworten.

Erster Vorstoß mit „Mars-1“

Wie schon bei der Venus, so unternahmen auch beim Mars die sowjetischen Wissenschaftler das erste Raumflugexperiment. Am 1. November 1962 starteten sie eine Trägersrakete, die die Planeten-sonde Mars-1 von einer Parkbahn aus auf eine solche Übergangsbahn brachte, die bis auf etwa 190 000 km an den Mars heranführte. Die Raumsonde war mit einem Hilfstriebwerk ausgerüstet, um durch Bahnkorrekturen die Annäherung an den



Schema der sowjetischen Planetensonde Mars-1

1 Stabantenne	7 Magnetometer
2 Solarzellenausleger	8 Lageindikator
3 Parabolantenne	9 Stabantenne
4 Gerätezelle	10 Sonnensucher
5 Korrekturtriebwerk	11 Druckgasbehälter
6 Sternsucher	12 Wärmeaustauscher

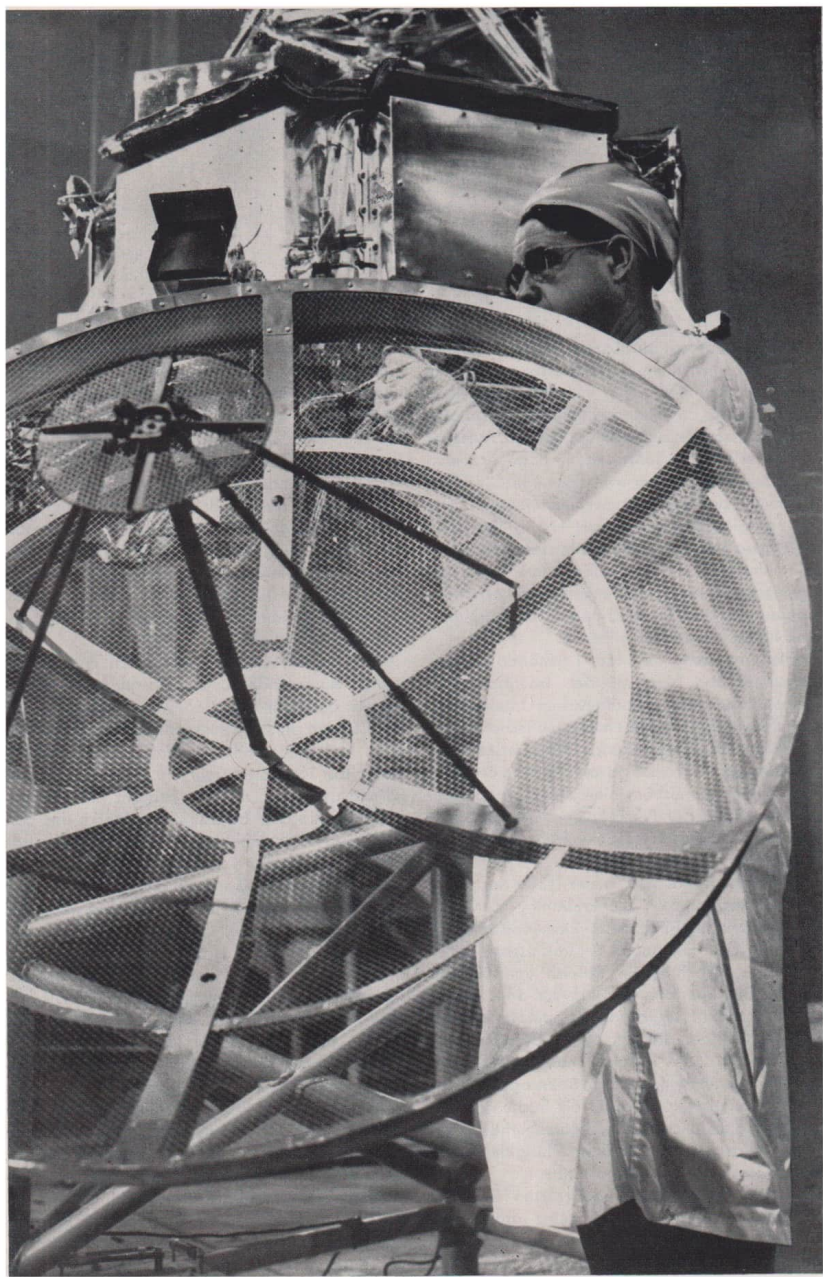
Planeten verbessern zu können. Bei einer Länge von 3,3 m und einem Durchmesser von 1,1 m stellte der Raumflugkörper mit 893,5 kg einen neuen Rekord an wissenschaftlicher Nutzmasse für Planetensonden auf. Rechnet man die Ausleger für die Solarzellen hinzu, dann hatte er einen maximalen Durchmesser von sogar 4 m. Die Flugkörperzelle bestand aus zwei Abteilungen. Die eine umschloß alle Geräte, die erst in Marsnähe zum Einsatz kommen sollten, und die andere enthielt außer den automatischen Steuerungs- und Regelungsanlagen sowie Funkanlagen noch Meßapparaturen, die Untersuchungen im interplanetaren Raum vorzunehmen hatten.

Zur Meßausrüstung von Mars-1 gehörten ein Magnetometer zur Messung des interplanetaren Magnetfeldes sowie zu magnetischen Untersuchungen in Marsnähe; eine aus mehreren Tscherenkow- und Geigerzählern bestehende Meßanordnung zur Registrierung von Teilchenstrahlungen in verschiedenen Energiebereichen; eine Zählrohrapparatur zur Erforschung der Primärkomponente der Kosmischen Strahlung; Geräte zur Messung der Ladungsteilchen niederer Energie im interplanetaren Raum (Sonnenwind) und in der Nähe des Mars; mehrere Impulsgeber zur Ermittlung der Verteilungsdichte von Mikrometeoriten und schließlich eine Anlage zur Erkundung der kosmischen radiofrequenten Strahlung im Bereich von 500 bis 50 kHz. Die Spezialausrüstung von Mars-1 bestand aus einer fotografischen Apparatur mit Zusatzeinrichtungen, die analog zu der ähnlichen Ausrüstung in Lunik-3 Aufnahmen des Mars auf funkttechnischem Wege zur Erde übertragen sollten; einem Spektralphotometer für die Suche nach organischen Substanzen auf der Marsoberfläche und einem Spektrographen zur Feststellung der Ozonabsorption in der Marsatmosphäre.

Nach den Auswertungen der ersten Bahnvermessungen erreichte Mars-1 seine größte Annäherung an den Planeten am 11. Juni 1963. Die Entfernung zur Erde betrug zu diesem Zeitpunkt

rund 250 Millionen km. Bis zu rund 106 Millionen km Entfernung ging aus den von der Raumsonde übertragenen Meßwerten hervor, daß alle Apparaturen des Bordsystems ordnungsgemäß arbeiteten und die Qualität der empfangenen Funksignale den theoretischen Erwartungen entsprach. Eine danach eintretende Störung des Orientierungssystems veränderte jedoch die Ausrichtung der Antennenanlage zur Erde, und der Funkkontakt mit Mars-1 ging verloren. Daran erkennt man einmal mehr die ungewöhnlichen Schwierigkeiten, denen sich die Raumflugtechnik noch bei jedem Unternehmen über größere kosmische Entfernungen gegenübersehen.

Die Meßwerte, die bis zum letzten Funkkontakt von der Raumsonde aus dem interplanetaren Flugbereich übermittelt wurden, waren jedoch für die Präzisierung der Ergebnisse früherer Raumsondenflüge bedeutungsvoll. So wurden unter anderen zahlreiche Meßdaten über die Struktur der Geokorona gewonnen und die Existenz einer Staubbhülle um die Erde bestätigt. Die Stärke des permanenten interplanetaren Magnetfeldes wurde mit Werten zwischen 4 und 12 Gamma (Erdmagnetfeld etwa 60 000 Gamma) als relativ konstant registriert. Weiterhin gelang der Nachweis, daß der interstellare Anteil der primären Kosmischen Strahlung, der also aus den Bereichen außerhalb des Sonnensystems kommt, im Vergleich zum Jahre 1959 (Lunik-Messungen) um 50 bis 70 Prozent zugenommen hat. Am 30. November 1962 konnte eine solare Korpuskelwolke registriert werden, in der die Intensität bei etwa 600 Millionen Teilchen $\cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ lag. Die Messungen im Außenbereich des Strahlungsgürtels ergaben für Elektronen mit über 50 eV Energie eine Intensität zwischen 200 und 400 Millionen Teilchen $\cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Besonders bemerkenswert waren aber die Registrierungen von Meteoritenaufschlägen. In unmittelbarer Nachbarschaft der Erde passierte die Raumsonde den Meteoritenstrom der „Tauriden“, der auch von der Erde aus beobachtet werden



kann. Als Maß für die Verteilungsdichte der meteoritischen Partikel ergab sich ein Aufschlag innerhalb von je zwei Minuten. In einer Entfernung von 20 bis 40 Millionen km von der Erde durchquerte Mars-1 noch einen weiteren Meteoritenstrom, der allerdings durch Beobachtungen von der Erde aus nicht erfaßt werden kann. Gerade dieses zuletzt genannte Ergebnis wies auf die außergewöhnlichen Möglichkeiten für die Beiträge der Raumflugtechnik zur Weltraumforschung hin, die gewiß noch eine große Zahl ähnlicher und anderer Neuentdeckungen im Kosmos versprechen.

Sensation durch „Mariner-4“

Die Vorbereitungen der USA für die Entsendung von Marssonden waren erst zwei Jahre später abgeschlossen. Die Raumflugkörper entstammten der „Mariner“-Serie. Nach einem Fehlschlag mit Mariner-3 zeitigte dann das Unternehmen mit Mariner-4 (28. November 1964) die bisher größte Leistung und den sensationellsten Erfolg aller Planetenflugexperimente. Das Programm sah einen ziemlich nahen Vorbeiflug am Mars vor, wobei außer Messungen und Untersuchungen im planetennahen Raum und am Planeten selbst erstmalig auch Fotos der Marsoberfläche gemacht und zur Erde übertragen werden sollten. Um die Aufnahmen auch ausführen zu können, mußte der Raumflugkörper in einem extrem genauen Flugverlauf – bis auf wenige hundert Kilometer räumlich festliegend – den Planeten passieren. Nur dann konnte, bei weiterhin präzisester automatischer Ausrichtung der starr eingebauten Aufnahmekamera auf das überflogene Gebiet der Marsoberfläche, der Versuch gelingen. Nach den übertragenen Meßwerten und Aufnahmen wich der von den Bildern erfaßte Streifen auf dem Mars tatsächlich nur um eine Bildbreite von dem vorher festgelegten ab. Daß das Experiment höchste Anforderungen an die Zuverlässigkeit

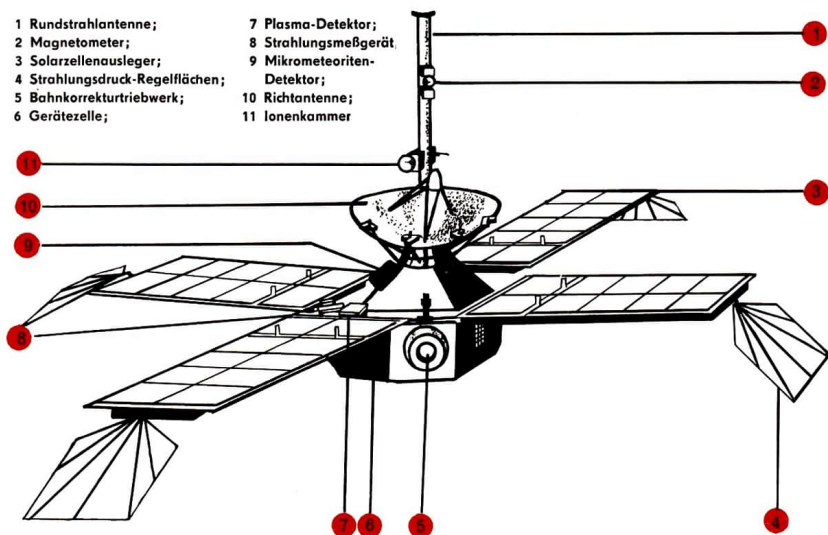
aller Funktionsteile stellte, geht daraus hervor, daß die Flugdauer bis zur Datenübertragung aus Marsnähe immerhin rund 8,5 Monate betrug.

Am 5. Dezember 1964 hatte man noch die Bahn korrigiert, die Mariner-4 (262 kg) schließlich am 15. Juli 1965 in die erforderliche Passageposition brachte. Für 22 Fotos ausgelegte Bildaufnahmesystem wurde in einer Entfernung von 13 300 km vom Mars eingeschaltet und arbeitete während des Vorbeifluges, mit einer größten Annäherung bis auf 9825 km, einwandfrei. Die Meßwert- und Bildübertragungsanlage funktionierte anschließend ebenfalls präzise. Mit einer Sendeleistung von 10 W wurden die Aufnahmen aus einer Entfernung von 216 Millionen bis 220 Millionen km zur Erde übertragen, wobei ein elektronisches Bordgerät die Analog-Bildmeßwerte in Digitalwerte umsetzte, um die bei normaler Trägerwellenmodulation unvermeidbaren Störungen auszuschließen. Die Übertragungszeit für jedes einzelne Bild betrug etwa 8,5 Stunden. Da die auf der Erde eintreffenden Signale außerordentlich schwach waren, mußten große Radioteleskope und Hochleistungsverstärker verwendet werden.

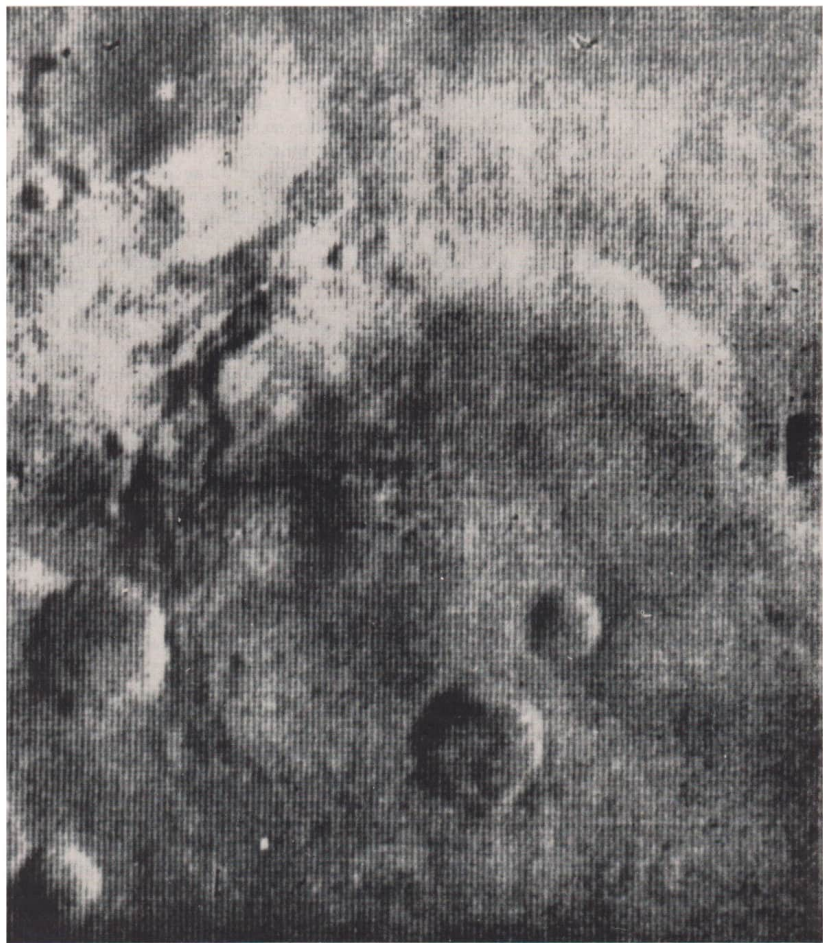
Die Marsfotos erwiesen sich als eine echte wissenschaftliche Sensation. Keine einzige der früher geäußerten Ansichten über die mögliche Beschaffenheit der Marsoberfläche war auch nur annähernd zutreffend. Vor allem erhielten alle Spekulationen über eine irgendwie geartete „Erdähnlichkeit“ des Planeten einen empfindlichen Stoß. Zwar hatten nicht alle der 22 Aufnahmen eine gleiche Aussagekraft, aber die zehn besten bewiesen ganz eindeutig, daß die Oberfläche des Mars weitgehend der des Erdmondes ähnelt! Auf den Fotos waren etwa 70 Kraterformationen zu erkennen, deren Durchmesser zwischen 5 und 70 km liegen und deren Strukturen die typischen Merkmale der Mondkrater aufweisen. Die Detailauflösungen der Aufnahmen betrugen immerhin etwa 3,2 km. Allerdings waren keine sicheren Anhaltspunkte für die Klärung des „Kanal“-Problems zu finden.

Nach den ersten Schlußfolgerungen muß sich die Marsoberfläche offenbar schon seit 2 Milliarden bis 5 Milliarden Jahren in dem vorliegenden Zustand befinden. Die Entstehung der Kratergebilde glaubt man auf Einschläge von Meteoriten und größeren kosmischen Kleinkörpern zurückführen zu können. Es ist praktisch ausgeschlossen, daß der Mars jemals eine dichtere Atmosphäre gehabt haben kann, ebenso wie größere Mengen von freiem Wasser gefehlt haben müssen, weil sonst eine stärkere Erosion der Oberflächenformationen eingetreten sein müßte. Die von Mariner-4 zusätzlich zu den Fotos gewonnenen Messungen ergaben als groben Richtwert für die Dichte der Marsatmosphäre an der Planetenoberfläche einen Wert, der

etwa dem der Erdatmosphäre in 30 km Höhe entspricht; zuvor hatte man einen Vergleichswert von etwa 18 km Höhe in der Erdatmosphäre angenommen. Andere Messungen ließen auf eine Zusammensetzung der Marsatmosphäre aus 72 Prozent Stickstoff, 18 Prozent Kohlendioxid, 8 Prozent Argon und einen noch unaufgeklärten Restanteil anderer Gase schließen. Sauerstoff fehlt offenbar ganz; dadurch würde der Mars der Erde noch unähnlicher. Allerdings darf nicht übersehen werden, daß allen diesen ersten Meßergebnissen zweifellos noch eine gewisse Unsicherheit anhaftet, die nur durch weitere Aufklärungsflüge behoben werden kann. Insgesamt übertrug Mariner-4 vom Starttage bis zum 1. Oktober 1965 13 Millionen



Aufnahme der Marsoberfläche
durch Mariner-4 am 14. Juli 1965
aus rund 12 000 km Entfernung



technische und 23 Millionen wissenschaftliche Daten. Nachdem man die Meßwertübertragung abgeschaltet hatte, wurde versuchsweise Anfang Januar 1966 erneut Funkverbindung mit dem Raumflugkörper aufgenommen, die (ohne Datenübertragung) bei einer Rekordentfernung von 349 Millionen km tatsächlich noch zustande kam.

Spekulationen um Phobos

Von besonderem Reiz ist aber noch ein astronomisches Problem, das ebenfalls mit dem Mars zusammenhängt. Merkur und Venus haben ja keinen Mond, Mars hingegen hat sogar deren zwei. Diese Begleiter unseres Nachbarplaneten zählen zu den interessantesten, jedoch auch am schwierigsten zu beobachtenden Körpern unseres Sonnensystems. Sie sind im astronomischen Sinn so winzig, daß bis heute noch nicht einmal ihre Durchmesser mit hinreichender Sicherheit bestimmt werden konnten; für den planetennäheren „Phobos“ (Furcht) werden meist 16 km angegeben, während die Daten für „Deimos“ (Schrecken) zwischen 8 und 58 km schwanken. Unter diesen Voraussetzungen ist es erklärlich, daß Masse und Dichte dieser Marstrabanten bisher nicht sicher bestimmt werden konnten. Da die Zwergkörper sehr schwierige Beobachtungsobjekte darstellen, konnten auch ihre Bahndaten nicht mit der sonst üblichen Genauigkeit ermittelt werden. Für Phobos ergab sich ein Abstand von der Planetenoberfläche von nur etwa 5900 km und eine Umlaufzeit von rund 7 Stunden 39 Minuten. Das heißt, ein Phobosumlauf dauert weniger Zeit als ein Drittel der Rotationszeit des Planeten. Für das Zustandekommen eines derartigen Verhältnisses vermag die Astronomie bisher keine befriedigende Deutung zu geben. Auch der äußere Marsmond hat eigenartige Bahndaten. Er bewegt sich in einer Entfernung von etwa 23 200 km um den Planeten und benötigt für einen Umlauf rund 30 Stunden

18 Minuten. Das sind nur etwa 6 Stunden mehr als die Dauer einer Marsrotation. Während also Phobos an einem Marstag etwa dreimal umläuft und dabei von West nach Ost den Himmel überquert, bleibt Deimos für einen bestimmten Ort auf dem Mars mehr als zwei Tage ununterbrochen über dem Horizont.

Über diese an sich schon etwas ungewöhnliche Bahnmechanik im System des Mars und seiner Monde hinaus weist die Umlaufbewegung des Phobos scheinbar noch eine ganz besondere Merkwürdigkeit auf. Die Bahngeschwindigkeit des inneren Marsmondes scheint zwar geringfügig, aber doch merklich zuzunehmen und der Abstand vom Planeten dabei allmählich kleiner zu werden. Es sieht so aus, als würde Phobos ständig „abgebremst“, ebenso wie ein künstlicher Erdsatellit in der Hochatmosphäre. Dieser Analogieschluß war vor einigen Jahren Anlaß zu der zwar sensationellen, aber außerordentlich zweifelhaften Hypothese, der innere Marsmond könne ein künstlicher Hohlkörper sein, den Raumfahrer eines fremden Gestirns in der Nähe des Mars geschaffen haben. Die Verfechter dieser Ansicht gingen davon aus, daß bei der Größe des Phobos nur ein Körper von extrem geringer Dichte eine derartige Abbremsung erleiden könne. Ein hohler Körper ließe nun durchaus die erforderliche geringe mittlere Dichte zu. Übersehen wurde bei diesem Gedanken allerdings, daß bei einem astronautischen Kunstmond der innere Ausbau mit technischen Anlagen die mittlere Dichte beträchtlich vergrößern müßte. Außerdem haben sich namhafte Astronomen zu Wort gemeldet, die mehrere plausible natürliche Ursachen für die Bahnänderungen des Phobos anführen konnten. Dessen ungewöhnlich geringe Entfernung vom Mars dürfte wohl die ausschlaggebende Rolle für die extrem starken Bahnstörungen spielen. Vor allem kann man aber schon gar nicht außer acht lassen, daß die bisherigen Bahnparameter des Phobos noch immer sehr unsicher sind.

Zu den Grenzen unseres Sonnensystems und darüber hinaus

Die jenseits des Mars liegenden Großplaneten des Sonnensystems werden in einer übersehbaren Zukunft wohl kaum zu den Zielen astronautischer Expeditionen zählen. Und wenn man zunächst auch nur unbemannte Raumflugkörper bis in diese gewaltigen Entfernungen entsenden will, so wird allein schon das Problem der Funkverbindung den Ausgang derartiger Experimente maßgeblich beeinflussen.

Jupiter — der Riese unter den Planeten

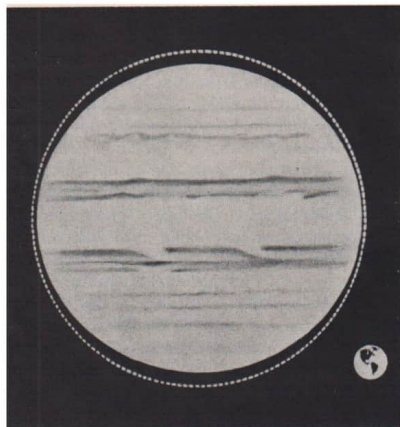
Die mittlere Sonnenentfernung des nächsten Planeten, des Jupiter, beträgt schon rund 778 Millionen km; das sind rund 5,2 AE. Mit einer mittleren Bahngeschwindigkeit von 13,06 km/s benötigt der Planet 11,86 Erdjahre zu einem Umlauf um die Sonne.

Trotz dieser riesigen Entfernung ist Jupiter aber zum Zeitpunkt seiner Opposition nach der Venus das hellste sternartige Objekt am Nachthimmel. Daraus läßt sich sofort auf eine beträchtliche Größe dieses Himmelskörpers schließen, die sich dann auch beim Blick durchs Fernrohr bestätigt. Sein scheinbarer Durchmesser ist über zweimal größer als der des so viel näheren Mars bei größter Annäherung. Mit einem äquatorialen Durchmesser von 142800 km (= 11,2 Erddurchmesser) ist Jupiter auch tatsächlich der größte unter den Planeten des Sonnensystems. Schon in einem kleinen Fernrohr fällt auf, daß er ganz erheblich abgeplattet ist, der polare Durchmesser ist um 8800 km kleiner als der am Äquator. Die Erklärung dafür läßt sich in der schnellen Rotation des Planeten finden, denn der Gigant dreht sich schon innerhalb von 9 Stunden 50 Minuten um seine eigene Achse, während die Erde dazu immerhin 24 Stunden benötigt.

Die Masse dieses Riesenplaneten ist nicht weniger eindrucksvoll. Mit rund 318 Erdmassen übertrifft sie die Masse aller übrigen Planeten zusammen

noch um mehr als das Doppelte. Eine Überraschung bietet allerdings die mittlere Dichte des Jupiter. Mit $1,33 \text{ g/cm}^3$ beträgt sie noch nicht einmal ein Viertel der mittleren Erddichte. Sie liegt nur wenig unter dem Wert für die Sonne. Damit zeichnen sich weitreichende Schlußfolgerungen für den inneren Aufbau dieses Planeten ab. Er kann keinesfalls mehr so „erdähnlich“ sein, wie es mit Einschränkungen für die Planeten Merkur, Venus und Mars gilt. Die Hypothesen über den inneren Aufbau des Jupiter gehen allerdings noch weit auseinander. Das äußere Bild des Planeten wird nämlich von einer im allgemeinen undurchdringlich dichten Wolkenhülle bestimmt, in der sich gewaltige Strömungsvorgänge nachweisen lassen. Die spektroskopische Analyse dieser Hülle ergab eine Zusammensetzung aus Wasserstoff, Methan (CH_4) und Ammoniak (NH_3).

Der Jupiter ist ein intensiver Radiostrahler, und die Untersuchungen zeigten, daß der Planet offenbar eine starke „Ionosphäre“ sowie ein Magnetfeld nebst ausgeprägtem „Strahlungsgürtel“ hat. Beide Gebiete sind nämlich – neben anderen Strahlungsherden – maßgeblich an der Erzeugung der radiofrequenten Strahlung beteiligt. Im Hinblick auf die Temperaturen der Radiostrahlungsgebiete konnte noch kein befriedigendes Bild gewonnen werden. So lieferten beispielsweise einige Messungen Temperaturwerte um -100°C , während in anderen Wellenlängenbereichen Temperaturen von $+130$ und sogar $+600^\circ\text{C}$ gefunden wurden. In den Überlegungen zum inneren Aufbau des Jupiter stehen sich daher zwei Ansichten kräftig gegenüber. Die eine dieser Hypothesen setzt einen relativ heißen Planetenkern aus hochverdichteten Gasen und darüber gelagerten Gasschichten mit unterschiedlichen physikalischen Bedingungen voraus, also etwa ähnlich wie bei der Sonne. Die andere nimmt einen bis in tiefste Regionen „kalten“ Jupiter an, dessen sehr kleiner fester Kern von mehreren starken Hüllen gefrorener und flüssiger Gase umgeben sein soll.



Gleichgültig, welche Meinung eines Tages recht behält, die davon zu erwartenden grundsätzlichen Erkenntnisse werden von sehr großer Bedeutung für das Bild von der Entstehung und Entwicklung des Planetensystems und seiner einzelnen Mitglieder sein. Inwieweit die Raumflugtechnik dazu beitragen kann, wird die Zukunft zeigen. Sicherlich versucht man später einmal, mit „Eintauchsonden“ unter die äußere Wolkenhülle des Planeten vorzustößen. In einer noch sehr fernen Zukunft der Raumfahrt könnten unter Umständen die vier großen Jupitermonde, die schon 1610 Galilei entdeckte, willkommene Stützpunkte sein, um die Außenbezirke unseres Planetensystems mit bemannten Raumschiffen zu erkunden. Von ihren physischen Daten her böten sie dafür sogar recht günstige Voraussetzungen; denn ihre Durchmesser liegen etwa zwischen dem des Erdmondes und dem des Merkur. Albedomessungen lassen darüber hinaus vermuten, daß zumindest zwei von ihnen eine Gashülle haben, was dann auch durch

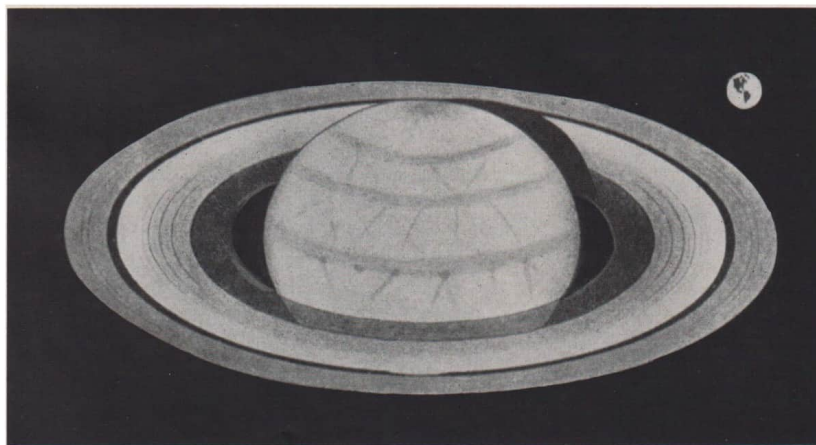
spektroskopische Untersuchungen bestätigt werden konnte. Allerdings sind ebenfalls wieder Methan und Ammoniak an der Zusammensetzung ihrer Atmosphären beteiligt. Sehr einladend dürften also diese fernen Himmelskörper für irdische Raumfahrer gerade nicht sein. Außer den vier „Galileischen“ Monden hat man bis heute noch weitere acht Trabanten des Riesenplaneten entdeckt; es sind jedoch ausnahmslos „Zwerge“ von wenigen Dutzend Kilometern Durchmesser.

Saturn und sein Ring

Um zum nächsten Planeten des Sonnensystems zu gelangen, muß man die Jupiterentfernung schon fast verdoppeln. 1,5 Milliarden km trennen den Saturn im Mittel von der Sonne. Knapp 30 Erdjahre dauert ein einziger Umlauf. Seine „Marschgeschwindigkeit“ von 9,65 km/s ist neben dem flotten Tempo des Merkur nur noch als müdes „Schleichen“ anzusehen. Nicht nur wegen seiner Größe (120 800 km Durchmesser) ist Saturn dem Jupiter verwandt. Auch seine sonstige physische Beschaffenheit trägt ähnliche Züge, die sich übrigens auch bei Uranus und Neptun wiederholen. Aus diesem Grund bezeichnet man in der Astronomie diese Planeten als „jupiterähnlich“. Die Abplattung ist beim Saturn sogar noch größer als beim Jupiter, denn sein Poldurchmesser ist um 11 600 km kürzer als der Äquatordurchmesser. Die Ursache ist auch hier wieder die schnelle Umdrehung um seine Achse von 10 Stunden 14 Minuten. Die mittlere Dichte des Saturn ist mit 0,69 g/cm³ seinem größeren Bruder gegenüber sogar noch erheblich kleiner. Seine gleichfalls dicht geschlossene Wolkenhülle zeigt spektroskopisch annähernd dieselbe Zusammensetzung wie die des Jupiter, nur ist der Methananteil etwas höher als der des Ammoniak. Aus allem läßt sich schließen, daß auch der innere Aufbau beider Planeten weitgehend ähnlich sein muß.

Dem Saturn käme also astronautisch kaum ein besonderes Interesse zu, wenn mit ihm nicht eine einmalige Naturerscheinung verknüpft wäre. Schon Galilei bemerkte mit seinen noch unvollkommenen Fernrohren, daß der Saturn eine recht merkwürdige Form zeigt. An Stelle eines einzelnen Planetenkörpers sah er deren drei; ihre Zentren lagen dabei auf einer Linie. Die beiden gleichgroßen äußeren Körper schienen den noch etwas größeren Zentralkörper direkt zu berühren. Die Deutung dieser ungewöhnlichen Erscheinung gelang im Jahre 1656 dem holländischen Astronomen Huygens. Nach seinen Beobachtungen war der Planetenkörper (Galileis Zentralkörper) von einem dünnen, ebenen, nirgends mit dem Saturn zusammenhängenden und gegen die Ekliptik geneigten Ring umgeben. Himmelsmechanische Überlegungen zeigten sehr bald, daß dieser Saturn-

Ring kein festes Gebilde sein konnte. Es handelt sich vielmehr um eine ausgedehnte und dichte Ansammlung von Kleinkörpern, die den Planeten als winzige „Monde“ umkreisen. Den Beweis für diese Ansicht trat erstmalig 1675 der Italiener Giovanni D. Cassini (1625–1712) an, als er die „Ringteilungen“ deutete. Danach schafften die bahnmekanischen Störungen durch die außerhalb des Ringes umlaufenden „echten“ Saturnmonde Gebiete, in denen sich kein Ringteilchen längere Zeit aufhalten kann. Später gelang es tatsächlich auf spektroskopischem Wege (Dopplereffekt), die Teilchenstruktur der Ringmaterie zu beweisen. Die im Spektrum der Saturnringe zu beobachtenden Linienverschiebungen zeigten deutlich, daß die inneren Partien des Gesamtgebildes schneller um den Planeten rotieren als die äußeren. Dieser Effekt kann nur durch frei nach

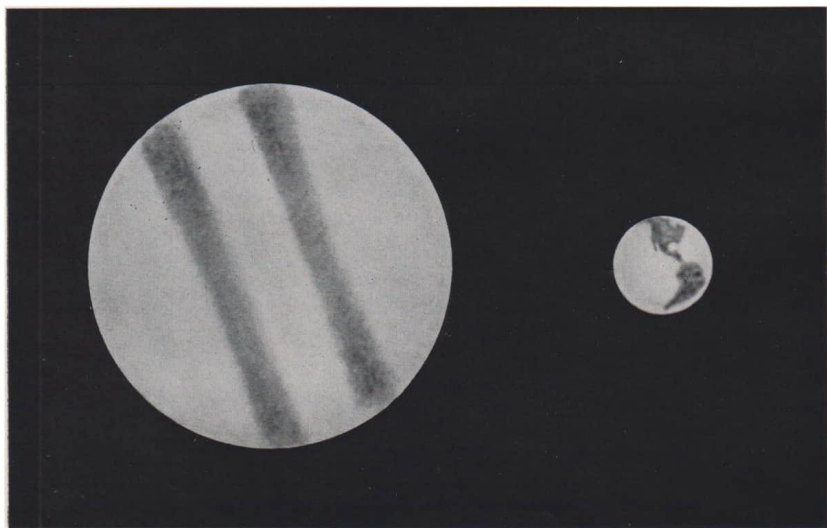


den Keplerschen Gesetzen umlaufende Einzelkörper erklärt werden.

Über die Masse des Saturnringsystems herrschte lange Zeit Unklarheit. Trotz einer ebenen Ausdehnung des Ringbereiches von etwa 12 000 bis zu rund 80 000 km über der äußeren Planetenhülle nahm man sie anfangs als außerordentlich klein an. Es ließ sich weder eine merkliche Anziehungswirkung auf die Planetenmonde, noch eine meßbare Dicke der Ringgebilde erfassen. Schließlich vermochte in neuerer Zeit der Astronom H. Buerius aus den Störungen der Saturnmonde die Ringmasse abzuleiten. Diese beträgt etwa ein Drittel der Masse des Erdmondes und ist also erheblich größer als erwartet. Das Bild von der

Struktur der Ringmaterie wurde dadurch insofern beeinflusst, als der Hauptmassenanteil auf größere Körper entfällt. Ein wesentlich geringerer Teil der Masse kommt auf eine ungeheure Vielzahl winziger Staubteilchen, die jedoch den Helligkeitseindruck der Ringe und deren scheinbar flächenhaftes Aussehen bestimmen.

Die himmelsmechanischen Untersuchungen zeigten weiterhin, daß das Saturnringsystem ein sehr junges Gebilde sein muß; denn die Gesamtwirkung aller Störkräfte läßt kaum einen längeren Bestand als etwa 1 Million Jahre zu. Vermutlich verdankt es seine Existenz dem allmählichen Zerfall eines extrem planetennahen Saturnmondes. Nach den Untersuchungen des Mathematikers



Roche kann ein größerer kompakter Körper, der sich innerhalb einer bestimmten Minimalentfernung (Rochesche Grenze) um einen wesentlich massereicheren herumbewegt, nicht stabil bleiben. Er wird von den auf ihn einwirkenden himmelsmechanischen Kräften buchstäblich zerrissen und zerfällt nach und nach in kleinere Körper verschiedener Dimensionen. Wie Messungen und Berechnungen ergeben, liegen die Saturnringe tatsächlich zu wesentlichen Teilen innerhalb der für den Saturn gültigen Rocheschen Grenze.

Über die insgesamt neun „echten“ Monde des Saturn ist nur so viel zu sagen, daß der mit weitem Abstand größte unter ihnen (Titan) den Merkur an Größe noch etwas übertrifft. Seine physische Beschaffenheit ist jedoch ungeklärt. Es wird allgemein angenommen, daß er den Galileischen Jupitermonden weitgehend ähnelt. Von den übrigen acht kleineren Saturnmonden ist wahrscheinlich der äußerste (Phoebe) ein „eingefangener“ oder „zugewanderter“ Planetoid.

Herschel entdeckt den Uranus

Am 13. März 1781 entdeckte W. Herschel einen Planeten jenseits des Saturn, der nach einigem Hin und Her um die Namensgebung schließlich Uranus genannt wurde. Damit dehnte sich das Planetensystem auf rund das Doppelte aus; denn 2,9 Milliarden km trennen den Uranus im Mittel von der Sonne. Selbst in sehr großen Fernrohren sieht man von ihm nicht mehr als eine winzige Scheibe, auf der sich Einzelheiten kaum noch hinreichend sicher erfassen lassen. So hat sich unser Wissen um die Beschaffenheit dieses Planeten, trotz der nun schon fast 200 Jahre zurückliegenden Entdeckungsgeschichte, nur sehr spärlich und unbefriedigend erweitert.

Außer Umlaufzeit (rund 84 Erdjahre), Bahngeschwindigkeit (6,8 km/s) und den übrigen Bahn-
daten weiß man von ihm lediglich, daß er mit

47 600 km Äquatordurchmesser die Erde um das rund 3,75fache übertrifft, bei einer Masse von 14,55 Erdmassen eine mittlere Dichte von $1,56 \text{ g/cm}^3$ aufweist und nach Albedomessungen und spektroskopischen Untersuchungen offenbar eine Wolkenhülle hat, die weitgehend jupiterähnlich ist. Die Bestimmung seiner Rotationsdauer auf spektroskopischem Wege ergab 10 Stunden 49 Minuten mit einer ebenso großen Abplattung wie beim Jupiter. Darüber hinaus zeigt Uranus aber eine Eigentümlichkeit, die bei keinem anderen Großplaneten zu verzeichnen ist. Seine Rotationsachse bildet mit der Bahnebene einen Winkel von 98° ; der Planet rotiert im Vergleich zu den übrigen Planeten „rückläufig“ von Ost nach West, wobei seine Äquatorebene fast senkrecht auf der Bahnebene steht. Für diese ungewöhnliche Erscheinung konnte bisher noch keine plausible Erklärung gefunden werden. Von den fünf Uranusmonden, deren letzter erst 1948 aufgefunden wurde, sind nur die Bahn-
daten mit Sicherheit bekannt, die sie als „reguläre“ Monde des Planeten ausweisen.

Neptun — der errechnete Planet

Wenn schon Uranus auf Grund seiner riesigen Entfernung dem forschenden Auge des Astronomen kaum noch Einzelheiten zugänglich werden läßt, so gilt dies erst recht für den in 4,5 Milliarden km (rund 30 AE) Entfernung von der Sonne umlaufenden Neptun. Dennoch wurde dieser Planet zu einem „Paradestück“ der Astronomie. Er wurde nämlich am Schreibtisch entdeckt. Nach Gesetzen der Planetenbewegung schlossen 1845 der Engländer J. C. Adams (1819–1892) und der Franzose U. J. Leverrier (1811–1877) unabhängig voneinander aus den in der Uranusbewegung vorhandenen Bahnstörungen auf die Existenz eines jenseits des Uranus umlaufenden Planeten und berechneten sogar dessen Ort am Himmel. Leverrier teilte sein Ergebnis dem

Berliner Astronom J. G. Galle (1812–1910) mit, der den theoretisch vorausgesagten Planeten schließlich am 23. September 1846 in unmittelbarer Nähe des berechneten Ortes fand. Diese Entdeckungsgeschichte des Neptun zählt zu einem der schönsten und wohl auch beeindruckendsten Erfolge in der Geschichte der Astronomie.

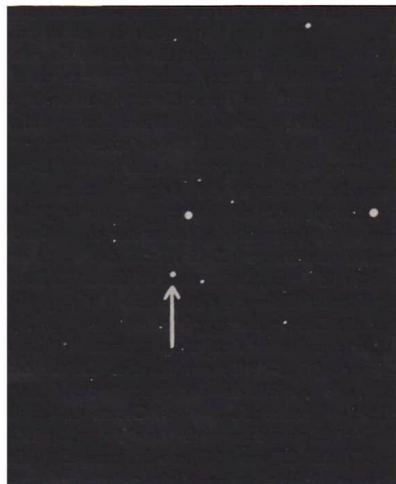
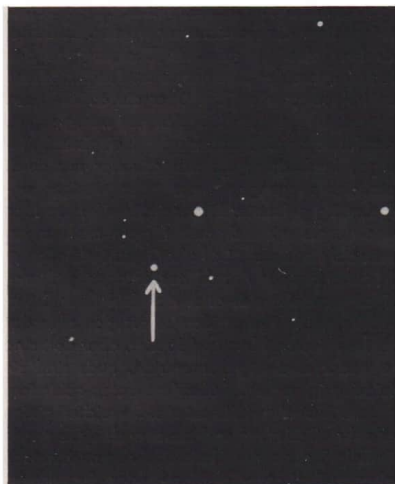
Die ungeheure Entfernung des Planeten von der Sonne bedingt auch die lange Umlaufzeit von etwa 165 Erdjahren. Obwohl die Neigung seiner Polarachse gegen die Senkrechte auf der Bahnebene mit 29° fast der Neigung der Erdachse entspricht, wird es auf dem Neptun keine merklichen jahreszeitlichen Erscheinungen mehr geben, da die Intensität der Sonnenstrahlung bei dieser Entfernung nur noch sehr gering ist. Für einen Beobachter auf dem Neptun wäre die Sonne lediglich ein ungewöhnlich heller (rund 500fache Vollmondhelligkeit) und fast punktförmiger Stern. Wenn als einzige Wärmequelle nur die Sonnenstrahlung in Frage kommt, dann liegt die Temperatur auf dem Neptun höchstens bei -200°C .

In seinen physischen Daten weist Neptun einige Ähnlichkeiten mit Uranus auf. Sein Durchmesser (44 600 km) ist zwar etwas kleiner als der seines Nachbarn, dafür sind aber Masse (17,23 Erdmassen) und Dichte ($2,27\text{ g/cm}^3$) größer. Neptun hat damit die größte Dichte unter allen jupiterähnlichen Planeten. Seine Zugehörigkeit zu dieser Gruppe wird jedoch durch die spektroskopisch nachgewiesene Existenz einer dichten Wolkenatmosphäre mit den charakteristischen Beimengungen von Methan und Ammoniak sowie durch die relativ rasche Rotation von 15 Stunden 40 Minuten hinreichend unterstrichen. Schon Ende 1846 wurde ein Mond des Neptun entdeckt, der etwa die Größe unseres Erdmondes haben dürfte. Seine rückläufige Bewegungsrichtung bereitet allerdings der Entwicklungstheorie von Planeten und Trabanten nicht weniger Schwierigkeiten als die ungewöhnliche Achsenneigung des Uranus. 1949 entdeckte man einen zweiten Neptunmond, dessen

außergewöhnlich elliptische Umlaufbahn ebenfalls zu den himmelsmechanischen Extremfällen zählt. Irgendwie scheinen also im Bereich großer Sonnenentfernungen die Bande der strengeren Ordnung, wie sie den sonnennäheren Raum beherrschen, offenbar etwas gelockert zu sein.

Außenseiter am Rand unseres Sonnensystems

Dieser Eindruck verstärkt sich noch, wenn man den erst 1930 entdeckten sonnenfernsten Planeten Pluto betrachtet. Von seinen physischen Eigenschaften weiß man zwar zur Zeit kaum mehr, als daß er etwa die Größe der Erde haben und ganz allgemein wahrscheinlich wieder ein „erdähnlicher“ Planet sein könnte. Auch seine Bahndaten sind recht ungewöhnlich. Schon wegen seiner mittleren Entfernung von der Sonne (5,9 Milliarden km; etwa 39,5 AE) fällt Pluto besonders augenfällig aus einem gewissen rhythmischen Anwachsen der Planetenabstände heraus. Vor allem sind es aber Bahnneigung (rund 17°) und Bahnexzentrizität (fast 0,25; Erde: 0,017), die ihn von allen anderen Großplaneten beträchtlich unterscheiden. So kommt es, daß der sonnennächste Punkt der Plutobahn noch innerhalb der Neptunbahn liegt. Enger begegnen können sich die beiden Planeten allerdings nicht, weil Pluto wegen seiner starken Bahnneigung um einige hundert Millionen Kilometer unter der Bahnebene des Neptun hindurchzieht. Die Hypothese, Pluto sei ein ehemaliger Neptunmond, der sich aus unbekannten Gründen „selbstständig“ gemacht habe, hat also wenig Wahrscheinlichkeit. Alle Bemühungen, den sonnenfernsten Planeten in die Vorstellung vom Aufbau des Planetensystems sinnvoll einzuordnen, waren bisher vergeblich. Weder die Suche nach einem zweiten Schwarm von Planetoiden in diesem Bereich, deren größter Vertreter Pluto sein soll, noch die Fahndung nach weiteren, mehr oder weniger



regulären Großplaneten jenseits des Pluto (transplutonische Planeten) führten zum Erfolg.

Lückenfüller zwischen Mars und Jupiter

Außer den Großen Planeten unseres Sonnensystems gibt es in diesem kosmischen Bereich unzählige Kleinkörper. Eine besondere Gattung davon, die Planetoiden, wurde bereits mehrmals erwähnt. Bei seinen mathematischen Entdeckungen fiel Kepler und nach ihm auch anderen Astronomen auf, daß in der Entfernungsfolge der Großplaneten zwischen Mars und Jupiter eine auffällige Lücke klappt. Besonders deutlich wurde dies, als der Mathematiker und Physiker J. K. Titius (1729–1796) im Jahre 1766 eine empirische Regel für die mittleren Entfernungen a (in AE) der

Großplaneten aufstellte, nämlich $a = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n$. Weil der Astronom J. E. Bode (1747–1826) diese Formel allgemein bekannt machte, wird sie auch Titius-Bodesche Reihe genannt. Die Daten für die damals bis zum Saturn bekannten Geschwister der Erde stimmten erstaunlich gut mit dieser Formel überein, wenn man als Exponenten beispielsweise für die Planeten Erde, Mars, Jupiter und Saturn die Zahlen $n = 1$, $n = 2$, $n = 4$ und $n = 5$ einsetzte. Nur für $n = 3$ fand sich kein zugehöriger Planet. Als dann 1781 der Uranus entdeckt wurde, dessen mittlere Entfernung mit $n = 6$ ebenfalls recht gut der Titiussschen Regel entsprach, verstärkte sich das wissenschaftliche Interesse an dieser rätselhaften Planetenlücke beträchtlich. Verständlicherweise erregte es daher großes Aufsehen, als der italienische Astronom Giuseppe Piazzi (1746–1826) in der Nacht zum 1. Januar 1801

ein lichtschwaches sternähnliches Objekt auffand, das wegen seiner relativ großen Eigenbewegung nur ein Planet sein konnte. Die weitere Bahnverfolgung bestätigte diese Ansicht. Sie ergab schließlich für die „Ceres“, wie dieser Himmelskörper dann genannt wurde, eine mittlere Sonnenentfernung, die sehr gut die Lücke zwischen Mars und Jupiter schloß. Allerdings ist dieser Himmelskörper wesentlich kleiner als die übrigen Planeten, denn wie sich später nach Messungen mit sehr großen Fernrohren herausstellte, hat er nur einen Durchmesser von knapp 800 km. Trotz des etwas ungewöhnlichen Ergebnisses schien damit das Rätsel der Planetenlücke an sich gelöst. Um so größer war die Überraschung, als schon etwa ein Jahr später der Bremer Arzt und Astronom Wilhelm Olbers (1758–1840) ein weiteres Objekt auffand, das ebenfalls den Bedingungen des „Lückenplaneten“ entsprach. Der von Olbers entdeckten „Pallas“ folgten dann noch „Juno“ (Harding 1804) und „Vesta“ (Olbers 1807), so daß man schließlich eine vierköpfige Familie „Kleiner Planeten“ hatte, deren Mitglieder man als Bruchstücke des eigentlichen Planeten mit $n = 3$ ansah. Nach einer Pause bis 1845 (Entdeckung des fünften Kleinen Planeten „Asträa“) fand man eine große Anzahl Planetoiden. Vor allem mit der Himmelsfotografie kam man immer wieder neuen Mitgliedern dieser Untergruppe von Himmelskörpern auf die Spur. Im Augenblick kennt man einige Tausende, von denen allerdings nur etwa 1800 durch exakte Bahnbestimmungen gesichert werden konnten. Nach Schätzungen sollen wahrscheinlich mehrere zehntausend Planetoiden vorhanden sein.

In der Größe rangieren unter den Kleinen Planeten die vier zuerst entdeckten mit beträchtlichem Abstand an der Spitze. Während bei diesen immerhin noch einige hundert Kilometer Durchmesser durch Direktmessungen gefunden wurden, sind einige zehn Kilometer bei den übrigen schon recht selten. Die überwiegende Mehrzahl hat sogar Durchmesser weit unter einem Kilometer.

Die Anzahl der Planetoiden nimmt um so stärker zu, je kleiner die Durchmesser werden. Es deutet sich hier also ein gewisser Übergang zu den Kleinstkörpern des Sonnensystems, den Meteoriten und Mikrometeoriten, an. Über die äußere Form der Kleinen Planeten läßt sich nur wenig sagen. An zahlreichen Objekten wurden Helligkeitsänderungen beobachtet, die sich offenbar nur durch Rotationsbewegungen mehr oder weniger unregelmäßig geformter Körper erklären lassen. Man kann daraus mit Sicherheit für die meisten von ihnen auf eine bruchstückhafte Gestalt schließen.

Mit zunehmender Anzahl der entdeckten Planetoiden wandelte sich auch das Bild ihrer Bahnverteilung. Die Planetoiden bevorzugen zwar das Gebiet zwischen Mars und Jupiter, aber dort sind sie weder eindeutig konzentriert, noch sind sie gleichförmig verteilt. Außerdem traten zahlreiche extreme Ausnahmefälle zutage. So reichen einige der sehr elliptischen und meist auch stark gegen die Ekliptik geneigten Umlaufbahnen nach beiden Seiten weit über die Mars- oder Jupiterbahn hinaus. Beispielsweise liegt der sonnenfernste Bahnpunkt des Kleinen Planeten „Hidalgo“ sogar jenseits der Saturnbahn, und „Ikarus“ wird auf seiner stark exzentrischen Bahn aus dem Bereich zwischen Mars und Jupiter bis auf rund 27 Millionen km (0,18 AE) an die Sonne herangeführt. Auch Fälle von relativ großer Erdannäherung sind bekannt geworden. So zog 1937 der Planetoid „Hermes“ in einem Abstand von nur rund 600 000 km an der Erde vorbei, das war weniger als die doppelte Entfernung des Mondes. Einen weiteren Sonderfall bilden die „Trojaner“. Bei ihnen handelt es sich um zur Zeit 14 Kleine Planeten, die sich etwa in der gleichen Bahn wie der Jupiter um die Sonne bewegen. Aus himmelmekanischen Gründen sind sie in Bereichen konzentriert, deren Zentren mit Sonne und Jupiter die Eckpunkte gleichseitiger Dreiecke bilden. Ihre Sammelbezeichnung rührt daher, daß sie nach Gestalten des Trojanischen Krieges benannt sind.

Eine wesentliche Bereicherung des Wissens über Planetoiden können wir von der erdgebundenen Forschung kaum noch erwarten. Dabei wäre es sicher hochinteressant, ihrer Entstehung auf die Spur zu kommen. In dieser Frage steht die Wissenschaft auch heute noch vor einem Rätsel. Es ist noch nicht einmal klar, ob ihr Entstehungsvorgang nur ein „individueller“ Prozeß (Zerfall eines größeren kompakten Körpers) war oder eine Folge der allgemeinen Entwicklung der kosmischen Materie im Sonnensystem darstellt. Die kosmologische Bedeutung des Planetoiden-Problems würde es durchaus sinnvoll machen, die Kleinen Planeten zu den astronautischen Zielkörpern zu zählen.

Die Welt der Kleinsten

Wie sich zeigt, kann man also mit gewissen Einschränkungen über die Stufenleiter der immer kleiner werdenden Planetoiden allmählich in den Größenbereich der interplanetaren Kleinstkörper gelangen. Dabei läßt sich ganz allgemein die frühere Feststellung, wonach mit abnehmender Größe die Häufigkeit anwächst, auch auf diese Kategorie kosmischer Körper übertragen. Eigentlich ist es etwas gewagt, hier von besonderen Kategorien zu sprechen, da man nach der Größe wahrscheinlich überhaupt keine feste Grenze zwischen kleinen und kleinsten Planetoiden und den noch kleineren meteoritischen Körpern ziehen kann. Eine allgemeine Zusammengehörigkeit kann daraus nicht abgeleitet werden. Die Bedingungen in der Welt interplanetarer Kleinkörper sind einerseits recht differenziert und andererseits in allen Einzelheiten auch heute noch nicht restlos geklärt. Das liegt vor allem daran, daß Körper von der Größenordnung der Meteorite (Durchmesser von etwa einigen Metern bis zu Zentimetern und Millimetern) von der Erde aus im freien interplanetaren Raum überhaupt nicht wahrgenommen werden können. Sobald aber ein mit kosmischer Ge-

schwindigkeit fliegender Meteorit in die Hochatmosphäre der Erde eintritt, entsteht als sichtbarer Effekt die Leuchterscheinung eines „Meteors“ oder einer „Sternschnuppe“. Die aufblitzende Bahnspur bringt für den Astronomen die einzige optische Kunde von der Existenz dieses kosmischen Kleinstkörpers, der zu diesem Zeitpunkt sogar schon wieder aufgehört hat zu existieren. Damit wird nur der sehr enge Kreis interplanetarer Körper für die wissenschaftliche Beobachtung erreichbar, dessen Mitglieder die Erdbahn auf ihrem Weg um die Sonne kreuzen. Diese durch den erdgebundenen Beobachtungsstandort hervorgerufene Auswahl kann daher nur ein unvollständiges Bild von der räumlichen Verteilung der interplanetaren Kleinkörper liefern.

Der Nutzen interplanetarer Raumsonden zur Bestimmung der Verteilungsdichte der Meteoriten liegt also klar auf der Hand. Allerdings kann sich der Beobachtungsbereich dieser Sonden in der Regel nur auf die winzigen Kleinkörper (Mikrometeorite, kosmischer Staub) beschränken, weil ein Meteorit von mehreren Gramm oder gar Kilogramm Masse eine Raumsonde beim Zusammenstoß zerstören würde. Immerhin ist die Energie, die ein Eisen-Nickel-Meteorit von nur 32 mg Masse beim Aufprall freisetzt, schon mit der einer 5-g-Dynamitladung vergleichbar, wenn sich das kosmische Teilchen mit einer Geschwindigkeit von etwa 40 km/s relativ zum Auftreffziel bewegt. Eine derartige Geschwindigkeit zählt aber in der Praxis noch nicht einmal zu den Ausnahmen. Für die Zukunft der Raumfahrt scheint sich dennoch die „Meteoritengefahr“ als weit weniger groß zu erweisen, als man es vor einiger Zeit noch vermutete. Die größeren Meteoriten verteilen sich im Durchschnitt weiträumig, so daß nach der Wahrscheinlichkeitsrechnung nur innerhalb sehr langer Zeiträume mit einem gefahrbringenden Treffer zu rechnen ist. Da es sich aber eben doch nur um Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen handelt, wird man trotzdem künftig jeglich erdenkbare Sicher-



heitsvorkehrungen treffen müssen (zum Beispiel leichte Mehrfachwandungen für Raumschiffe). Sicherlich werden sich aber gelegentlich auch größere Havarien und Verluste durch schwere Meteoritentreffer nicht ganz vermeiden lassen.

Meteoritenschwärme, Kometen und Kometensysteme

Die Beobachtungen mit visuellen, fotografischen und funkttechnischen (Radar) Methoden zeigen, daß außer den „sporadischen“ Meteoriten auch noch eine ganze Reihe von „Meteoritenströmen“ existieren. Es handelt sich dabei um eine größere Anzahl von Meteoriten, die mit gewissen Streuungen auf einer nahezu gleichen mittleren Bahn um die Sonne ziehen. Derartige Ströme haben eine unterschiedliche Verteilungsdichte. Für das Zustandekommen solcher Schwärme meteoritischer Körper gibt es nur in einigen Fällen eine brauchbare Erklärung, wenn nämlich die Bahndaten des Teilchenschwarms mit den Bahnen ganz bestimmter Kometen eindeutig übereinstimmen. Es muß dann eine enge Beziehung zwischen diesen beiden Arten von Himmelskörpern angenommen werden. Darüber hinaus scheint sich für andere Meteoritenströme ein gewisser Zusammenhang mit den Kleinen Planeten abzuzeichnen.

Von der angedeuteten Verknüpfung zwischen Meteoriten und Kometen läßt sich schon ein klares Bild skizzieren. Grundsätzlich kann man die betreffenden Meteoritenströme als Zerfallsprodukte der zugehörigen Kometen ansehen. Dieser Prozeß hängt mit der ungewöhnlichen Beschaffenheit der Kometen zusammen, für die die Entwicklungstheorien des Sonnensystems zur Zeit noch keine Erklärung geben können. Ein voll ausgebildeter Komet zeigt sich am Himmel als flächenhaftes, diffus leuchtendes Gebilde, mit mehr oder weniger kräftigem, langem „Schweif“ (daher auch „Schweifstern“, „Haarstern“ oder lat. „Komet“). Bei näherer

Betrachtung erkennt man im „Kopf“ des Kometen, in der „Koma“, zumeist noch einen winzigen, sternartig leuchtenden Punkt. In diesem äußerlich so unscheinbaren „Kometenkern“ ist praktisch die Gesamtmasse des Gebildes konzentriert. Koma und Schweif sind nur leuchtende Gasmassen extrem niedriger Dichte, die sich unter bestimmten Bedingungen zusätzlich bilden.

Im Durchmesser ist der Kometenkern etwa mit den Kleinen Planeten vergleichbar. Die stoffliche Zusammensetzung beider Körper unterscheidet sich jedoch wesentlich. Während die Planetoiden einzelne kompakte Körper darstellen, die arm an flüchtigen Stoffen und Gasen sind, bestehen die Kometenkerne dagegen offenbar aus Anhäufungen von Kleinstkörpern, die durch einen beträchtlichen Anteil gefrorener Gase und sonstiger leicht flüchtiger Substanzen „zusammengekittet“ sind. Gelangt dieses merkwürdige Gebilde, das sich meist auf einer sehr elliptischen Bahn bewegt, in einen hinreichend geringen Abstand zur Sonne, dann bewirkt deren Wellen- und Korpuskularstrahlung ein allmählich immer lebhafter werdendes Verdampfen der flüchtigen Stoffe in das Vakuum des interplanetaren Raumes, und der Kern umgibt sich mit der Koma-Gashülle. Bei weiterer Sonnenannäherung und genügend starker Gasentwicklung sorgt der Strahlungsdruck der Sonne für das „Abblasen“ des Gasschweifs. Aber nicht nur der Strahlungsdruck ist an diesem Phänomen beteiligt, wie man früher allgemein annahm, auch der Sonnenwind spielt dabei eine wichtige Rolle, wie man neuerdings feststellte. Der Sonnenwind kann sogar nicht nur gasförmige Bestandteile als Schweif in den Raum hinausblasen, sondern auch feste staubförmige Partikel. Mit dem Verdampfen der flüchtigen Substanzen lockert sich allmählich das Gefüge des Kometenkerns, und unter dem Einfluß himmelsmechanischer Störkräfte verteilen sich schließlich die ursprünglich im Kern „eingebakenen“ kompakten Kleinkörper als Meteoritenschwarm über einen immer größer werdenden Bereich der



Umlaufbahn. Dieser Auflösungsprozeß kann sich über viele Umläufe des Kometen hinziehen.

Damit wurde natürlich nur eine summarische und stark vereinfachte Darstellung der Entstehung eines kometarischen Meteoritenstromes gegeben. Rückschlüsse auf die stoffliche Beschaffenheit der Meteoriten und damit in gewissem Umfang auch der Kometen lassen sich aus einer Analyse derjenigen Meteoriten ableiten, die wegen ihrer besonderen Größe beim Einschuß in die Erdatmosphäre nicht total verdampfen und demzufolge aufgefunden werden können. Danach gehören etwas mehr als 90 Prozent zu den „Steinmeteoriten“, 5 Prozent zu den „Eisenmeteoriten“ und der Rest zu verschiedenen Zwischenformen. Die chemische Analyse der Steinmeteoriten ergibt im Mittel 42 Prozent Sauerstoff, 20,6 Prozent Silizium, 15,8 Prozent Magnesium, 15,6 Prozent Eisen und rund 2 Prozent Beimengungen einiger anderer Elemente. Wie der Name schon andeutet, bildet Eisen (91 Prozent) den Hauptbestandteil der Eisenmeteoriten, dazu kommen noch etwa

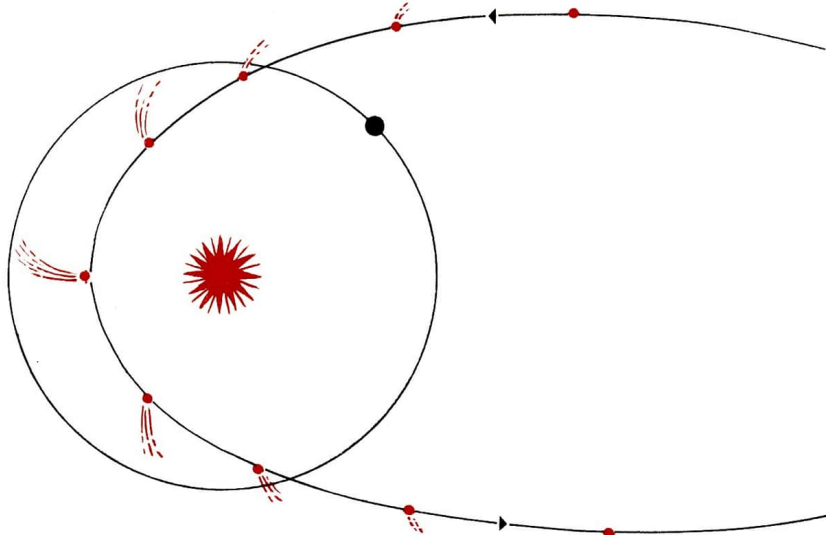
8 Prozent Nickel, 0,6 Prozent Kobalt und ein verschwindender Rest anderer Elemente. Diese Zahlen sind natürlich ebenfalls nur Mittelwerte. Ob die „Glasmeteorite“ oder „Tektite“ wirklich zu den „echten“ Meteoriten gehören, ist zur Zeit noch heftig umstritten. Bisher konnte noch nie das Niederstürzen des umstrittenen dunkelgrünen bis schwärzlichen Minerals zur Erdoberfläche beobachtet oder anderweitig belegt werden. Außerdem fällt es schwer, die gelegentlich aufgefundenen Stücke in den Entstehungsmechanismus der irdischen Mineralien einzuordnen.

Der mengenmäßige Anteil der meteoritischen Materie am Aufbau von Kometenkernen beläuft sich jedoch nur auf etwa 10 Prozent ihrer Masse. Die restlichen 90 Prozent werden von den festen Kondensaten der leicht flüchtigen „Muttermoleküle“ CO_2 (Kohlendioxid), NH_3 (Ammoniak), CH_4 (Methan), N_2 (Stickstoff), C_2N_2 (Dizyan) und H_2O (Wasser) aufgebracht. Nach dem Abdampfen dieser Verbindungen aus dem Kerngebiet veranlaßt die energiereiche Ultraviolettstrahlung der

Schema der Bahnbewegung
und der Schweifentwicklung
eines Kometen

Sonne photochemische Prozesse (Ionisation, Dissoziation, Rekombination). In der Folgezeit wird die Gashölle der Koma zu einem kalten Plasma, in dem sich außer freien Elektronen die verschiedensten molekularen Verbindungen aus den Bestandteilen der Muttermoleküle nachweisen lassen (zum Beispiel CH, NH, C₂, CN, OH⁺, CO⁺). Unter dem Einfluß der Sonnenstrahlung können diese Plasmateilchen in der Koma Geschwindigkeiten zwischen 10 und 30 km/s erreichen. Verfügt der Kometenkern über eine ausreichende Menge verdampfbaren Materials, so kann bei seiner Annäherung an die Sonne (auf etwa 1,5 bis 2 AE und weniger) ein Gasschweif entstehen, der bei sehr großen Kometenerscheinungen eine Länge von über 100 Millionen km zu erreichen vermag. Gewisse Anhaltspunkte über Herkunft und kosmische Stellung der Kometen lassen sich aus ihren

Bahndaten gewinnen. So nimmt man heute ein allgemeines „zirkumsolares“ Kometensystem an, dessen äußere Grenze ungefähr bei 100 000 AE (1,5 Lichtjahre) Entfernung von der Sonne liegen soll. Seine Mitglieder laufen auf sehr langgestreckten elliptischen Bahnen mit allen möglichen Bahnneigungen um die Sonne. Die Anzahl der Kometenkern in diesem übergeordneten System schätzt man auf etwa 100 Milliarden. Darin eingebettet liegt das „zentrale planetarische“ Kometensystem, mit einer äußeren Grenze bei etwa 1000 AE. In ihm werden schon Bahnneigungen bevorzugt, die sich etwas mehr der Hauptebene des Planetensystems anpassen. Eine weitere Einteilung unterscheidet zwischen „langperiodischen“ und „kurzperiodischen“ Kometen des zentralen Systems, deren Übergangsgebiet in etwa 35 AE Entfernung von der Sonne zu suchen ist. Die kurz-



periodischen Kometen haben Bahndaten, die auch bei den Kleinen Planeten beobachtet werden können. Sie passen sich damit am meisten der räumlichen Struktur des Zentralbereiches im Sonnensystem an. Die grundlegende Ursache für diese mit abnehmender Aphelentfernung zunehmende Anpassung der Kometenbahnen liegt offensichtlich in den Gravitationseinflüssen der Großen Planeten. Extreme und daher eindrucksvolle Beispiele für derartige Möglichkeiten bilden die „Kometenfamilien“ der Großplaneten ab Jupiter. Sie sind als Kometengruppen innerhalb des zentralen Systems gekennzeichnet, deren sonnenfernste Bahnpunkte eine auffällige Beziehung zu der Bahn des betreffenden Großplaneten aufweisen. Wie durch tatsächlich beobachtete Beispiele belegt werden konnte, hat der Planet die Mitglieder seiner Kometenfamilie nach und nach, bei genügend nahen Vorübergängen der ursprünglich wesentlich weiter in den Raum hinauslaufenden Kometen, „eingefangen“ und mit den Aphelien um seine eigene Bahn gruppiert.

Sterne und Sternsysteme

Im Vergleich zu den Ausmaßen des zentralen oder gar des zirkumsolaren Kometensystems ist das, was wir als Planetensystem im engeren Sinne bezeichnen, in der Tat nur ein kleiner Bereich von der Gesamteinflußsphäre unserer Sonne. Aber schon jenseits des Pluto werden alle Informationen über unsere engere kosmische Umwelt immer unsicherer, bis sie schließlich in reine Vermutungen übergehen. Erst weit jenseits dieser hypothetischen „Grenzen“ unseres Sonnensystems lassen sich dann wieder körperhafte Gebilde feststellen, deren Beobachtung weitere Aussagen über die Bedingungen im kosmischen Raum erlauben. Allerdings sind diese Himmelskörper dann nicht mehr von planetarer Eigenschaft, sonder selbstleuchtende Fixsterne wie unsere Sonne. Das Licht ist

schon mehr als 4 Jahre unterwegs, ehe es vom allernächsten Fixstern zu uns gelangt. Da ein „Lichtjahr“ etwa der Strecke von 9,5 Billionen km entspricht, beträgt die Entfernung bis zu dieser Nachbarsonne (Proxima Centauri) rund 40 Billionen km. Nun gibt es Tausende und Millionen solcher Fixsterne, deren unterschiedlichen scheinbaren Helligkeiten bis zu einem gewissen Grad als Entfernungsmaß dienen können. Man fand Entfernungen von einigen hundert und tausend, ja von mehreren zehntausend Lichtjahren.

Eine Antwort auf die in diesem Zusammenhang naheliegende Frage, ob auch diese anderen sonnenähnlichen Objekte von Planeten umgeben sind, läßt sich natürlich durch direkte Beobachtungen nicht finden. Aus periodischen Störungen in den Eigenbewegungen einiger näherer Fixsterne haben sich aber auch schon Hinweise auf die mutmaßliche Existenz planetenähnlicher Fixsternbegleiter ergeben. Diesen bisher nur mit dem Rechenstift entdeckten Himmelskörpern kämen allerdings Massen zu, die meist noch die des Jupiter übertreffen. Doch abgesehen von derartig konkreten Feststellungen dürfte es außerordentlich unwahrscheinlich sein, daß unsere Sonne die einzige Vertreterin ihrer Gattung sein sollte, die von Planeten umgeben ist. Man darf vielmehr nach neueren statistischen Untersuchungen mit großer Sicherheit annehmen, daß eine beträchtliche Anzahl Fixsterne Zentralkörper von Planetensystemen sind. In letzter Konsequenz berührt man damit natürlich auch die Frage, ob außerhalb unseres Sonnensystems lebende Materie existiert. Ob die Menschheit aber jemals aus den fernsten kosmischen Bereichen eine Antwort auf ihre Frage erhalten wird, läßt sich vom gegenwärtigen Stand der Erkenntnis nicht entscheiden.

Unsere Sonne ist also Mitglied einer ungeheuer zahlreichen Familie ähnlich gearteter Körper. Doch auch in dieser Welt der Fixsterne wird ein räumliches Ordnungsprinzip erkennbar, dem ein übergeordneter Entstehungs- und Entwicklungsmecha-

Maßstäbe kosmischer Entfernungen

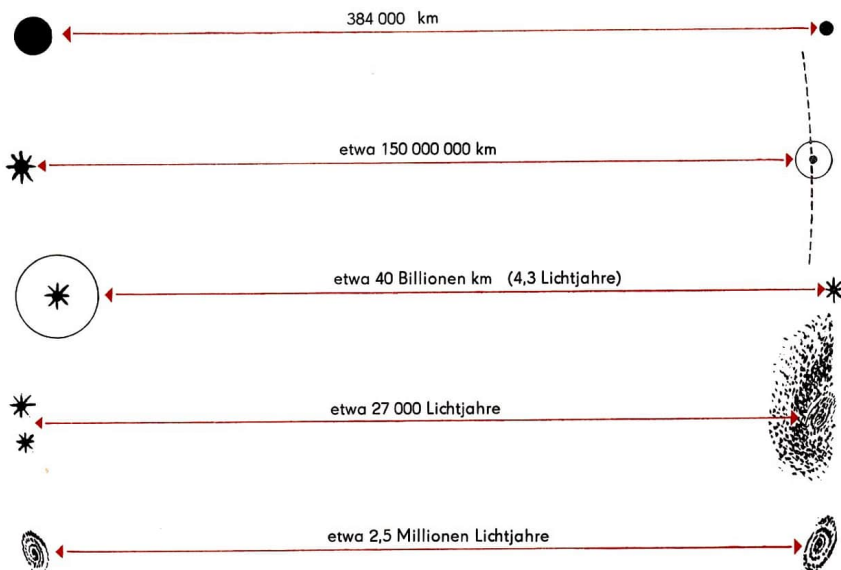
(v. o. n. u.: Erde – Mond;

Erde – Sonne (1 AE);

Sonnensystem – Proxima Centauri;

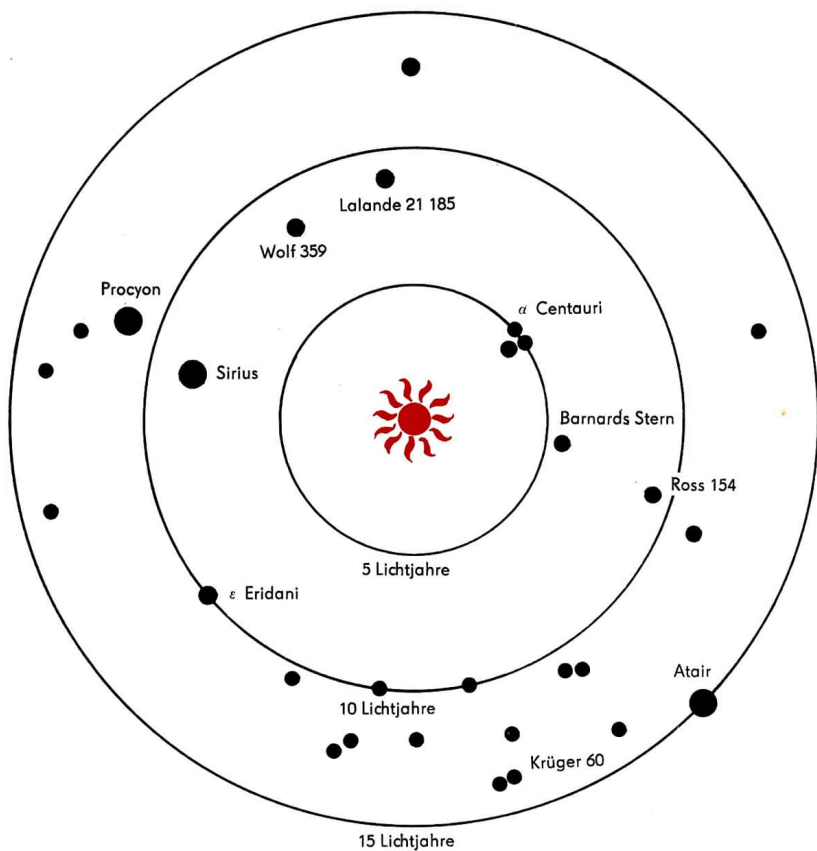
Sonnenumgebung – Milchstraßenzentrum;

Milchstraßensystem – Andromeda-Nebel)



nismus zugrunde liegt. Abgesehen von lokalen Häufungen (Sternhaufen usw.), bilden die etwa 150 Milliarden sonnenähnliche Körper insgesamt ein gewaltiges System, das als „Galaxis“ oder „Milchstraßensystem“ bezeichnet wird. Die äußere Form dieses riesigen Sternsystems ähnelt grobschematisch etwa einer Linse, in deren Zentrum die Verteilungsdichte der Sterne am höchsten ist. Der größte Durchmesser des linsenförmigen Gebildes beträgt rund 90 000 Lichtjahre, seine maximale Dicke etwa 15 000 Lichtjahre. Der Platz unserer Sonne liegt im Randgebiet des Systems, rund 30 000 Lichtjahre vom Zentrum entfernt. Da die gewaltige Sternensinsel rotiert, hat auch unsere Sonne eine „Umlaufzeit“, die ungefähr 200 Mil-

lionen Jahre dauert. Zum Milchstraßensystem gehören außerdem noch große Massen feinverteilter gas- und staubförmiger Materie, die den Raum zwischen Sternen – hauptsächlich in der galaktischen Ebene – ausfüllt („interstellare Materie“). Einzelne wolkenförmige Verdichtungen von mehr oder weniger unregelmäßiger Gestalt können entweder als helle „Gas“- oder „Staubnebel“ oder als „Dunkelwolken“ beobachtet werden. Wie beim Aufbau der Sonne und der ihr ähnlichen Fixsterne bildet der Wasserstoff auch den Hauptbestandteil der gasförmigen interstellaren Materie. Das Milchstraßensystem ist jedoch nicht die einzige Sternenswelt im kosmischen Raum. In den „Spiralnebeln“, von denen allerdings nur der



Schematischer Schnitt
durch unser Milchstraßensystem.
Die großen Kreise
geben die Stellung
der Kugelsternhaufen an



hellste („Andromeda-Nebel“) mit bloßem Auge erkennbar ist, hat man nämlich keine echten Nebel, sondern der Milchstraße ähnliche Sternsysteme vor sich. Die Entfernungen bis zu diesen extragalaktischen Systemen sind für das menschliche Vorstellungsvermögen kaum noch faßbar. So ist der Andromeda-Nebel rund 1,5 Millionen Lichtjahre von unserer eigenen Galaxis entfernt; dennoch ist er einer ihrer unmittelbaren „Nachbarn“ im Weltraum. Für die lichtschwachen, nur noch mit Fernrohren oder langbelichteten Himmelsaufnahmen erfaßbaren extragalaktischen Systeme ergeben sich Entfernungen bis zu mehreren Milliarden Lichtjahren. Die Unterschiede im inneren Aufbau dieser Sternsysteme sind im einzelnen recht groß. Es lassen sich auch hier wieder „Riesen“ und „Zwerge“ unterscheiden, deren Strukturen sowohl absolut unregelmäßig als auch kugelförmig, elliptisch und spiralförmig sein können.

Unser Milchstraßensystem zählt zu den größten Objekten in der Welt der Galaxien, die ausnahmslos der Gruppe der spiralförmigen Sternsysteme angehören. Die Verteilung dieser kosmischen Objekte ist nicht gleichförmig. Man findet vielmehr eine deutliche Tendenz zur Gruppenbildung. Auch unser Milchstraßensystem ist Mitglied einer solchen (in diesem Fall als „Lokale Gruppe“ bezeichneten) Anhäufung von Sternsystemen, die insgesamt wahrscheinlich etwa zwei Dutzend Sternensinseln umschließt. Diese sind jedoch, mit Ausnahme des Andromeda-Nebels, durchweg wesentlich kleiner als unsere eigene Galaxis. Ob allen extragalaktischen Sternsystemen, von denen sich heute mit den größten Instrumenten einige Hundertmillionen bis in Entfernungen von mehreren Milliarden Lichtjahren erfassen lassen, ein noch größeres Ordnungsprinzip („Metagalaxis“) zugrunde liegt, ist gegenwärtig noch nicht zu erkennen.

Andromeda-Nebel,
aufgenommen mit dem
2-m-Universalspiegelteleskop
des Karl-Schwarzschild-Observatoriums
in Tautenburg bei Jena
am 1. September 1961
(Belichtungszeit 45 Minuten)



Von Horizont zu Horizont

Vielleicht mag es so scheinen, als hätten wir uns mit dem Vordringen in immer größere Tiefen des kosmischen Raumes zuletzt doch recht weit über den Rahmen unserer anfänglichen Betrachtungen hinausbegeben. Gewiß, die Fortschritte bei der Erforschung ferner Fixsterne und fernster Sternsysteme werden direkt kaum das Problem der Wettervorhersage lösen oder andere geophysikalische Zusammenhänge aufdecken helfen. Aber in einem sehr weit gespannten Bogen allgemeingültiger, gesetzmäßiger Verknüpfungen und urchlicher Wechselbeziehungen sind letztlich alle Erscheinungen der kosmischen Physik miteinander verbunden. Es sei nur darauf hingewiesen, daß man auf dem „Umweg“ über astrophysikalische Untersuchungen an den Fixsternen durchaus viele Informationen erhalten kann, die der Sonnenphysik sogar unmittelbar nützlich sind. Die große Bedeutung solarer Vorgänge für die geophysikalischen Erscheinungen haben wir wohl hinreichend kennengelernt. Wenn man also die teilweise bis in den Alltag hineinwirkenden kosmischen Einflüsse umfassender verstehen will, dann muß man schon – wie wir es beispielsweise getan haben – den Wegen der Weltraumforschung folgen, angefangen von der Meteorologie über Aeronomie, Geo- und Sonnenphysik bis hin zur Frage nach der Stellung der Erde im kosmischen Raum sowie der Beschaffenheit anderer Planeten und Sonnen.

Unsere Exkursion durch die klassische und moderne Weltraumforschung vermochte allerdings nur einen gedrängten, ausgewählten Überblick zu vermitteln. Viele interessante Probleme konnten lediglich gestreift werden oder wurden, beispielsweise auf dem Gebiet der Stellarastronomie, wegen ihrer besonders großen Weitläufigkeit bewußt ausgeklammert. Ebenso läßt sich nicht übersehen, daß noch längst nicht auf alle der hier berührten Fragen eine abschließende Antwort gegeben werden kann. Sehr vieles ist noch stark im Fluß, und vor allem die stürmischen

Fortschritte bei der Anwendung der Raumflugtechnik zur wissenschaftlichen Erschließung des kosmischen Raumes bringen es mit sich, daß manche der hier mitgeteilten Ergebnisse inzwischen schon wieder eine Korrektur erfahren haben können. Doch gerade darin zeigt sich besonders eindrucksvoll der große Wert des modernsten Hilfsmittels der Weltraumforschung, der Raumflugtechnik. Ihr verdankt die Wissenschaft innerhalb sehr kurzer Zeit umfangreiches, neues Informationsmaterial und nicht wenige überraschende Entdeckungen. Sicher werden Meßsatelliten, Raumsonden, Mond- und Planetenraumschiffe sowie außerirdische Raumstationen noch eine zunehmend größere Rolle in der Weltraumforschung spielen. Allerdings können sie die erdgebundene Forschung niemals voll ersetzen und überflüssig machen. Nur wenn alle hochentwickelten Verfahren in einer weltumspannenden, friedlichen Forschungsarbeit zusammenwirken, können schließlich der Natur Schritt für Schritt deren Geheimnisse entrissen werden.

Das Streben nach immer weiter reichenden Horizonten naturwissenschaftlicher Erkenntnis kann jedoch letztlich nicht Selbstzweck oder gar rein „akademisches Vergnügen“ sein. Die neuen Einblicke in das Naturgeschehen werden nicht nur das materialistische Weltbild festigen und die These von der Erkennbarkeit der Welt bestätigen, sondern auch in ihrer praktischen Anwendung immer umfassendere Möglichkeiten erschließen, die eine Verbesserung des menschlichen Daseins auf der Erde zum Ziel haben. Darin werden schließlich auch die nicht gerade geringen Anwendungen, die die menschliche Gesellschaft für diese Entwicklungen aufbringt, ihre volle materielle Rechtfertigung finden.

Für die schöpferischen Kräfte des menschlichen Geistes wird allerdings der größte Wert dieses Strebens immer in der Auseinandersetzung mit den Barrieren vor dem heute noch Unbekannten zu suchen sein.



Sonnenschein, Gewitter und Taifune . . . 5

Meteorologisches Rätselmosaik	7
Etwas Physik der Erdatmosphäre	9
Eine globale Wärmekraftmaschine	12
Atmosphärische Zirkulationssysteme	13
Luftmassenwirbel	17
Bewölkung und „Rückkopplung“	20
Weltweite Wetterbeobachtung	25
Internationale geophysikalische Forschungen	28

Goldfischeich und Erdatmosphäre . . . 31

Über Lichtbrechungen	32
Das Licht und sein Spektrum	34
Spektralanalyse	37
Atmosphärische Strahlungsfenster	41

Rüstzeug der klassischen Weltraumforschung . . . 45

Vom „Galilei“ zum „Achromaten“	46
Spiegelteleskope an der Spitze	48
Uhren und Zeitmessung	55
Sternhelligkeiten und Himmelsfotografie	58
Etwas über Radioteleskope	60

Unser „Stern“ – die Sonne 65

Kosmische „Elle“ und Sonnensteckbrief	65
Sonnenflecken und Sonnentätigkeit	68
„Kältemaschine“ auf der Sonne	70
Turmteleskop und Sonnenphysik	75
Plasmaphysik – Schlüssel zum Sonneninneren	79
Mond als Helfer der Sonnenforschung	82
Sonnenblitze und Strahlungstürme	85
Die Sonne als Radiostrahler	88
„Atomofen“ Sonne	91

Vorzimmer zum Weltraum 97

Erste Erkundungen im Freiballon	97
Geheimnisvolle Höhenstrahlung	98
Werkzeuge der Strahlungsforschung	100
Vorstoß in die Stratosphäre	102
Höher und höher	107
Ozonsphäre – Spezialfilter der Hochatmosphäre	108
Von der „Zone des Schweigens“ zum „Nachthimmelslicht“	110
Ionosphäre und solar-terrestrische Beziehungen	113
Polarlichter	114
Magnetstürme und Partikelströme	117
Moderne Stratosphärenaufstiege	118
Fernrohre am Ballon	121

Der Schritt über die Schwelle 127

Das Raketenprinzip	127
Bahnmechanik und Bahngeschwindigkeit	129
Grundgleichung der Raketentechnik	132
Etwas Raketentechnik	134
Die entscheidende Idee: das Stufenprinzip	138
Steuerung und Lenkung	139
Der Weg in die Praxis	142
Erste Höhenraketen im Einsatz	144
Raketensonden als Meßgeräteträger	147

Künstliche Erdsatelliten 153

Sputnik-1 – Aufbruch ins Raumfahrt- zeitalter	156
Erste Forschungssatelliten der USA	159
Der Kreis wird größer	162
Satelliten als Spezialisten	164
„Kosmos“-Satelliten – Weg zur Vielseitigkeit	166

Erste Entdeckungen und Erfolge	169
Erdatmosphäre in neuer Sicht	169
Erdfigur und Ionosphäre	173
Überraschung im Kosmos: Strahlungsgürtel	174
„Magnetosphäre“ – ein neuer Begriff	179
Spezialisten für Geo- und Sonnenphysik	184
Wettersatelliten	188
Gewichtige Strahlungsforscher	194

Der Mensch im Kosmos 197

Physiologische Zwangsjacke	197
Die Vorversuche starten	200
Juri Gagarin und German Titow – erste Menschen im Kosmos	204
Projekt „Mercury“	210
Wostok-3 und Wostok-4 im Gruppenflug	213
„Mercury“-Abschluß	215
Erste Kosmonautin: Valentina Tereschkova	217
Woßhoh – der Schritt zum Raumfahrtkollektiv	218
Ein Mensch schwebt frei im Weltraum	221
„Gemini“-Programm löst Redezvousproblem	222
Raumstation – Projekt der nahen Zukunft	227

Der Griff zum Mond 235

Mond als Raumstation	235
Visitenkarte des Mondes	238
Selenographische Fundamente	240
Unwirtliche Mondoberfläche	243
Forschungsaufgaben einer Mondstation	245
Vorstufen der Monderschließung	247
Erste Nahaufnahmen des Mondes	252
Luna-9 landet weich	255
Erste „Drei-Punkt-Landung“ mit „Surveyor“	257
Künstliche Mondtrabanten erweitern das Programm	260

Erste Schlußfolgerungen	263
Projekt „Apollo“	266
Raumfahrtprogramme und Raumflugtechnik – Triebfeder der technischen Revolution	272

Venus und Mars – Nahziele des interplanetaren Raumfluges 273

Raumflugtechnik rückt Planeten näher	273
Keplerellipsen und Hohmannbahnen	276
Triebwerke mit Zukunft	278
Unbemannte Planetensonden als Vorhut	282
Merkur – der sonnennächste Planet	284
Venus – geheimnisvoller Morgen- und Abendstern	285
Rätsel der Venusatmosphäre	286
Radarechos und Venusrotation	289
Planetensonden zur Venus	289
Das Bild von gestern: der „erdähnliche“ Mars	296
Mars-„Kanäle“ und Marsvegetation	300
Erster Vorstoß mit „Mars-1“	301
Sensation durch „Mariner-4“	305
Spekulation um Phobos	308

Zu den Grenzen unseres Sonnensystems und darüber hinaus 309

Jupiter – der Riese unter den Planeten	309
Saturn und sein Ring	310
Herschel entdeckt den Uranus	313
Neptun – der errechnete Planet	313
Außenseiter am Rand unseres Sonnensystems	314
Lückenfüller zwischen Mars und Jupiter	315
Die Welt der Kleinsten	317
Meteoritenschwärme, Kometen und Kometensysteme	319
Sterne und Sternsysteme	322

Von Horizont zu Horizont 327

