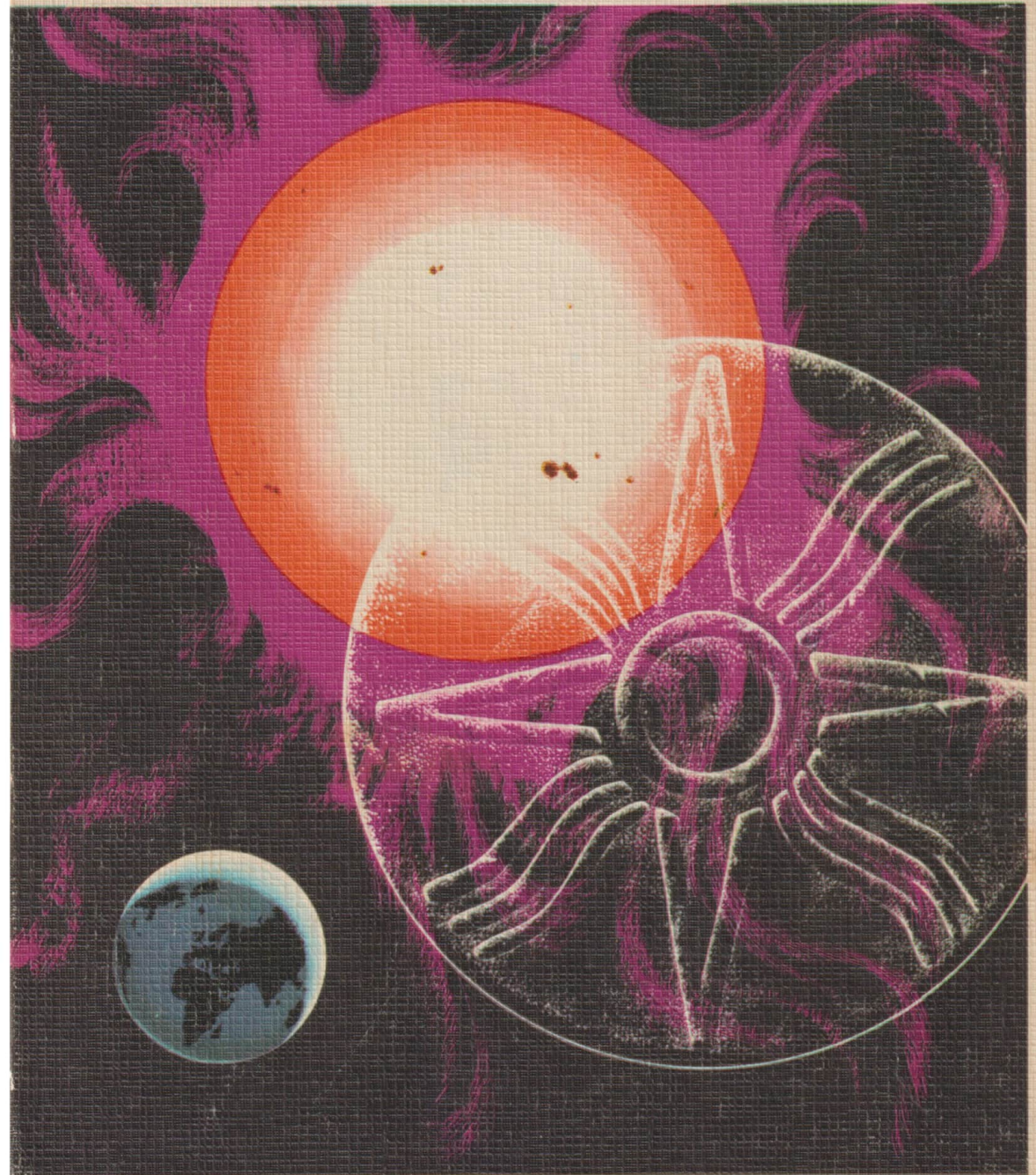


Sonnengott und Sternenfeuer

Heinz Mielke



Heinz Mielke

Verlag
Neues Leben
Berlin

Sonnengott und Sternenfeuer

Zeichnungen von Horst Boche

© Verlag Neues Leben, Berlin 1975

Lizenz Nr. 303 (305/102/75)

LSV 1499

Einband: Horst Boche

Fotos: ADN/ZB-German (1); ADN/ZB-Ihde (1); ADN/ZB-MTI (1); ADN/ZB-Reiche (1); ADN/ZB-Sturm (2); ADN/ZB-TASS (2); ADN/ZB-Thieme (1); Archiv des Verfassers (6); Deutsche Fotothek Dresden (1); Heyden, Berlin (2); Landesmuseum für Vorgeschichte Halle (1); Nowosti (13); Presse der Sowjetunion (1); Reuel, Berlin (1); Sonnenobservatorium Einsteinturm, Potsdam (7); Staatliche Museen zu Berlin/Ägyptisches Museum (1); Staatliche Museen zu Berlin/Antiken-Sammlung (1); Staatlicher Mathematisch-Physikalischer Salon Dresden (1); USIS (2); Zentrales Haus der Deutsch-Sowjetischen Freundschaft – Bildarchiv (1).

Typografie: Gerhard Christian Schulz

Schrift: 11 p Sabon

Lichtsatz: (140) Druckerei Neues Deutschland

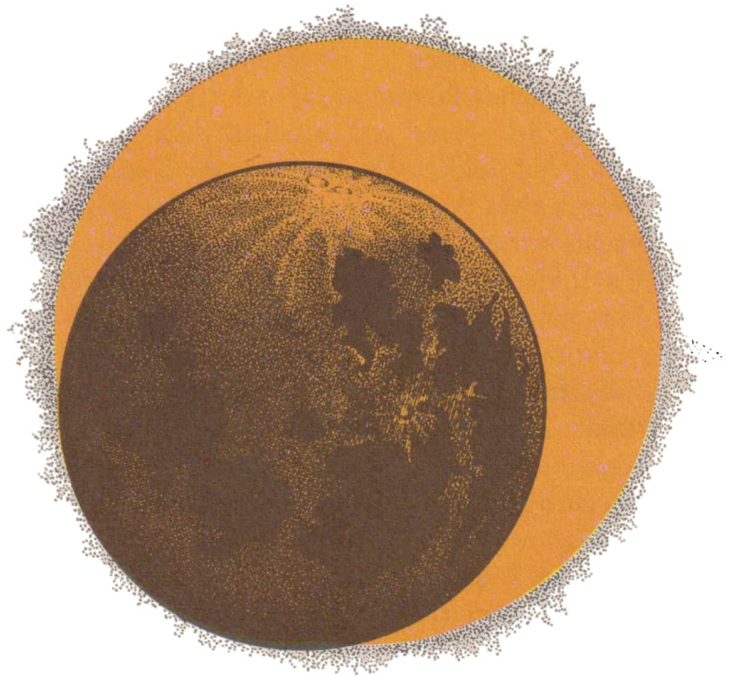
Druck u. buchbinderische Weiterverarbeitung: Karl-Marx-Werk Pößneck V 15/30

Redaktionsschluß: 31. Januar 1975

Bestell-Nr.: 642 036 9

EVP 13,80 ~~Mark~~

„Achtung – in zehn Sekunden
Totalität!“



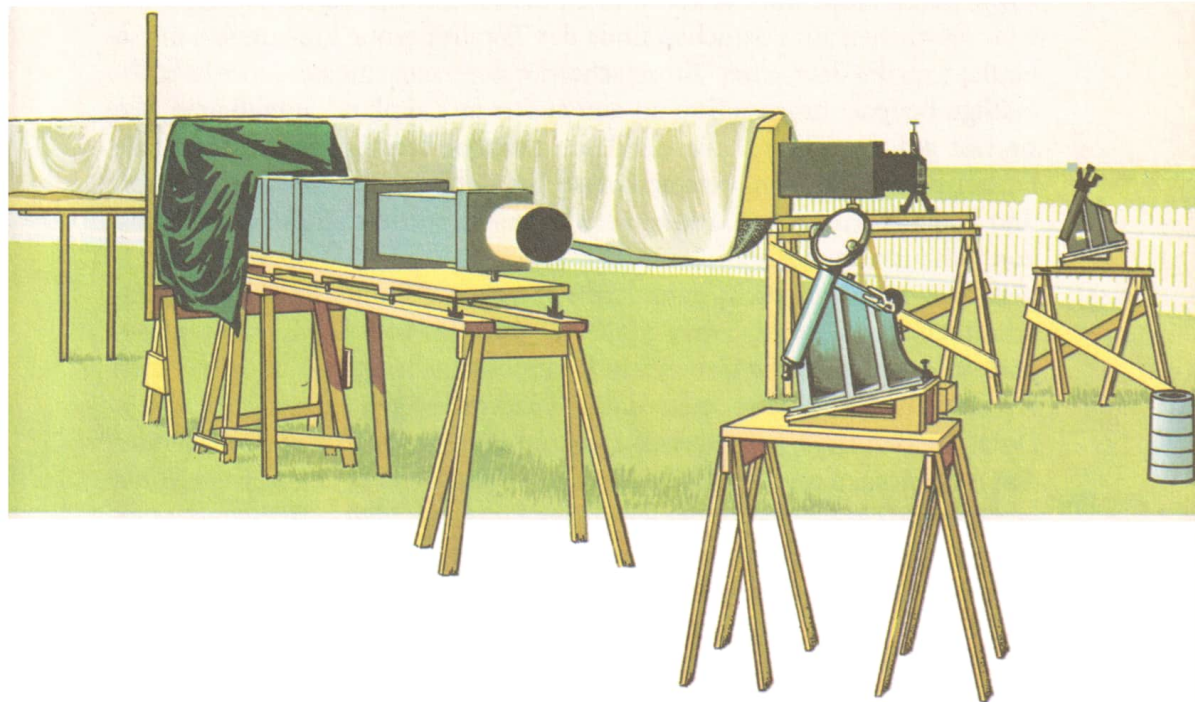
Klarer Himmel wölbte sich über Jokkmokk, einem kleinen Ort im nördlichen Schweden. Es war etwa 6 Uhr. Obwohl nach dem Kalender schon der Sommer Einzug gehalten hatte – man schrieb den 29. Juni 1927 –, gaben sich Witterung und Vegetation noch immer spätfrühlingshaft. Vor knapp drei Wochen erst waren die letzten Spuren des Winters gewichen, und noch Anfang Juni hatten die meisten offenen Brunnen einen mehr oder minder dicken Eisrand gezeigt.

Das alles entsprach durchaus den normalen Klimaverhältnissen im Gebiet der alten Handelsmetropole des Lappenbezirks. Jokkmokk liegt immerhin auf 66,6° nördlicher Breite und damit dicht über dem nördlichen Polarkreis. Der Einzug des Frühlings und der Übergang zum Sommer verlaufen hier am Rande der Arktis viel rascher als in niederen Breiten. Mit der zunehmenden Erwärmung entwickelt sich eine üppig sprießende und blühende Pflanzenwelt, und zugleich bevölkern leider auch alle Jahre wieder Schwärme von Mücken diese weithin sumpfigen Landstriche. Dafür hat Jokkmokk dann um die Sommersonnenwende, vielleicht als freundlichen Ausgleich der Natur, das reizvolle Schauspiel der Mitternachtssonne zu bieten. Die Sonne geht zu dieser Jahreszeit nicht unter, sie streift vielmehr um Mitternacht dicht über den Nordpunkt des Horizonts hin, um danach wieder zu ihrem Tagesbogen am Himmel aufzusteigen.

Trotz der frühen Morgenstunde hatten sich an diesem 29. Juni schon zahlreiche Einwohner am Schulgarten des kleinen sauberen Ortes eingefunden. Es waren Schulferien, und voller Erwartung blickten vor allem die Kinder über den niedrigen weißgestrichenen Holzzaun oder drängten sich um ein außerhalb der Umzäunung behelfsmäßig aufgestelltes kleines astronomisches Fernrohr. Innerhalb des Gartens sah man eine Reihe größerer optischer Instrumente, mit denen sich mehrere Männer beschäftigten. Ein Projektionsschirm hinter dem Okular des kleinen Fernrohrs zeigte das etwa



Kameras mit beweglichen Planspiegeln
(rechts) der Sonnenfinsternisexpedition
in Jokkmokk (1927)

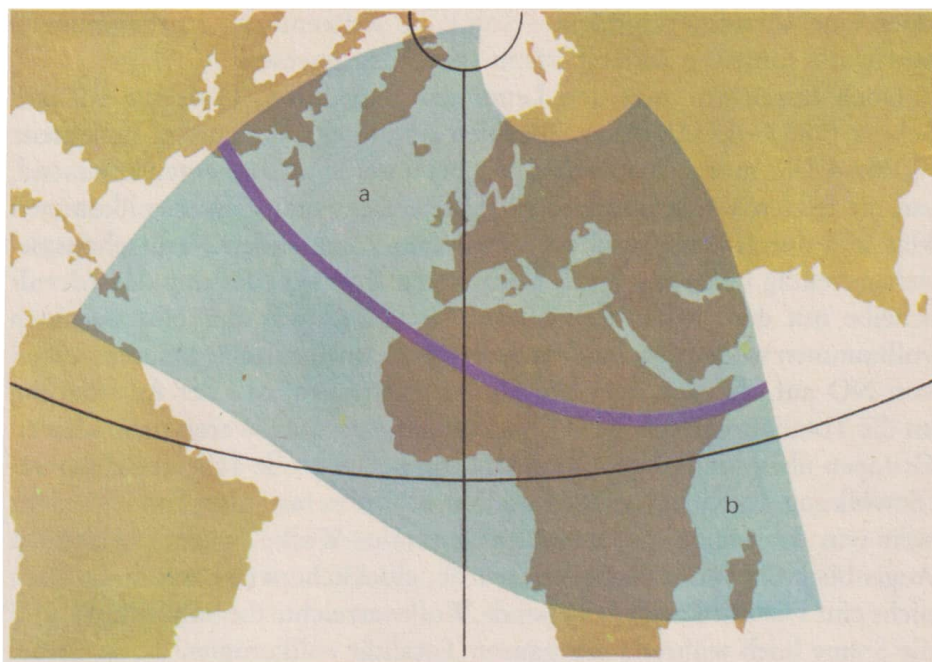


8 cm große Abbild der Sonne. Allerdings war die Sonnenscheibe nicht vollständig zu sehen, sie erschien vielmehr durch einen von Minute zu Minute größer werdenden Dunkelsektor „angeknabbert“. Und diese Erscheinung war der eigentliche Grund für die ungewöhnliche Aktivität in Jokkmokk. Man erwartete nämlich allseits gespannt ein besonderes astronomisches Ereignis. In etwa einer Dreiviertelstunde sollte an diesem Ort für rund 41 Sekunden eine totale Bedeckung der Sonnenscheibe durch den vorbeiziehenden Mond erfolgen. Die Männer an den Instrumenten gehörten zu einer deutschen Sonnenfinsternisexpedition und waren eigens in das entlegene Gebiet gekommen, um diesen seltenen Naturvorgang zu beobachten.

Wie die Vorausberechnungen ergeben hatten, würde die am 29. Juni 1927 stattfindende Sonnenfinsternis nacheinander in einem streifenförmigen Gebiet – der sogenannten Totalitätszone – zu verfolgen sein, das in der Irischen See begann, Nordengland und die Nordsee überquerte, bei Stavanger die norwegische Küste erreichte und schließlich über Skandinavien zum Weißen Meer hin verlief. Die Dauer der Bedeckung der Sonne sowie deren Höhe über dem Horizont bei Eintritt der Verfinsterung sollte vom westlichen zum östlichen Ende der Totalitätszone hin zunehmen. So hatten sich die deutschen Wissenschaftler denn entschlossen, ihre behelfsmäßige Beobachtungsstation an einem Ort in Lappland aufzubauen, wo sie fast auf der Zentrallinie der Totalitätszone lag. Andere ausländische Finsternisexpeditionen, beispielsweise aus der Sowjetunion, aus Holland und Polen, hatten ihre Stationen etwas weiter nordöstlich, in der Gegend von Gällivare, errichtet.

Es war natürlich nicht ganz leicht gewesen, die umfangreiche wissenschaftliche Ausrüstung (etwa 5000 kg) und das sonstige Expeditionsgepäck in das abgelegene Gebiet um Jokkmokk zu bringen. Auf dem letzten Streckenabschnitt hatte man dafür Lastkraftwagen einsetzen müssen. Doch an derartige Beschwerden waren die Finsternisspezialisten unter den Astronomen und Astrophysikern gewöhnt; denn in den meisten Fällen verläuft die Totalitätszone der jeweiligen Finsternis über verkehrstechnisch weniger günstig gelegenen Gebieten der Erdoberfläche. Wie schon bei früheren Unternehmungen – 1905 in Algerien, 1907 in Turkestan, 1923 in Mexiko und 1925 vor der Ostküste von Nordamerika auf einem Dampfer – waren aber auch diesmal alle Vorbereitungen zufriedenstellend und die technischen Zurüstungen mit größter Präzision vonstatten gegangen. Und so stand man nun an den verschiedenen Instrumenten in Erwartung des für die Wissenschaft so interessanten und wichtigen himmlischen Schauspiels.

Den Astronomen oder, genauer gesagt, den Sonnenphysikern ging es in erster Linie darum, von der Gesamterscheinung der Finsternis sowie von bestimmten Einzelheiten möglichst hochwertige fotografische Dokumente zu gewinnen. Zum Gerätepark der Lappland-Expedition zählten daher zwei Großformatkameras (Plattengröße 50 cm × 50 cm) mit langbrennweitiger Linsen- beziehungsweise Spiegeloptik (20 m und 11 m Brennweite), die Aufnahmen der verfinsterten Sonne liefern sollten, sowie Instrumente mit kürzeren Brennweiten für Spezialzwecke. All diese optischen



Verlauf der Totalitätszone (lila) während der Sonnenfinsternis am 20. Oktober 1959

a = nördlicher Bereich der partiellen Verfinsterung; b = südlicher Bereich

Geräte waren hier, entgegen den sonstigen astronomischen Gegebenheiten, horizontal fest aufgestellt, da man für die besonderen Finsternisaufnahmen die etwas aufwendigere Technik der normal montierten astronomischen Fernrohre nicht benötigte. Über bewegliche und von Uhrwerken angetriebene Planspiegelkombinationen wurde das Sonnenlicht in die Kameraoptiken geleitet.

Das sorgfältige Aufstellen der Instrumente unter Verwendung provisorischer, aber standfester Holzkonstruktionen hatte zusammen mit dem Überprüfen der Funktionsfähigkeit aller Systeme einige Tage in Anspruch genommen. Danach waren noch verschiedene „Trockenübungen“ an den Geräten durchgeführt worden, um die Bedienungsmannschaften mit der Abfolge der einzelnen Handhabungen vertraut zu machen. Zum Zeitpunkt der Finsternis mußte alles mit äußerster Exaktheit vor sich gehen; denn für die fotografischen Arbeiten standen nach Eintritt der Totalität schließlich nur etwa 25 Sekunden zur Verfügung. Ein einziger falscher Handgriff

oder eine Unaufmerksamkeit – und die aufwendigen Vorbereitungen sowie alle sonstigen Mühen wären vergebens gewesen.

Doch lassen wir nun den Leiter der Expedition, Professor Richard Schorr (1867–1951), selbst über den Ablauf des Ereignisses berichten:

„Von 4 Uhr morgens ab waren wir bei unseren Instrumenten anwesend, um die letzten Vorbereitungen zu treffen. Der Himmel war vollkommen klar und durchsichtig, und wir sahen dem kommenden Naturschauspiel daher freudig entgegen. Auch beim ersten Kontakt (der dunklen Mondscheibe mit dem hellen Sonnenrand – H.M.) war der Himmel noch vollkommen wolkenlos; bald nachher aber kamen einzelne Haufenwolken von NO auf, die sich über den Himmel verteilten. Mit der Annäherung an die Totalität wurden die Wolken zahlreicher, doch waren sie in kleinen Gruppen über den Himmel zerstreut und ließen große Teile desselben frei (Bewölkung 3). Kurz vor der Totalität schien es fast, als wenn eine nicht weit von der Sonne stehende Stratokumulus-Wolke im entscheidenden Augenblick die Sonne verdecken würde; glücklicherweise trat dies jedoch nicht ein: Die nur langsam ziehende Wolke erreichte die Sonne nicht, und die Sonne blieb während der ganzen Totalität vollkommen wolkenfrei.

Der Beginn der Totalität rückte immer näher. Jeder der Beobachter stand in gespannter Erwartung auf seinem Posten und wartete auf das verabredete Signal, bei dem er seine Aufnahmen beginnen sollte. Das Tageslicht nahm schnell ab, und die in der Umgebung des Schulplatzes versammelte Menge verharrte in andachtsvollem Schweigen. Wir verfolgten an einem projizierten Sonnenbild das Abnehmen der Sonnensichel. Als dieselbe ganz schmal geworden war, trat das als ‚Perlschnur‘ bekannte Phänomen ein: Infolge der Unebenheiten des Mondrandes zerfiel die Sichel in mehrere Stücke. In diesem Augenblick wurde für den Beobachter an der Prismenkamera das Signal zum Beginn der Flash*-Aufnahmen gegeben. Wenige Sekunden später verschwand auch die letzte Spur des Sonnenlichts, und jetzt begannen nach dem verabredeten Signal die Aufnahmen an den einzelnen Instrumenten. 25 Sekunden nach Beginn der Totalität erfolgte ein zweites Signal zur Beendigung der Aufnahmen. Wir wollten die Aufnahmen nicht länger fortsetzen: Einerseits wurde dadurch die Sicherheit gegeben, daß bei einer etwa kürzeren Dauer der Totalität das wiederkehrende Sonnenlicht die Aufnahmen nicht verderben würde, und andererseits

* Vgl. hierzu S. 123

hatten hierdurch alle Beobachter während der letzten Sekunden der Totalität die Möglichkeit, das herrliche Schauspiel auch unmittelbar zu betrachten.

Der Eindruck war überwältigend: Die tiefschwarze Mondscheibe, das matt leuchtende Strahlengebilde der Korona, die roten Protuberanzen, dazu die bleigraue Färbung des Himmels und die allgemeine Dunkelheit und Stille in der Natur ergaben zusammen ein Bild von unbeschreiblicher Schönheit. Besonders auffallend waren bei dieser Finsternis die zahlreich vorhandenen Protuberanzen; auch die Helligkeit der Korona war gegenüber früheren Finsternissen erheblich größer, wenn auch die weit ausschließenden Strahlen nicht eine solche Länge wie bei den Finsternissen von 1923 und 1925 erreichten.

Nur wenige Sekunden konnten wir das herrliche Bild in uns aufnehmen: 41 Sekunden nach Beginn der Totalität blitzte das erste Sonnenlicht am westlichen Mondrand wieder auf und überflutete unmittelbar darauf die ganze Landschaft mit seinen Strahlen.

Dieser Moment des wiederkehrenden Sonnenlichtes machte auf die große Menge geradezu einen befreienden Eindruck und veranlaßte sie, die bis dahin in starrem Schweigen verharrt hatte, zu lauten Freudenausbrüchen. Auch wir Expeditionsteilnehmer waren in höchstem Maß erfreut, daß das Glück uns so günstig gewesen war und daß wir unser Beobachtungsprogramm gut hatten durchführen können.“*

Soweit die knappe und sachliche Schilderung eines Wissenschaftlers, die aber doch einiges von dem ungewöhnlich starken Eindruck ahnen läßt, den eine totale Sonnenfinsternis als Naturerlebnis macht. Nicht einmal der bei dieser Gelegenheit zu konzentrierter nüchterner Arbeit gezwungene Forscher kann sich dem ganz entziehen. Ja, es ist sogar mehr als einmal vorgekommen, daß Wissenschaftler, die zum erstenmal eine totale Verfinsterung der Sonne miterlebten, ernsthafte Schnitzer beim Bedienen ihrer Instrumente machten, weil ein einziger Blick zum Himmel im Augenblick der Totalität sie so in Bann schlug, daß ihr Arbeitsprogramm aus dem Tritt geriet.

Heute, im Zeitalter der Strahlflugzeuge und Raumflugkörper, setzt man modernste technische Mittel für die Beobachtung von Sonnenfinsternissen

* Prof. Dr. R. Schorr, Die astronomischen Forschungsaufgaben bei totalen Sonnenfinsternissen und die Hamburgische Sonnenfinsternis-Expedition nach Lappland im Juni 1927, in: „Deutsche Forschung“, Heft 12/1930, S. 51 ff.

ein. Von schnellen und hoch fliegenden Strahlflugzeugen werden die Wissenschaftler und ihre Instrumente in dem über die Erdoberfläche dahinjagenden Mondschaten auf der Mittellinie der Totalitätszone „mitgeführt“, um die Beobachtungsdauer künstlich zu „strecken“. Doch selbst bei so perfektionierten technischen Verfahren verliert die Finsternisercheinung nichts von ihrem Zauber. Das Ganze ist sogar fast noch erregender; denn das vielleicht etliche zehn Minuten andauernde Dahinjagen im Mondschaten unter beinahe „astronautisch“ anmutenden Höhenflugbedingungen ermöglicht einen entsprechend langen und damit in allen Einzelheiten viel tieferen Eindruck des Finsternisbildes.

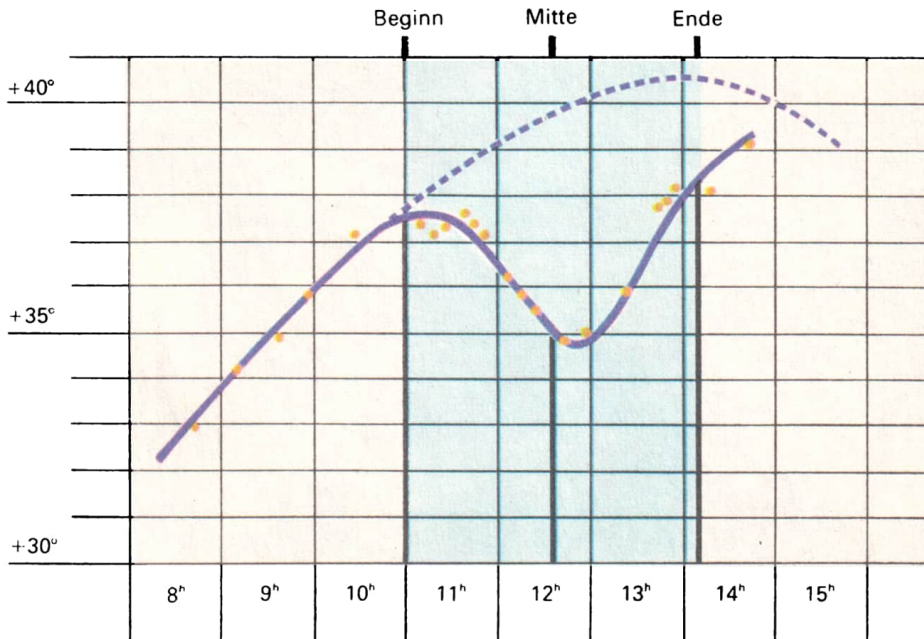
Am besten hat es natürlich ein Betrachter, der frei von strengen Aufgaben ist und sich ganz dem Genuß einer solchen Erscheinung hinzugeben vermag. Wie außerordentlich bewegend dann das Erlebnis einer totalen Sonnenfinsternis gerade für einen sachkundigen Beobachter sein kann, schildert uns Edgar Mädlow, ein Teilnehmer der Finsternisexpedition, die 1954 von Amateurastronomen nach Südschweden unternommen wurde:

„Es ist soweit. Die Brillen werden heruntergerissen. Es ist Nacht geworden. Nein – doch nicht ganz dunkle Nacht; eine eigenartig fahle graue Dämmerung liegt über See und Strand und Klippen. Ein plötzlicher Windstoß bringt Kleider und Segeltücher zum Flattern und läßt die Wellen für Augenblicke etwas heftiger an den steinigen Strand schlagen.

Eine merkwürdige Farbe hat der Himmel jetzt. Ganz tief-, beinahe stahlblau leuchtet er über uns, gelb und orangefarben rings am Horizont. Weiß, fast perlmutterfarben irisieren die Wolkenfasern und die gekrümmten Kondensstreifen, die die Bahnen unsichtbarer Flugzeuge markieren. Hell leuchtet die Venus auf, rechts darunter der Stern Prokyon, und ganz tief über dem Horizont funkelt der Sirius.

Inmitten einer großen, völlig klaren Wolkenlücke aber steht die verfinsterte Sonne!

Es ist ein märchenhafter Anblick: Zwar ist die strahlende Sonnenscheibe völlig hinter der Silhouette des Mondes verschwunden; aber dieser selbst ist gar nicht dunkel! Das Streulicht, das die Atmosphäre noch erfüllt, hellt auch den Mond ganz matt auf; wie eine klare, blau durchleuchtete Glaskugel sieht er aus, heller am Rande und etwas schwärzer zur Mitte hin. Auch die Korona, die ihn wie ein Heiligenschein umgibt, erstrahlt in einem magischen Licht, wie ein Gespinnst von Glasfäden, das von einem blauen Schein durchflutet wird.



Temperaturverlauf während der totalen Sonnenfinsternis am 20. Oktober 1959; gestrichelt der wahrscheinliche Temperaturverlauf ohne Finsternis

Im Fernrohr sind auch die Protuberanzen zu sehen: Leuchtend rot, etwas ins Orange spielend, heben sie sich von dem weißblau durchstrahlten Hintergrund der inneren Korona ab – ein Farbenspiel von hinreißender Pracht, wie kein Künstler es schöner hätte zusammenstellen können.

Uns fröstelt. Ist es die fehlende Sonnenwärme, oder ist es die Erregung, die uns gepackt hat? (Erst später erfahren wir, daß die Temperatur in diesen Augenblicken um 20° zurückgegangen ist.) Und doch ist es kein Gefühl des Unbehagens, das uns gefangenhält.

Das unterscheidet uns Astronomen vielleicht von unbefangenen Beobachtern: Uns erfüllt keine Furcht; nichts Unheimliches hat dieser Vorgang für uns. Es ist vielmehr ein unbeschreibliches Gefühl des Glückes und der Dankbarkeit darüber, daß es uns vergönnt ist, dieses über alle Maßen herrliche Schauspiel zu erleben. Wir möchten laut jubeln, mitten hinein in die feierliche Stille der Finsternis; und wenn wir uns noch etwas



Beschwörungszeremonie während einer Sonnenfinsternis im alten Peru

wünschen, so nur, daß dieser Augenblick nie zu Ende gehen möge, damit wir schauen und immer nur schauen können!“*

Nach alldem kann es uns nicht verwundern, daß totale Sonnenfinsternisse in früheren Zeiten, als die Menschen von den natürlichen Zusammenhängen und dem gesetzmäßigen Ablauf eines solchen Vorgangs überhaupt nichts wußten, einen noch viel stärkeren Eindruck auf die Gemüter der Betroffenen machten. Und das um so mehr, als die ganze belebte Natur unmittelbar und sehr deutlich auf die Finsternis reagiert: So ist zu beobachten, wie die Vögel zu ihren Bruthöhlen und Nestern fliegen, wie frei lebende Tiere ihre Nachtverstecke aufsuchen und wie blühende Pflanzen ihre Blütenkelche schließen. Weidende Rinder und Schafe zeigen oft schon vor Eintritt der Finsternis eine zunehmende Unruhe, und manche Hunde stimmen ein scheinbar unbegründetes Geheul an. Eine häufige Begleiterscheinung

* Zitiert nach: Hartmut Bastian, *Geheimnisvolles Weltall*, Gebrüder Weiß Verlag, Berlin – München o. J., S. 160 f.

nung der beginnenden Totalität ist der „Finsterniswind“, eine deutlich verstärkte Luftbewegung, die wegen des eigentümlichen Zwielihts kühl wirkt und erschauern läßt, was natürlich emotionelle Spannungen steigert. Manche Beobachter berichten von „fliegenden Schatten“, die bei Eintritt der Totalität über die Landschaft huschen. Wahrscheinlich spielen bei dieser Erscheinung die Beugung des Sonnenlichts am Mondrand und die Luftunruhe in der Erdatmosphäre die Hauptrolle.

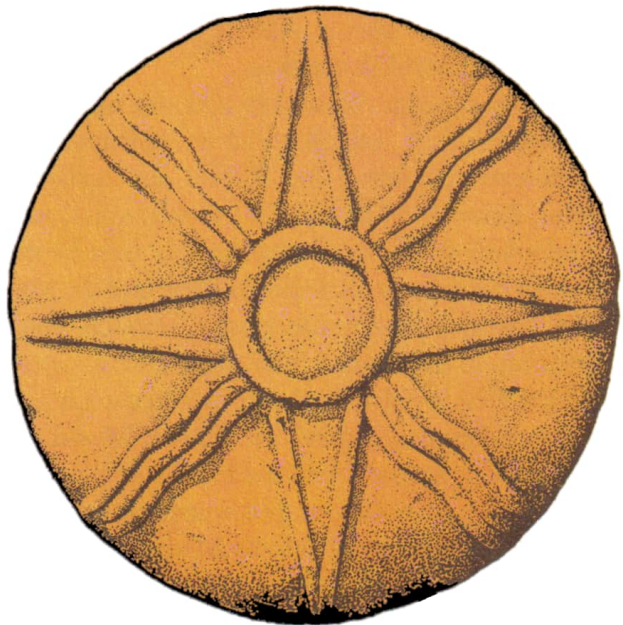
Von Finsternisängsten und -beschwörungen wissen bis in die Neuzeit hinein Forschungsreisende zu erzählen, die in Südamerika, auf den Südseeinseln oder anderswo abgeschieden lebende primitive Völker – meist zufällig – im Augenblick einer totalen Verfinsterung der Sonne beobachten konnten.

Doch selbst im „aufgeklärten“ Europa war man noch von einem unheilvollen Einfluß der Sonnenfinsternisse auf irdische Dinge überzeugt. So wird berichtet, daß im 18. Jahrhundert ein Arzt in England die Brunnen zudecken ließ, um das Wasser nicht den „giftigen Nebeln“ auszusetzen, die nach seiner Ansicht im Gefolge einer Finsternis auftraten. Derartige absurde Vorstellungen von den Wechselwirkungen astronomischer Erscheinungen und irdischer Vorgänge waren übrigens auch später durchaus keine Seltenheit.

Der Bewohner der heutigen zivilisierten Welt hat da gut lächeln; denn er kann kaum von dem Eintritt eines astronomischen Ereignisses oder von den mit seinem Ablauf verbundenen Erscheinungen überrascht werden. Abgesehen von den schulischen und außerschulischen Bildungseinrichtungen, die ihm ein sicheres Wissen um die natürlichen Zusammenhänge ermöglichen, sorgen die modernen Kommunikationsmittel schon dafür, daß er rechtzeitig auf das aktuelle Geschehen hingewiesen wird.

Für die Menschen der Urgesellschaft und der Sklavenhalterordnung aber bestimmten Götter und gottähnliche Wesen das Geschehen auf der Erde, und der Himmel mit seinen geheimnisvollen Erscheinungen war das große Welttheater, wo sich diese Mächte den Sterblichen offenbarten. Daß dabei die Sonne, die Spenderin von Licht und Wärme, die höchste Stellung einnahm, ist leicht zu verstehen. Nichts konnte darum mehr Furcht erregen als ein vermeintlicher Angriff dunkler Gewalten auf diesen Quell allen Lebens.

Als der Drache der Finsternis
den Gott des Lichts verschlang



Eine uralte Sage der nordamerikanischen Navaho-Indianer erzählt über die Entstehung der Sonne, des Mondes und des Sternenhimmels:

Die Menschen hatten lange Zeit in einer großen abgeschlossenen Höhle im Innern der Erde gelebt. Eines Tages bemerkten sie, daß es hohl klang, wenn man gegen die Decke des Gewölbes stieß. Ein riesiger Moskito bohrte mit seinem Stachel ein Loch in die Decke und kletterte gleich als erster Kundschafter hinaus. Draußen fand er sich auf der Spitze eines hohen Berges, der von einem weiten, tiefen Wasser umgeben war. Nach seiner Rückkehr in die Höhle beschrieb der Moskito den Menschen, was er in der oberen Welt erlebt hatte. So waren vier wunderschöne weiße Schwäne vor ihm auf dem großen Wasser geschwommen. Nachdem sie ihn als „von ihrer Art“ anerkannt hatten, gruben sie schnell vier breite Kanäle, durch die das Wasser abfloß. Auf diese Weise und mit Hilfe des Windes wurde die Erde allmählich trocken.

Der vorwitzige Waschbär war der nächste, der sich nach oben begab. Er hopste dort jedoch gleich so tolpatschig herum, daß er tief in den schwarzen Schlamm am Rande des zurückweichenden Wassers geriet. Seine Beine färbten sich dadurch dunkel, was seinen Nachkommen als Andenken an dieses Abenteuer bis zum heutigen Tage verblieb. Endlich kamen dann auch die anderen Tiere und die Menschen aus der Erde hervor. Die Navaho waren die ersten, danach erschienen die übrigen Indianerstämme und zum Schluß die Bleichgesichter.

Die Welt auf der Erde war anfangs noch sehr klein. Vor allem aber gab es noch keinen Himmel mit Sonne, Mond und Sternen, so daß es recht finster war, genau wie in der Höhle im Innern der Erde. Diesem Übelstand wollte man abhelfen, und so wurde eine große Ratsversammlung einberufen, auf der ein alter weiser Mediziner eine bedeutsame Rede hielt. Unter anderem sagte er:

„Hört, meine Brüder, wir sind jetzt ebenso übel dran wie früher, da wir in unserer großen Höhle wohnten; es ist hier geradeso dunkel wie unten; wir stoßen uns hier ebenso leicht die Augen aus wie unten, zerquetschen uns die Nasen oder stoßen sie uns schief und treten uns die Zehen geradeso leicht ab wie früher. Das einzige, was uns retten kann, ist, daß wir eine Sonne für den Tag und einen Mond mit vielen Sternen für die Nacht bauen, damit wir zu jeder Zeit ordentlich sehen können und imstande sind, uns ausreichend mit Lebensmitteln zu versorgen.“

Diese Idee fand allgemeinen Beifall. Die Menschen trafen auch gleich die notwendigen Vorkehrungen, um sie zu verwirklichen. Sie bauten ein großes Haus und schleppten allerlei Dinge – vor allem „Medizinen“ – hinein. Dann machten sich die Alten der Navaho daran, aus diesem Material die Sonne zu fabrizieren, während andere Stämme die Herstellung des Himmels, des Mondes, der Sterne und der Milchstraße in Angriff nahmen. Alle gingen mit großem Eifer ans Werk.

Nachdem der Himmel vollendet war, begannen die Medizinmänner ihn mit allerlei schönen Sternbildern zu schmücken. Doch plötzlich kam ein alter Präriewolf dahergelaufen, warf den noch übrigen Sternenvorrat in wildem Durcheinander an den Himmel und verspottete die Leute oben-drein, weil sie mit den lumpigen Himmelslichtern so viel Zeit vergeudet hätten.

Inzwischen hatten die Navaho aber auch die Sonne fertiggestellt, und man befahl zwei langen, spindeldürren Gestalten, die als komische Käuze bekannt waren, die Sonne auf ihre Schultern zu nehmen und am Himmel zu befestigen. Wie sich jedoch bald zeigte, war es ein unverzeihlicher Fehler der Medizinmänner, ausgerechnet diesen Schafsköpfen eine dermaßen wichtige Arbeit anzuvertrauen. Die beiden waren nämlich so unachtsam, die Sonne viel zu dicht an die Erde heranzusetzen. Dadurch wäre diese um ein Haar verbrannt, wenn nicht gleich alle Leute aus ihren Pfeifen große Rauchwolken gegen die Sonne geblasen hätten. Insgesamt viermal mußte die Sonne noch fortgerückt werden, damit die nun allmählich wachsende Erde nicht in Gefahr geriet, vernichtet zu werden.

Soweit die reizvolle Geschichte der Navaho. Sie soll hier als ein Beispiel für viele mythologische Überlieferungen stehen, in denen die Naturvölker aller Zeiten ihre Anschauungen über die Entstehung der Welt ausdrückten.

Dämonen beherrschen das Himmelsgeschehen

Ausgangspunkt der urgeschichtlichen Weltvorstellungen, die auch die ersten Versuche einschlossen, die Existenz und vor allem die Bedeutung der Erscheinungen des Himmels zu erklären, waren die täglichen Erfahrungen des Menschen mit den Dingen seiner Umwelt, mit der Natur und den meist feindlichen Naturkräften. All die unverständlichen Vorgänge – der Wechsel von Tag und Nacht, das unvermittelte Auftreten von Blitz, Feuer, Erderschütterungen und Hochfluten, ja das ganze Werden und Vergehen in der belebten Natur – brachten ihn zwangsläufig in den Bann der Vorstellung vom Wirken geheimnisvoller überirdischer Kräfte. Diese dunklen Mächte verkörperten ihm Dämonen und ähnliche Naturgeister, denen er menschlichen Willen und menschliche Triebe zuschrieb. Und nur mit dem Beistand anderer, ihm freundlich gesinnter Dämonen und der Kunst der Zauberer glaubte er den tückischen Gewalten begegnen zu können.

Unter solchen Bedingungen war das Denken und Trachten des Menschen anfangs fast ausschließlich mit der Erde, auf der er lebte, verhaftet. Für ihn war sie, die Erde, die Urmutter alles Existierenden, und folglich hausten auch die geheimnisvollen dunklen Mächte, die ihn bedrängten und sein Schicksal bestimmten, tief in ihrem Innern. Eine Beziehung zu den Erscheinungen des Himmels herzustellen bereitete ihm daher noch mehr Schwierigkeiten als sein sonstiges Bemühen um ein Verstehen der Umwelt. Auf dem niedrigen Entwicklungsstand der menschlichen Gesellschaft konnten die Versuche, Sonne, Mond und Sterne, Finsternisse und Kometen ebenfalls vorstellungsmäßig zu erfassen, nichts anderes ergeben als einen Bestandteil des allgemeinen naiven, unkritischen Weltbildes.

Für den Menschen der Urgesellschaft war die Welt sehr klein und eng, und die Gestirne betrachtete er keinesfalls als räumliche große Gebilde. Auch in der Sklavenhaltergesellschaft finden wir noch sehr naive Ansichten über die Beschaffenheit des Himmelsgewölbes, besonders natürlich über seine Höhe. Beispielsweise sahen die Ägypter den Himmel als eine große Kuh, deren Beine auf der Erde stehen, oder auch als gebücktes Weib, das sich mit Händen und Füßen auf die Erde stützt. Nach älteren Auffassungen waren Erde und Himmel ursprünglich fest aneinandergedrückt, und erst götterähnliche Wesen haben sie getrennt.

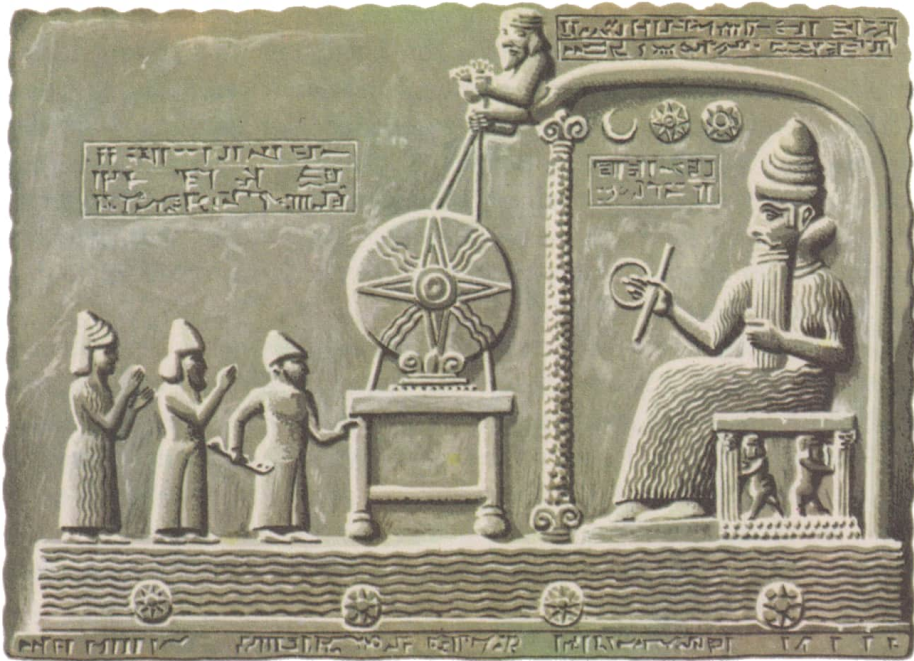
Die Körperhaftigkeit der Gestirne wurde zunächst ebenfalls nur aus der

Umwelterfahrung heraus gedeutet. Sonne, Mond und Sterne waren meist einfach Tiere oder wurden zumindest von Tieren über den Himmel gezogen. Der erfundene Zusammenhang zwischen Himmelserscheinungen und Tiergestalten beeinflusste sogar die Vorstellungen von der Entstehung der Gestirne und Sternbilder. Die Bakairi in Zentralbrasilien glaubten zum Beispiel, die Sonne sei von einem himmelhoch fliegenden Königsgeier gebracht worden und ein böser Zauberer verwandele sich in einen blauschwarzen Vogel, der mit seinen Flügeln die Sonne verdeckt, so daß eine Sonnenfinsternis eintritt.

Die Menschen vermochten anfangs noch nicht einmal zu der Erkenntnis zu gelangen, daß Sonne, Mond und Sterne im Wechsel von Tag und Nacht doch immer die gleichen, also wiederkehrende Objekte sind. Sogar für die Ägypter wurde die Sonne noch jeden Morgen durch die Himmelskuh oder die Himmelsgöttin neu geboren. Am Abend versank sie dann hinter dem Rand der Welt und überließ den unwissenden Menschen dem Grauen der Finsternis, bis am Beginn des nächsten Tages eine neue Sonne erschien. Für jene alten Völker, welche am Meer wohnten, verschwand die Sonne augenscheinlich in den Tiefen des Wassers, und so nimmt es nicht wunder, daß beispielsweise die Iberer am Atlantischen Ozean mit eigenen Ohren zu hören glaubten, wie sie gleich einem glühenden Eisen zischend in den Fluten versank. Bemerkenswert ist dabei, daß die Morgen- und die Abenddämmerung noch nicht mit der Sonne selbst, mit dem von ihr ausgehenden Licht in Verbindung gebracht wurden.

Nach einer ziemlich weit verbreiteten Ansicht galt die Sonne nur als Licht- und nicht auch als Wärmespenderin. Man glaubte nach altamerikanischen Vorstellungen vielmehr, die Wärme käme allein von den Winden. Die Sage wollte sogar wissen, daß auf der Erde einst ewiger Winter herrschte, und erst nachdem Tiere einen Durchbruch im Himmelsgewölbe geschaffen hatten, drangen die warmen Winde aus dem jenseitigen Himmelslande ein und schufen so den Sommer.

Im Zusammenhang mit der allgemeinen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Entwicklung vollzog sich auch ein gewisser Wandel in den Ansichten über den Himmel und die Gestirne. Die Priester in den ältesten Sklavenhalterstaaten beobachteten aufmerksam und beständig die Himmelserscheinungen und erkannten in ihnen allmählich immer klarer sich regelmäßig wiederholende Abläufe. Das war zweifellos ein auffälliger Gegensatz zu dem launischen Treiben der von Dämonen und anderen



Altbabylonisches Relief mit dem Sonnengott Schamasch

Naturgeistern beherrschten Geschehnisse auf der Erde: So dürfen wir wohl annehmen, daß zu einem großen Teil gerade die eindeutige Regelmäßigkeit in der Wiederholung der Vorgänge am Himmel – Tag-Nacht-Rhythmus, Mondphasen, Sonnen-, Mond- und Planetenlauf – dazu veranlaßte, die betreffenden Objekte einer besonderen Kategorie höherer Gewalten, den Göttern, zuzuordnen. In diesen einer strengeren Ordnung unterliegenden Göttergestalten sah man die Widerparte der finsternen Dämonen. Von den Göttern erhoffte und erflehte man mit der Priester Hilfe Schutz vor allen Einflüssen düsterer Mächte und den vielfältigen Feindseligkeiten des Lebens.

Demnach können wir leicht ermessen, wie tief es die Menschen in ferner Vergangenheit bewegen mußte, wenn die Sonne oder der Mond, Abbilder jener lichten Göttergestalten, bei einer Finsternis dem Angriff wilder Ungeheuer zu erliegen drohten, die man meist als Tiere, wie Wolf oder Drachen, oder als mörderische Riesen sah. Ebenso, wie sehr sie bemüht

sein mußten, diesen Kampf der überirdischen Mächte mit Geschrei und Getöse und mit inbrünstigen Gebeten zugunsten der Götter zu unterstützen. Der Drache der Finsternis durfte ja um keinen Preis den Gott des Lichts verschlingen, wenn nicht das Ende der Welt kommen sollte.

Obwohl nun die Priester ihr Wissen um die Regelmäßigkeiten himmlischer Abläufe oder „Zeichen“ ständig zu erweitern vermochten, waren sie weder fähig noch gewillt, es im Sinne echter Naturerkenntnis anzuwenden. Für sie ergab sich daraus vor allem die Befähigung zur Vorhersage komkommender Erscheinungen, was gegenüber der breiten Gemeinde der Nichtwissenden ihre gesellschaftliche Stellung stärkte und ihre damit verbundenen Machtansprüche rechtfertigte. In späterer Zeit wurden die Ansichten über Sonne, Mond und Sterne geradezu ein Angelpunkt in der Auseinandersetzung zwischen idealistischer und materialistischer Weltanschauung. Übrigens blieb von den unwissenschaftlichen Vorstellungen und Phantasien in breiten Volksschichten sehr viel erhalten – ein Tatbestand, der sich nicht nur für die Antike oder das Mittelalter nachweisen läßt, sondern für den es sogar in den hochentwickelten Ländern der Gegenwart zahlreiche Beispiele gibt. So sprechen wir immer noch von einem „Neumond“, obwohl jeder weiß, daß der Mond keinesfalls jedesmal neu geschaffen oder geboren wird.

Sonnengötter bringen das Licht

In Ägypten galt die Sonne als die Verkörperung des ältesten und höchsten Gottes, dessen Verehrung schließlich zeitweilig die Form eines Staatskultes annahm. Von *Ra* oder *Re*, dem Sonnengott, glaubte man, daß er als erster dem Chaos, dem mythologischen Weltenei oder der im Urmeer gewachsenen Lotosblüte entstieg sei. Seither gleitet er Tag für Tag in einer königlichen Barke auf dem himmlischen Strom dahin, um bei Anbruch der Nacht sein Abendschiff zu besteigen und auf dem Fluß der Unterwelt durch das düstere Reich des Todes zum Morgenhorizont zurückzufahren. Dort vollzieht sich seine Wiedergeburt als strahlender junger Gott, der nun von neuem seinen segenspendenden Weg über den Himmel der oberen Welt nimmt.

Die wesentlichste objektive Ursache für die besonders hohe göttliche



Altägyptisches Weltmodell in symbolischer Darstellung; rechts der Sonnengott in der Königsbarke bei seinem Weg über den Taghimmel, links seine Rückfahrt in der Abendbarke

Verehrung, die der Sonne im alten Ägypten zuteil wurde, lag in dem offensichtlichen Zusammenhang zwischen der jährlich wiederkehrenden Nilüberschwemmung und der Zeit der intensivsten Erwärmung des Landes durch das Tagesgestirn – beides entscheidende Faktoren für die große Fruchtbarkeit des Niltals und damit für die Ernährung seiner Bewohner. Der Beginn dieses so wichtigen Zeitabschnitts fiel im übrigen jedes Jahr etwa mit dem ersten Sichtbarwerden des hellsten Sterns im Sternbild Großer Hund, des *Sirius*, in der Dämmerung vor Sonnenaufgang zusammen. Die nachfolgenden, in der Regel also sehr heißen Tage, erhielten – wahrscheinlich wegen dieses Zusammentreffens – die Bezeichnung „Hundstage“, die sich bis in unsere Zeit erhalten hat.

Als die Macht der Herrscher im Alten Reich (3. Jahrtausend v. u. Z.) ihren Höhepunkt erreichte, erklärten sich die Pharaonen selbst zu Söhnen und irdischen Stellvertretern des Sonnengottes, um durch die Vereinigung der Königsmacht mit dem Sonnenkult ihre Stellung weiter zu verstärken.

Altägyptische Sonnendarstellung mit der Königsfamilie (Amenophis IV.)



So fügten sie jeweils ihrem Namen den des Sonnengottes hinzu und machten diesen zum Staatsgott. Zahlreiche Könige der 5. Dynastie ließen dem Sonnengott und damit auch sich selbst prächtige Tempel erbauen, wobei die noch heute existierende Stadt Heliopolis (altägypt. On) von alters her eine der Hauptstätten des Sonnenkults (griech. helios = Sonne) war.

Als im Mittleren Reich (um 2040–um 1730 v. u. Z.) Theben zum politischen Zentrum Ägyptens wurde, erhielt der lokale Gott Amon den Rang des obersten Staatsgottes. Der Amonkult nahm mit der fortschreitenden Zentralisierung des Staates viele örtliche Sonnenkulte in sich auf, vor allem den Kult des Gottes Re. Der „Ketzerkönig“ *Amenophis IV.* setzte im 15. Jahrhundert v. u. Z. noch einmal für kurze Zeit den alleinigen Kult der Sonnenscheibe (Aton) an die Stelle des Amonkults.

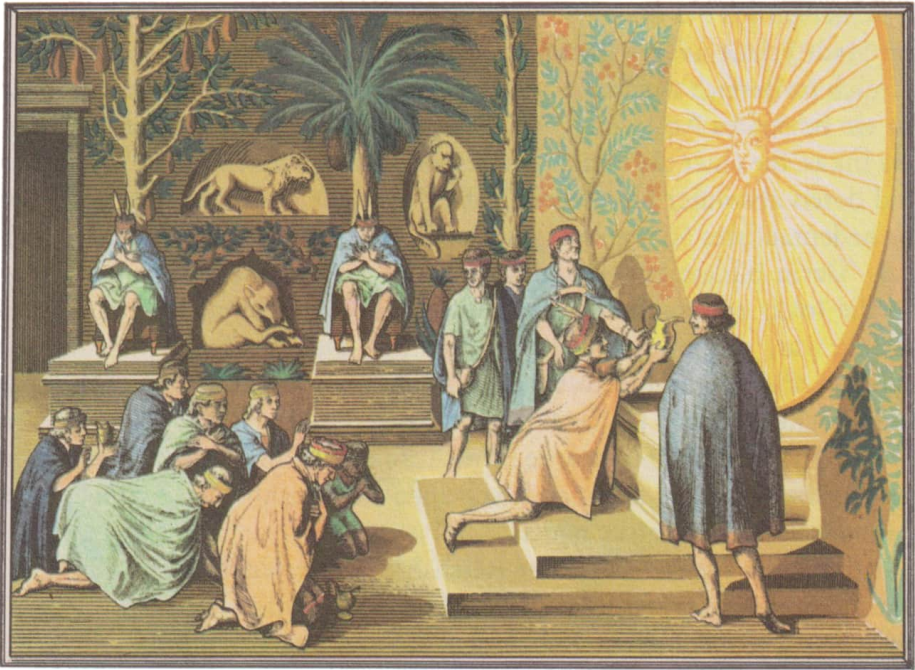
Auch für die nachfolgenden alten Völker blieb die göttliche Verehrung des Lichts, der Sonne, ein wichtiger Bestandteil ihrer religiösen Vorstellung.



Helios mit dem Sonnenwagen (altgriechisches Vasenbild)

gen, selbst wenn es nirgends mehr zu einem ausgeprägten, alles beherrschenden Sonnenkult kam. So bildeten für die Griechen die Sonne und das Heil des Lebens im Grunde ebenfalls eine Einheit. Ihren Sonnengott *Helios*, den Strahlenden, sahen sie als herrliches Wesen voll ewiger Jugendkraft. Als Lenker eines Viergespanns feuriger Sonnenrosse zieht er jeden Morgen von Osten her mit lebenspendender Kraft über den Himmel dahin. Des Nachts fährt er in einem goldenen Becher, den ihm Hephaistos, der Gott des Feuers und der Schmiedekunst, gefertigt hat, über das große finstere Wasser in den Osten zurück. Auch dem Helios wurden in Griechenland Tempel erbaut, allerdings nicht allzu zahlreiche, und Opfer dargebracht. Wie die Wissenschaftler annehmen, war die gewaltige Statue des Koloß von Rhodos – eines der Sieben Weltwunder der Antike – ein Symbol des Sonnengottes.

Die besondere Ehrfurcht vor dem Sonnengott, dem höchsten Reinen, kam beispielsweise auch darin zum Ausdruck, daß Tote jeweils noch vor



Sonnenanbetung im Inka-Tempel

Sonnenaufgang bestattet werden mußten, um den Gott des Lebens nicht einen Leichnam erblicken zu lassen. Aus dieser Sonnenverehrung erklärt sich die symbolische Bedeutung, die den Himmelsrichtungen Osten und Westen beigemessen wurde. Von Osten, wo die Sonne aufgeht, kommen das Licht, das Leben und die Kraft des Daseins; im Westen, wo die Sonne in das Dunkel der Nacht hinabsteigt, liegen die Finsternis, das Grauen und der Tod. Weit verbreitet war daher auch der Brauch, das Morgengebet mit dem Gesicht nach Osten zu verrichten. Vielfach wurden deshalb die Stätten des Gebets oder der Gottesverehrung, die Tempel, mit der Hauptausrichtung nach Osten angelegt. Eine Sitte, die viele Jahrhunderte lang auch für andere, teilweise erst später aufkommende Religionen erhalten blieb und die wir selbst in den christlichen Kirchen unserer Zeit finden können. Der noch heute übliche Begriff „orientieren“ (lat. „den Osten = Orient suchen“) läßt ebenfalls diese alten Zusammenhänge erkennen. Die Hauptausrichtung Osten-Westen wandte man im alten Griechenland sogar

verschiedentlich bei der Neuanlage von Städten an, beispielsweise im Fall der Stadt Priene an der Bucht von Milet.

Auch im Bereich der alten Kulturen Amerikas finden sich später Beispiele für ein bewußtes Ausrichten von Heiligtümern nach dem Sonnenaufgang. Die Inkas, die einer der altägyptischen ähnlichen Sonnenreligion huldigten und deren absoluter Herrscher „Sohn der Sonne“ genannt wurde, hatten ihr bedeutendstes Sonnenheiligtum in Cuzco, der Hauptstadt des Inkareiches. Darin bildete eine gewaltige massive Scheibe aus purem Gold, das für die Inkas ein von materiellem Wert freies, dem Sonnengott geweihtes Metall war, das höchste religiöse Symbol. Den Tempel hatte man so angelegt, daß die an der westlichen Innenwand des Heiligtums befestigte Sonnenscheibe durch ein nach Osten offenes Tor vom Licht der aufgehenden Sonne angestrahlt wurde. Im Aufleuchten der künstlichen Sonnenscheibe spiegelte sich das Erscheinen des strahlenden Sonnengottes symbolisch und verstärkt wider.

In der Alten Welt hatte sich im Reich *Alexanders des Großen* (356–323 v. u. Z.) und seiner Nachfolger durch die starken Einflüsse der ägyptischen, syrischen und persischen Religionen die Stellung der Sonne unter den Göttern beziehungsweise Göttersymbolen noch erhöht. Später wurde sie dann sogar, als unbesiegbarer Sonnengott (lat. = *Deus Sol invictus*), zum Schutzgott des Römischen Reiches erhoben. Kaiser *Aurelian* (270–275) versuchte auf diese Weise, für das Weltreich eine einheitliche Religion zu schaffen, um seine erschütterte Herrschaft zu festigen und ihr eine religiöse Weihe zu geben.

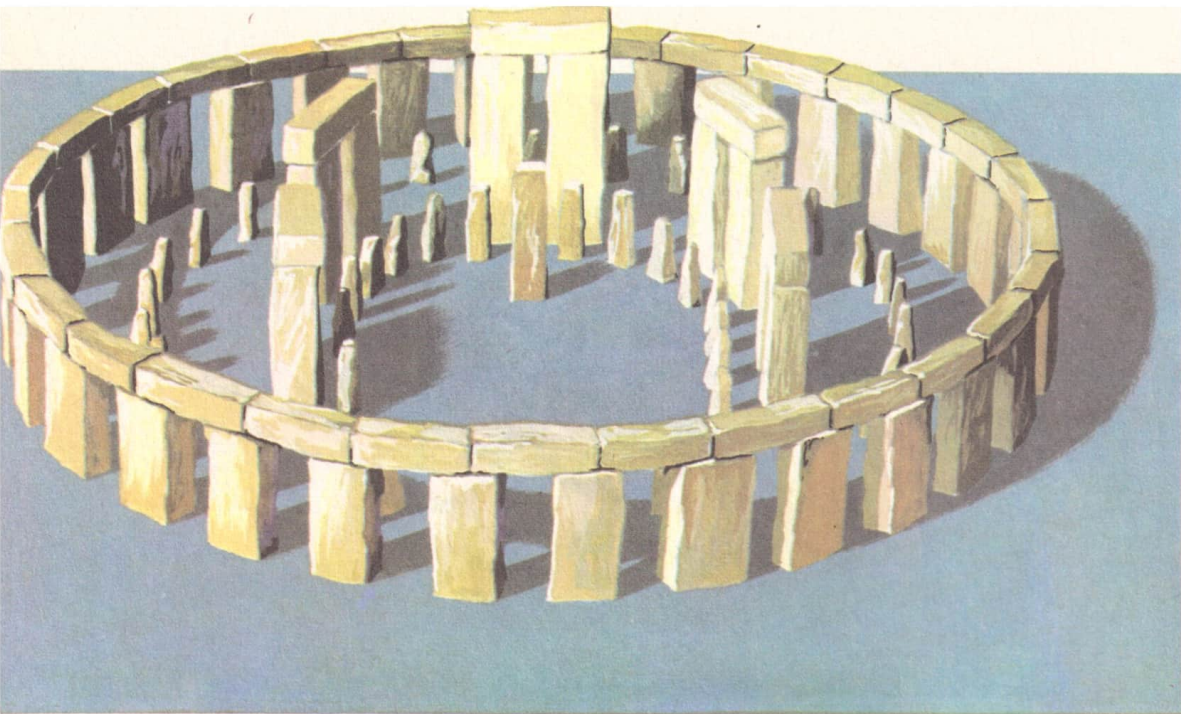
Mit den religiösen Einflüssen kam aus dem Vorderen Orient aber auch ein anderes, für die weltanschauliche Entwicklung in Griechenland äußerst verhängnisvolles „Geschenk“, das auf seine geistigen Erben überging: die schon von den altbabylonischen Priestern begründete Sterndeuterei. Diese „Geheimwissenschaft“ durfte und konnte stets allein von den priesterlichen Dienern der Götter ausgeübt werden und gipfelte in der Behauptung, aus dem Wissen um den Lauf der Gestirne das Schicksal von Menschen, Völkern und Staaten vorhersagen zu können. Gegenüber den unwissenden Massen bildete dieser in der Praxis geschickt gehandhabte, aber wissenschaftlich natürlich völlig unhaltbare Anspruch ein wirksames Machtinstrument der Priester. Die Kenntnis der regelmäßigen Wiederkehr gewisser natürlicher Erscheinungen am Himmel lieferte schließlich nur noch die „Tarnung“ für eine rein okkultistische Sterndeuterei, aus der sich der



Bronzezeitlicher Sonnenwagen (restauriert),
gefunden in Trundholm (Dänemark)

Sternenaberglaube entwickelte. Im hellenistischen Griechenland fand diese Irrlehre als „Astrologie“ ein neues Ausbreitungsfeld. Es ist, nebenbei bemerkt, recht bezeichnend, daß uns auch heute noch jener altbabylonisch-griechische Sternenaberglaube als Pseudowissenschaft überall dort entgegentritt, wo die gesellschaftlichen Verhältnisse und die davon abhängige Bewußtseinsentwicklung einen günstigen Nährboden für sämtliche Arten von geistiger Verstümmelung bieten.

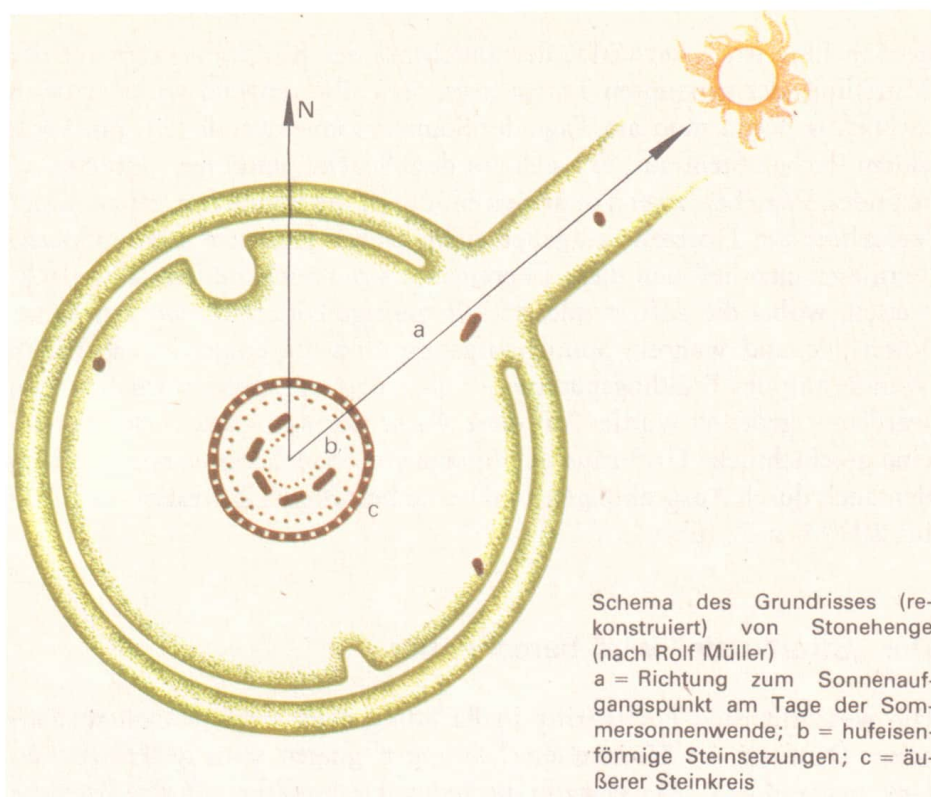
Das bisher gezeichnete Bild von der Stellung der Sonne für die Menschen der Urgesellschaft und der Sklavenhalterordnung wäre unvollständig, wollten wir nicht auch einen kurzen Blick auf die Verhältnisse in höheren geographischen Breiten werfen, wo Götterglauben und Sonnenverehrung im Frühstadium der Entwicklung die gleiche Rolle spielten wie in den bereits betrachteten Gebieten. Ja, gerade in den so unwirtlichen Regionen mit ihren langen, finsternen und eisigen Winternächten mußte sich in Glauben und Kult ein besonders starkes Empfinden für die Sonne ausprägen.



Nachbildung des Sonnenheiligtums von Stonehenge

So wurde sie auch hier das Symbol eines der Hauptgötter. Dieser lichte Sonnengott sollte, so wie bei den alten Griechen, auf einem von feurigen Sonnenrossen gezogenen Wagen über den Himmel jagen. Daher glaubten dann auch die am Rande des „geronnenen Meeres“ lebenden Völker, wie *Tacitus* (um 55 – um 120) am Schluß seiner „Germania“ zu berichten weiß, nach Sonnenuntergang und vor Sonnenaufgang die Strahlen um das Haupt des Sonnengottes zu sehen und das Donnern des auftauchenden Sonnenwagens zu hören – mythologische Deutungen von Naturerscheinungen, die wir heute nüchtern als Nordlichtstrahlen und Dröhnen berstenden Eises erklären können.

Mit größter Anteilnahme verfolgte man dort im rauhen Norden den auf- und absteigenden Jahreslauf der Sonne und schuf sich mit teilweise noch heute erhaltenen kultischen Steinsetzungen vermutlich auch kalendarische Marken zur Beobachtung der für den Lebenslauf so bedeutsamen Zeitpunkte Sommer- und Wintersonnenwende.



Das wohl berühmteste derartige Denkmal ist das *Stonehenge* in der Nähe von Salisbury in England. Eine im Modell versuchte Rekonstruktion des heutigen Ruinenfeldes zeigt Stonehenge als ein ehemals von 30 mächtigen quaderförmigen Megalithen (großen Steinblöcken) gebildetes kreisförmiges „Gehege“ (Durchmesser etwa 31 m), in dem sich ein kleinerer Steinkreis befand, der seinerseits wieder zwei ineinandergestellte hufeisenförmige Steinsetzungen umschloß. Diese Anlage umgab dann noch ein Ringwall mit Graben (etwa 100 m Durchmesser). Außerdem läßt sich eine Art befestigter Straße, an der Wallöffnung beginnend, etwa 400 m weit verfolgen.

Auffällig ist nun, daß die Trasse, die durch die Richtung der „Hufeisen“-Öffnung, den Walldurchbruch und die „Kunststraße“ abgesteckt wird, gerade nach Nordosten weist, und zwar mit ziemlicher Genauigkeit dorthin, wo etwa zur Zeit der Sommersonnenwende die Sonne aufgeht. Der Eindruck, daß hier eine Visierlinie markiert ist, wird noch durch einen

großen Einzelstein verstärkt, der außerhalb des Ringwalls etwa auf der Mittellinie der genannten Trasse liegt. Sehr überzeugend wirkt es dann zweifellos, wenn man am Tage der Sommersonnenwende (21. Juni) von einem flachen Stein aus, der sich vor dem Scheitelpunkt des „Hufeisens“ befindet, zwischen zwei Torsteinen hindurch die Sonne fast genau in der Visierlinie am Horizont aufgehen sieht. Durch genauere astronomische Vermessungen ließ sich diese Übereinstimmung auch zahlenmäßig nachweisen, wobei die auftretende, an sich geringe Differenz zwischen fester Visierlinie und wahrem Sonnenaufgangspunkt als Folge der jährlichen Wanderung des Frühlingspunktes – über den wir später noch sprechen werden – gedeutet wurde. Auf diese Weise hat man sogar rückrechnerisch eine geschichtliche Datierung der Anlage von Stonehenge versucht, die in den auch durch Ausgrabungen annähernd bestätigten Zeitraum von 1700 bis 2000 v. u. Z. führt.

Der „Strahlende“ wird berechenbar

Die wesentlichsten Fortschritte in Richtung einer beginnenden realistischen Deutung der Himmelserscheinungen gingen vom hellenistischen Griechenland aus. Hier gewann die geometrisch-mathematische Betrachtungsweise des Naturgeschehens, wie sie speziell von den Schulen des *Pythagoras* (um 540–500 v. u. Z.) und *Platons* (427–347 v. u. Z.) eingeführt beziehungsweise weiterentwickelt wurde, an Einfluß. Auch die Sonne erhielt dabei allmählich eine neue Bewertung. Zwar blieb sie das unbedingt notwendige, lebenerhaltende Element des irdischen Daseins, aber sie wurde auch zu einem realen und nicht mehr ausschließlich mythologischen Objekt in einem sich begriffsmäßig immer mehr ausdehnenden Weltall. Der Himmel selbst weitete sich, die Fixsterne rückten in eine ferne Sphäre, und die Erde wurde zum Mittelpunkt des Umlaufs der in einer separaten Sphäre befindlichen Sonne sowie der Sphären der übrigen Wandelsterne. Über deren Körperhaftigkeit, einschließlich Größe und Entfernung, vermochte man sich anfangs noch keine annähernd zutreffenden Vorstellungen zu machen.

Im 3. Jahrhundert v. u. Z. wagte einer der bedeutendsten Denker seiner Zeit, *Aristarch von Samos* (etwa 320–250 v. u. Z.), dann sogar die Meinung zu vertreten, die Erde, der geheiligte Mittelpunkt des *geozentrisch*

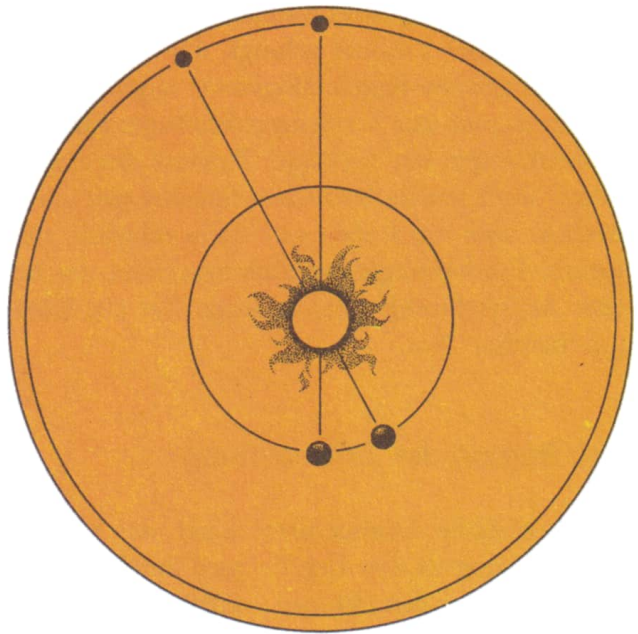
orientierten Weltbildes, bilde nicht das Zentrum der Welt, sondern sie wandere als Planet unter Planeten gemeinsam mit den anderen um die Sonne. Und im 1. Jahrhundert v. u. Z. unternahm es der Stoiker *Poseidonios* (um 135–51 v.u.Z.) erstmalig, Entfernung und Größe der Sonne abzuschätzen, wobei die von ihm genannten Werte nicht einmal allzusehr von der Wirklichkeit abwichen. Das Weltall erhielt also auch in der Vorstellung der Menschen allmählich seine wirklichen, ungeheuren Ausmaße. Aus einigen späteren griechischen, vor allem aber römischen Quellen scheint hervorzugehen, daß man sogar auf dem Wege war, als Ursache für die Bewegung der Planeten und der Kometen um die Sonne letzterer eine besondere „Anziehungskraft“ zuzuschreiben.

Doch all diese frühen Schritte zu einem *heliocentrischen* Weltbild verliefen im Sande. Zu stark war einerseits das Ansehen der Physik des *Aristoteles* (384–322 v. u. Z.) und andererseits der Einfluß des von den mächtigen Priestern vertretenen Sternenaberglaubens. Aristoteles hatte es zu einem Naturprinzip erhoben, daß der natürliche Ort aller schweren Körper das Weltzentrum sei. Da aber sämtliche zu beobachtenden Fallbewegungen zur Erdoberfläche hin erfolgen, sei die Erde das Weltzentrum. Und die Sterndeuterei setzte ebenfalls voraus, daß die Erde im Mittelpunkt des kosmischen Geschehens steht, weil nur dann das Wirken geheimnisvoller kosmischer Kräfte eben auf die Bewohner dieses Zentrums konzentriert sein könnte. Die Stagnation der eben begonnenen wissenschaftlichen Denkweise dauerte viele Jahrhunderte, und die altgriechischen astronomischen Erkenntnisse mußten später vielfach erst neu entdeckt oder förmlich „ausgegraben“ werden.

Von größter Bedeutung für die wirtschaftliche und kulturelle Entwicklung der alten Völker aber war die Tatsache, daß sich aus den beobachteten Regelmäßigkeiten im Lauf der Gestirne, besonders der Sonne und des Mondes, eindeutige Zeitmaßstäbe – mit Tageszählung und Tages-Großeinheiten wie Monat und Jahr – herleiten ließen. Landwirtschaftliche Produktion, Handwerk und weitläufiger Handel als Grundlage des gesellschaftlichen Lebens konnten letztlich nur auf der Basis eines geordneten Kalenderwesens gedeihen. Die alte Erkenntnis des Zusammenhangs zwischen den wiederkehrenden Jahreszeiten und dem Rhythmus der pflanzlichen Entwicklung hatte ja überhaupt erst eine auf Vorausschau beruhende landwirtschaftliche Tätigkeit – mit dem Ablauf von Saatvorbereitung, Aussaat und Ernte – ermöglicht. Wenn wir schließlich noch bedenken,

wie sehr beispielsweise im alten Ägypten das Ergebnis der Ernten und damit die Lebensverhältnisse der Menschen von den im Jahreslauf regelmäßig wiederkehrenden Nilüberschwemmungen abhängig waren, dann können wir leicht ermessen, welches gesellschaftliche Gewicht die Entwicklung eines geordneten Kalenderwesens haben mußte. Die feinere Kenntnis der Regelmäßigkeiten oder sogar strengen Periodizitäten im Lauf der Sonne und der anderen Gestirne lieferte dazu die Grundbausteine.

Vom Sonnenjahr zum Kanon der Finsternisse



Die ersten Ansätze zu einer fortlaufenden Zeitrechnung oder einem Kalender gehen sicher schon auf frühgeschichtliche Himmelsbeobachtungen in Babylon, Ägypten und China zurück. Anlaß waren meist mehrere Faktoren, die jedoch nicht stets alle gemeinsam wirkten. Einmal benötigte man, wie wir schon erwähnt haben, mit dem Fortschreiten der Entwicklung eine vorausschauend angelegte und an natürlichen Lebensrhythmen (Jahreszeiten) orientierte Zeitskala für Landwirtschaft, Handel und Verkehr. Ferner waren Priester und andere herrschende Schichten an einer streng geregelten Festtagsordnung für das religiöse Zeremoniell interessiert. Außerdem verlangten die Königsdynastien eine Datierung ihrer Regierungszeit. Und schließlich waren mit Himmelsbeobachtungen beschäftigte Priester oder mit der Schaffung eines Kalenderwesens betraute Hofbeamte irgendwann einmal zu der Einsicht gelangt, daß dem Ablauf der Erscheinungen am Himmel gewisse Regelmäßigkeiten zugrunde liegen, deren Kenntnis unter anderem auch zur Vorhersage künftiger Ereignisse – für die Priester und Hofastrologen ein wichtiges Element der Sterndeuterei – und damit als Stütze ihrer gesellschaftlichen Stellung genutzt werden konnte. Eine Vorhersage aber wird eben nur dann möglich, wenn man vorangegangene gleiche Erscheinungen zeitlich bestimmt, das heißt datiert und somit für eine Aufzeichnung oder sonstige Art der Überlieferung an Nachfolger „aufbereitet“ hat.

Am Beginn der Zeitrechnung

Die natürliche Grundeinheit einer am Himmelsgeschehen orientierten Zeitrechnung ist der *Tag*. Er wird durch den scheinbaren Ost-West-Lauf der Sonne über den Himmel – zuzüglich des nächtlichen „Rückwegs“ zum

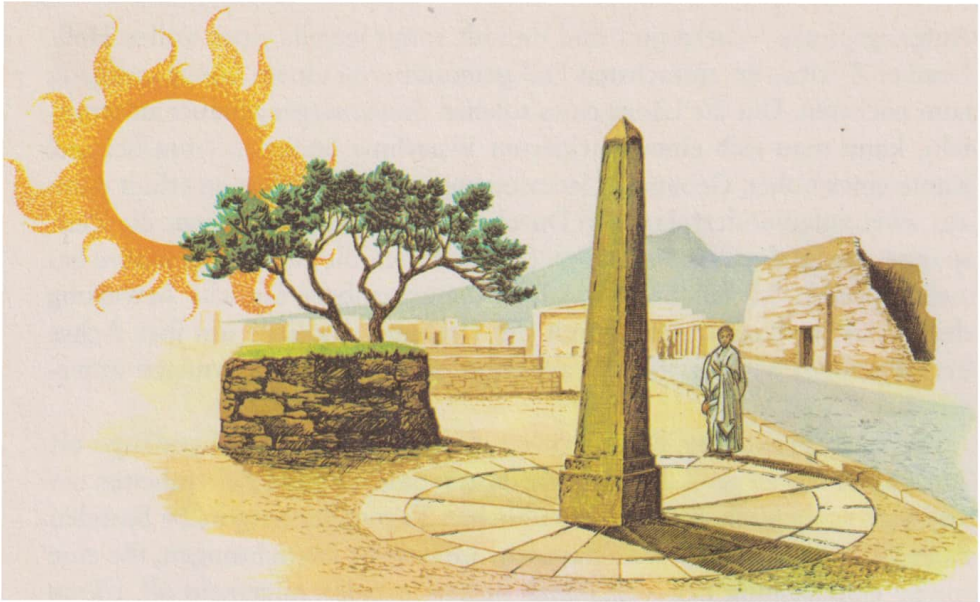
Aufgangspunkt – bestimmt und umfaßt somit jeweils einen vollen Hell-Dunkel-Zyklus, im einfachsten Fall gemessen von einem Sonnenaufgang zum nächsten. Um die Länge eines solchen *Sonnentages* genauer zu ermitteln, kann man sich einer markierten Visierlinie bedienen (zum Beispiel Kante eines hohen Gebäudes, Steinsetzung im Gelände); man erhält dann aus zwei aufeinanderfolgenden Durchgängen der *wahren Sonne* die Zeitspanne des *wahren Sonnentages*. (Worauf sich die Beifügung *wahre* bezieht, werden wir noch sehen.) Daß die scheinbare tägliche Bewegung der Sonne in Wirklichkeit durch die Drehung der Erde um ihre Achse hervorgerufen wird, ist für die astronomischen Zeitmarkierungen unwesentlich.

Für viele praktische Erfordernisse des Lebens ist die Tageslänge als Zeiteinheit viel zu groß. Man führte darum bald kleinere Zeiteinheiten ein und kam schließlich zu der heute üblichen Tageseinteilung in 24 Stunden zu je 60 Minuten mit je 60 Sekunden. Künstliche Einrichtungen, die eine solche Unterteilung der Tageslänge liefern, werden allgemein als *Uhren* bezeichnet.

Einen auf den Lauf der wahren Sonne abgestimmten Zeiteiler zu schaffen war schon für die Astronomen des Altertums recht einfach, zumal für die damaligen Bedürfnisse durchaus noch eine Grobteilung nach Stunden ausreichte. Eine entsprechende Vorrichtung läßt sich sehr leicht nachbauen. Im einfachsten Fall genügt es, einen Stab im Freien senkrecht auf eine horizontale Skalenfläche zu setzen, deren Teilung von der 24-Stunden-Periode eines scheinbaren Sonnenumlaufs ausgeht. Der Zeitpunkt, zu dem der Schatten des Stabes in Nord-Süd-Richtung weist, die Sonne also auf dem am Himmel verlaufenden Nord-Süd-Großkreis steht, wird *wahrer Mittag* genannt. Der Nord-Süd-Großkreis heißt daher auch *Mittagskreis* oder *Meridian* (lat. *meridies* = Mittag).

So konnte man schon im Altertum mit Hilfe eines derartigen *Schattenstabs*, griechisch *Gnomon* genannt, die *wahre Sonnenzeit* bestimmen – vorausgesetzt, daß die Sonne tatsächlich schien. Die meisten Länder des Alten Orients hatten dafür jedoch eine günstige geographische Lage. Während nächtlicher Reisen bot eine solche *Sonnenuhr* natürlich keine Hilfe als Zeitweiser.

Sonnenuhren können auch erheblich komplizierter konstruiert sein. Sie lassen sich dann an senkrechten Gebäudeflächen anbringen oder – meist mit konkav gewölbten Skalenflächen – auf Sockeln errichten. Bekannt ist,



Schattensäule (Gnomon) im alten Rom

daß schon der Chaldäer *Berosos* im 3. Jahrhundert v. u. Z. eine Sonnenuhr benutzte, die eine kleine Kugel als Schattenwerfer und teilweise konkav gewölbte Flächen als „Zifferblatt“ hatte. Die Griechen nannten einen Zeitweiser dieser Art *Heliotrop* oder auch *Skaphe*. Sonnenuhren von oft hohem künstlerischem Wert finden wir noch an zahlreichen historischen Gebäuden.

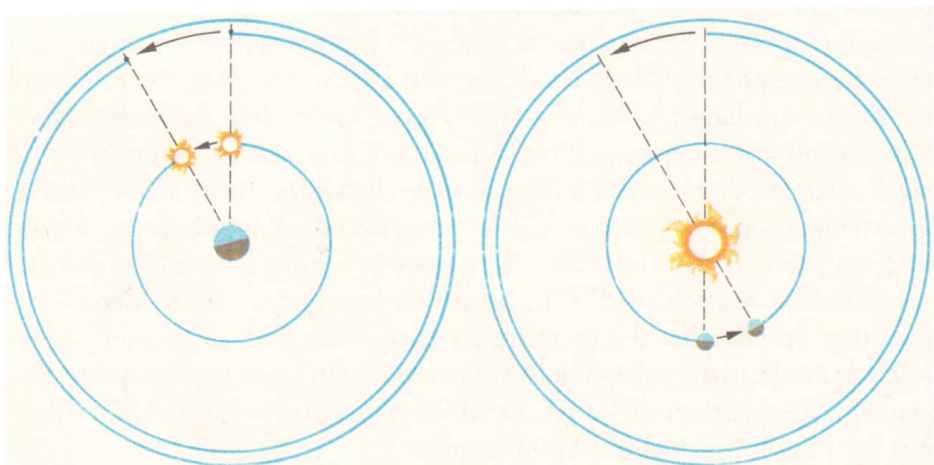
Bei einer anderen Methode der Zeitbestimmung wird nicht die Sonne als Durchgangsobjekt gewählt, sondern ein nachts zu beobachtender Fixstern. Die Zeitdauer zwischen zwei Durchgängen des gleichen Sterns heißt *Sterntag*. Der durch die Visierlinie wandernde Fixstern stellt eine in erster Näherung raumfeste Bezugsmarke dar, und der Zeitabstand zwischen aufeinanderfolgenden Sterndurchgängen entspricht daher der wahren Rotationsdauer der Erde, wegen des Bezugs auf einen Stern (lat. *sidus*) auch als *siderische Rotationszeit* bezeichnet.

Wenn wir eine Uhr moderner Konstruktion benutzen, die zwischen zwei Sterndurchgängen eine genaue 24-Stunden-Teilung – einschließlich der Feinteilung in Minuten und Sekunden – anzeigt, also nach *Sternzeit* geht,

und nach dieser Uhr aufeinanderfolgende Sonnendurchgänge kontrollieren, dann machen wir eine interessante Feststellung: Die Sonne benötigt nach Sternzeit im Mittel 24 Stunden 3 Minuten 56,6 Sekunden zu einem täglichen „Umlauf“ am Himmel. Die zusätzlichen 3 Minuten 56,6 Sekunden lassen sich offenbar nur damit erklären, daß sie während des Tagesablaufs – das heißt während einer Erdumdrehung – unter den Sternen ein kleines Stück von West nach Ost weitergewandert sein muß. Diese scheinbare Sonnenbewegung wird schließlich auch dadurch bestätigt, daß sich die abends in südlicher Himmelsrichtung zu beobachtenden Sternbilder im Laufe einer gewissen Zeit immer weiter zur untergehenden Sonne hin verschieben und wir im Sommer folglich andere Sternbilder am nächtlichen Südhimmel sehen als im Winter.

Selbstverständlich ist diese Sonnenbewegung unter den Fixsternen nur scheinbar; denn dahinter verbirgt sich in Wirklichkeit, wie man zumindest seit *Nicolaus Copernicus* (1473–1543) weiß, die Umlaufbewegung der Erde um die Sonne. Doch für die Zeit- und Kalenderrechnung ist es auch in diesem Fall belanglos, ob man annimmt, daß sich die Sonne um die Erde bewegt, oder davon ausgeht, daß die Erde um die Sonne läuft. Mit anderen Worten, bei einem geozentrischen Weltmodell läßt sich der beobachtete Sonnenlauf ebenfalls ohne Schwierigkeiten für kalendarische Zwecke

Scheinbare Bewegung der Sonne vor dem Hintergrund der Fixsternsphäre;
links geozentrisch gedeutet, rechts heliozentrisch gesehen



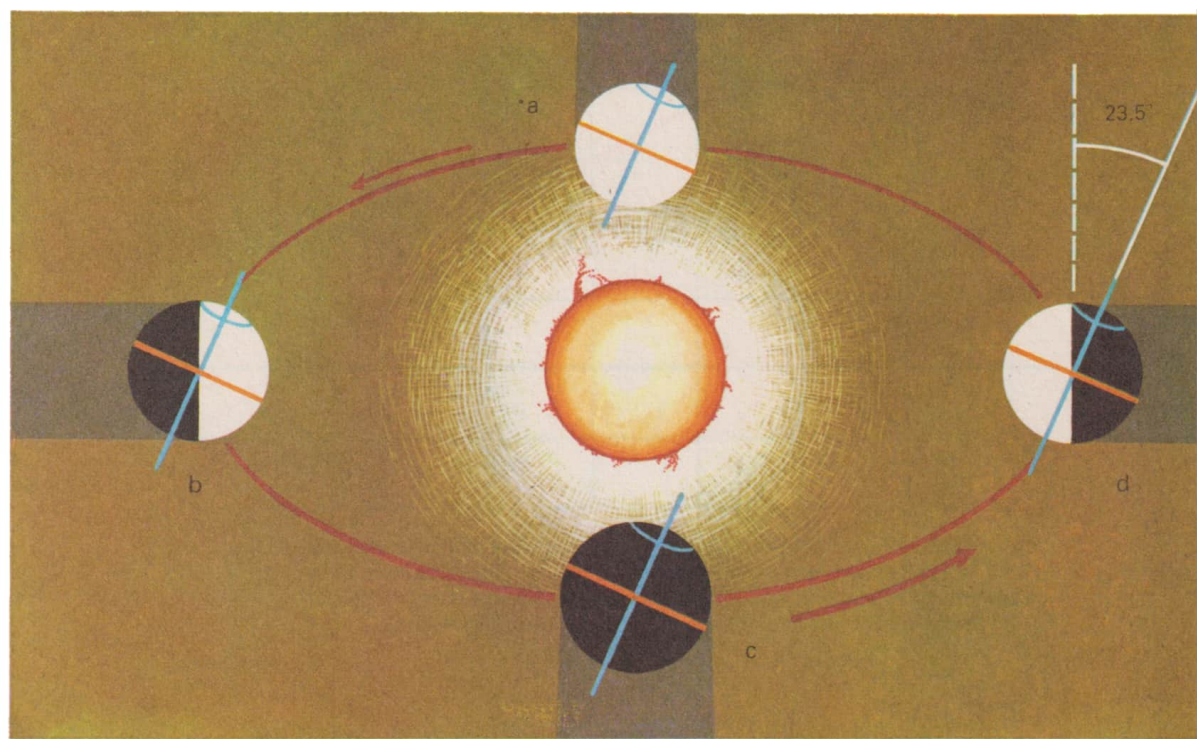
auswerten, und so konnte in früheren Zeiten von dieser Seite her kein Anstoß zur Unterscheidung zwischen scheinbarer und wirklicher Bewegung der Sonne kommen.

Wie die Beobachtungen zeigen, ergibt das tägliche Fortschreiten der Sonne unter den Fixsternen nach rund 365,25 Sonnentagen einen vollen Umlauf am Himmel. Nach diesem Zeitraum ist die Sonne also wieder an den gleichen Ort unter den Sternen zurückgekehrt; man nennt ihn daher auch *siderisches Jahr*. Die Jahresperiode des scheinbaren Sonnenlaufs ist eng mit den Lebensrhythmen auf der Erde verbunden, und das *Jahr* bildet daher von alters her neben dem Tag das wichtigste Grundmaß für die meisten Zeit- und Kalenderrechnungen.

Bei einem das ganze Jahr umfassenden Vergleich stellen wir fest, daß während der 365,25 Sonnentage 366,25 Sternentage vergangen sind. Ein Sterntag hat nach Sonnenzeit eine Länge von 23 Stunden 56 Minuten 4,1 Sekunden, und dieser Wert entspricht der siderischen Rotationsdauer der Erde nach Sonnenzeit.

Der Sonnenlauf hat seine Gesetze

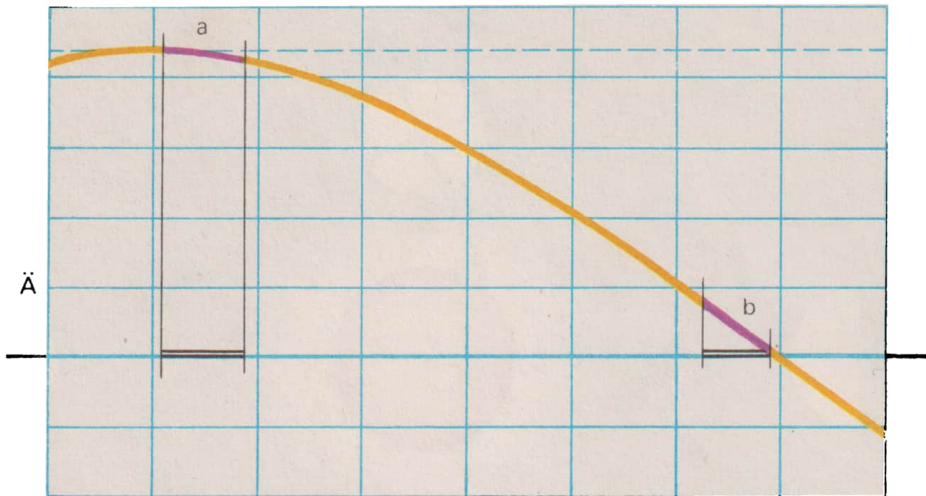
Der Weg der Sonne unter den Sternen beschreibt am Himmel einen Großkreis, den man die *Ekliptik* nennt. In Wirklichkeit ist die Ekliptik nichts weiter als die Projektion der Erdumlaufbahn an die – selbstverständlich nur gedachte – Fixsternsphäre. Kommen wir noch einmal auf den Schattenstab zurück. Wenn wir täglich zum wahren Mittag die Schattenlänge des Stabes messen, werden wir im Laufe des Jahres erhebliche Änderungen registrieren und feststellen, daß der Schatten im Sommer am kürzesten und im Winter am längsten ist. Wir erhalten so durch Messungen den schon vom Augenschein her bekannten Befund bestätigt, daß die Sonne in unseren Breiten zur Sommerzeit mittags beträchtlich höher steht als im Winter. Eine bedeutsame Folge dieser Erscheinung sind die klimatisch sehr ausgeprägten *Jahreszeiten*. Die beiden Extremwerte für die Sonnenhöhe werden als *Solstitien* bezeichnet. Da die Sonne im Sommer nach Erreichen ihres höchsten Standes bei ihrem weiteren Lauf wieder absteigt, wird dieser höchste Punkt in der scheinbaren Sonnenbahn auch *Sommersonnenwende* genannt. Dementsprechend ist die *Wintersonnenwende* gleichbedeutend mit dem Punkt des tiefsten Sonnenstands.



Entstehen des Jahreszeitenwechsels (schematisch) durch die Neigung der Rotationsachse der Erde (blau) gegen die Senkrechte (weiß gestrichelt) auf der Erdbahnebene

a = Frühlings-, b = Sommer-, c = Herbst-, d = Winteranfang auf der Nordhalbkugel

Das Wechseln der Sonnenhöhe im Jahresrhythmus läßt sich dadurch erklären, daß die Ekliptik gegen die Hauptebene der täglichen Himmelsumdrehung, die Ebene des *Himmelsäquators*, geneigt ist. Himmelsäquator heißt derjenige Großkreis, welcher von den Himmelspolen jeweils 90° entfernt ist. Da diese Pole aber durch die Richtung der Rotationsachse der Erde bestimmt sind, kann er auch als die Projektion des Erdäquators an die Sternensphäre aufgefaßt werden. Die Ekliptik bildet mit dem Himmelsäquator einen Winkel von etwa $23^\circ 27'$. Er wird als die *Schiefte der Ekliptik* bezeichnet und stellt in Wirklichkeit die Neigung des Erdäquators gegen die Erdbahnebene dar beziehungsweise den Winkel, den die Erdachse mit der Senkrechten zur Erdbahnebene bildet.



Unterschiedliche Länge der Projektion gleicher Tageswege der Sonne in der Ekliptik (orange) auf den Himmelsäquator (Ä) in der Nähe der Sommersonnenwende (a) und eines Äquinoktiums (b), dargestellt im rechtwinkligen Himmelsgradnetz; gestrichelte Linie: nördlicher Wendekreis

Himmelsäquator und Ekliptik schneiden sich in zwei Punkten, den *Äquinoktialpunkten*. Der Name *Äquinoktium* kann mit *Tagundnachtgleiche* übersetzt werden, weil die Sonne zu dieser Zeit auf dem Himmelsäquator steht und damit ihr Tagbogen genauso groß ist wie der Weg, den sie unterhalb des Horizonts beschreibt, Tag und Nacht folglich gleich lang sind. Der vom Sprachgebrauch her doppeldeutige Begriff Tag bezeichnet in diesem Fall die Zeitspanne zwischen Sonnenauf- und untergang. Einer der Äquinoktialpunkte wird von der Sonne zwischen der Winter- und der Sommersonnenwende erreicht, also im Frühjahr, und heißt darum *Frühjahrs-Tagundnachtgleiche* oder *Frühlingspunkt*. Das andere Äquinoktium trägt dementsprechend den Namen *Herbst-Tagundnachtgleiche* oder *Herbstpunkt*.

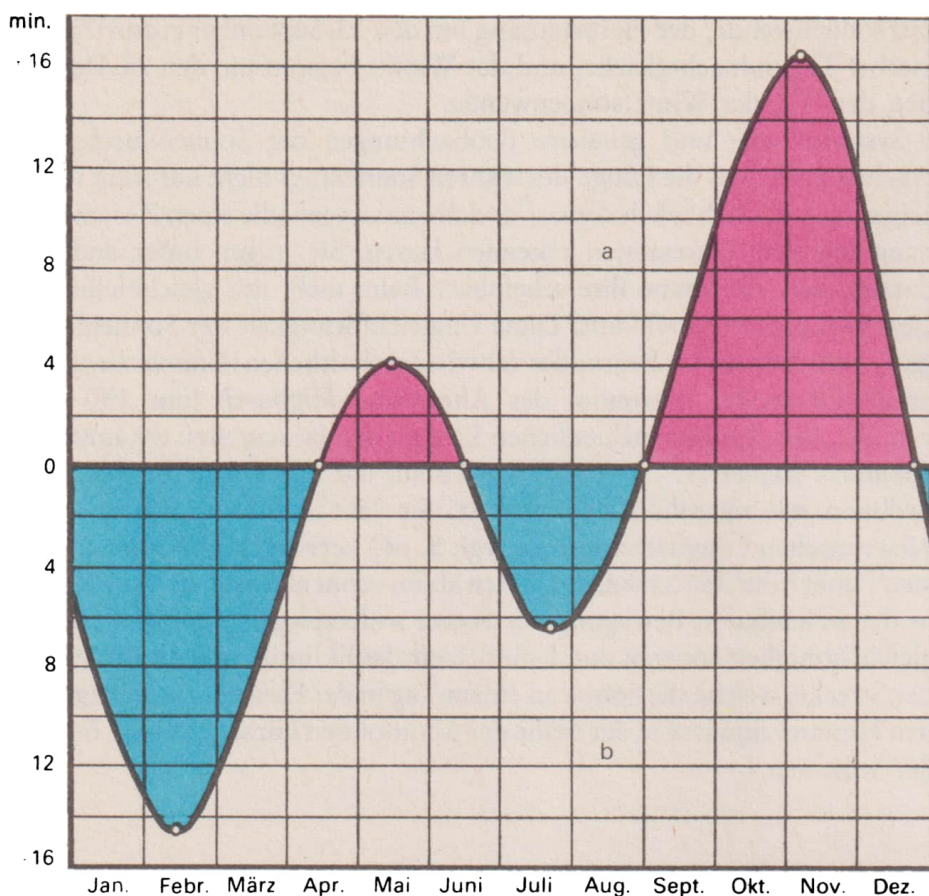
Die Solstitien und die Äquinoktien markieren vier charakteristische Zeitpunkte im Jahreslauf der Sonne. Genauer gesagt, sie kennzeichnen jeweils den Beginn der Jahreszeiten, und zwar astronomisch gesehen, was nicht mit den für die Meteorologie gültigen Gesichtspunkten identisch ist. So liegen astronomisch Frühlingsanfang und Frühlingsäquinoktium um den 21. März, der Sommer beginnt um den 21. Juni mit der Som-

ersonnenwende, der Herbstanfang um den 23. September entspricht der Herbst-Tagundnachtgleiche, und der Winter beginnt um den 21. Dezember, den Tag der Wintersonnenwende.

Systematische und genauere Beobachtungen der Sonnendurchgänge ergeben bald, daß die Länge des wahren Sonnentags nicht konstant ist. Es zeigen sich jährlich wiederkehrende Schwankungen, die einen Zusammenhang mit den Jahreszeiten erkennen lassen. Sie folgen unter anderem daraus, daß die Sonne ihre scheinbare Bahn nicht mit gleichbleibender Geschwindigkeit durchläuft. Diese Ungleichförmigkeit der Sonnenbewegung hatte bereits der Begründer der wissenschaftlichen Himmelsbeobachtung, der größte Astronom des Altertums, *Hipparch* (um 190–125 v. u. Z.), aus den unterschiedlichen Längen der Jahreszeiten erkannt. Seit *Johannes Kepler* (1571–1630) weiß man, daß die elliptische Form der Erdbahn die eigentliche Ursache ist. Sie läßt die Erde, wie aus dem Newtonschen Gravitationsgesetz (vgl. S. 66) hervorgeht, im sonnennächsten Punkt ihrer Bahn schneller laufen als im sonnenfernsten, was sich dann in der scheinbaren Bewegung der Sonne widerspiegelt. Eine weitere Ungleichförmigkeit entsteht durch die Schiefe der Ekliptik, weil die Projektion der Strecke, welche die Sonne an einem Tag in der Ekliptik zurücklegt, auf den Himmelsäquator in der Nähe der Äquinoktien kürzer ist als im Bereich der Solstitien.

Das Zeitmaß wird verfeinert

Als an die Genauigkeit der Zeitbestimmung höhere Anforderungen gestellt wurden, war die für primitivere gesellschaftliche Verhältnisse noch ausreichende und durch Sonnenuhren angezeigte wahre Sonnenzeit nicht mehr als Zeitsystem brauchbar. Da andererseits die Sonnenzeitrechnung wegen ihrer natürlichen Beziehung zum menschlichen Dasein erhalten bleiben sollte, führte man als Ausweg eine gedachte *mittlere Sonne* ein, für die dann natürlich auch ein *mittlerer Sonnentag* und eine *mittlere Sonnenzeit* festgelegt wurden. Das heißt, wenn diese gedachte mittlere Sonne den Meridian durchschreitet, ist *mittlerer Mittag* oder 12 Uhr mittlerer Sonnenzeit beziehungsweise mittlerer Zeit (MZ). Das trifft selbstverständlich nur für den jeweiligen Beobachtungsort zu, und dieser Zusammenhang wird denn auch durch die Bezeichnung *Ortszeit* – in diesem Fall also 12 Uhr mittlerer



Änderung der Zeitgleichung im Laufe eines Jahres
a = Sonnenuhr geht vor; b = Sonnenuhr geht nach

Ortszeit – ausgedrückt. Nach Übereinkunft gilt, daß die Bewegung der mittleren Sonne völlig gleichförmig am Himmelsäquator entlang verläuft und die mittlere Sonne mit der Umlaufzeit der wahren Sonne wieder zum Frühlingspunkt zurückkehren läßt.

Wenn man (zum Beispiel beim Ablesen von Sonnenuhren) von der wahren auf die mittlere Sonnenzeit übergehen will oder umgekehrt, ergibt sich als Differenz die sogenannte *Zeitgleichung*. Durchschreitet die wahre Sonne den Ortsmeridian früher als die mittlere Sonne, so ist die Zeitgleichung positiv, im umgekehrten Fall negativ. Die graphische Darstellung

der Zeitgleichung läßt zwei Maxima und zwei Minima erkennen und vier Zeitpunkte, zu denen die Differenz Null beträgt. Die Höchstwerte liegen um den 14./15. Mai beziehungsweise 3./4. November und die Tiefstwerte um den 12. Februar beziehungsweise 26./27. Juli, während die Nullwerte um den 16. April, 14./15. Juni, 2. September und 25./26. Dezember erreicht werden.

Die mittlere Sonnenzeit bildet die Grundlage der gesamten modernen Zeitrechnung, wobei die zugehörige Tageslänge aus den schon genannten rund 365,25 Sonnentagen des siderischen Jahres hervorgeht. Als *Weltzeit* wurde die Ortszeit vereinbart, die für den Meridiandurchgang der mittleren Sonne auf dem Nulllängengreis des Erdgradnetzes gilt. Die Nullkoordinate der geographischen Länge verläuft bekanntlich etwa durch den Londoner Bezirk Greenwich. Weil von Ort zu Ort wechselnde Uhrzeiten für die Erfordernisse des Alltags – denken wir nur an den Verkehr – völlig ungeeignet sind, wurden international *Zonenzeiten* eingeführt. Dazu hat man vereinbart, daß innerhalb einer jeweils 15° breiten Zone entlang bestimmter Standardlängengreise die individuellen Ortszeiten durch eine Standardzeit ersetzt werden. So gilt für einen 15° breiten Streifen mit dem Nulllängengreis als Mittellinie die Weltzeit zugleich als *westeuropäische Zeit* (WEZ). Aus praktischen Erwägungen haben sich allerdings einige Länder dieses Gebiets der Zonenzeit für den östlich benachbarten Streifen angeschlossen, der beiderseits des 15. östlichen Längengreises (etwa Görlitz) liegt. Dies ist die Zone der *mitteleuropäischen Zeit* (MEZ), die auch für die DDR gilt. Die 15° Längendifferenz der MEZ-Mittellinie gegenüber der Weltzeit-Mittellinie ergeben die Beziehung $MEZ = \text{Weltzeit} + 1 \text{ Stunde}$. Für die Zonenzeit um den 30. östlichen Längengreis, die sogenannte *osteuropäische Zeit* – in der UdSSR auch als *Moskauer Zeit* bezeichnet –, beträgt die Differenz gegenüber der Weltzeit 2 Stunden. Ebenfalls aus praktischen Gründen sind aber in der gesamten UdSSR die Uhren zusätzlich um 1 Stunde vorgestellt, so daß die Moskauer Zeit $\text{Weltzeit} + 3 \text{ Stunden}$ beträgt. Auch die übrigen Zonen-(Standard-)Zeiten rund um den Erdball unterscheiden sich in der Regel durch jeweils 1 Stunde.

Im praktischen Zeitdienst kontrolliert man der Genauigkeit wegen die mittlere Zeit nicht an Hand von Beobachtungen der Sonnendurchgänge, sondern mißt die Passage von Fixsternen am Nachthimmel in Sternzeit. Aus dem schon gezeigten Zusammenhang von Sternzeit und Sonnenzeit

läßt sich dann rechnerisch die mittlere Ortszeit am Beobachtungsort bestimmen, so daß man mittels einer für jeden Ort festliegenden Zeitkorrektur gegenüber der Zonenzeit die an den Zeitdienst angeschlossenen öffentlichen Uhren (Normaluhren, Bahnhofsuhren usw.) überprüfen kann. Seit längerem nimmt man jedoch im allgemeinen die Kontrolle der Normalzeit mit Hilfe ständig in Gang gehaltener und sehr genauer physikalischer Laboratoriumsuhren (Quarzuhren und andere) vor. Die früher allein als „Hauptuhr“ dienende Rotationsbewegung der Erde wird nur noch für gelegentliche Parallelkontrollen genutzt. Übrigens konnte man mittels der Laboratoriumsuhren bald nachweisen, daß die Erdrotations-„Uhr“ zwar winzige, aber doch deutliche Gangschwankungen zeigt, die im Grunde jedoch allein den Geophysiker zu interessieren brauchen.

Als Nullpunkt des „Himmelszifferblatts“ wurde der Frühlingspunkt bestimmt. Beim Meridiandurchgang des Frühlingspunktes, also jenes Schnittpunkts zwischen Ekliptik und Himmelsäquator, welchen die Sonne zum Frühlingsanfang erreicht, ist an dem betreffenden Beobachtungsort demnach 0 Uhr Sternzeit. Bis zur nächsten Passage des Frühlingspunktes verstreichen dann 24 Stunden Sternzeit, woraus sich ein einfaches Verfahren zur Ortsbestimmung für einen Fixstern im Himmelsgradnetz ergibt. Dieses Gradnetz ist im Prinzip so aufgebaut wie das der Erde. Eine der beiden Sternkoordinaten – sie entspricht der geographischen Länge auf der Erde und heißt *Rektaszension* – erhält man sehr leicht durch Ablesen der für den Beobachtungsort gültigen Sternzeituhr beim Meridiandurchgang des betreffenden Sterns. Das heißt, diese Koordinate wird in den zunächst etwas ungewöhnlich erscheinenden Maßeinheiten Stunden, Minuten und Sekunden festgelegt. Als zweite Koordinate hat man den Abstand des Sterns vom Himmelsäquator im Winkelmaß zu bestimmen und erhält so die *Deklination*, die der geographischen Breite im Erdgradnetz entspricht.

Jahreslängen und ihre Tücken

Der Frühlingspunkt hat noch andere grundlegende Bedeutung für die Zeitrechnung. Wir wissen bereits, daß die Zeitdauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden Vorübergängen der Sonne an ein und demselben Stern

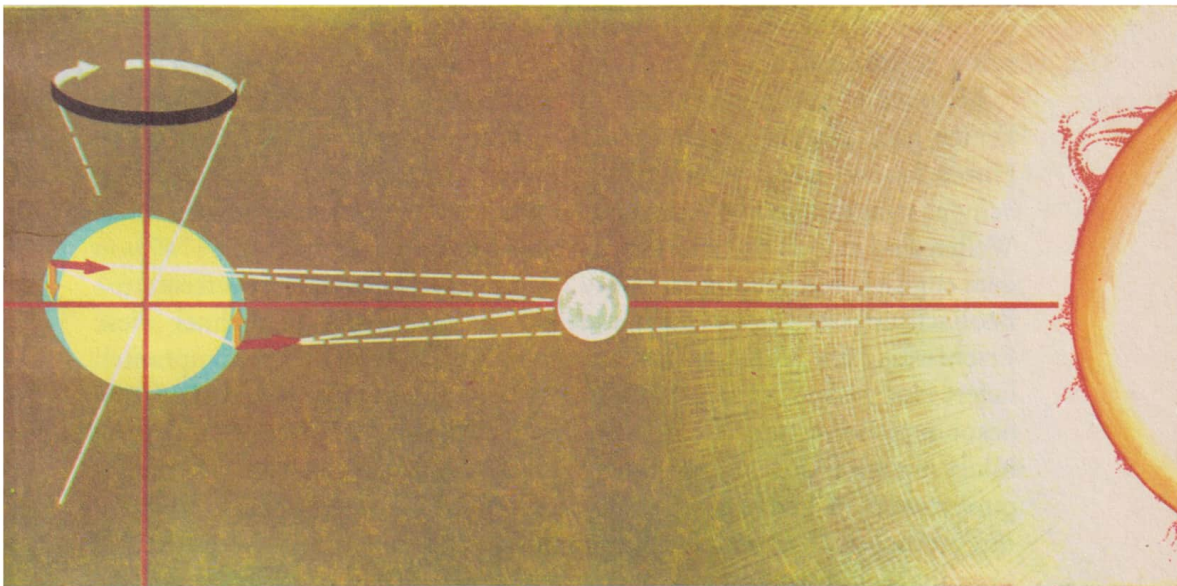
siderisches Jahr genannt wird. Seine genaue Länge beträgt 365,25636 Tage oder 365 Tage 6 Stunden 9 Minuten 9 Sekunden. Auch daß der für das irdische Leben so bedeutsame Zusammenhang zwischen dem Lauf der wahren Sonne und den Jahreszeiten unter anderem durch die Äquinoktien markiert ist, haben wir erwähnt. Nun zeigt sich jedoch, daß die Lage des Frühlingspunktes – wie auch die des Herbstpunktes – unter den Sternen nicht absolut fest ist. Der Frühlingspunkt wandert vielmehr während eines Sonnenumlaufs auf der Ekliptik der Sonne um etwa 50'' (Bogensekunden) entgegen. Dadurch ist die Umlaufdauer von Frühlingspunkt zu Frühlingspunkt etwas kürzer als die Dauer eines siderischen Jahres. Sie beträgt genau 365,24220 Tage oder 365 Tage 5 Stunden 48 Minuten 46 Sekunden und wird als *tropisches Jahr* bezeichnet. Der Unterschied zum siderischen Jahr macht zwar pro Jahr nur etwas mehr als 20 Minuten aus, wächst aber in einem Jahrtausend schon auf ungefähr 14 Tage an. Dem Kalender muß also das tropische Jahr zugrunde gelegt werden, da bei Verwendung der siderischen Jahreslänge eine allmähliche Verschiebung zwischen den Kalenderdaten und den Jahreszeiten eintreten würde. So könnte der 24. Dezember durchaus mitten in die sommerliche Jahreszeit fallen.

Es zählt zweifellos zu den erstaunlichsten Leistungen astronomischer Beobachtungskunst und wissenschaftlicher Analyse im Altertum, daß dieses Vorrücken des Frühlingspunktes, das man auch als *Präzession der Äquinoktien* oder einfach nur als *Präzession* (lat. praecedere = vorrücken) bezeichnet, trotz seines doch recht geringen jährlichen Betrags – 50'', das ist etwa der 35. Teil des Vollmonddurchmessers – bereits erkannt wurde. Der griechische Astronom Hipparch machte diese Entdeckung, als er die – damals noch recht grob gemessenen – Örter heller Sterne zu seiner Zeit mit Angaben verglich, die man etwa 150 Jahre früher gewonnen hatte. Er schätzte daraus auch schon den zahlenmäßigen Betrag dieser Bewegung auf mindestens 1° pro Jahrhundert ab. Wir sehen an diesem Beispiel im übrigen sehr gut, daß selbst kleine Bewegungsgrößen mit unvollkommenen meßtechnischen Hilfsmitteln erfaßt werden können, wenn nur die Beobachtungsspanne entsprechend groß ist. Das setzt allerdings voraus, daß die Bewegung die ganze Zeit über in annähernd unveränderlicher GröÙe anhält. Dieses Prinzip gilt ebenso für die Genauigkeit, mit der zyklische Abläufe (zum Beispiel Jahreslängen) aus langen Zeiträumen zu ermitteln sind.

Die von Hipparch gefundene Präzession zeigt sich demnach als ein langsames Entlanggleiten des Frühlingspunktes auf der Ekliptik. Das bedeutet aber andererseits, daß die Ebene des Himmelsäquators um die im Raum starre Mittel- oder Polachse der Ekliptik „taumelt“. Wir können genausogut sagen, die durch die räumliche Lage der Erdachse bestimmte Himmelsachse taumelt langsam um die Polachse der Ekliptik herum. Und zwar beschreibt sie dabei einen Doppelkegelmantel mit einem Öffnungswinkel von rund $23,5^\circ$, dem Betrag der Schiefe der Ekliptik.

Der geringen Größe der jährlichen Präzession entsprechend verläuft diese Taumelbewegung der Himmels- oder, genauer gesagt, der Erdachse sehr langsam. Erst in etwa 26 000 Jahren – man nennt diesen Zeitraum das *Platonische Jahr* – vollführt der Himmelspol einen vollen Umlauf um den Pol der Ekliptik, der im Sternbild Drache liegt, aber nicht wie der nördliche Himmelspol durch einen nahestehenden hellen Stern (Polarstern) ausgezeichnet ist. Doch dieser heute am Himmelspol stehende Polarstern, der hellste Stern im Sternbild Kleiner Bär, behält seine bevorzugte Stellung auch nicht für immer bei. Der wandernde Himmelspol wird sich ihm zwar noch bis zum Jahr 2100 auf etwa $0,5^\circ$ nähern – heute beträgt der Abstand etwa 1° –, dann aber immer weiter fortrücken. Andere Sterne werden die Rolle des Polarsterns übernehmen, so um das Jahr 7400 der Hauptstern des Sternbilds Cepheus und um das Jahr 14 000 schließlich der hellste Stern im Sternbild Leier, die Wega. Zur Zeit des Hipparch war übrigens der Himmelspol noch etwa 12° vom heutigen Polarstern entfernt.

Bleibt die Frage, wodurch die für die Präzession verantwortliche Taumelbewegung der Erdachse entsteht. Die Antwort mußte nicht nur Hipparch, sondern überhaupt so lange verborgen bleiben, bis man in der von *Isaac Newton* (1643–1727) entdeckten und in sein berühmtes Gesetz gefaßten Wirkung der allgemeinen Massenanziehung (Gravitation) die natürliche Ursache aller Bewegungen von Körpern im Weltraum zu erkennen begann. Weiterhin bedurfte es genauer Kenntnisse über die Gestalt der Erde; denn wie man schließlich herausfand, spielt beim Zustandekommen der Präzessionsbewegung der Einfluß der Anziehungskräfte von Sonne und Mond die ausschlaggebende Rolle. Wegen seiner größeren Nähe leistet der Mond, dessen Bahn in dieser Hinsicht nicht allzusehr von der Ekliptik abweicht und somit eine gemeinsame Wirkung beider Himmelskörper ergibt, sogar den größeren Beitrag zur *Lunisolarpräzession* (lat. luna = Mond, sol = Sonne; solar = auf die Sonne bezogen), wie die vollständige



Zusammenwirken von Sonne und Mond beim Entstehen der Präzessionsbewegung der Erdatmosphäre

Blau: Äquatorwulst der Erde; rote Pfeile: Wirkungsrichtung von Sonnen- und Mondgravitation; gelbe Pfeile: aufrichtend wirkende Störkraft; weiß-schwarzer Richtungspfeil: Präzessionsbewegung der Erdatmosphäre

Bezeichnung lautet, und zwar verursacht er von den 50'' rund 34'', während auf den Einfluß der Sonne 16'' entfallen.

Die Erde ist bekanntlich in erster Näherung als Rotationsellipsoid anzusehen; sie ist folglich abgeplattet und zeigt einen sogenannten Äquatorwulst. Die Neigung des Erdäquators gegen die Ekliptik führt nun dazu, daß dieser Wulst während eines Umlaufs der Erde um die Sonne mit wechselnder Richtung und Stärke durch die Mond- und die Sonnengravitation in die Ekliptikebene „hineingezogen“ wird. Wir können auch sagen, die vereinten Anziehungskräfte von Mond und Sonne versuchen ununterbrochen, die schräg auf der Ekliptik stehende Erdatmosphäre „aufzurichten“. Diesem Bemühen setzt aber die rotierende Erde einen Widerstand entgegen, der sich so auswirkt, daß ihre Rotationsachse den angreifenden Gravitationskräften seitlich ausweicht und damit eben zu „taumeln“ beginnt. Wir haben es hier mit dem gleichen Präzessionseffekt zu tun, der sich auch sonst bei schräg stehenden Kreisel beobachten läßt;

denn die rotierende Erde ist letztthin selbst nichts anderes als ein gigantischer Weltraum-, „Kreisel“.

Bei näherem Hinsehen ergibt die Taumelbewegung der Erdachse aber keinen ganz glatten Kegelmantel. Der Hauptbewegung des wandernden Himmelspols überlagern sich nämlich fortlaufende wellenförmige Schwankungen, die den Kegelmantel wie geriffelt erscheinen lassen. Diese Wellen sind jedoch nur sehr klein. Deshalb konnten sie auch erst 1747 von dem englischen Astronomen *James Bradley* (1692–1762) mit verfeinerten Beobachtungsmethoden nachgewiesen werden. Man bezeichnet diese Erscheinung als *Nutation* (lat. *nutatio* = Schwankung). Den Hauptanteil liefert eine periodische Schwankung von rund 18,66 Jahren, die auf eine besondere Bewegung der Mondbahn zurückgeht. Die Mondbahnebene bildet mit der Ekliptikebene einen Winkel von rund 5°; die beiden Schnittpunkte werden *Bahnknoten* genannt, ihre Verbindungslinie heißt *Knotenlinie*. Ähnlich wie der Frühlingspunkt wandern auch die Knoten der Mondbahn auf der Ekliptik dem umlaufenden Mond entgegen, wobei sie zu einem Umlauf die erwähnten 18,66 Jahre benötigen. Während die Dauer eines Mondumlaufs um die Erde, allgemein als *Monat* bezeichnet, zwischen zwei Passagen des gleichen Sterns (*siderischer Monat*) 27 Tage 7 Stunden 43 Minuten 12 Sekunden beträgt, ist der *drakonitische Monat* (lat. *draco* = Drache) – die Zeit bis zur Rückkehr des Mondes zum gleichen Bahnknoten – wegen der *Knotenwanderung* etwa 3 Stunden kürzer. Knotenbewegung der Mondbahn und drakonitischer Monat werden für uns später noch im Zusammenhang mit der Sonne von Interesse sein.

Die Sorgen der Kalendermacher

Bisher war immer nur von der Sonne als Kalendergestirn und von den aus ihrem scheinbaren Lauf abgeleiteten kalendarischen Einheiten Sonnentag und Sonnenjahr die Rede. Ein darauf beruhendes Kalenderwesen – mit Zählung und fester Einteilung der Jahre – konnte jedoch erst geschaffen werden, als die Menschen die durchaus nicht von Anfang an vorhandene Fähigkeit zum Auszählen und Aufzeichnen größerer Einheiten gewonnen hatten. Zuvor behalf man sich wahrscheinlich mit einem dem allgemeinen Natur- und Jahreszeitenrhythmus angepaßten *Naturjahr*, dessen genaue

Länge zwar noch nicht festzulegen war, das aber schon gewisse Unterteilungen nach jährlich wiederkehrenden Hauptphasen, wie Trocken- und Regenzeit oder Saat- und Erntezeit, enthielt.

Auch später kam man nicht überall gleich auf das Sonnenjahr als kalendarische Grundeinheit. Eher bot sich der Mond als Kalendergestirn an; denn seine wechselnden Lichtgestalten (Mondphasen) ließen sich als optisch leicht zu erfassender „Uhrzeiger“ verwenden, und der Zeitraum zwischen zwei Neulichtphasen des Mondes, der *synodische Monat*, ergab mit seinen rund 30 Tagen ein bequemes Zählmaß. So gelangte man anfangs verschiedentlich zu einem Kalender, der auf dem Tag als kleinster Einheit, dem (synodischen) Monat und einem *Mondjahr* als größter Einheit von 12 Monaten beruhte.

Allerdings fand man sicher schon bald heraus, daß der synodische Monat – genaue Länge 29 Tage 12 Stunden 44 Minuten 3 Sekunden – als Jahresteilmaß doch recht ungünstig ist; denn 12 synodische Umläufe (*Lunationen*) ergeben nur rund 354 Tage, was beim Anpassen dieses Kalenders an den von der Sonne abhängigen Jahresrhythmus erhebliche Probleme aufwirft. Es gab schon im alten Babylon Versuche, diese Schwierigkeiten zu überwinden, indem man Großzyklen in die Kalenderrechnung einführte, die eine Verbindung zwischen Mondjahr und Sonnenjahr herstellten. So beruht der 433 v.u.Z. von dem Griechen *Meton* (geb. um 460 v.u.Z.) vorgeschlagene und nach ihm benannte Zyklus auf der annähernden zeitlichen Übereinstimmung von 19 Sonnenjahren mit 235 Lunationen. Das daraus erhaltene *gebundene Mondjahr* heißt auch *Lunisolarjahr*. Sofern das reine Mondjahr als Kalendergrundlage verwendet wurde, wie beispielsweise im Römischen Reich vor *Julius Cäsar* (100–44 v.u.Z.), mußte durch behördlich festgelegte Einfügungen von *Schalttagen* von Zeit zu Zeit eine Anpassung erfolgen.

Die ersten, die ein reines Sonnenjahr als Kalenderbasis benutzten, waren die Ägypter. Aus den schon erwähnten Siriusbeobachtungen war ihnen auch die Länge des Sonnenjahres mit 365,25 Tagen recht genau bekannt. Sie unterteilten es in 12 Monate zu je 30 Tagen, dazu kamen 5 Tage, die dem letzten Monat angehängt wurden und wohl Festtage darstellten. Bei dieser Zählweise werden aber in jedem Jahr 0,25 Tage „unterschlagen“, was nach 4 Jahren schon zu einem Fehlbetrag von 1 Tag und nach 120 Jahren von 1 Monat führt. Folglich wandert der Zeitpunkt der Frühljahrs-Tagundnachtgleiche allmählich durch das ganze Kalenderjahr. Zu

einem Durchlauf werden, wie wir leicht ausrechnen können, rund 1460 Jahre benötigt. Dieser Zyklus war auch schon den Ägyptern bekannt und wurde von ihnen als die *Sothisperiode* bezeichnet, nach dem ägyptischen Namen *Sothis* für Sirius. Seit 238 v. u. Z. ging man dann dazu über, die Übereinstimmung des Kalenders mit dem tropischen Jahr durch einen alle 4 Jahre eingefügten Schalttag herzustellen. Dieses *Schaltjahrverfahren* vermochte sich allerdings in Ägypten nicht durchzusetzen.

Julius Cäsar, der den Sonnenjahr-Kalender bei seinen Eroberungszügen in Ägypten kennengelernt hatte, griff diese Zeitrechnung auf und führte sie schließlich auch in Rom ein. Ab 46 v.u.Z. wurden das *Julianische Jahr* (nach *Julius Cäsar*) mit 365,25 Tagen und die Schalttechnik zur gesetzlichen Grundlage des Kalenderwesens im römischen Machtbereich. Zuvor war die Zeitrechnung im alten Rom so verworren gewesen, daß *François-Marie Voltaire* (1694–1778) einmal sarkastisch sagen konnte, die römischen Feldherren hätten dauernd Triumphe gefeiert, aber nie gewußt, *wann* sie triumphierten.

Übrigens stammt die etwas eigenwillig anmutende Festlegung der unterschiedlichen Monatslängen, wie sie sich bis heute im Kalender erhalten hat, ebenfalls von Cäsar. (Eine Ausnahme bilden die Monate August, der bis zur Herrschaft von *Augustus* [63 v.u.Z. – 14. u.Z.] 30, und Februar, der 29 beziehungsweise 30 Tage hatte.) Dabei erkennen wir an einigen der aus dem Lateinischen abgeleiteten Monatsnamen – September (lat. septem = sieben), Oktober, November, Dezember –, daß anfangs der März der erste Monat des Jahres war und demzufolge der Februar der letzte, weshalb dieser wohl auch weniger Tage hat.

Der von Cäsar eingeführte *Julianische Kalender* behielt viele Jahrhunderte Gültigkeit, zumal ihn schließlich die christliche Kirche als verbindliche Grundlage der kirchlichen Festtagsrechnung angenommen hatte. In den griechisch-orthodoxen Ländern galt er sogar bis 1923.

Aber wie man nach einiger Zeit erkennen mußte, war auch dieser Kalender durchaus nicht frei von Mängeln. Immerhin beging man ja mit der glatten Rechnung von 0,25 Tagen als Korrekturwert für die Schaltungen im Julianischen Jahr doch wieder einen Fehler von jährlich rund 11 Minuten gegenüber dem tropischen Jahr. Dieser Fehler hatte sich bis zum 16. Jahrhundert bereits auf 10 Tage summiert. Papst *Gregor XIII.* (1502–1585) veranlaßte schließlich im Jahre 1582 die Einführung des *Gregorianischen Kalenders*. Um den entstandenen Fehler von 10 Tagen

auszugleichen, wurde auf den 4. Oktober 1582 unmittelbar folgend der 15. Oktober angesetzt. Zur Korrektur künftiger Abweichungen legte man fest, daß die normale Schaltregel – alle die Jahre zu Schaltjahren (Februar 29 Tage) zu erheben, deren Jahreszahl ohne Rest durch 4 teilbar ist – für volle Jahrhunderte (1700, 1800 usw.) nicht gelten sollte. Davon wurde jedoch wiederum jedes vierte Jahrhundert ab 1600, also 2000, 2400 usw., ausgenommen.

Durch diese verfeinerte Schaltregel konnte das *Gregorianische Jahr*, das heute die Grundlage der Zeitrechnung in allen zivilisierten Bereichen der Erde bildet, bis auf rund 26 Sekunden der Länge des tropischen Jahres angepaßt werden. Erst nach 3000 Jahren wird die Abweichung zwischen Kalender und Jahreslauf der Sonne wieder auf 1 Tag angewachsen sein.

Auch das Spiel der Finsternisse folgt festen Regeln

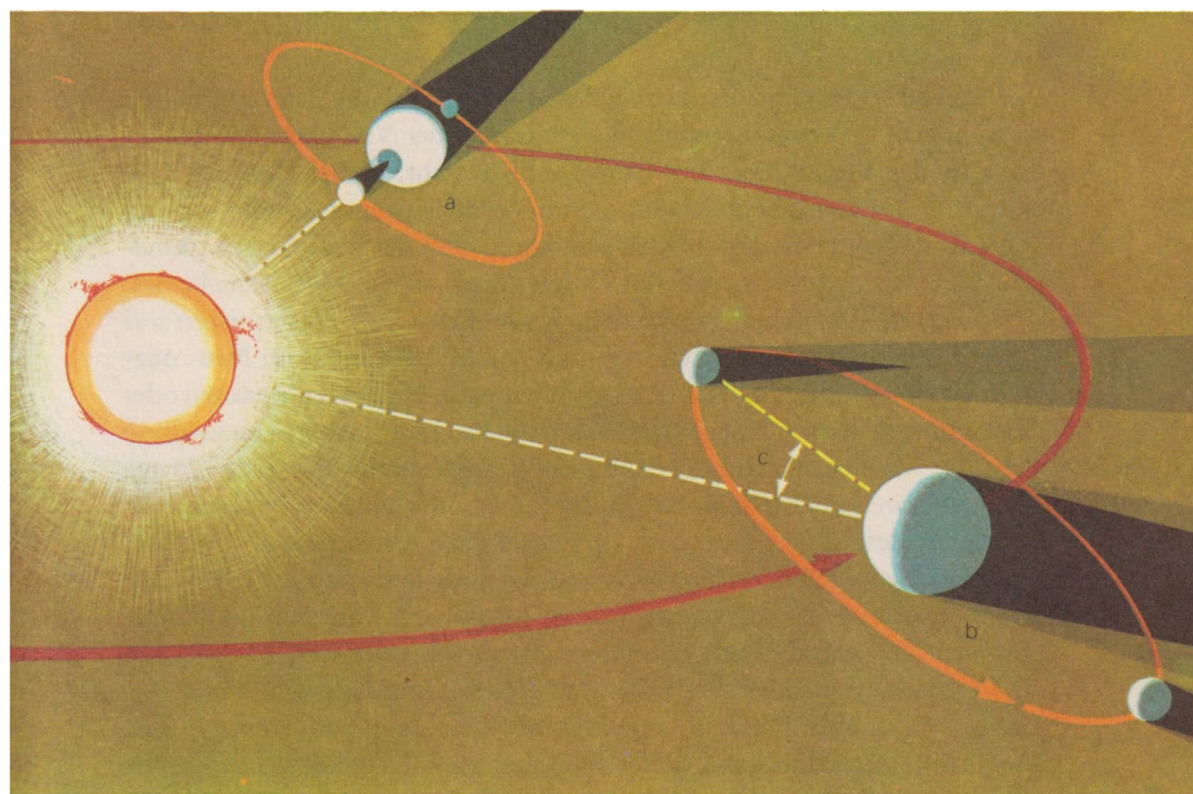
Die Sternkundigen des Altertums, die nach einem brauchbaren Kalender suchten, verfügten nur über unvollkommene Beobachtungstechniken. Es gab jedoch bestimmte Himmelserscheinungen, die ihnen zu ziemlich genauen Markierungen des Sonnenlaufs gegenüber den Sternen und vor allem gegenüber dem Mond verhelfen konnten: die Sonnen- und die Mondfinsternisse. Das über lange Zeiträume erhaltene Beobachtungsmaterial reichte schließlich sogar aus, Wiederholungstendenzen oder Zyklen im Auftreten der Finsternisse zu erkennen und auf dieser Grundlage teilweise schon recht treffende Vorhersagen künftiger Ereignisse zu machen, obwohl man von den eigentlichen Bedingungen für das Zustandekommen der Finsternisse noch keinerlei Ahnung hatte. Letzteres galt zumindest für die altbabylonischen und für die altchinesischen Astronomen.

Für wie wichtig man im alten China die Aufgabe der Sternkundigen ansah, Himmelsereignisse vorherzusagen, geht aus einer der ältesten überlieferten chinesischen Chroniken hervor. In köstlich bildhafter Sprache wird berichtet, daß sich die beiden würdigen Astronomen des kaiserlichen Hofes, Hi und Ho mit Namen, eines Tages dem unziemlichen Wohlleben, der Völlerei und der Trunksucht zu ergeben begannen. Darüber vernachlässigten sie immer mehr ihre beruflichen Pflichten, und –

wie der Chronist vermeldet – „die Häuser des Himmels gerieten durcheinander“. So versäumten es die beiden weinseligen Astronomen schließlich auch, ihrem hohen Gebieter, seinem Hof und dem „gemeinen Volke“ eine Sonnenfinsternis vorherzusagen. Als dieses Ereignis dann eintrat, hub „eine entsetzliche Furcht unter allem Volke“ an, das in wilde Panik geriet, weil es fest davon überzeugt war, daß es diesmal dem Tagesgestirn endgültig an den Kragen ginge. Und nur dem infernalischen Geschrei und Lärmen der Massen sowie ihren inbrünstigen Gebeten war es zu danken, daß der Drache der Finsternis die Sonne schließlich doch wieder freigeben mußte. Für die Herren Hi und Ho hatte das übersehene Himmelsereignis allerdings ein äußerst peinliches Nachspiel. Der im Gedanken an seine ausgestandenen Ängste zornbebende Herrscher ließ sich vom Henker die Köpfe der beiden Unglücklichen vor die Füße legen. Wie man in neuerer Zeit durch Rückrechnung ermittelt hat, müßte diese Sonnenfinsternis am 22. Oktober 2137 v. u. Z. stattgefunden haben.

Als rechnerisches Hilfsmittel für die Voraussage von Sonnen- und Mondfinsternissen stand den altchinesischen und altbabylonischen Sternkundigen offenbar schon die Kenntnis einer bestimmten Wiederholungstendenz in den Finsternisfolgen zur Verfügung, die allgemein als die chaldäische oder babylonische *Sarosperiode* bekannt wurde. Es handelt sich dabei um einen Zeitraum von rund 18 Jahren und 11 Tagen, nach dem sich eine Finsternis auf fast gleiche Weise wiederholt. Wie diese Periode zustande kommt, verstehen wir, wenn wir von den wirklichen, heliozentrischen Beziehungen zwischen Erde, Mond und Sonne sowie von den Voraussetzungen für das Auftreten von Finsternissen ausgehen.

Wir haben schon gesagt, daß der um die Erde laufende Mond eine Bahn beschreibt, die um etwa 5° gegen die Ekliptik geneigt ist. Bei einem synodischen Umlauf entstehen in Folge der wechselnden Stellungen des Mondes zur Erde und seiner Beleuchtung durch die erheblich weiter entfernte Lichtquelle Sonne bekanntlich die Mondphasen. Dabei kann der Mond in seiner Neulichtphase so zwischen Sonne und Erde hindurchziehen, daß sein Schatten auf die Erdoberfläche fällt. Dort, wo der Kernschatten des Mondes auftritt, findet dann eine *totale Sonnenfinsternis* statt. Der Schattenfleck ist wegen der Beziehungen zwischen Größe und Entfernung von Mond und Erde auch im günstigsten Fall nur klein und zeichnet, in Folge der Bahnbewegung des Mondes und der Erdrotation, in westöstlicher Richtung eine streifenförmige Spur auf die Erdoberfläche, die schon im



Entstehen der Verfinsterungen von Sonne und Mond

a = Neu- und Vollmond gehen durch die Bahnknoten (Finsternisse);

b = Neu- und Vollmond in maximaler Abweichung von der Erdbahnebene

(keine Finsternisse); c = Neigung der Mondbahn gegen die Erdbahnebene

ersten Kapitel erwähnte *Totalitätszone*. Bei senkrechtem Auftreffen des Kernschattens kann der maximale Durchmesser des kreisförmigen Schattenflecks etwa 264 km betragen. Unter Annahme einer mittleren Schattengeschwindigkeit von 34 km/min vermag die totale Verfinsterung für einen auf der Mittellinie der Totalitätszone gelegenen Ort höchstens 7,6 Minuten zu dauern.

Die veränderlichen Entfernungsverhältnisse zwischen Erde und Mond können es aber auch mit sich bringen, daß der Mondschaten zu kurz ist, um die Erdoberfläche zu erreichen. In diesem Fall erscheint der Mond auf der Erde im Zentralbereich der Finsternis während der ganzen Bedeckung

kleiner als die Sonnenscheibe, und man erlebt eine *ringförmige Sonnenfinsternis*.

Während seines Umlaufs vermag der Mond auch durch den Erdschatten zu wandern, und zwar ausschließlich während der Volllichtphase, weil er dann in der Verbindungslinie Sonne – Erde steht. Dabei läßt sich also eine *Mondfinsternis* beobachten, die im Verfinsterungsgrad und -verlauf von Fall zu Fall recht verschieden sein kann, weil der Erdschatten grundsätzlich einen mehrfach größeren Durchmesser als die Mondscheibe hat.

Wie leicht einzusehen ist, können beide Arten von Finsternissen nur unter der Bedingung eintreten, daß sich der Mond einmal im Neu- oder im Volllicht befindet, zugleich aber auch einen der beiden Bahnknoten oder dessen unmittelbaren Nachbarbereich passiert. Trifft letzteres nicht zu, so zieht der Mondschaten bei Neumond über oder unter der Erde hinweg beziehungsweise der Vollmond wandert oben oder unten am Erdschatten vorbei. Beides ist bei den rund 12 synodischen Umläufen des Mondes durchaus die Regel; denn die Bewegung von Erde und Mond um die Sonne bringt die in erster Näherung raumstabile Mondbahn während eines Jahres praktisch nur zweimal mit der Knotenlinie mehr oder weniger genau in die Verbindungslinie Sonne–Erde. Aus diesem Grund entstehen nicht bei jedem synodischen Umlauf des Erdtrabanten eine Sonnen- und eine Mondfinsternis. Man kann dieses Bild aber auch so deuten, daß Finsternisse immer nur dann zustande kommen, wenn sich der Mond in unmittelbarer Nähe der Ekliptik befindet. Dieser Zusammenhang muß den Himmelsbeobachtern schon sehr früh aufgefallen sein und hat schließlich dem Großkreis beziehungsweise der Linie am Himmel, längs der sich immer wieder die Finsternisse ereigneten, die Bezeichnung Ekliptik eingetragen; denn dieses aus dem Griechischen stammende Wort bedeutet eigentlich nichts anderes als *Finsternislinie*.

Nun können wir auch das Zustandekommen der Sarosperiode erklären. Ausgangspunkt bilden die unterschiedlichen Monatslängen des synodischen (29,53059 Tage) und des drakonitischen (27,21222 Tage) Umlaufs, die als Grundwerte für Finsternisperioden bestimmend sind. Läßt sich im weiteren eine Zeitspanne finden, die beide Monatslängen als gemeinsames ganzzahliges Vielfaches umschließt, dann hat man den Zeitraum, nach dem sich eine stattgefundene Finsterniserscheinung unter annähernd gleichen Ablaufbedingungen wiederholt. Der Saroszyklus von 18 Jahren und rund 11 Tagen stellt die kleinste Zeitspanne dar, die dieser Forderung ent-

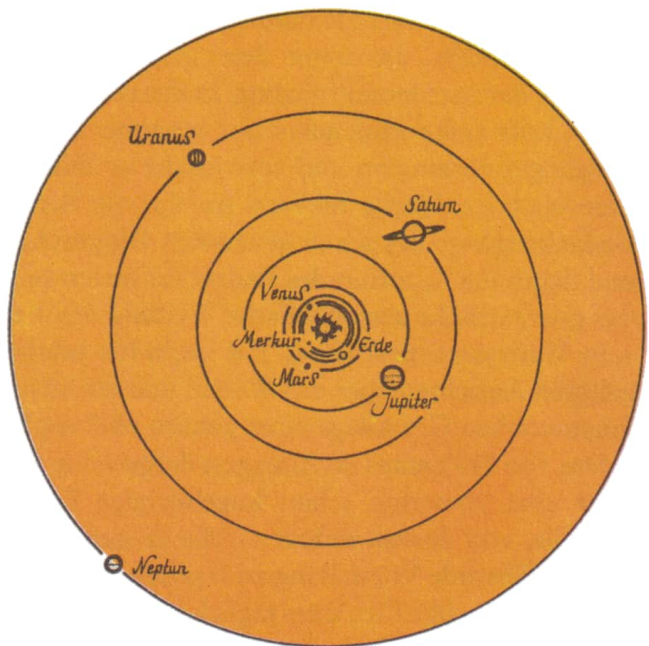
spricht. Noch genauere Übereinstimmungen im Verlauf der Finsternisse erhält man jedoch bei Verdreifachung dieses Zeitraums.

Mit zunehmender Verfeinerung der Beobachtungs- und Meßtechnik sowie mit den seit Kepler und Newton wachsenden Einsichten in die physikalischen Grundlagen der Gestirnsbewegungen wurde schließlich der mathematische Apparat zur Berechnung des Eintritts und Ablaufs von Sonnen- und Mondfinsternissen immer präziser. Das erwies sich um so nutzbringender, als man in den Sonnenfinsternissen ausgezeichnete natürliche Hilfsmittel zum Studium der physikalischen Natur der Sonne zu erkennen begann. Der scheibenförmige dunkle Schirm des Mondkörpers, den das Naturereignis von der Erde aus annähernd so groß wirken läßt wie die Sonnenscheibe, macht bei einer Sonnenfinsternis solare Erscheinungen sichtbar, die tiefe Einblicke in die Beschaffenheit des Tagesgestirns ermöglichen. Das Entsenden von speziellen wissenschaftlichen Expeditionen in die jeweiligen Finsternisgebiete wurde zu einer wichtigen Methode sonnen- und astrophysikalischer Forschung.

Unter diesen Gesichtspunkten kommt einem Sammelwerk hervorragende Bedeutung zu, das der österreichische Astronom *Theodor von Oppolzer* (1841–1886) im Jahre 1873 geschaffen hat und das sozusagen ein „Kursbuch“ der Finsternisse darstellt. In dieser unter dem Namen „Kanon der Finsternisse“ bekannt gewordenen Arbeit sind detaillierte Angaben und Darstellungen des Verlaufs aller Sonnen- und Mondfinsternisse zwischen 1207 v. u. Z. und 2161 u. Z. enthalten. Auf Karten ist jeweils für die Finsternisse eines gewissen Zeitraums der Verlauf der Totalitätszonen abgebildet. Insgesamt 8000 Sonnen- und 5196 Mondfinsternisse verzeichnet das Werk, das auch in Zukunft noch, trotz Computerberechnungen, eine wichtige Grundlage für die Vorbereitung auf Finsterniserscheinungen sein wird.

Der hier nur in groben Umrissen sichtbar gewordene lange Weg vom ägyptischen Sonnenjahr und seinen Vorläufern zum „Kanon der Finsternisse“ Oppolzers und zu den modernen Finsternisexpeditionen der Astrophysiker läßt uns den geschichtlichen Wandel in den Ansichten und Kenntnissen über das Gestirn Sonne verfolgen. Mit zunehmender Entmythologisierung der Gestirnswelt und dem Aufkommen einer wissenschaftlichen Betrachtungs- und Denkweise entwickelte sich schließlich auch ein immer realeres Bild der Sonne als Zentralgestirn eines Systems von Weltkörpern, in dem unsere Erde ihre engere kosmische Heimat hat.

Die Sonne und ihre Familie



Die Erde – das Zentrum der Welt?

Die vorangegangenen Betrachtungen über Sonne, Zeitrechnung und Kalenderwesen haben uns gezeigt, daß man die zeitlichen Veränderungen der Himmelserscheinungen hinreichend genau allein aus den scheinbaren Bewegungen von Sonne, Mond und Sternen ableiten kann. Für die von mythologisch-religiösen Vorstellungen beeinflussten Himmelsbeobachter des Altertums waren alle scheinbaren Bewegungen der Gestirne mit den wahren identisch, weil für sie ihr eigener Standpunkt, die Erde, den Mittelpunkt des Weltalls bildete und somit keine andere Deutung in Betracht kam.

Das so entstehende *geozentrische Weltbild* wurde erstmalig in dem berühmten Werk des Alexandriners *Claudius Ptolemäus* (nach 83 – nach 161) dargestellt, das unter dem späteren Namen *Almagest* in die Geschichte der Astronomie einging. In dieser zwischen 150 und 160 vollendeten Schrift faßte Ptolemäus das gesamte astronomische Wissen seiner Vorgänger zusammen und entwickelte es durch eigene Arbeiten weiter. Eine wichtige Quelle bildeten für ihn die Beobachtungsergebnisse und Gedankengänge des schon genannten Hipparch. Der Einfluß des Werkes und damit die Autorität des Ptolemäus waren so stark, daß man bis heute das geozentrische astronomische Weltbild meist einfach als *ptolemäische Weltsystem* bezeichnet. Die darin für Jahrhunderte verbindlich festgelegten Ansichten über das Weltall und die Stellung der Erde wurden zur dogmatischen Grundlage einer ganzen philosophischen Weltanschauung.

Das von Ptolemäus im *Almagest* dargestellte System sah die Erde – und zwar eine immerhin schon kugelförmige Erde – im Mittelpunkt des Weltalls, von dessen wahrer Größe er sich allerdings noch nicht einmal eine annähernde Vorstellung zu machen vermochte. Alle Bewegungen der Gestirne, einschließlich ihres täglichen Umlaufs am Himmel, vollzogen sich

danach als wahre Bewegungen auf der geometrisch einfachsten geschlossenen Kurve, dem Kreis. Um diese Bahnen irgendwie zu „stützen“, nahm man wieder zu alten mystifizierenden Vorstellungen Zuflucht und erfand geheimnisvolle unsichtbare Kristallsphären als Träger der Gestirne oder ihrer Bahnen. Da Ptolemäus noch keinerlei Kenntnis von dem wahren Bewegungsmechanismus der Gestirne besaß, mußte er es bei dem Versuch bewenden lassen, die Bewegungsabläufe aus rein geometrischer Sicht zu deuten.

Als aber die Beobachtungen immer genauer wurden und damit größere Feinheiten in den Bewegungsabläufen erkennen ließen, bereitete die Erklärung vieler Befunde zunehmende Schwierigkeiten. Um das Gesehene zu deuten, war man zu immer komplizierteren „Basteleien“ an dem geometrischen Mechanismus des ptolemäischen Weltsystems gezwungen, so daß schließlich mehr und mehr Zweifel daran aufkamen, ob denn seine Voraussetzungen tatsächlich zuträfen. Dennoch blieb das geozentrische Weltbild über ein Jahrtausend lang die allein gültige astronomische Grundlage der Weltanschauung. Dabei spielte bis weit in das Mittelalter hinein und auch noch danach der Einfluß religiöser Dogmen, wie sie von der christlichen Kirche vertreten wurden, die Hauptrolle. Das ptolemäische Weltsystem stimmte mit den Anschauungen der Bibel überein und galt wie diese als unantastbar. Jedem Versuch einer naturwissenschaftlich fundierten Widerlegung des geozentrischen Weltbildes setzte der Klerus seine gesamte geistliche und weltliche Macht entgegen, bis zur geistigen Entmündigung und sogar physischen Vernichtung der ihm auf diesem Gebiet erwachsenen Gegner.

Copernicus setzt die Sonne in den Mittelpunkt

Es ist das Verdienst eines der kühnsten Denker des Mittelalters, des polnischen Arztes und Astronomen Nicolaus Copernicus, mit der Veröffentlichung seiner Untersuchungen und Überlegungen zur Struktur des Weltsystems in dem 1543 erschienenen Werk „De revolutionibus orbium coelestium“ („Über die Umdrehungen der Himmelskörper“) das Rüstzeug für die endgültige Überwindung des geozentrischen Weltbildes geliefert zu haben. Von einer gründlichen Analyse des astronomischen Wissens seiner

Zeit ausgehend, nahm er die längst fällige Umdeutung der täglichen Himmelsumdrehung in die Eigenrotation der Erde sowie des scheinbaren Jahreslaufs der Sonne in die jährliche Bahnbewegung des Planeten Erde um die Sonne vor. In seinem *heliozentrischen Weltsystem* wurde die Erde ein Himmelskörper wie andere auch, ohne jede Vorzugsstellung. Einzig und allein der Mond blieb ihr weiterhin als Trabant. Ein ebenso bedeutsamer Wandel vollzog sich mit der Sonne. Sie rückte in den Mittelpunkt dieses Systems von Weltkörpern und wurde zum Zentralgestirn für die Umlaufbewegungen der Erde und der anderen Planeten sowie der Kometen.

Wenn es auch noch etliche Zeit brauchte, bis sich das kopernikanische System in vollem Umfang gegen den Widerstand der geistigen Verfechter des Geozentrismus durchgesetzt hatte, war doch von nun an der Boden bereitet, um den Einfluß naturwissenschaftlichen Forschens und Denkens auf das astronomische Weltbild ständig wachsen zu lassen. Nach und nach verloren sich die letzten Reste mystisch-religiöser Gestirnsbetrachtung, wurde das Bild von der Körperhaftigkeit der Gestirne, ihrer Größe und Entfernung genauer. An die Stelle mystifizierender Spekulationen trat das Wissen um die Existenz von Naturgesetzen. Und damit bekamen die Vorstellungen von der Sonne als Weltkörper ebenfalls eine neue, realistische Qualität.

Aber auch nachdem Copernicus die Sonne in ihren wirklichen Rang als Zentralkörper des Planetensystems versetzt hatte, blieb zunächst noch eine ganze Reihe von Detailfragen offen. Vor allem war man noch nicht in der Lage, die Ursache der zentralen Stellung der Sonne und der offensichtlichen Abhängigkeit der Planeten von diesem Zentralkörper anzugeben, weil die dafür notwendigen physikalischen Erkenntnisse fehlten. Unter anderem bereitete es nach wie vor Schwierigkeiten, die Bewegungen der Planeten – nun um die Sonne – mit aller Genauigkeit zu beschreiben. Auch Copernicus hielt an der Vorstellung fest, daß sich die Planeten auf Kreisbahnen bewegen, weil ihm der Kreis die vollkommenste geometrische Form für Umlaufbahnen zu sein schien und solche Ideale wie Vollkommenheit und Harmonie nach damaligen Ansichten die allgemeinen Grundlagen des Weltenbaus bilden sollten. Wir sehen daran, daß mit dem Übergang zum heliozentrischen Weltbild noch längst nicht alle idealistischen spekulativen Vorstellungen überwunden werden konnten.

Vor allem aber war die von Copernicus angenommene Geometrie des

Planetensystems selbst nicht frei von Mängeln; denn es blieb im Grunde bei den gleichen unerklärlichen Abweichungen zwischen Beobachtung und Rechnung, wie man sie auch schon vom ptolemäischen Weltsystem her kannte. Das neue Prinzip schien in dieser Hinsicht also keinen Fortschritt darzustellen, was erheblich zu seiner Kritik beitrug. Nur durch eine treffendere Erklärung der Planetenbewegungen auf kopernikanischer Grundlage konnte eine wesentliche Stütze für das neue Weltbild gewonnen werden.

Kepler findet die Gesetze aller Bewegungen um die Sonne

Den entscheidenden Schritt zur weiteren Annäherung an die Wirklichkeit getan zu haben bleibt das Verdienst Johannes Keplers. Mit seinen gründlichen mathematischen und rechnerischen Untersuchungen der Planetenbewegungen, unter Verwendung der Beobachtungen *Tycho Brahes* (1546–1601), gelang es ihm schließlich, das Problem zu lösen. Die außerordentliche Genauigkeit der Beobachtungen Tycho Brahes bildete dafür eine wesentliche Voraussetzung; denn nur so konnten die Feinheiten der Planetenbewegungen trotz unvermeidbarer Beobachtungsfehler hinreichend sicher erfaßt werden. Zuvor war es eigentlich immer unklar geblieben, ob die aufgetretenen Differenzen zwischen beobachteten und berechneten Planetenörtern zu Lasten der Beobachtungsgenauigkeit oder der theoretischen Grundlagen gingen. Tycho Brahe verfügte noch nicht über Fernrohre als Hilfsmittel der astronomischen Meßtechnik, aber mit den meist von ihm selbst geschaffenen oder verfeinerten Meßgeräten seiner Zeit (Quadrant und ähnlichen) und einer höchstentwickelten Beobachtungskunst war er bis an die Grenze der mit diesen Instrumenten erreichbaren Genauigkeit vorgedrungen.

Grundlage der Untersuchungen Keplers bildeten vornehmlich die umfangreichen Braheschen Materialien zur Ortsbestimmung des Planeten Mars. Da die Beobachtungen genau genug waren, mußten die verbleibenden Abweichungen von einem Fehler in den Voraussetzungen herrühren. Diesen Fehler fand Kepler dann in der Annahme kreisförmiger Planetenbahnen. Nach einigen unbefriedigenden Versuchen mit anderen Bahnformen kam er schließlich auf die Lösung, für die Planetenbewegung ellipti-

sche Bahnen anzunehmen. An Hand der nunmehr weitgehenden Übereinstimmung zwischen den Beobachtungen Tycho Brahes und seinen eigenen Rechnungen konnte er einen ersten unumstößlichen Beweis für die Richtigkeit des heliozentrischen Weltsystems liefern.

Bei seinen mathematischen Bemühungen fand Kepler dann auch die ersten beiden seiner berühmten drei *Gesetze der Planetenbewegung*, die er 1609 in dem grundlegenden Werk „*Astronomia nova*“ veröffentlichte:

1. Die Bahn eines Planeten ist eine Ellipse, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.

2. Der Radiusvektor eines Planeten (Verbindungsline Sonne–Planet) überstreicht in gleichen Zeiträumen gleich große Flächen.

Genau 10 Jahre später, nach weiteren langwierigen Untersuchungen, fügte Kepler noch ein drittes Gesetz hinzu, das in sein Werk „*Harmonices mundi*“ („Weltharmonien“) aufgenommen wurde. Es besagt:

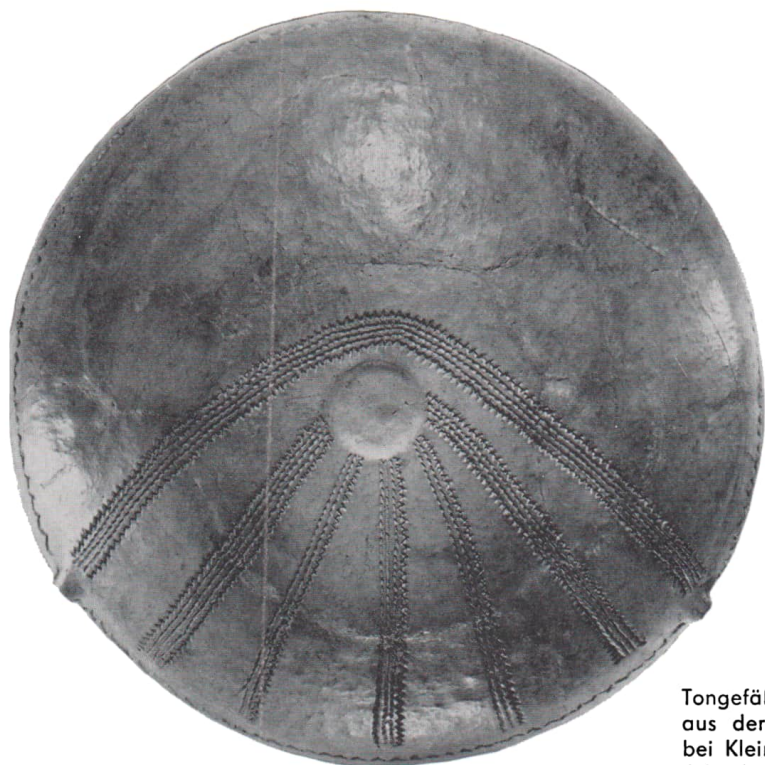
3. Die Quadrate der Umlaufzeiten der Planeten verhalten sich wie die Kuben (dritten Potenzen) ihrer mittleren Entfernungen von der Sonne.

Mit der Entdeckung dieser drei Gesetze waren die ersten Ansätze zu der modernen *Himmelsmechanik*, der Lehre von den wahren Bewegungen der Himmelskörper, geschaffen. Durch das erste Keplersche Gesetz wird die Stellung der Sonne in einen genau definierten Zusammenhang mit der geometrischen Form der Planetenbahnen gebracht. Das zweite macht die Ungleichförmigkeit der Bewegung eines Planeten in seiner Umlaufbahn verständlich. Danach läuft er im sonnennächsten Punkt seiner Bahn, dem *Perihel*, schneller als im sonnenfernsten, dem *Aphel*. Das entspricht für die Erde der Beobachtung des Hipparch über die verschieden langen Jahreszeiten. Keplers drittes Gesetz stellt eine außerordentlich wichtige Beziehung zwischen den Hauptparametern einer Umlaufbahn her. Mit seiner Hilfe konnte unter anderem erstmalig eine genauere relative Skala der Planetenabstände von der Sonne gewonnen werden, wobei die Entfernung Sonne—Erde als Einheitsmaßstab dient.

Hinter den Aussagen des zweiten und des dritten Keplerschen Gesetzes zeichnete sich übrigens schon in ersten Umrissen die Antwort auf die Frage nach der Ursache der Planetenbewegungen um die Sonne ab, wenn auch Kepler selbst das dafür maßgebende dynamische Naturprinzip nicht mit letzter Klarheit zu erkennen vermochte. Denn die gesetzmäßigen Grundlagen der Dynamik, der Lehre von den bewegenden Kräften, wurden zum größten Teil erst einige Zeit nach seinen eigenen, noch immer rein kinema-



Sonniger Urlaub



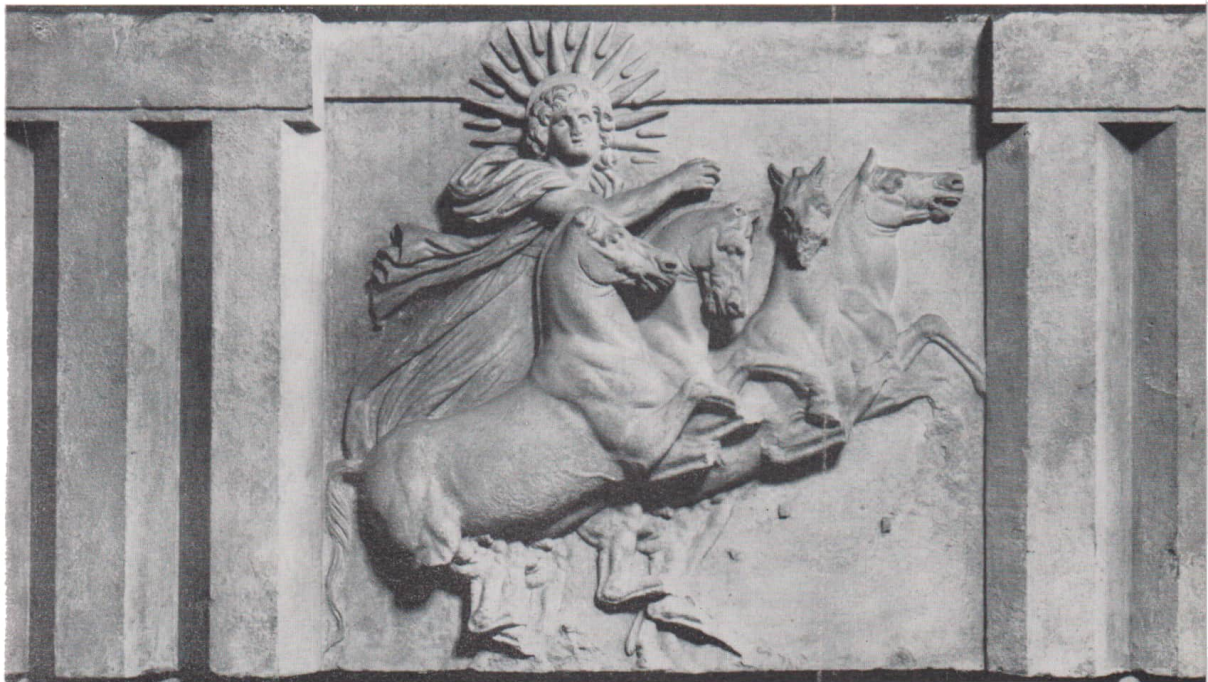
Tongefäße mit Sonnenmotiven
aus der Jungsteinzeit, gefunden
bei Klein Möhringen, Kr. Stendal
(oben) und bei Hohlstedt, Kr.
Sangerhausen (Landesmuseum
für Vorgeschichte Halle)

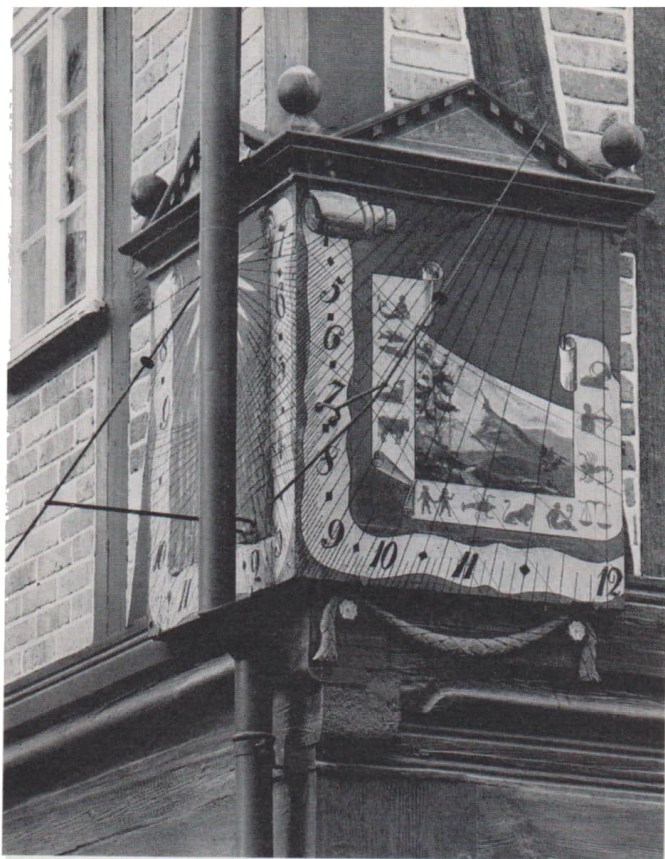


Falkenköpfiger Gott Re-
Harachte mit Sonnen-
scheibe über dem Kopf,
um 1330 v. u. Z. (Ägypti-
sches Museum Berlin)



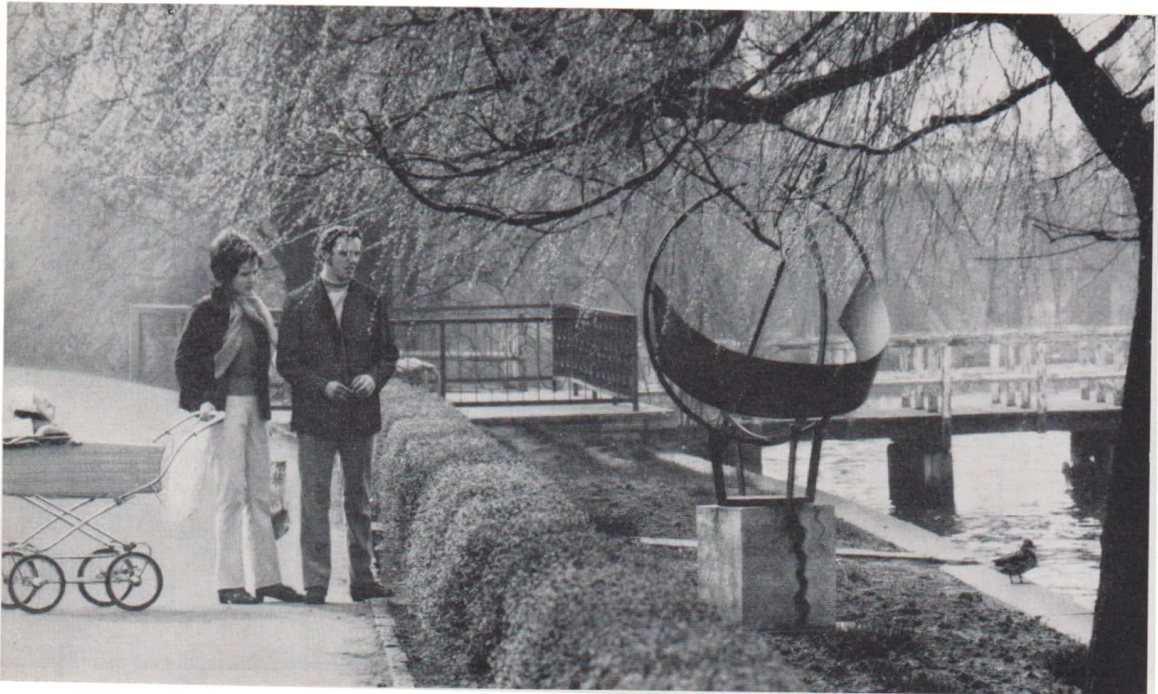
Relief des Sonnengottes
vom Tempel der Athena in
Troja, um 300 v. u. Z. (An-
tiken-Sammlung Berlin)



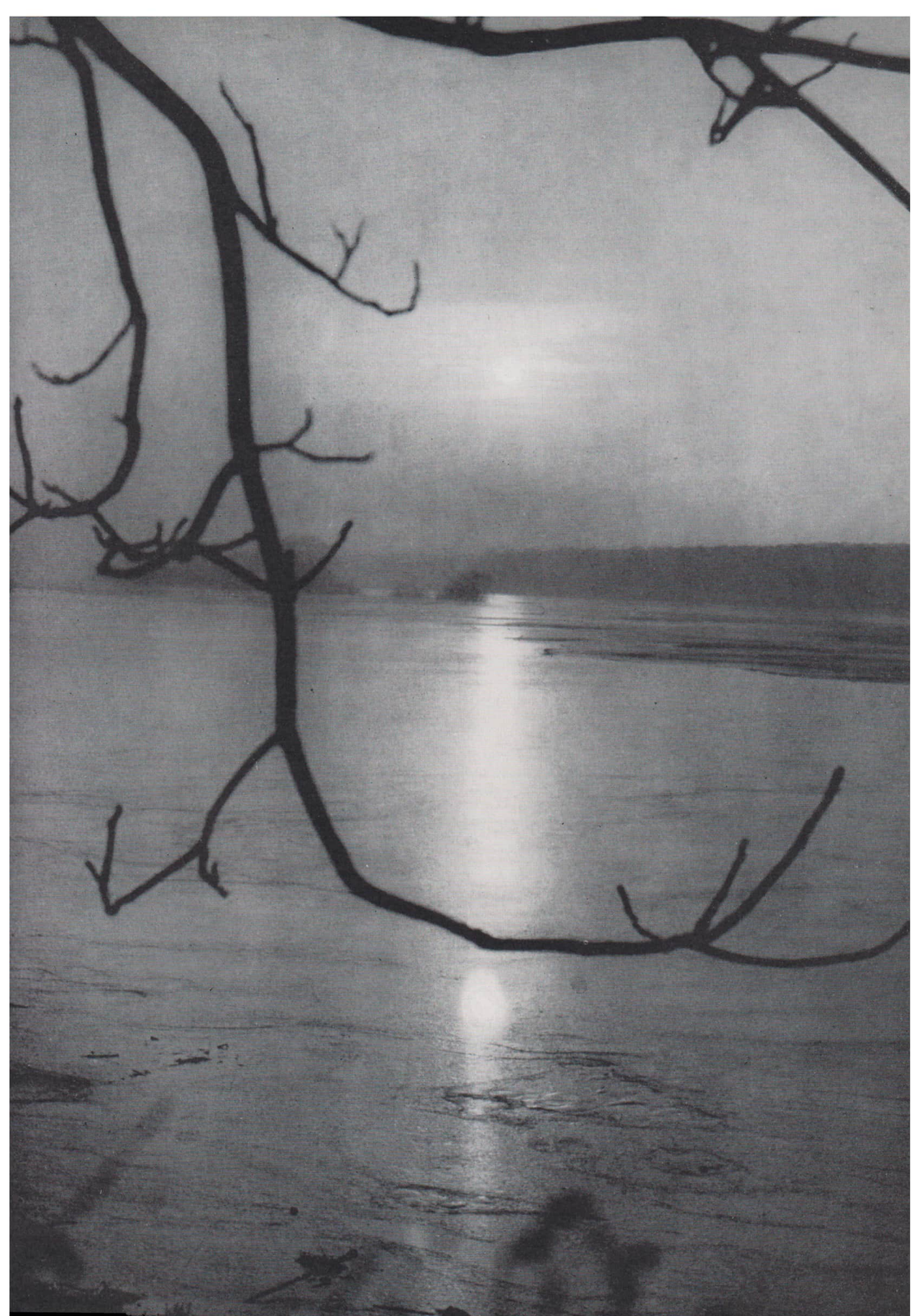


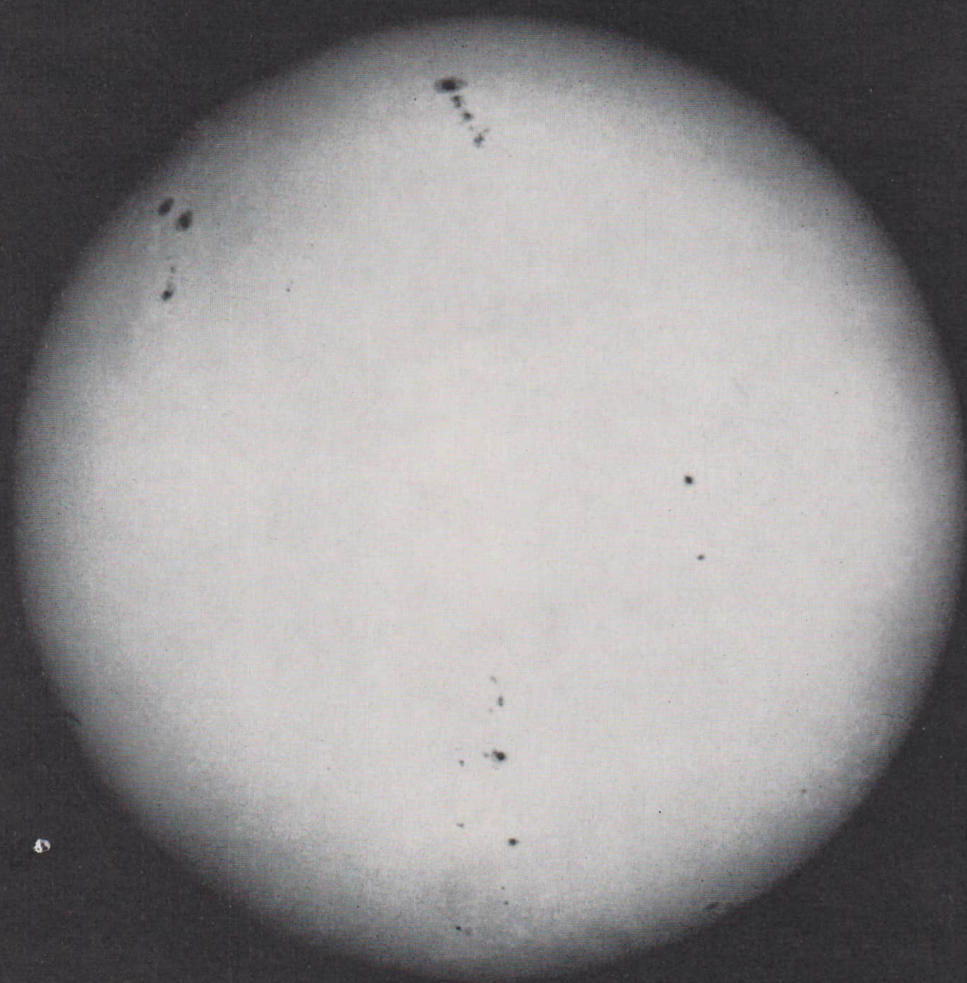
Sonnenuhr an einem Umgebinderhaus in Ebersbach, Kr. Löbau

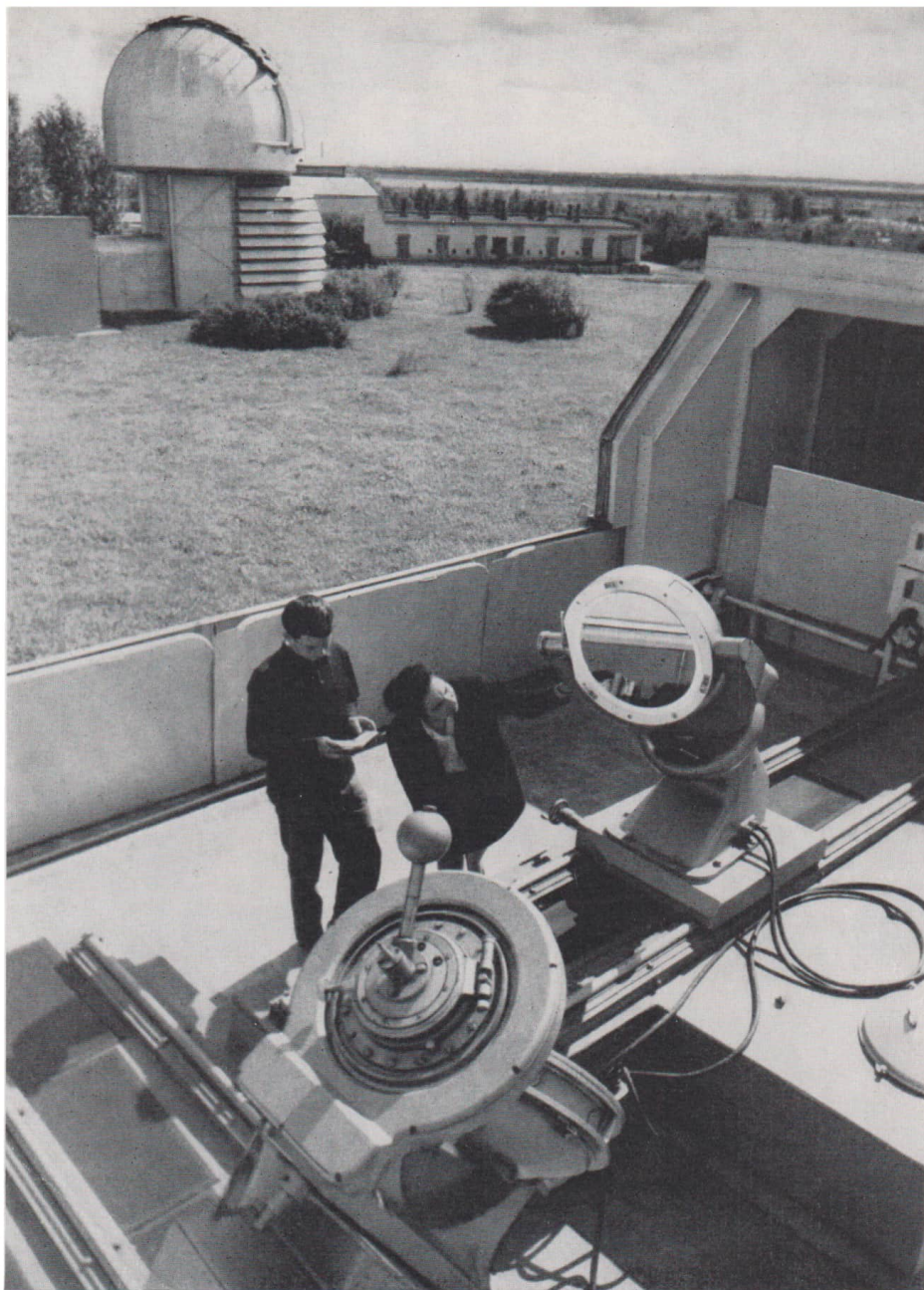
Sonnenuhr, geschaffen von Fritz Kühn, in Berlin-Köpenick



Sonnenaufgang an der winterlichen Elbe ►

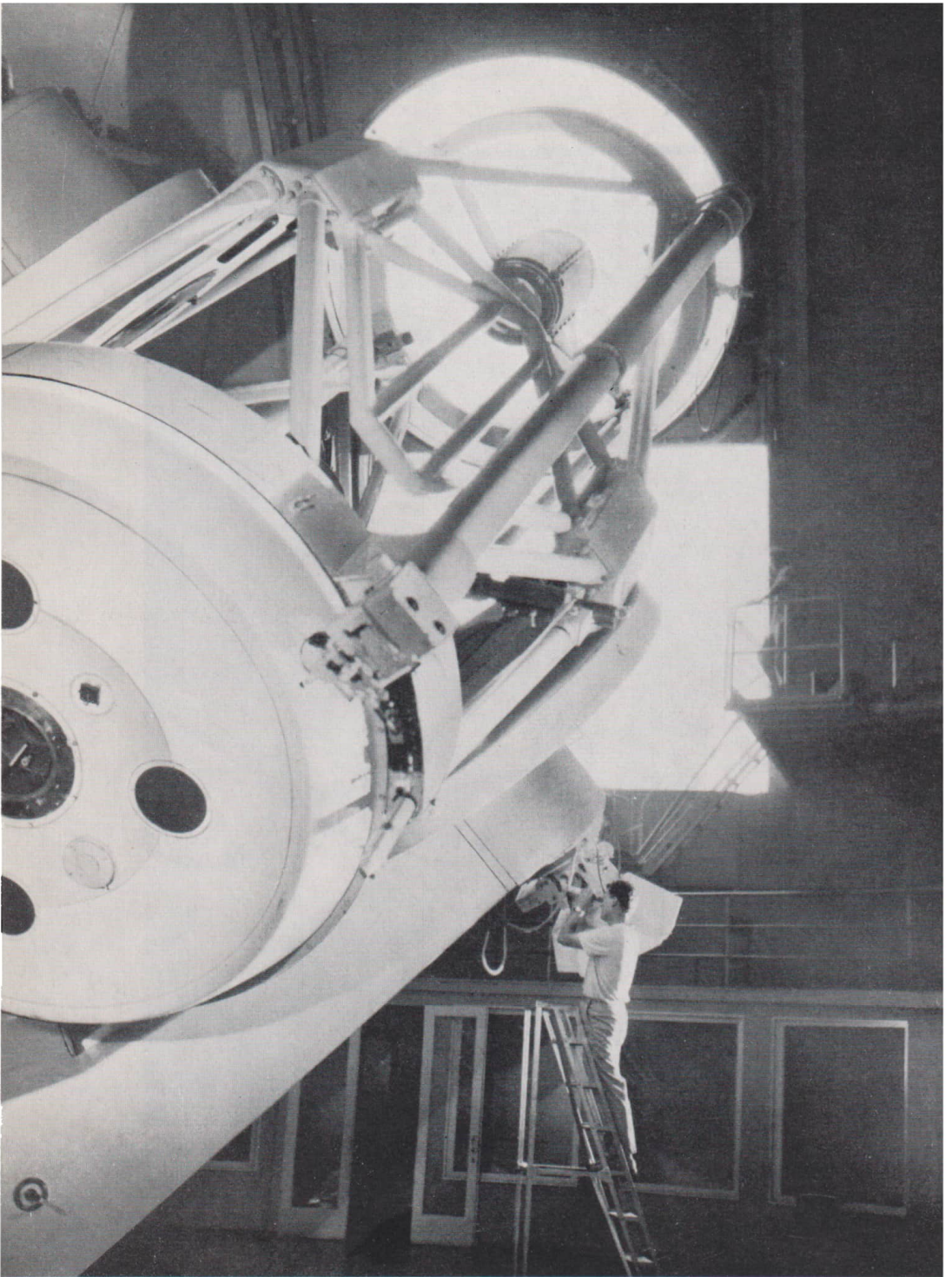






Sonnenobservatorium Pulkowo (RSFSR), im Vordergrund Zölostat eines Horizontalteleskops

Aufnahme der Sonne im Normallicht mit zahlreichen Flecken (Einsteinurm, Potsdam)



Große Spiegelteleskope werden auch für Untersuchungen der Sonne verwendet

tischen – nur den Bewegungsablauf beschreibenden – Untersuchungen von anderen Forschern gefunden und mathematisch formuliert. Immerhin begann auch für Kepler allmählich der Gedanke an einen – zunächst noch nicht beweisbaren – Zusammenhang zwischen den von ihm entdeckten kinematischen Gesetzmäßigkeiten und der herausragenden Stellung der Sonne feste Gestalt anzunehmen. Bei diesen Beziehungen sollte sogar schon eine besondere, von dem Zentralgestirn ausgehende Anziehungskraft mitwirken, die aber noch als eine Art Magnetismus gesehen wurde.

Erst nachdem der große Naturforscher *Galileo Galilei* (1564–1642), Zeitgenosse Keplers, durch seine genialen Experimente und deren scharfsinnige Deutung die Elemente der Dynamik entwickelt hatte, wurde es möglich, auch die Prinzipien der Planetenbewegung einer endgültigen Klärung näher zu bringen. Galilei war der Begründer einer von philosophischen Spekulationen befreiten physikalisch-mathematischen Naturforschung und vollbrachte viele Pionierleistungen. So definierte er als erster exakt den Kraft- und den Massebegriff, untersuchte die Gesetzmäßigkeiten des freien Falls, formulierte das Prinzip der Massenträgheit und gab für das Zusammenwirken von Kräften das Prinzip des Parallelogramms der Kräfte an. Seine Befähigung als Experimentator und forschender Beobachter ließ ihn darüber hinaus zum ersten großen astronomischen Entdecker werden. Mit Hilfe selbstgefertigter Fernrohre, deren Prinzip gerade erst in Holland erfunden worden war, erkannte er die bergige Struktur der Mondoberfläche, die Beleuchtungsphasen der Venus und das System der 4 großen Monde des Planeten Jupiter. Die beiden zuletzt genannten Entdeckungen widerlegten die von Aristoteles gegebene Begründung für den Geozentrismus (vgl. S. 33). Das Wissen um die Existenz der 4 Galileischen Jupitermonde, deren Umlauf um den Planeten himmelsmechanisch eine Art Sonnensystem im kleinen ergibt, hat sicherlich als Denkanstoß für die Überlegung mitgewirkt, daß die Ursache kosmischer Umlaufbewegungen in einem allgemeingültigen Naturprinzip zu suchen ist. Und dafür lieferten die schon erwähnten Untersuchungen Galileis über die Wirkung bewegender Kräfte die wichtigsten Grundlagen.

Isaac Newton entdeckt die Sonnenanziehung

Nachdem zunächst andere Naturforscher die galileischen Erkenntnisse über die Mechanik noch um einiges erweitert hatten, war es schließlich Isaac Newton, dem die wohl für alle Zeiten bedeutsamste physikalische Entdeckung gelang, daß den Umlaufbewegungen der Planeten die gleiche Naturkraft zugrunde liegt, die auch einen Apfel vom Baum zu Boden fallen läßt. Er bezeichnete diese Kraft als *Massenanziehung* oder *Gravitation* und erkannte in ihr eine Eigenschaft der Masse eines jeden Körpers. Wie schon angedeutet, veranlaßt sie als Anziehungskraft, die von der Masse des Planeten Erde ausgeht, den freien Fall von Körpern zur Erdoberfläche. Desgleichen verursacht sie dort bei den nichtfallenden Körpern deren Gewicht und wird demzufolge *Schwerkraft* genannt. Newton fand nun heraus, daß diese Anziehungskraft ebenso von allen anderen Weltkörpern ausgeht und die dynamische Grundlage für sämtliche Arten von Umlaufbewegungen bildet. Als Gravitation der Sonne zwingt sie die Planeten, geschlossene Umlaufbahnen zu verfolgen.

Newtons Bemühungen, diese von jedem kosmischen Körper verursachte Kraftwirkung in ein Gesetz zu fassen, erbrachten zunächst die Erkenntnis eines anderen wichtigen Naturprinzips: des *Wechselwirkungsgesetzes* oder *Reaktionsprinzips*. Es besagt: Die Wirkung ist stets der Gegenwirkung gleich ($\text{actio} = \text{reactio}$). Das bedeutet, wenn ein Körper auf einen anderen mit einer bestimmten Kraft einwirkt, übt der zweite Körper eine gleich große, aber entgegengesetzt gerichtete Kraft auf den ersten aus. Diese Erkenntnis und der seinerzeit schon bekannte Zusammenhang zwischen Zentrifugal- und Zentripetalkraft bei kreisförmigem Umlauf, angewandt auf das dritte Keplersche Gesetz, führten Newton zur Formulierung seines berühmten *Gravitationsgesetzes*:

Zwei Massen ziehen sich gegenseitig an mit einer Kraft, die dem Produkt der Massen direkt proportional und dem Quadrat der Entfernung zwischen den beiden Massen umgekehrt proportional ist.

Dieses Gesetz bildet seither die Grundlage für das Verständnis, die Beschreibung und die Vorausberechnung aller Bewegungen von Körpern im Weltall. Es liefert die dynamische Erklärung der kinematischen Keplerschen Gesetze. Dieser enge Zusammenhang wird daraus ersichtlich, daß sich die von Kepler gefundenen Beziehungen aus dem Newtonschen Gesetz mathematisch ableiten lassen. Im einzelnen beherrscht dieses universelle

Gesetz folglich sowohl die Umläufe der Planeten und anderen Körper um die Sonne als auch die Bahn des Mondes um die Erde sowie die Bahnen der Galileischen Monde um den Jupiter oder überhaupt der Monde um Planeten. Mit seiner Hilfe können wir letztlich, wie schon gesagt, auch die Präzessionsbewegung der Erdachse deuten. Vor allem aber macht es alle Bahnen von Weltkörpern sogar bis in die Feinheiten ihrer gegenseitigen gravitatorischen Störungen berechenbar. Es war einer der größten Triumphe der Newtonschen Himmelsmechanik, als es im 19. Jahrhundert gelang, erstmalig die Existenz eines bis dahin unbekannten Planeten (Neptun) aus den Störungen der Bahn eines anderen Planeten (Uranus) zu errechnen und damit seine Entdeckung zu bewirken.

Wie alle Beobachtungen zeigen, gehorcht auch die Bahnmechanik von sonnenähnlichen Doppel- und Mehrfachsternen, Sternhaufen und Sternsystemen bis in die fernen Tiefen des Raumes dem gleichen allgemeingültigen Naturgesetz. So kann man am Beispiel des Newtonschen Gravitationsgesetzes besonders anschaulich das wichtige Prinzip nachweisen, daß innerhalb des gesamten zu beobachtenden Kosmos die gleichen Naturgesetze gelten. In jüngster Zeit hat dieses Gesetz dem Menschen noch einen besonderen physikalischen und technischen Wirkungsbereich erschlossen – den der künstlichen Weltraumkörper. Auch die Berechnung der Bahnen von Forschungs- und anderen Erdsatelliten, Raumsonden und -fahrzeugen beruht auf der von Newton begründeten dynamischen Himmelsmechanik.

Die Gravitation selbst, eine in vielem heute noch immer ziemlich rätselhafte physikalische Erscheinung, stellt über die spezielle bahnmechanische Wirksamkeit hinaus offensichtlich ein für das Geschehen im Kosmos überhaupt maßgebliches Naturprinzip dar. Wie nämlich inzwischen vielfach nachgewiesen werden konnte, übt die der Masse eines kosmischen Körpers oder einer sonstigen Materieansammlung im Weltraum innewohnende Gravitationswirkung entscheidenden Einfluß auf den gesamten physikalischen „Lebenslauf“ dieser Masse aus – sei sie nun ein sonnenähnlicher Fixstern, ein Planet oder anderer kompakter Weltkörper, eine Wolke von kosmischen Gasen oder gar ein ganzes extragalaktisches Sternsystem. Mit anderen Worten, es zeigt sich, daß die Kräfte der Massenanziehung für die Entwicklung der gesamten Materie im Kosmos einen der naturgegebenen Hauptfaktoren bilden. Deshalb wird dieses Prinzip für uns zwangsläufig auch bei den nachfolgenden Betrachtungen über die physikalische Natur der Sonne noch von Interesse sein.

Wir wollen jedoch hier erst einmal das Bild skizzieren, das die Sonne nach den grundlegenden Newtonschen Entdeckungen in wissenschaftlicher Hinsicht bot. Mit dem Wachsen naturwissenschaftlicher Erkenntnis hatte das strahlende Tagesgestirn unwiderruflich den Nimbus eines Sonnengotts oder eines mythischen Himmelsfeuers verloren und sich in ein reales Objekt körperhafter Substanz verwandelt. Die Sonne war von nun an ein Weltkörper, dessen stoffliche Natur feststand und von jener der Erde nicht grundverschieden sein konnte, was ja vor allem daraus hervorging, daß für beide Körper die gleichen Gesetzmäßigkeiten der Gravitation gelten. Über die enorme Größe der Sonne herrschte im Prinzip ebenfalls bereits Klarheit, wenn auch die Entfernung Erde — Sonne, die zum Errechnen der wahren Dimensionen des Zentralgestirns bekannt sein mußte, erst in der Folgezeit mit größerer Genauigkeit bestimmt werden konnte. Die im Vergleich zur Erde ungeheuren Ausmaße der Sonne, besonders aber ihre gewaltige Masse, waren allein schon aus ihrer Anziehungskraft abzuleiten, mit der sie über riesige Entfernungen hinweg die Umlaufbewegungen der übrigen Körper des Systems beherrscht. Der dabei immer deutlicher werdende „familiäre“ Zusammenhang zwischen dem Zentralgestirn Sonne einerseits sowie den Planeten und Kometen andererseits ließ schließlich die Vorstellung von einer eigenständigen kosmischen Einheit entstehen, für die sich wegen der physikalisch so dominierenden Stellung der Sonne die allgemeine Bezeichnung *Sonnensystem* anbot, während für speziellere Betrachtungen auch der Begriff *Planetensystem* üblich wurde.

Über die Ursache der im Vergleich zu den anderen Körpern des Sonnensystems hervorstechendsten physikalischen Eigenschaft der Sonne, aus Materie in selbstleuchtendem Zustand zu bestehen, sowie über die damit verbundenen Probleme und Konsequenzen konnte man zu jener Zeit allerdings noch keinerlei brauchbare Aussagen machen. Doch gerade diese Fragen waren es, die im weiteren den Schwerpunkt des wissenschaftlichen Interesses an der Sonne bildeten und zur Entwicklung eines speziellen Arbeitsgebiets in der Astronomie, der *Sonnenforschung* oder *Sonnenphysik*, führten. Als sich die Erkenntnis festigte, daß die Sonne eigentlich nichts anderes ist als ein aus besonderer Nähe zu beobachtender Fixstern und man grundlegende Prinzipien der physikalischen Forschung also auch auf diese weitverbreitete Art von Weltkörpern anwenden kann, entstand schließlich die umfassendere *Stern-* oder *Astrophysik*, welche die chemische und physikalische Beschaffenheit der kosmischen Objekte untersucht.

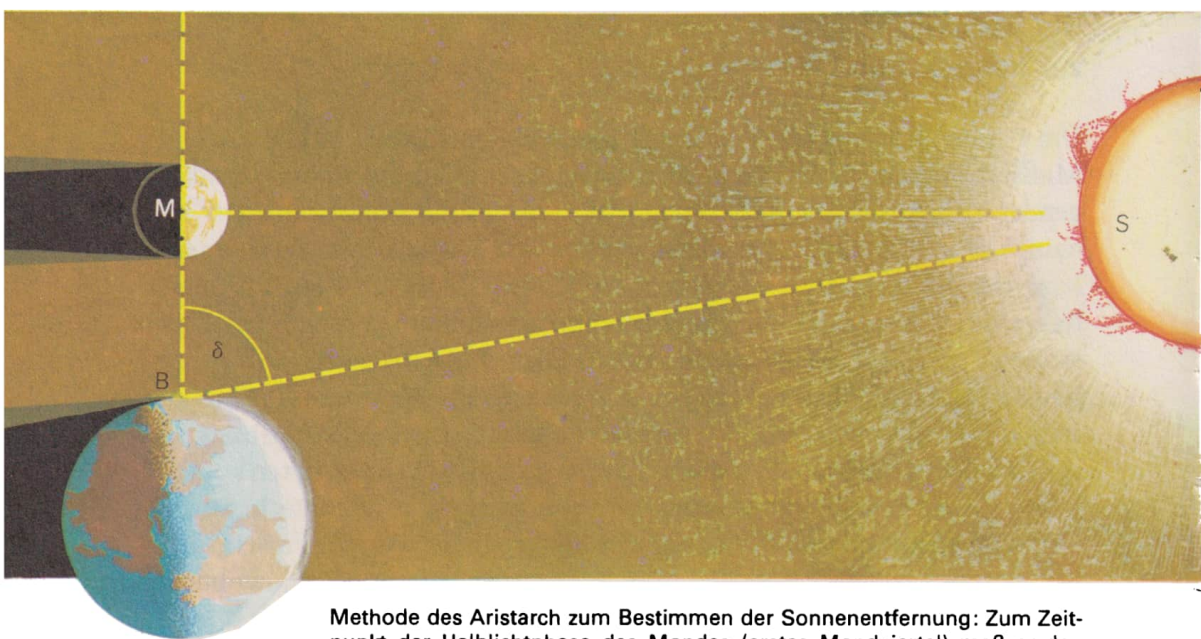
Die Entfernung Erde—Sonne wird zur kosmischen „Elle“

Um bei der Erforschung der Sonne mit den eingeführten physikalischen Maßstäben rechnen und arbeiten zu können, mußte zunächst als grundlegender Zahlenwert die Entfernung Erde—Sonne mit größtmöglicher Genauigkeit in Kilometern bestimmt werden. Wie wir schon im Zusammenhang mit den Keplerschen Gesetzen erwähnten, bildet diese Strecke überhaupt das Einheitsmaß für alle Entfernungsbestimmungen im Sonnensystem; sie wird deshalb als *astronomische Einheit* (AE) bezeichnet. Darüber hinaus hat sie für die noch größeren Distanzen im Weltraum, bis hin zu fernen Sternsystemen, die Rolle einer meßtechnischen Ausgangsbasis zu spielen. Die Fehlerhaftigkeit dieser Einheit geht also in alle weiteren kosmischen Entfernungsbestimmungen mit ein. Selbst die bahnmechanische Genauigkeit interplanetarer Raumflüge hängt letztlich von der Fehlergröße der astronomischen Einheit ab. Der Präzisierung dieses Maßes widmete die astronomische Forschung deshalb bis in die Gegenwart hinein besondere Aufmerksamkeit.

Ausgangspunkt der astronomischen Entfernungsbestimmung bildet das bekannte Verfahren der Dreiecksmessung. Man bestimmt an den beiden Endpunkten einer Meßbasis, deren Länge möglichst genau bekannt sein muß, die Visierwinkel zwischen der Meßbasis und dem Objekt, dessen Entfernung ermittelt werden soll. Aus diesen Winkeln und der Länge der Basis läßt sich dann die Entfernung des Objekts von der Meßbasis berechnen.

Statt der beiden Basiswinkel kann man für die Rechnung aber auch den einzelnen Winkel angeben, der von den Visierstrahlen am Objekt gebildet wird. Er heißt parallaktischer Winkel, nach dem Wort *Parallaxe*, das im Griechischen soviel wie Abweichung oder Verschiebung bedeutet. Um diesen Begriff zu verstehen, brauchen wir nur den Vorgang des Visierens von einer festen Basis aus auf ganz einfache Weise nachzuvollziehen: Wenn wir unsere beiden Augen auf einen nahebei befindlichen Gegenstand richten und sie abwechselnd schließen, werden wir sehen, daß die unterschiedlichen Visierrichtungen als Verschiebung des Objekts vor einem in größerer Entfernung liegenden Hintergrund erscheinen.

Im Falle der *Sonnenparallaxe*, um die es also den Astronomen beim Bestimmen der Sonnenentfernung geht, wird man natürlich eine möglichst



Methode des Aristarch zum Bestimmen der Sonnenentfernung: Zum Zeitpunkt der Halblichtphase des Mondes (erstes Mondviertel) maß er den Winkel δ und berechnete in dem rechtwinkligen Dreieck MBS die Sonnenentfernung

große Meßbasis auf der Erdoberfläche wählen. Dennoch bleibt der errechnete parallaktische Winkel außerordentlich klein, weil die Entfernung zur Sonne eben sehr groß und die Dreiecksbasis dagegen winzig ist. Im übrigen berechnet man die Sonnenparallaxe aus den Messungen dann so, als gelte sie für zwei Basispunkte, die genau um einen Erddurchmesser auseinander liegen. Wir können folglich auch sagen, die Sonnenparallaxe stellt den Winkel dar, unter dem ein auf der Sonne befindlicher Beobachter den Halbmesser der Erde sehen würde.

Die ersten ernsthaften Versuche, die Entfernung der Sonne zu ermitteln, wurden schon im Altertum gemacht. Es waren der große Beobachter Aristarch und später Ptolemäus, die nach einem an sich richtigen Prinzip, jedoch mit unzulänglichen Mitteln eine Bestimmung der Sonnenparallaxe vornahmen. Sie erhielten dabei einen Winkel von $3'$ (Bogenminuten), was einer Entfernung von etwa 1200 Erddurchmessern entsprach. Dieser in den Almagest aufgenommene, um ein vielfaches zu kleine Wert blieb wegen der Autorität des Ptolemäus fast anderthalb Jahrtausende lang das

als einzig richtig angesehene Maß für die Sonnenentfernung. Als das ptolemäische Weltbild überwunden wurde, hielt man den genannten Wert zwar schon für viel zu klein, aber die eigenen Schätzungen Keplers und verschiedener seiner Zeitgenossen (3500 bis 7000 Erdradien) lagen ebenfalls noch erheblich unter der Wahrheit. Die weiteste Annäherung an die tatsächlichen Gegebenheiten wurde um 1650 von *Gottfried Wendelin* (1580–1660) erzielt, der unter verbesserten Bedingungen auf eine Sonnenparallaxe von 14'' kam.

Nach der Entdeckung der Keplerschen Gesetze bot sich ein viel günstigeres Verfahren an, für dessen Handhabung sich im einzelnen zahlreiche Varianten finden ließen. Man brauchte nur davon auszugehen, daß die Entfernungen zweier Planeten nach dem dritten Keplerschen Gesetz in relative Beziehung zueinander gebracht werden können. Es genügte dann, die Parallaxe eines im Vergleich zur Sonne erheblich näheren Planeten (zum Beispiel Mars) zu messen, um daraus auf die Sonnenparallaxe umrechnen zu können. Die größere Nähe des Planeten und seine geringere scheinbare Größe – das heißt die Winkelgröße, unter der er uns am Himmel erscheint – ergeben meßtechnisch recht gute Voraussetzungen für eine höhere Genauigkeit der abgeleiteten Sonnenentfernung. So kam man bei ersten Versuchen mit Mars im 17. Jahrhundert zunächst auf einen Parallaxenwert von 9,5'', der immerhin eine weitere Annäherung an die tatsächlichen Gegebenheiten (rund 8,80'') bedeutete.

Ein anderes Verfahren zur Ableitung der Sonnenparallaxe aus Messungen an Planeten bot sich bei den – allerdings äußerst seltenen – Vorübergehungen des Planeten Venus vor der Sonnenscheibe an. Auf diese Möglichkeit hatte der englische Astronom *Edmund Halley* (1656–1742) aufmerksam gemacht, der vor allem durch die ersten Berechnungen von Kometenbahnen auf Newtonscher Basis berühmt wurde. Beim Beobachten von *Venusdurchgängen* werden im einfachsten Fall von jedem Beobachtungsort aus die Zeitpunkte der vier Kontakte – das sind für Aus- und Eintritt der dunklen Planetenscheibe je zwei Berührungen mit dem hellen Sonnenrand – bestimmt. Daraus lassen sich dann für zwei verschiedene Beobachtungsorte unterschiedliche Durchgangssehnen auf der Sonnenscheibe konstruieren, deren Lage zueinander sehr gut das Prinzip der parallaktischen Verschiebung veranschaulicht und die Ausgangswerte für die Berechnung der Sonnenparallaxe liefert.

Allerdings brachte diese Methode wegen mannigfacher beobachtungs-

technischer Schwierigkeiten im Grunde nicht die erhofften Fortschritte, obwohl damit bis zum Ende des 19. Jahrhunderts angenäherte Werte um $8,80''$ erreicht wurden. Inzwischen gab es aber schon ein viel besser geeignetes Verfahren, und da außerdem jeweils ein beträchtlicher Aufwand erforderlich ist, um die seltene Himmelserscheinung eines Venusdurchgangs beobachten zu können – wie bei Sonnenfinsternissen müssen Expeditionen an günstige Beobachtungsorte geschickt werden –, verlor man schließlich das Interesse an dieser Methode. Die nächsten Venusdurchgänge finden übrigens erst wieder am 8. Juni 2004 und am 6. Juni 2012 statt.

Die Durchgänge des Planeten Merkur vor der Sonnenscheibe eignen sich aus verschiedenen Gründen noch schlechter als die Venusdurchgänge zum Bestimmen der Sonnenparallaxe und wurden deshalb auch nicht dazu genutzt.

Das schon erwähnte verbesserte Verfahren der Parallaxenmessungen an Planeten beruht auf der Verwendung von *Planetoiden* oder *Kleinen Planeten* als Meßobjekten. Diese Kleinkörper des Sonnensystems wurden seit Mitte des 19. Jahrhunderts in wachsender Anzahl entdeckt. Sie bewegen sich überwiegend zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter um die Sonne; einzelne können der Erde jedoch erheblich näher als der Mars kommen. Wegen ihrer punktförmigen Abbildung im Fernrohr stellen sie außerdem auch bessere Meßmarken als Mars oder Venus dar. Auf diesem Wege konnte schließlich der Wert für die Sonnenparallaxe – nach der besonders günstigen Beobachtung des Planetoiden Eros 1930/1931 – bis auf $8,790'' \pm 0,001''$ präzisiert werden, was die zu dieser Zeit international vereinbarte Länge der astronomischen Einheit von 149 500 000 km hinreichend bestätigte.

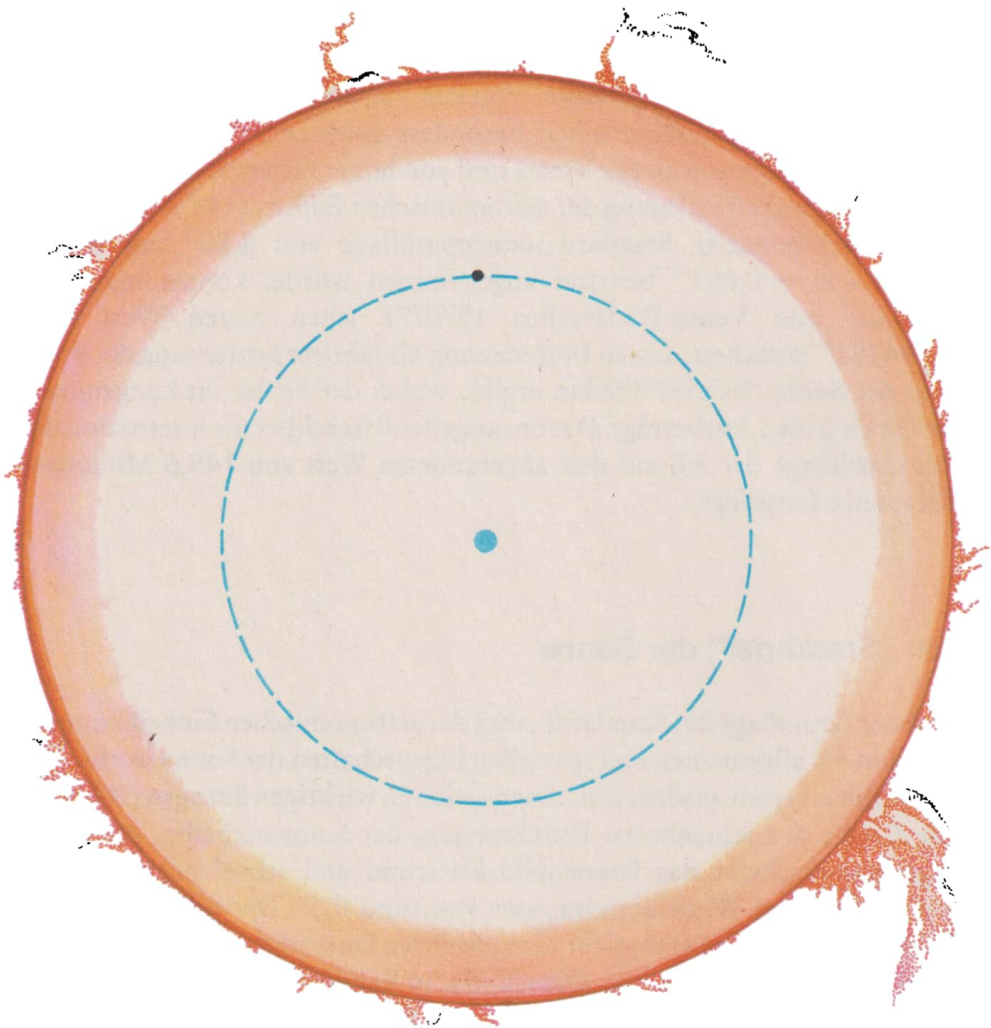
Die enormen Fortschritte der technischen Disziplinen im 20. Jahrhundert ermöglichten grundsätzlich neue Verfahren für die Entfernungsbestimmungen im Weltraum. Die genaueste Methode ist dabei die Laufzeitmessung von Radarechos an Planetenoberflächen. Dieses im Seeverkehr sowie in der Luft- und Raumfahrt angewandte funktechnische Verfahren beruht auf Direktmessungen, aus denen man die betreffende Planetenentfernung unmittelbar in Kilometern erhält. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Funkwellen im Weltraum inzwischen mit sehr hoher Genauigkeit bekannt ist und sich auch die notwendigen Zeitmessungen mit außerordentlicher Präzision vornehmen lassen, bringt diese Me-

thode ausgezeichnete Ergebnisse. Von den Planeten bietet Merkur wegen seiner physischen Beschaffenheit besonders günstige Bedingungen, aber auch Funkmessungen an der Venus sind von hoher Genauigkeit. Während zuvor die für die Festlegung der astronomischen Einheit (149,5 Millionen Kilometer) benutzte Standard-Sonnenparallaxe von $8,80''$ mit einem Fehler von $\pm 0,001''$ behaftet angenommen wurde, konnte man mit Merkur- und Venus-Radarechos 1970/71 einen besten Wert von $8,794181''$ erreichen, dessen Umrechnung als mittlere Entfernung der Erde von der Sonne 149 597 892 km ergibt, wobei der Fehler im Längenmaß nur noch 2 bis 5 km beträgt. Davon ausgehend ist seither die internationale Standardlänge der AE auf den abgerundeten Wert von 149,6 Millionen Kilometer festgelegt.

Ein „Steckbrief“ der Sonne

Auf der Grundlage des Standardmaßes der astronomischen Einheit können wir nun die allgemeinen und speziellen Eigenschaften der Sonne in absoluten Zahlenwerten ausdrücken. Einen weiteren wichtigen Bezugswert bildet die Größe des scheinbaren Durchmessers der Sonnenscheibe. Auch im Fernrohr erscheint das Sonnenbild kreisrund und scharf begrenzt, mit einem mittleren Winkeldurchmesser von rund $0,5^\circ$. Der genauere Wert beträgt $31' 49''$ und entspricht einem wahren Durchmesser der Sonne von 1,392 Millionen Kilometer. Die elliptische Bahnbewegung der Erde läßt den scheinbaren Sonnendurchmesser im Laufe eines Jahres zwischen $31' 31''$ (Erde im Aphel ihrer Bahn) und $32' 36''$ (Erde im Perihel) schwanken, was einem Aphelabstand der Erde (Anfang Juli) von 152,1 Millionen Kilometer beziehungsweise einer Perihelentfernung (Anfang Januar) von 147,1 Millionen Kilometer gleichkommt.

Der wahre Durchmesser von 1,392 Millionen Kilometer zeigt die Sonne als einen gigantischen Weltkörper, zumindest nach irdischen Maßstäben; denn um diese Strecke zu überbrücken, müßten immerhin rund 109 Erdkugeln aneinandergereiht werden. Denken wir uns die Erde in den Mittelpunkt der Sonne versetzt, so würde der Mond mit seinem mittleren Erdbstand von rund 384 000 km noch immer weit innerhalb des Sonnenkörpers umlaufen.



Größenvergleich der Sonne mit dem Durchmesser der Mondbahn (Erde nicht im gleichen Maßstab)

Das Volumenverhältnis von Erde und Sonne ergibt ein noch phantastischeres Bild: Rund 1 300 000 Kugeln vom Inhalt der Erde müßte man aufbringen, um die hohl gedachte Sonne vollständig zu füllen!

In ähnlich gewaltigen Dimensionen bewegt sich die Masse der Sonne. Vergleichen wir sie wiederum mit der Erde, deren Masse schon rund 5975 Trillionen ($5,975 \cdot 10^{21}$) Tonnen ausmacht, so ist die Masse der Sonne noch 333 000mal größer. Aus dem Verhältnis von Sonnenmasse zu

Sonnendurchmesser ergibt sich, daß die Schwerkraft auf der Sonnenoberfläche rund 28mal so groß ist wie auf der Erdoberfläche. Das heißt, ein Mensch von 75 kg Masse – und daher 75 kp Gewicht auf der Erde – würde dort ein Gewicht von 2100 kp haben. Dementsprechend beträgt die Fallbeschleunigung an der Sonnenoberfläche $273,98 \text{ m/s}^2$ (Erde: $9,81 \text{ m/s}^2$). Ein frei fallender Körper könnte folglich an der Sonnenoberfläche nach einer Fallstrecke von 10 m eine Geschwindigkeit von rund 270 km/h erreichen, was etwa dem Tempo eines Formel-I-Rennwagens auf längeren Geraden einer Rennstrecke oder dem moderner superschneller Schienen-Versuchsfahrzeuge entspricht.

Aus der Gegenüberstellung des Volumenverhältnisses zwischen Erde und Sonne (1:1 300 000) und des Massenverhältnisses beider (1:333 000) ersehen wir aber auch, daß die Materie in der Sonne nicht so dicht „gepackt“ sein kann wie in der Erde. Unser Planet hat eine mittlere Dichte von $5,52 \text{ g/cm}^3$, während man für die Sonne aus den oben genannten Verhältnissen nur $1,41 \text{ g/cm}^3$ erhält. Dieser Dichtevergleich läßt durchaus schon erste Rückschlüsse auf die physikalische Beschaffenheit der Sonne zu, die offensichtlich ganz anders aufgebaut ist als die Erde. Im Zusammenhang mit ihrem selbstleuchtenden Zustand erscheint somit in erster Näherung die Schlußfolgerung gerechtfertigt, daß die Sonne eine gigantische Kugel aus gasförmiger Materie mit hoher Temperatur sein muß.

Ehe wir aber das astrophysikalische Bild der Sonne weiter vertiefen, wollen wir erst noch einen Blick auf die übrigen Weltkörper des Sonnensystems werfen, um einen vollständigen Eindruck von der Rolle und der kosmischen Stellung der Sonne zu gewinnen.

Die Geschwister der Erde

Den Hauptteil der Masse des Sonnensystems konzentrieren, nach der Sonne selbstverständlich, die 9 großen Planeten auf sich. In der Reihenfolge ihrer Entfernung von der Sonne sind dies: Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun und Pluto. Bis zu den Zeiten Keplers, Galileis und Newtons waren außer der Erde nur die ersten 5 bekannt. Die letzten 3 konnten erst mit Fernrohren entdeckt und beobachtet werden. Alle Planeten zusammen ergeben aber immer noch nicht mehr als den 750. Teil der Sonnenmasse. Es handelt sich ausnahmslos um nicht selbst-

leuchtende Körper, da ihre Temperaturen nicht hoch genug sind. Wir sehen sie daher nur im reflektierten Sonnenlicht leuchten, und auch die Temperatur an ihrer Oberfläche oder in ihrer Atmosphäre verdanken sie ganz oder im wesentlichen der empfangenen Strahlungsenergie der Sonne. Von den Riesenplaneten ab Jupiter wurde in jüngster Zeit bekannt, daß sie mehr Eigenenergie in Form von Wärme abstrahlen, als sie von der Sonne erhalten.

Merkur und Venus nennt man bislang, nach ihrer Stellung zur Erdbahn, die *inneren Planeten* und alle anderen ab Mars dementsprechend die *äußeren Planeten*. Heute wird die Bezeichnung innere Planeten immer häufiger für alle Planeten bis Mars verwendet und bezieht sich dann auf deren deutlichen physischen Unterschied zu den Planeten ab Jupiter – eine Ausnahme bildet dort der Pluto. In der Vergangenheit bezeichnete man die Planeten Merkur, Venus, Erde, Mars, Pluto als die *erdähnlichen Planeten*, weil sie Oberflächen aus festem oder flüssigem Material sowie mehr oder weniger dichte Atmosphären aus ähnlichen Gasen wie die der Erde aufweisen und weil auch ihre sonstige Beschaffenheit (Größe, Masse und Dichte) hinreichende Ähnlichkeit mit der Erde vermuten ließ. Sie unterscheiden sich danach deutlich von den *jupiterähnlichen Planeten*, wie die übrigen 4 Planeten genannt wurden. Inzwischen haben vornehmlich die mit Planetensonden durchgeführten Untersuchungen von Venus und Mars gezeigt, daß sich die Charakteristik „erdähnlich“ für diese Planeten kaum noch vertreten läßt, weil die Unterschiede in vielem doch recht groß sind. Aus diesem Grunde hält man neuerdings die Bezeichnung innere Planeten – im Sinne gemeinsamer physikalischer Merkmale – für sinnvoller.

Der sonnennächste Planet Merkur ist in unseren höheren geographischen Breiten recht schwer zu beobachten, weil er sich nie mehr als 27° westlich oder östlich von der Sonne entfernen kann. Das ist gerade etwas mehr als die Spanne, die wir zwischen den Spitzen von Daumen und kleinem Finger bei gespreizter Hand und ausgestrecktem Arm erblicken. Der Planet steht daher auch bei günstigster Konstellation zur Sonne bei uns meist tief im Dunst des Horizonts. Wegen seiner geringen Schwerkraft und der hohen Temperatur auf der sonnenzugewandten Seite (etwa bis 450°C bei Sonnennähe des Planeten) vermag der Merkur keine dichtere Atmosphäre zu halten. Man vermutet seit längerem, daß ihre Dichte weniger als ein Tausendstel der Dichte der Erdatmosphäre beträgt. Die Beobachtungen des Planeten von günstigen Höhensternwarten aus ließen

Einige Bahndaten der Planeten

Planet	Mittlere Entfernung von der Sonne	Siderische Umlaufzeit	Bahn- neigung	Rotationsdauer			Äquator- neigung		
	Mill. km	AE	Jahre	Grad	Tage	Std.	Min.	Sek.	Grad
Merkur	57,91	0,39	0,24	7,0	58	15			7
Venus	108,21	0,72	0,62	3,4	242	23	4		6
Erde	149,60	1,00	1,00	—		23	56	4	23,5
Mars	227,9	1,52	1,88	1,8		24	37	23	24,0
Jupiter	778,3	5,20	11,86	1,3		9	50		3,1
Saturn	1427	9,54	29,46	2,5		10	14		26,8
Uranus	2870	19,18	84,02	0,8		10	49		98,0
Neptun	4496	30,06	164,79	1,8		15	40		29
Pluto	5946	39,7	247,7	17,1	6	9			

Einige physische Daten der Planeten

Planet	Äquatordurchmesser	Masse		Mittlere Dichte g/cm ³	Zahl der Satelliten
	km	Erde = 1	Erde = 1		
Merkur	4840	0,38	0,056	5,62	0
Venus	12 112	0,95	0,8148	5,23	0
Erde	12 756	1,00	1,000	5,52	1
Mars	6800	0,53	0,107	3,95	2
Jupiter	143 650	11,24	317,82	1,30	12
Saturn	120 670	9,47	95,11	0,68	10
Uranus	47 100	3,70	14,52	1,58	5
Neptun	49 200	3,86	17,22	1,65	2
Pluto	5 000	0,39	0,18	4	0

ferner die Annahme zu, daß seine Oberfläche etwa so beschaffen ist wie die des Erdmondes, zumal ihre Rückstrahlungsfähigkeit, die *Albedo* (lat. = die Weiße), annähernd der des Mondes gleicht.

Die von der amerikanischen Planetensonde „Mariner 10“ Anfang 1974 übertragenen Fernsehaufnahmen und Meßwerte bestätigten im allgemeinen das mondähnliche Bild des Merkur. Auf den zahlreichen Aufnahmen, die während des Vorbeiflugs (geringster Abstand 750 km) gemacht wurden, sind noch Einzelheiten von 300 m Ausdehnung zu erkennen. Die

Altbabylonischer Grenzstein mit den Symbolen für Sonne, Mond und Venus



Einzelstrukturen, wie Krater aller Größenstufen, Rillen, Strahlensysteme, Maria (lat. mare = Meer) und andere, sowie der Gesamteindruck zeigen tatsächlich eine verblüffende Ähnlichkeit mit der Mondoberfläche. Weiterhin ergaben die Untersuchungen, daß der Merkur – wie vermutet – eine sehr dünne und noch über 750 km Höhe reichende Atmosphäre hat. Allerdings waren bisher ausschließlich Edelgase (Helium, Argon, Neon) nachzuweisen, die von Lebewesen bekanntlich auch bei höherer Dichte nicht geatmet werden könnten. Große Überraschung rief die Entdeckung eines relativ starken Merkur-Magnetfeldes hervor, dessen Wert rund ein Hundertstel von dem des Feldes auf der Erdoberfläche beträgt und das – wie bei der Erde – auf einen flüssigen Planetenkern aus Nickeleisen schlie-

ßen läßt. Diese Annahme wird durch die große mittlere Dichte des Merkur gestützt. Man schlußfolgert daraus, daß der Planet möglicherweise zu zwei Dritteln aus Nickeleisen besteht.

Über den Planeten Venus, der noch bis vor wenigen Jahren unzählige Spekulationen auslöste, haben vor allem die Erkundungsvorstöße mit Raumflugkörpern und Radaruntersuchungen zahlreiche und grundlegend neue Erkenntnisse vermittelt. Schon für die Himmelsbeobachter des Altertums war der hellstrahlende *Abend-* und *Morgenstern* nach Sonne und Mond vielfach das wichtigste, weil auffälligste Gestirn. Es gab sogar Kalender, in deren Zeitrechnungssystem die Erscheinungen der Venus eine maßgebliche Rolle spielten. Immerhin kann sich die Venus bis zu 47° östlich oder westlich von der Sonne entfernen, so daß auch in unseren Breiten äußerst attraktive Abend- und Morgenkonstellationen entstehen. Den Planeten, von ähnlicher Größe wie die Erde, umgibt eine für die optische Beobachtung undurchdringliche Wolkenhülle, deren obere Grenze in der außerordentlich dichten Venusatmosphäre (etwa 90 kp/cm^2 Druck an der Oberfläche) bei 50 bis 60 km liegt. Zum Vergleich sei daran erinnert, daß in der Erdatmosphäre Wolken nur äußerst selten die Höhe von 10 bis 12 km erreichen. Die große Albedo der geschlossenen Venuswolkenhülle trägt erheblich zur strahlenden Helle des Gestirns an unserem Himmel bei.

Die chemische Zusammensetzung der Venusatmosphäre ist grundverschieden von der Erdatmosphäre und läßt auf einen unterschiedlichen Ablauf der bisherigen Entwicklung beider Planeten schließen. Die Venusatmosphäre besteht zu etwa 95 Prozent aus Kohlendioxid, den Rest bilden Wasserstoff, Kohlenmonoxid sowie Spuren von Wasser und möglicherweise Sauerstoff. Diese Zusammensetzung und vor allem die extremen Druck- und Temperaturverhältnisse (am Boden etwa 400 bis 500°C) in der Atmosphäre machen das Vorhandensein von Lebensspuren auf der Venus unwahrscheinlich. Die sehr hohe Temperatur an der Oberfläche des Planeten ist sicherlich mit auf den „Treibhauseffekt“ in seiner Atmosphäre zurückzuführen, der verhindert, daß die in Wärme umgewandelte Sonnenstrahlung in den Weltraum zurückgestrahlt wird. Der Planet hat offenbar ein sehr schwaches Magnetfeld, so daß er auch keinen magnetischen „Schutzkäfig“ gegen kosmische Partikelstrahlungen aufbauen kann, wie es die Erde in Gestalt ihrer Magnetosphäre tut. Die überraschend langsame und rückläufige, das heißt entgegen der Richtung des Umlaufs um die

Sonne erfolgende Rotation der Venus – eine Rotationsperiode dauert rund 243 Tage – sowie die geringe Neigung ihres Äquators (etwa 6°) gegen die Bahnebene des Planeten hat man erst mit Hilfe der modernen Radartechnik ermittelt. Die Venus war übrigens der erste fremde Planet, dessen Oberfläche von einer irdischen Meßsonde („Venus 8“, UdSSR) erreicht und untersucht wurde.

Der Planet Mars galt lange Zeit als besonders erdähnlich, was verschiedene optische Beobachtungen (jahreszeitliche Veränderungen, scheinbare Vegetationsverfärbungen und anderes) zunächst durchaus zu bestätigen schienen. Dieses Bild wandelte sich jedoch gründlich durch die Ergebnisse der seit 1964 zum Mars entsandten Forschungssonden. Es zeigte sich, daß die Oberflächenstruktur des Planeten ein eigenständiges Gesicht hat, das in gewissen Zügen (Kraterfelder) Ähnlichkeit mit dem Erdmond aufweist, aber offensichtlich auch noch von aktivem Vulkanismus geprägt wird, wie er vielleicht in Frühphasen der Erdentwicklung auftrat. Die Marsatmosphäre ist wegen der geringen Schwerkraft des Planeten nur sehr dünn. An der Planetenoberfläche hat sie eine Dichte, wie sie in der Erdatmosphäre etwa in 30 km Höhe herrscht. Dennoch ist sie meteorologisch sehr aktiv, wie die Beobachtung von zeitweilig auftretenden Staubstürmen beweist. Den Hauptbestandteil der Marsatmosphäre bildet ebenfalls Kohlendioxid, daneben enthält sie außer Kohlenmonoxid offensichtlich noch geringe Mengen von Wasserstoff und Sauerstoff. Wasserdampf ist nur in Spuren vorhanden, freies Wasser auf der Oberfläche überhaupt nicht.

Das Klima auf dem Mars ist, nicht zuletzt wegen der extrem dünnen Atmosphäre, außerordentlich hart. Die mittlere Jahrestemperatur beträgt nur -15°C , während die der Erde immerhin bei $+4^\circ\text{C}$ liegt. Die tages- und jahreszeitlich bedingten Temperaturschwankungen sind äußerst kraß, weil die wolkenarme dünne Atmosphäre keinen hinreichenden Schutz gegen Temperaturabstrahlung bietet. So hat man zwar für einige Gebiete in Äquatornähe Mittagstemperaturen etwa zwischen $+15$ und $+25^\circ\text{C}$ gemessen, gegen Ende der Nacht fallen die Temperaturen dieser Gebiete jedoch auf Werte zwischen -35 und -70°C . Für die Regionen der weißlichen Polkappen, die aus einer relativ dünnen Lage von Kohlendioxid-schnee zu bestehen scheinen, ergaben die Messungen sogar Temperaturen um -120°C . Mit marsumkreisenden Planetensonnen wurden aber auch vereinzelte „Wärmeinseln“ auf der Marsoberfläche festgestellt, deren Temperatur konstant um etliche Grade über der Temperatur der weiteren

Umgebung liegt. Möglicherweise sind vulkanische Vorgänge in der Planetenkruste dafür die Ursache. Ob wir tatsächlich annehmen können, daß auf dem Mars niedere Lebensformen (Algen, Moose oder ähnliche Pflanzen) existieren, die sich an das extrem harte Klima angepaßt haben, ist zur Zeit noch umstritten. Immerhin bietet die dünne Atmosphäre des Planeten keinen Schutz gegen die lebensbedrohende Ultraviolettstrahlung der Sonne, und mit einem stärkeren Magnetfeld fehlt auch hier ein magnetischer Schirm gegen Partikelstrahlungen.

Die beiden Marsmonde, Phobos und Deimos, blieben wegen ihrer außergewöhnlichen Winzigkeit und einiger bahnmechanischer Besonderheiten lange Zeit recht rätselhaft. Inzwischen lieferten Marssonden („Mariner“, USA) von beiden Monden Fotos, die diese Körper als unregelmäßig geformte kosmische Trümmerstücke erkennen lassen, deren Oberflächen offenbar durch den Aufprall von anderen Kleinkörpern mit Einschlagkratern unterschiedlicher Größe bedeckt sind. Wir können in ihnen zweifellos, zumindest der physischen Beschaffenheit nach, enge Verwandte der zwischen Mars und Jupiter umlaufenden Planetoiden sehen.

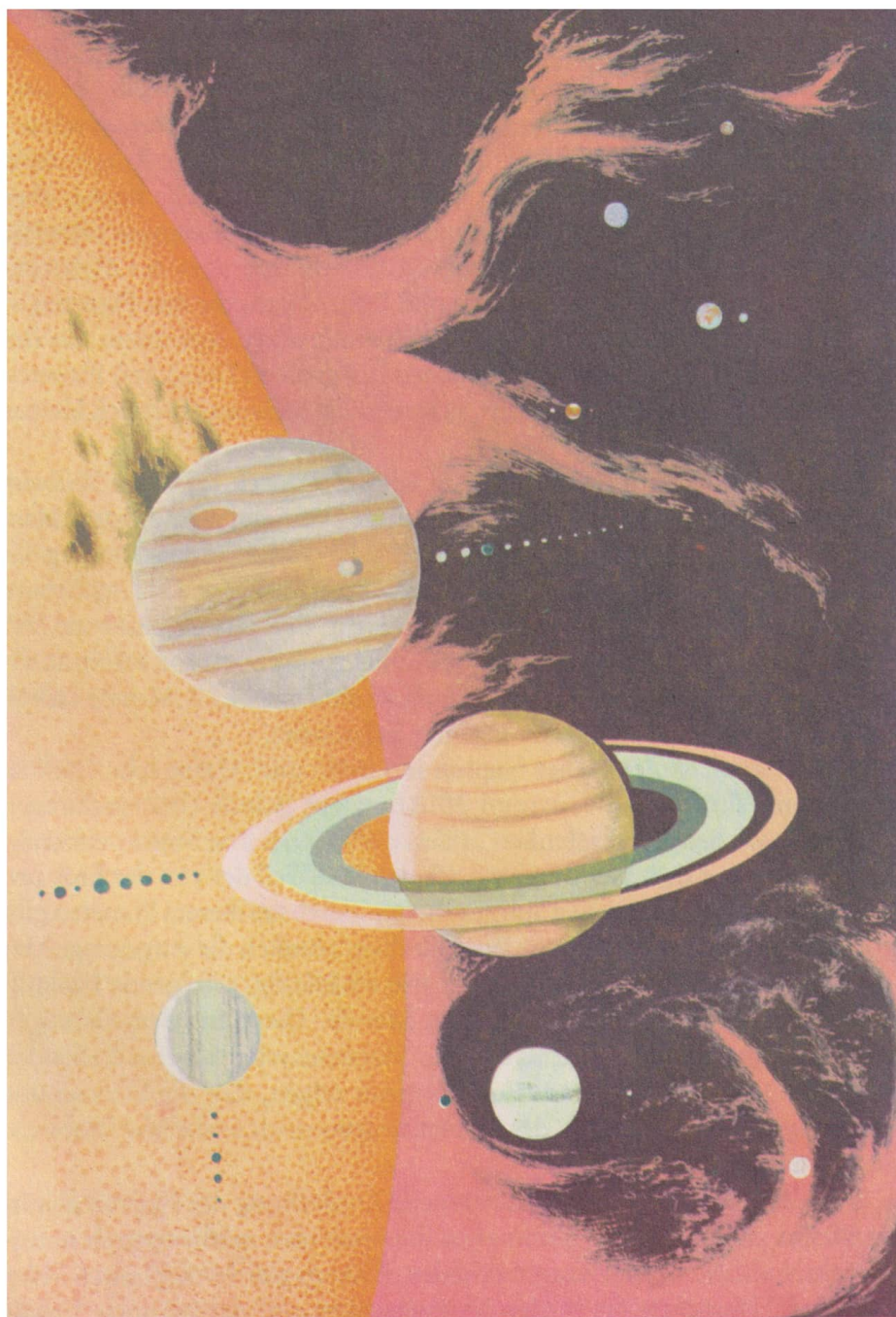
Der Planet Jupiter ist der Riese unter den Wandelsternen; immerhin beträgt seine Masse rund das 318fache der Erdmasse und ist damit noch mehr als doppelt so groß wie die Gesamtmasse aller übrigen Planeten. Seine geringe mittlere Dichte ($1,30 \text{ g/cm}^3$) läßt wie bei der Sonne auf eine von der Erde grundverschiedene Beschaffenheit schließen. Optische Beobachtungen und spektrographische Befunde zeigen ihn als planetaren Weltkörper mit einer enorm ausgedehnten und durch dichte Wolken angereicherten Atmosphäre, in der wahrscheinlich Wasserstoff den Hauptanteil bildet und außerdem große Mengen von Ammoniak und Methan vorhanden sind. Diese und andere Besonderheiten – beispielsweise die kurze Rotationsperiode, die zu einer erheblichen Abplattung des Jupiter führt – wiederholen sich im Prinzip bei den nächsten drei Planeten, so daß man für diese ganze Gruppe, wie schon erwähnt, die Bezeichnung jupiterähnliche Planeten prägte.

An der oberen Wolkengrenze des Jupiter beträgt die Temperatur zwar nur rund -130°C , aber aus seiner Radiostrahlung und den Messungen einer Jupiter-Forschungs-sonde („Pioneer 10“, USA) konnte der hochinteressante Schluß gezogen werden, daß an der Strahlungsbilanz des Planeten mehr Eigenenergie beteiligt ist als eingestrahlte Sonnenenergie. Wahrscheinlich verfügt der Jupiter also noch über beträchtliche eigene Wär-

meenergiequellen. Über den inneren Aufbau des Planeten können wir gegenwärtig jedoch kaum etwas aussagen. So bleibt vor allem offen, ob er einen festen Kern aus schwereren Elementen besitzt oder nur aus verflüssigten und verfestigten Gasen besteht, wie verschiedene ältere Hypothesen besagen. Die neueren Erkenntnisse über die Energiebilanz scheinen allerdings besser zu der Annahme zu passen, daß der Planet bis an eine – vorläufig nicht zu bestimmende – Oberfläche unterhalb der Wolkenhülle noch ziemlich heiß sein müsse. Höchst bemerkenswert ist, daß der Jupiter eine ausgedehnte Magnetosphäre und demzufolge einen Strahlungsgürtel hat, was offenbar nur für die Erde und ihn zutrifft und unter anderem auch Spekulationen über günstige Voraussetzungen zur Entwicklung von Urformen des Lebens in seiner Atmosphäre hervorrief.

Eine Sonderstellung nimmt der Jupiter unter den übrigen Planeten ebenfalls wegen seiner Monde ein. Wie bereits erwähnt, wurden die 4 hellsten der insgesamt 12 Monde schon von Galilei (1610) entdeckt. Noch im gleichen Jahrhundert gelang es dem dänischen Astronomen *Olaf Römer* (1644 – 1710), mittels der 4 Galileischen Jupitermonde erstmalig die Endlichkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts nachzuweisen und den Betrag dieser Geschwindigkeit mit rund 300 000 km/s annähernd richtig anzugeben. Periodische Änderungen in den Eintrittszeiten der Verfinsterungen, welche die 4 großen Jupitermonde durch den Planetenschatten erfahren, hatten ihn auf diese Entdeckung gebracht. Ihre relativ große Helligkeit, die sie schon in kleinen Fernrohren gut sichtbar werden läßt, verdanken die Galileischen Monde vornehmlich ihrer besonderen Größe. Der kleinste erreicht fast den Erdmond, während der größte im Durchmesser sogar den Planeten Merkur übertrifft. Die Beschaffenheit dieser großen Jupitermonde ist noch unklar; möglicherweise ähneln sie dem Erdmond und dem Mars und haben zum Teil eine dünne Atmosphäre, in der Ammoniak und Methan vorkommen. Die übrigen Jupitermonde sind dagegen sehr kleine Körper, ihre bahnmekanischen Verhältnisse deuten zudem eine gewisse Verwandtschaft mit den Planetoiden an. Für einige von ihnen dürfte feststehen, daß sie von der starken Jupitergravitation eingefangene ehemalige Kleine Planeten sind.

Die Planetenfamilie des Sonnensystems, von oben nach unten:
Merkur, Venus, Erde und Mond, Mars (2 Monde), Jupiter (12 Monde), Saturn
(9 Monde), Uranus (5 Monde), Neptun (2 Monde), Pluto



Die physikalische Beschaffenheit der nachfolgenden drei Planeten – Saturn, Uranus und Neptun – brauchen wir nicht im einzelnen zu beschreiben, da sie in dieser Hinsicht weitgehend dem Jupiter ähneln. Es sind ausnahmslos Riesenplaneten mit annähernd ähnlich zusammengesetzten Atmosphären. Der Saturn bietet allerdings in Gestalt seines Ringsystems eine im Planetensystem einmalige Besonderheit. Dieses sehr flache, aber ausgedehnte Gebilde besteht nach neueren Radaruntersuchungen offenbar aus einer riesigen und dichten Schar von Einzelkörpern, in der Mehrzahl mit Durchmessern zwischen Metern und Dezimetern, die den Planeten in der Ebene des Ringes als winzige Monde umkreisen. Außerdem hat der Saturn noch 10 echte Monde, von denen der größte (Titan) den Planeten Merkur im Durchmesser übertrifft, während die anderen erheblich kleiner sind.

Mit der Entdeckung des Uranus am Fernrohr durch *Friedrich Wilhelm Herschel* (1738 – 1822) im Jahre 1781 wurde erstmalig die Zahl der „klassischen“ Planeten erweitert und gleichzeitig die räumliche Ausdehnung des Planetensystems annähernd verdoppelt. Eine bisher nicht erklärbare Merkwürdigkeit dieses Planeten besteht darin, daß sein Äquator um 98° gegen die Umlaufbahn geneigt ist und seine Rotationsachse somit annähernd in der Bahnebene liegt. Die Umlaufbahnen seiner 5 Monde stehen daher fast senkrecht auf seiner eigenen Bahnebene.

Dem Uranus ist der Planet Neptun in Größe und Masse sehr ähnlich, die enorme Entfernung von rund 30 AE macht jedoch Untersuchungen seiner physischen Beschaffenheit äußerst schwierig. Die Sonneneinstrahlung beträgt auf dem Neptun nur noch den 900. Teil der von der Erde pro Flächeneinheit empfangenen Sonnenenergie. Auch bei diesem Planeten gibt es eine unerklärte kinematische Besonderheit, nämlich die entgegengesetzt zu seiner eigenen Rotationsrichtung, also rückläufig, erfolgende Umlaufbewegung des größeren seiner beiden Monde. Diese aus dem sonstigen strengen Schema der Kinematik des Planetensystems herausfallenden Eigentümlichkeiten bei Uranus und Neptun zeigen, daß die Erforschung der Entwicklungsgeschichte des Sonnensystems noch zahlreiche Probleme zu bewältigen hat.

Die schon kurz erwähnte sensationelle Entdeckung des Neptun gehört zweifellos zu den größten Triumphen der modernen mathematisch-naturwissenschaftlichen Forschungsmethoden. Nahezu gleichzeitig hatten Mitte des 19. Jahrhunderts die beiden Mathematiker und Astronomen *Urbain*

Leverrier (1811–1877) in Frankreich und *John Adams* (1819–1892) in England unabhängig voneinander aus Störungen der Bahnbewegung des Uranus unter Anwendung der Newtonschen Himmelsmechanik die mutmaßliche Position eines noch unbekannten Planeten errechnet. Leverrier teilte seine Berechnungsdaten dem deutschen Astronomen *Johann Gottfried Galle* (1812–1910) mit, der den nachfolgend Neptun genannten Planeten dann auch am 23. September 1846 in unmittelbarer Nähe des berechneten Ortes auffand.

Ähnlich verlief später die Entdeckungsgeschichte des sonnenfernsten Planeten Pluto. Aus Reststörungen in der Uranusbewegung schloß man auf das Vorhandensein eines weiteren unbekannten Planeten, der schließlich nach langer vergeblicher Suche am 18. Februar 1930 von dem Amerikaner *Clyde William Tombaugh* auf fotografischen Himmelsaufnahmen als schwacher Sternenpunkt gefunden wurde. Wie die weiteren bahnmekanischen Untersuchungen ergaben, zeigt der Pluto mit seiner sehr exzentrischen (Exzentrizität = Abstand des Brennpunkts vom Mittelpunkt einer Ellipse) und stark gegen die Ekliptik geneigten Bahn ein von dem der übrigen Planeten beträchtlich abweichendes Verhalten. Mutmaßungen, daß es sich bei ihm um einen ehemaligen Neptunmond handeln könnte, haben sich jedoch als recht unwahrscheinlich erwiesen. In Größe und sonstiger Beschaffenheit ähnelt der Pluto offensichtlich wieder den inneren Planeten, wobei allerdings die bisher ermittelten Daten wegen seiner weiten Entfernung und relativ geringen Größe noch keinesfalls dieselbe Zuverlässigkeit besitzen wie die der anderen Planeten.

Klein- und Kleinstkörper im Sonnensystem

Die schon öfter erwähnten Planetoiden oder Kleinen Planeten stellen eine schätzungsweise 50 000 bis 100 000 Objekte umfassende Gruppe von Kleinkörpern dar, die in der Mehrzahl zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter um die Sonne laufen. Die mittlere Sonnenentfernung des gesamten Planetoiden-„Systems“ liegt bemerkenswerterweise in einer „Lücke“ innerhalb der sonst gesetzmäßigen Entfernungsfolge der großen Planeten. Es stellt damit sozusagen den Ersatz eines dort zu erwartenden großen Planeten dar. Dieser Tatbestand ist für die Entwicklungsgeschichte des

Planetensystems zweifellos äußerst interessant, läßt sich jedoch bis heute noch nicht plausibel erklären. Wegen der teilweise recht intensiven Gravitationseinwirkungen der großen Planeten, vor allem natürlich des Jupiter, sind die Bahnen der Planetoiden nach Form und Lage außerordentlich verschieden. Einige erreichen auf sehr exzentrischen Bahnen sogar noch den sonnennahen Raum innerhalb der Merkurbahn, während andere bis über die Saturnbahn hinausgelangen. Vereinzelte Planetoiden können daher auch relativ nahe an der Erde vorüberziehen – Hermes näherte sich 1937 der Erde bis auf fast 600 000 km –, was diese Objekte dann zur Ableitung der Sonnenparallaxe besonders geeignet macht. Bisher hat man erst etwa 4000 dieser Kleinen Planeten entdeckt, von denen rund 1800 durch genauere Bahnbestimmungen gesichert werden konnten. Die Entdeckungswahrscheinlichkeit für diese Weltkörper ist recht niedrig, weil nur die vier größten Durchmesser von einigen hundert Kilometern haben, die überwältigende Mehrheit jedoch lediglich solche von einigen Dutzend Kilometern bis unter einem Kilometer aufweist. Die Gesamtmasse aller Planetoiden, die wir uns in der Regel höchstwahrscheinlich als ähnliche Körper wie die Marsmonde vorstellen dürfen, liegt unter 0,1 Erdmasse.

Außer den großen und kleinen planetarischen Weltkörpern gehört zum Sonnensystem noch weitere stoffliche Substanz, die sich zwar wiederum nach gewissen Hauptgruppen ordnen läßt, insgesamt jedoch eine sehr enge innere Verwandtschaft zeigt. Es handelt sich bei dieser im Raum zwischen Sonne und Planeten befindlichen *interplanetaren Materie* ausnahmslos um Objekte oder Substanzen, die ihrem Ausmaß nach zwischen den Dimensionen etwa der kleinsten Planetoiden und der Partikelgröße reiner gas- oder staubförmiger Materie liegen.

Die gegenwärtig nur recht selten attraktiv in Erscheinung tretenden *Kometen*, von denen es im Sonnensystem wahrscheinlich einige Milliarden gibt, sind die „Vagabunden“ der großen Sonnenfamilie; denn sie laufen fast sämtlich in nicht allzu stabilen, meist sehr exzentrischen Bahnen um die Sonne, wobei sie teilweise sogar bis weit über die Plutobahn hinausgelangen können. Das charakteristische Erscheinungsbild – diffus leuchtender Nebelkopf sowie mehr oder weniger langer Schweif – erreichen jeweils nur die größeren Objekte, und zwar erst bei einer bestimmten Annäherung an die Sonne. Dann werden die in dem meist bloß einige Kilometer großen Kometenkern konzentrierten gasförmigen Substanzen durch die Sonnenstrahlung freigesetzt und zum Leuchten angeregt. Auch staubförmige

Partikel, die mit den gefrorenen Gasen und größeren Trümmern den mehr oder weniger lockeren Verband des Kometenkerns bilden, können am Aufbau und am Leuchten des Kometenkerns oder -schweifs beteiligt sein.

Für die entwicklungsgeschichtliche Stellung der Kometen im Sonnensystem ist gegenwärtig noch nicht ganz geklärt, ob es sich bei ihnen um kosmische Objekte aus dem interstellaren Raum handelt, die lediglich die Gravitationswirkung der Sonne in deren System hineingezogen hat, oder, was wahrscheinlicher ist, um spezielle kosmische Formen, die bei der Entstehung des Sonnensystems in dessen Randgebieten gebildet wurden. Allein ihre enge Verwandtschaft zur *meteoritischen Materie* und zum *interplanetaren Gas* ist unbestritten.

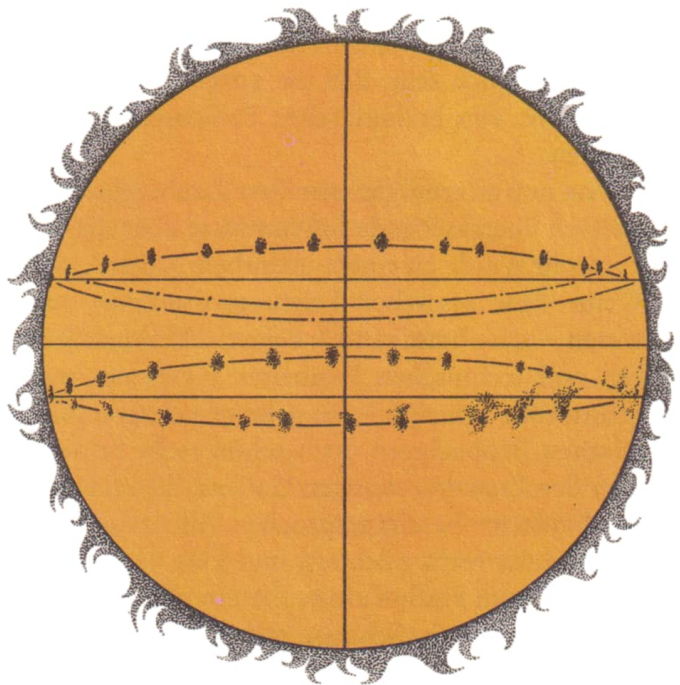
Die aus Nickeleisen oder (beziehungsweise und) speziellen Silikaten bestehenden *Meteorite* sind extreme Kleinkörper und haben im allgemeinen Durchmesser zwischen etwa 1 cm und 0,01 cm; größere Meteorite kommen recht selten vor, während die Mikrometeorite (unter 0,1 mm Durchmesser) sehr zahlreich sind und vielfach auch als kosmischer Staub bezeichnet werden. Entgegen früheren Annahmen ist die Gesamtzahl und damit die mittlere Verteilungsdichte von Meteoriten mit größeren Durchmessern als 1 mm im Sonnensystem nicht so hoch, daß für Raumflugkörper selbst bei längerem Raumaufenthalt eine ernsthafte Meteoritengefahr besteht. Die Gesamtmasse der meteoritischen Materie wird übrigens auf weniger als ein Milliardstel der Erdmasse geschätzt.

Meteorite bewegen sich meist auf nur wenig gegen die Ekliptik geneigten elliptischen Bahnen um die Sonne, woraus zu schließen ist, daß sie mit hoher Wahrscheinlichkeit zur Ursprungsmaterie des Sonnensystems gehören. In vielen Fällen konnte nachgewiesen werden, daß sie Auflösungsprodukte von Kometenkernen sind. Ein Teil der im interplanetaren Raum vorhandenen, allerdings äußerst stark verdünnten gasförmigen Materie stammt wahrscheinlich ebenfalls aus Kometensubstanz, was den verwandtschaftlichen Zusammenhang innerhalb der interplanetaren Materie erkennen läßt. Den Hauptanteil des interplanetaren Gases liefert jedoch die Sonne selbst. Wie wir noch sehen werden, bewegt sich nämlich ein ständiger Strom geladener atomarer Partikel von der Sonne in den Raum hinaus.

Aus dieser kurzen Betrachtung der Beschaffenheit des Sonnensystems, auf die wir noch einmal zurückkommen werden, dürfte zumindest klar

geworden sein, daß es sich bei dieser Familie von größeren Weltkörpern sowie den zwischen ihnen befindlichen festen und gasförmigen Kleinsubstanzen um ein eigenständiges kosmisches System handelt, für dessen Bestandteile wir offenbar auch eine gemeinsame Entstehungs- und Entwicklungsgeschichte annehmen müssen. Seine Natur als weitgehend selbständiges und in sich geschlossenes System wird überdies daraus ersichtlich, daß die Entfernung bis zu den allernächsten Weltkörpern außerhalb des planetaren Raumes dessen Dimensionen schon um das Vieltausendfache übertrefft. Innerhalb dieses Systems nimmt die Sonne nicht nur in bahnmechanischer Hinsicht die Stellung eines Zentralkörpers ein, sondern liefert auch den Schlüssel zu vielen Problemen, die mit den Einzelheiten seiner Entstehung und Entwicklung zusammenhängen. Das heißt, die detaillierte astrophysikalische Erforschung der Sonne, von der nunmehr die Rede sein soll, ist zugleich eine notwendige Voraussetzung für das Verständnis der Entstehungs- und Entwicklungsgeschichte der Erde, einschließlich des organischen Lebens auf diesem Planeten.

Die Sonne – ein glühender kosmischer Gasball



Das Fernrohr eröffnet neue Welten

Die in der Epoche der Renaissance eingeleiteten und danach nicht mehr aufzuhaltenden Umwälzungen in der Naturbetrachtung und Weltanschauung hatten zwangsläufig auch zur Folge, daß die Naturgelehrten der physischen Beschaffenheit der Sonne ein wachsendes, wissenschaftlich ernstgemeintes Interesse entgegenbrachten. Eine maßgebliche Rolle bei dem Aufbruch zu neuen Wegen der astronomischen Forschung spielte die Erfindung des Fernrohrs um die Wende des 16. zum 17. Jahrhundert.

Wer die entscheidende Entdeckung machte, daß zwei in einem bestimmten Abstand hintereinander gehaltene Brillengläser ein vergrößertes und darum scheinbar näheres Bild ferner Gegenstände liefern, ist heute nicht mehr mit Gewißheit zu klären. Eine reizvolle, aber unverbürgte Geschichte schreibt sie den spielenden Kindern holländischer Brillenmacher zu. Sicher dürfte lediglich sein, daß die ersten – in allem noch sehr primitiven – Teleskope von holländischen Brillenschleifern hergestellt und verbreitet wurden.

Von nun an ermöglichten diese Zaubergläser den Wissenschaftlern neue, vielfach überraschende Erkenntnisse über die Natur fremder Welten. Das Fernrohr wurde zu einem unentbehrlichen Arbeitsmittel des Astronomen. Wenn seine optischen Leistungen anfangs auch noch sehr bescheiden waren – man hatte ja noch keinerlei Einblick in die theoretischen Grundlagen und technischen Feinheiten dieses nur mehr oder weniger zufällig gefundenen Prinzips –, so gelangen einigen Naturforschern und astronomischen Beobachtern doch schon recht bemerkenswerte Entdeckungen. Von den Erstentdeckungen Galileis, die seinerzeit großes Aufsehen erregten, haben wir bereits gesprochen. Allerdings konnte es geschehen, daß sich selbst sonst recht nüchtern und klar denkende Köpfe als dennoch nicht ganz frei vom Einfluß altüberlieferter Vorstellungen erwiesen und aus dem Entdeckten falsche Schlüsse zogen. Daher entbrannte in jenen Pioniertagen

der teleskopischen Himmelsbeobachtung oft heftiger Meinungsstreit um die Deutung neu aufgefundener Erscheinungen. Und gerade die Sonne stand nicht selten im Kreuzfeuer des wissenschaftlichen Disputs.

Schon bald nachdem sich die Kunde von den holländischen Fernrohren unter den Naturgelehrten Europas verbreitet hatte, waren mehrere Besitzer solcher Instrumente annähernd um die gleiche Zeit auf den Gedanken gekommen, das neue Gerät auch auf die Sonne zu richten. Zu den ersten gehörte Galilei, der sich bekanntlich mehrere Fernrohre selbst gefertigt hatte. Über die Entdeckung von Flecken auf der Sonne geriet er mit dem Jesuitenpater *Christoph Scheiner* (1573–1650) in einen hartnäckigen Prioritätsstreit. Jeder von ihnen wollte als erster im Jahre 1610 jene merkwürdigen dunklen Gebilde vor oder auf der hellen Sonnenscheibe beobachtet haben, die man seither als *Sonnenflecke* bezeichnet. Allerdings hatten anfangs beide Schwierigkeiten, das Gesehene richtig einzuschätzen.

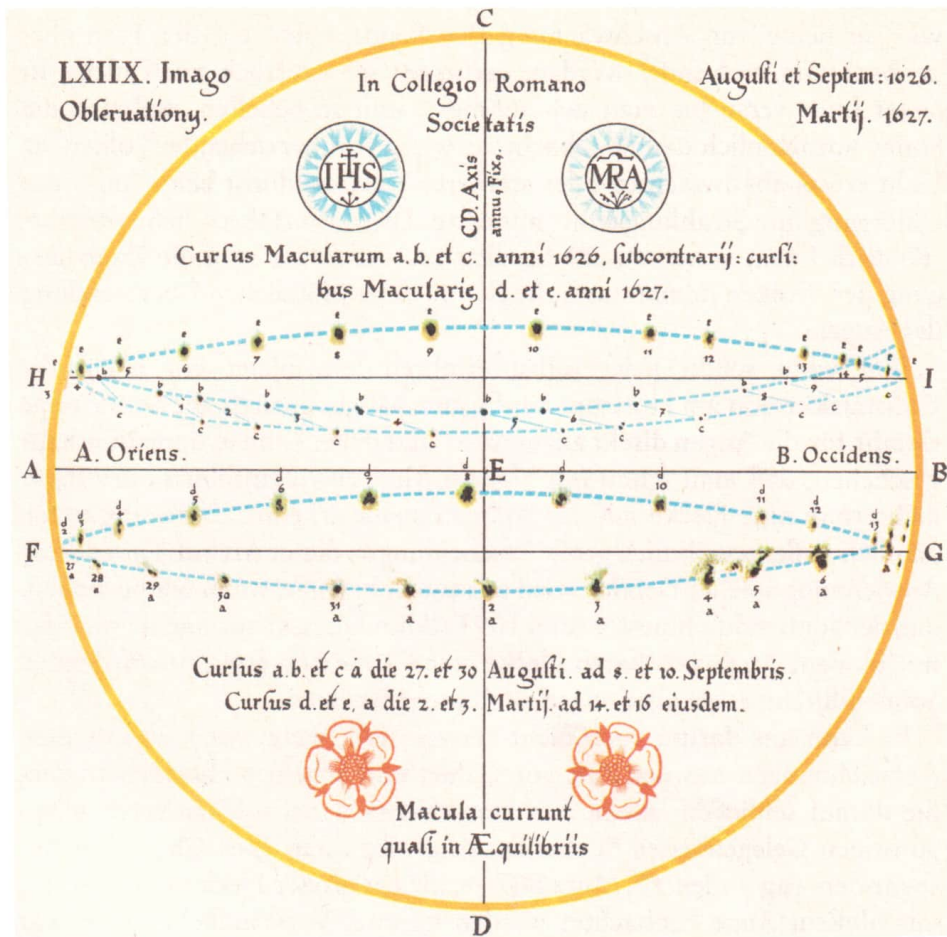
Galilei, dem wahrscheinlich auch in diesem Fall der Vorrang zukommt, maß seinen Beobachtungen zunächst offenbar weniger Bedeutung bei, er hielt die Erscheinungen wohl für zufällig an der Sonne vorüberziehende dunkle Wolken oder Körper. Scheiner als Angehörigem einer geistlichen Institution erging es mit seiner Entdeckung besonders bezeichnend. Wie es heißt, wurde er von seinem Vorgesetzten, dem er seine Wahrnehmung mitteilte, so scharf für die Ungeheuerlichkeit gerügt, auf der Sonne etwas „gesehen haben zu wollen, wovon bei Aristoteles nichts zu lesen ist“, daß er einige Monate lang überhaupt nicht mehr zu beobachten wagte. Seine Deutungsversuche gingen dann im weiteren vorsichtigerweise von der Annahme aus, es handle sich bei den dunklen Flecken um kleine planetare Körper, die nahe der Sonne umlaufen. Wahrscheinlich spielte dabei sein von der Theorie beeinflusstes Weltbild, das eine fleckenlose Reinheit der Sonne forderte, die Hauptrolle.

Galilei widersprach aber sehr bald dieser Hypothese und erklärte seinerseits die Sonnenflecke für echte Erscheinungen der Sonnenoberfläche, ohne jedoch auf Einzelheiten einzugehen. Scheiners Bemühungen um eine endgültige Klärung des Sachverhalts erbrachten schließlich die Bestätigung der Ansicht Galileis. Den Ausschlag gab die Feststellung, daß die Flecke ihre Lage auf der Sonnenscheibe von Tag zu Tag verändern. Der Verlauf dieser Positionsänderungen entspricht eindeutig einem Bild, wonach die dunklen Erscheinungen Flecke auf der Oberfläche einer um ihre Achse rotierenden Sonne sind. Beide Erkenntnisse, also das Vorhandensein

dunkler Gebiete auf der Sonne und deren Rotation, bestätigten erstmalig, daß die Sonne ebenfalls „nur“ ein Weltkörper ist, wenn augenscheinlich auch ein besonderer. Es waren weitere wichtige Beiträge zu einem materialistischen astronomischen Weltbild.

Scheiner veröffentlichte die Ergebnisse seiner langjährigen sorgfältigen Sonnenbeobachtung 1630 in dem speziell diesem Problem gewidmeten Werk „Rosa Ursina“. Darin gab er an Hand seines umfangreichen gesammelten Materials bereits eine recht detaillierte Beschreibung der vielgestaltigen Sonnenflecke nach Größe, Zahl und Häufigkeit sowie ihren individuellen Veränderungen. Ferner teilte er die von ihm erstmalig bestimmte Dauer der Sonnenrotation mit und deutete auch schon an, daß das Auftreten der Flecke an gewisse bevorzugte Zonen beiderseits des Sonnenäquators gebunden ist, deren Lage sich im Laufe der Jahre ändert. Diese und andere Erkenntnisse beziehungsweise Wahrnehmungen, die teilweise erst zwei Jahrhunderte später in der sonnenphysikalischen Forschung ihre Würdigung fanden, machten Scheiners Buch zum ersten klassischen Werk auf diesem Gebiet.

Wenn wir von den Anfängen einer wissenschaftlichen Sonnenbeobachtung sprechen, dürfen wir nicht übersehen, wie problematisch derartige Untersuchungen in der damaligen Zeit allein schon von der Beobachtungstechnik her waren. Die Sonne strahlt ja ihr Licht mit einer enormen Stärke aus. Wir brauchen nur einmal bei Sonnenschein die eingeschaltete Tiefstrahlerbatterie eines Sportstadions neben der Sonne zu sehen, um deren gewaltige Strahlungsintensität richtig einschätzen zu können. Darüber hinaus weiß ein jeder, daß es förmlich schmerzt, wenn man auch nur kurze Zeit mit ungeschützten Augen in die klare Sonne blickt. Und wie die Praxis gezeigt hat, droht dem, der längere Zeit ununterbrochen oder sehr häufig direkt in die Sonne schaut, die Gefahr schwerer Sehstörungen oder gar der Erblindung. Die Verwendung eines Fernrohrs steigert die Gefahr noch um ein mehrfaches, weil das von der größeren Objektivöffnung gesammelte Licht, zu einem schmalen Bündel konzentriert, in das Auge gelangt. Bei größeren Fernrohren würde dies augenblicklich zu einer Totalschädigung der empfindlichen Netzhaut führen. Wie gefährlich die am Fernrohrökular ungeschwächt austretende, gebündelte Sonnenstrahlung ist, hat auch mancher heutige Wissenschaftler schon am eigenen Leibe oder genauer Anzug zu spüren bekommen – nämlich dann, wenn er zwar das zur Beobachtung benutzte Hauptrohr mit lichtdämpfenden Mitteln ausrüstete,



Aufzeichnung von Sonnenbeobachtungen aus dem Jahre 1627 (Christoph Scheiner, „Rosa Ursina“)

aber vergaß, das Objektiv des kleinen Sucherfernrohrs mit einem Schutzdeckel zu versehen. Gerät er nun im Eifer der Hantierungen zufällig mit Jacke oder Hemd dicht hinter das Sucherokular, so machen ihn brenzlicher Geruch und Brandspuren sehr schnell auf sein Versäumnis aufmerksam. Die nackte Haut reagiert natürlich noch eindrucksvoller auf diese ungewollte Demonstration der Brennglaswirkung eines Fernrohrs.

Die ersten Sonnenbeobachter am Ende des Mittelalters standen also vor einem recht heiklen Problem; denn über spezielle technische Hilfsmittel,

wie sie heute zur Abschwächung des Sonnenlichts bei der Fernrohrbeobachtung verwendet werden, verfügten sie natürlich noch nicht. In erster Linie versuchte man sich anfangs damit zu behelfen, daß man die Sonne vornehmlich dann beobachtete, wenn vorüberziehende Wolken ihr Licht etwas abschwächten oder stärkerer Horizontdunst beim Auf- oder Untergang ihre Strahlungskraft minderte. Dieses Verfahren ließ selbstverständlich kaum systematische Studien zu, außerdem barg die Zugbewegung der Wolken immer das hohe Risiko einer plötzlichen Überblendung des Auges.

Wie wohl schon jeder selbst erfahren hat, bietet vor allem die Dunstabsorption am Horizont häufig gute Möglichkeiten, die Sonne ohne Gefahr für die Augen direkt anzusehen. Und dabei kann es dann durchaus geschehen, daß man schon mit bloßem Auge einen einzelnen oder sogar mehrere dunkle Flecke auf der Sonnenscheibe erkennt. Zeitweilig treten nämlich außergewöhnlich große Erscheinungen dieser Art auf. Die enorme Ausdehnung solcher Gebilde wird uns sofort bewußt, wenn wir bedenken, daß der Sonnendurchmesser rund 109 Erddurchmesser ausmacht und diese mit bloßem Auge sichtbaren Flecke eine Größe von etwa einem Zehntel Sonnendurchmesser oder sogar noch mehr besitzen.

Es kann uns darum auch nicht verwundern, wenn wir schon in alten Aufzeichnungen aus der Zeit vor Galilei und Scheiner Hinweise finden, die darauf schließen lassen, daß man seinerzeit bei solchen vereinzelt günstigen Gelegenheiten Sonnenflecke gesehen hat. Eine Chronik nennt sogar den Tag – den 17. März 807 –, als ein großer Fleck auf der Sonne mit bloßem Auge beobachtet werden konnte. Verständlicherweise war man damals noch nicht in der Lage, das Gesehene richtig einzuschätzen, und so glaubte man an Täuschungen, an kleine hohe Wolken oder auch an dunkle Körper, die an der Sonne vorbeiziehen.

Für uns, die wir um die Gefahren einer direkten Sonnenbeobachtung mit Fernrohren wissen, muß es fast unglaublich klingen, daß einige Naturforscher aus der Zeit Galileis es tatsächlich fertigbrachten, bei klarem Himmel mit ihren – allerdings noch recht kleinen und verhältnismäßig lichtschwachen – Fernrohren die Sonne zu untersuchen. Von einigen Sachkennern wird sogar die Ansicht vertreten, daß Galileis spätere schwere Sehbehinderungen nicht zuletzt auf derartige Versuche zurückzuführen seien.

Eine erste Beschreibung solcher Sonnenbeobachtung lieferte *Johann Fabricius* (1587–etwa 1617), der Sohn des als eifriger Himmelsbeobach-

ter bekannt gewordenen ostfriesischen Pfarrers *David Fabricius* (1564–1617), in einer 1611 veröffentlichten Schrift, wo er seine unabhängig von anderen gemachte Entdeckung der Sonnenflecke mitteilte:

„Während ich dies beobachtete, zeigte sich wiederholt ein dunkler Flecken – von der anderen Seite aber seltener und schwächer – von einem kleinen Durchmesser im Vergleich zur Sonnenscheibe. Im Anfang begann ich sehr an der Richtigkeit der Beobachtung zu zweifeln, wenn nämlich ein Wolkenschleier mir die Sonne verdeckte, so daß ich meinte, daß die vorüberfliegenden Wolken so etwas wie einen Flecken auf der Sonne vortäuschten. Wohl zehnmal wurde die Beobachtung mit niederländischen Fernrohren verschiedener Größe wiederholt; endlich wurde ich dessen gewiß, daß der Flecken nicht durch die Wolken verursacht sei. Jedoch wollte ich mich nicht auf das deutliche Zeugnis meiner Augen verlassen. Ich rief meinen Vater herbei, bei dem ich damals nach meiner Rückkehr aus den Niederlanden wohnte, damit er an dieser Beobachtung teilnehme, ohne allerdings sein Auge zu gefährden. Jeder von uns ging mit seinem Fernrohr an den Sonnenstrahlen entlang vom Sonnenrande allmählich bis zur Sonnenmitte vor, bis das Auge, an die Sonnenhelligkeit gewöhnt, die ganze Sonnenscheibe zu überblicken uns gestattete. Wir sahen damals den Flecken deutlicher und sicherer. Inzwischen unterbrachen Wolken die langdauernde Beobachtung, und die nach Süden wandernde Sonne setzte unseren Beobachtungen ein Ende, da zu befürchten war, daß eine unbesonnene Betrachtung der mittäglichen Sonne das Auge sehr schädigen würde; hatte doch schon das schwächere Licht der auf- und untergehenden Sonne das Auge häufig gerötet, was zwei Tage anhielt, wobei die gesehenen Gegenstände geändert erschienen...

Als wir die Nacht mehr zweifelnd als schlafend zugebracht hatten, wurden wir von der wiederkehrenden Sonne aufgeweckt, die sich durch ihren heiteren Anblick uns zur nicht unwillkommenen Schiedsrichterin in dieser zweideutigen Sache machte. Eilends blickte ich hin und ließ mir kaum Zeit bei meinem eifrigen Begehren, die Sonne anzusehen. Beim ersten Augenblick erschien der Flecken von neuem... Und so ging der Tag dahin; häufig hatten wir das Fernrohr zur Sonne gerichtet und dabei unser Verlangen zu beobachten kaum gestillt, obwohl unsere Augen sich über unsere Rücksichtslosigkeit beschwerten und eine große Gefahr androhten...

Endlich klarte es wieder auf, nachdem die Wolken verschwunden waren, und es bot sich ein erwähnenswertes Schauspiel. Wir sahen in der Sonne

jenen Flecken von Osten nach Westen in einer geneigten Bahn wandern; als wir gespannt zusahen, bemerkten wir einen anderen Flecken am Sonnenrand, zwar kleiner, jedoch dem größeren einige Tage später folgend und fast zur Mitte der Sonnenscheibe wandernd. Endlich folgte ihnen ein anderer Flecken, so daß bereits drei Flecken gleichzeitig zu erblicken waren, von denen der größere, allmählich zum anderen Rand wandernd, unseren Blicken entschwand, während die übrigen dasselbe zu tun sich anschickten. Darauf verschwanden nach wenigen Tagen auch sie. Dies erregte mich sehr; ich hoffte, ich fürchtete, daß ich sie auf Nimmerwiedersehen verabschiedet hätte, wenn mich nicht die Hoffnung ermahnt hätte, an der künftigen Wiederkehr der Flecken nicht zu zweifeln. Ich erwartete die Entscheidung nach etwa 10 Tagen: Inzwischen begann der größere Flecken, der neulich zuerst verschwunden war, von neuem am östlichen Rande zu erscheinen. Nachdem er bei seiner langsamen Wanderung tiefer in die Sonnenscheibe gekommen war, folgten die übrigen Flecken.“*

All diese Beobachtungen ließen schließlich keinen Zweifel mehr daran, daß sich die merkwürdigen Flecke tatsächlich auf der Sonnenoberfläche befinden. Gerade die auch von Fabricius erwähnte Änderung der Lage dieser Flecke, die im weiteren – wie von Scheiner – nur als Folge der Sonnenrotation gedeutet werden konnte, war ein Beweis dafür. Dennoch versuchten längere Zeit andere Beobachter, denen die Reinheit der Sonne ein hohes Prinzip war, diese Erscheinungen unbedingt als um die Sonne kreisende Körper zu interpretieren. Ein Franzose gab ihnen sogar die Bezeichnung „Bourbonische Gestirne“.

Die anderen anfänglichen Versuche, die Sonnenflecke zu erklären, entsprachen ebenfalls der damaligen Zeit. Da man von den wahren Vorgängen auf der Sonne noch keine annähernd richtigen Vorstellungen haben konnte, fielen auch die „physikalischen“ Hypothesen recht naiv aus. So hielt man die Flecke entweder für riesige Schlackenfelder, die auf der glühendflüssigen Sonnenoberfläche schwimmen, oder für undurchsichtige Rauch- und Rußwolken, die aus dem Feuer des Sonneninnern emporsteigen. Für die zuletzt genannte Ansicht, die übrigens auch von Kepler vertreten wurde, der 1613 selbst Sonnenflecke beobachtete, schien vor allem zu sprechen, daß diese Gebilde nicht alle mit der gleichen Geschwindigkeit über die Sonnenscheibe ziehen. Außerdem entstehen sie oft relativ schnell

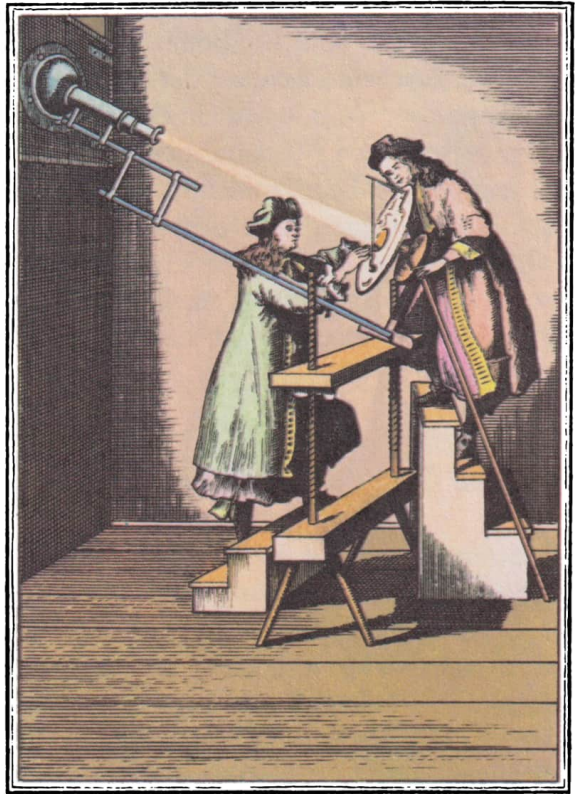
* Zitiert nach: Diedrich Wattenberg, David Fabricius, Vorträge und Schriften der Archenhold-Sternwarte BerlinTreptow, Nr. 19/1964, S. 23 f.

oder lösen sich auf und zeigen auch sonst starke Veränderungen. Nach Meinung einiger Sonnen-„Experten“ des 17. Jahrhunderts sollten die verdichteten Rußwolken gelegentlich sogar von der Sonne explosionsartig empor- und in den Weltraum hinausgeschleudert werden, wo die „Rußbomben“ als Kometen das Planetensystem unsicher machten. Nach dieser Reinigungsprozedur könnte die Sonne dann wieder hell und klar strahlen.

Die Schlacke- und Rußbomben-Hypothesen waren also die ersten Versuche, Erscheinungen auf der Sonne zu erklären. Die wahren Zusammenhänge konnten jedoch nicht erfaßt werden, bevor man die grundlegenden physikalischen Mechanismen des Sonnengeschehens erkannt hatte. Wie kompliziert diese Probleme tatsächlich sind, geht daraus hervor, daß auch in den beiden nachfolgenden Jahrhunderten trotz verschiedener wichtiger Teilfortschritte viele Fragen ungeklärt blieben. Und wir werden noch sehen, daß es bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts dauerte, ehe die letzten Mosaiksteine zum großen Bild der Sonnenphysik zusammengetragen waren.

Was die Gaskugel zusammenhält

Die Sonnenforschung befaßte sich zunächst vor allem mit den optisch zu beobachtenden Erscheinungen der Sonnenoberfläche und bemühte sich, sie physikalisch zu erklären. Wer die dabei gewonnenen Eindrücke für sich selbst nachvollziehen möchte, sei nochmals mit allem Nachdruck davor gewarnt, mit ungeschützten Augen – vielleicht gar durch einen Feldstecher oder ein größeres Fernrohr – in die Sonne zu blicken. Man kann jedoch mit einem solchen optischen Gerät auch ohne spezielle lichtmindernde Mittel die Sonne beobachten und dennoch jedes Risiko für die Augen ausschließen, wenn man ein Verfahren anwendet, das die ersten Sonnenbeobachter schon sehr bald erfanden. Dabei wird in einem gewissen Abstand hinter dem Fernrohrkular eine weiße Projektionsfläche angebracht. Nachdem man das Fernrohr auf die Sonne gerichtet hat, erhält man mit Hilfe der Okularverstellung auf dem Schirm ein scharfes Projektionsbild. Der Durchmesser dieses Sonnenbildes kann, je nach den optischen Daten des Fernrohrs und der Entfernung des Okulars vom Schirm, 10, 20 oder mehr Zentimeter betragen, so daß die Erscheinungen der Sonnenoberfläche schon recht deutlich zu erkennen sind.

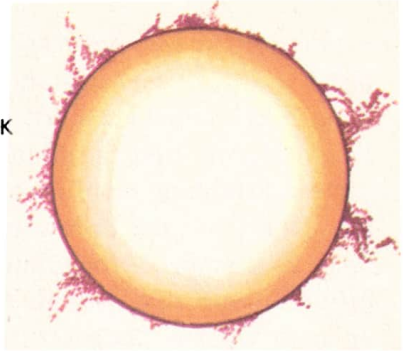


Sonnenbeobachtung nach
der Projektionsmethode im
Mittelalter

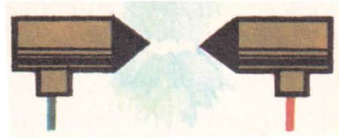
Wie bereits die ersten Beobachter bald erfaßten, läßt sich die enorme Strahlungsfülle der Sonne nur dadurch erklären, daß ihre Oberfläche sehr heiß ist. Die wahre Höhe dieser Temperatur wurde aber lange Zeit weit unterschätzt.

Heute ist sie durch Strahlungsmessungen hinreichend genau bekannt, sie beträgt rund 6000 °K (Kelvin). Bei dieser Temperatur befinden sich alle auf der Sonne vorhandenen Elemente in glühendgasförmigem Zustand, die Sonne ist somit in erster Näherung ein gigantischer Glutgasball.

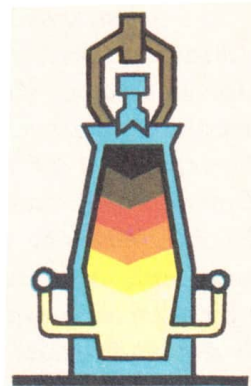
6000°K



4000°K

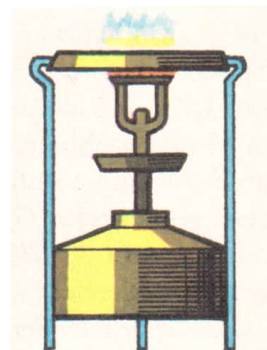


1500°K



Temperaturvergleiche mit der Sonne, von unten nach oben: Spiritusflamme, Hochofen, Lichtbogen

800°K



Hier könnte sich die Frage erheben, warum diese ungeheuer große und heiße Gaskugel eine so stabile Beschaffenheit hat und nicht auseinanderfliegt oder zumindest stärkere kurzzeitige Veränderungen in Größe und Form oder in ihrer Strahlungskraft zeigt. Gerade von der Intensität der solaren Strahlung weiß man aber heute aus der Entwicklungsgeschichte des Lebens auf der Erde sogar sehr genau, daß sie über außerordentlich lange Zeiträume – etliche hundert Millionen Jahre – weitgehend konstant geblieben sein muß. Das gleiche gilt für Größe und Gestalt der Sonne. Mit anderen Worten, der gewaltige Gasball Sonne muß tatsächlich im großen und ganzen ein weitgehend stabiles Gebilde sein. Über die Ursache werden wir uns gemeinsam Klarheit verschaffen.

Da die Strahlungsintensität der Sonne als allgemeines Kriterium für die physikalischen Verhältnisse in dieser kosmischen Gasmasse und für den Mechanismus solarer Vorgänge gelten kann, stellt ihre Messung eine wichtige Aufgabe der Sonnenforschung dar. Allerdings ist dabei zu beachten, daß derartige Strahlungsmessungen wie alle Untersuchungen an Strahlung, die aus dem kosmischen Raum zur Erde gelangt, durch die Reflexion und Absorption der Erdatmosphäre verfälscht werden. Die ankommende elektromagnetische Wellenstrahlung erreicht nur zu einem Teil die Erdoberfläche, das heißt, die Erdatmosphäre wirkt wie ein Filter.

Abgesehen von der Streuung an den Luftmolekülen und der Reflexion an Wolken, Dunst und Staubeinlagerungen, werden vor allem bestimmte Wellenlängenbereiche von den atmosphärischen Gasen (Kohlendioxid, Wasserdampf, Ozon) in verschiedenen Höhen mehr oder weniger stark absorbiert. Diese Absorption ist naturgemäß mit einer Energieaufnahme durch die betreffenden atmosphärischen Gase verbunden. Dabei dient diese Energie entweder der Zerlegung von Molekülen in Atome (Sauerstoff und Stickstoff) oder der Bildung von besonderen Molekülformen (Ozon aus normalem Sauerstoff). Dieser Zusammenhang wird bei späteren Betrachtungen noch eine wichtige Rolle spielen. An dieser Stelle interessiert uns zunächst, daß aus dem gesamten Frequenzbereich der elektromagnetischen Wellenstrahlung, also von der kurzwelligsten Röntgenstrahlung bis zu den längsten radiofrequenten Wellen, in der Hauptsache nur zwei größere geschlossene Gebiete ohne atmosphärische Absorption bleiben. Das eine umfaßt die Wellenlängen des sichtbaren Lichts und unmittelbar angrenzender Bereiche im Ultraviolett und im Infrarot; es wird daher auch das *optische Fenster* der Erdatmosphäre genannt. Das zweite Gebiet liegt

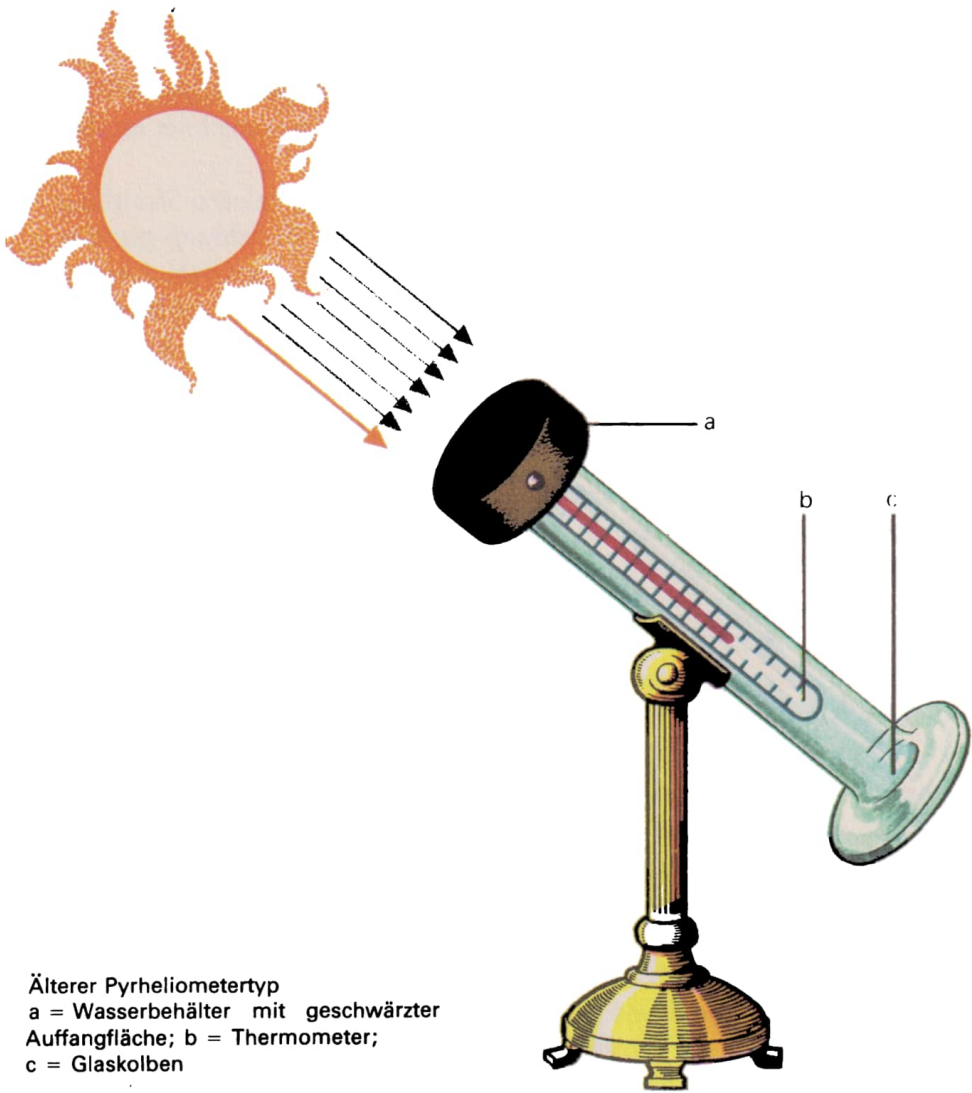
im Bereich der radiofrequenten Wellen, und zwar zwischen den Wellenlängen von einigen Millimetern und etwa 25 m; man bezeichnet es als das *Radiofenster*.

Bis vor wenigen Jahren konnte die Intensität der solaren Strahlung – in diesem Zusammenhang ist immer nur die Wellenstrahlung gemeint – ausschließlich von der Erdoberfläche aus gemessen werden. Um dabei möglichst gering verfälschte Werte zu erhalten, baute man die Meßinstrumente in der klaren, reinen Luft hoher Berge auf oder ließ sie von Ballons in große Höhen tragen. Heute bietet der Einsatz von Raumflugkörpern als extraterrestrischen (lat. terra = Erde) Meßplattformen für alle solaren Strahlungsmessungen eine nahezu ideale Voraussetzung.

Das Verfahren zum Messen der Strahlungsenergie der Sonne im Bereich des optischen Fensters wurde in den Grundzügen schon 1837 von *Claude Pouillet* (1790–1868) angegeben. Sein noch sehr einfaches *Pyrheliometer* (von griech. pyro... = Wärme... und helios = Sonne) oder *Aktinometer* (griech. aktis = Strahl) bestand aus einer wassergefüllten Dose, deren eine Fläche intensiv geschwärzt war und in die von der anderen Seite ein gegen die Sonnenstrahlung geschütztes Thermometer hineinragte. Die senkrecht zur Sonnenstrahlung ausgerichtete schwarze Fläche absorbierte die Strahlung und bewirkte dadurch eine Erwärmung des Wassers, aus der dann die pro Zeit- und Flächeneinheit eingefallene Sonnenenergie in Kalorien bestimmt werden konnte. Die heutigen, erheblich verbesserten Aktinometer arbeiten auch mit thermoelektrischen Messungen.

Bezieht man die so an der Erdoberfläche erhaltenen Meßwerte auf die mittlere Entfernung der Erde von der Sonne und korrigiert sie nach einer völlig strahlungsdurchlässig gedachten Erdatmosphäre, ergibt sich auf einer Fläche von 1 cm² pro Minute ein solarer Energiestrom von 1,94 Kalorien. Diesen Wert (1,94 cal cm⁻² min⁻¹) nennt man die *Solarkonstante*, weil früher allgemein angenommen wurde, daß die Sonnenstrahlung konstant sei. Wie neuere Messungen zeigen, unterliegt dieser Zahlenwert aber über längere Zeit doch Schwankungen. Da die übrigen Spektralbereiche nur einen sehr kleinen – und außerdem berechenbaren – Beitrag zur Gesamtstrahlungsenergie der Sonne leisten, genügt es völlig, die aktinometrischen Messungen im Gebiet des optischen Fensters auszuführen.

Die Solarkonstante bildet die zahlenmäßige Grundlage für alle energetischen und damit zusammenhängenden physikalischen Untersuchungen an der Sonne selbst, aber auch für die Ermittlung ihrer Energielieferung zur



Erde. Wie beträchtlich dieser Energiestrom tatsächlich ist, zeigt eine Umrechnung, die für eine Erdoberfläche von 1 m^2 immerhin eine solare Strahlungsenergie von $1,395 \text{ kW}$ ausweist.

Mit Hilfe der Solarkonstanten läßt sich die *absolute Leuchtkraft* der Sonne, das heißt die von ihr insgesamt pro Sekunde ausgestrahlte Energie, bestimmen. Sie beträgt $3,90 \cdot 10^{23} \text{ kW}$, was etwa der hundertbillionenfachen Leistung aller auf der Erde vorhandenen Kraftwerke entspricht. Die

Erde erhält davon allerdings nur den fünfhundertmillionsten Teil. Wenn wir die Leuchtkraft der Sonne schließlich noch in die übliche astronomische Helligkeitsskala umrechnen, erhalten wir einen Wert von $-26^{\text{m}}86$. m bedeutet die Abkürzung für *magnitudo* (lat. = Größe), was zu der nicht sehr glücklichen Bezeichnung *Größenklassen* geführt hat, obwohl ja Helligkeitswerte gemeint sind. In dieser Skala nimmt die Größenklasse mit zunehmender Helligkeit der Sterne oder sonstigen Objekte ab; Sterne, die heller sind als die der Größe 0, erhalten negative Werte. So besitzt der Vollmond eine Helligkeit von $-12^{\text{m}}5$, der Planet Venus kommt in seinem größten Glanz auf etwa $-4^{\text{m}}4$, und der hellste Fixstern des Himmels, der Sirius, hat etwa $-1^{\text{m}}45$, während für die beiden hellsten Sterne des Sternbildes Großer Bär $+1^{\text{m}}80$ ermittelt wurden.

Aus der Leuchtkraft der Sonne läßt sich die Strahlungsleistung ihrer Oberfläche pro Flächeneinheit errechnen. Man erhält dabei $6,41 \text{ kW/cm}^2$, woraus sich wegen des gesetzmäßigen Zusammenhangs zwischen Strahlungsleistung und Temperatur die schon genannte Oberflächentemperatur der Sonne von rund 6000°K ergibt.

Mit diesen Zahlen über die enorme Energieentwicklung des Sonnengasballs kommen wir zwangsläufig auf die Frage nach seiner Stabilität zurück. Der entscheidende Faktor ist auch in diesem Fall die gewaltige Gravitation der Sonne. Wir haben in ihr sozusagen die Gegenspielerin des starken Gasdrucks zu sehen, der wegen der hohen Temperaturen im Innern des Gasballs herrscht und diesen auseinanderreiben würde. Diese beiden Kräfte halten sich innerhalb des Sonnenkörpers an sämtlichen Punkten die Waage, die Sonne befindet sich also überall — das heißt bis an die Untergrenze ihrer dünnen Oberflächenschicht — im *mechanischen Gleichgewicht*. Dieses Gleichgewicht bildet die Grundlage für die physikalische Stabilität der Sonne. Es wird einerseits durch die Größe der Sonnenmasse und die chemische Zusammensetzung der Sonnenmaterie bestimmt und legt andererseits für jeden Punkt des Sonneninnern die dort herrschenden Zustandsgrößen (Druck, Temperatur und Dichte) des Gases fest. Da beide Kräfte in bezug auf den Massenmittelpunkt kugelsymmetrisch wirken, muß der Gaskörper auch eine Kugelform haben. Würden zusätzliche Kräfte (schnellere Rotation, Magnetfelder, Doppelsternsystem) auftreten, so entstünden Formänderungen (Rotationsellipsoid und andere) der Gaskugel. Wie schon erwähnt, bestätigen bisher alle Messungen die genaue Kugelform der Sonne.

Spektralanalyse – der Schlüssel zur Sonnenphysik

Wir haben bereits mehrfach auf das Spektrum der solaren Wellenstrahlung Bezug genommen. Wegen ihrer grundsätzlichen Bedeutung für die meisten physikalischen Aussagen, die heute über die Sonne gemacht werden können, wollen wir hier kurz die mit dem *Sonnenspektrum* und seiner Analyse zusammenhängenden Probleme erörtern.

Die von einem Körper oder einer Substanz ausgesandte elektromagnetische Strahlung – somit auch das sichtbare Licht – entsteht bekanntlich in deren Atomen, die durch energetische Vorgänge (beispielsweise Aufheizung) zur Emission (lat. *emissio* = Herauslassen) von Lichtquanten oder Photonen (kleinsten Energieteilchen einer elektromagnetischen Strahlung) mit ganz bestimmten Wellenlängen angeregt werden. Die Möglichkeiten zu einer solchen Anregung sind vielfältig. Ein sicht- oder sonstwie registrierbares Spektrum entsteht durch Zerlegen der elektromagnetischen Strahlung mittels einer Vorrichtung – je nach Arbeitsweise *Spektroskop*, *Spektrograph* oder ähnlich genannt –, die ein „Sortieren“ der ankommenden Photonen nach ihrer Wellenlänge bewirkt. Im sichtbaren Bereich ergibt ein *kontinuierliches* (fortlaufendes) *Spektrum* das bekannte Farbband vom dunklen Rot bis zum tiefen Violett (Regenbogenfarben).

Nimmt man nun eine *Spektralanalyse* verschiedener Strahlungsquellen vor, so stellt man fest, daß die erhaltenen Spektren recht unterschiedlich aussehen. Unter anderem zeigt sich, daß ein glühendfester Körper (Wendel einer Glühlampe) ein einfaches kontinuierliches Spektrum (*Kontinuum*) ohne jede zusätzliche Besonderheit liefert. Ein leuchtendes Gas oder leuchtender Dampf ergibt dagegen ein *Linienpektrum*, und zwar ein *Emissionspektrum*. Das heißt, statt des kontinuierlichen Farbbandes hat man nur noch an ganz bestimmten Stellen der Wellenlängenskala einzelne helle, farbige Linien oder Liniengruppen. Zwischen der Anzahl und der Lage dieser Linien oder Liniengruppen einerseits und der chemischen Beschaffenheit des leuchtenden Stoffes andererseits besteht ein Zusammenhang, so daß sich aus dem Linienpektrum einer zu analysierenden Substanz auf deren chemischen Aufbau schließen läßt.

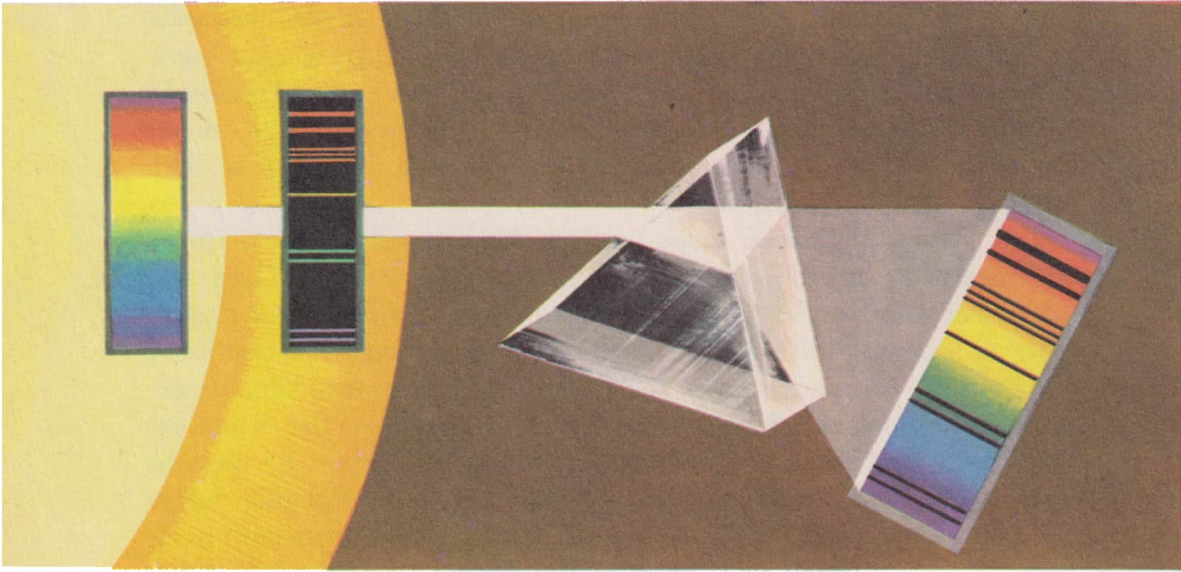
Das Sonnenspektrum bietet nun insofern eine Besonderheit, als es ein kontinuierliches Farbband zeigt, auf dem aber eine große Anzahl mehr oder weniger kräftiger und auch verschieden breiter dunkler Linien zu sehen sind. Die stärksten dieser Linien wurden erstmalig 1802 von dem

englischen Arzt, Physiker und Chemiker *William Hyde Wollaston* (1766–1828) beobachtet, man bezeichnet sie jedoch allgemein als *Fraunhofersche Linien*, nach dem Physiker *Joseph von Fraunhofer* (1787–1826), der mit verbesserten Geräten 1814 insgesamt 547 dieser Linien auffand und die erste systematische Übersicht ihrer Lage im Sonnenspektrum veröffentlichte.

Das Zustandekommen eines solchen *Absorptionsspektrums* ist im Experiment leicht zu zeigen. Man läßt dazu beispielsweise das Licht einer Glühlampe vor dem Eintritt in einen Spektralapparat durch eine dampf- oder gasförmige Substanz – ein chemisches Element oder eine chemische Verbindung – hindurchtreten. Dann erhält man außer dem Glühlampen-Kontinuum auch hier dunkle Linien oder Liniengruppen, die – und das ist wesentlich – genau an den Stellen des Farbbandes liegen, wo sonst die dampf- oder gasförmige Substanz allein ihre charakteristischen hellen Emissionslinien gezeigt hätte. Was ist passiert? Aus dem Strom von Photonen aller Wellenlängen, die der Glühfaden ausstrahlt, absorbieren (daher Absorptionsspektrum) die Atome oder Moleküle der dampf- oder gasförmigen Substanz genau diejenigen, welche sie selbst in ihrem Linienspektrum aussenden oder emittieren (daher Emissionsspektrum) und ersetzen sie durch ihren eigenen, in diesem Fall weniger intensiven Photonenstrom, so daß an den betreffenden schmalen Stellen des Kontinuums geringere Helligkeiten und somit dunkle Linien entstehen.

Auf die Sonne übertragen, folgt aus diesem Experiment, daß dort ein „Lieferant“ für den kontinuierlichen Untergrund des Spektrums vorhanden sein muß, den eine gasförmige Hülle umgibt, welche die Absorptionslinien bewirkt. Wie sich zeigt, kommt das Kontinuum aus einer dünnen Oberflächenschicht des Sonnenkörpers, die zwar aus heißer gasförmiger Materie besteht, an ihrer Untergrenze aber sehr dicht und optisch undurchsichtig ist, so daß sie wie die Oberfläche eines glühendfesten Körpers strahlt. Die Absorptionslinien entstehen in einer darüber liegenden Hülle dünnerer und kühlerer Gase. Das Rätsel der Fraunhoferschen Linien ließ sich erst in den Jahren 1859 bis 1861 lösen, als der Physiker *Gustav Robert Kirchhoff* (1824–1887) und der Chemiker *Robert Bunsen* (1811–1899) mit ihren gemeinsamen Untersuchungen die Grundlagen der Spektralanalyse schufen.

Mit hochauflösenden modernen Spektrographen können im Sonnenspektrum über 20 000 Spektrallinien nachgewiesen werden. Allerdings



Entstehen des solaren Absorptionsspektrums (schematisch)

haben nicht alle diese Linien oder Liniengruppen ihren Ursprung in der Sonne selbst. Schließlich muß ja das Sonnenlicht, bevor es in den Spektrographen gelangt, noch die gasförmige Erdatmosphäre passieren, und so machen sich dann die Bestandteile der irdischen Atmosphäre mit entsprechenden Absorptionslinien im Sonnenspektrum bemerkbar. Es gibt jedoch Möglichkeiten, diese *terrestrischen Linien* aus den eigentlichen Sonnenlinien herauszufinden.

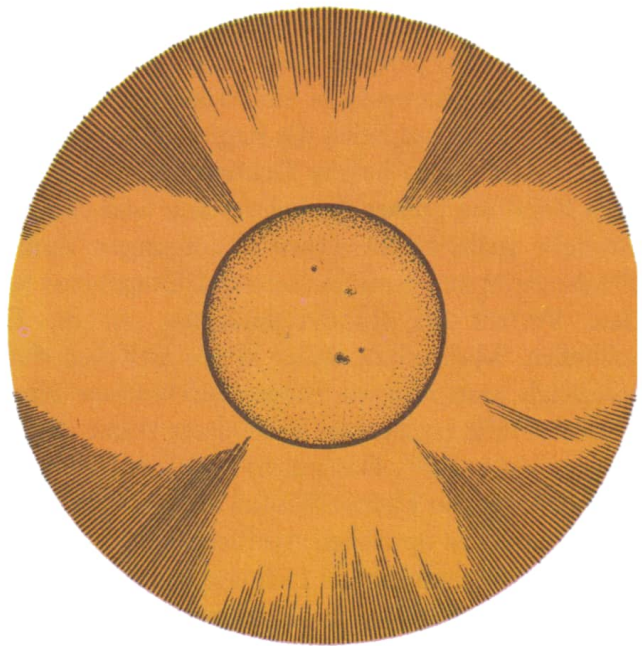
Aus einem Absorptionsspektrum läßt sich ebenfalls auf die chemische Zusammensetzung eines Körpers schließen, sowohl in qualitativer als auch in quantitativer Hinsicht. So konnten die solaren Linien im Sonnenspektrum bisher zu etwa 60 Prozent identifiziert, das heißt bestimmten Elementen des Periodensystems zugeordnet werden, wobei man 64 Elemente auf der Sonne nachzuweisen vermochte. Mit Hilfe der Spektralanalyse gelang es sogar, ein bis dahin unbekanntes Element zuerst auf der Sonne zu entdecken, bevor es dann auch auf der Erde gefunden wurde. Bei spektroskopischen Untersuchungen war in unmittelbarer Nachbarschaft einer charakteristischen Doppellinie, die dem Natrium zugehört, eine dritte ähnliche Linie aufgefallen, für die es jedoch keine Beziehung zu einem

bekannten irdischen Element gab. Man vermutete daher, daß ein nur auf der Sonne vorkommendes Element der Urheber dieser Linie wäre, und gab ihm 1869 den Namen Helium, das heißt soviel wie Sonnenstoff. Erst 1895 fand man das Helium auch auf der Erde.

Heute wissen wir, daß die Sonne überwiegend aus Wasserstoff und einem etwa zehnmal geringeren Anteil Helium besteht, während die übrigen Elemente den dagegen nur kleinen Rest bilden, wobei Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff in dieser Folge die häufigsten sind. Mit einer solchen Zusammensetzung ist sie, wie auch in ihrer sonstigen Beschaffenheit, den meisten Fixsternen weitgehend ähnlich. Daß bisher nur 64 Elemente auf der Sonne nachgewiesen werden konnten, sagt nichts darüber aus, ob die anderen natürlichen Elemente tatsächlich fehlen. Schließlich läßt sich ja allein die Sonnenatmosphäre spektralanalytisch erfassen, und anderswo vorkommende Elemente treten dabei nicht in Erscheinung. Außerdem gibt es verschiedene Elemente, die unter den in der Sonnenatmosphäre herrschenden energetischen Anregungsbedingungen keine spektrale Absorption oder Emission zeigen können und demzufolge ebenfalls unsichtbar bleiben müssen. Von den leichtflüchtigen Elementen Wasserstoff und Helium einmal abgesehen, stimmt die Elementenhäufigkeit in der Sonnenatmosphäre mit der allgemeinen kosmischen Elementenhäufigkeit überein, wie sie auch für planetarische und meteoritische Materie gilt. Dieser Befund ist letztlich ein weiterer Beweis für die These von der materiellen Einheit des Weltalls.

Die verschiedenen Methoden der spektrographischen Untersuchung bilden seither die wichtigste verfahrenstechnische Grundlage der sonnenphysikalischen Forschung und der Astrophysik überhaupt. Obwohl wir nicht auf alle Einzelheiten eingehen können, werden wir doch noch öfter auf verschiedene spezielle Anwendungen spektrographischer Verfahren zu sprechen kommen.

Die Sonne unter der Lupe

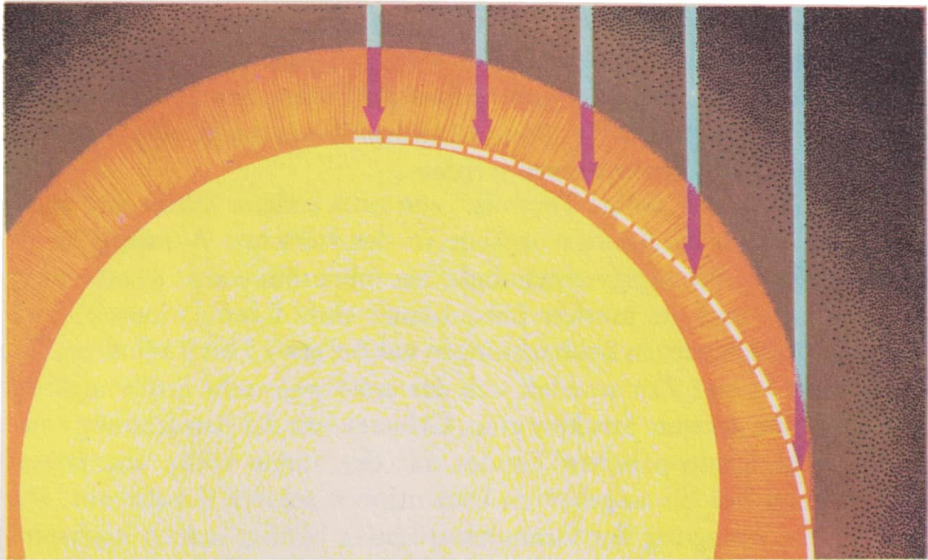


„Pflastersteine“ auf der Sonnenoberfläche

Ein Blick ins Fernrohr oder eine Sonnenfotografie zeigt uns die Sonne als kreisrunde, scharfbegrenzte Scheibe, deren Helligkeit zum Rand hin deutlich abnimmt. Die genaue Kreisform der Sonnenscheibe wird durch sehr feine Präzisionsmessungen bestätigt, woraus folgt, daß die Sonne keinerlei nachweisbare Abplattung besitzt. Der scharfe Sonnenrand, der selbst bei sehr starken optischen Vergrößerungen erhalten bleibt, steht in einem gewissen Zusammenhang mit der erwähnten *Randverdunklung*. Beides ergibt sich aus der physikalischen Beschaffenheit der Sonnenoberfläche.

Die optisch sichtbare Strahlung der Sonne geht von einer relativ dünnen Oberflächenschicht aus, die als *Photosphäre* (lat. = Lichthülle) bezeichnet wird. Zum Grund dieser Schicht hin nimmt die Temperatur des Sonnengases zu, während die Durchsichtigkeit sinkt. An ihrer Unterseite ist die Photosphäre für den von außen eindringenden Blick undurchsichtig. Setzt man nun gleiche optische Einblicktiefen voraus, dann wird man in der Mitte der Sonnenscheibe die Regionen am Grunde der Photosphäre, also heißere und damit hellere Gebiete sehen, während der schräge Einblick zum Rand hin immer flacher verläuft und demzufolge auf weniger heiße Bereiche trifft. Unter diesen Bedingungen vermindert sich folglich die Flächenhelligkeit zum Sonnenrand. Umgekehrt kann man aber auch aus dem Verlauf der Randverdunklung auf die Dicke der Photosphäre schließen. Man erhält dabei Werte zwischen 400 und 500 km, was im Vergleich zum riesigen Sonnendurchmesser eine wirklich nur „hauchdünne“ Hülle ergibt. Ihre scheinbare Dicke am Rand der Sonnenscheibe beträgt kaum 0,5". Das macht auch deren scharfe Begrenzung verständlich; denn ein so kleiner Winkel bleibt selbst für größere Fernrohre unter der Grenze der optischen Auflösbarkeit.

Bei hinreichend ruhiger Luft und stärkerer Vergrößerung fällt besonders im zentralen Bereich der Sonnenscheibe eine körnige Feinstruktur der



Entstehen der Randverdunklung (schematisch)

hellstrahlenden Oberfläche auf. Die einzelnen Elemente dieser *Granulation* (lat. *granulum* = Körnchen) sind nicht sehr kontrastreich und haben auch nur eine geringe scheinbare Größe. Im Mittel beträgt der Durchmesser der *Granulen* etwa 1 bis 2'', was allerdings immer noch einer wahren Ausdehnung von rund 800 bis 1600 km entspricht. Ihre Form ist meist rundlich polygonal (vieleckig), aber verschiedentlich auch oval. Einige Beobachter sprachen in der Vergangenheit von Weidenblatt- oder Reiskornstrukturen. Am besten dürfte jedoch der Vergleich mit einer Pflastersteinstruktur das Erscheinungsbild der Sonnengranulation treffen.

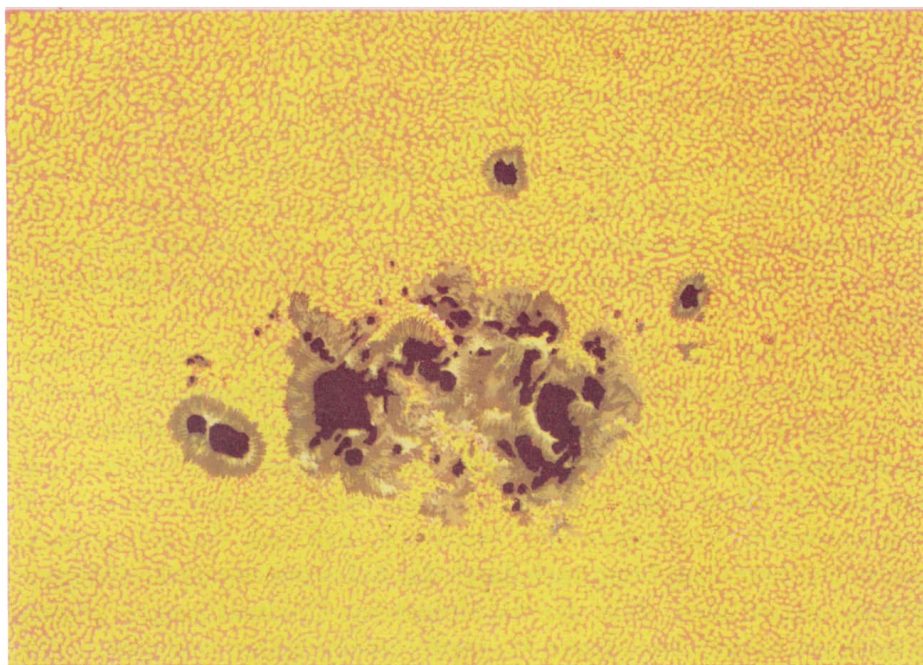
Die Sonnengranulation ist als Folge der gasförmigen Beschaffenheit der Oberflächenschicht leicht zu erklären. Aus der Tiefe der Photosphäre steigen heißere Gase in den zellenförmigen Granulen empor, während am Rand einer solchen Zelle die etwas kühleren Gase absinken. Ähnliche Strömungsbilder lassen sich übrigens auch in nicht allzu dicken, von unten erhitzten Ölschichten erzeugen. Wie man festgestellt hat, liegen die Temperaturdifferenzen zwischen den heißeren, also heller strahlenden Zellen-, „Köpfen“ und der etwas dunkleren Umgebung etwa bei 100 grd. Die vertikal zirkulierende Granulenströmung in der photosphärischen Gas-

hülle könnten wir somit als etwas Ähnliches wie die Gewitterturbulenz in der Erdatmosphäre auffassen. Dieser Vergleich paßt dann auch sehr gut zu dem heute geltenden Bild vom Aufbau der Sonne, das die Photosphäre als unterstes Stockwerk der *Sonnenatmosphäre* darstellt, deren weitere Bereiche wir noch kennenlernen werden.

Allerdings ist die „solare Thermik“ von ganz anderer Stärke und anderem Ausmaß als Strömungsvorgänge in der irdischen Atmosphäre. So betragen die Strömungsgeschwindigkeiten immerhin einige Kilometer in der Sekunde, und die mittlere Lebensdauer eines Granulationselements liegt nach verschiedenen Beobachtungen nur bei etwa 3 bis 4 Minuten. Das heißt, in so kurzer Zeit wandelt sich das atmosphärische Strömungsbild und damit die gesamte Struktur eines Gebietes von der Ausdehnung eines größeren mitteleuropäischen Landes auf der Sonne völlig um. Dieses Beispiel zeigt uns die ungeheuren Dimensionen solaren Geschehens. Die Energie zur Anregung der Granulenströmung beträgt jedoch höchstens etwa 1 Prozent der von der Sonnenoberfläche durch Strahlung ausgesandten Energie.

„Kühlmaschinen“ im Sonnengas

In die hellstrahlende granulierten Photosphäre sind die Sonnenflecke eingebettet. Es handelt sich dabei, wie wir schon wissen, um erheblich dunklere Gebiete, deren Größe, Form und Häufigkeit starken Veränderungen unterliegen. Ein Fleck geht aus einer *Pore* hervor, einem kleinen, sehr dunklen Herd von etwa Granulenausmaß. Mit zunehmender Vergrößerung dieses Gebildes, das sehr bald den Durchmesser der Erde und noch mehr erreichen kann, entwickelt sich meist ein „Hoffleck“. Er besteht aus einem intensiv dunklen Kern, der *Umbra*, und einem weniger dunklen „Hof“ mit vornehmlich faseriger Struktur, der *Penumbra*. Dieses Aussehen eines normal entwickelten großen Sonnenflecks und die Entdeckung, daß die meisten dieser Flecke am Sonnenrand den Eindruck eines trichterförmig vertieften Gebiets machen, führten übrigens gegen Ende des 18. Jahrhunderts zu einer besonders originellen Ansicht über den Aufbau der Sonne. Danach sollte der eigentliche Sonnenkörper dunkel und kühl, möglicherweise sogar bewohnbar sein und das intensive Leuchten nur von der Sonnenatmosphäre ausgehen. Die Sonnenflecke wären dann Löcher in



Große Sonnenfleckengruppe

dieser Atmosphäre, durch die man die dunkle Oberfläche des Zentralgestirns sehen könnte.

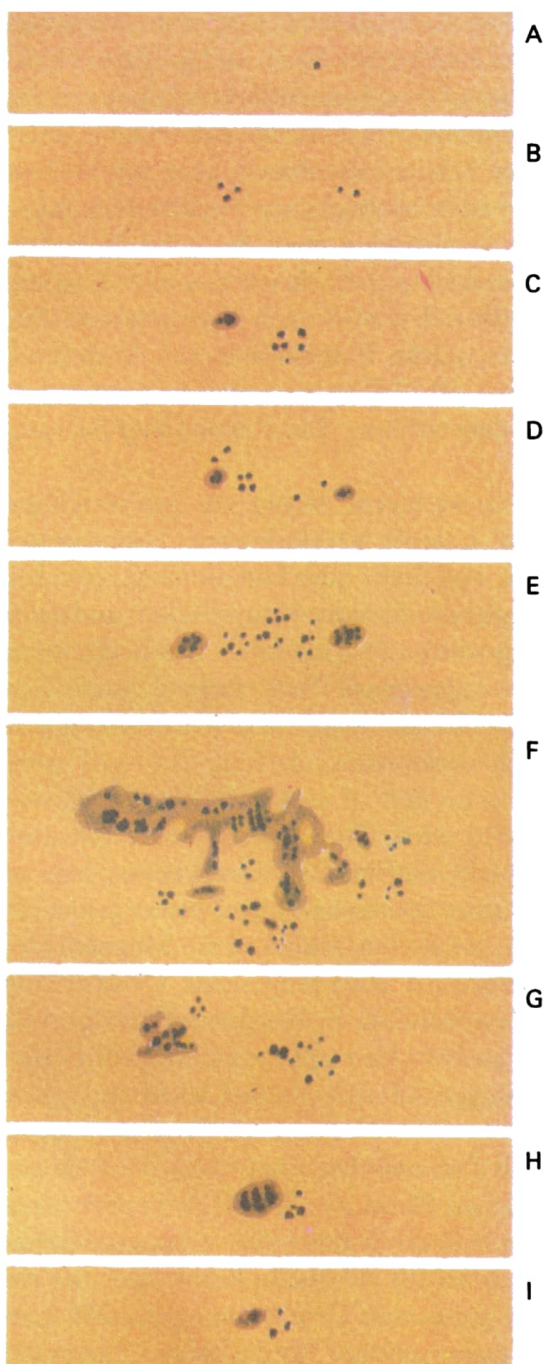
Schon in den Annahmen über die äußere Erscheinung eines Sonnenflecks steckt ein entscheidender Fehler dieser unhaltbaren Hypothese. Die Umbra ist nämlich nicht völlig schwarz oder lichtlos, sondern nur gegenüber der noch helleren Umgebung dunkel, wobei Kontraste diesen Helligkeitsunterschied verstärken. In Wirklichkeit sendet sie sogar eine beträchtliche Lichtmenge aus. Man kann das besonders gut erkennen, wenn sich bei einer Finsternis der pechschwarze Mondkörper vor die Sonnenscheibe schiebt oder wenn die Planeten Venus und Merkur bei einem Vorübergang an der Sonne neben eventuell vorhandenen, gegen sie fast hell wirkenden Sonnenflecken als absolut schwarze Scheiben zu sehen sind. Und wie Messungen gezeigt haben, strahlt die Umbra eines Sonnenflecks tatsächlich immer noch mit einer Intensität, die rund ein Drittel der Helligkeit der Photosphäre ausmacht.

Es liegt nahe, diesen Helligkeitsunterschied mit einer entsprechend geringeren Temperatur der Sonnengase im Gebiet des Flecks zu erklären. Unter Anwendung der Strahlungsgesetze kommt man zu dem Ergebnis, daß die Temperatur in der Umbra eines normalen Sonnenfleckes um etwa 1200 bis 1500 grd niedriger ist als in der umgebenden Photosphäre. Dieser Befund mutet geradezu phantastisch an. Er besagt nämlich, daß es auf der Sonne einen physikalischen Mechanismus geben muß, der innerhalb eines Gases von rund 6000 °K für bestimmte Gebiete eine so enorme Abkühlung bewirkt.

Welcher Art der Mechanismus der „Kältemaschine“ eines Sonnenfleckengebiets ist, konnte noch nicht bis in alle Einzelheiten geklärt werden. Sicher dürfte jedoch sein, daß dabei die Wirkung von Magnetfeldern eine maßgebliche Rolle spielt. 1908 gelang dem amerikanischen Sonnenphysiker *George Ellery Hale* (1868–1938) mit Hilfe eines besonderen spektrographischen Verfahrens der Nachweis, daß sich die Sonnenflecke gegenüber ihrer Umgebung auch durch das Auftreten von starken Magnetfeldern auszeichnen. Wie die nachfolgenden Untersuchungen zeigten, können solche örtlichen solaren Magnetfelder eine Stärke erreichen, welche die des Erdmagnetfeldes um das 5000- bis 10 000fache übertrifft.

Die Entstehung dieser Magnetfelder vollzieht sich offenbar in größerer Tiefe des Sonnenkörpers. Dort ergeben lokale, aber großräumige Strömungen in der Sonnenmaterie, die bei den hohen Temperaturen nur noch als Plasma, also als elektrisch leitfähiges Gemisch aus Elektronen und ionisierten (Ionisation = Bildung elektrisch geladener Teilchen) Atomkernen, auftritt, gigantische elektrische Wirbel- und Ringstromsysteme, die nach den Gesetzen der Elektrodynamik entsprechend starke Magnetfelder erzeugen. Andere Vorgänge im Sonneninnern sorgen dann dafür, daß die mit Magnetfeldern behafteten Strömungsgebiete der heißen Sonnenmaterie an die Oberfläche des Gaskörpers gelangen. Dort bilden sich schließlich unter dem Einfluß der „durchbrechenden“ Magnetfelder die Flecke. Wir können also sagen, daß die Fleckengebiete offensichtlich Störungsherde im Sonnenkörper charakterisieren, wobei die Magnetfelder der Primärmechanismus sind und die an der Sonnenoberfläche auftretenden Flecke und Fleckengruppen sekundäre Erscheinungen darstellen.

In der Regel entwickelt sich in einem solchen Störungsgebiet aus einem neu aufgetauchten Einzelfleck eine mehr oder weniger große *Fleckengruppe*. Meist wird aus dem Einzel- zunächst ein Doppelfleck, dessen



Fleckenentwicklung und Klassifizierungsschema (nach Max Waldmeier)

beide Bestandteile allmählich weiter auseinanderücken, wobei zwischen ihnen und um sie herum ein ganzes Feld kleiner Poren und größerer Flecken entsteht. Die Ausdehnung einer solchen Sonnenfleckengruppe vermag den zehnfachen Erddurchmesser und mehr zu erreichen und ist dann, unter Berücksichtigung der notwendigen Schutzmaßnahmen, auch mit bloßem Auge zu sehen. Eine der größten bisher beobachteten Fleckenerscheinungen (1850) hatte die ungeheure Ausdehnung etwa des achtzehnfachen Erddurchmessers. Entwicklungsgeschichte und Lebensdauer eines Sonnenflecks oder einer Fleckengruppe, die sich jeweils nach einer gewissen Zeit wieder aufzulösen beginnt, weisen starke Unterschiede auf. Manchmal sind sie nur wenige Tage sichtbar, oft bleiben sie unter mannigfaltigen Veränderungen Wochen und Monate erhalten. Der Rekord liegt bei rund 18 Monaten.

Die Magnetfelder in den Fleckengebieten zeigen ein gesetzmäßiges Verhalten ihrer Pole. Am häufigsten treten in Verbindung mit Fleckengruppen zweipolige Felder auf, wie sie von Stab- oder Hufeisenmagneten her bekannt sind. Die beiden auseinanderwandernden Hauptflecken sind dann meist mit den Orten der entgegengesetzten Pole identisch. Das heißt, wenn der im Sinne der Sonnenrotation vorangehende Fleck einem magnetischen Nordpol entspricht, so liegt am Ort des nachfolgenden Flecks ein magnetischer Südpol. Es kann aber auch vorkommen, daß nur ein nord- oder südpolarer Einzelfleck vorhanden ist und in seiner Nachbarschaft ein entsprechender Gegenpol festgestellt wird, ohne daß dort ein Fleck oder eine sonstige Störung der Photosphäre auftritt. Das bemerkenswerteste ist jedoch, daß alle bipolaren Felder einer Sonnenhalbkugel immer genau die gleiche Orientierung der Polarität aufweisen, während die Magnetfelder auf der anderen Hemisphäre exakt die entgegengesetzte Orientierung zeigen. Gehen also auf der einen Sonnenhälfte die Nordpolarflecke in einer Gruppe voraus, so sind es auf der anderen Hemisphäre die Südpolarflecke.

Mit Hilfe der Fleckenbeobachtungen läßt sich ziemlich leicht und genau die Sonnenrotation verfolgen. Man erhält dabei rund 27 Tage als (synodische) Rotationsdauer, das heißt als Zeit zwischen zwei – von der Erde aus gesehen – Durchgängen des gleichen Flecks durch den Zentralmeridian der Sonnenscheibe. Berücksichtigt man die in dieser Zeit vollzogene Bahnbewegung der Erde, so ergibt sich für die siderische Rotationsdauer ein Wert von etwa 25,4 Tagen. Bei genaueren Untersuchungen stellt man jedoch fest, daß die genannte Rotationszeit nur für die beiden Zonen auf

etwa 16° heliographischer Breite gilt, während sie für zunehmende Breiten wächst und zum Äquator hin noch etwas abnimmt. Dort beträgt sie 25,03 Tage, was zu der Geschwindigkeit eines Äquatorpunktes von rund 2 km/s führt; für die Polgenden steigt sie jedoch bis auf 33 Tage und etwas darüber an. Als genauere Untersuchungsmethode verwendet man das von dem österreichischen Physiker und Mathematiker *Christian Doppler* (1803–1853) entdeckte und nach ihm benannte Prinzip. Danach registriert ein Empfänger von einer bewegten Strahlungsquelle eine höhere Strahlungsfrequenz als von einer ruhenden, wenn sich die Quelle auf ihn zu bewegt, und eine niedrigere Frequenz bei wachsender Entfernung.

Die Sonne rotiert somit nicht wie ein starrer Körper, sie „verdreht“ sich vielmehr ständig in sich selbst, wobei die Äquatorpartien stets vorauslaufen. Man nennt diese Erscheinung *differentielle* (unterschiedliche) *Rotation*. Die für eine Gaskugel ungewöhnlich anmutende Eigenschaft stellt wahrscheinlich eine der wesentlichsten Quellen für den speziellen inneren Mechanismus der Sonne dar, der sich an der Oberfläche durch lokale Magnetfelder mit Sonnenflecken und anderen Störungen bemerkbar macht. Lange Zeit bereitete es größte Schwierigkeiten, dieses besondere Rotationsverhalten der Sonne zu erklären. Heute führt man es auf großräumige Strömungsvorgänge in ihrem Innern und damit zusammenhängende ausgedehnte Magnetfelder zurück.

Aus den Beobachtungen der Sonnenflecke läßt sich auch leicht die Lage der Rotationsachse der Sonne bestimmen; man findet sie um rund 7° gegen die Senkrechte auf der Ekliptikebene geneigt. Ferner ist zu erkennen, daß die Flecke stets in zwei deutlich ausgeprägten Zonen beiderseits des Sonnenäquators auftreten, mit einem als langjähriges Mittel geltenden Häufigkeitsmaximum bei etwa $\pm 20^\circ$ heliographischer Breite. Zum Äquator hin fällt die Häufigkeitskurve von beiden Seiten her sehr stark ab, während über $\pm 40^\circ$ heliographischer Breite Flecke zu den extremen Seltenheiten zählen. Höher als 60° Breite wurde überhaupt noch nie ein deutlich ausgebildeter Sonnenfleck beobachtet.

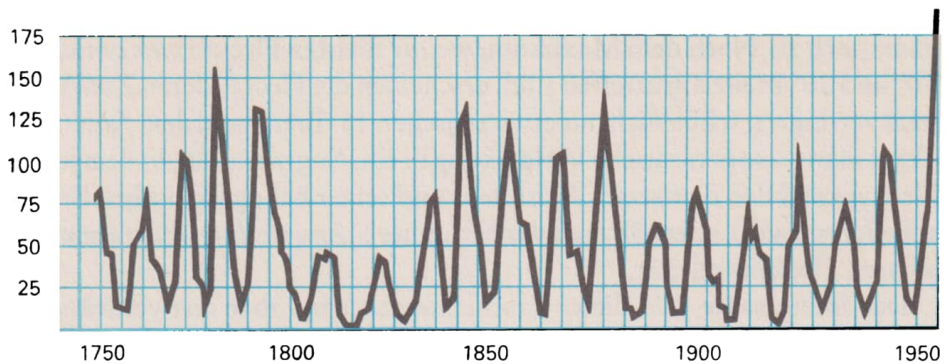
Die „Fieberkurve“ der Sonne

Schon bald nach der Entdeckung der Sonnenflecke fiel verschiedenen Beobachtern auf, daß deren Häufigkeit, abgesehen von Schwankungen, die

durch die Zufälligkeiten der Herdbildung innerhalb eines Zeitraums von Tagen oder Monaten entstehen, offenbar gewissen periodischen Langzeitveränderungen unterliegt. Die ersten systematischen Untersuchungen in dieser Richtung nahm der Apotheker und Liebhaberastronom *Heinrich Samuel Schwabe* (1789–1875) von 1828 bis 1868 vor. Im Jahre 1843 konnte er als Ergebnis seiner sorgfältigen Beobachtungen die Entdeckung einer etwa zehnjährigen Periode der Fleckenhäufigkeit bekanntgeben. Die danach einsetzenden intensiven Beobachtungen, zu deren Systematisierung vor allem die von dem Schweizer Astronomen *Rudolf Wolf* (1816–1893) eingeführte *Fleckenrelativzahl* beitrug, ergaben schließlich eine Verbesserung dieses Mittelwertes auf 11,3 Jahre.

Der Tageswert für die Wolfsche Fleckenrelativzahl läßt sich recht einfach bestimmen. Man zählt zunächst alle zum Beobachtungszeitpunkt auf der Sonnenoberfläche sichtbaren Flecke, die eventuell sehr zahlreichen Kerne einer Gruppe werden dabei einzeln gewertet. Dann stellt man die Anzahl der Fleckengruppen fest, wie sie sich aus der Anordnung der Flecke und deren Entwicklungsgeschichte erkennen lassen (wobei auch ein echt isolierter Einzelfleck als selbständige Gruppe gilt), multipliziert die Gruppenzahl mit dem Faktor 10 und rechnet schließlich die vorher ermittelte Fleckenzahl hinzu. Die Summe ist die gesuchte Relativzahl.

Die zu Monatsmitteln zusammengefaßten und als Kurve aufgetragenen Relativzahlen lassen über eine entsprechende Zeit hinweg die periodische Wiederkehr der Fleckenhäufigkeit eindeutig erkennen. Die von Schwabe und Wolf begründete und von den inzwischen entstandenen Sonnenobservatorien ziemlich lückenlos geführte Sonnenfleckensstatistik zeigt darüber hinaus, daß diese Periode von rund 11 Jahren selbst wieder gewissen Schwankungen unterliegt. Gelegentlich beträgt die Zeit zwischen zwei Maxima der Fleckenhäufigkeit sogar nur 8 oder 9 Jahre. Dabei ist die Regel, daß besonders hohe Fleckenmaxima gegenüber dem Mittelwert ein bis zwei Jahre früher eintreten. Außerdem wird die Kurve der Relativzahlen dann betont unsymmetrisch, mit einem viel steileren Anstieg zum Maximum als sonst. Der Anstieg ist aber überhaupt im Mittel etwas kürzer (etwa 5,1 Jahre) als der Abstieg zum nachfolgenden Minimum (etwa 6,0 Jahre). Alles in allem können wir demnach sagen, daß die in der Fleckenrelativzahl widerspiegelten Störungsaktivitäten im Sonneninneren, die mit anderen veränderlichen, auf der Sonne auftretenden und durch Vorgänge in deren äußeren Schichten verursachten Erscheinungen

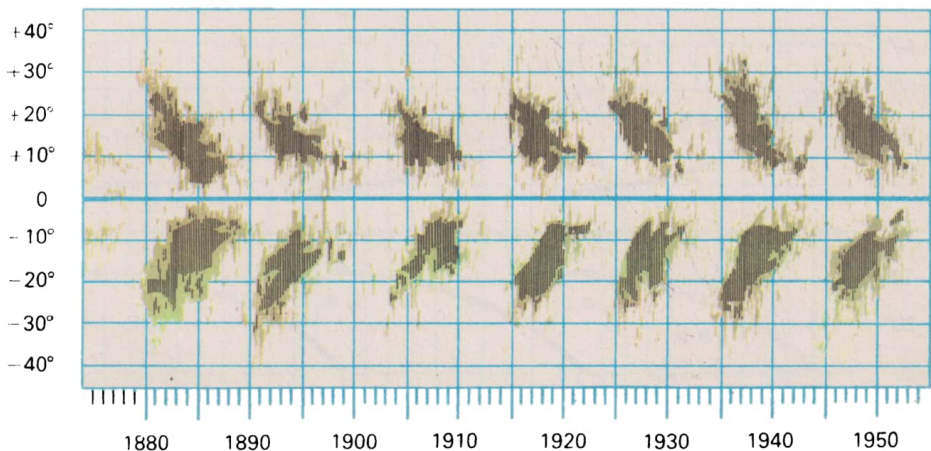


Kurve der Sonnenflecken-Relativzahlen von 1750 bis 1950

unter dem Begriff *Sonnenaktivität* zusammengefaßt werden, offensichtlich periodischer Natur sind.

Eine besondere Beziehung zeigt sich zwischen dem Ablauf einer *Sonnenfleckenperiode*, wie man den Zeitraum von einem Maximum zum nächsten nennt, und der Lage der Flecke in den schon erwähnten Häufigkeitszonen. Zu Beginn eines elfjährigen Zyklus tauchen die ersten Flecke in etwa 30° nördlicher und südlicher Breite auf, wo sie während ihrer weiteren Lebensdauer verbleiben. Mit dem Voranschreiten des Zyklus entstehen neue Flecke in immer tiefer gelegenen Breiten, und ihre mittlere Anzahl nimmt

Schmetterlingsdiagramm der Sonnenfleckenhäufigkeit

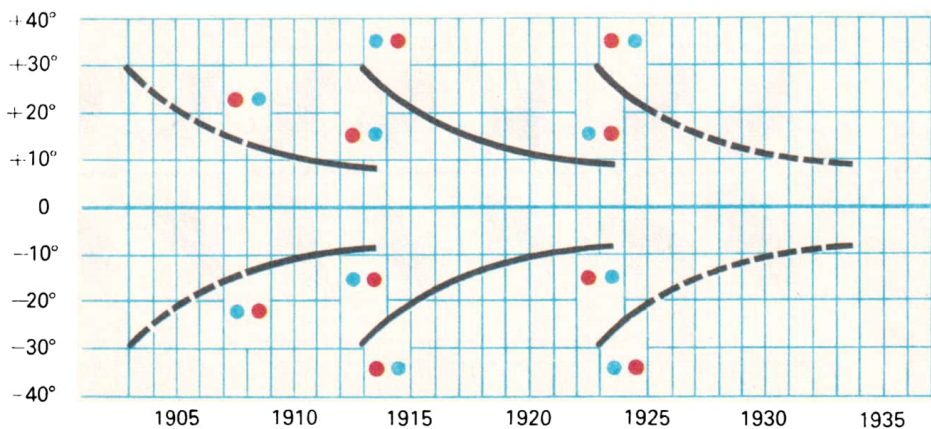


allmählich zu. Nach dem Maximum, wo die meisten Flecke etwa zwischen 10° und 20° Breite anzutreffen sind, erscheinen die Flecke, deren Zahl sich jetzt verringert, schließlich nur etwa zwischen 15° Breite und dem Äquator. Trägt man diese periodische Verlagerung in ein Diagramm ein, in dem jeder Fleck gemäß der Zeit seines Auftretens und seiner heliographischen Breite verzeichnet wird, so erhält man das berühmte *Schmetterlingsdiagramm* der solaren Fleckenaktivität.

Das interessante Bild dieser Erscheinungen wird aber erst vollständig, wenn wir auch noch die Ergebnisse der schon beschriebenen magnetischen Untersuchungen hinzufügen. Nachdem Hale und seine Mitarbeiter seit 1908 systematisch die Polarität der Magnetfelder des laufenden Fleckenzyklus verfolgt hatten, waren sie sehr überrascht, als sie um 1913 die ersten, in hohen Breiten auftauchenden Flecke des neuen Zyklus untersuchten. Sie fanden nämlich, daß die bipolaren Magnetfelder auf beiden Sonnenhemisphären im Vergleich zu dem alten Zyklus genau die entgegengesetzte Orientierung aufwiesen. Wo also bisher der magnetische Nordpol voranging, war es jetzt der Südpol und umgekehrt. Diese Feststellung führte dazu, daß man von nun an als Grundperiode der Sonnenaktivität einen 22,2jährigen Zyklus annahm, der sich übrigens bei genaueren Analysen in der Statistik der Sonnenfleckenhäufigkeit ebenfalls mehr oder weniger deutlich nachweisen läßt.

Zu den Erscheinungen der Sonnenaktivität gehören auch die *Sonnenfak-*

Wechsel der Polarität in den Sonnenfleckengruppen (schematisch)
Rot: magnetischer Nordpol; blau: magnetischer Südpol



keln. Bei der Beobachtung durch das Fernrohr fallen diese Gebilde ausschließlich in der lichtschwächeren Randzone der Sonnenscheibe auf. Sie sind dort als ausgedehnte, meist wolken- oder netzartige helle Gebiete zu erblicken, die eine zum Teil beträchtlich größere Flächenhelligkeit als die Umgebung zeigen. Der naheliegende Schluß, daß es sich hierbei um erheblich höher temperierte photosphärische Materie handeln müsse, wird durch spektrographische Untersuchungen bestätigt. Die Gastemperaturen in den Fackeln liegen tatsächlich um mehrere hundert Grad über denen der Nachbarschaft. Mit welchen Methoden Sonnenfackeln auch in den hellstrahlenden zentralen Partien der Sonnenscheibe sichtbar gemacht werden können, erfahren wir im nächsten Kapitel.

Ein voll entwickeltes Fackelgebiet besteht aus netzartigen Lichtadern mit einer granulierten Feinstruktur, ähnlich der ungestörten Photosphäre. Wie nicht anders zu erwarten, sind sie als Erscheinungen der Sonnenaktivität eng mit den nachweisbar vorhandenen Aktivitätszentren verbunden. Das heißt, im Bereich eines Sonnenfleckes oder einer Fleckengruppe treten grundsätzlich auch Fackeln auf. Zuweilen lassen sich Fackeln ohne zugehörige Sonnenflecke beobachten, was auf ihre gewöhnlich größere Lebensdauer zurückzuführen ist. Der enge Zusammenhang zwischen Fackeln und Flecken ergibt eine ähnliche Häufigkeitsverteilung der Fackeln nach heliographischer Breite, wie wir sie bei den Sonnenflecken finden, wobei etwa 45° Breite im allgemeinen die obere Grenze für ihr Auftreten bilden.

Das zweite „Stockwerk“ der Sonnenatmosphäre

Bevor wir nun die letzten durch direkte Beobachtung zu erfassenden Einzelheiten im Aufbau des Glutgasballs Sonne kennenlernen, wollen wir noch einmal auf die im Eingangskapitel beschriebenen Erlebnisse totaler Sonnenfinsternis zurückkommen. Erinnern wir uns an die Augenblicke vor dem Eintritt der Totalität: Der dunkle Körper des Mondes hat sich schon nahezu völlig vor die helle Sonnenscheibe geschoben. Da sein scheinbarer Durchmesser fast genau dem der Sonne entspricht, bleibt in den letzten Sekunden vor der totalen Bedeckung schließlich nur noch eine äußerst schmale Sichel der Sonnenscheibe sichtbar. Dann erlischt auch diese Lichtspur der Photosphäre, und schlagartig erscheint das Totalitätsbild. Was

nun zu erblicken ist, zählt zu den eindruckvollsten Erlebnissen, welche die Natur überhaupt zu bieten hat.

Unmittelbar über dem Rand der schwarzen Mondscheibe zeigt sich dort, wo die Photosphäre hinter dem Mondkörper verschwunden ist, für kurze Zeit ein leuchtend roter Saum. Kann man in diesem Augenblick den Mond- beziehungsweise Sonnenrand mit einem Fernrohr ohne Filterdämpfung beobachten, so sieht man eine flache Schicht gasförmiger Materie, deren Außenrand oder besser Oberfläche sehr unregelmäßig und in relativ schneller Bewegung begriffen ist. Der erfahrene und erfolgreiche italienische Sonnenforscher *Angelo Secchi* (1818–1878) hat diese leuchtende Schicht, die man wegen ihrer intensiven Färbung als *Chromosphäre* (griech. chromos = Farbe) bezeichnet, einmal treffend mit einer brennenden Prärie verglichen. Die größeren der emporschlagenden „Flammen“ werden *Spiculen* (Spieße) genannt. Die Beobachtungen haben ergeben, daß die gasförmige Materie in diesen Gebilden binnen weniger Minuten 10 000 km und noch höher emporgeschleudert wird, wobei Geschwindigkeiten von 20 bis 50 km/s auftreten.

Die stürmischen vertikalen Bewegungen und ihre physikalischen Folgerscheinungen bilden ein Hauptmerkmal der Chromosphäre. Diese liegt unmittelbar über der Photosphäre und stellt mit ihren rund 10 000 km Dicke sozusagen das zweite Stockwerk der Sonnenatmosphäre dar. Die enormen Strömungsgeschwindigkeiten entsprechen in der hochverdünnten Materie der Chromosphäre – sie hat nur noch eine Dichte von etwa 10^{-12} g/cm³ gegenüber etwa 10^{-8} g/cm³ der Photosphäre – einer Bewegung der Gase mit Überschallgeschwindigkeit. Die dynamische Anregung zu diesen hohen Bewegungsgeschwindigkeiten kommt offenbar aus der Photosphäre in Form der vertikal zirkulierenden Granulenströmung, die auch einen Energietransport durch Schallwellen einschließt. Dabei entstehen Stoßwellen, wie wir sie vom Überschallflug in der Erdatmosphäre her kennen. Diese Stoßwellen transportieren Bewegungsenergie in die oberen Schichten der Chromosphäre und die noch höher gelegenen Bereiche. Die Energie der Stoßwellen wandelt sich in den hochverdünnten Gasen zunehmend in thermische Energie um. So erreichen die oberen Schichten der Chromosphäre schon Temperaturen um 10 000 °K, während im darüber liegenden „Stockwerk“ sogar 1 bis 2 Millionen Grad K herrschen. Daß man von den so hoch temperierten Schichten der Sonnenatmosphäre unter normalen Beobachtungsbedingungen nichts bemerkt, liegt einfach an

deren außerordentlich geringer Dichte. Es zählt aber zweifellos zu den „Delikatessen“ der Sonnenphysik, daß wir hier einen Heizungsmechanismus kennenlernen, bei dem der „Topf“ (Chromosphäre und darüber liegende Schicht) erheblich heißer ist als die „Heizplatte“ (Oberfläche der Photosphäre).

Totale Sonnenfinsternisse bieten für die spektrale Untersuchung der Chromosphäre noch eine Besonderheit. Bekanntlich benötigt man zum Erzeugen eines Linienspektrums im Normalfall neben anderem auch einen engen Spalt, der nur ein schmales Bündel des zu untersuchenden Lichts in den Spektralapparat fallen läßt. Aus diesem Lichtbündel wird dann nach seiner Zerlegung das nach Wellenlängen aufgefächerte Spektrum, in dem die Spektrallinien nichts anderes sind als einfarbige Abbildungen des Spektrographenspalts. Bei einer totalen Finsternis kann man das Spektrum der Chromosphäre aber auch mit einem spaltlosen Spektrographen aufnehmen. Dazu braucht man diesen nur auf den Mondrand zu richten, wo unmittelbar nach dem Verschwinden der Photosphäre die Chromosphäre sichtbar wird. Deren schmale Sichel wirkt dann selbst wie ein Spektrographenspalt, und das im Augenblick des Auftauchens der Chromosphäre aufgenommene Spektrogramm zeigt die Linien dementsprechend als gekrümmte, sichelförmige Abbilder des Chromosphärensaums.

Das Wesentliche an einem so gewonnenen Chromosphärenspektrogramm ist aber, daß es ausschließlich aus Emissionslinien besteht. Und zwar finden wir in ihm all die Linien hell und farbig wieder, die sonst als solare Absorptionslinien im normalen Sonnenspektrum auftreten. Die einzig sinnvolle Deutung dieses Befundes besagt, daß die Chromosphäre offenbar der eigentliche Erzeuger der Fraunhoferschen Linien ist, während die darunterliegende Photosphäre die Umkehr in dunkle Linien innerhalb eines Kontinuums bewirkt. Genauere Untersuchungen haben ergeben, daß das chromosphärische Emissionsspektrum, das wegen seines nur wenige Sekunden dauernden Aufleuchtens als *Flashspektrum* (engl. flash = Blitz) bezeichnet wird, hauptsächlich von der untersten Schicht der Chromosphäre ausgeht. Die Analyse des Fraunhofer-Absorptionsspektrums sagt also eigentlich bloß etwas über die Zusammensetzung dieser dünnen Schicht der Sonnenatmosphäre aus.

Wir erkennen daran, wie schwierig es ist, ein hinreichend zuverlässiges Bild von dem chemischen Gesamtaufbau der Sonne zu gewinnen. Derartige Aussagen beruhen deshalb im wesentlichen – natürlich unter Einbezie-

hung aller erfaßbaren Erscheinungen – auf Modellvorstellungen von dem Mechanismus der Energieerzeugung und des Energietransports im Sonneninnern sowie der Energieabgabe durch die Sonnenoberfläche.

Glühende Gaswolken über der Sonnenoberfläche

Zu den eindrucksvollsten Finsterniserscheinungen zählen die *Protuberanzen*, die auch noch nach Abdeckung der Chromosphäre durch den Mond als rotleuchtende wolken- oder flammenartige Gebilde über die dunkle Mondscheibe herausragen (lat. *protuberare*). Sie sind fast bei jeder Finsternis und meist in größerer Anzahl zu beobachten. Früher glaubte man, daß diese Gebilde nicht der Sonne, sondern dem Mond angehören, und hielt sie für nur bei Finsternisbeleuchtung sichtbar werdende Wolken in der sehr dünnen Mondatmosphäre.

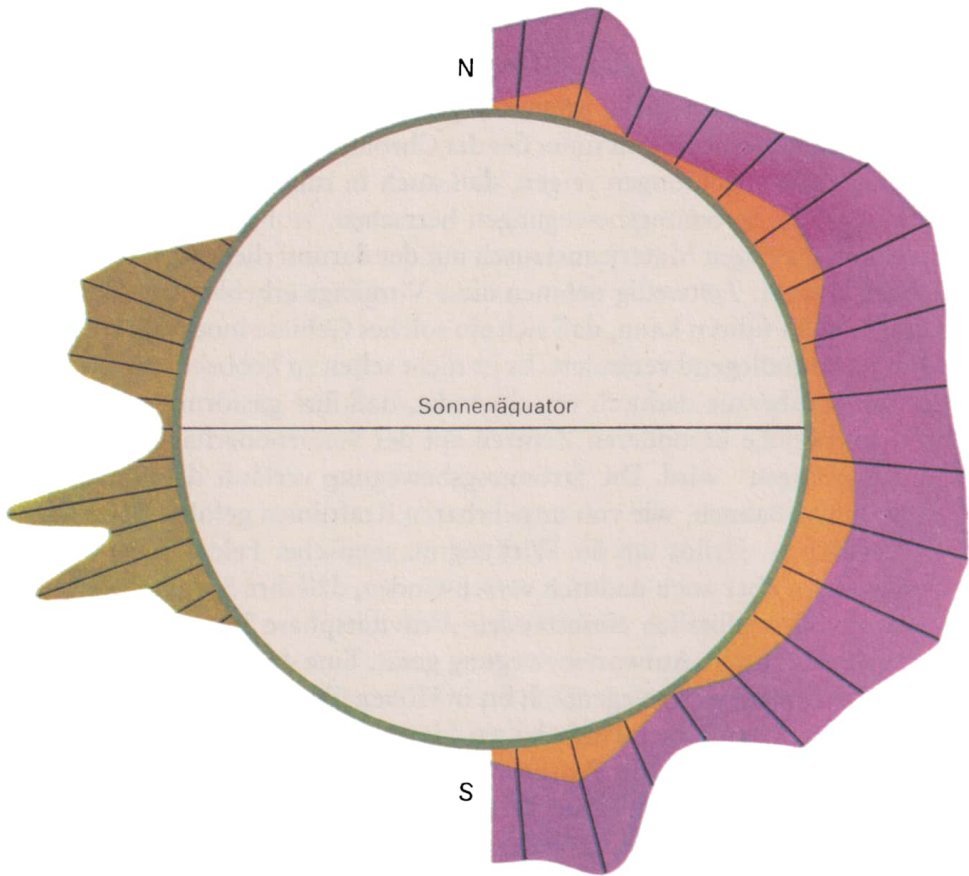
Schon die intensive Färbung der Protuberanzen läßt darauf schließen, daß sie weitgehend aus dem gleichen Material bestehen wie die Chromosphäre. In ihrem Spektrum zeigen sich ebenso wie dort besonders intensiv die Linien von Wasserstoff, Helium und ionisiertem Kalzium. Übrigens lassen sich Protuberanzen eben aus diesem Grunde mit Hilfe eines einfachen spektroskopischen Verfahrens auch außerhalb von Finsternissen beobachten. Man benutzt dazu einen tangential auf den Sonnenrand eingestellten Spektroskopspalt und richtet die Betrachtungsoptik beispielsweise auf eine bestimmte einzelne Linie des Wasserstoffs. Öffnet man nun den Spalt des *Protuberanzenspektroskops* etwas weiter, so wird die Wasserstofflinie breiter, und in dieser eigentlich dunklen Linie zeichnet sich das Abbild der Protuberanz als hellrot leuchtende Wasserstoffwolke ab.

Form, Größe und Verhalten der Protuberanzen sind sehr unterschiedlich. Das übliche Klassifizierungsschema teilt sie im wesentlichen nach ihrem verschiedenartigen Verhalten ein. Die *ruhenden Protuberanzen* sind außerordentlich ortsfeste Gebilde, die manchmal sogar einige Sonnenrotationen überdauern können. Sie kommen meist am Rand einer Fleckengruppe vor, was ihre Verbindung zu den Aktivitätszentren deutlich macht, und erinnern in ihrem Aussehen häufig an frei über der Sonnenoberfläche schwebende langgestreckte Leuchtbögen mit Höhen bis 100 000 km und darüber; ihre Basislängen können mehrere 100 000 km

erreichen. Die Dimensionen eines solchen Gebildes sind also riesig. Dennoch bleibt seine stoffliche Menge wegen der sehr geringen Gasdichte – sie liegt teilweise noch weit unter der der Chromosphäre – äußerst niedrig.

Längere Beobachtungen zeigen, daß auch in ruhenden Protuberanzen recht kräftige Strömungsbewegungen herrschen, wobei es offensichtlich zu einem ständigen Materieaustausch mit der darunterliegenden Chromosphäre kommt. Zeitweilig nehmen diese Vorgänge erheblich an Aktivität zu, was dazu führen kann, daß sich ein solches Gebilde innerhalb weniger Stunden grundlegend verändert. Es ist nicht selten zu beobachten, wie eine ganze Protuberanz dadurch verschwindet, daß ihre gasförmige Substanz in irgendwelche besonderen Zentren auf der Sonnenoberfläche förmlich „hineingesogen“ wird. Die Strömungsbewegung verläuft dabei meist in bestimmten Bahnen, wie von unsichtbaren Kraftlinien geführt. Hier handelt es sich zweifellos um die Wirkung magnetischer Felder. Eine Protuberanz kann aber auch dadurch verschwinden, daß ihre Materie während einer ziemlich plötzlich einsetzenden Aktivitätsphase in eine mehr oder weniger stürmische Aufwärtsbewegung gerät. Eine derartige *aufsteigende Protuberanz* läßt sich gelegentlich bis in Höhen über 1 000 000 km verfolgen. Dabei treten Geschwindigkeiten bis zu 700 km/s auf. Unter diesen Bedingungen kann sich die Protuberanzenmaterie auch ganz von der Sonne lösen, indem sie förmlich in den Weltraum „hinauskatapultiert“ wird und dann ihren weiteren Weg durch den interplanetaren Raum nimmt. Wegen ihrer extremen Verdünnung hat sie dort jedoch keinerlei besondere Wirkung.

Eine weitere Gruppe umfaßt die *Fleckenprotuberanzen*, die jeweils direkt über einem Fleckengebiet entstehen. Sie bieten eine überaus merkwürdige Erscheinungsform: Hoch über der Sonnenoberfläche – scheinbar aus dem Nichts – bilden sich für längere Zeit helle knotenförmige Wolken, aus denen ständig Protuberanzenmaterie auf gekrümmten Bahnen in die Chromosphäre abfließt. Dabei ist jedoch nicht zu erkennen, woher sich die Materie in den Knoten ergänzt. Wir müssen annehmen, daß sich dies wahrscheinlich auf Kondensationsvorgänge in der noch höher verdünnten dritten Schicht zurückführen läßt, in der ja die Fleckenprotuberanzen entstehen. Da aber absteigende Strömungen bei den Protuberanzen überhaupt vorherrschen, scheint ihre Bildung auch sonst sehr stark an solche Kondensationen gebunden zu sein. Einige Sonnenforscher vergleichen deshalb die aktiven Protuberanzen mit abregnenden Schauerwolken eines



Verteilung der Flecke (links) und der Protuberanzen (rechts) in Abhängigkeit von der heliographischen Breite
 Lila: Protuberanzenhäufigkeit im Aktivitätsmaximum; orange: im Minimum

Sonnengewitterzentruns. Hierbei ist die Mitwirkung magnetischer Kräfte wiederum sehr deutlich.

Als letzte Gruppe sind noch die *eruptiven Protuberanzen* zu nennen. Sie treten außerordentlich spontan auf und sind Anzeichen für besondere Vorgänge in einem Aktivitätsherd. Chromosphärische Materie wird explosionsartig emporgeschleudert, meist in Säulenform, ohne daß vorher an der betreffenden Stelle eine stärkere Protuberanzenaktivität zu beobachten war. Sie erreicht dabei Höhen von einigen 10 000 km bis mehr als 100 000 km und Geschwindigkeiten von etlichen 100 km/s. Die emporgeschleuderte Materie strömt meist schon nach ein paar Minuten oder

wenigen Stunden wieder zur Sonnenoberfläche zurück oder löst sich in der Höhe auf.

Die Häufigkeit des Auftretens von Protuberanzen läßt wiederum die elfjährige Aktivitätsperiode erkennen, allerdings mit einem weniger deutlich ausgeprägten Verlauf. Auch eine Konzentration auf gewisse Häufigkeitszonen ist vorhanden, freilich nicht mit so scharfen Begrenzungen wie bei den Sonnenflecken. Die Hauptzone beginnt etwa $\pm 50^\circ$ heliographischer Breite und wandert ebenfalls im Laufe einer Sonnenfleckenperiode zum Äquator hin. Eine Besonderheit besteht darin, daß auch Nebenzonen auftreten, die sich in Richtung der Sonnenpole verlagern. Die zugehörigen Protuberanzen verschwinden jedoch bald nach Überschreiten des Sonnenfleckenmaximums.

Eine hauchdünne, aber sternenhheiße Krone

Das dritte und höchste „Stockwerk“ der Sonnenatmosphäre, die *Korona* (lat. corona = Kranz, Krone), ist in seiner vollen faszinierenden Schönheit nur bei einer totalen Sonnenfinsternis zu sehen. Gegen den abgedunkelten Hintergrund hebt es sich wie eine Strahlenkrone aus hauchdünnem, silberfarbigem Gespinnst um die pechschwarze Mondscheibe herum ab. So hielt man diese Erscheinung noch bis zum vorigen Jahrhundert für die weit in den Weltraum hinausreichende, extrem dünne Mondatmosphäre. Inzwischen wissen wir aber, daß die Koronahelligkeit zwar nur ein Millionstel der Photosphärenhelligkeit beträgt und folglich bei Tage durch das atmosphärische Streulicht völlig überdeckt wird, im Prinzip jedoch etwa der Helligkeit des Vollmonds entspricht, so daß die Korona als Mondatmosphäre auf jeden Fall mit dem Mond am Nachthimmel zu sehen sein müßte.

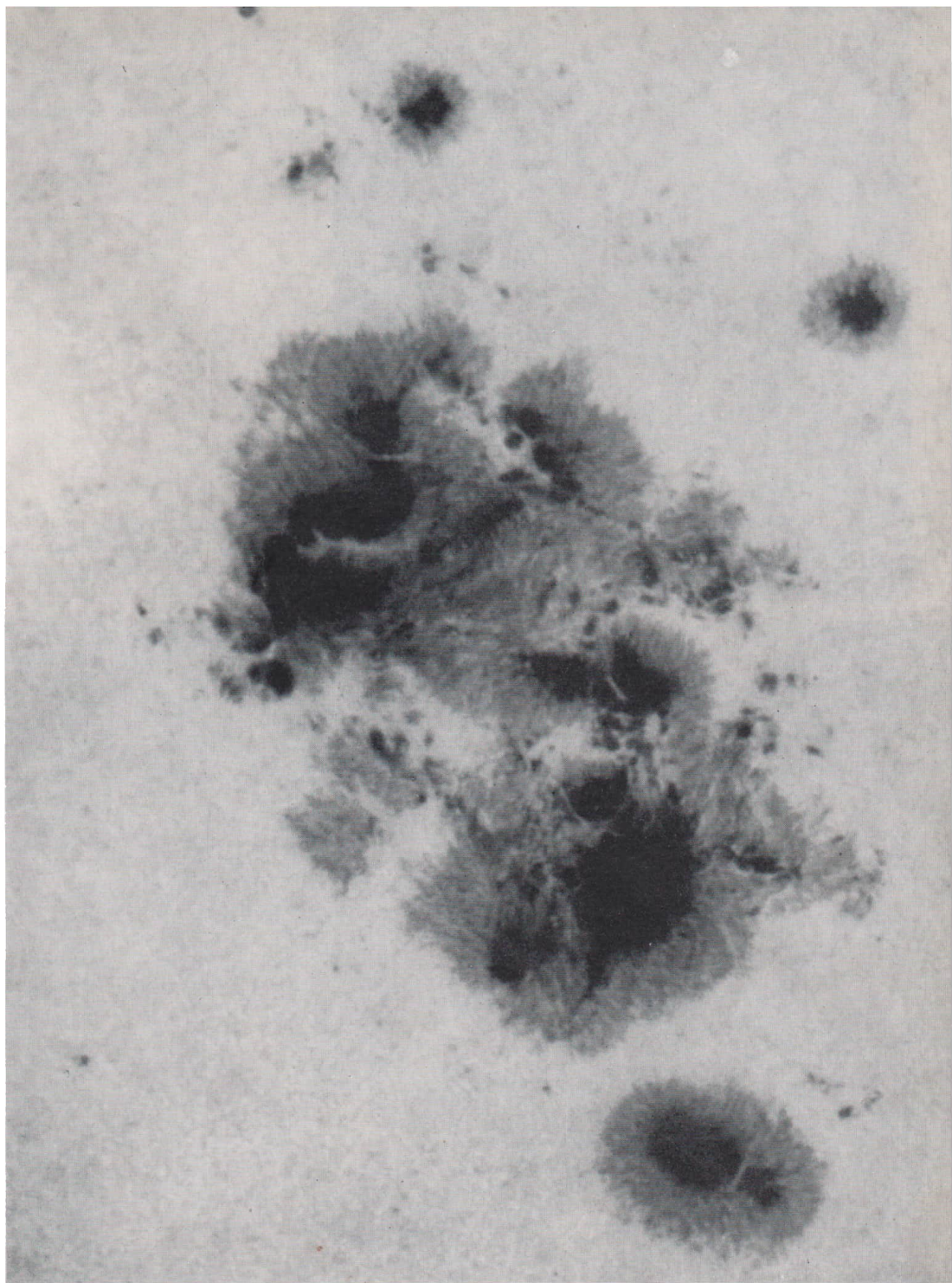
Die Physik der Korona zählt zu den reizvollsten, aber auch schwierigsten Kapiteln der Sonnenforschung. Bis heute ist eine ganze Reihe von Problemen gerade erst in den Umrissen einer Klärung näher gebracht. Die Ursache liegt offenbar in den außergewöhnlichen physikalischen Bedingungen, die im Bereich der Koronamaterie herrschen. Sie werden einerseits durch die extrem niedrige Dichte der in der Korona vorkommenden Substanz und andererseits durch die Nähe der intensiv strahlenden und Überschallstoß-

wellen aussendenden Sonnenoberfläche beziehungsweise der chromosphärischen Regionen bestimmt. Die Dichte der Koronamaterie beträgt nur etwa den hundertmilliardsten Teil der Dichte der Atmosphäre an der Erdoberfläche. Ihre Temperatur ist, wie bereits erwähnt, außerordentlich hoch. Sie liegt in der Größenordnung von 1 bis 2 Millionen Grad K. Die Koronamaterie ist also ein energetisch hochangeregtes Plasma. Über den Anregungsmechanismus durch Stoßwellen haben wir ebenfalls schon gesprochen.

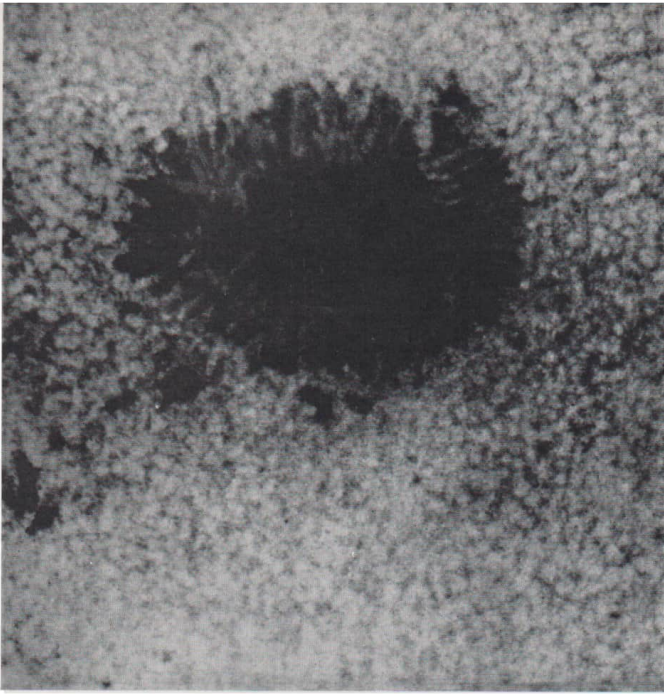
Die spektrographische Analyse des Koronalichts ergibt einen recht komplizierten Befund. Sie läßt vor allem einen Unterschied zwischen *innerer* und *äußerer Korona* erkennen, der einem tatsächlichen Unterschied im Aufbau entspricht. Die innere Korona erstreckt sich bis etwa 0,5 Sonnenradien Entfernung von der Sonnenoberfläche, während die äußere Korona ohne feste Grenze in den interplanetaren Raum übergeht. Einzelne strahlenförmige Ausläufer haben sich bei Finsternissen über einige Sonnendurchmesser hinweg verfolgen lassen. In den Spektren sind die Übergänge zwischen innerer und äußerer Korona allerdings etwas verwischt.

Das Spektrum der inneren Korona zeigt überraschend ein kräftiges Kontinuum, dem eine Reihe von Emissionslinien überlagert ist. Für eine gasförmige Substanz erscheint zunächst ein Kontinuumsuntergrund rätselhaft. Die einfache Erklärung liefert aber die Plasmanatur des Koronagases. Dieses besteht ausschließlich aus ionisierten Atomen sowie einer noch viel größeren Anzahl freier Elektronen. Die thermische Bewegungsgeschwindigkeit dieser Materiepartikel liegt für Protonen bei etwa 200 km/s und für Elektronen bei ungefähr 8000 km/s. Vor allem die zahlreich vorhandenen Elektronen sind es, die das von der Sonnenoberfläche in die Korona gelangende Licht nach allen Richtungen, also auch zur Erde hin, streuen. Dieses Streulicht müßte aber eigentlich das normale Fraunhofer-Sonnenspektrum ergeben, mit Kontinuum und eingelagerten Absorptionslinien. Solche Linien fehlen jedoch eindeutig. Die sehr schnelle Bewegung der Elektronen bewirkt zwangsläufig bei der gestreuten Strahlung einen Dopplereffekt und dieser dann ein totales „Verschmieren“ der dunklen Fraunhoferschen Linien in die hellen Nachbargebiete des Spektrums hinein. So wird dieses ein scheinbar reines Kontinuum.

Noch rätselhafter aber erschienen die Emissionslinien, von denen je eine im grünen und im roten Bereich des Spektrums am auffälligsten ist. Man mußte nämlich sehr bald nach der Entdeckung der grünen Koronalinie im

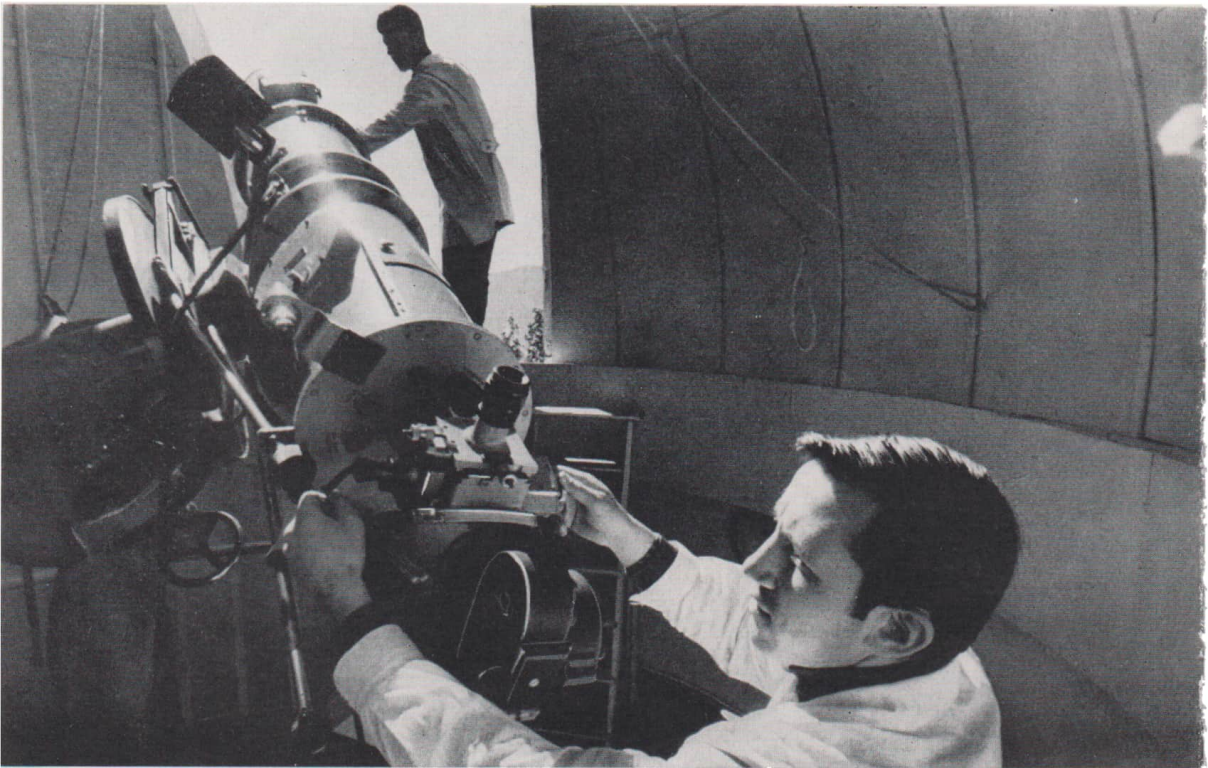


Große Sonnenfleckengruppe vom 17. Mai 1931 (Einsteinurm, Potsdam)

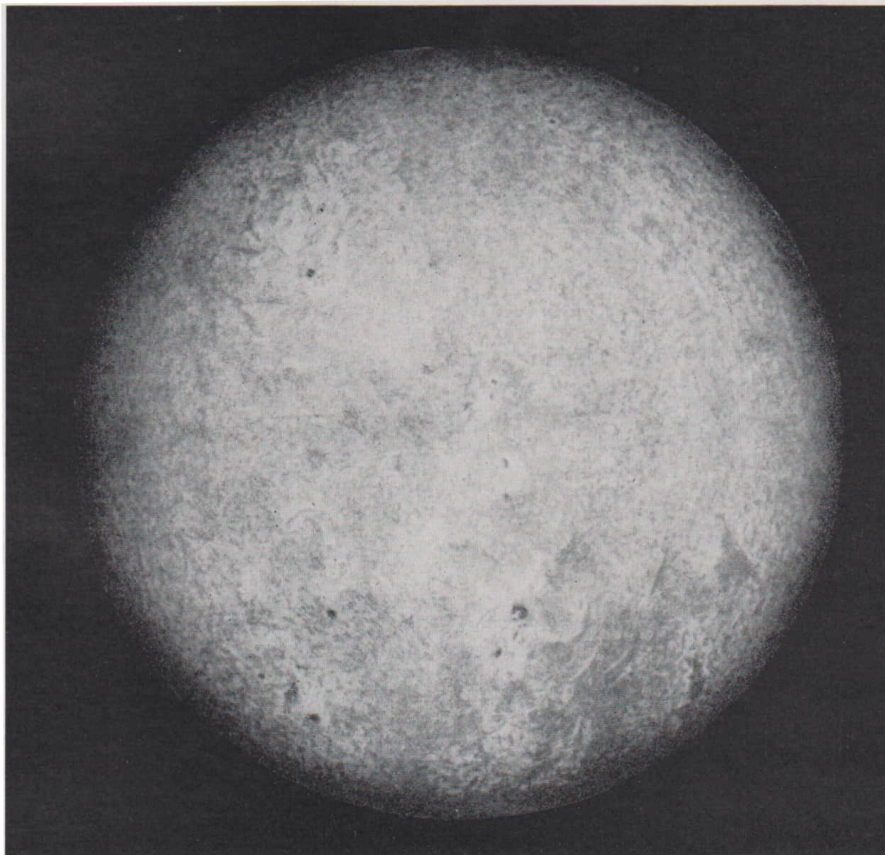
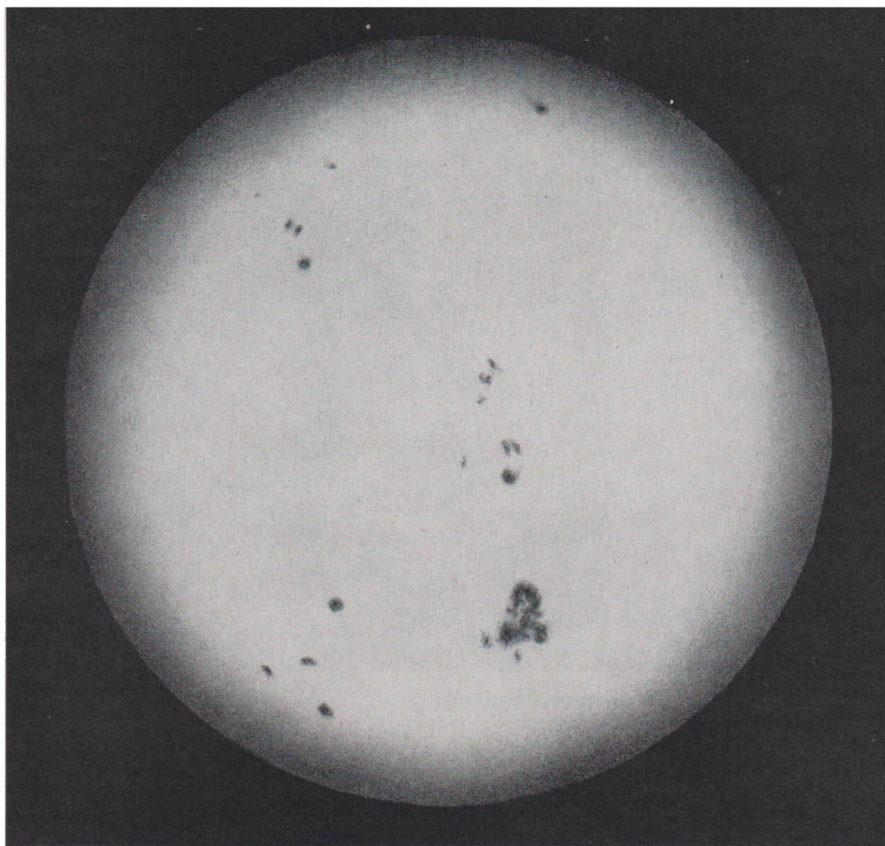


Granulation in der Umgebung
eines Einzelflecks

Kleines Sonnentteleskop mit Ka-
mera für Reihenaufnahmen im
Observatorium von Abastumani
(Georgische SSR)



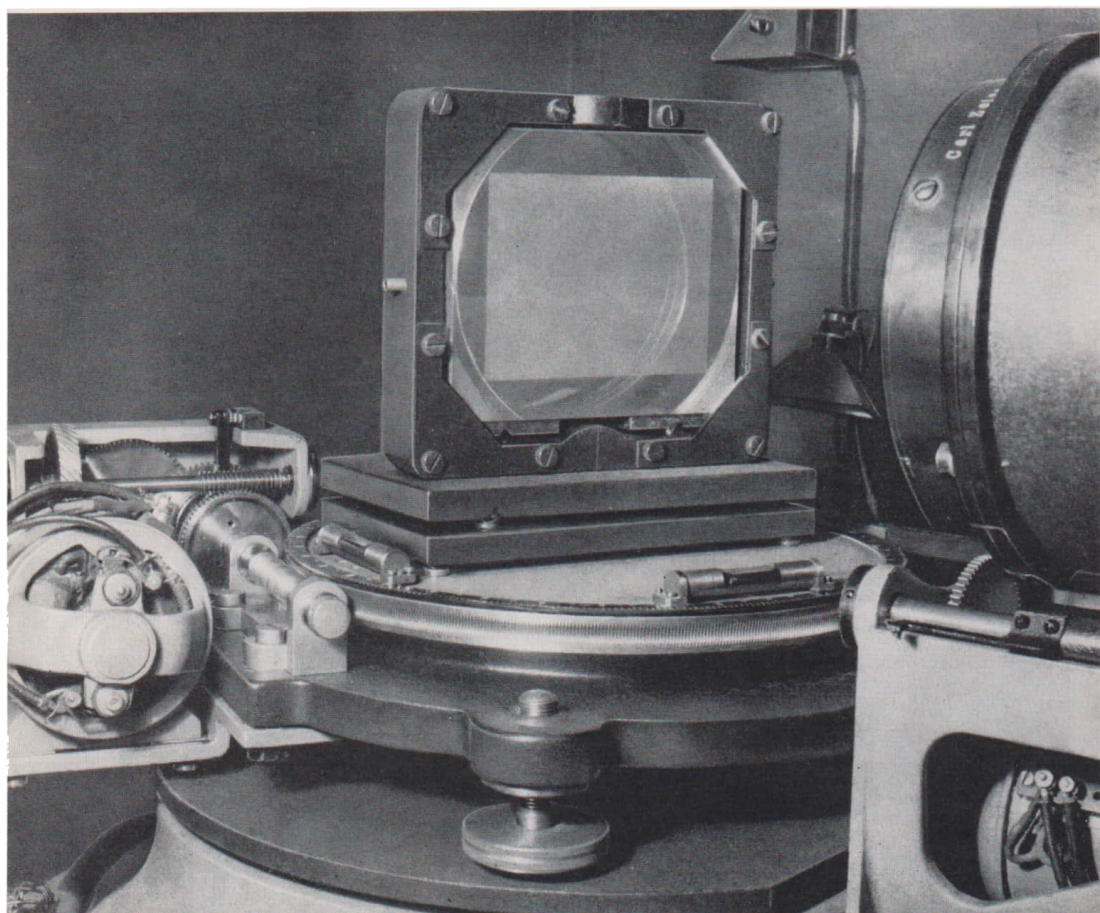
Aufnahme der Sonne im Normallicht (oben) und gleichzeitig gewon- ►
nenes $H\alpha$ -Spektroheliogramm

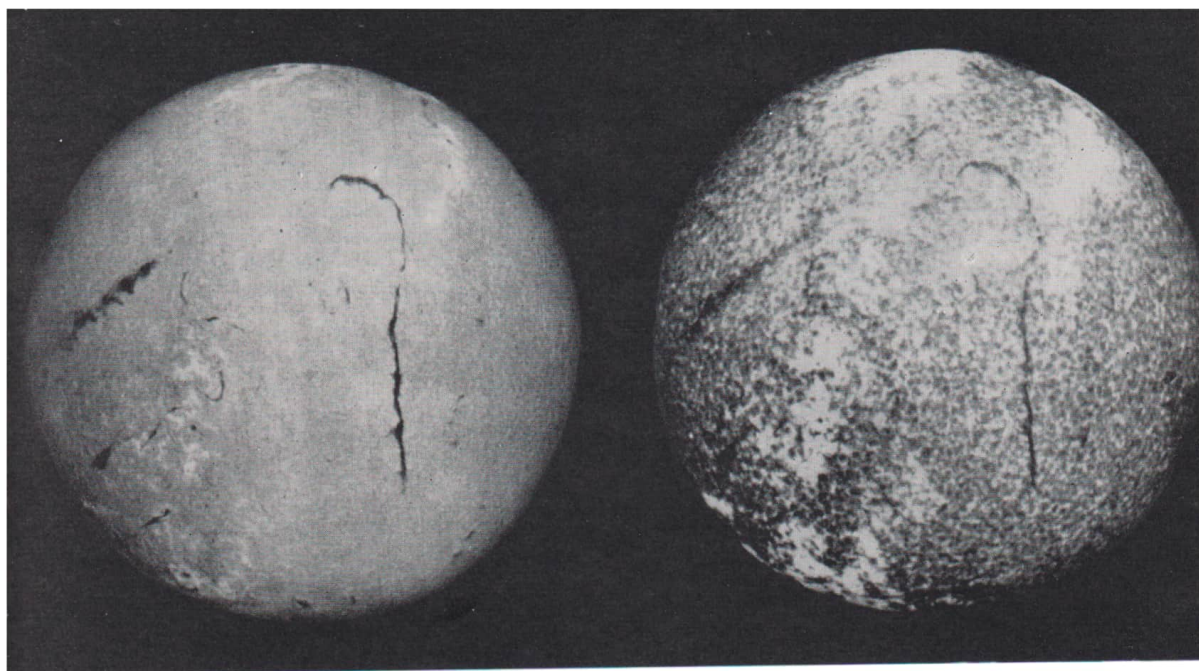




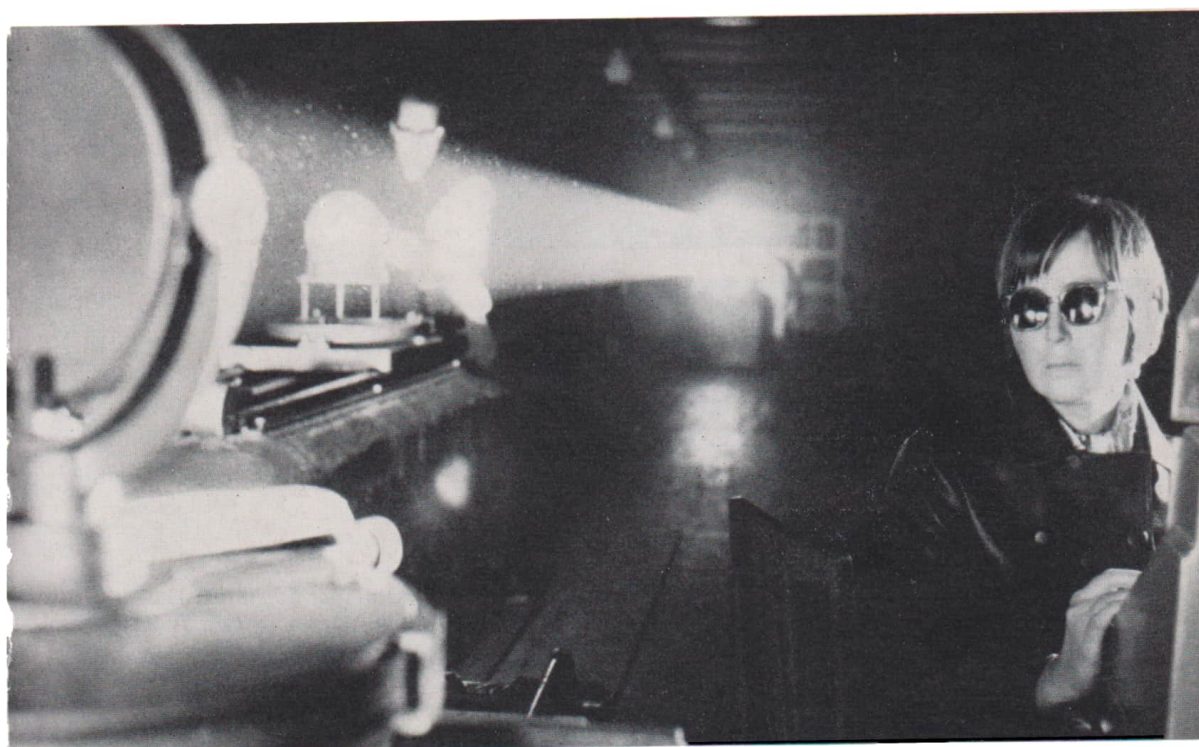
Sonnenobservatorium Einsteinturm, Potsdam

Gitterspektrograph des Einsteinturms

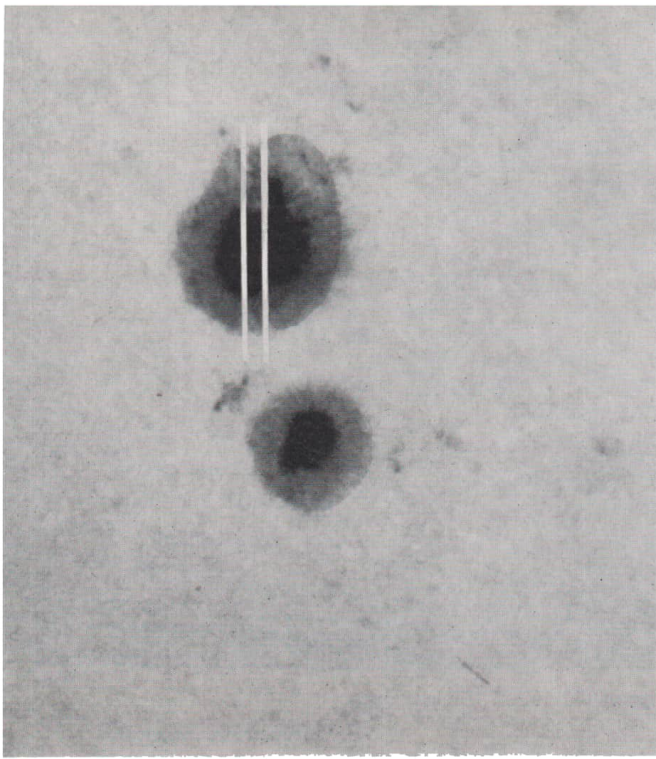




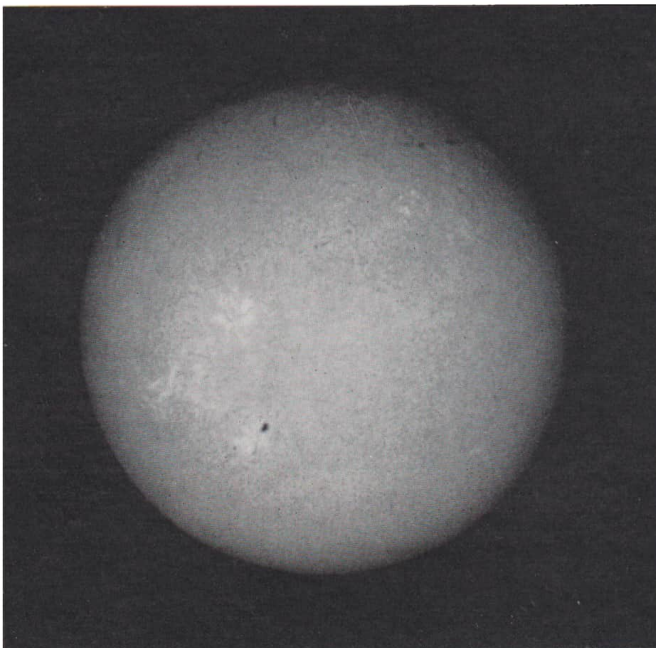
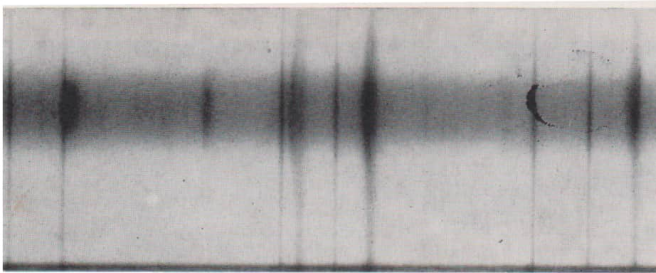
Gleichzeitig aufgenommenes $H\alpha$ -Spektroheliogramm (links) und Kalzium-Spektroheliogramm



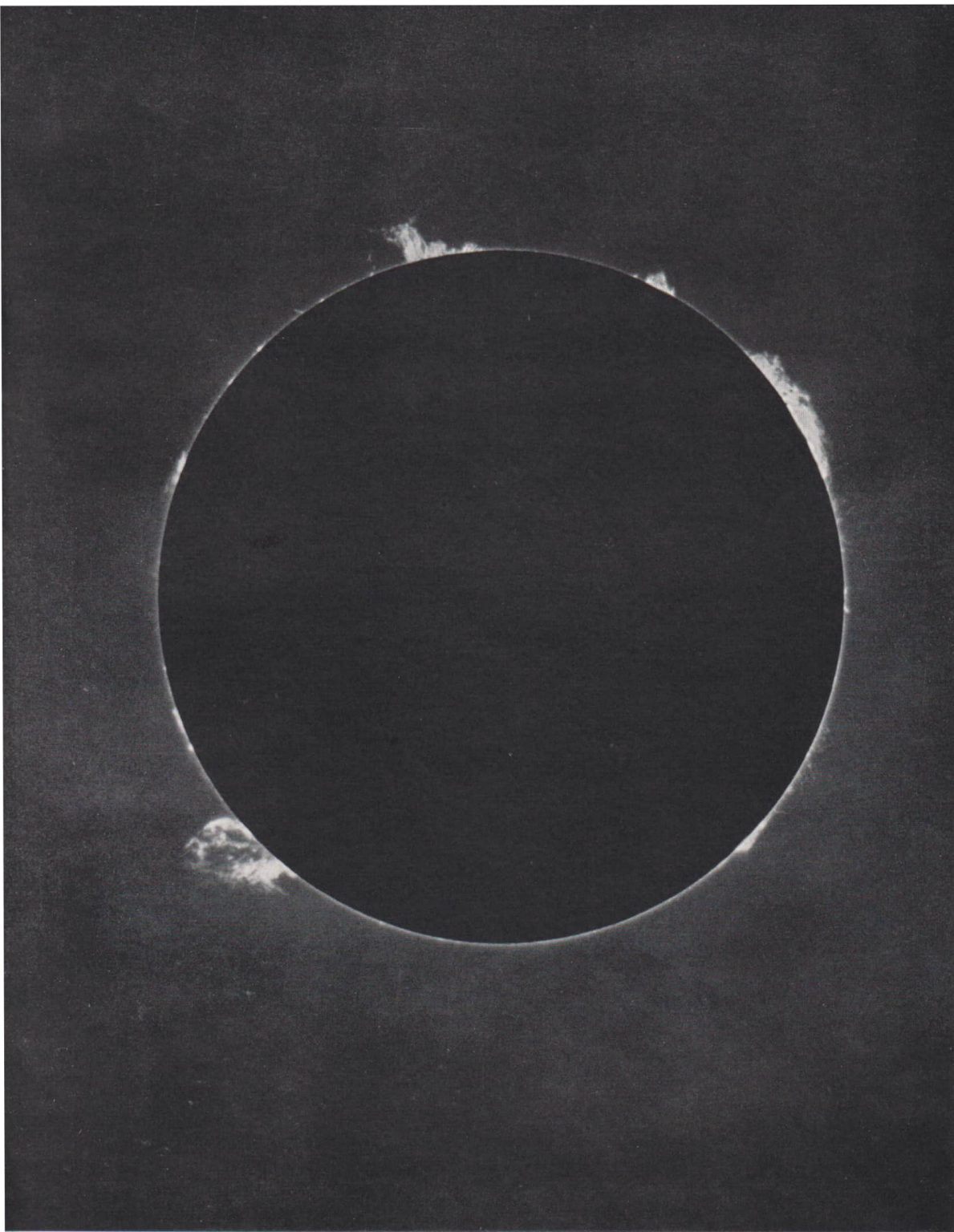
Von einem Horizontalteleskop (hinter der rückwärtigen Wand) wird das Sonnenlicht in den Meß- und Spektrographenraum geleitet



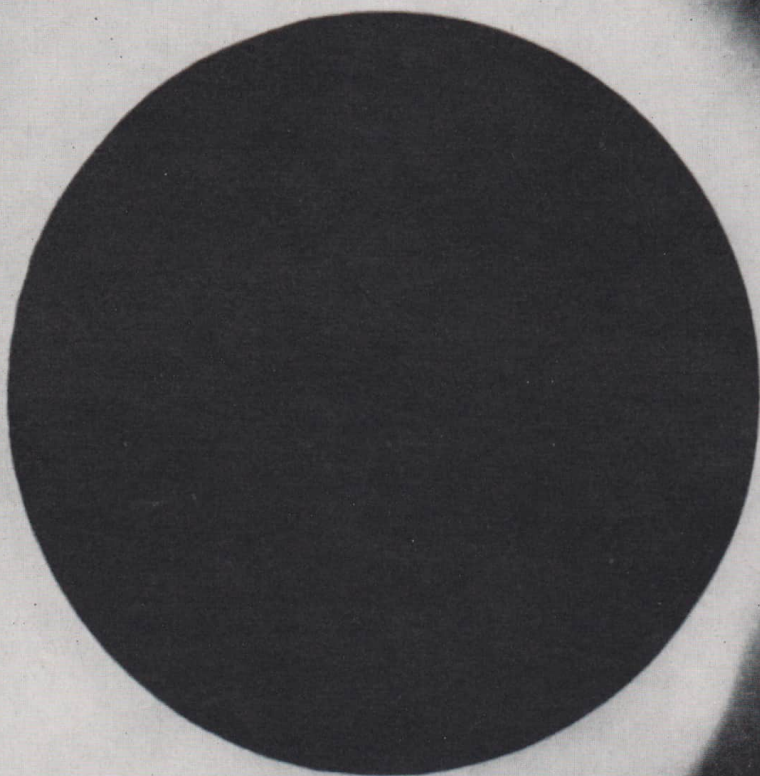
Das Magnetfeld im Gebiet eines Sonnenflecks (oben) ruft bei bestimmten Spektrallinien (unten) eine Aufspaltung hervor; die Doppellinie über dem Fleck gibt die Lage des Spektrographenspalts bei der Aufnahme an



Aufnahme der Sonne mit $H\alpha$ -Filter; die starken lokalen Aufhellungen weisen auf chromosphärische Eruptionen hin



Koronographen-Aufnahme der Sonne mit mehreren großen Protuberanzen



Sonnenkorona (Minimum-Typ), aufgenommen während einer
Finsternis

Jahre 1869 feststellen, daß weder sie noch eine der später aufgefundenen Linien mit irgendeiner der normalen Fraunhoferschen Linien oder überhaupt mit Spektren der bekannten Elemente in Beziehung zu bringen sind, und war schon versucht, sie als Nachweis eines neuen, nicht auf der Erde vorkommenden Elements, des sogenannten Koroniums, zu buchen. Erst 1940 gelang es dem schwedischen Physiker *Bengt Edlén*, das Rätsel der Koronalinien zu lösen. Er fand heraus, daß es sich dabei doch um Spektrallinien bekannter, auch sonst in der Sonnenmaterie nachgewiesener Elemente handelt, vor allem von Eisen, Kalzium, Nickel und Argon.

Die Besonderheiten dieser Linien folgen daraus, daß die Atome der genannten Elemente in der Sonnenkorona durch die enorme Temperatur viel stärker ionisiert werden, als es den bis dahin bekannten Bedingungen bei spektralanalytischen Untersuchungen entsprach. Der sehr hohe Ionisationsgrad – die Zahl der dem Atom entrissenen Elektronen – läßt aber eben ganz spezielle Spektrallinien entstehen. So wird die grüne Koronalinie durch die Strahlung von Eisenatomen erzeugt, denen die beträchtliche Zahl von 13 Elektronen fehlt, während die rote Linie dem „nur“ 9fach ionisierten Eisen zugehört. Ein weiterer ausschlaggebender Faktor für das Zustandekommen derartiger Spektrallinien ist eine so extrem geringe Dichte des strahlenden Stoffes, wie sie das Koronagas aufweist. Die außergewöhnlichen Bedingungen der Ionenanregung trugen den Koronalinien die Bezeichnung „verbotene Linien“ ein, weil sie eben unter normalen Verhältnissen nicht zustande kommen können. Inzwischen hat man gelernt, derartige Linien auch unter Laboratoriumsbedingungen zu erzeugen, und zwar mittels elektrischer Anregung in hochverdünnten Gasen.

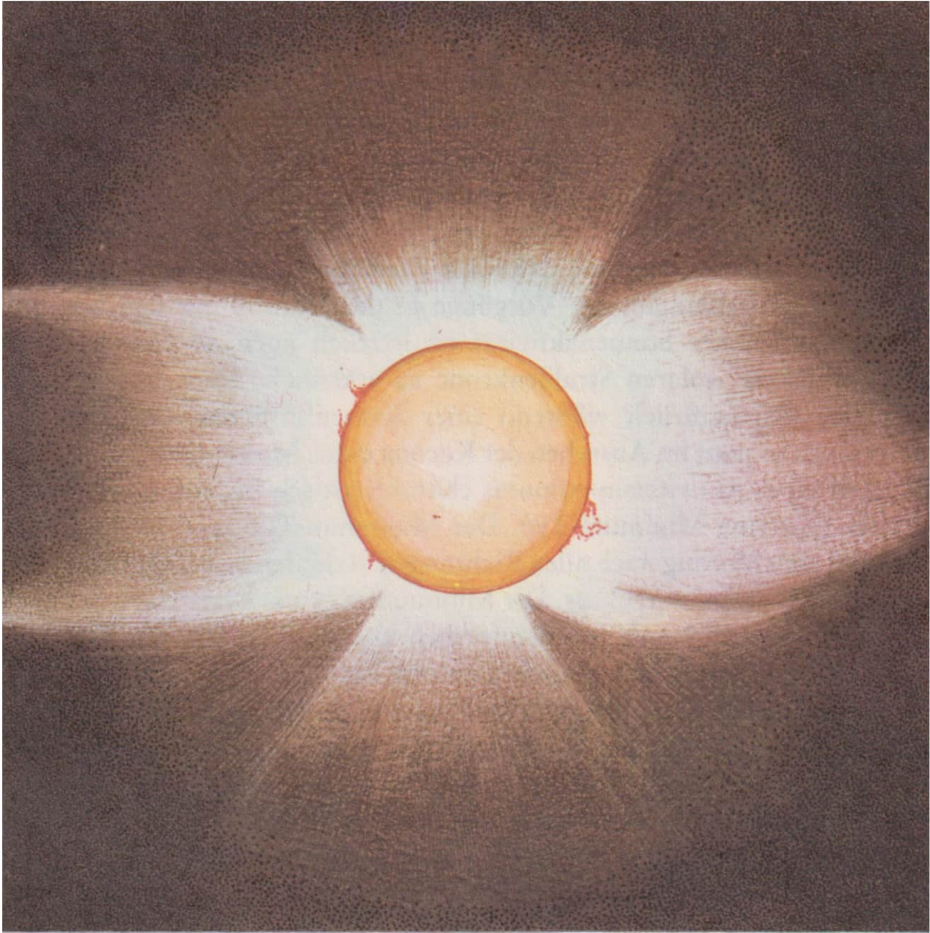
Die Koronalinien, deren ortsabhängige Intensität als Folge der Vorgänge in Photo- und Chromosphäre sehr schnell wechselt, werden nun schon seit längerem als außerordentlich empfindliche Anzeiger für die Sonnenaktivität gewertet und deshalb von einigen Sonnenobservatorien ständig überwacht. Dabei zeigen sich besonders enge Verbindungen zwischen der Protuberanzentätigkeit und der Struktur der inneren Korona. Mit welchen Mitteln eine solche Überwachung auch außerhalb totaler Finsternisse möglich ist, werden wir im Zusammenhang mit anderen beobachtungstechnischen Spezialitäten der Sonnenforschung erläutern.

Im Spektrum der äußeren Korona läßt sich, wenn auch mit abnehmender Stärke bei wachsender Entfernung vom Sonnenrand, ebenfalls das solare Kontinuum beobachten. Daß es sich wie zuvor um gestreutes Sonnenlicht



Typisches Aussehen der Sonnenkorona im Aktivitätsmaximum (schematisch)

handelt, ist übrigens leicht aus der Intensitätsverteilung im Spektrum zu ersehen. Aber hier sind wieder die Fraunhoferschen Linien vertreten, die somit ein echtes Unterscheidungskriterium für diesen Teil der Korona darstellen. Die genauere Untersuchung zeigt nämlich, daß wir aus ihrem Vorhandensein auf eine ganz andere Beschaffenheit der äußeren Korona schließen können. Zwar ist auch hier ein Streuvorgang wirksam, aber diesmal handelt es sich um feste, staubförmige Partikel, deren Durchmesser etwa zwischen 0,0001 und 0,1 cm liegen.



Typisches Aussehen der Sonnenkorona im Aktivitätsminimum (schematisch)

Weil die Bewegungsgeschwindigkeit dieser Teilchen erheblich kleiner ist als die der Elektronen der inneren Korona, werden die Linien durch den thermischen Dopplereffekt nicht so stark verbreitert und bleiben damit sichtbar. Diese Koronasubstanz zählt also nicht zur Sonnenatmosphäre. Sie gehört vielmehr zu jener staubförmigen interplanetaren Materie, welche die Sonne bis weit über die Erdbahn hinaus in Gestalt einer flachen, zur Ekliptik hin konzentrierten Wolke umgibt. Dieser interplanetare Staub hat nur eine sehr geringe räumliche Dichte, in der Umgebung der Erde etwa

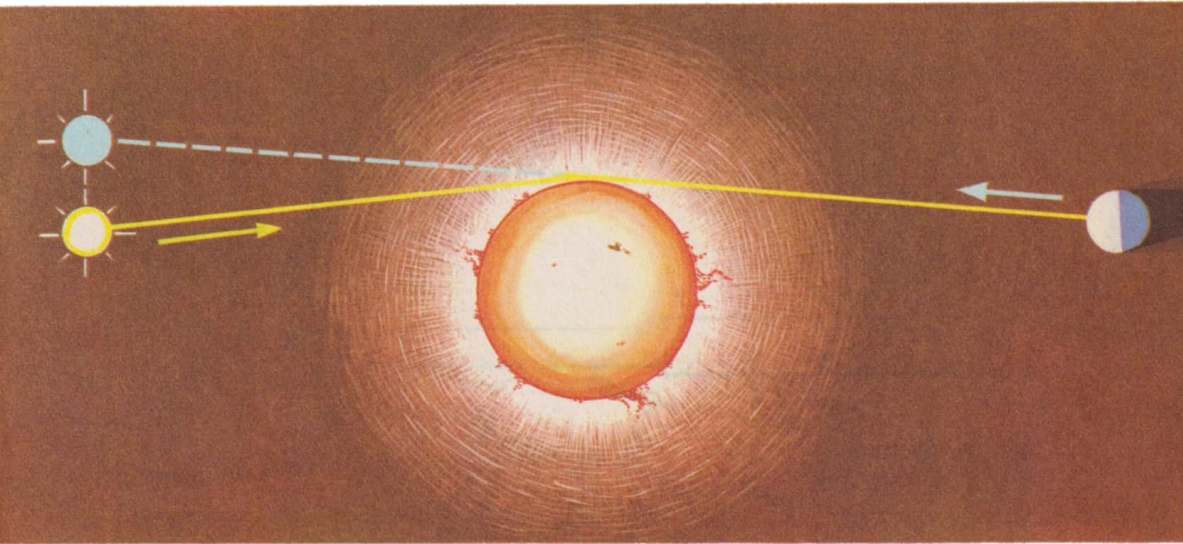
10^{-20} g/cm^3 . Dennoch ruft er durch Reflexion des Sonnenlichts in unmittelbarer Umgebung der Sonne die von der Erde aus auch außerhalb von Finsternissen zu beobachtende Erscheinung des *Zodiakallichts* (von Zodiakus = Tierkreis) hervor. Es handelt sich dabei um eine meist wenig auffällige Himmelsaufhellung, die im Frühjahr nach Sonnenuntergang im Westen oder im Herbst vor Sonnenaufgang im Osten kegelförmig vom Horizont aufsteigt und sich längs der Ekliptik hinzieht. Man bezeichnet die ganze Staubsammlung daher als *Zodiakallichtmaterie*.

Die enge Verbindung der Vorgänge in der Korona mit den anderen Erscheinungen der Sonnenaktivität ist letztlich auch an dem äußeren Gesamtbild der solaren Strahlenkrone zu erkennen. Besonders deutlich läßt sich das natürlich während einer Sonnenfinsternis feststellen. So unterscheidet man im Aussehen der Korona einen Maximum-Typ, der für die Zeit eines Aktivitätsmaximums charakteristisch ist, von einem völlig anders gearteten Minimum-Typ. Der Maximum-Typ zeigt in der Regel eine fast gleichförmig nach allen Richtungen verlaufende, nicht immer sehr ausgeprägte Strahlenstruktur. Die Minimum-Korona kennzeichnen dagegen meist weitreichende Strahlenformen in einem äquatornahen Gürtel sowie schwächere Strahlenbüschel an den Polen, was den Eindruck der Wirkung eines solaren Magnetfeldes hervorruft. Dieses dem Erdmagnetfeld ähnliche Dipolfeld der Sonne ist allerdings recht schwach, sicher nicht viel stärker als 1 Gauß (Erdmagnetfeld etwa 0,5 Gauß), und daher meßtechnisch sehr schwer zu erfassen. Mit Abklingen der lokalen Magnetfeldtätigkeit zum Minimum hin werden jedoch seine Auswirkungen auf die Korona deutlicher sichtbar.

Die Sonne krümmt den Weg des Lichts

Während das recht schwache Magnetfeld der Sonne doch ziemlich deutlich die räumliche Anordnung des hauchdünnen Koronamaterials beeinflusst, läßt sich eine andere physikalische Erscheinung, die mit dem enormen solaren Gravitationsfeld zusammenhängt, nur sehr schwer erfassen.

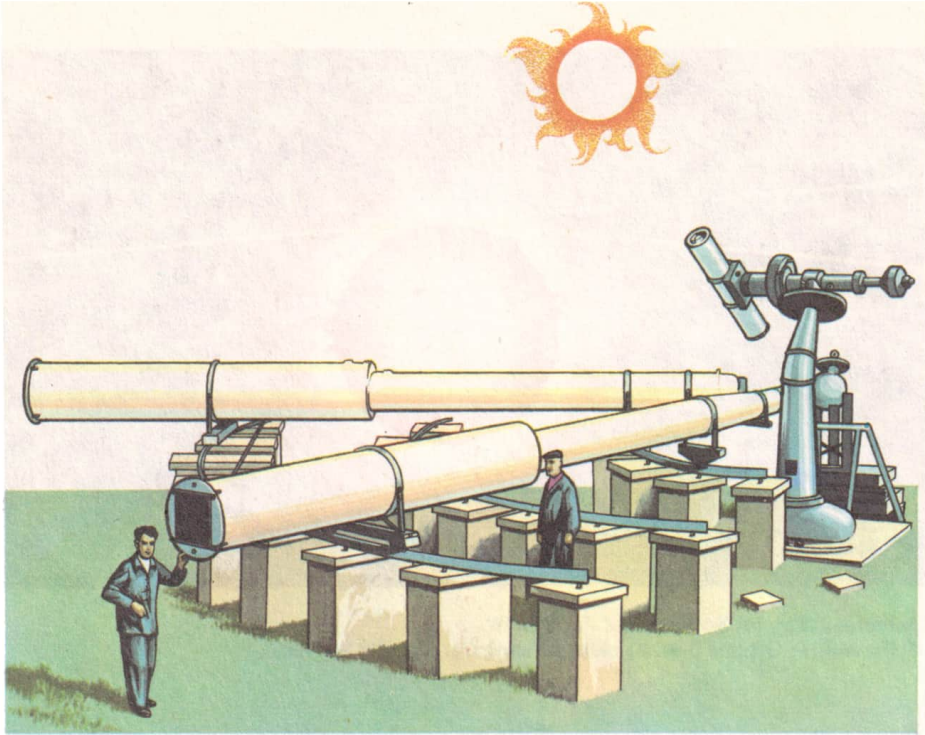
Nach der von *Albert Einstein* (1879–1955) begründeten Relativitätstheorie übt eine jede Masse auch auf elektromagnetische Wellenstrahlung einen Gravitationseinfluß aus. Das heißt, wenn ein aus Photonen bestehen-



Lichtablenkung im Schwerefeld der Sonne
Gelb: wahrer Ort des Sterns; blau: scheinbarer Ort des Sterns

der Lichtstrahl dicht an der Oberfläche einer größeren Masse vorbeigeht, wird er aus seiner Richtung abgelenkt, und zwar zum Massenzentrum hin. Ein merklicher Effekt tritt jedoch erst bei sehr starken Schwerefeldern auf, so daß man diese Erscheinung unter irdischen Bedingungen nicht beobachten kann.

Von den Sonnenphysikern wurde schon bald nach der Aufstellung der allgemeinen Relativitätstheorie (1915) vorgeschlagen, bei Sonnenfinsternissen die in der Umgebung der total verfinsterten Sonne sichtbar werden hellsten Sterne mit langbrennweitigen Instrumenten zu fotografieren und die auf diesen Aufnahmen vermessenen Sternörter mit den Normalpositionen der betreffenden Sterne zu vergleichen. Der Einstein-Effekt müßte sich dann an entsprechenden Positionsdivergenzen erkennen lassen. Seit 1919 bildeten Spezialaufnahmen von der näheren Umgebung der verfinsterten Sonne einen wichtigen Programmpunkt vieler Finsternisexpeditionen. Allerdings ist die von der Theorie her zu erwartende Verschiebung der Sternörter wegen ihrer Geringfügigkeit meßtechnisch nur sehr schwer zu erfassen. Selbst das enorme Gravitationsfeld der Sonne bewirkt für Lichtstrahlen, die ihren Rand fast streifen, lediglich eine Ablenkung



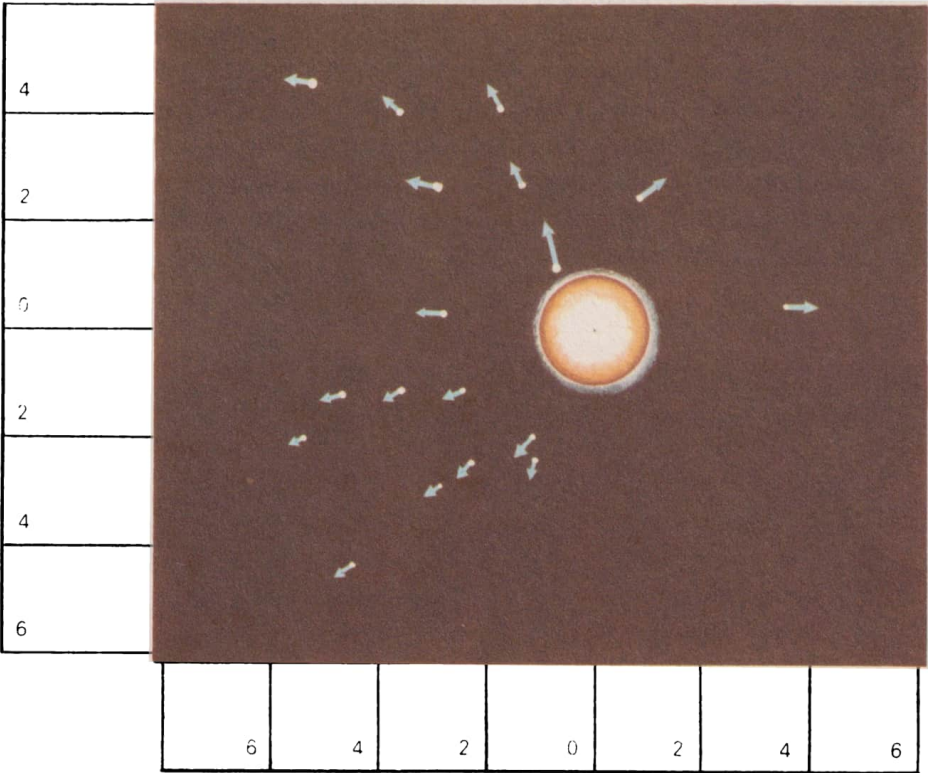
Doppelhorizontalkamera des Astrophysikalischen Observatoriums Potsdam, mit der 1929 auf Sumatra anlässlich einer Sonnenfinsternis Aufnahmen zum Bestimmen der Lichtablenkung im Schwerefeld der Sonne gemacht wurden

von $1,75''$. Das entspricht etwa dem zweihundertsten Teil des scheinbaren Sonnendurchmessers. Die erheblichen verfahrens- und meßtechnischen Schwierigkeiten verhinderten lange Zeit eine verbindliche Bestätigung des vorhergesagten Effekts der *Lichtablenkung im Schwerefeld der Sonne*. Daß eine auf die Sonne orientierte Änderung der Sternpositionen stattfindet, war zwar deutlich genug nachzuweisen, aber man erhielt mit den fotografisch-optischen Verfahren stets einen entschieden zu hohen Wert, im Mittel etwa $2,0''$, für die streifenden Lichtstrahlen. In jüngster Zeit gelang es schließlich doch, den Einstein-Effekt an der Sonne auch seiner Größe nach zu belegen. Aus Beobachtungen an radiofrequenter Strahlung, für die ja das Ablenkungsprinzip ebenfalls gelten muß, wurde 1969 ein Zahlenwert von $1,77''$ für den Sonnenrand abgeleitet.

Wir haben uns einen Überblick über die vorwiegend mit herkömmlichen Mitteln und Methoden auf der Sonne zu beobachtenden Erscheinungen und ihre physikalische Deutung verschafft. Die wichtigsten der dabei gewonnenen Erkenntnisse wollen wir zur Ergänzung unseres „Steckbriefs“ der Sonne zusammenfassen.

Die Sonne ist eine selbstleuchtende Gaskugel von etwa 1,39 Millionen km Durchmesser und mit einer Masse von rund $2 \cdot 10^{27}$ t, ihre mittlere Dichte beträgt $1,41 \text{ g/cm}^3$. Sie hat eine differentielle Rotation, die am Äquator ungefähr 25 Tage, am Pol etwa 33 Tage dauert. Ihre Oberfläche besitzt eine Temperatur von rund 6000°K und strahlt in der Sekunde eine Energie von etwa $3,90 \cdot 10^{23} \text{ kW}$ aus. Davon erhält die Erde einen

Verschiebung der Sternörter in der Umgebung der Sonne nach den Potsdamer Expeditionsaufnahmen von 1929; Skaleneinheit = Sonnenradius



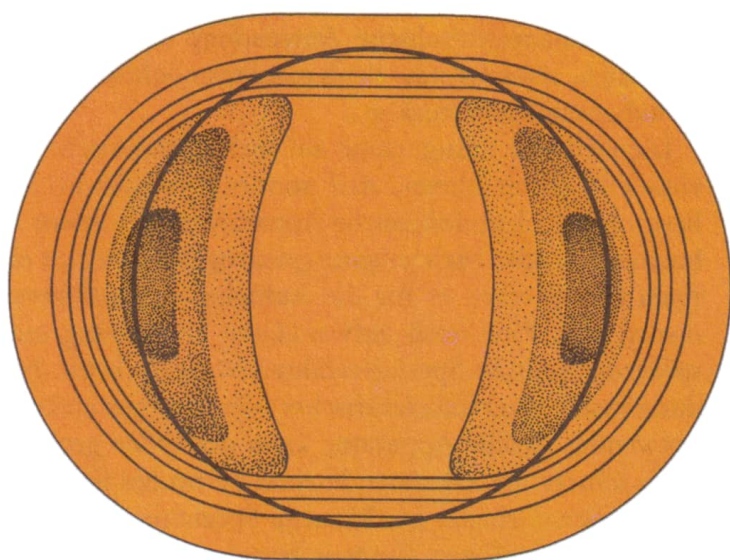
Energiestrom von $1,94 \text{ cal min}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ (Solarkonstante) oder $1,395 \text{ kW/m}^2$. In der sichtbaren Oberflächenzone, der Photosphäre, sinkt die Dichte von ungefähr 10^{-2} auf 10^{-8} g/cm^3 .

Die aus dem Sonneninnern kommenden magnetischen Störungen führen in der Photosphäre zur Bildung der Sonnenflecke, deren Temperatur um etwa 1200 bis 1500 grd niedriger liegt als die der Umgebung. Sonnenflecke zählen zu den Erscheinungen der Sonnenaktivität, die in einem 11jährigen beziehungsweise 22jährigen Rhythmus verläuft.

Ein solarer Aktivitätsherd ist in der Regel zugleich durch das Auftreten heller und entsprechend heißer Gaswolken (Fackeln) gekennzeichnet. Aber auch kühlere Gasmassen, die meist aus der Sonnenoberfläche emporgeschleudert werden (Protuberanzen), gehören zum Bild der Sonnenaktivität.

In der Chromosphäre, deren chemische Zusammensetzung dem Fraunhofer-Sonnenspektrum das Gepräge gibt, sinkt die Dichte des Sonnengases weiter auf etwa 10^{-12} g/cm^3 ab, die Temperatur steigt jedoch auf ungefähr 8000 bis 10 000 °K. Die thermische Anregung erfolgt hier, ebenso wie in der nach außen anschließenden Korona (Dichte etwa 10^{-16} g/cm^3), durch Überschallstoßwellen. In der Korona werden dabei Temperaturen zwischen 1 und 2 Millionen Grad K erreicht. Auch die Korona, deren äußere Partien schon zur staubförmigen Zodiakallichtmaterie gehören, zeigt in ihrer jeweiligen Form eine deutliche Beziehung zu den anderen Erscheinungen der Sonnenaktivität.

Aus der Werkstatt des Sonnenphysikers



Sonnentürme der Wissenschaft

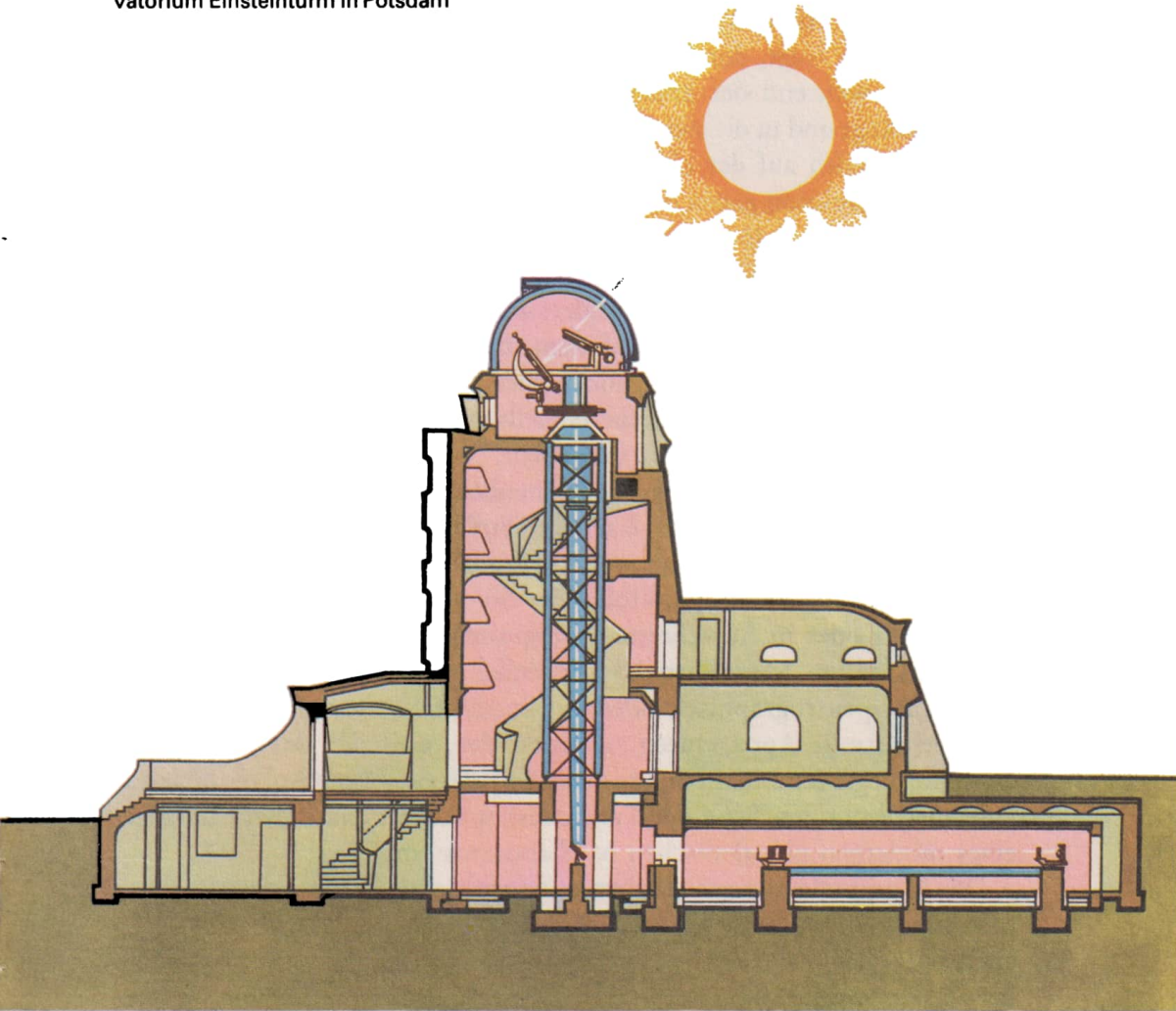
Von einigen beobachtungstechnischen Hilfsmitteln der Sonnenforschung haben wir bereits gesprochen. Es ging dabei allerdings vornehmlich um, wenn wir so sagen wollen, herkömmliche astronomische Instrumente. Das wichtigste unter ihnen ist der normale Refraktor kleiner oder mittlerer Brennweite, der mittels einer parallaktischen Aufstellung der täglichen Sonnenbewegung nachgeführt werden kann. Er läßt sich durch einen Projektionsschirm oder lichtdämpfende Zusatzeinrichtungen (Filter, Dämpfgläser, Sonnenprismen und andere) für die Sonnenbeobachtung ergänzen. Auch auf die fotografische Methode der Aufzeichnung des Sonnenbildes haben wir schon hingewiesen. Die eingangs beschriebene Verwendung von horizontal liegenden Fernrohrkameras für Finsternisfotografien stellt eine Variante dieses Prinzips dar. Vor allem aber sind wir auf die Grundlagen der spektralanalytischen Verfahren und ihre allgemeine sonnenphysikalische Anwendung eingegangen sowie auf daraus zusätzlich erwachsende Beobachtungsmöglichkeiten, wie im Falle des Protuberanzenspektroskops.

Die vielfache Bezugnahme auf spektrographische Untersuchungen ließ vielleicht schon ahnen, daß sonnenphysikalische Spezialaufgaben am Fernrohr recht umfangreiche Apparaturen erfordern können. Bereits ein hochauflösender Mehrprismenspektrograph wird zu einem ziemlich sperrigen Gerät, wenn er für die Aufnahme ausgedehnter Spektralbereiche dienen soll. Eine noch aufwendigere Einrichtung machen verschiedene spektrographische Spezialverfahren sowie die heute meist übliche Anwendung zusätzlicher fotoelektrischer oder sonstiger elektronischer Hilfsmittel notwendig. Solche Apparatur kann dermaßen groß werden, daß sie nur noch schwer am Okularende eines Fernrohrs üblicher Konstruktion an- oder unterzubringen ist. Manche Spezialuntersuchungen erfordern eine aus vielen ortsfesten Geräten bestehende Meßanlage, so daß sich ein

normal gebauter Refraktor als sonnenabbildendes System überhaupt nicht mehr verwenden läßt.

Da aber gerade die spektrographischen und die meist sehr komplizierten modernen meßtechnischen Verfahren die wichtigsten Grundlagen der Sonnenforschung bilden, entwickelte man einen besonderen Typ der Sonnenfernrohre – die *Turmteleskope*. Ihr Prinzip ist höchst einfach. Es

Schnitt durch das Sonnenobservatorium Eisteinturm in Potsdam



handelt sich um unbeweglich senkrecht stehende Fernrohre. Um ein möglichst großes und damit detailreiches Abbild der Sonne zu erhalten, verwendet man Objektive mit besonders langer Brennweite. So gibt es Teleskope, die eine Brennweite von über 40 m haben und dementsprechend im Brennpunkt Sonnenbilder von mehr als 40 cm Durchmesser liefern. Das Objektiv eines solchen Instruments ist in einem turmartigen Gebäude oder Gerüst untergebracht, dessen Höhe etwa der Brennweite des Objektivs entspricht.

Das Licht der Sonne wird mit Hilfe zweier beweglicher *Zölostatspiegel* (lat. caelum = Himmel) senkrecht in das Objektiv gelenkt. Der eine dieser ebenen Spiegel folgt, durch ein Uhrwerk getrieben, der täglichen Sonnenbewegung, während der andere das von dem ersten Spiegel reflektierte Licht auffängt und in die stete Richtung nach unten umlenkt. Objektiv und Zölostat werden auf der oberen Plattform des Sonnenturms durch eine Kuppelkonstruktion gegen die Witterung geschützt. Der hohe Aufbau der Optik eines solchen Instruments hat den großen Vorteil, daß der bildverschlechternde Einfluß der Luftunruhe, der sich besonders in Bodennähe bemerkbar macht, erheblich gemindert wird. Um die eigentliche Fernrohrkonstruktion – das Gerüst, auf dem die Plattform mit Zölostat und Objektiv montiert ist – auch noch gegen Erschütterungen durch Wind oder andere Bewegungen zu sichern, stellt man sie im Innern einer Turmverkleidung auf ein separates Fundament.

Das vom Objektiv gesammelte Sonnenlicht fällt frei oder durch einen ummantelten Schacht in einen Raum am Fuße der Turm- oder Gerüstkonstruktion. Dort entsteht dann, sozusagen auf dem „Seziertisch“ des Sonnenphysikers, das Brennpunktbild der Sonne. Man kann hier also die Sonne ganz oder in Ausschnitten fotografieren und dabei auch spezielle Filter einschalten. Meist wird das Sonnenlicht jedoch tatsächlich „seziert“, und zwar spektrographisch oder mit anderen Meßverfahren. Nun sind auch sehr große Apparaturen zu verwenden, weil sich das Licht durch weitere Spiegelkombinationen bequem zu jeder ortsfesten Anlage hinleiten läßt. Der Raum am Fuße des Turmteleskops erhält damit den Charakter eines modernen physikalischen Meßlaboratoriums.

Die Hauptanlage eines solchen sonnenphysikalischen Laboratoriums bildet stets ein separater Spektrographenraum. In ihm sind die empfindlichen optischen Teile der Spektrographenkonstruktionen mit meist recht langer Brennweite stabil aufgestellt. Er ist deshalb von den übrigen Räu-

men des Laboratoriums abgeschlossen und zusätzlich klima- oder temperaturgeregt. Man findet ihn horizontal angeordnet, aber auch als tief in den Boden reichenden Vertikalschacht. Die optischen Einrichtungen können während der Untersuchungen vom Arbeitsraum aus verstellt werden. In der Trennwand zwischen Laboratorium und Spektrographenraum befinden sich der Spektrographenspalt sowie die Halterungen und Anschlüsse für die Geräte zum Aufzeichnen des Spektrums, das in der Wandebene scharf abgebildet wird.

Anfangs verwendete man zum Zerlegen des Lichts meist Prismen. Sie haben für größere Anlagen einige empfindliche Nachteile – unter anderem nimmt die Absorption bei wachsender Größe und Dicke der Prismen stark zu –, so daß man mehr und mehr zu Spektrographen überging, in denen *Beugungsgitter* als lichtzerlegende Einrichtungen dienen. Ein derartiges Gitter besteht im einfachsten Fall aus einer Glasplatte oder einem Metallspiegel, in die mit einer äußerst feinen Diamantspitze eine sehr große Anzahl paralleler Rillen gezogen sind. In der Regel kommt man dabei auf etwa 600 Linien pro Millimeter und auf Gitterflächen bis zu 25 cm Seitenlänge. Die parallelen Furchen im Spiegelmateriale haben die besondere Eigenschaft, auffallendes Licht je nach seiner Wellenlänge mit verschiedenen Winkeln zu reflektieren, also eine spektrale Zerlegung zu bewirken.

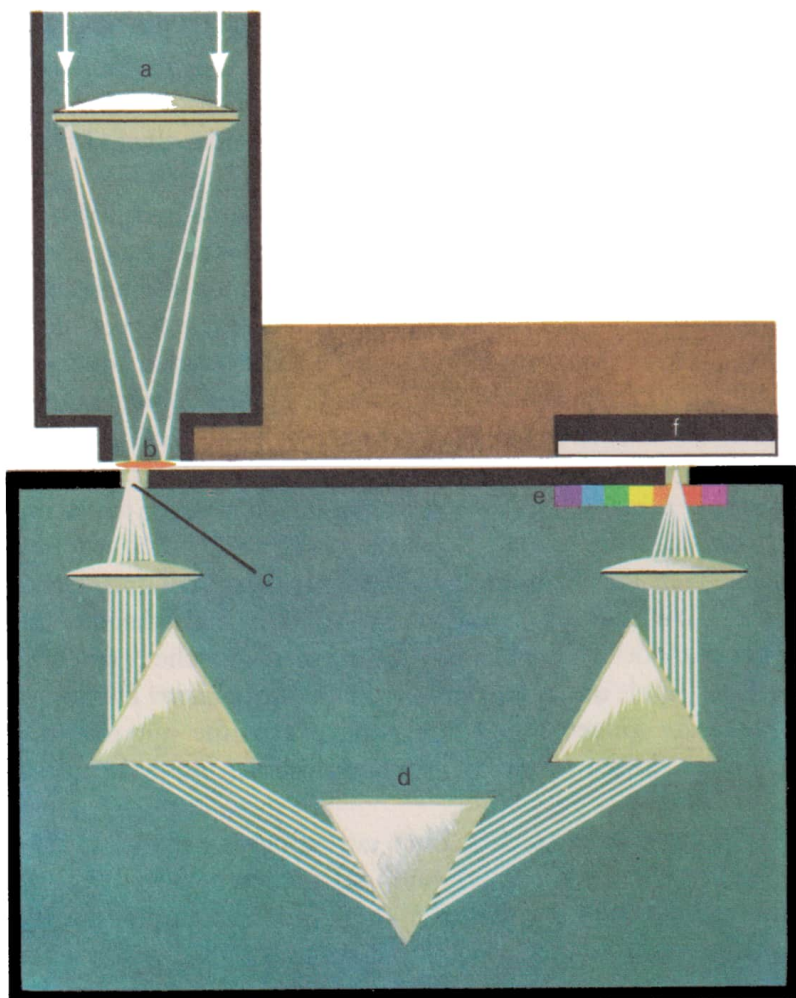
Auf die zahlreichen technischen Details der modernen Sonnenspektrographie können wir hier nicht eingehen. Aber wir wollen ein spezielles spektrographisches Verfahren kennenlernen, mit dessen Hilfe sich jederzeit regelrechte optische Schnitte durch die Sonnenatmosphäre legen lassen und das viel zur Abrundung des Bildes von den Vorgängen in der Sonnenatmosphäre, einschließlich ihrer Zusammenhänge mit den Aktivitätserscheinungen, beitrug. Die Idee dazu hatten um 1890 fast gleichzeitig und unabhängig voneinander der schon erwähnte amerikanische Sonnenforscher George Ellery Hale und sein französischer Kollege *Henri Deslandres* (1853–1948). Beide gingen von Überlegungen aus, die mit dem Zustandekommen der Fraunhoferschen Absorptionslinien im Sonnenspektrum verbunden sind.

Der Dunkelkontrast einer solchen Linie gegenüber dem benachbarten Kontinuum beruht, wie wir wissen, darauf, daß in dieser Wellenlänge das Licht der Photosphäre von den Atomen eines Elements in den darüber liegenden Schichten der Sonnenatmosphäre gestreut und absorbiert und nur zum Teil durch deren weniger intensive Eigenstrahlung ersetzt wird.



Funktionsschema eines Spektroheliographen

a = Fernrohrobjektiv; b = Sonnenbild;
 c = Spektrographenspalt; d = Prismensatz;
 e = Sonnenspektrum; f = Fotoschicht hinter Monochromatorspalt



Eine derartige Linie ist demnach nicht völlig lichtlos, sondern nur weniger hell als das Kontinuum. Wenn man nun das gesamte übrige Spektrum abblendet oder wegfiltert, so daß lediglich das schmale Gebiet der betreffenden Spektrallinie übrigbleibt, erhält man folglich allein das Licht aus der Sonnenatmosphäre, und zwar ausschließlich die monochromatische (einfarbige; griech. *mono*... = ein... und *chromos* = Farbe) Strahlung der Atome des jeweiligen Elements.

Wie Hale und Deslandres weiter überlegten, wäre es außerordentlich aufschlußreich, sozusagen durch diese schmale Linie hindurch die ganze Sonnenscheibe sehen zu können. Diese müßte dann nämlich überall dort am hellsten sein, wo das zur Spektrallinie gehörende Element konzentriert auftritt. Auf diese Weise ließe sich also ein Bild von der räumlichen Verteilung des Elements in der Sonnenatmosphäre erhalten. Eine Spektrallinie ist jedoch im Prinzip immer die Abbildung des engen Spektrographenspalts, der seinerseits lediglich einen entsprechend schmalen Streifen der Sonnenoberfläche zur Analyse herauschneidet. Die technische Idee der beiden Sonnenphysiker bestand nun darin, mit dem Spektrographenspalt durch eine langsame Seitenverschiebung die ganze Sonnenoberfläche abzutasten und synchron zu dieser Bewegung eine Fotoplatte hinter der Spektrallinie vorbeizuführen, die durch einen zweiten Spalt aus dem Spektrum ausgeblendet wurde. Das Gerät, mit dem man das einfarbige Licht aussondert, heißt *Monochromator*. Auf diese Weise erhält man schließlich ein vollständiges Bild von der Sonne im monochromatischen Licht der Spektrallinie des betreffenden Elements. Dieses Verfahren trägt den Namen *Spektroheliographie*, und die so gewonnenen Sonnenbilder werden *Spektroheliogramme* genannt.

Besondere Möglichkeiten aber ergeben sich daraus, daß auch eine Spektrallinie stets einen speziellen Aufbau zeigt. Sie ist nämlich von einem Linienrand zum andern nicht gleichförmig dunkel, sondern die Dunkelheit steigt vom Rand zur Mitte hin an. Die Ursachen dafür sind recht kompliziert, und sie zu erläutern würde sehr spezielle physikalische Ausführungen erfordern. Wichtig ist die Feststellung, daß die zur Linienmitte hin zunehmende Lichtschwächung von jenen Atomen des Elements kommt, welche am höchsten über der Photosphäre liegen, und daß die Höhe der absorbierenden Schicht zum Linienrand hin abnimmt. Mit anderen Worten, wenn man den vor der Fotoplatte liegenden Austrittsspalt des Monochromators weiter verengt, so daß die Linie selbst noch einmal in Ausschnitten

erfaßt werden kann, erhält man Spektroheliogramme mit verschiedenen Tiefenstufen, also optische Schnitte durch die Chromosphäre.

Spektroheliogramme werden vorwiegend im Lichte der besonders intensiven K-Linie des Kalziums und der $H\alpha$ -Linie des Wasserstoffs aufgenommen. Man spricht daher auch von K- und $H\alpha$ -Spektroheliogrammen. Mit $H\alpha$ bezeichnet man die erste Linie der nach dem Schweizer Mathematiker *Johann Jakob Balmer* (1825 – 1898) benannten Linienserie (Balmer-Serie) im sichtbaren Bereich des Wasserstoffspektrums.

Die K-Linie des Kalziums eignet sich wegen ihrer Feinstruktur besonders gut für die Tiefenschnitte. Die K_1 -Spektroheliogramme werden an den Rändern der Linie gewonnen und entsprechen folglich den tiefsten chromosphärischen Regionen. Sie zeigen im allgemeinen noch eine sehr weitgehende Ähnlichkeit mit den Photosphärebildern, allerdings treten auf der ganzen Sonnenscheibe schon verstärkt helle wolkenförmige Gebiete um Aktivitätsherde in Erscheinung. Es ist leicht nachzuweisen, daß diese Gebiete den im Gesamtlicht am Sonnenrand erkennbaren Fackeln entsprechen. Mit dem spektroheliographischen Verfahren lassen sich also Sonnenfackeln auch in der Mitte der Sonnenscheibe sichtbar machen. Auf den weiter zur Linienmitte hin gewonnenen K_2 - und den schließlich direkt in der Linienmitte erhaltenen K_3 -Spektroheliogrammen erscheinen die Kalziumgebiete zunehmend heller und ausgedehnter. Zugleich treten kleinere helle Elemente immer häufiger auch außerhalb der Aktivitätsherde auf, bis sie endlich als dichtes Netz über die ganze Sonnenscheibe verteilt sind. Wegen ihres flockenartigen Aussehens werden sie als *Flocculi* bezeichnet. Die Feinstruktur der Kalzium-Flocculi steht offenbar im engen Zusammenhang mit der photosphärischen Granulation.

Die Spektroheliogramme im Lichte der $H\alpha$ -Wasserstofflinie sind ebenfalls aufschlußreich. Sie zeigen einen ähnlichen Anblick der Sonnenoberfläche wie die Kalziumbilder, so daß man auch analog von Wasserstoff-Flocculi spricht. Darüber hinaus lassen beide Flocculi-Arten erkennen, daß Kalzium- und Wasserstoffwolken etwa die gleiche Grobstruktur haben. Das Besondere an den $H\alpha$ -Spektroheliogrammen ist aber die Feinstruktur in der Umgebung von Fleckengruppen. Dort fällt nämlich eine mehr oder weniger ausgeprägte wirbelförmige Anordnung der Wasserstoffwolken auf. Die betreffenden Bilder erinnern sowohl an sichtbar gemachte Dipolmagnetfelder als auch an weiträumige Strömungswirbel. Beides entspricht ja den tatsächlichen Vorgängen in diesen Gebieten. Auf beiden

Arten von Spektrroheliogrammen sind außerdem fast immer lange schmale, meist raupenförmig gewundene dunkle *Filamente* (lat. *filum* = Faden) zu sehen. Dabei handelt es sich um die schon beschriebenen ruhenden Protuberanzen, die sich in diesem Fall auf der Sonnenscheibe abzeichnen, deren Helligkeit sie sonst im Gesamtlicht nicht sichtbar werden läßt. Es ist außerordentlich interessant, in einer Aufnahmeserie das von der Rotationsbewegung bewirkte Vorrücken eines Filaments zum Sonnenrand hin zu verfolgen, wo sich das Gebilde dann im $H\alpha$ -Spektrroheliogramm oder im Protuberanzspektroskop als helle Protuberanz vor dem dunklen Himmelshintergrund abhebt.

Eine spezielle Erscheinung der Sonnenaktivität, die überhaupt erst durch das spektrroheliographische Verfahren richtig erkannt und in ihren Einzelheiten geklärt werden konnte, sind die *chromosphärischen Eruptionen*, oft einfach als *Sonneneruptionen* bezeichnet. Sie machen sich besonders deutlich im $H\alpha$ -Spektrroheliogramm als plötzlich auftretende, lokale Helligkeitsausbrüche bemerkbar. Ihre mittlere Lebensdauer liegt etwa zwischen 10 und 90 Minuten; der Helligkeitsanstieg erfolgt ziemlich schnell, während das Abklingen langsamer vor sich geht. Sonneneruptionen treten ausschließlich im Bereich von Aktivitätsherden auf, also in Fackelgebieten und in Fleckengruppen. Bei diesen erscheinen sie meist zwischen den beiden Hauptflecken, oft zu mehreren nacheinander. Die Dauer eines solchen Ausbruchs nimmt mit der Ausdehnung der davon betroffenen Fläche zu. Während die meisten Eruptionen recht klein bleiben, können die größten immerhin ein Ausmaß bis zu etwa einem Tausendstel der sichtbaren Sonnenoberfläche erreichen. Ihre Häufigkeit richtet sich nach der Sonnenfleckenperiode, wobei sich im Maximum der Fleckenaktivität insgesamt etwa 5 bis 10 solcher Ereignisse pro Tag auf der sichtbaren Sonnenhälfte beobachten lassen. Gelegentlich vermag eine Sonneneruption so intensiv zu werden, daß sie selbst unter normalen Beobachtungsbedingungen auf der hellen Sonnenscheibe andeutungsweise zu sehen ist.

Über den Entstehungsmechanismus der chromosphärischen Eruptionen, die bei besonders starken Ausbrüchen auch vom Auswurf chromosphärischer Materie in Form eruptiver Protuberanzen begleitet sein können, war bisher noch keine völlige Klarheit zu gewinnen. In der Hauptsache findet hier ein lokaler Ausbruch vornehmlich kurzweiliger elektromagnetischer Strahlung statt. Die Strahlungsemission im Ultraviolett und im Gebiet der Röntgenstrahlung wird dabei so intensiv, daß sich die Gesamtstrahlung

der Sonne in diesen Wellenlängenbereichen merklich erhöht. Die vermehrten UV- und Röntgenstrahlungsstöße erreichen auch die Erde und üben dort erhebliche Einflüsse auf die Hochatmosphäre aus. Daneben ist in den Sonneneruptionen der Ausstoß von teilweise sehr energiereicher Teilchenstrahlung (Elektronen, Protonen, schwere Ionen) nachzuweisen, die sich ebenfalls im Bereich der Erde auswirkt.

Das Beobachten und Untersuchen solarer Eruptionen hat also zunächst für die Sonnenphysik selbst große Bedeutung, da sie zweifellos einen Schlüssel zum Verständnis des gesamten Aktivitätsmechanismus darstellen. Vor allem aber ist es für die Erforschung der Einflüsse der Sonnenaktivität auf die Erde wichtig, die man heute allgemein unter der Bezeichnung *solar-terrestrische Beziehungen* zusammenfaßt. Aus diesen Gründen wird die Sonne seit längerem laufend spektroheliographisch überwacht.

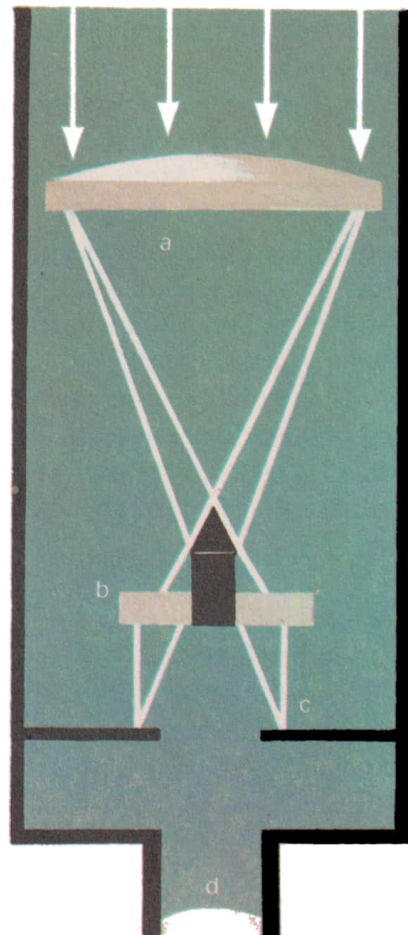
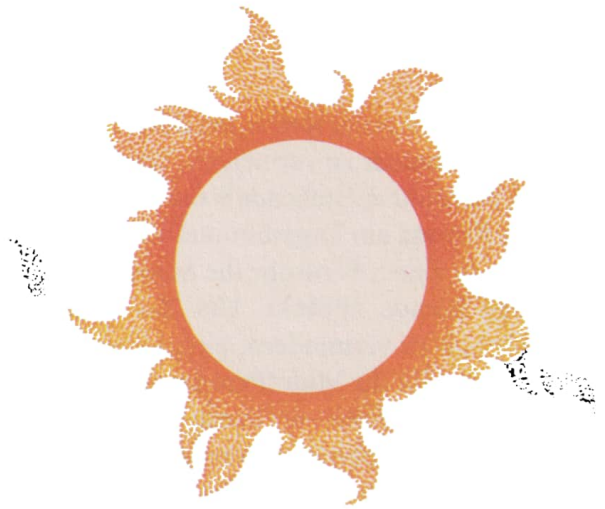
In der letzten Zeit hat man die etwas aufwendige und komplizierte spektroheliographische Technik mehr und mehr durch automatische Überwachungsanlagen ersetzt, in denen ein spezielles Filter genügt, um die gewünschte monochromatische Abbildung der Sonne zu erhalten. Ein derartiges Filter läßt also nur noch den ganz engen Wellenlängenbereich der ausgewählten Spektrallinie hindurch. Da für die monochromatische Sonnenüberwachung die $H\alpha$ -Linie benutzt wird, spricht man von einem $H\alpha$ -Filter. Gelegentlich finden wir auch die Bezeichnung Lyot-Filter, nach dem französischen Sonnenforscher *Bernard-Ferdinand Lyot* (1897–1952), der sich um die Einführung dieses Hilfsmittels besonders verdient gemacht hat.

Von Lyot stammt noch ein anderes spezielles Beobachtungsverfahren, das für die Sonnenforschung von nicht weniger großem Wert ist. Mit dem von ihm 1930 erfundenen *Koronographen* gelang die Lösung eines Problems, das für die Sonnenforschung schon lange brennend aktuell war: die künstliche Nachahmung von Sonnenfinsternissen in einem Fernrohr. Die Lyotsche Methode ermöglicht es nicht nur, die Protuberanzen jederzeit rings um die Sonne zu verfolgen, sondern auch die innere Korona zu sehen oder ihre Struktur fotometrisch zu messen, ebenso die Helligkeit der Koronalinien bis zu einem gewissen Abstand vom Sonnenrand. Die fotoelektrische Messung stellt überhaupt eines der wichtigsten modernen Registrierverfahren in der Sonnen- und Astrophysik dar.

Der Lyotsche Koronograph ist ein Fernrohr, dessen Objektiv aus einer Einzellinse besteht, die möglichst blasenfrei sein und völlig staubfrei gehalten

**Aufbauschema eines Koronogra-
phen**

a = Fernrohrobjektiv; b = Hilfs-
linse mit Kegelblende; c = Iris-
blende; d = Okular



ten werden muß, weil es bei diesem Verfahren darauf ankommt, Streulicht im Instrument zu vermeiden. Das in der hellen Tagesatmosphäre und das im Fernrohr entstehende Streulicht ist es nämlich, was sonst die lichtschwache Korona am Tageshimmel selbst dann nicht sichtbar werden läßt, wenn man in einem Fernrohr die Sonnenscheibe durch eine eingebaute kreisförmige Blende abdeckt. Um das atmosphärische Streulicht so weit wie möglich zu vermindern, ging Lyot mit seinem Gerät zum Observatorium auf den Pic du Midi (Pyrenäen) in 2860 m Höhe, und das instrumentelle Streulicht senkte er durch die spezielle Konstruktion. Das vom Koronographenobjektiv erzeugte Sonnenbild fällt auf eine zentrale Kegelblende, die gerade so groß gewählt wird, daß sie genau die Sonnenscheibe abdecken kann. Diese Blende übernimmt folglich die Rolle des verfinsternden Mondes. Die in der Randumgebung der Sonne sichtbaren Erscheinungen (Protuberanzen, Korona) werden schließlich durch weitere optische Einrichtungen in der Aufnahmeebene des Instruments abgebildet.

Der Einsatz des Koronographen verlangt somit grundsätzlich einen möglichst hoch gelegenen Aufstellungsort. Daher finden wir Instrumente dieser Art, heute schon recht zahlreich, ausschließlich an Höhenobservatorien, wie beispielsweise der astronomischen Institute von Alma-Ata (1450 m; UdSSR), Arosa (2050 m; Schweiz), Wendelstein (1840 m; BRD), Climax (3500 m; USA) und anderer. Zu den eindrucksvollsten astronomischen Dokumenten, auch für den Nichtfachmann, zählen die mit Hilfe der Koronographen gewonnenen Protuberanzenfilme. Sie zeigen die in Wirklichkeit Stunden andauernden Vorgänge in Protuberanzen durch Anwendung der Zeitraffertechnik auf wenige Minuten zusammengedrängt. Man erhält so einen anschaulichen, ja packenden Eindruck von den imposanten Strömungen in diesen Gebilden. Der Wissenschaft liefern derartige Filme umfangreiches Material über die typischen Erscheinungen in der Bewegung der Protuberanzenmaterie.

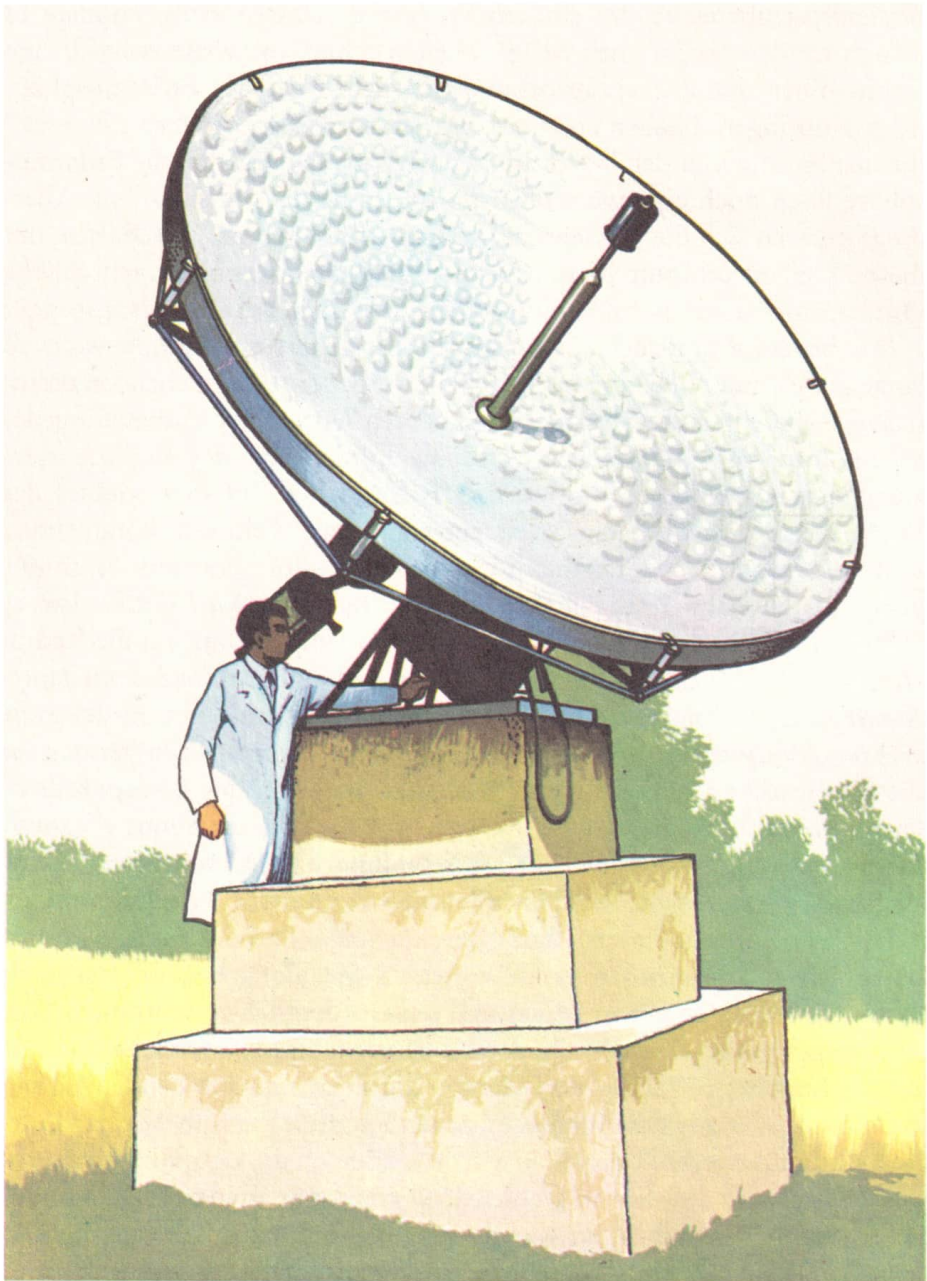
Radiosender Helios

Die bisher geschilderten Verfahrenstechniken dienten ausschließlich einer Untersuchung der Sonne im Bereich des sichtbaren Lichts oder, genauer, des optischen Fensters der Erdatmosphäre. Aber den Sonnenphysikern war

klar, daß man, um den Gesamtmechanismus der Erscheinungen und Vorgänge auf und in der Sonne zu verstehen, unbedingt auch andere Wellenlängenbereiche der solaren Strahlung erfassen muß. Solange es jedoch an den technischen Möglichkeiten fehlte, die wissenschaftlichen Geräte über die stärker absorbierenden Schichten der Erdatmosphäre hinauszubringen, blieben eben nur die beiden naturgegebenen „Fenster“ für den Ausblick in den Weltraum. Wir wissen bereits, daß die Erdatmosphäre auch noch ein zweites Fenster im Radiowellenbereich hat. Allerdings mußten sich die Wissenschaftler erst „Radioaugen“ beschaffen, um diesen Wellenkanal zum Kosmos nutzen zu können; denn der menschliche Organismus besitzt ja für radiofrequente Strahlung kein Empfangsorgan.

Das bedeutet natürlich, daß auch die Existenz eines Radiofensters so lange unbekannt blieb, wie man noch nicht über die entsprechenden radio-technischen Hilfsmittel verfügte. Mit anderen Worten, die Entwicklung der astronomischen „Radioaugen“ und die Entdeckung des Radiofensters standen in enger Beziehung zu den Fortschritten auf dem Gebiet der Funktechnik. Der erste Nachweis einer aus dem Weltraum kommenden und die Erdatmosphäre durchdringenden radiofrequenten Strahlung geht auf das Jahr 1932 zurück, als der Ingenieur *Karl Guthe Jansky* (1905–1950) in den USA bei anderweitigen Untersuchungen die Radiostrahlung der Milchstraße entdeckte. Zehn Jahre später fand dann *James Stanley Hey* in England die solare Radiofrequenzstrahlung. Er arbeitete während des zweiten Weltkriegs an der Entwicklung von Radargeräten für die Flugabwehr und empfing im Wellenbereich von 2 bis 4 m sporadisch eine Störstrahlung, als deren Urheberin er schließlich die Sonne erkannte. Das unvermittelte Auftreten dieser Strahlung hatten chromosphärische Eruptionen verursacht, was Hey allerdings noch nicht wissen konnte.

Die systematische Untersuchung der von der Sonne oder aus dem kosmischen Raum kommenden radiofrequenten Strahlung begann erst nach 1945. Sie führte zu einem neuen und außerordentlich bedeutsamen Forschungsgebiet der Astrophysik, der *Radioastronomie*. Zahlreiche spezielle funktechnische Verfahren und Geräte, die in den nachfolgenden Jahren entwickelt oder aus dem funktechnischen Flugführungszubehör der Luft- und Raumfahrttechnik entlehnt wurden, bildeten die Grundlage der großen Fortschritte auf diesem Gebiet. Und wenn wir zuvor von „Radioaugen“ gesprochen haben, so war dieser Ausdruck natürlich nur bildhaft gemeint; denn „sehen“ kann man Radiostrahlung ja bekanntlich nur,



wenn man die empfangenen Impulse als Kurven auf dem Schirm eines Oszillographen (Schwingungsschreibers) oder eines anderen Registriergeräts sichtbar macht.

Wesentlich ist, daß die kosmische oder solare Radiostrahlung keinerlei Ähnlichkeit mit der „geordneten“ Ausstrahlung eines irdischen Rundfunksenders besitzt. An Stelle der dort auftretenden, mit Musik oder Sprache modulierten Trägerfrequenz haben wir es hier mit einem Gemisch unzähliger gleichzeitiger Einzelimpulse verschiedenster Frequenzen zu tun. Dieses Gemisch entsteht durch die ungeordnet abgegebenen Einzelimpulse der unter bestimmten Bedingungen als winzige Radiofrequenzsender wirkenden freien Elektronen in der Strahlungsquelle. Wir können folglich ebenso gut umgekehrt sagen, daß sich aus der beobachteten Radiostrahlung auf die besonderen physikalischen Bedingungen der Strahlungsquelle schließen läßt. Im übrigen vermag man dieses kosmische oder solare Impulsgemenge mit einem entsprechend empfindlichen Empfänger auch in einem Lautsprecher hörbar zu machen und erhält dann, gewissermaßen als eine Art „Sphärenklänge“, ein feines Prasselgeräusch, was der ganzen Erscheinung die fachliche Bezeichnung *kosmisches* oder *solares Rauschen* eingetragen hat.

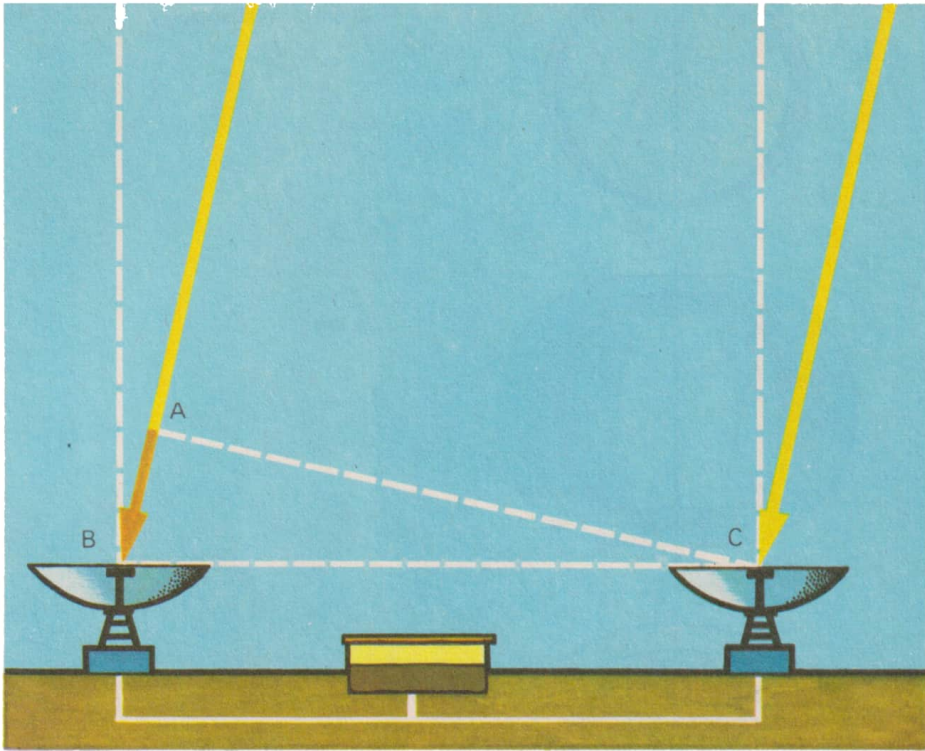
Für die Radioastronomen kommt es nun darauf an, mit Hilfe der funkttechnischen Mittel die Intensität und sonstige Beschaffenheit (zum Beispiel Polarisation) dieser Rauschstrahlung, vor allem aber möglichst genau die Richtung zur Strahlungsquelle zu bestimmen. Dazu dient ihnen ein *Radio-teleskop*, so genannt wegen gewisser funktioneller Ähnlichkeiten mit optischen Geräten. Es besteht aus einer Antenne und einem auf den zu untersuchenden Frequenzbereich abgestimmten Empfänger. Die Eigenschaften der funkttechnischen Empfangsverfahren bedingen aber, daß dieser Bereich jeweils eng begrenzt sein muß. Um die Empfangsintensität zu erhöhen, wird die Antenne meist mit einer hohlspiegelartigen Reflektorfläche ausgerüstet, weshalb das Gerät – entsprechend dem optischen Spiegelteleskop – die Bezeichnung *Radiospiegel* erhalten hat. Nach dem gleichen Prinzip wie bei den optischen Systemen wächst auch das Auflösungsvermögen eines Radioteleskops mit dem Durchmesser der auffangenden Fläche. Da aber die radiofrequenten Wellen viel länger sind als die Lichtquellen, muß ein Radiospiegel schon beträchtlich größer sein, wenn eine brauchbare Auflösung erreicht werden soll. So besitzen heute zahlreiche Radiospiegel Durchmesser bis zu 100 m und darüber; das

größte Gerät dieser Art in Arecibo (Puerto Rico) weist sogar einen Durchmesser von 305 m auf. Der Reflektor des riesigen Teleskops liegt allerdings unbeweglich in eine passende Bodenmulde eingebettet, und die „Blickrichtung“ wird lediglich durch Bewegen des Antennensystems verändert.

Trotz dieser teilweise beträchtlichen Dimensionen bleibt das Auflösungsvermögen eines einzelnen Radiospiegels weit hinter dem der optischen Systeme zurück. Aber auch mit Radioteleskopen kann man eine fast „punktförmige“ Abbildung der Strahlungsquelle erzielen, wenn man das von der Optik her bekannte Interferenzprinzip anwendet. Im einfachsten Fall werden dazu zwei in möglichst großer Entfernung voneinander aufgestellte kleinere Radiospiegel zusammengeschaltet. So erhält man bei der Signalauswertung eine Auflösung, die einem Teleskop entspricht, dessen Durchmesser gleich der Entfernung der beiden Einzelspiegel ist. Durch zeilenweises Abtasten einer flächenhaften Radioquelle kann man schließlich eine rasterartige Abbildung des Objekts auf einem dafür geeigneten Registriergerät gewinnen. Die Sonnenforscher kommen jedoch für zahlreiche wichtige Untersuchungen beziehungsweise Überwachungszwecke mit einzelnen Radiospiegeln bis zu 20 m Durchmesser aus.

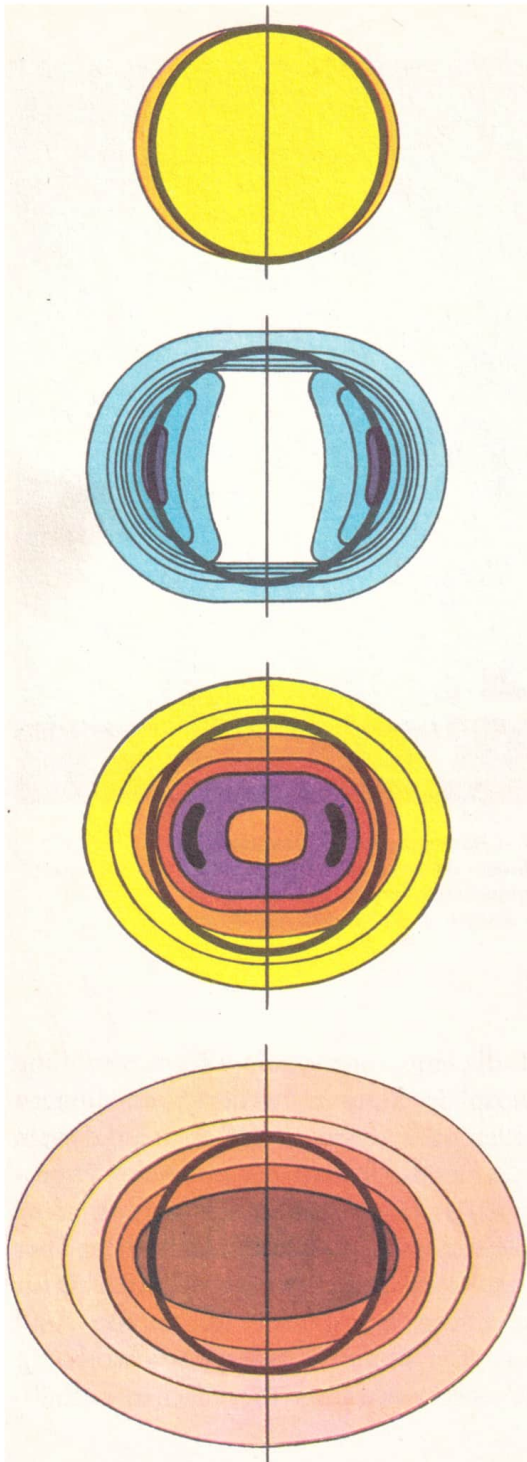
Von den Ergebnissen der radioastronomischen Sonnenforschung können wir hier wiederum nur die wichtigsten nennen. Den Ausgangspunkt bildet die Erscheinung, daß die Sonne eine radiofrequente Grundstrahlung aussendet, die über den gesamten erfaßbaren Wellenlängenbereich (etwa 1 cm bis 20 m) hinweg zu beobachten ist, und daß sich dieser Grundstrahlung zeitweilige Strahlungsanstiege wechselnder Intensität überlagern. Die stets annähernd gleich starke Grundstrahlung wird auch *Strahlung der ruhigen Sonne* genannt, während man die Überlagerungen als *Strahlung der gestörten Sonne* bezeichnet.

Die Radiostrahlung der ruhigen Sonne besitzt viel geringere Stärke als die Strahlung im Bereich des sichtbaren Lichts. Auch die zeitweiligen Intensitätssteigerungen beeinflussen dieses Bild nicht wesentlich. Die Sonne ist also im Radiogebiet recht unscheinbar, ein Verhalten, das sie mit den meisten Fixsternen gemein hat. Die Fähigkeit der Strahlung der ruhigen Sonne, die Sonnenmaterie zu durchdringen, hängt von der Wellenlänge ab. Je kürzer die beobachtete Wellenlänge ist, desto tiefer liegt die solare Schicht, aus der sie stammt. Sofern in den tieferen Schichten längere Radiowellen entstehen, werden sie – nach dem gleichen Prinzip wie die Radiowellen in der Erdionosphäre – reflektiert oder absorbiert.



Funktionsschema des Interferenzprinzips bei Radioteleskopen; das zusätzliche Wegstück AB der Radiowellen zur linken Antenne läßt sich aus den ermittelten Laufzeitunterschieden bestimmen und ergibt bei bekannter Entfernung zwischen B und C den Winkel ABC, also die Richtung zur Strahlungsquelle

Insgesamt zeigt sich dabei, daß die empfangene solare Radiostrahlung überhaupt nur aus der Sonnenatmosphäre kommt. Aus dem Sonneninnern gelangen demnach keine Radiowellen nach außen, so daß auch auf diesem Wege kein direkter Einblick in die Beschaffenheit der unter der Photosphäre liegenden Gebiete zu gewinnen ist. Die größte Einblicktiefe erreichte man mit den Zentimeterwellen. Sie stammen aus einer Schicht dicht über der Photosphäre und bestätigen durch ihre speziellen Eigenschaften die für diese Region auf andere Weise ermittelten Temperaturen von rund 6000°K . Man kann nämlich aus der Intensität einer Radiostrahlung unmittelbar auf die bei ihrem Entstehen wirksamen thermischen Verhält-



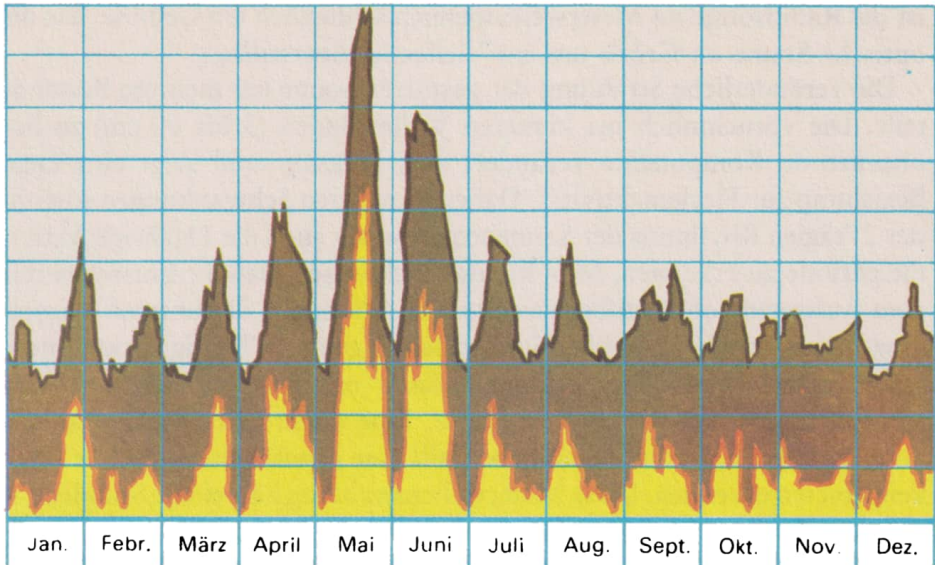
3 cm Wellenlänge

20 cm

60 cm

140 cm

Bilder der Sonne nach Registrierung in verschiedenen Wellenlängen der solaren Radiostrahlung; die Tiefe der Farbtönung gibt die Stärke der Strahlung an (nach Albrecht Krüger/Gotthard Richter)



Vergleich der Kurven (1951) für die Stärke der solaren Radiostrahlung bei 10,7 cm Wellenlänge (braun) und für die Fläche der Sonnenflecken (gelb)

nisse schließen. Die längeren Wellen aus dem Meterbereich kommen nur noch aus den höheren Gebieten der Korona und bestätigen ebenfalls die für diesen Teil der Sonnenatmosphäre gefundenen extrem hohen Temperaturen von 1 bis 2 Millionen Grad K.

Tastet man nun bei derartigen Untersuchungen die Sonne punkt- und zeilenweise ab, dann erhält man, je nach der empfangenen Wellenlänge, ein charakteristisches Abbild, das als *Radiosonne* bezeichnet wird. Wie wir nach dem dargelegten Zusammenhang zwischen Eindringtiefe und Wellenlänge erwarten können, stimmt die Radiosonne im Zentimeterbereich nach Größe und Form noch weitgehend mit dem Aussehen der optischen Sonne überein. Wesentlich ist jedoch, daß sie im Zentimeter- und Dezimeterbereich – anders als die optische Sonne – eine *Randaufhellung* zeigt. Dieser Effekt entsteht, weil am Sonnenrand die Sichttiefe in die strahlenden Schichten erheblich größer ist als in der Mitte der Sonnenscheibe. Mit wachsender Wellenlänge gewinnt die Radiosonne dann immer mehr an Umfang, wobei sie eine etwas abgeflachte, zum Äquator symmetrische Struktur annimmt. Da sich die heiße Korona weit in den Raum erstreckt,

ist die Radiosonne im Meterwellenbereich schließlich ein Gebilde, das die optische Sonne an Größe um ein Vielfaches übertrifft.

Die veränderliche Strahlung der gestörten Sonne hat mehrere Bestandteile. Die vornehmlich bei kürzeren Wellenlängen (3 bis 60 cm) zu beobachtende Komponente verändert sich langsam und zeigt eine enge Beziehung zur Fleckenaktivität. Daher ist in ihren Schwankungen sowohl der 27tägige Rhythmus der Sonnenrotation als auch die 11jährige Aktivitätsperiode zu erkennen. Man konnte nachweisen, daß ihr Entstehen mit dem Auftreten von Protuberanzenkondensationen in der unteren Korona zusammenhängt, wie sie über Sonnenfleckengebieten häufig vorkommen. Dabei spielt neben Temperatureinflüssen offenbar die Wirkung von Magnetfeldern eine wesentliche Rolle. Eine andere Art der sporadisch auftretenden Störstrahlung läßt ebenfalls eine gewisse Beziehung zu Fleckengebieten erkennen. Diese Meterwellenstrahlung hält einige Stunden bis mehrere Tage an und stammt offensichtlich aus der Korona; die Strahlungsherde liegen etwa 0,3 bis 1 Sonnenradius über dem jeweiligen Fleckengebiet in der Photosphäre. Das Besondere an dieser Strahlung ist ihr „Scheinwerfereffekt“. Sie ist ziemlich stark gebündelt und annähernd radial (in Richtung des verlängerten Sonnenradius) nach außen gerichtet, so daß sie auf der Erde immer nur dann empfangen werden kann, wenn sich der Strahlungsherd etwa in der Mitte der Sonnenscheibe befindet. Wegen der Form ihres Auftretens bezeichnet man diese Radiostrahlung auch als solaren *Rausch-* oder *Radiosturm*.

Die interessantesten Erscheinungen der radiofrequenten Sonnenstrahlung stellen jedoch zweifellos die spontanen *Radiostrahlungsausbrüche* (engl. bursts) dar. Sie sind teilweise so intensiv, daß die Radiostrahlung der Sonne insgesamt zu diesem Zeitpunkt um mehrere Zehnerpotenzen höher liegen kann, als es dem „ruhigen“ Niveau entspricht. Diese Radioausbrüche, bei denen man nach ihrem Verhalten und ihrer Beschaffenheit mehrere Typen (I-V) unterscheidet, treten teilweise als Strahlungsstöße von nur 0,1 bis 0,5 Sekunden Dauer auf, können aber auch bis zu mehreren Stunden anhalten. Besonders interessant sind die Ausbrüche vom Typ II im Dezimeter- und Meterbereich. Sie zeigen sich häufig zu Beginn einer chromosphärischen Eruption und lassen somit einen ursächlichen, aber noch nicht geklärten Zusammenhang mit dieser speziellen Aktivität vermuten. Der an sich schmale Wellenlängenbereich der Strahlung wandert im Verlauf des Ausbruchs zu größeren Wellenlängen hin, was ein Aufstei-

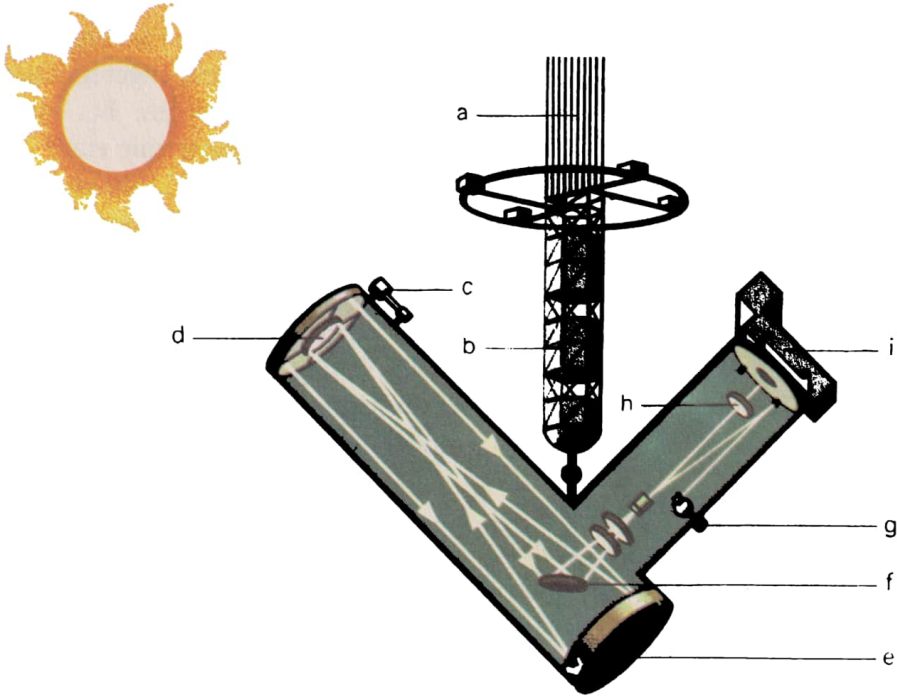
gen der Strahlungsquelle in der Korona (400 bis 1000 km/s) anzeigt. Man deutet diese Strahlung als Folge von Plasmaschwingungen, angeregt durch Partikelwolken, die bei der Eruption ausgestoßen werden. Bei einem anderen Typ steigt die Quelle der Radiostrahlung sogar mit einer Geschwindigkeit bis zu 100 000 km/s in der Korona empor. Ursache dieser Strahlung dürften extrem schnelle, teilweise annähernd mit Lichtgeschwindigkeit fliegende Elektronenwolken sein, deren Bewegung in den solaren Magnetfeldern zum Aussenden von radiofrequenter Strahlung führt.

Schon dieser allgemeine Überblick läßt sicher erkennen, daß das Radiofenster der Erdatmosphäre auch für die Sonnenforschung von großem Nutzen ist. Dennoch wurde es für sie immer wünschenswerter, die beeinträchtigende „Fenster-Technik“ zu überwinden.

Sonnenteleskope am Ballon

Ein modernes Hilfsmittel der Sonnenforschung bilden die *Ballontelekope*. Spezialkonstruktionen astronomischer Spiegelteleskope, mit Öffnungen zwischen 30 cm und 100 cm sowie sehr langen Äquivalentbrennweiten, werden durch große Trägerballons in Höhen über 20 km, verschiedentlich sogar bis etwa 40 km gebracht und arbeiten dort vollautomatisch oder ferngesteuert.

Mit den Ballontelekopen werden einmal spektrale Bereiche der Sonnen- oder Sternstrahlung der Analyse zugänglich gemacht, die sonst der Absorptionswirkung atmosphärischer Schichten zum Opfer fallen, welche unterhalb von etwa 25 bis 30 km Höhe liegen. Dazu gehört in erster Linie die verstärkte Ultraviolettabsorption durch die in diesen Höhen besonders intensive Ozonschicht. Und gerade die Untersuchung der kurzwelligen solaren UV-Strahlung hat für die Sonnenforschung wegen des engen Zusammenhangs zwischen Strahlung und Sonnenaktivität größte Bedeutung. Zum anderen läßt sich durch dieses Verfahren auch die störende Luftunruhe ausschalten, die in der bodennahen troposphärischen Schicht der Erdatmosphäre am stärksten ist und dort verhindert, daß die tatsächliche Leistungsfähigkeit astronomischer Instrumente voll ausgenutzt wird. Ballontelekope dienen somit entweder der Spektralanalyse oder Feinstrukturuntersuchungen an Sonne oder Planeten; sie können aber auch für kombinierte Aufgaben ausgestattet sein.



Aufbau eines Ballonteleskops (schematisch)

a = Tragseile; b = Elektronik und funktechnische Geräte; c = Sucher-Fernsehkamera; d = Sekundärspiegel; e = Hauptspiegel; f = Ablenkspiegel; g = Fernseh-Kontrollkamera; h = Hilfslinse; i = Filmkassette

Die Verwirklichung derartiger Projekte, die ja erst bei Steighöhen über 20 km die angestrebten Vorteile versprechen, war entscheidend von den Fortschritten auf einigen technischen Spezialgebieten abhängig. Erst als etwa seit 1950 für die Ballonhüllen mit den neu aufkommenden Kunststoffen ein Material zur Verfügung stand, das beträchtliche Vorzüge gegenüber den früher verwendeten gummierten Geweben hatte, waren schließlich auch Höhen über 40 km mit großen Ballons erreichbar. Während das ältere Hüllenmaterial, abgesehen von seinem erheblich größeren Gewicht, gegenüber dem gleichzeitigen Einwirken von extrem niedrigen Temperaturen und verstärkter UV-Strahlung in mehr als 25 km Höhe wenig widerstandsfähig war, können die modernen Forschungsballons aus Polyäthylenfolie, deren Dicke nur wenige hundertstel Millimeter beträgt, sogar tage- und wochenlang in sehr großen Höhen verbleiben. Die kostbare

Instrumentenlast sichert ein zwischen Ballon und Geräteteil befindlicher Tragefallschirm, der diesen Komplex nach Beendigung des Unternehmens wieder zur Erdoberfläche zurückbringt.

Da mit bemannten Ballons keine astrophysikalischen Präzisionsuntersuchungen möglich sind, weil allein die Atembewegung des Beobachters die Instrumentengondel viel zu stark schwanken läßt, galt es, zuverlässige technische Lösungen für die automatische oder Fernsteuerung der Instrumenteneinheit zu entwickeln. Denn auch mit dem Teleskop eines unbemannten Ballons mußten sich vorgegebene Punkte oder kleinere Ausschnitte auf der Sonnenoberfläche genau erfassen lassen, wenn wirklich nennenswerte Fortschritte erzielt werden sollten. Letztlich leistete hier wieder einmal die von der Raumflugtechnik angeregte stürmische Entwicklung auf den Gebieten der Elektronik, Kleinstbauweise, Lageregelungstechnik, Telemetrie (Meßwertübertragung) und anderen die wichtigste Hilfe. So kann man sich für die Lageausrichtung und -stabilisierung der Teleskopeinheit wie in der Raumflugtechnik empfindlicher Lageanzeiger (Sensoren) bedienen, die auf das Licht der Sonne reagieren, und Druckgasdüsen oder Drallradsysteme als Drehmomentgeber beziehungsweise -speicher verwenden. Besonders die Drallradsysteme, bei denen in Rotation versetzte massereiche Kreisel gegenläufige Drehbewegungen des Instrumententrägers zur Folge haben, ermöglichen es, die Richtung des Teleskops außerordentlich genau einzustellen. Bei den höchstentwickelten Geräten wird die Feineinstellung meist durch direkte Fernsehbildübertragung unter Verwendung der Teleskopoptik kontrolliert. So vermag der das Programm überwachende oder leitende Sonnenphysiker in der Bodenempfangsstelle, von der aus über Funk und Telemetrie der gesamte Flugführungskontakt mit dem Ballon unterhalten wird, auf einem Monitor unmittelbar den Bildausschnitt zu prüfen und gegebenenfalls mittels Fernsteuerung auch Korrekturen oder Neueinstellungen vorzunehmen.

Die ersten systematischen Versuche mit Ballontelesternen für die Zwecke der Sonnenforschung stellten der französische Astrophysiker *Audouin Dollfus* und sein deutsch-amerikanischer Kollege *Martin Schwarzschild* an. Dollfus war schon frühzeitig durch seinen Vater, einen Pionier des Freiballonsports, mit der Ballontechnik vertraut gemacht worden. Nach dem Vater von Martin Schwarzschild, dem namhaften deutschen Astrophysiker *Karl Schwarzschild* (1873–1916), der von 1909 bis zu seinem Tode Direktor des Astrophysikalischen Observatoriums in Potsdam war

und mit zahlreichen bedeutenden Arbeiten über verschiedene Probleme der Astrophysik hervortrat, ist das heute weltweit bekannte Observatorium nahe Tautenburg bei Jena benannt.

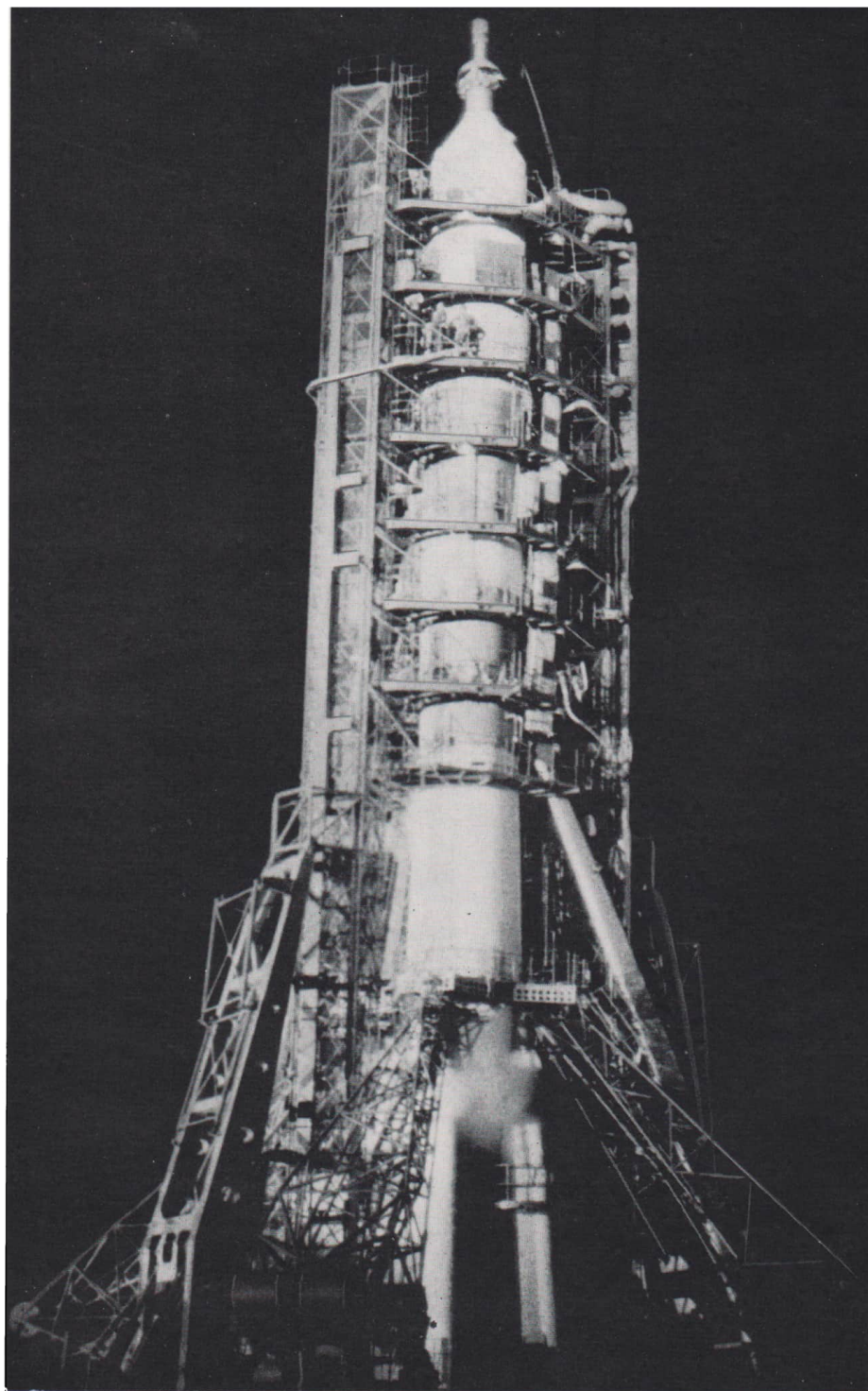
Dollfus konzentrierte sich, unter Anregung und Mitwirkung seines Vaters, auf Untersuchungen mit bemannten Ballons. Den ersten Versuchsaufstieg führten beide im Mai 1954 mit einem wasserstoffgefüllten Freiballon (700 m^3) in offenem Korb aus; sie erreichten eine Gipfelhöhe von 6850 m. Am Korb war außen ein von Lyot konstruiertes Spiegelteleskop (28 cm Öffnung) befestigt, mit dem Audouin Dollfus seine Beobachtungen anstellte. Das Ergebnis dieses Aufstiegs ermutigte zu zwei weiteren Unternehmungen, die 1956 und 1957 stattfanden. Dabei wurden jeweils Höhen von 6000 m erreicht und dort 400 beziehungsweise 600 Sonnenaufnahmen gewonnen, die noch Einzelheiten von 200 km Ausdehnung erkennen ließen und damit eine fast dreimal so große Auflösung lieferten, wie bodengebundene Instrumente erbringen. In der Folgezeit konstruierte Dollfus ein spezielles Höhenballonsystem, mit dem er im April 1959 in 13.200 m Höhe gelangte. Das Trägersystem bestand aus einer Ballon-„Traube“ von 104 kleineren Ballons, was den Start technisch vereinfacht. Die Gondel war aus Leichtmetall gefertigt und hermetisch geschlossen, als Instrument diente diesmal ein Spiegelteleskop von 50 cm Öffnung. Bei dem Unternehmen zeigten sich aber dann doch die schon erwähnten Nachteile einer bemannten Instrumentenplattform, so daß dieser Weg nicht weiter verfolgt wurde. Eine wesentliche Rolle spielte hier offensichtlich, daß das größere Instrument mit entsprechend längerer Brennweite gegen Bewegungsunruhe entschieden empfindlicher war.

Das von Schwarzschild in den USA betriebene Projekt „Stratoscope“ sah von vornherein unbemannte Instrumententräger vor, mit denen Mindesthöhen von 20 bis 25 km erreicht werden sollten, um neben hochauflösenden Bildern von Himmelskörpern (Sonne, Planeten) auch spektrale Analysen und Messungen im Infrarotbereich ausführen zu können. Die Verwendung heliumgefüllter Polyäthylenballons – später solcher aus Mylar, einem Thermoplast auf Polyesterbasis – sollten Verweilzeiten von einigen Stunden in Gipfelhöhe ermöglichen. Amerikanische Forscher bezeichnen die modernen Höhenballons wegen dieser Eigenschaft scherzhaft als „Himmelshaken“ (engl. „skyhook“).

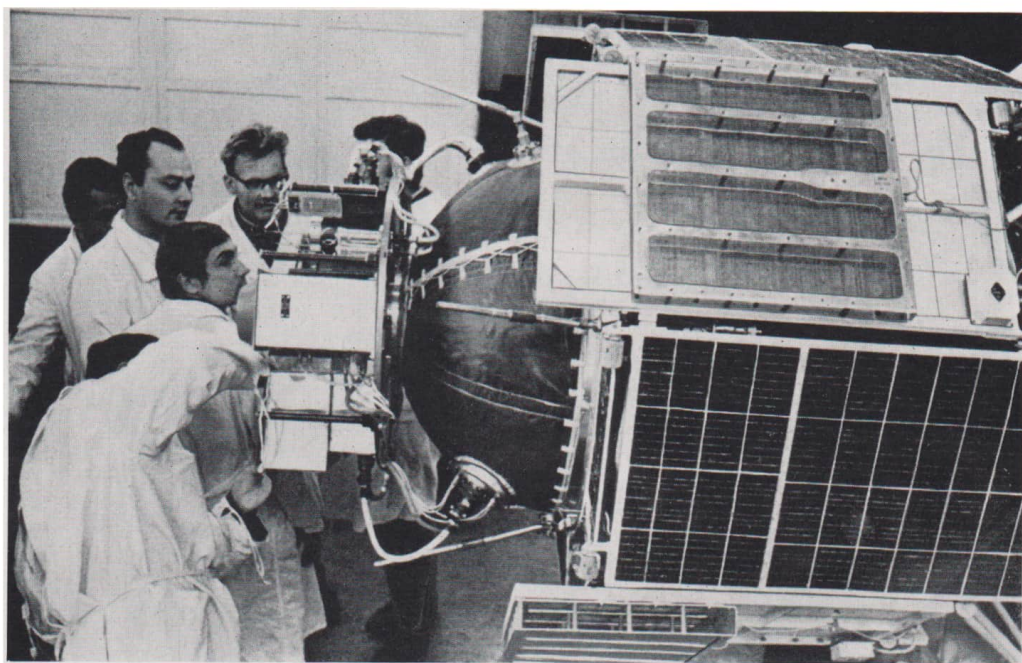
Für das vollautomatische System „Stratoscope I“ wurde ein 30-cm-Spiegelteleskop (240 cm Brennweite) konstruiert, das bei einer Länge von



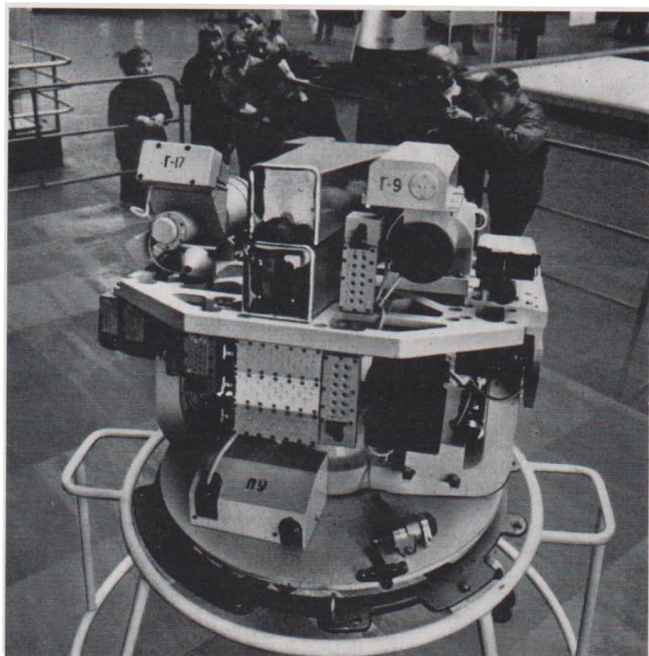
Antenne des Sonnen-Radioteleskops in Baldone (Lettische SSR)



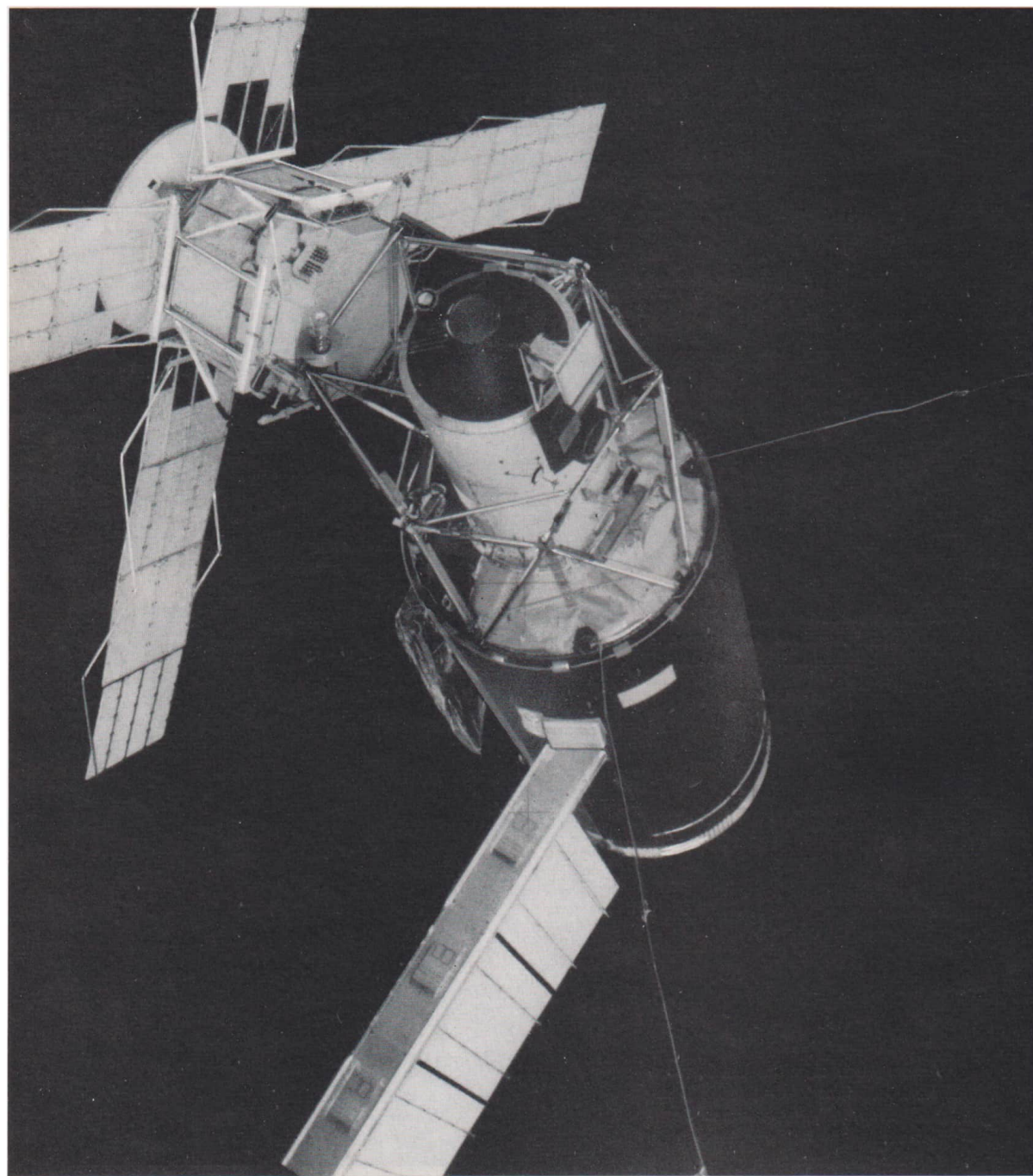
Trägerrakete mit „Soyuz“-Raumfahrzeug auf der Startrampe



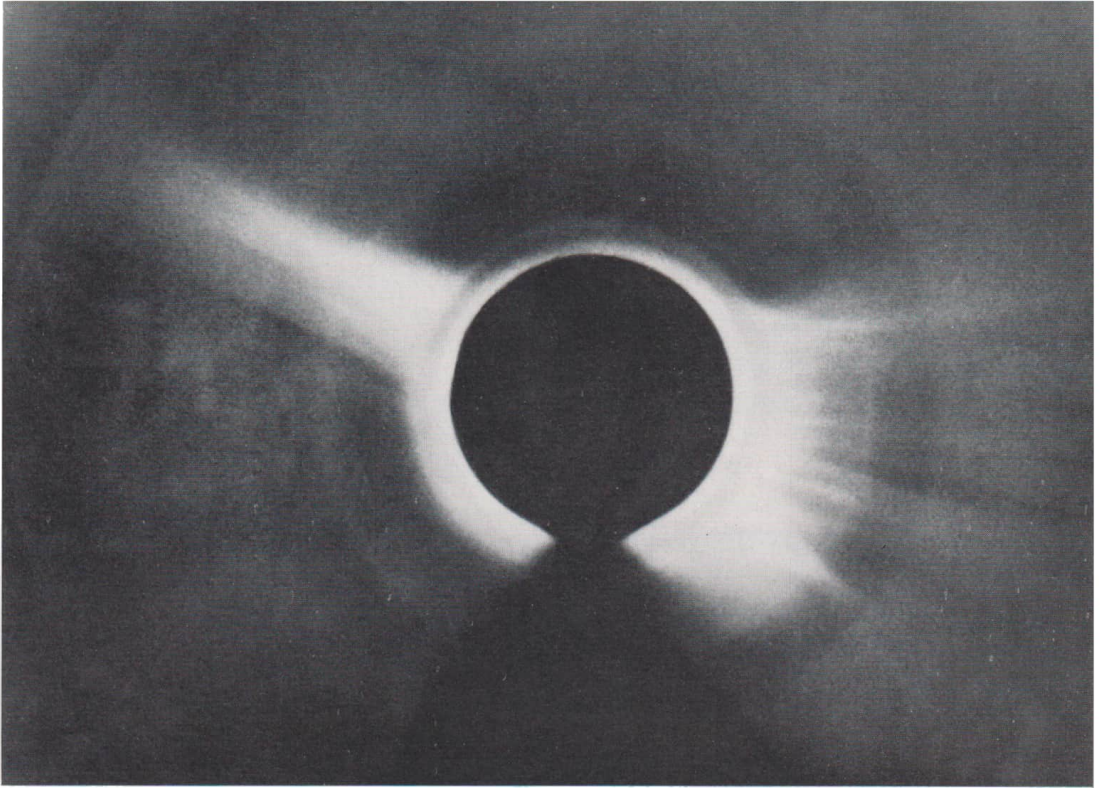
Wissenschaftler aus der DDR und der CSSR bereiten den Sonnenforschungssatelliten „Interkosmos 4“ vor



Automatisch arbeitendes Sonnenobservatorium RAO (UdSSR), am 3. Oktober 1970 von einer Vertikalrakete in eine Höhe von 500 km gebracht

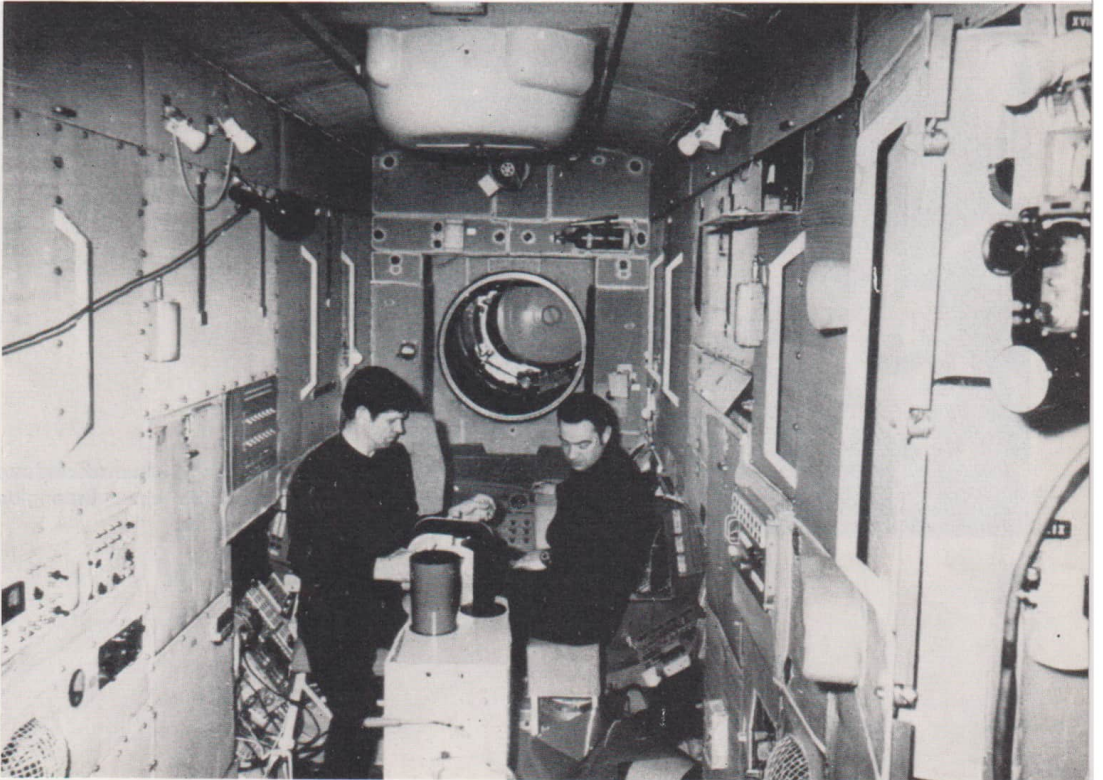


Raumstation „Skylab“ vor dem Andocken des zweiten
Raumfahrzeugs; links oben das Sonnenteleskopmodul ATM



ATM-Aufnahme der Sonnenkorona mittels Abdeckscheibe

Alexej Gubarjow und Georgi Gretschko beim Training im Modell
der Raumstation „Salut 4“





Sonnenenergie steuert das Wettergeschehen

Die tägliche Sonnenscheindauer wird mit Hilfe einer Brennglas-kugel registriert



Wetterbeobachtungsgeräte auf der Gletscherstation Tujusku“ (Süd-
kasachstan)



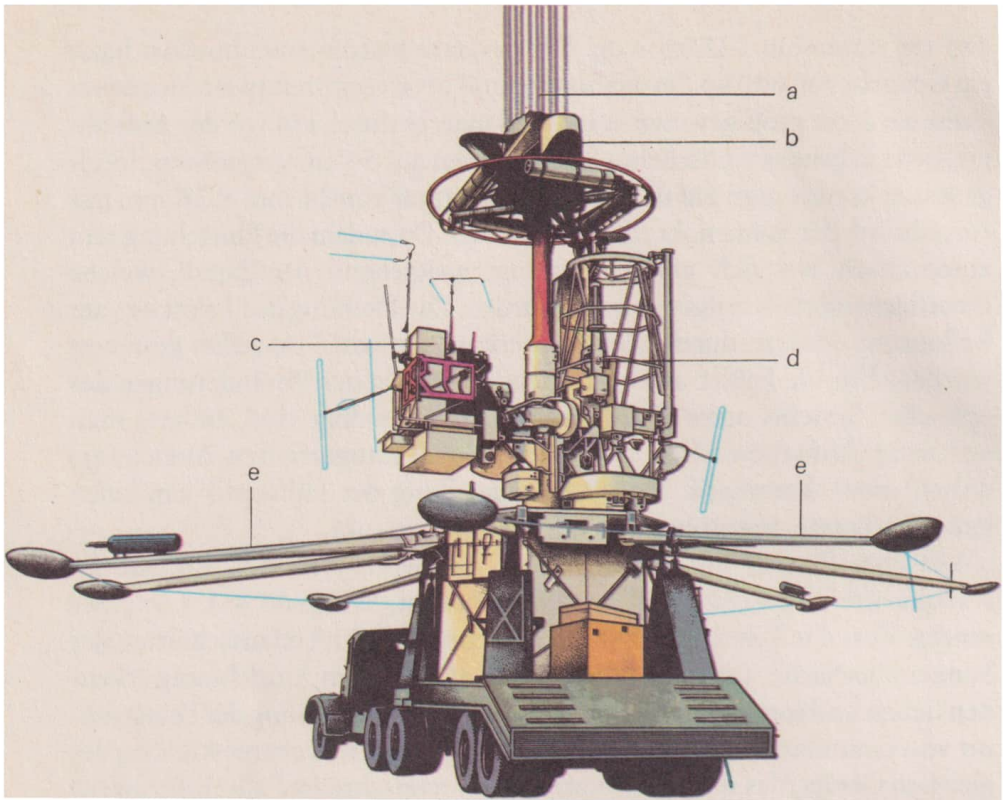
Eingefangener Sonnenschein

285 cm immerhin 135 kp wog. Die gesamte Instrumentennutzlast hatte ein Gewicht von 600 kp. Da das Sonnenbild bei dieser Brennweite nur etwas mehr als 2 cm groß gewesen wäre, ließ man es durch ein vor der Aufnahmeebene liegendes zusätzliches Linsensystem auf 54 cm vergrößern. Infolgedessen konnte man auf dem Aufnahmeformat von 24 mm × 36 mm nur Ausschnitte der Sonnenoberfläche abbilden. Da zudem die Einstellung rein automatisch vor sich ging, bestimmte weitgehend der Zufall, welche Oberflächendetails aufgenommen wurden. Die Drehung des Teleskops am Ballonring erfolgte durch Elektromotoren, die von Fotozellen gesteuert wurden. Um die Fehler auszugleichen, die wegen der Veränderungen des optischen Systems unter Wärmeeinfluß unvermeidbar sind, änderte man vor jeder Aufnahme eines insgesamt 20mal fotografierten Ausschnitts mittels einer Automatik die Schärfeeinstellung der Hilfsoptik um einen gewissen Betrag gegenüber dem Normalbrennpunkt.

Der erste Einsatz von „Stratoscope I“ im September 1957 brachte die Instrumente in eine Gipfelhöhe von 26 000 m. Während 4 3/4 Stunden machte dort das Teleskop 8000 Aufnahmen von 400 Teilausschnitten der Sonnenoberfläche, die noch Einzelheiten von 200 km Ausdehnung erkennen ließen und somit einige Fortschritte in der Untersuchung der Feinstruktur von Granulation und Sonnenflecken ergaben. Ein weiterer Aufstieg des gleichen Geräts, das nach dem ersten Flug unversehrt am Fallschirm gelandet war, im Oktober 1957 hatte ähnliche Ergebnisse.

Um die Unzulänglichkeiten eines rein automatischen Systems zu überwinden, konstruierte Schwarzschild danach die Teleskopeinheit auf eine Fernsehbild-Fernsteuerung um. Nach einem weniger erfolgreichen Probeaufstieg erreichte sie im August 1959 eine Gipfelhöhe von fast 25 000 m. Mit der Fernsehkontrolle wurde eine merkliche Verbesserung der Bildqualität erzielt; die besten der 400 Aufnahmen zeigten Details von 130 bis 150 km Ausdehnung.

Auch in der Sowjetunion, die in der Höhenforschung mit Ballons eine lange Tradition besitzt und große Leistungen vollbracht hat, bedient man sich seit längerem der Ballontelestechnik für astro- und sonnenphysikalische Forschungen. Nach verschiedenen Vorauserprobungen startete im November 1966 ein unbemannter Ballon, mit dem eine Gipfelhöhe von mehr als 20 km erreicht wurde. Die wissenschaftliche Nutzlast dieses Systems hatte das enorme Gewicht von 7500 kp, was einen Polyäthylenballon von 100 000 m³ Volumen erforderlich machte. Die Ausrüstung

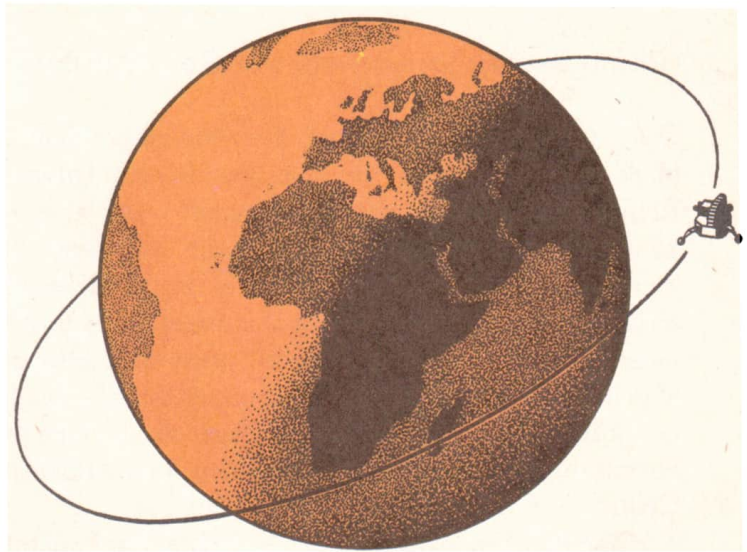


Sowjetisches Ballontelekop auf dem Transport- und Startwagen
a = Trageile; b = Batterien und Hilfsausrüstung; c = Funkübertragungs-
systeme; d = Teleskop mit Steuerungselektronik; e = Landegestell

bestand aus einem Teleskop für hochauflösende fotografische Bilder, einem Sonnenspektrographen, einem Spektroheliographen sowie automatischen Steuerungselementen und Fernseh-, Fernsteuerungs- und Telemetrieanlagen. Für die Funktionserprobungen des Gesamtsystems verwendete man bei den ersten Aufstiegen ein Teleskop mit 0,5 m Öffnung, das später durch ein 1-m-Teleskop ersetzt wurde. Schon beim dritten Aufstieg des Höhenballons im Juni 1970, noch mit dem kleineren Teleskop, konnten in 20 500 m Gipfelhöhe während rund 6 3/4 Stunden neben Meßdaten eine große Zahl von Sonnenfotos gewonnen werden, deren Detailauflösung die der „Stratoscope“-Aufnahmen teilweise noch um einiges übertraf. Aufnahmen von zwei Fleckengruppen, die am 20. Juni 1973 mit

Hilfe des 1-m-Teleskops gewonnen wurden, brachten neue Informationen über das Entstehen von Eruptionen. Man konnte daraus den Schluß ziehen, daß das Zustandekommen dieser solaren Erscheinungen einen Teil der Prozesse darstellt, die mit spiralartig verlaufenden Magnetfeldern verbunden sind. Die Aufnahmen und Spektrogramme ließen ferner erkennen, daß sich die großräumigen Magnetfelder auf der Sonne in Form von dünnen Bögen oder Schlingen aus dem Innern durch die Photo- und die Chromosphäre hindurch bis in die Korona erstrecken. Diese Bögen erweitern sich jeweils beim Übergang in das stärker verdünnte Medium.

Sonnenobservatorien im Weltall



So wertvoll Forschungsaufstiege mit Ballonteleסקopen in verschiedener Hinsicht auch sind, es bleibt nicht zu übersehen, daß diese Methode im entscheidenden Punkt eben doch keinen grundlegenden Fortschritt liefert. Und zwar deswegen nicht, weil man sich selbst in 40 bis 45 km Höhe, die sich außerdem mit lastreichen Systemen kaum erreichen läßt, immer noch innerhalb der Erdatmosphäre befindet. Somit hat man auch dort gewisse Beschneidungen des solaren Spektrums durch Absorption in den höchsten Schichten der Erdatmosphäre in Kauf zu nehmen. Weiter unten verstärkt sich dieser Effekt natürlich entsprechend. Das heißt, um wesentlich bessere Bedingungen zu erhalten, muß man mit den Beobachtungsinstrumenten noch höher steigen oder im Idealfall in den nahezu völlig leeren, freien Weltraum vordringen.

Höhenraketen im Dienste der Sonnenforschung

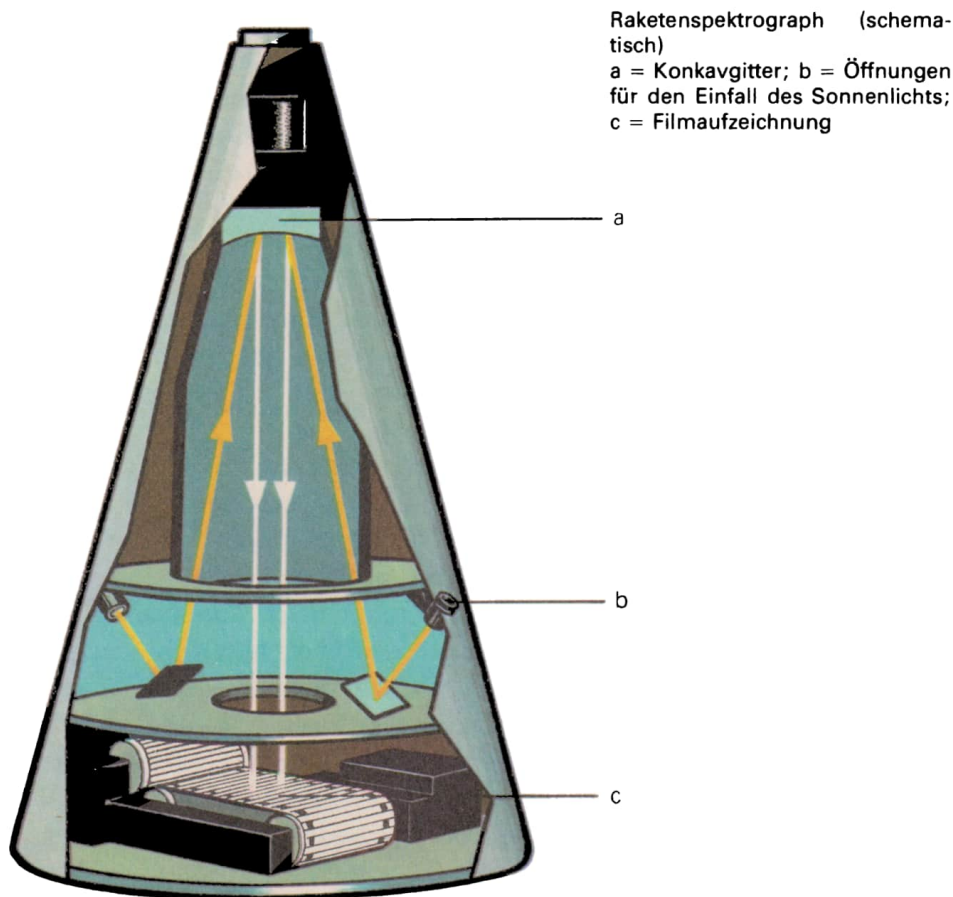
Das naturgegebene Hindernis Erdatmosphäre ließ sich von dem Augenblick an überwinden, als eine hinreichend entwickelte Raketen- und Raumflugtechnik zur Verfügung stand. Das war in den Jahren zwischen 1946 und 1948 der Fall, also noch vor dem Aufkommen der Ballonteleסקope. Die ersten Versuche in dieser Richtung wurden mit relativ einfach instrumentierten, vertikal aufsteigenden einstufigen *Höhenraketen* unternommen, weil man zunächst noch nicht über genügend leistungsfähige Mehrstufenraketen verfügte, um auch erdumkreisende Raumflugkörper, künstliche Erdsatelliten, als Trägerplattformen für astrophysikalische Forschungsgeräte einsetzen zu können. Pionierarbeit leisteten auf diesem Gebiet die Sowjetunion und die USA.

Höhenraketen werden in der Mehrzahl mit Feststofftriebwerken ausge-

rüstet, weil sie damit einfacher und sicherer zu handhaben sind und sich folglich auch auf Schiffen oder entlegenen Forschungsstützpunkten (zum Beispiel in der Antarktis) verwenden lassen. Gerade den zuletzt genannten Möglichkeiten verdanken wir wesentliche Beiträge zur Sonnenforschung und zugleich Informationen über die Beziehungen zwischen solaren Erscheinungen und Vorgängen im erdnahen Raum. In dieser Hinsicht nehmen Höhenraketen auch gegenwärtig noch einen wichtigen Platz unter den Forschungsmitteln der Sonnenphysik und der Weltraumforschung überhaupt ein. Immerhin starten über ein Dutzend Länder in jedem Jahr, überwiegend in internationaler Zusammenarbeit, insgesamt mehrere hundert Höhenraketen, davon nicht wenige speziell für die Zwecke der Sonnenphysik.

Für größere Nutzlasten und Steighöhen werden meist ein- oder zweistufige Flüssigkeitsraketen eingesetzt, weil sie im allgemeinen eine höhere spezifische Antriebsleistung haben. Die Gipfelhöhen liegen in der Regel zwischen 100 und 500 km, die Nutzlasten betragen wenige Kilogramm bis zu einigen hundert Kilogramm. Die automatisch arbeitenden Forschungsinstrumente sind stets im Kopfteil der Rakete untergebracht, den man daher auch als *Meßkopf* bezeichnet, gelegentlich ergänzen Geräte in Containern außen am Raketenkörper die Ausrüstung. Gewöhnlich wird der Meßkopf bereits während des Aufstiegs oder aber im Gipfelpunkt der Bahn von dem Antriebsteil getrennt. Dabei ist es für viele sonnenphysikalische Untersuchungen erforderlich, entweder schon während des Aufstiegs oder auf der Gipfelhöhe die Instrumente genau auf die Sonne auszurichten und in dieser Einstellung während der Untersuchungszeit zu fixieren. Hierzu dienen Fotozellensteuerungen, Kreiselstabilisatoren und Gasdüsen.

Die maximal mögliche Arbeitsdauer für die wissenschaftlichen Apparaturen einer Höhenrakete wird von der Aufenthaltsdauer der Nutzlast oberhalb einer gewissen Höhe und damit von dem Flugablauf bestimmt. Ein reiner Vertikalaufstieg ergibt zwangsläufig eine nur relativ kurze Aufstiegszeit und geht unmittelbar in einen Rücksturz zur Erdoberfläche über. Dieser läßt sich zwar durch Bremshilfen etwas verzögern, der gesamte Flugablauf bleibt aber in jedem Fall zeitlich recht knapp und beträgt meist nicht mehr als einige Minuten. Dem gebremsten oder ungebremsten Rücksturz der Nutzlast, bei dem die Apparaturen bis zum Erreichen einer bestimmten Höhe noch arbeiten können, schließt sich im allgemeinen eine Fallschirmrückführung an. Dieser Flugablauf macht Höhenraketen somit



lediglich für solche Untersuchungen als Meßgeräteträger geeignet, bei denen es auf kurzzeitig zu erfassende Erscheinungen oder Meßwerte ankommt.

Die ersten sonnenphysikalischen Raketenanstiege (1946 bis 1950) galten hauptsächlich der Untersuchung des Sonnenspektrums im kurzweligen Ultraviolett, also jenseits der Grenze der atmosphärischen Absorption bei etwa 300 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-7} \text{ cm}$). An diesem Teil des solaren Spektrums blieben die Sonnenphysiker aber auch weiterhin stark interessiert, weil im Bereich des kurzweligen Ultraviolett und ebenso im anschließenden Röntgenstrahlungsgebiet bestimmte Strahlungsemissionen der Sonne auftreten, die sich auf den erdnahen Raum merklich auswirken. Wiederum

bilden die Aktivitätszentren und vor allem die chromosphärischen Eruptionen die Herde verstärkter UV- und Röntgenstrahlung. Neben besonderen UV-Raketenspektrographen, die mit Optiken aus ultraviolett-durchlässigem Material (zum Beispiel Lithiumfluorid) sowie Beugungsgittern arbeiten und größere Bereiche des Spektrums erfassen, werden vielfach auch Kombinationen aus Filtern und Photonenzählern eingesetzt, die auf engere Spektralbereiche abgestimmt sind. Mit speziellen Zählerkonstruktionen kann man die Röntgenemissionen der Sonne bis zu Wellenlängen von nur etwa 10 nm verfolgen. Direkte Aufnahmen der Sonne im Röntgenstrahlungsbereich bereiten insofern beträchtliche Schwierigkeiten, als für diese extrem kurzwellige Strahlung abbildende Systeme mit gewöhnlichen Linsen und Spiegeln nicht mehr in Betracht kommen. Man wendet daher bei den Röntgenkameras Varianten des einfachen Lochkameraprinzips (beispielsweise Löchermatrizen) und andere Verfahren an.

Im kurzwelligen Ultraviolett des Sonnenspektrums fällt vor allem eine grundlegende Veränderung auf, die sich etwa ab 170 nm bemerkbar macht. Zu noch kürzeren Wellenlängen hin wird das Kontinuum sehr schwach, und es treten hell überlagernde Emissionslinien auf, die in der Mehrzahl dem Wasserstoff und dem Helium angehören. Die intensivste Linie ist die erste aus einer Serie von Wasserstofflinien, die ausschließlich im Ultraviolett vorkommen. Die Serie wurde nach ihrem Entdecker, dem amerikanischen Physiker *Theodore Lyman* (1874–1954), benannt. Die Intensität der *Lyman-Alpha-Linie* (121,6 nm) stellt wegen ihres repräsentativen Verhaltens bei Veränderungen in den UV-Emissionen der Sonne einen wichtigen Gradmesser für die Überwachung der Sonnenaktivität, vor allem der Strahlungsausbrüche bei chromosphärischen Eruptionen, dar.

Die solare Strahlung im extrem kurzwelligen Bereich ist erheblich stärker, als es einer Strahlungsquelle mit rund 6000 °K Oberflächentemperatur entspricht. Die Intensität im Röntgenstrahlungsgebiet weist schließlich sogar auf eine Temperatur von etwa 1 Million Grad K hin. Der Befund kann nur so gedeutet werden, daß die in diesen Spektralbereichen von der Sonne ausgesandte Strahlung in den hochtemperierten Schichten der Chromosphäre sowie in der Korona entsteht.

Das Interesse der Sonnenphysiker an Beobachtungen und Messungen außerhalb der Erdatmosphäre richtet sich aber nicht nur auf die Untersuchung der elektromagnetischen solaren Strahlung. Schon seit längerem ist bekannt, daß von der Sonne zeitweilig auch intensive Ströme oder Wolken

elektrischer Ladungsteilchen – vornehmlich Elektronen und Protonen – ausgehen, die im erdnahen Raum beziehungsweise in der irdischen Hochatmosphäre recht wirksame physikalische Effekte hervorrufen. Es handelt sich dabei in erster Linie um Störungen des erdmagnetischen Feldes, auf die wir in anderem Zusammenhang noch eingehen werden. Diese solare Komponente der kosmischen Strahlung – es existiert außerdem ein Anteil, der aus den Tiefen des kosmischen Raumes kommt – zeigt ebenfalls eine enge Verbindung mit bestimmten Erscheinungen der Sonnenaktivität. Das sind erstens wiederum die chromosphärischen Eruptionen, und zwar vornehmlich solche, bei denen Radioausbrüche vom Typ II stattfinden. Teilchenströme lassen sich aber auch kurz nachdem eines der in der Korona gelegenen Ursprungsgebiete von Radiostürmen durch das Zentrum der Sonnenscheibe gegangen ist, nachweisen.

Ein wichtiger Zusammenhang ergibt sich aus dem zeitlichen Vergleich zwischen dem Sichtbarwerden einer Eruption und dem Eintreten der von den solaren Partikeln ausgelösten erdmagnetischen Störung. Diese folgt mit einer Verzögerung von etwa 16 Stunden bis zu 4 Tagen, woraus sich die Laufgeschwindigkeit der Teilchen bestimmen läßt. Man kommt dabei im Mittel auf Geschwindigkeiten von rund 700 km/s. Wie wir schon erwähnt haben, kann man die Bewegung einer ausgestoßenen Teilchenwolke ebenfalls an den von ihr in der Korona angeregten Plasmaschwingungen verfolgen. In einigen Fällen treten bei Eruptionen allerdings auch sehr schnelle, hochenergetische Strahlungspartikel aus, die eine beträchtliche Erhöhung der auf der Erdoberfläche gemessenen Intensität der kosmischen Strahlung bewirken. So zeigt sich immer deutlicher, wie vielfältig die physikalischen Verbindungen zwischen den verschiedenen solaren Erscheinungen und den auslösenden Vorgängen auf und in der Sonne sein müssen. Daran läßt sich ermessen, vor welchen Schwierigkeiten die Sonnenforschung auch heute noch steht.

Automatische Sonnenobservatorien in der Erdumlaufbahn

Die wertvollen Beiträge zur Sonnenphysik, die mit Höhenraketen zu erhalten sind, konnten letztlich doch nicht in allem befriedigen, da die Klärung der meisten Probleme – vornehmlich der solar-terrestrischen Beziehungen

– eine möglichst ununterbrochene Überwachung verschiedener solarer Strahlungsparameter außerhalb der Erdatmosphäre verlangt. Dieses Ziel war nur mit *künstlichen Erdsatelliten* und anderen *Raumflugkörpern* zu erreichen, die als extraterrestrische Meßgeräteplattformen Wochen, Monate oder sogar Jahre hindurch in Betrieb bleiben. Seit etwa 1956, als leistungsfähige Mehrstufenraketen zur Verfügung standen, welche den Start der ersten künstlichen Satelliten (1957) ermöglichten, stellen wissenschaftliche Raumflugkörper eines der wichtigsten technischen Hilfsmittel der modernen Sonnenforschung dar. Diese Aufgabe wurde schon zu Beginn der neuen technischen Etappe der Weltraumforschung betont; denn die Programme zur Entwicklung der ersten künstlichen Satelliten in der Sowjetunion („Sputnik“) und in den USA („Vanguard“, „Explorer“) waren speziell auf die Vorhaben zum *Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957/1958 (IGJ)* abgestimmt. Und dieses weltweite Forschungsunternehmen hatte unter anderem die umfassende Erkundung der Zusammenhänge zwischen Vorgängen auf der Sonne und Folgeerscheinungen im irdischen Raum zum Schwerpunkt.

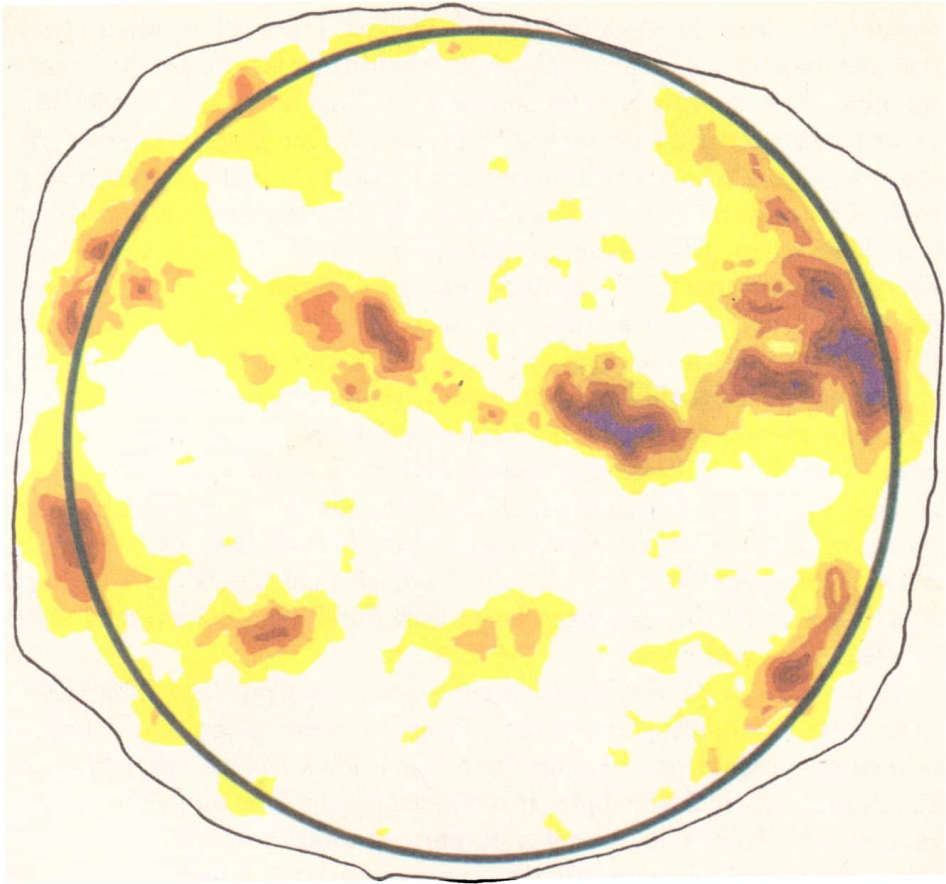
Die meisten für sonnenphysikalische oder solar-terrestrische Untersuchungen eingesetzten Raumflugkörper gehören zur Gruppe der universell instrumentierten Forschungssatelliten. Mit Raumflugkörpern dieser Kategorie werden jeweils mehrere unterschiedliche Teilprobleme der Weltraumforschung gleichzeitig untersucht, was eine entsprechend vielseitige wissenschaftliche Ausrüstung erfordert. Beispielsweise kann das Arbeitsprogramm eines solchen Satelliten erdbezogene Erkundungen (Magnetfeld, Hochatmosphäre, Infrarotstrahlung), Messungen von Partikelstrahlungen, ausgewählte sonnenphysikalische Untersuchungen (etwa Lyman-Alpha-Intensitäten) und außerdem noch astrophysikalische Messungen (galaktische Radiostrahlung und anderes) umfassen. Gerade die Gleichzeitigkeit der verschiedenen Messungen mit einem derartigen Forschungssatelliten war es nun vielfach, die grundlegende Zusammenhänge zwischen sonnenphysikalischen und terrestrischen Erscheinungen sichtbar werden ließ. Satelliten dieses Typs haben daher wesentlich zu bedeutenden Erkenntnissen über das solar-terrestrische Geschehen und damit auch über die Sonnenphysik beigetragen.

Beispiele universeller Forschungssatelliten, die auch für sonnenphysikalische oder solar-terrestrische Untersuchungen instrumentiert sind, finden wir vor allem unter den Satelliten der sowjetischen „Kosmos“-Serie. Von

den seit Beginn der Serie bis Mitte 1975 gestarteten 750 Satelliten diene eine große Anzahl der ständigen Überwachung sonnenphysikalischer oder solar-terrestrischer Parameter. Ähnliches gilt für die Satelliten der amerikanischen „Explorer“- , „IMP“- und „Vela“-Serien. In diese Kategorie gehören auch die meisten Satelliten, welche die sozialistischen Länder seit Oktober 1969 im Rahmen ihres kooperativen „Interkosmos“-Forschungsprogramms starteten. Beteiligt sind daran die UdSSR, die VR Bulgarien, die ČSSR, die DDR, die VR Polen, die SR Rumänien und die Ungarische VR. Die mit diesen Raumflugkörpern vorgenommenen Untersuchungen werden durch koordinierte Beobachtungen von zahlreichen Bodenstationen aus ergänzt. Hinzu kommen ferner Aufstiege mit Höhenraketen des Typs „Vertikal“, die Nutzmassen von 1300 kg in etwa 460 km Höhe bringen können.

Eine ganze Reihe der erwähnten sowjetischen und amerikanischen Meßsatelliten wird schon seit etlichen Jahren für einen regelrechten Sonnen-„Unwetterwarndienst“ eingesetzt. Die Wissenschaftler bezeichnen nämlich die von der Sonne ausgehenden Störungsaktivitäten auch als „Sonnenwetter“. Danach sind die besonders heftigen Vorgänge bei Eruptionen „solare Unwetter“, deren Auswirkungen jeweils weit in den interplanetaren Raum und demzufolge auch bis zur Erde reichen. Den Ausbruch und die Folgen eines solchen Sonnen-„Unwetters“ möglichst frühzeitig, also schon weit außerhalb der Erde zu erfassen ist aber nicht nur für die solar-terrestrische Forschung interessant, es hat auch für die Vorbereitung und Durchführung von Raumfahrtunternehmen Bedeutung, weil plötzlich auftretende intensive Strahlungsschauer zu einer Gefahr für die Raumfahrer werden können. Auf die Frühwarnfunktion der erwähnten „IMP“-Satelliten weist übrigens schon deren Bezeichnung hin. Sie ist eine Abkürzung von „Interplanetary Monitoring Platform“ (engl. = interplanetare Frühwarnplattform).

Eine zweite Gruppe von Raumflugkörpern, die ausschließlich für kombinierte sonnenphysikalische und solar-terrestrische Untersuchungen verwendet werden, bilden die eigentlichen *Sonnenforschungssatelliten*. Hierzu gehören die seit 1962 in gewissen Abständen gestarteten „OSO“-Satelliten der USA (engl. „Orbiting Solar Observatory“ = Sonnenobservatorium auf Erdumlaufbahn) sowie mehrere „Interkosmos“-Satelliten und schließlich die seit 1972 eingesetzten „Prognos“-Satelliten der Sowjetunion. Neben koordinierten Strahlungsmessungen in verschiedenen



Intensitätsverteilung der UV-Strahlung auf der Sonnenscheibe nach Registrierungen des Satelliten „OSO 4“ (USA)

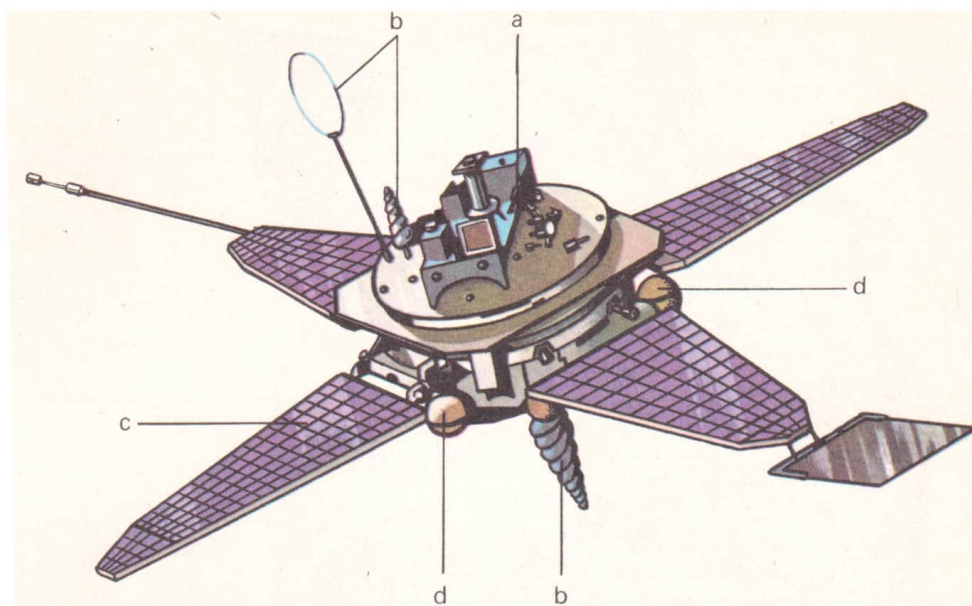
Bereichen des kurzwelligen solaren Spektrums, Registrierungen von Strahlungsteilchen und anderen Angaben liefern einige dieser Satelliten auch Ultraviolett- und Röntgenstrahlungsbilder der Sonne. Mit verbesserten Apparaturen gelang es außerdem in den letzten Jahren, den Bereich der extrem kurzwelligen Gammastrahlung der Sonne zu erfassen. Diese hoch-energetische Strahlung entsteht, wie die solare Röntgenstrahlung, ebenfalls bei Vorgängen in der Korona, vornehmlich über Eruptionsgebieten.

Da die Instrumentierung der Satelliten dieses Typs ganz oder überwiegend auf die direkte Untersuchung der Sonne abgestimmt ist, müssen sie

besondere technische Voraussetzungen erfüllen. Dazu gehört unter anderem das ständige Ausrichten der wissenschaftlichen Geräte auf die Sonne. Im allgemeinen ist eine Richtgenauigkeit von Bogenminuten erforderlich, unter Umständen muß sie aber auch bis zu wenigen Bogensekunden reichen, was erhebliche Anforderungen an die Präzision der Fluglageregelung stellt. Die notwendige Grundausrichtung des Raumflugkörpers wird mit lichtelektrischen Lageanzeigern (Sensoren) sowie mit Gasdüsen und Kreiselstabilisatoren als Drehmomentgeber vorgenommen. Die danach erforderliche Dauerausrichtung der wissenschaftlichen Geräte auf die Sonne erfolgt durch die auch sonst bei unbemannten Satelliten vielfach angewendete Drallstabilisierung. Dazu wird im einfachsten Fall der ganze Raumflugkörper um seine Hauptachse, die man vorher auf die Sonne ausgerichtet hat, in Rotation versetzt. Natürlich müssen die Instrumente an dem zur Sonne weisenden Ende des Raumflugkörpers untergebracht sein. Die Rotation des Satelliten ergibt nach dem Kreiselprinzip eine gewisse richtungsstabile „Steifheit“ der Drallachse im Raum. Im Laufe der Zeit auftretende Abweichungen lassen sich durch die eingebauten Drehmomentgeber korrigieren.

Als Beispiel für die Drallstabilisierung des ganzen Satelliten können die sowjetischen Raumflugkörper der „Prognos“-Serie gelten. Diese extra-terrestrischen Sonnenforschungsplattformen (etwa 850 kg Masse) laufen auf sehr langgestreckten elliptischen Bahnen um die Erde und vermögen so einen weiten Bereich des erdnahen Raums auf solar-terrestrische Einflüsse hin „abzutasten“. Der erdnächste Punkt ihrer Umlaufbahn (Perigäum) liegt anfangs etwa 900 bis 950 km über der Erdoberfläche, der erdfernste Punkt (Apogäum) bei ungefähr 200 000 km, das sind etwas weniger als zwei Drittel der Entfernung des Mondes.

Mit den amerikanischen „OSO“-Satelliten (rund 200 bis 635 kg Masse), deren Bahnen im Normalfall etwa zwischen 500 und 600 km Höhe verlaufen, hat man einen anderen Weg der Drallstabilisierung beschritten. Diese Raumflugkörper bestehen aus zwei Baugruppen, die eine Rotationsachse verbindet. Der hutschachtelförmige „Untersatz“ bewirkt durch Rotation die Drallstabilisierung, während der aufgesetzte Teil mit den eingebauten Forschungsinstrumenten ständig auf die Sonne ausgerichtet bleibt. Die Rotation des Unterteils wird übrigens bei den zuletzt gestarteten Satelliten dieser Serie („OSO 7“, 1971; „OSO 8“, 1975) dazu genutzt, mit optischen Instrumenten die Sonnenscheibe zeilenweise abzutasten. So erhält

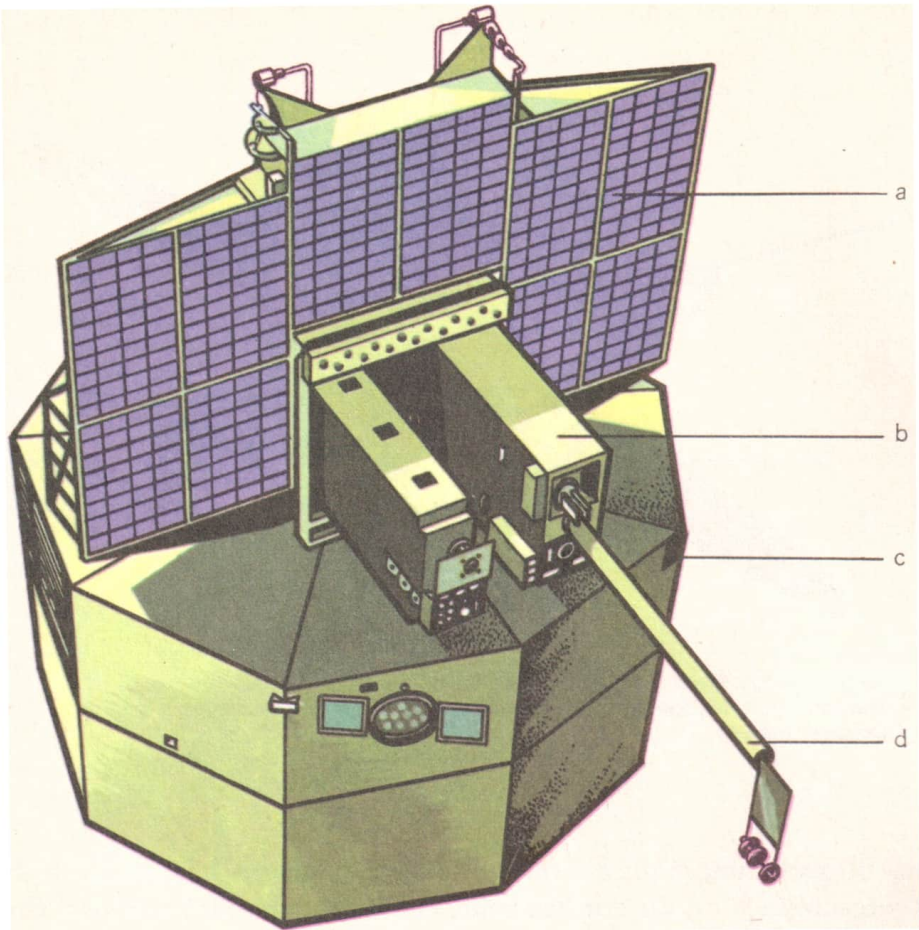


Sonnenforschungssatellit „Prognos“ (UdSSR)

a = Plattform mit Meßgeräten; b = Antenne; c = Solarzellenausleger;
d = Druckgasbehälter

man Registrierungen für Zeilenrasterbilder der Sonne – hauptsächlich im Röntgenbereich –, die mit den anderen Meßwerten durch telemetrische Systeme zur Erde übertragen werden.

„Prognos“- und „OSO“-Satelliten lieferten schon eine Fülle von Informationen, speziell über die Vorgänge bei Sonneneruptionen. Sowjetische Wissenschaftler äußerten in diesem Zusammenhang die Erwartung, daß es in nicht allzu ferner Zukunft möglich sein wird, zu einer Art „Wetter“- oder „Unwetter“-Vorhersage über die Sonnenaktivität zu gelangen und damit gewisse Auswirkungen auf die Erde vorausszusehen. Mit „OSO 7“, zu dessen Ausrüstung auch kleinere Koronographensysteme für den Bereich des sichtbaren Lichts und des Ultraviolett gehörten, konnte am 13. Dezember 1971 an den Folgeerscheinungen in der Korona die Entwicklung einer ungeheuren Eruption verfolgt werden, die auf der Rückseite der Sonne vor sich ging. Wie der Leiter der Untersuchungen auf einer Pressekonferenz mitteilte, ließ sich die Stärke dieser außergewöhnli-



Sonnenforschungssatellit „OSO 7“ (USA)

a = raumstabil auf die Sonne orientierte Solarzellenfläche; b = mit a fest verbundene Sonnenforschungsinstrumente; c = rotierende Gerätesektion; d = ausfahrbare Meßsonde

chen Eruption mit der Explosivkraft von etwa hundert Millionen Wasserstoffbomben vergleichen. Die Energie der erzeugten Plasmawolken hätte bei Umwandlung in elektrische Energie ausgereicht, den gegenwärtigen Energiebedarf der USA für mehr als eine Million Jahre zu decken.

Die Erforschung der Sonne mit Raumflugkörpern ist aber nicht auf erdumkreisende Universal- und Speziaßatelliten beschränkt, auch andere unbemannte Raumflugkörper werden dafür genutzt. So sind die inter-

planetaren Raumsonden (zum Beispiel „Sonde“, UdSSR; „Pioneer“, USA) und die meisten für Planetenerkundungen eingesetzten Raumflugkörper mit Geräten ausgerüstet, die während des Fluges durch den interplanetaren Raum entweder „hauptamtlich“ oder nebenbei Messungen und andere Registrierungen über die dortigen physikalischen Verhältnisse vornehmen. Und diese Verhältnisse hängen ja ganz entscheidend von den Vorgängen auf der Sonne ab. Die Zusatzausrüstung von Planetensonden kann aber auch für direkte solare Untersuchungen bestimmt sein, wie im Falle der Anlage „Stereo“, die französische Wissenschaftler für einige der sowjetischen Planetensonden vom Typ „Mars“ entwickelten. Mit diesem Gerät wird die Ausbreitung solarer Radiostrahlen verfolgt, und zwar im Zusammenwirken mit gleichzeitig in Betrieb befindlichen Empfängern auf der Erde. Man erhält so von der räumlichen Ausbreitung der Radiowellen, die bei einer Eruption spontan entstehen, tatsächlich eine Art Stereobild.

Eine weitere Kategorie unbemannter Raumflugkörper, mit denen der direkten sonnenphysikalischen Forschung in den nächsten Jahren neue Wege erschlossen werden sollen, sind die *Sonnensonden*. Es handelt sich um Raumflugkörper, die in elliptische Sonnenumlaufbahnen gebracht werden, auf denen sie in den sonnennahen Raum jenseits der Merkurbahn vordringen können. Entsprechend den gegenwärtig verfügbaren Antriebsmitteln beabsichtigt man zunächst Sonnenannäherungen bis auf etwa 0,25 bis 0,15 AE; der zuletzt genannte Wert ist ungefähr gleich der Hälfte des Merkurabstands von der Sonne. Den Schwerpunkt der Forschungen mit interplanetaren Sonnensonden sollen die sonnenphysikalisch beeinflussten Erscheinungen im Übergangsbereich zwischen den äußersten Ausläufern der Korona und dem daran anschließenden interplanetaren Raum bilden. Die Messungen werden die Dichte und Strömungsrichtungen des solaren Plasmas, die Stärke der von den Plasmawolken mitgeführten Magnetfelder, Elektronen- und Protonenintensität, die Verteilungsdichte staubförmiger Materie sowie Stärke und Variationen der verschiedenen elektromagnetischen Strahlungen bei Eruptionen und Koronaprozessen erfassen.

Ein erstes Unternehmen dieser Art begann am 10. Dezember 1974 mit dem Start des „Helios A“ (BRD/USA). Diese Sonnensonde (374 kg) wurde in eine stark elliptische Umlaufbahn gebracht, die sie bis auf rund 0,3 AE (etwa 45 Millionen Kilometer) an das Zentralgestirn des Planetensystems heranführte. Die Umlaufzeit beträgt etwas über 6 Monate, und

im sonnennächsten Punkt der Bahn erreicht der Raumflugkörper eine Rekordgeschwindigkeit von rund 64 km/s. Das entscheidende technische Problem derartiger Projekte liegt in einem hinreichenden Temperaturschutz der wissenschaftlichen und technischen Ausrüstung des Raumflugkörpers bei großer Annäherung an die Sonne. In 0,3 AE Entfernung vom Zentralgestirn beträgt die Intensität der solaren Strahlung gegenüber dem Wert der irdischen Solarkonstanten schon das Elffache, bei Annäherung auf 0,1 AE steigt sie auf das Hundertfache. Für „Helios A“ ergibt sich im Perihel der Bahn eine Außentemperatur von etwa 300 °C, für einige Bauteile sogar bis etwa 700 °C.

Raumstationen als „Sonnenwarten“

Bisher war immer nur von unbemannten Raumflugkörpern als Hilfsmitteln der Sonnenforschung die Rede. Die großen Fortschritte der Raumflugtechnik ließen in letzter Zeit aber noch eine weitere Möglichkeit zur Praxis heranreifen, die in ihren theoretischen Umrissen schon vor Jahrzehnten von den Pionieren der Raumfahrt als einer der großen Wege zur Nutzanwendung der Raumflugtechnik erkannt wurde: die Idee, erdumkreisende *Raumstationen*, also dauerhafte bemannte Großsatelliten, unter anderem auch als Weltraumobservatorien einzusetzen. Raumfahrtforscher und -techniker wie *Konstantin Ziolkowski* (1857–1935), *Hermann Noordung*, *Hermann Oberth* und andere waren sich nach 1920 durchaus darüber im klaren, welche enormen Vorteile es der astronomischen Forschung bringen müßte, wenn man mit den Beobachtungsgeräten und Strahlungsempfängern einen Stützpunkt außerhalb der Erdatmosphäre beziehen könnte. Aus diesem Grunde entwarf auch der Österreicher Noordung im Jahre 1929 für das Projekt seiner aus drei separaten Einheiten bestehenden „Raumwarte“ eine davon ausschließlich als astronomisches Observatorium.

Betrachten wir Raumstationen nur als Instrumentenplattformen für extraterrestrische Weltraumforschung, so stellen sie funktionstechnisch nichts anderes dar als erweiterte Forschungssatelliten. Allerdings vervielfachen sich bei ihnen die betriebstechnischen Probleme durch das Mitfliegen einer Besatzung. Zweifellos bietet es verschiedene Vorteile, wenn der mit

einer bestimmten Forschungsaufgabe beschäftigte Wissenschaftler selbst unmittelbar an den im Weltraum befindlichen Instrumenten und Apparaturen arbeiten kann. Wegen der nicht unerheblichen Versorgungsprobleme bleibt aber zur Zeit die Frage doch noch offen, ob ständig bemannte Raumstationen tatsächlich die beste Lösung für astronomische Weltraumstützpunkte sind oder ob sie nicht von den zu erwartenden Resultaten her ebenso gut und hinsichtlich der technischen Ökonomie sogar besser durch entsprechend spezialisierte, halbautomatisch-ferngesteuerte Observatoriumssatelliten ersetzt werden können. Als weitere Möglichkeit bliebe noch der zeitweilige Besuch einer astronomischen Raumstation durch Raumfahrer, zum technischen Warten der Anlagen und Geräte sowie zum Auswechseln von Informationsspeichern (Filmen, Magnetbändern). Wir können diesen Problemen hier nicht weiter nachgehen, weil dazu recht komplizierte Raumflug- und andere verfahrenstechnische Fragen diskutiert werden müßten. Feststehen dürfte, daß auch in diesem Bereich die Fortschritte automatisierter und fernsteuerbarer Systeme eine wesentliche Rolle spielen werden. Insgesamt läßt sich aber heute noch keine verbindliche Prognose über die weitere Entwicklung auf diesem Gebiet abgeben.

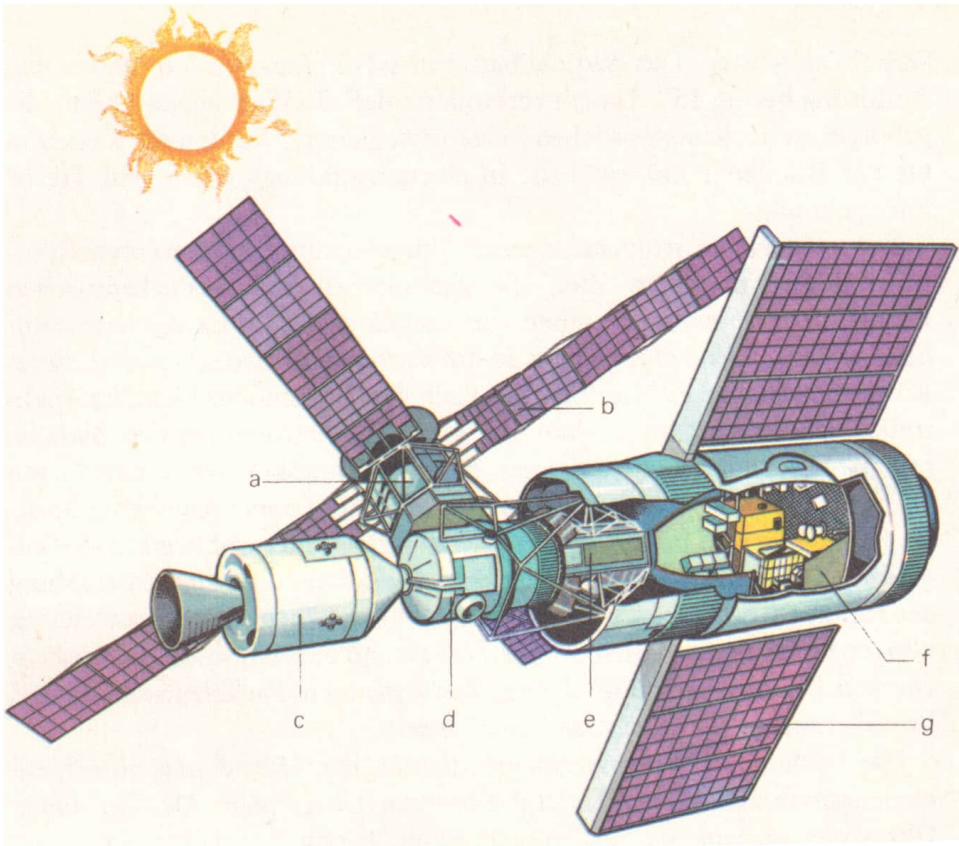
Die bisherigen Erfahrungen mit Raumstationen als Weltraumobservatorien stammen vor allem von dem Erprobungsbetrieb der ersten wissenschaftlichen Raumstationen der Erde, der sowjetischen Geräte vom Typ „Salut“ sowie des amerikanischen Systems „Skylab“. Ergänzende Ergebnisse lieferten die an Bord von Raumfahrzeugen der Typen „Sojus“ (UdSSR) und „Apollo“ (USA) vorgenommenen astro- beziehungsweise sonnenphysikalischen Untersuchungen.

Die im April 1971 gestartete sowjetische Raumstation „Salut 1“ (Bahnhöhe zwischen 200 und 220 km) wurde nach einer Vorauserprobungsphase 6 Wochen später von einer dreiköpfigen Besatzung (Georgi Dobrowolski, Wladislaw Wolkow, Wiktor Pazajew) mit dem Raumfahrzeug „Sojus 11“ angeflogen und als wissenschaftliche Station und experimentelles Laboratorium in Betrieb genommen. Der über 20 m lange „Salut“-Raumflugkörper hatte mit angekoppeltem „Sojus“-Raumfahrzeug eine Masse von etwas über 25 000 kg. Er bestand aus drei Hauptbaugruppen: einem Schleusentunnel, an dem sich auch das Kopplungsteil befand, einer großen Arbeitssektion (3 bis 4 m Durchmesser) und einem Antriebsmodul für Bahnkorrekturen. In dem Schleusentunnel waren unter anderem die Geräte des astrophysikalischen Beobachtungskomplexes „Orion“ instal-

liert, mit denen erstmalig die Beobachtung von Gestirnen unter Verwendung von Teleskopen an Bord einer Raumstation erprobt wurde. Die Untersuchungen umfaßten zwar ausschließlich Spektralaufnahmen von Gestirnen, lieferten aber auch wertvolle Hinweise für künftige sonnenphysikalische Instrumentierungen.

Die ersten speziellen sonnenphysikalischen Untersuchungen an Bord einer Raumstation bildeten einen wesentlichen Bestandteil des wissenschaftlichen Programms der „Skylab“-Besatzungen. Bei einer Gesamtlänge von 36 m hatte der im Mai 1973 gestartete Raumflugkörper in der Umlaufbahn (etwa 450 km Höhe) eine Masse von rund 88 000 kg. Das Stationssystem setzte sich aus 4 Hauptbaugruppen zusammen: einem Kopplungsmodul mit Ausstiegsluke, einer separaten Luftschleuse, einem großen Arbeits- und Aufenthaltsmodul (18 m Länge, 6,7 m Durchmesser) sowie einer in der Umlaufbahn seitlich neben den Kopplungsmodul geschwenkten Sonnenteleskopeinheit. Diese bestand aus einem achtseitigen offenen Zellengerüst, das einen 3,5 m hohen zylindrischen Gerätekanister (2 m Durchmesser) enthielt. In dem Behälter befanden sich, in 4 abgeteilten Sektionen, die Sonnenteleskope und die anderen Geräte. Die Instrumentenöffnungen konnten durch Deckel verschlossen werden. Der Ausrichtungsmechanismus arbeitete für den Grobbereich (4') wiederum mit Kreiselstabilisatoren (Drallrädern) und erreichte in der Feinsteuerung — mit Gleichstrommotoren im Schwenkrahmen — eine Genauigkeit von etwa 2"). Die Teleskopeinheit hatte eine eigene Stromversorgung durch Solarzellen, die auf 4 windmühlenflügelartigen Auslegern befestigt waren und eine Spitzenleistung von 10,5 kW erbrachten. Die Funktionskontrolle der Instrumente und die Feinsteuerung des Teleskopbehälters konnten die Astronauten-Wissenschaftler von einer Konsole aus vornehmen, die sich im Kopplungsmodul befand und die unter anderem auch zwei Projektionschirme aufwies, auf denen die von zwei 16-cm-Teleskopen gelieferten Sonnenbilder zu sehen waren.

Mit den „Skylab“-Instrumenten sollte in erster Linie der Energietransport in der Sonne erforscht werden. Aus diesem Grunde konzentrierten sich die insgesamt 8 Einzeluntersuchungen, zu denen 5 Teleskope verwendet wurden, auf die solare elektromagnetische Strahlung vom sichtbaren Bereich bis zum Röntgengebiet. Die beiden 16-cm-Instrumente waren mit Lyot-Filtern ausgestattet, und die Filme der angebauten Kameras zeigten hauptsächlich auf Eruptionen „angesetzte“ $H\alpha$ -Spektroheliogramme. Die



Aufbau der Raumstation „Skylab“ (USA)

a = Sonnenteleskopeinheit; b = Solarzellenausleger des Sonnentele-skops; c = „Apollo“-Raumfahrzeug; d = Kopplungsmodul; e = Schleusenmodul; f = Stationsräume; g = Solarzellenausleger der Raumstation

Kassetten mit den belichteten Filmen mußten von Zeit zu Zeit durch einen in den freien Raum aussteigenden Astronauten im Teleskopbehälter ausgetauscht werden. Diese Prozedur erforderten übrigens auch die Aufzeichnungsträger aller anderen Sonnenforschungsinstrumente.

Mit dem dritten Teleskop, einem Koronographen, wurde die innere Korona im Bereich des sichtbaren Lichts aufgenommen, um zu klären, ob es optische Erscheinungen gibt, die eine Wechselbeziehung zu den Radio-stürmen zeigen. Das Instrument war mit Zusatzblendscheiben ausgestattet, die sich an einem stabförmigen Ausleger etwa 2 m vor der Ko-ronographenoptik befanden und die zentrale Sonnenscheibe schon au-

ßerhalb abdeckten. Das Bildfeld hatte einen Durchmesser von rund 3° , die Auflösung betrug $15''$. Um zu verhindern, daß die Weltraumstrahlung die geborgenen hochempfindlichen Filme verschleierte, wurden die Kassetten bis zur Rückkehr auf die Erde in einem strahlungsgeschützten Tresor untergebracht.

Zwei weitere Instrumente dienten Untersuchungen der solaren Röntgenstrahlung mit dem Ziel, die thermischen und nichtthermischen Energieprozesse beim Entstehen von Fackeln und in diesem Zusammenhang auch den Energietransport in die Korona zu klären. Das eine dieser Röntgenteleskope bildete kleinere Teile der Sonnenoberfläche im Spektralbereich von 0,2 bis 1,0 nm ab, wobei die Astronauten den Bildausschnitt auf einem Fernsehschirm der Steuerungskonsole kontrollieren konnten. Das zweite Gerät erfaßte die gesamte Sonnenscheibe im Spektralbereich von 0,3 bis 6,0 nm, und zwar mittels Filter wahlweise in 6 Teilgebieten. Gegenstand der Untersuchungen waren die Röntgenstrahlung der ruhigen Korona, ferner die langsam veränderliche Röntgenstrahlung aktiver Koronagebiete über Sonnenflecken und Fackeln sowie die Ausbrüche von Röntgenstrahlung, die mit Radiostürmen, Fackelentstehung und Protuberanzenaufstiegen zusammenhängen.

Die beiden übrigen Instrumente dienten der Herstellung von Spektroheliogrammen im nahen und extremen Ultraviolett. Der im nahen Ultraviolett arbeitende Spektroheliograph lieferte 7 simultan auf einem Filmstreifen fixierte Sonnenbilder in ebenso vielen ausgewählten UV-Spektrallinien. Mit dem für das extreme Ultraviolett eingesetzten Gerät gewann man monochromatische Sonnenbilder aus zwei verschiedenen Tiefen der Chromosphäre. Zusätzlich wurde noch ein spezieller Chromosphärenspektrograph für Linienspektrogramme im gleichen Wellenlängenbereich verwendet. Übrigens wurden die von den Teleskop-Fernsehkameras für die Kontrollkonsole der Raumstation gelieferten Bildsignale gleichzeitig zur Erde übertragen, wo die Sonnenphysiker sie auswerteten. So konnten dem Astronauten, der das Teleskop bediente, auch Hinweise für die Wahl des Bildausschnitts oder ähnliches gegeben werden.

Schon die erste Besatzung (Charles Conrad, Dr. Joseph Kerwin, Paul Weitz) gewann während ihres 28tägigen Aufenthalts (Mai/Juni 1973) in der Raumstation, obwohl anfangs ernste Defekte in der Energieversorgung und Temperaturregelung des Systems auftraten, mit den verschiedenen

Instrumenten des Teleskopbehälters immerhin rund 30 200 Sonnenaufnahmen. Dazu gehörte auch die komplette Bildfolge einer Sonneneruption von 20 Minuten Dauer. Weitz entdeckte den beginnenden Ausbruch als winzigen Punkt von zehnfacher Helligkeit der Umgebung, der sich dann spiralförmig vergrößerte und schließlich in eine gigantische Explosion von Licht und Gasen überging. Während der zweiten, 59tägigen Besatzungsperiode (Alan Bean, Dr. Owen Garriott, Jack Lousma) von Juli bis September 1973 gelangen über 77 000 Aufnahmen mit den Sonnentelestopen, ein Rekord, der schließlich von der dritten Mannschaft (Gerald Carr, Dr. Edward Gibson, William Pogue) während ihres 84tägigen Fluges von November 1973 bis Februar 1974 mit etwa 90 000 Aufnahmen noch übertroffen wurde.

Am 26. Dezember 1974 brachten die sowjetischen Raumfahrtwissenschaftler den gegenüber seinen Vorgängern in vielen Punkten der Konstruktion und Ausstattung wesentlich weiter entwickelten Raumstationsmodul „Salut 4“ in die Umlaufbahn, dessen umfangreiche wissenschaftliche Ausrüstung spezielle Instrumente für die Sonnenforschung einschloß. Um die raumflugtechnischen Bedingungen zu verbessern, hatte man für den Stationsmodul die größere Bahnhöhe von 350 km gewählt. So wie schon „Salut 3“ (Juni 1974) war „Salut 4“ mit 3 großen, drehbar gelagerten Solarzellenflächen (etwa 4 kW Spitzenleistung) ausgestattet, die durch einen Steuerungsmechanismus ständig auf die Sonne ausgerichtet wurden, und zwar unabhängig von der räumlichen Lage des Stationsmoduls selbst. Diese Verfahrensweise ermöglichte es, die sonnenphysikalischen Beobachtungsgeräte optimal zu nutzen.

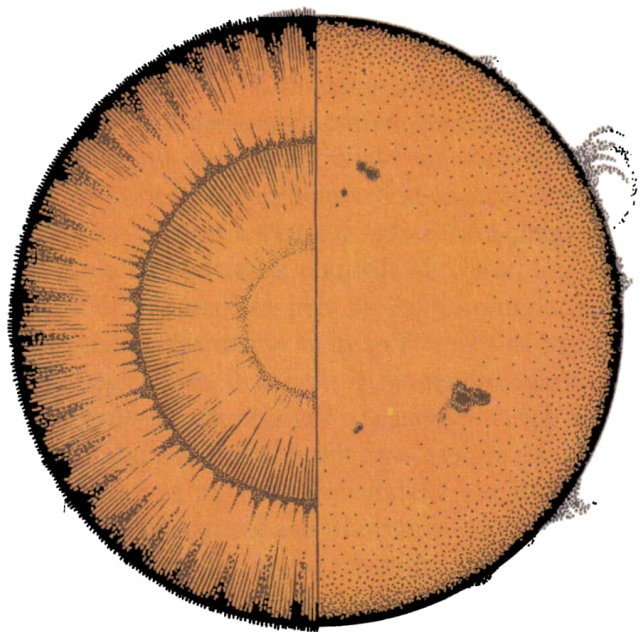
Die bemannte Arbeitsphase der wissenschaftlichen Raumstation „Salut 4“ begann nach dem Überstieg der Besatzung von „Sojus 17“ (Alexej Gubarjow, Georgi Gretschko), die am 11. Januar 1975 mit ihrem Raumfahrzeug gestartet war. Am 27. Januar setzten die Kosmonauten zum erstenmal das Sonnentelestoskop für Spektralaufnahmen ein. Sein Hauptspiegel hatte einen Durchmesser von 0,25 m und eine Brennweite von 2,5 m. Das Instrument war außenbords in einer kegelförmigen Nische untergebracht und somit vor Mikrometeoriten geschützt. Mit dem Teleskop wurden zunächst 34 Aufnahmen verschiedener Teilgebiete der Sonnenoberfläche gemacht. Die Kassette mit dem belichteten Filmmaterial holten die Kosmonauten nach Beendigung der Aufnahmen über eine Schleuse in die Station und brachten sie später in der Landekapsel von

„Sojus 17“ unter. Weitere Aufnahmen hielten im Ultraviolettbereich einzelne charakteristische Gebilde der Sonnenoberfläche fest, und mit einem speziellen Beugungsspektrometer wurde ebenfalls im Ultraviolett die Strahlungsintensität der ganzen Sonnenscheibe gemessen. Wie schon erläutert, geht es dabei immer wieder um die Schlüsselfrage nach dem Energietransport aus der Photosphäre beziehungsweise dem darunter liegenden subphotosphärischen Gebiet in die Korona, der sich in seinen komplizierten Folgeerscheinungen eben nur durch extraterrestrische Beobachtung voll erfassen läßt.

Die gründliche Auswertung dieses Materials wird die Sonnenphysiker sicher noch viele Jahre beschäftigen, und gesicherte Ergebnisse werden demzufolge erst in einiger Zeit vorliegen. Das gilt auch für die Entdeckung von rätselhaften „Löchern“ in der Korona, für die man zunächst überhaupt keine Erklärung findet. Insgesamt haben die „Salut“- und „Skylab“-Erfahrungen jedoch eindeutig bewiesen, daß die extraterrestrischen Forschungsmethoden einen wichtigen Weg zur Lösung der komplizierten sonnenphysikalischen Probleme eröffnen.

Diese sonnenphysikalischen Untersuchungen an Bord von „Salut 4“ fanden ihre systematische Fortsetzung im Programm der nachfolgenden Stationsbesatzung. Am 24. Mai 1975 starteten Pjotr Klimuk und Witali Sewastjanow mit „Sojus 18“, und zwei Tage danach koppelten sie ihr Raumfahrzeug mit dem Stationsmodul. Das Sonnenteleskop und die verschiedenen Zusatzanlagen für Untersuchungen in speziellen Spektralbereichen (Infrarot, Ultraviolett, Röntgenstrahlung) lieferten umfangreiches Ergänzungsmaterial zu den von Gubarjow und Gretscho zur Erde gebrachten Aufnahmen und Registrierungen.

Sternenfeuer im Sonnenkern

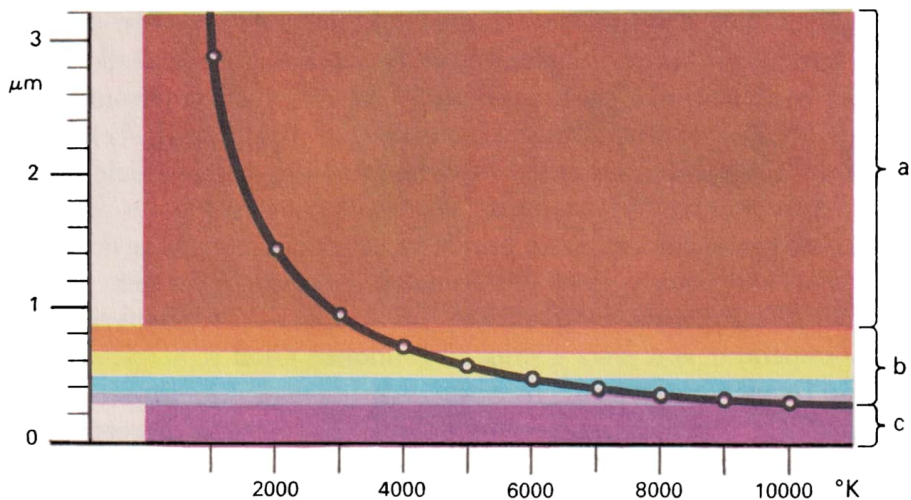


Das Rätsel der Sonnenenergie wird gelöst

Wenn es bisher um sonnenphysikalische Probleme ging, war ausschließlich von Erscheinungen und Vorgängen die Rede, die sich in den äußeren Regionen der Sonne vollziehen. Sehen wir einmal von der als tiefstes „Stockwerk“ optisch noch zugänglichen, im solaren Maßstab aber nur hauchdünnen Photosphäre ab, die wir bekanntlich als Oberfläche des eigentlichen Sonnenkörpers auffassen können, so betrafen alle Feststellungen das physikalische Geschehen in der „Wetterküche“ der Sonnenatmosphäre. Eine wesentliche Rolle spielt dabei zweifellos die Tatsache, daß mit keinem der bekannten Beobachtungsverfahren direkte Informationen aus der Tiefe des Sonnenkörpers zu gewinnen sind. Der Schlüssel zum gigantischen Energiehaushalt der Sonne, die Energiequelle des ganzen sonnenphysikalischen Geschehens aber kann nur im Innern der Sonne zu suchen sein. Die naive mittelalterliche Hypothese, die den Energienachschub der Sonne durch das Hineinstürzen und Verbrennen von Kometen und planetarischen Körpern deuten wollte, brauchen wir hier wohl kaum zu entkräften.

Will man die Natur der Sonne und den physikalischen Mechanismus ihrer kosmischen Beziehungen, bis hin zu solar-terrestrischen Folgeerscheinungen, umfassend verstehen lernen, so wird die Beschäftigung mit der Frage „wie's da drinnen aussieht“ zu einer Grundvoraussetzung. Da es jedoch unmöglich ist, den Aufbau des Sonneninnern direkt zu erforschen, bleibt nur der Weg über wissenschaftlich begründete Schlußfolgerungen von den allgemeinen physikalischen Eigenschaften der Sonne, einschließlich der energetischen Verhältnisse an ihrer Oberfläche, auf die Beschaffenheit des Innern und die dort ablaufenden Prozesse. Korrekt gehandhabt, führt dieses Verfahren durchaus zu verlässlichen Vorstellungen über die Verhältnisse innerhalb des kosmischen Glutgasballs.

Es kommt somit darauf an, ein theoretisches Modell des Sonnenaufbaus zu konstruieren, das einerseits von der allgemeinen Gültigkeit physikali-



Lage des Helligkeitsmaximums im Spektrum von Sternen mit verschiedener Oberflächentemperatur

a = Infrarotbereich; b = sichtbares Licht; c = Ultraviolettbereich;
S = Sonne

scher Grundgesetze (Thermodynamik und andere) ausgeht und andererseits die zu beobachtenden Eigenschaften des Sonnenkörpers (Oberflächentemperatur, Größe und Konstanz der Strahlungsleistung) hinreichend genau wiedergibt. In dieser Weise verfährt man überhaupt in der Astrophysik bei der Erforschung des Aufbaus der Fixsterne, zu denen ja schließlich auch die Sonne zählt. Da diese als Muster einer ganzen Gruppe sonnenähnlicher Sterne angesehen werden kann, bietet sie dem Astrophysiker wegen ihrer großen Nähe einzigartige Möglichkeiten zu tiefgehenden Detailuntersuchungen. Auch aus diesem Grund hat die Sonnenforschung für die astronomische Wissenschaft außerordentliche Bedeutung.

Maßgebliche Größen für den Entwurf eines Sternmodells bilden die Masse und die Leuchtkraft. Die von der Sonne in jeder Sekunde ausgestrahlte Energie, also ihre Leuchtkraft, haben wir bereits genannt, sie beträgt $3,90 \cdot 10^{23}$ kW. Daraus ergibt sich eine Strahlungsleistung pro Quadratcentimeter der Sonnenoberfläche von 6,41 kW. Die energieerzeugenden Mechanismen im Sonneninnern müssen demnach ständig diese ungeheuren Strahlungsverluste ausgleichen. Wir haben auch schon von dem notwendigen mechanischen Gleichgewicht im Innern des Sonnenkör-

pers gesprochen. Das heißt, an jedem Punkt der Sonne müssen die nach innen gerichtete Gravitationskraft und der nach außen wirkende Druck der heißen Gase genau gleich groß sein. Und dieser Zustand muß schon seit etlicher Zeit bestehen, sonst hätte die Sonne nicht über die bekannten langen Zeiträume die weitgehend gleiche Strahlungsleistung liefern können. Geht man nun von dieser zwingenden Voraussetzung des mechanischen Gleichgewichts aus, so kommt man – unter Einbeziehung der Daten für Masse und Durchmesser der Sonne – rechnerisch zu dem für alle weiteren Überlegungen maßgeblichen Resultat, daß im Sonnenkerngebiet eine Temperatur von etwa 15 bis 20 Millionen Grad K herrscht. Diese enorme Temperatur ist nämlich erforderlich, um einen Gasdruck zu erzeugen, der dem ungeheuren Gravitationsdruck hinreichend entgegenwirkt. Unter diesen Bedingungen erhält man außerdem für das Kerngebiet der Sonne eine Dichte von etwa 100 g/cm^3 . Dort hätte also ein Materievolumen von der Größe einer Streichholzschachtel unter irdischen Verhältnissen das Gewicht von etwa 1 kp.

Welche physikalischen Prozesse vermögen nun über sehr große Zeiträume hinweg bei so enormer Temperaturentwicklung ständig den Nachschub für die riesige Energieabstrahlung der Sonne zu liefern? – Noch vor rund 50 Jahren war man nicht in der Lage, diese Frage verbindlich zu beantworten. Andererseits hatten sich aber schon vor etwa 120 Jahren die Physiker *Hermann von Helmholtz* (1821–1894) und *William Thomson* (*Lord Kelvin*, 1824–1907) mit ihr beschäftigt. Bei dem Versuch, eine Erklärung zu finden, gingen sie von der bis heute für die Theorie der Sternentstehung wichtigen, weil grundlegenden Voraussetzung aus, daß sich die Sonne durch das ständige Zusammenziehen ihrer Gasmassen bis zur beobachteten Strahlungsleistung aufheizen könnte. Eine solche durch die Gravitation bewirkte Kontraktion (lat. *contrahere* = zusammenziehen) wäre aber, wie Helmholtz und Thomson herausfanden, lediglich imstande, den Energiebedarf der Sonne für insgesamt etwa 25 Millionen Jahre zu decken. Dem widerspricht jedoch die Zeitskala der Erdentwicklung. Noch eindrucksvoller ist vielleicht das Ergebnis einer anderen Rechnung, die allerdings von vornherein nicht als ernsthafter Beitrag zur wissenschaftlichen Diskussion des Problems gewertet werden will. Gehen wir davon aus, daß die Sonne (über 300 000 Erdmassen!) aus bester Kohle besteht, so würde deren Verbrennung nur für den äußerst bescheidenen Zeitraum von rund 8000 Jahren reichen.

Die Lösung des Rätsels Sonnenenergie wurde schließlich 1938 durch Untersuchungen der Physiker *Hans Albrecht Bethe* und *Carl Friedrich von Weizsäcker* eingeleitet. Sie fanden, daß als ausreichend ergiebige Quelle für die ungeheure Energieentwicklung einer Fixsternsonne einzig das Freiwerden der in den Atomkernen gebundenen Energien in Frage kommt. Den beiden Forschern gelang dann auch die Darstellung der speziellen kernphysikalischen Prozesse, die im Innern eines Fixsterns ablaufen und die notwendige Energieausbeute liefern. Dabei gingen sie in der Hauptsache von der einleuchtenden Annahme aus, daß die Sonne sowie die anderen Fixsterne zum überwiegenden oder zumindest großen Teil aus Wasserstoff bestehen.

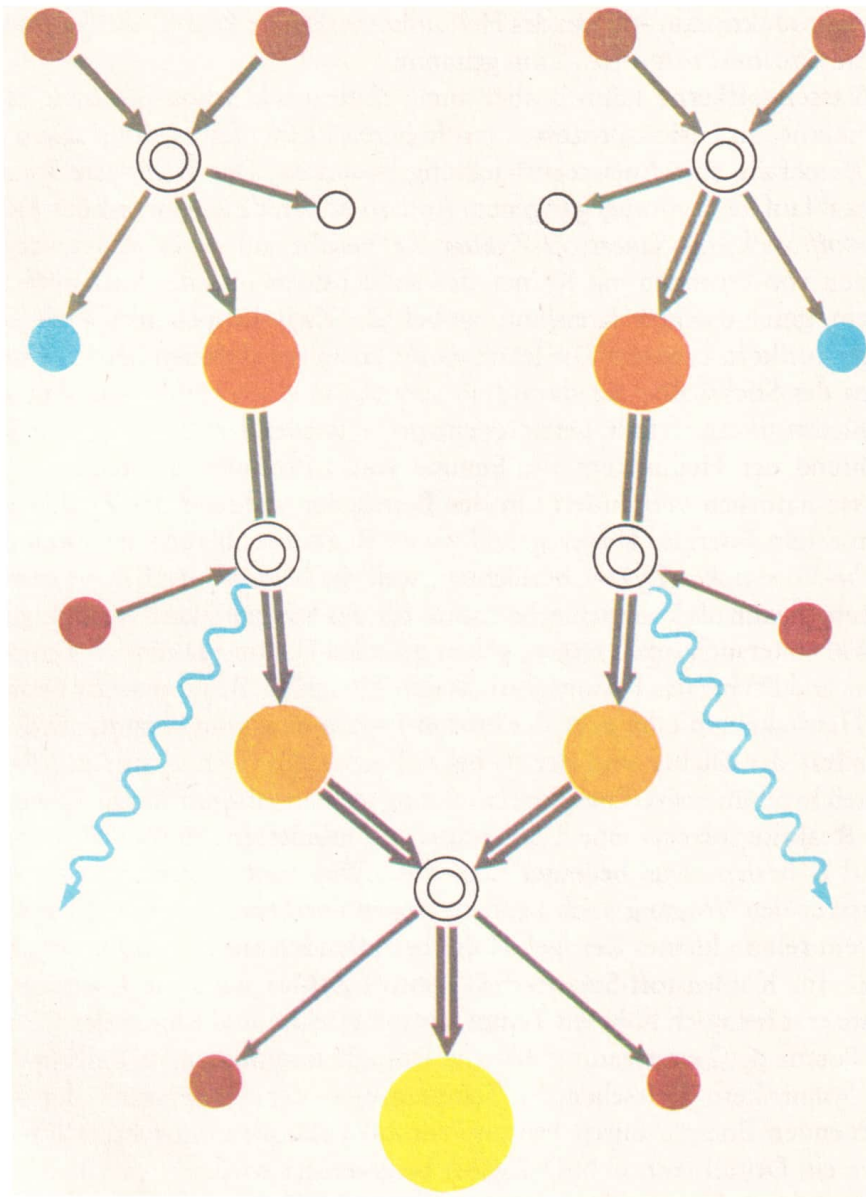
Nachdem *Ernest Rutherford* (1871–1937) im Jahre 1911 den ersten Entwurf eines Atommodells geliefert hatte, war man bis 1938 schrittweise zu einem schon recht detaillierten Bild vom Aufbau des Atomkerns und der bei kernphysikalischen Prozessen auftretenden Energie gekommen. Eine entscheidende Rolle spielte dabei das 1905 von Albert Einstein in seiner speziellen Relativitätstheorie formulierte *Prinzip der Äquivalenz von Masse und Energie* (lat. *aequus* = gleich, *valere* = gelten). Es besagt, daß einer Masse m eine Energie E nach der Beziehung $E = m c^2$ gleichwertig ist, wobei c den Zahlenwert für die Lichtgeschwindigkeit (300 000 km/s) darstellt. Wie wir daraus ersehen, lassen sich bei einer Umwandlung von Masse in Energie – beides also äquivalente Erscheinungsformen der Materie – tatsächlich enorme Energiebeträge erhalten. Eine solche Umwandlung verläuft in Form der Bildung hochenergetischer elektromagnetischer Strahlung, die sozusagen die reinste Art der Energie ist. Ein einziges Gramm Masse würde nach der Einsteinschen Energiegleichung bei vollständiger Zerstrahlung ein Energieaufkommen von rund 25 Millionen Kilowattstunden ergeben. Nach diesem Prinzip wäre es somit durchaus möglich, den Energiebedarf der gesamten Erdbevölkerung mit nur wenigen Kilogramm Masse pro Jahr zu decken.

Die Wirkung des Äquivalenzprinzips läßt sich aber auch unter „normalen“ kernphysikalischen Bedingungen erkennen. Wie man zur Zeit der Entdeckung Bethes und Weizsäckers schon längst wußte, kann man sich den Aufbau der Atomkerne im Periodensystem der Elemente als Zusammentreten einer durch die Ordnungszahl des betreffenden Elements und dessen Atomgewicht festgelegten Anzahl von Protonen und Neutronen vorstellen. Protonen sind bekanntlich die Atomkerne des am Anfang dieses

Systems stehenden Elements Wasserstoff. Es zeigt sich jedoch, daß die Atomgewichte der Elemente, die man durch rein zahlenmäßige Addition der Einzelmassen von Protonen und Neutronen erhält, nicht mit den tatsächlichen übereinstimmen; die wahren Atomgewichte sind kleiner. Beispielsweise beträgt für einen aus je zwei Protonen und Neutronen aufgebauten Heliumkern der Massenunterschied 0,03028 Einheiten. Man bezeichnet diese Differenz als *Massendefekt*. Sein Betrag ist – gemäß der Einstein-Gleichung – das Äquivalent für die Energie, die bei der Bildung des schwereren Atomkerns in Form von Strahlung frei wird. Eine *Kernfusion* (lat. fusio = Verschmelzung) ist demzufolge grundsätzlich mit dem Auftreten von Strahlung verbunden, die ihrerseits wieder in der umgebenden stofflichen Materie zum größten Teil in Wärmeenergie umgewandelt wird. Dieses bemerkenswerte Naturprinzip, wonach beim Aufbau komplizierterer Atome Energie freigesetzt und nicht etwa verbraucht wird, stellt im übrigen – neben der Gravitation – den Schlüssel für die gesamte Entwicklung im Kosmos dar.

Bethe und Weizsäcker nahmen nun bei ihren kernphysikalischen Überlegungen ein hauptsächlich aus Wasserstoffkernen oder Protonen bestehendes Fusionsplasma als Ausgangsmaterial an, in dem bei Temperaturen von mehreren Millionen Grad K sowie hohen Dichten die Protonen zu Kernen des nächsthöheren Elements Helium aufgebaut werden. Die dem Massendefekt äquivalente Energie sollte dann nach ihrer Ansicht ausreichen, in Form von Strahlung und Wärme den Energiehaushalt der Fixsterne zu decken. Das heißt, so viel Energie, wie die Sonne in jeder Sekunde abstrahlt, muß durch Masseumwandlung in ihrem Innern wieder nachgeliefert werden. Rechnen wir ihre Strahlungsleistung in den gleichwertigen Massendefekt um, dann kommen wir zu dem recht eindrucksvollen Ergebnis, daß die Sonne in jeder Sekunde 4,3 Milliarden Kilogramm an Masse verliert. Diese phantastisch anmutende Zahl braucht jedoch nicht zu beunruhigen; denn selbst nach 10 Milliarden Jahren beträgt der Verlust noch nicht mehr als rund 0,07 Prozent der heutigen Sonnenmasse.

Als das Prinzip klar war, bemühten sich die beiden genannten Physiker und nach ihnen noch zahlreiche andere Wissenschaftler vor allem darum, kernphysikalische Mechanismen nachzuweisen, die unter den in der Sonne herrschenden Bedingungen Wasserstoff-Fusionsprozesse zulassen. Man kam dabei auf verschiedene mögliche Reaktionsabläufe. Der einfachste führt von einer Reaktion zwischen zwei Protonen stufenweise über Zwi-



Ablauf der Proton-Proton-Reaktion (schematisch)

Rot: Protonen; Doppelkreis: instabile Zwischenprodukte; Kreis: Neutrinos;
 blau: Positronen; orange: Deuteriumkerne; Wellenlinie: Gammastrahlung;
 dunkelgelb: ^3He -Isotop; hellgelb: Heliumkern

schenprodukte zum Aufbau des Heliumkerns. Dieser Prozeß wird entsprechend *Proton-Proton-Reaktion* genannt.

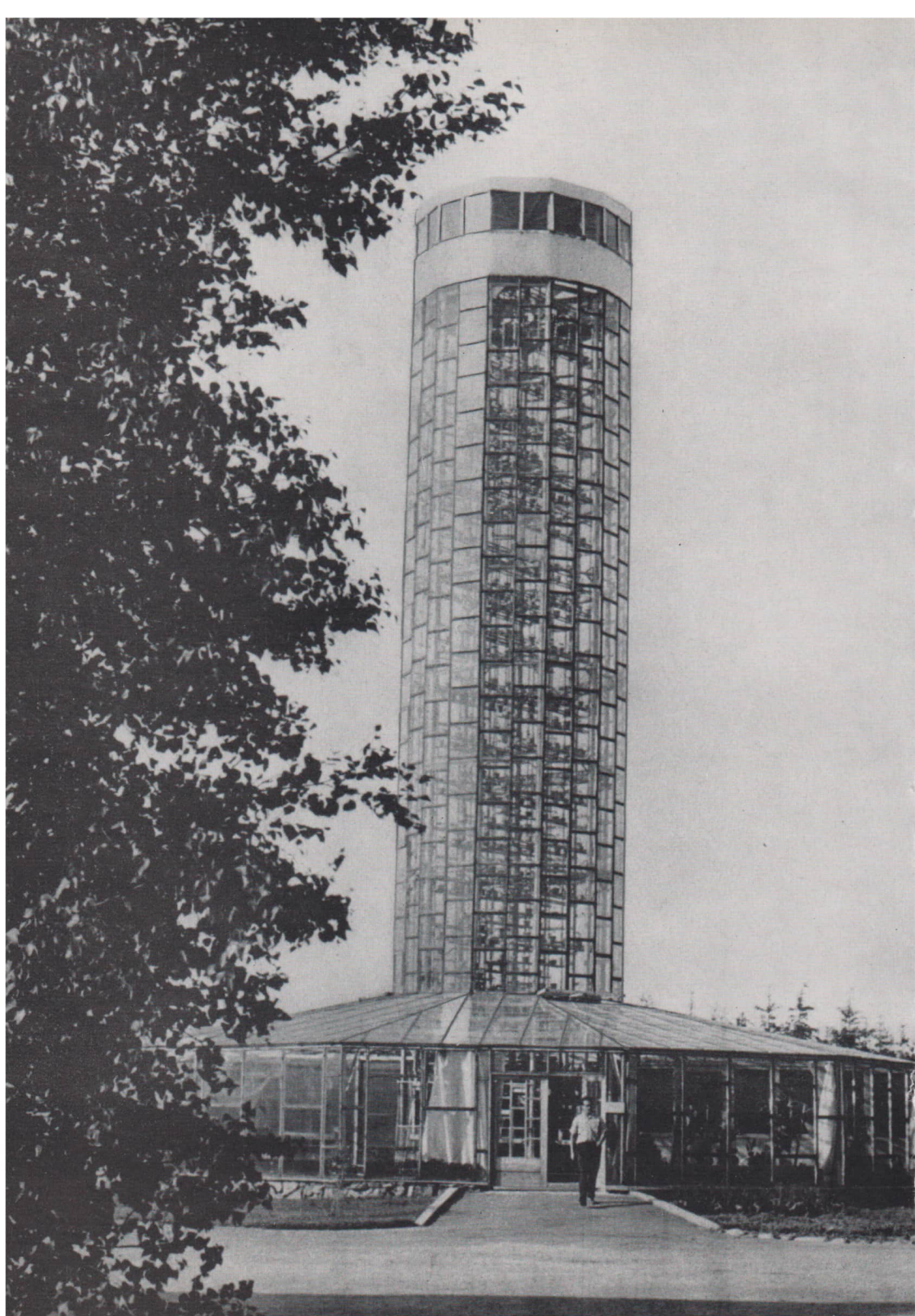
Wasserstoffkerne können aber auch, ebenso wie schon gebildete Heliumkerne, an Fusionsprozessen mit höheren Elementen beteiligt sein und so gleichfalls eine Energieentwicklung bewirken. Der wichtigste Reaktionsablauf nach vorangegangenem Aufbau höherer Elemente ist der *Kohlenstoff-Stickstoff-Sauerstoff-Zyklus*. Er beruht auf einer stufenweisen Fusion von Protonen mit Kernen des Kohlenstoffs und des Stickstoffs in einem geschlossenen Kreislauf, wobei als Zwischenprodukt auch ein Sauerstoffkern entsteht. Die letzte dieser Fusionsreaktionen betrifft einen Kern des Stickstoffs, der daraufhin spontan in einen Helium- und einen Kohlenstoffkern zerfällt. Letzterer entspricht wieder dem Anfangsprodukt, während der Heliumkern die Summe von 4 Protonen darstellt, in der Masse natürlich vermindert um den Betrag der während des Zyklus abgestrahlten Energie. Dieser geschlossene Reaktionsablauf wird auch als *Bethe-Weizsäcker-Zyklus* bezeichnet, weil die beiden Forscher die ersten waren, die ihn als Energiemechanismus für das Sternenninnere vorschlugen.

Wie Untersuchungen zeigen, geben bei allen Fusionsreaktionen Temperatur und Dichte des Fusionsplasmas den Ausschlag. Beispielsweise nimmt die Häufigkeit, mit der es zu der Proton-Proton-Reaktion kommt, mit dem Quadrat der Dichte und der 4. bis 6. Potenz der Temperatur zu. Eine hinreichend intensive Energieentwicklung ist übrigens nur möglich, wenn das Reaktionsplasma eine Temperatur von mindestens einigen Millionen Grad K besitzt. Das bedeutet, daß das „Wasserstoffbrennen“, wie die Physiker den Vorgang auch nennen, wegen der Temperaturabhängigkeit auf ein relativ kleines Kerngebiet des betreffenden Sterns beschränkt sein muß. Im Kohlenstoff-Stickstoff-Sauerstoff-Zyklus wird die Energieausbeute erst bei noch höheren Temperaturen effektiv und ist von der 15. bis 20. Potenz der Temperatur abhängig. Deshalb nimmt man an, daß bei den im Sonnenkern herrschenden Temperaturen der Hauptanteil der frei werdenden Energie durch Proton-Proton-Reaktionen entsteht, während etwa ein Drittel vom C-N-O-Zyklus beigesteuert wird.

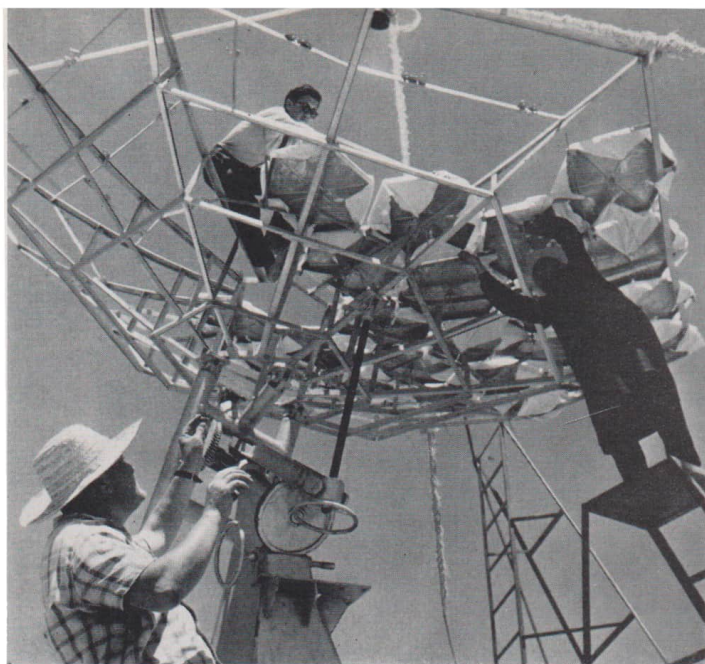
Nachdem wir nun von dem maßgeblichen Einfluß extrem hoher Temperaturen auf den Verlauf von Kernfusionen wissen, erhebt sich die Frage, wie denn überhaupt ein solcher Prozeß, beispielsweise das Wasserstoffbrennen in einem Fixstern, ausgelöst werden kann. Woher kommt die erforderliche „Zündtemperatur“?



Doppelbrennlinse, um 1690 von Walter von Tschirnhaus für Friedrich Böttgers Schmelzversuche zur Porzellanherstellung gebaut (Staatlicher Mathematisch-Physikalischer Salon Dresden)



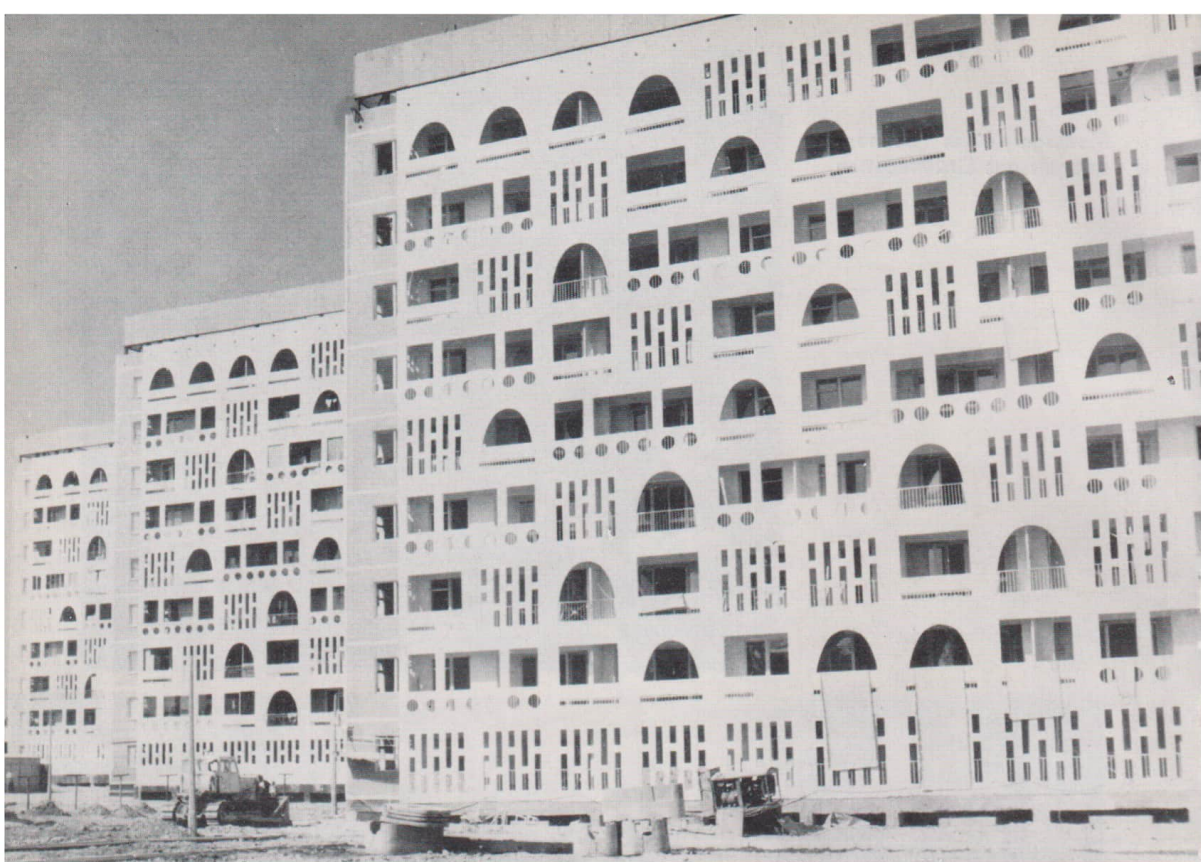
Montage eines Sonnen-
spiegels aus Einzelfacetten



Sonnenlicht belebt die
Natur



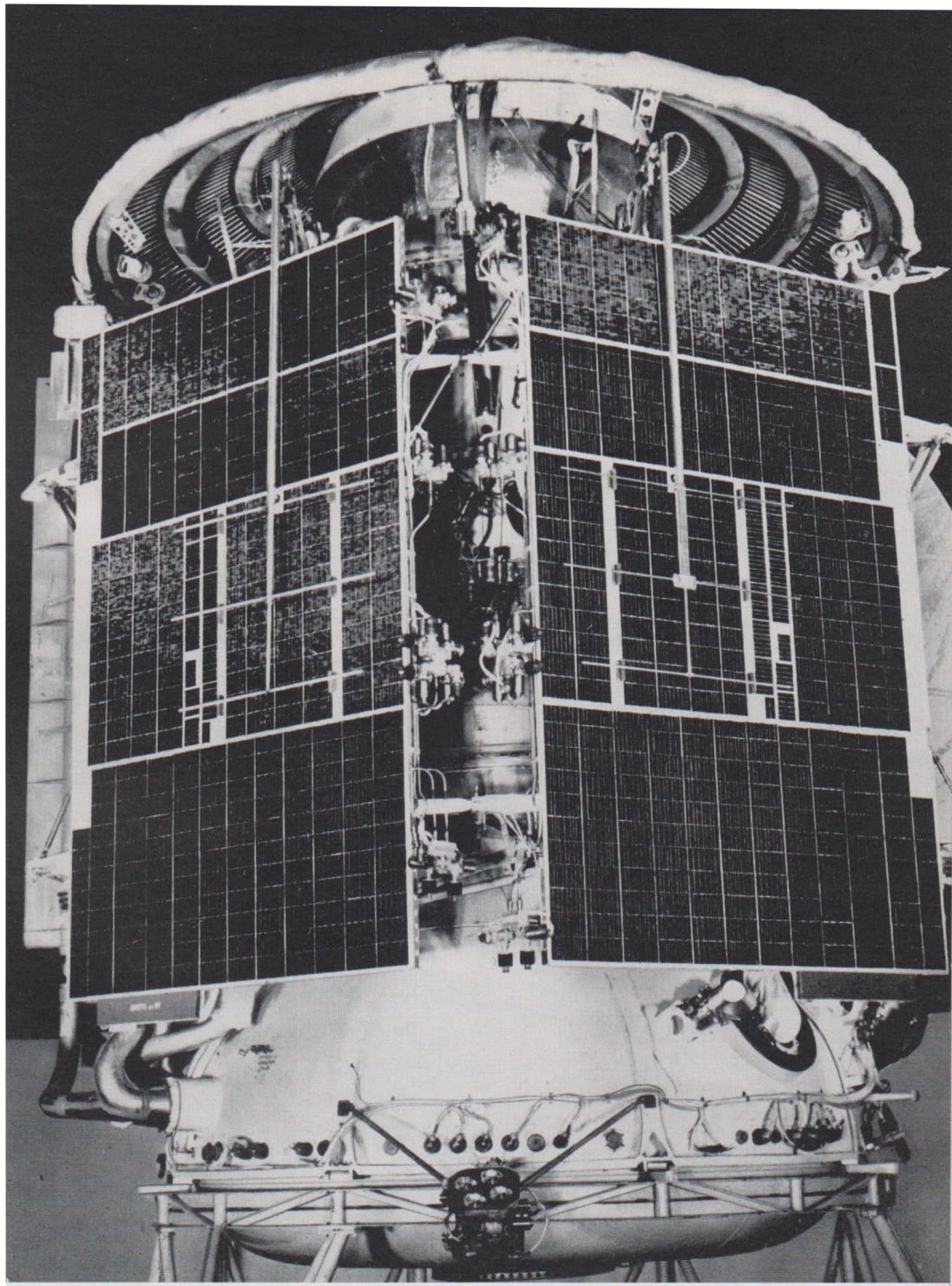
◀ „Etagen“-Gewächshaus im Experimentalsowchos von Malspils
(Lettische SSR)



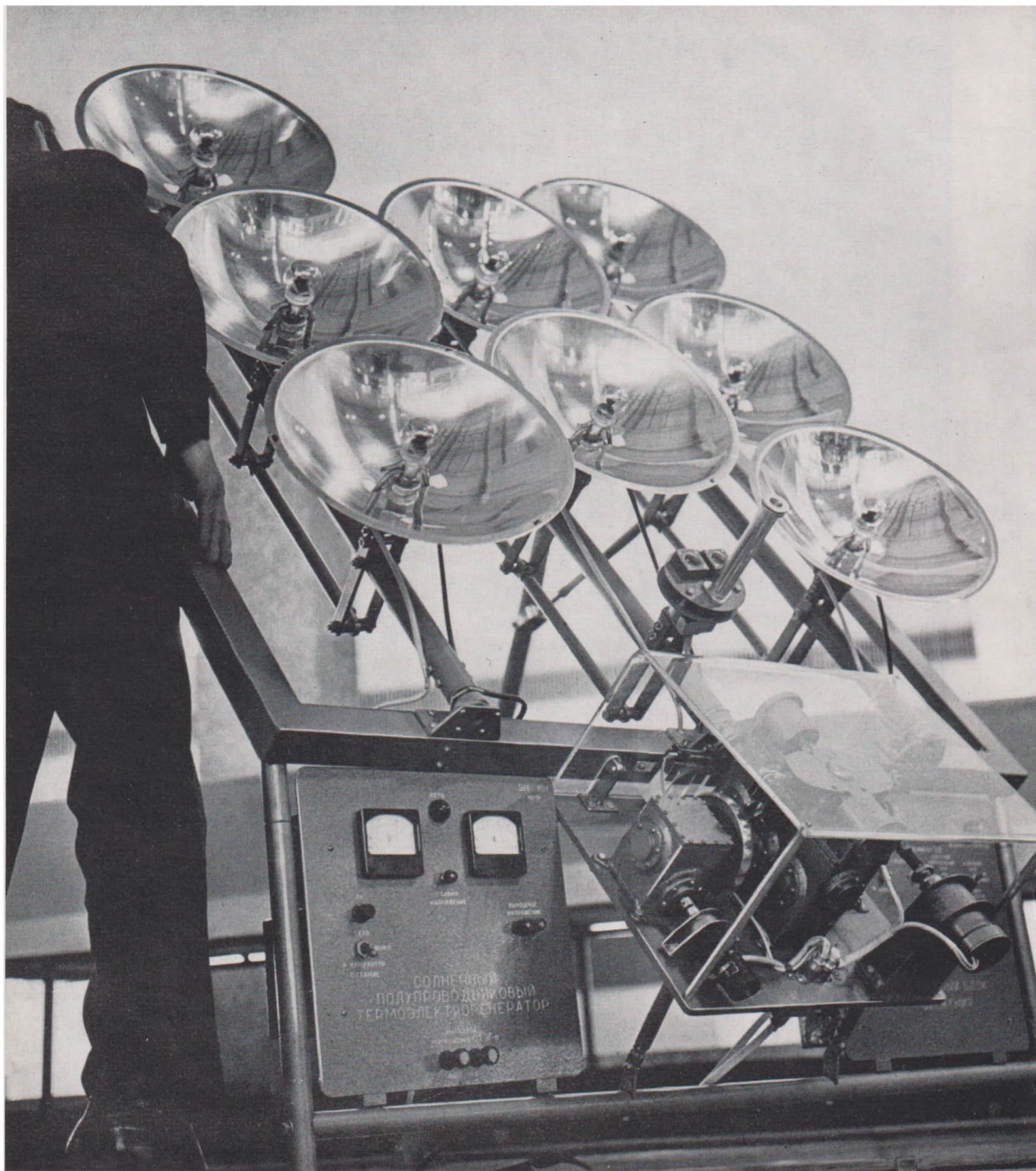
Wohnhäuser in Taschkent; durch die Bauweise sind die Wohnungen gegen die heißen Sonnenstrahlen abgeschirmt



Sonnenküche auf der Volkswirtschaftsausstellung der Kasachischen SSR



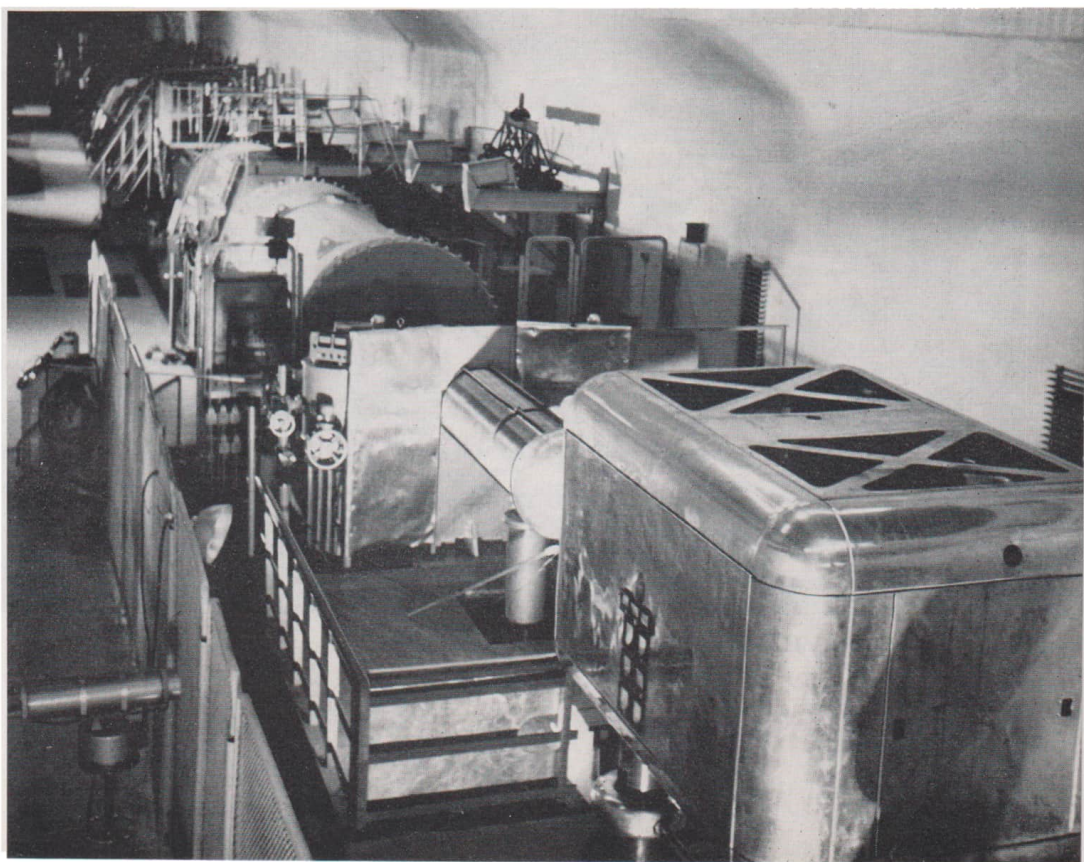
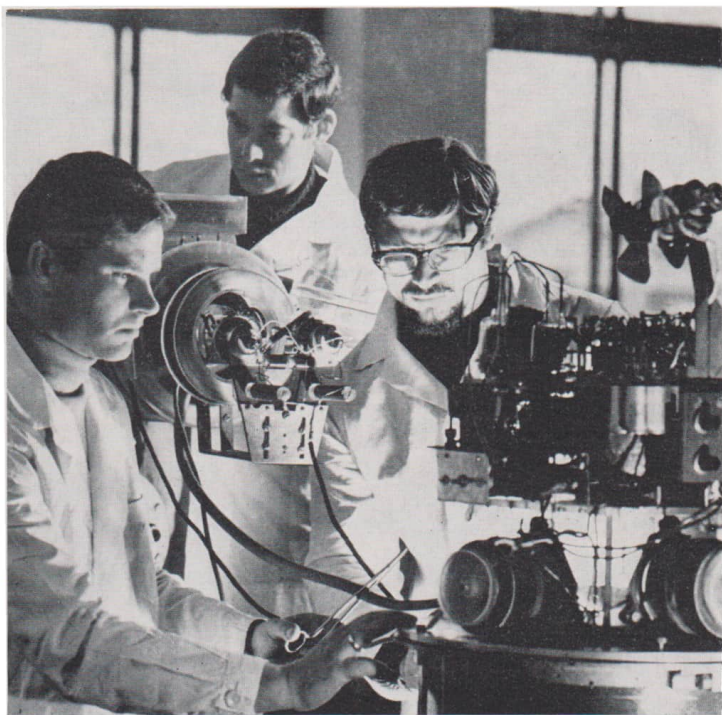
Planetensonde „Mars 3“ mit angelegten Solarzellenflächen



Sonnen-Elektrogenerator des Forschungsinstituts „G. Krshishanowski“ in Moskau mit Energiewandlern auf Halbleiterbasis

Kernphysikalische Labora-
toriumsversuche an der
Universität Kiev

Grundlagenforschung zur
energietechnischen Beherr-
schung der Kernfusion wird
am Allunionsinstitut für
Physik der hohen Energien
in Serpuchow (Moskauer
Gebiet) mit großen Teil-
chenbeschleunigern betrie-
ben



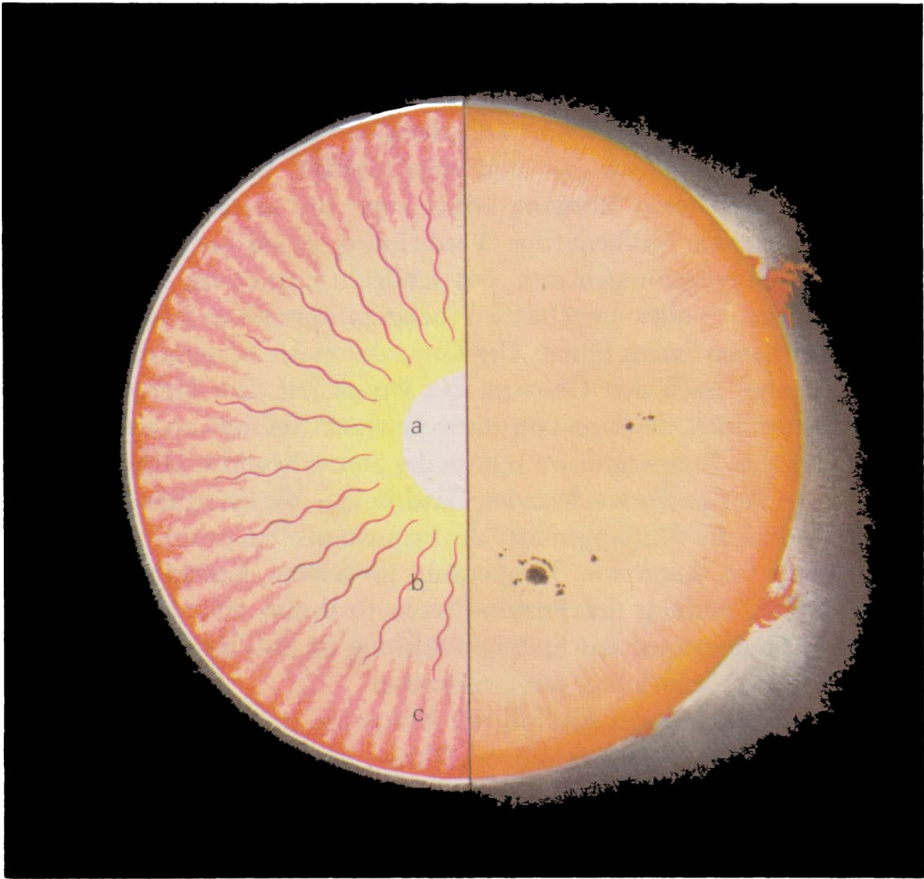


Millionen kleine Sonnen funkeln auf den Wellen

Mit dieser Frage werden Grundprobleme der Sternentwicklung berührt, von denen uns hier jedoch nur jene Details interessieren sollen, welche sich speziell auf die Sonne beziehen. Wir müssen von der heute allgemein vertretenen Annahme ausgehen, daß die Sonne – wie auch die übrigen Fixsterne – aus gas- und staubförmiger interstellarer Materie entstanden ist. Diesen Vorgang können wir uns etwa folgendermaßen vorstellen: Lokale wolkenartige Verdichtung ergab ein immer stärker wirksames Gravitationszentrum, das schließlich zu einem fortlaufenden Zusammenziehen aller umgebenden lockeren Materie und damit zur Bildung eines neuen Sterns führte. Die Kontraktion der Materie eines jungen Sterns ist aber nach den Gesetzen der Physik mit dem Freiwerden von Energie verbunden, die dann von einem gewissen Stadium an ein ständiges Zunehmen der Temperatur im Innern des Sterns bewirkt. Dabei verlangsamt sich – infolge des wachsenden Gasdrucks – die Kontraktion allmählich, und wenn die Ausgangsmasse des Protosterns (lat. *proto* ... = vor ...) groß genug ist, kann die Temperatur in seinem Kerngebiet schließlich die zur Zündung der Proton-Proton-Reaktion erforderliche Höhe erreichen. Hauptmotor der Sternentwicklung ist also im Grunde die allgemeine Massenanziehung, die Gravitation.

Wie entscheidend der Einfluß der Masse ist, zeigt sich am weiteren Entwicklungsweg eines Protosterns. Beträgt dessen Masse beispielsweise nur 0,07 bis 0,09 Sonnenmassen, so kann er niemals zu einem echten Fixstern werden. Durch Kontraktion kommt es zwar in seinem Innern zu einer gewissen Temperaturerhöhung, sie reicht jedoch nicht aus, um ein Wasserstoffbrennen auszulösen. Eine solche „verhinderte Sonne“ kühlt nach einiger Zeit – unter zunehmender Verdichtung im Innern und ohne zum Leuchten gekommen zu sein – durch ständige Wärmeabstrahlung wieder ab. Ein Protostern dagegen, der eine Masse zwischen etwa 0,1 und maximal 1,5 Sonnenmassen hat, durchläuft verschiedene Stadien der Energieentwicklung und wird dabei zu einem Objekt mit sehr heißer, leuchtender Oberfläche. Sterne, die ihr Dasein mit mehr als 1,5 Sonnenmassen beginnen, verlieren ihre mechanische Stabilität, was in den meisten Fällen mit Masseverlusten durch Abstoßen gasförmiger Materie verbunden ist.

Wenn wir die bisher aufgeführten Forschungsergebnisse zusammenfassen, erhalten wir ein Gesamtbild, das eine Vorstellung von der Beschaffenheit einer typischen Fixsternsonne vermittelt, aber auch die grundlegenden



Schematischer Schnitt durch das Sonneninnere (links)
 a = Kerngebiet mit Fusionsreaktionen; b = Gebiet des Energietransports
 durch Gamma- und Röntgenstrahlung; c = Gebiet des Energietransports
 durch Plasmaströmungen

Faktoren zeigt, deren Kenntnis zum Verständnis der komplizierten Ursachen physikalischer Einwirkungen der solaren Vorgänge auf die Erde notwendig ist.

Die Sonne stellt also einen gigantischen „Atomofen“ dar, in dessen Innern durch Kernfusionsprozesse – als Wasserstoffbrennen, vorwiegend auf Proton-Proton-Basis – unter Masseverlust ständig enorme Energiemengen frei werden. Die Reaktion ist in der Hauptsache auf ein verhältnis-

mäßig kleines Kerngebiet (15 bis 20 Millionen Grad K; 100 Milliarden kp/cm^2 ; 100 g/cm^3) beschränkt. Aus der Kernzone gelangt die Energie innerhalb einer dickeren Schale (einige $100\,000 \text{ }^\circ\text{K}$; etwa $1,0 \text{ g/cm}^3$) zunächst in Form von Strahlung – vornehmlich hochenergetischer Gamma- und Röntgenstrahlung – unter ständigem Wechsel von Absorption und Emission in die äußeren Regionen des Sonnenkörpers. In einer Tiefe von rund $0,1$ Sonnenradien unter der Oberfläche beginnt eine Kugelschale (etwa $100\,000 \text{ }^\circ\text{K}$; $0,01 \text{ g/cm}^3$), in welcher der Energietransport aus physikalischen Gründen nicht mehr allein durch Strahlung erfolgen kann. Von hier an „brodeln“ die gasförmige Sonnenmaterie, das heißt, vertikale Wärmeströmungen transportieren einen Teil der Energie. Diese Form des Energietransports bezeichnet man als Konvektion und das Gebiet in der Sonne demzufolge als *Wasserstoff-Konvektionszone*. In ihren oberflächennahen Bereichen beginnt auch die Ausbildung von Stoßwellen. Darüber liegt die Photosphäre, in der sich die Wärmeströmungen als Granulation fortsetzen und die Stoßwellenprozesse ihre volle Entwicklung erfahren und an Bedeutung gewinnen.

Über die physikalischen Bedingungen in der nach außen anschließenden Sonnenatmosphäre haben wir schon ausführlich gesprochen, so daß wir hier auf eine gesonderte Zusammenfassung verzichten können. Wichtig ist die Feststellung, daß bei dem Geschehen im Sonneninnern Vorgänge mitwirken, die sich sozusagen dem inneren Aufbau des „ruhigen“ Sonnenmodells überlagern und jene Erscheinungen verursachen, welche der Begriff „Sonnenaktivität“ umschließt. Quelle des Mechanismus der gestörten Sonne ist mit ziemlicher Sicherheit die differentielle Rotation des Sonnenkörpers, die in der hochionisierten Sonnenmaterie durch Wirbelströmungen der geladenen Teilchen (Elektronen, Ionen) großräumige Magnetfelder entstehen läßt. Deren Wirkungen können bis in die Korona und darüber hinaus verfolgt werden. Die ganze Vielfalt der aus dem Innern der Sonne in den kosmischen Raum übertragenen physikalischen Prozesse und Wechselwirkungen ist jedoch auch heute noch nicht zu erfassen. Dabei wird gerade die weitere Erforschung der Sonnenaktivität und ihrer Folgeerscheinungen im kosmischen Raum zu einem dringenden Erfordernis der modernen Weltraumforschung, weil sich in den bisherigen Ergebnissen immer stärker Zusammenhänge zwischen dem „unnormalen“ Geschehen auf der Sonne und physikalischen Wirkungen im erdnahen Raum und auf der Erde selbst abzeichnen.

Wie sind Sonne und Planeten entstanden?

Ehe wir näher auf die wichtigsten Beziehungen zwischen Sonne und Erde eingehen, müssen wir uns noch einen ungefähren Überblick über die heutigen Ansichten zur Entstehung und frühen Entwicklung des Gesamtsystems der Sonne mit ihren Planeten verschaffen; denn nur vor dem kosmogonischen Hintergrund – die Lehre von der Entstehung der Weltkörper bezeichnet man als *Kosmogonie* – läßt sich vieles am gegenwärtigen Bild der kosmischen Beziehungen zwischen diesen Weltkörpern deuten.

Vorausgeschickt sei, daß alle, selbst die modernsten wissenschaftlichen Ansichten über das Entstehen des Sonnensystems schon von ihren Grundzügen her mehr oder weniger hypothetisch sind. Eine allgemein befriedigende Theorie zu diesem Problem gibt es bisher noch nicht. Die Schwierigkeiten zeigen sich vor allem, wenn es gilt, Besonderheiten des Systems als Ganzes sowie spezifische Eigenschaften der einzelnen Weltkörper zu erklären. So ist die Entstehungsgeschichte des Sonnensystems weit schwerer zu durchschauen als die Entstehung und Entwicklung einer Fixsternsonne allein. Andererseits kann sie jedoch nur im engen Zusammenhang mit der Kosmogonie der Fixsterne gesehen werden, und gerade diese Verbindung birgt noch sehr viele ungeklärte Fragen. Dabei ist es naturgemäß außerordentlich problematisch, von dem heutigen Erscheinungsbild des Sonnensystems auf Zustände in seiner Frühphase zu schließen. Und Fortschritte in Richtung einer ernstzunehmenden Theorie sind nicht zuletzt deswegen so schwer zu erzielen, weil der Wissenschaft noch immer kein Vergleichsmaterial über andere Planetensysteme zur Verfügung steht. Bis heute kennt sie mit der notwendigen Sicherheit nur die Daten und feineren Einzelheiten eines einzigen – eben unseres eigenen – Planetensystems. Von diesem einen Fall allgemeingültige Prinzipien für den Mechanismus des Entstehens von Planetensystemen ableiten zu wollen stößt zwangsläufig auf große Schwierigkeiten und führt mitunter zu Fehlinterpretationen und grundsätzlichen Irrtümern. Auch in den fortgeschrittensten Hypothesen bleibt daher noch immer vieles offen, oder es werden besondere Bedingungen vorausgesetzt, um bestimmte Tatbestände innerhalb des Gesamtbildes erklären zu können.

Unter den kosmischen Hypothesen gibt es zwei Hauptgruppen. Die einen nehmen eine gleichzeitige Entstehung von Sonne und Planeten aus derselben Ursubstanz an, die anderen besagen, daß die Planeten erst nach

einer gewissen Entwicklung der Sonne entstanden seien. Eine weitere Unterteilung geht daraus hervor, ob sich die planetaren Körper auf „kaltem“ oder „heißem“ Wege gebildet haben. Letzteres ist gleichbedeutend mit der Frage, ob die Ursubstanz staubförmige, meteoritische oder aber gasförmige Beschaffenheit besaß.

Die ersten kosmogonischen Hypothesen über das Sonnensystem gehen auf *Immanuel Kant* (1724–1804) und *Pierre-Simon Laplace* (1749–1827) zurück. Kant entwarf 1755 das Bild eines auf „kaltem“ Wege aus einer Wolke staubförmiger Materie mit allen Körpern zugleich entstandenen Sonnensystems, Laplace vertrat 1796 die Ansicht einer „heißen“ Entstehung der Planeten aus einer Ursonne, die aus einer durch Rotation abgeflachten Gaswolke hervorgegangen wäre. Als die Rotationsgeschwindigkeit infolge der Kontraktion der Gaswolke wuchs, hätten sich von der Ursonne nacheinander Gasringe gelöst, aus denen sich schließlich die Planeten bildeten. Die kosmogonischen Überlegungen Kants finden sich in fast allen modernen Hypothesen wieder.

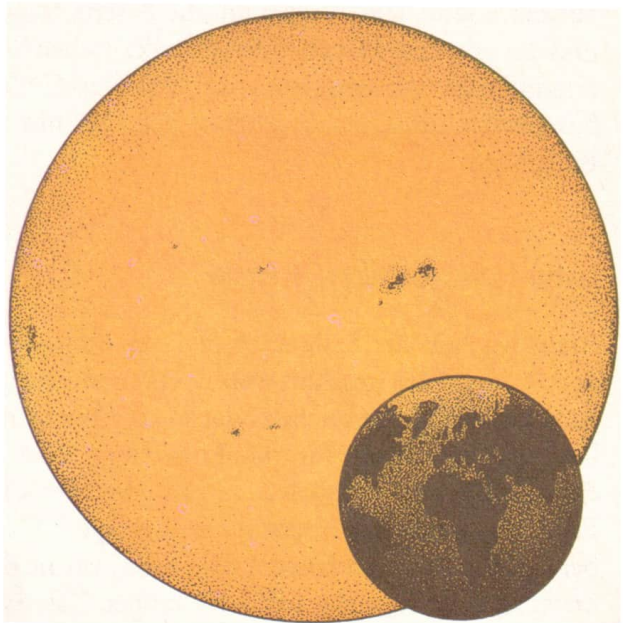
Ein „Außenseiter“ blieb dagegen bis heute die Katastrophen-Hypothese des englischen Astrophysikers *James Jeans* (1877–1946), nach der die Entstehung des Planetensystems die Folge eines Zufalls wäre. Ursache sollte der fast streifende Vorbeigang eines anderen Sterns an unserer Sonne gewesen sein, wobei durch Gravitationswirkungen eine Fontäne gasförmiger Materie aus ihr herausgerissen wurde, die in Verdichtungen zerfiel, aus denen sich dann die Planeten bildeten. Verschiedene grundlegende physikalische Einwände schließen diese Hypothese jedoch praktisch aus.

Im übrigen würde die äußerst geringe Wahrscheinlichkeit eines solchen nahen Zusammentreffens zweier Fixsternsonnen die Entstehung unseres Planetensystems zu einer extrem seltenen kosmischen Erscheinung machen. Wie aber die gegenwärtig verfügbaren astrophysikalischen Kenntnisse und theoretischen Einsichten ziemlich klar zeigen, müßte die Herausbildung von Planetensystemen eine durchaus häufiger anzutreffende Entwicklungsphase im Lebensweg sonnenähnlicher Sterne sein. Nach unterschiedlich optimistischen Abschätzungen ist innerhalb unseres Milchstraßensystems immerhin mit einigen hunderttausend bis etlichen Millionen Planetensystemen zu rechnen. Wie viele unter diesen Systemen auch erdähnliche Planeten einschließen, die in allen notwendigen Einzelheiten die Voraussetzung für die Entstehung und Entwicklung von Leben erfüllen – darüber gehen allerdings die Ansichten noch weit auseinander.

Auch in den modernsten Überlegungen zur Kosmogonie des Sonnensystems stehen sich „heiße“ und „kalte“ Entstehungsmechanismen gegenüber. Allerdings sind sich beide Richtungen über die grundlegende Bedeutung eines physikalischen Prinzips einig, von dem man vor einigen Jahrzehnten noch keine oder nur unklare Vorstellungen hatte und das eine Verbindung zwischen den Entwicklungsprozessen einer Sonne und der Entstehung eines Planetensystems herstellt. Gemeint ist eine Wirkung, die von den Wechselbeziehungen zwischen strömenden elektrisch geladenen Teilchen und Magnetfeldern ausgeht und *magnetohydrodynamischer Effekt* genannt wird. Mit seiner Hilfe läßt sich die bei allen kosmogonischen Erklärungsversuchen auftauchende Frage beantworten, warum die Sonne, obwohl sie 99,8 Prozent der Masse des Sonnensystems umfaßt, nur 2 Prozent des Gesamtdrehimpulses auf sich vereint, während die Planeten mit ihrer Umlaufbewegung 98 Prozent des Drehimpulses repräsentieren. Diese merkwürdige Drehimpulsverteilung stellte lange Zeit eines der schwierigsten Probleme in der Kosmogonie des Sonnensystems dar.

Gehen wir von den modernen physikalischen Erklärungsversuchen aus, so entstand während der Frühphase der Herausbildung des Systems durch Kontraktion gasförmiger Materie die Ursonne, in der sich nach einiger Zeit durch Strömungen der geladenen Teilchen des Hochtemperaturplasmas ein starkes zentrales Magnetfeld ausbildete. Die in der Umgebung verbliebene, zunächst scheibenartige Ansammlung gasförmiger Restsubstanz wurde durch die zunehmend intensivere Sonnenstrahlung ionisiert, also in geladene Gasteilchen verwandelt und wirkte für die „mitdrehenden“ Magnetfeldlinien der schnell rotierenden Sonne wie eine magnetohydrodynamische „Bremse“. Man könnte, stark vereinfacht, auch sagen, die entsprechend den Keplerschen Gesetzen langsam umlaufenden ionisierenden Teilchen verhielten sich gegenüber den Feldlinien wie eine zähe Flüssigkeit. So ging der Drehimpuls der Zentralmasse allmählich als „Antrieb“ auf die Bahnbewegung der Planeten über, die etwa in der gleichen Zeit aus der Scheibenmaterie entstanden. Eine gewisse Bestätigung dieser Vorstellungen sieht man in dem allgemein bei Fixsternen anzutreffenden Rotationsverhalten, welches darauf schließen läßt, daß auch diese kosmischen Gaskörper über einen bestimmten Entwicklungsablauf hinweg stark drehimpulsmindernden Einflüssen unterliegen. Hier wäre als Ursache der Rotationsbremsung ebenfalls die Entstehung eines Planetensystems denkbar.

Sonne und Erde



Der Weg, den die Vorstellungen von der Sonne im Laufe der Jahrhunderte nahmen, läßt den tiefgreifenden Wandel erkennen, den der unaufhaltsam fortschreitende Einfluß praktischen Denkens und naturwissenschaftlicher Erkenntnis bewirkte. So wurde die Sonne von einem vorwiegend optischen Erscheinungsbild in Mythologie und Sternenkult zu einem Maßstab für Zeitrechnung und Kalenderwesen und schließlich zu einem körperhaften Objekt mit physikalischen Eigenschaften. Sie erhielt ihren Platz als Zentralgestirn eines ganzen Systems entwicklungsgeschichtlich mit ihr verbundener und von ihr abhängiger kosmischer Körper, zu denen auch unsere Erde zählt. Daraus erwuchs die ständig vertiefte Einsicht in die enge kosmische Verbindung des Lebens auf der Erde mit dem Geschehen in und auf der Sonne. Das Wissen um die Beschaffenheit des Weltkörpers Sonne und der von ihm ausgehenden physikalischen Wirkungen ist demnach eine unerläßliche Voraussetzung für das Verständnis der damit zusammenhängenden irdischen Erscheinungen, bis hin zu den Einflüssen auf die Biosphäre.

Lebensmotor für die Erde

Alles, was auf der Erde nach Herausbildung der Litho-, der Hydro- und der Atmosphäre geschah und noch geschieht, geht in energetischer Hinsicht auf den maßgeblichen oder sogar alleinigen Einfluß der Sonne zurück. Das gilt vor allem für die Entstehung und Entwicklung des Lebens, einschließlich seiner höchsten Form, des Menschen. Die von der Sonne zur Erde als Strahlung übertragene Energie ist seit Jahrmillionen der Lebensmotor unseres Planeten. Die Eigenwärme der Erde (Vulkanismus und anderes) hat dagegen seit sehr langer Zeit nur einen vernachlässigbar

geringen Anteil. Alle Vorgänge in der Atmosphäre und in der Hydrosphäre, die wir unter anderem auch als die physikalische Ausgangsbasis der Entwicklung von Leben auf der Erde ansehen müssen, werden ebenso durch Aufnahme von Sonnenenergie unterhalten, wie der Energiehaushalt (Atmung, Nahrungsumsatz) aller Lebewesen in erster Linie auf dem Zustrom solarer Energie beruht.

In diesem Zusammenhang erhebt sich die Frage, ob die Entfernung zwischen Erde und Sonne für das Zustandekommen der Anfangsbedingungen zur Entwicklung von organischen Lebensformen wesentlich ist, oder, mit anderen Worten, welchen Spielraum die Strahlungsintensität der Sonne für das Entstehen lebenbegünstigender Voraussetzungen auf einem erdähnlichen Planeten bietet. Der durch vorteilhafte Strahlungsverhältnisse ausgezeichnete Raum in der Umgebung der Sonne wird als deren *Ökosphäre* bezeichnet. Wie verschiedene Untersuchungen ergaben, schließt die solare Ökosphäre an ihrem inneren Rand gerade noch den Planeten Venus ein und am äußeren den Planeten Mars, wobei die Bedingungen in diesen Randgebieten schon keineswegs mehr optimal sind.

Die Untersuchung der Abhängigkeit des Naturgeschehens auf der Erde von Einflüssen der Sonne, vor allem des Zusammenhangs solarer Störungen mit Reaktionen im terrestrischen Bereich, entwickelte sich zu einem Arbeitsgebiet von hohem wissenschaftlichem Interesse. Das ist gut zu verstehen – ermöglichen doch die so gewonnenen Erkenntnisse vielfältige praktisch nutzbare Einsichten. Dabei werden die wissenschaftlichen Bemühungen, die Verbindungen innerhalb der kosmischen Kette Sonne – Erde – Leben – Menschheit aufzudecken, um so schwieriger, je weiter zum Ende dieser Kette hin Einzelheiten erklärt werden sollen. Viele der vorhandenen Zusammenhänge deuten sich vorerst nur vage an oder lassen sich aus verschiedenen objektiven Gründen sehr schwer erfassen beziehungsweise aus überlagernden Effekten kaum „herausschälen“. Andere zeichnen sich dagegen heute schon genauer ab und sind Gegenstand breit angelegter internationaler Forschungsprogramme. Letzteres gilt vor allem für die kosmische Physik, also dort, wo jene physikalischen Verbindungen zwischen Sonne und Erde liegen, welchen wir schon mehrfach unter dem Begriff „solar-terrestrische Beziehungen“ begegnet sind.

Energietransport durch Wellen und Teilchen

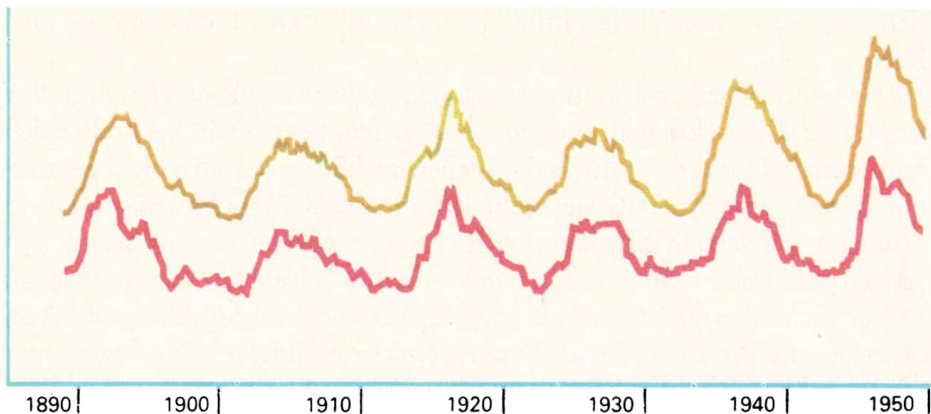
Die Energieübertragung von der Sonne zur Erde geschieht durch beide Kategorien von Strahlung, allerdings überwiegt die elektromagnetische Wellenstrahlung weit die Teilchenstrahlung. Die solare elektromagnetische Strahlung breitet sich geradlinig durch den Raum aus, erreicht also die Erde auf kürzestem Weg, und zwar infolge der Ausbreitungsgeschwindigkeit von rund 300 000 km/s in etwa 8,3 min. In ihr sind alle Wellenlängen vertreten, von der kurzwelligsten Gammastrahlung bis zur langwelligen Radiofrequenzstrahlung; das Intensitätsmaximum liegt im Bereich des sichtbaren Lichts. Der Gesamtenergiestrom wird durch die Solarkonstante ausgedrückt, deren zunächst als echt konstant angenommener Betrag sozusagen die gleichförmige Basis des energetischen Einwirkens der Sonne auf die Erde bildet. Kurzzeitige Intensitätserhöhungen in Teilbereichen des Strahlungsspektrums (zum Beispiel Ultraviolett, Radiostrahlung) gehen auf solare Störungen zurück, und ihr Beitrag zur Gesamtstrahlung ist keinesfalls ausschlaggebend.

Wesentliche Mechanismen werden von der solaren Wellenstrahlung schon in der Hochatmosphäre ausgelöst; daran ist vor allem die kurzwellige Strahlung beteiligt. Die Absorption dieser Strahlung in der Hochatmosphäre führt zu Dissoziationsprozessen (lat. *dissociatio* = Trennung), bei denen sich atomarer Sauerstoff und Stickstoff bilden, daneben aber auch zur Ionisation der atmosphärischen Gase. Die so entstehende *Ionosphäre* (etwa 60 bis 500 km Höhe) stellt einen hochwirksamen Schutzmantel der Erde gegen energiereiche solare Wellenstrahlung dar. Das gilt noch mehr für die etwa zwischen 30 und 50 km Höhe liegende *Ozonschicht*, welche die kurzwellige Ultraviolettstrahlung absorbiert und dadurch zu einem unbedingt notwendigen Schutzfilter für alles Leben auf der Erde wird. Ein totaler Ausfall dieser atmosphärischen Schicht würde eine in sehr kurzer Zeit wirksam werdende tödliche Bedrohung für pflanzliche und tierische Organismen bedeuten. Ob und wieweit diese Energieabsorptionen in der Hochatmosphäre das gesamte Kräftespiel in der Erdatmosphäre, bis hin zur Wetterbildung, beeinflussen, darüber besteht heute noch keine Klarheit. Da sie nicht sehr groß sind, hält man bestenfalls gewisse Steuerungsfunktionen für möglich. Ungeklärt blieb bisher auch, ob die Solarkonstante tatsächlich unveränderlich ist. Kurz- und langzeitige Änderungstendenzen scheinen angedeutet. Selbst wenn sie nur geringfügig sind, können sie

dennoch einige merkliche Einflüsse auf Wetter und Klima der Erde ausüben.

Die solare Teilchenstrahlung transportiert zwar nicht soviel Energie zur Erde, ihre Auswirkungen sind jedoch trotzdem beachtlich. Sie breitet sich naturgemäß langsamer aus als die Wellenstrahlung und auch nicht geradlinig. Hinzu kommt, daß sie nicht als annähernd gleichförmiger Strom erscheint, sondern in ihrer Gesamtintensität – abgesehen von einem gewissen Grundbestandteil – recht beträchtlichen Schwankungen unterliegt. Dieser Grundbestandteil ist ein ständiger Strom von Strahlungsteilchen, überwiegend Protonen, der als *Sonnenwind* bezeichnet wird und sozusagen die fortwährend in den Weltraum übergehende Koronamaterie darstellt. In den mit etwa 300 bis 500 km/s dahinströmenden Sonnenwind sind wolkenförmige Verdichtungen von Strahlungsteilchen eingelagert, die mit höheren Geschwindigkeiten durch den Weltraum fliegen. Ihr Entstehen verursachen die Prozesse der gestörten Sonne, also die Sonnenaktivität.

Wir können somit davon ausgehen, daß die Sonnenaktivität bei beiden Kategorien solarer Energieträger die Rolle eines überlagernden Störfaktors spielt. Nun sind es aber gerade die Folgen dieser Störungen im Sonnengeschehen, denen die Wissenschaft in der Hauptsache den Anstoß zur Beschäftigung mit den solar-terrestrischen Beziehungen verdankt. Man fand nämlich sehr bald heraus, daß offensichtlich enge Verbindungen zwischen der Sonnenaktivität, beispielsweise dargestellt durch die Kurve der Fleckenrelativzahlen, und geophysikalischen Erscheinungen bestehen. Das gilt unter anderem für das Auftreten von *Polarlichtern*, die zu Zeiten von Sonnenfleckemaxima in beträchtlich erhöhter Anzahl und Intensität zu beobachten sind, und zwar gewöhnlich 1 bis 2 Tage nach Durchgang einer besonders großen oder aktiven Fleckengruppe durch den Zentralmeridian der Sonnenscheibe. Ähnliche Zusammenhänge zeigten sich zwischen der Kurve der Fleckenrelativzahlen und den Veränderungen des Erdmagnetfeldes (erdmagnetischen Variationen). Diese *Magnetfeldstörungen* können sich während starker Sonnenaktivität zu *Magnetstürmen* steigern, als deren Folge in höheren geographischen Breiten oftmals schwere Störungen in Telegrafien- und Kraftstromanlagen auftreten. Nach Erfindung der drahtlosen Telegrafie und des Rundfunks bemerkte man ferner Behinderungen der Funkwellenausbreitung, die eindeutig mit der Sonnenaktivität zusammenhängen. Die bekannteste Erscheinung ist der plötzliche Totalschwund beim Kurzwellenempfang.

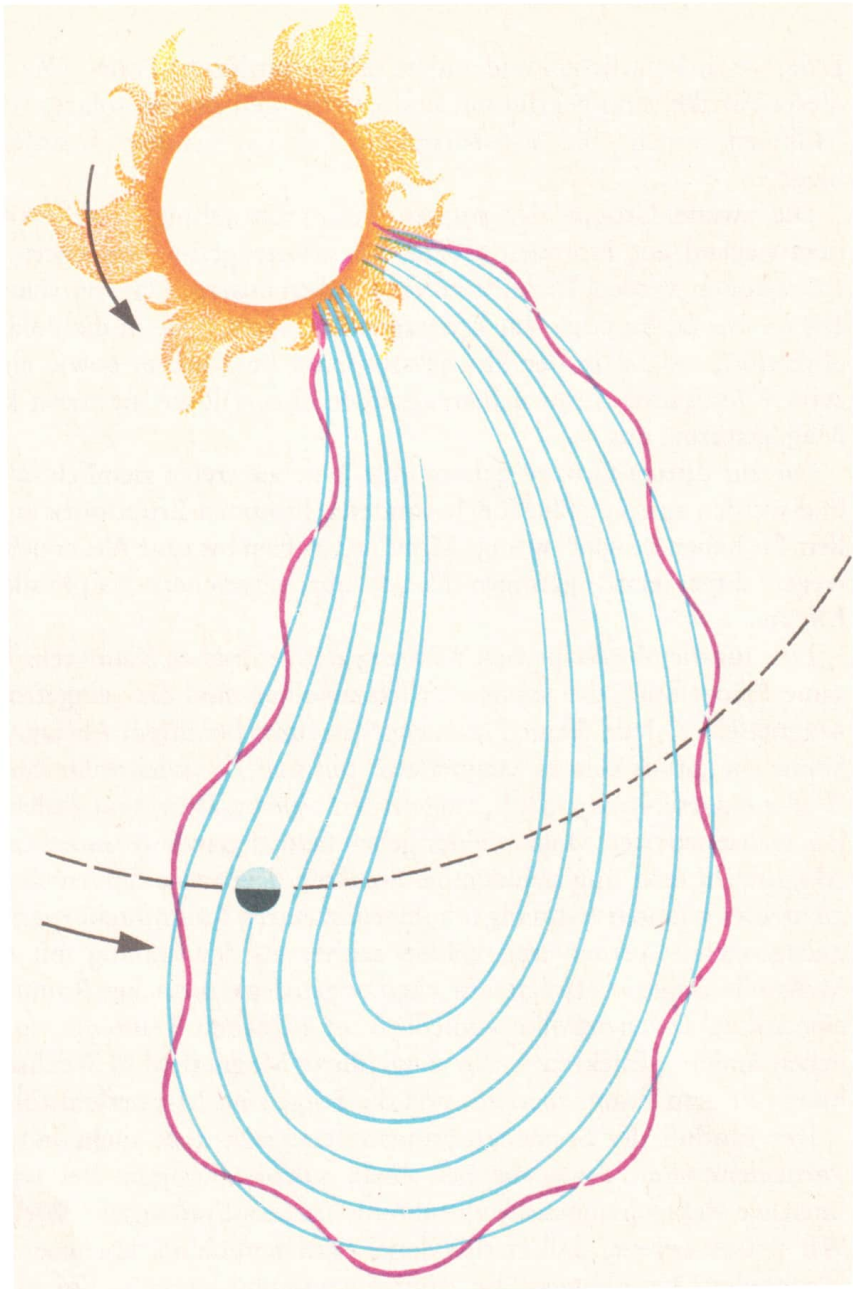


Vergleich der Kurven für die Sonnenflecken-Relativzahlen (braun) und die erdmagnetische Unruhe (rot)

Die schrittweise Aufdeckung dieser Zusammenhänge zählt zweifellos zu den reizvollsten Kapiteln naturwissenschaftlicher Forschung. Viele Jahrzehnte lang bemühten sich die Fachleute intensiv, Beobachtungsstatsachen durch theoretische Überlegungen miteinander in Verbindung zu bringen und so die verschiedenartigen Beziehungen zwischen Sonne und Erde aufzuklären. Obwohl man anfangs – in den ersten Jahrzehnten dieses Jahrhunderts – noch keinerlei direkte experimentelle Möglichkeiten besaß, die Mitwirkung von solarer Partikelstrahlung bei verschiedenen terrestrischen Erscheinungen (Polarlichtern usw.) nachzuweisen, kam man doch schon zu der festen Annahme entsprechender Mechanismen. Immer deutlicher trat dabei die wichtige Rolle der solaren Aktivitätszentren hervor. Vor allem erkannte man die Sonneneruptionen als den Schlüssel zum Verständnis vieler solar-terrestrischer Beziehungen.

Heute zeigt sich etwa folgendes Gesamtbild: Außer dem ständigen Strom der Partikel des Sonnenwindes fließen von der Sonne wolkenförmige Teilchenströme in den umgebenden Raum, die ihren Ursprung hauptsächlich in den Aktivitätszentren haben. Man unterscheidet dabei drei Gruppen von Partikeln mit unterschiedlichen Energien.

Die erste Gruppe besteht neben Elektronen überwiegend aus Protonen. Ihre Teilchen bewegen sich durchschnittlich mit Geschwindigkeiten um 1000 km/s durch den Raum und erreichen nach etwa 1 bis 2 Tagen die



Grobschematischer Verlauf eines weit in den interplanetaren Raum hinausreichenden, von einem solaren Aktivitätszentrum ausgehenden Magnetfeldes; die gewundene Bahn bezeichnet den Weg solarer Strahlungsteilchen entlang einer Magnetfeldlinie

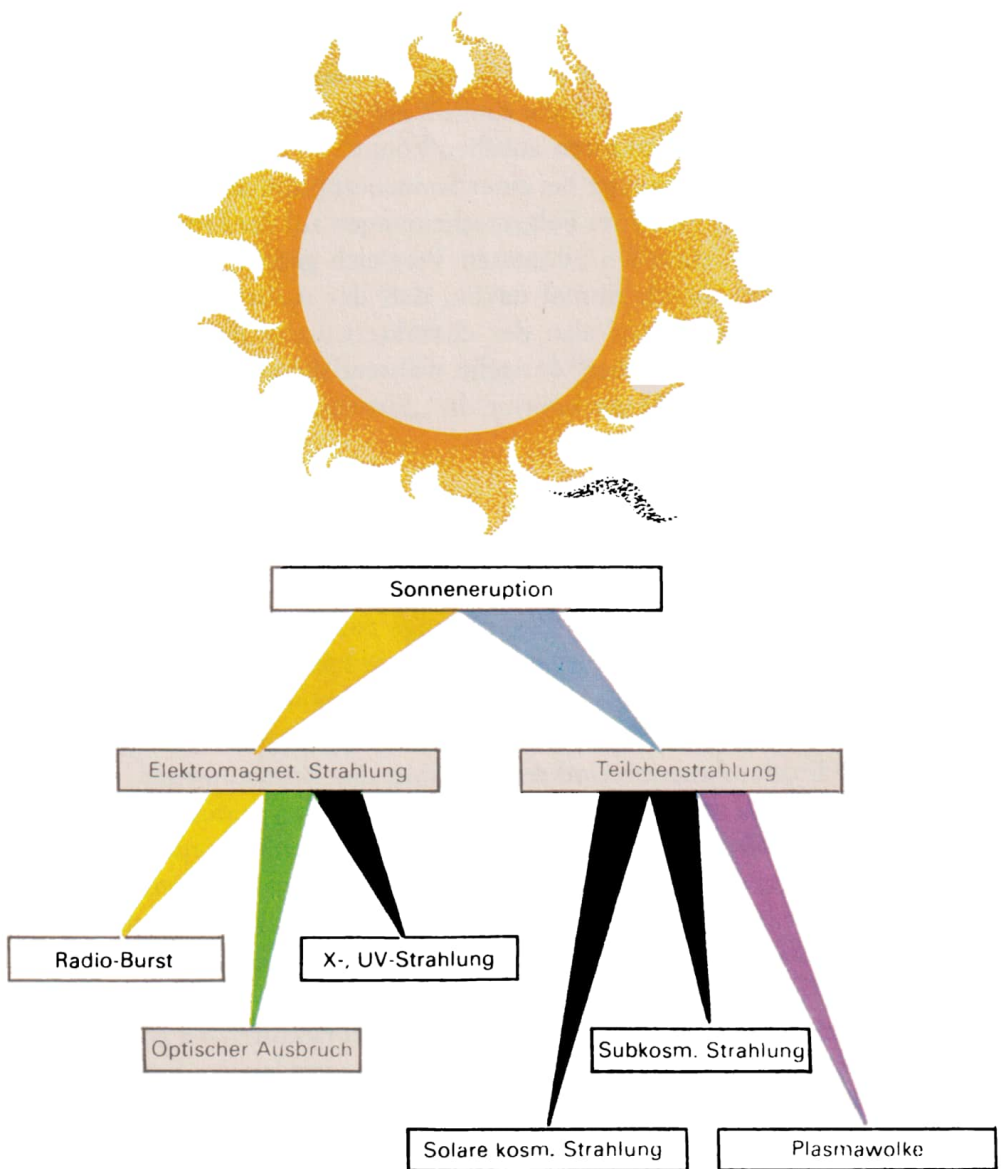
Erde, wo sie Polarlichter und andere Effekte auslösen können. Die Bahnen dieser Partikel sind gekrümmt, und zwar folgen sie den solaren Magnetfeldlinien, welche die Sonnenrotation bei wachsendem Abstand „verbiegt“.

Die zweite Gruppe der solaren Teilchenstrahlung besteht ebenfalls überwiegend aus Protonen, die jedoch bevorzugt bei Sonneneruptionen ausgestoßen werden. Diese Partikel erreichen unseren Planeten schon nach etwa 1 bis 20 Stunden. Im Erdmagnetfeld werden sie in die Polarzonen abgelenkt, wo sie in der Hochatmosphäre Polarlichter sowie eine verstärkte Ionisation verursachen; darüber hinaus lösen sie meist kräftige Magnetstürme aus.

Die zur dritten Gruppe gehörenden Teilchen treten ziemlich selten auf und werden ausschließlich bei besonderen Protonen-Eruptionen ausgestoßen. Sie haben lediglich wenige Minuten Laufzeit bis zur Erde, erzielen aber wegen ihrer relativ geringen Dichte nur schwächere geophysikalische Effekte.

Eine für die physikalischen Wirkungen im erdnahen Raum sehr bedeutsame Erscheinung der solaren Teilchenwolken sind die „eingefrorenen“ Magnetfelder. Jede dieser Plasmawolken führt bei ihrem Abflug von der Sonne ein „Stück solares Magnetfeld“ mit sich, das auch weiterhin in der Wolke eingeschlossen oder „eingefroren“ bleibt. Diese von Teilchenwolken transportierten Magnetfelder geben dem allgemeinen *interplanetaren Magnetfeld* eine ungleichförmige Struktur. Derartige Solarwolken-Magnetfelder konnten erstmalig mit interplanetaren Raumflugkörpern direkt nachgewiesen werden und zählen seither zu den ständig mit solchen Meßgeräteträgern verfolgten Erscheinungen des kosmischen Raums. Trifft eine solare Teilchenwolke schließlich im erdnahen Raum ein, so tritt – neben anderen Effekten – das mitgeführte Magnetfeld in Wechselbeziehung mit dem Erdmagnetfeld, und die Folge sind Magnetfeldstörungen.

Der Einfluß der Sonneneruptionen zeigt sich aber nicht nur in der Partikelemission. Auch die bei einem solchen Ereignis frei werdende intensive elektromagnetische Strahlung hat geophysikalische Wirkungen. Wir wissen bereits, daß es sich dabei vornehmlich um hochenergetische Ultraviolett- beziehungsweise Röntgenstrahlung handelt. Vor allem die sprunghaft gesteigerte Intensität der kurzwelligen Ultraviolettstrahlung führt in der Hochatmosphäre zu einer verstärkten Ionisation, die ihrerseits die schon erwähnten Funkstörungen hervorruft. Einige Wis-



Wirkungen von Sonneneruptionen (schematische Übersicht, nach Krüger/
Richter)

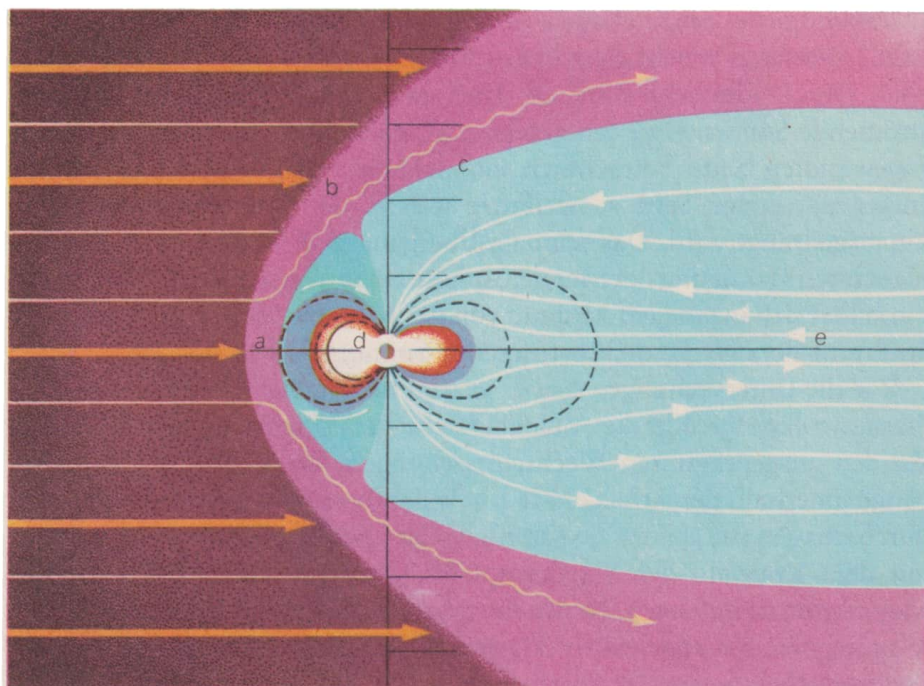
senschaftler sind zudem der Ansicht, daß die durch den UV-Einbruch gesteigerte Energiezufuhr in der Hochatmosphäre, aber auch in tieferen Regionen der irdischen Gashölle Einfluß auf wetterbildende oder zumindest wettersteuernde Faktoren ausüben könnte.

Der Zusammenhang aller bei einer Sonneneruption ablaufenden physikalischen Prozesse und ihrer Folgeerscheinungen auf der Erde hat übrigens Anlaß zu einem reizvollen bildhaften Vergleich gegeben. Ein namhafter Sonnenphysiker sprach einmal davon, daß das Aufleuchten einer Sonneneruption (engl. flare), also der charakteristische lichtoptische Ausbruch, das „Mündungsfeuer“ darstelle, während die später zu beobachtenden Polarlichter und Magnetstürme die „Einschläge“ der Partikelwolken markieren.

Der Strahlungskäfig der Erde

Bei der Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Vorgängen auf der Sonne und dem Naturgeschehen auf der Erde haben wir uns bisher nicht näher mit den Besonderheiten des erdnahen Raums beschäftigt. Es gibt jedoch auch im kosmischen Nahbereich unseres Planeten – das heißt bis etwa 10 Erddurchmesser Umkreis – zahlreiche Erscheinungen, die zum Gesamtkomplex der solar-terrestrischen Beziehungen gehören. Sie wurden allerdings erst entdeckt, als man mit Hilfe von Raumflugkörpern in diesen Regionen direkte physikalische Untersuchungen anstellen konnte.

Wissenschaftliche Gremien von mehr als 50 Nationen hatten sich zusammengeschlossen, um in den Jahren 1957 und 1958 mit einem großangelegten Kooperationsprogramm die Lösung geophysikalischer Probleme voranzutreiben. Die Abhängigkeit verschiedener Faktoren des geophysikalischen Geschehens von solaren Vorgängen war seit langem bekannt, und so hatte man die geplanten Untersuchungen bewußt zum Zeitpunkt eines Maximums der Sonnenaktivität angesetzt. Die vielschichtigen Forschungsarbeiten in diesem Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957/1958 umfaßten auch die ersten Starts künstlicher Erdsatelliten. Mit diesen extraterrestrischen Meßgeräteträgern gelang dann eine außerordentlich bedeutsame Entdeckung. Die Messungen der im erdnahen Raum anzutreffenden Partikelstrahlung zeigten nämlich, daß unser Planet von einem zuvor völlig unbekannten riesigen Strahlungskäfig umgeben ist, der



Schematischer Schnitt durch die Magnetosphäre der Erde
 a = Stoßfront; b = Turbulenzgebiet; c = Magnetopause; d = Strahlungsgürtel; e = Magnetschweif

durch die Wechselwirkungen zwischen dem Magnetfeld der Erde und den von der Sonne her anströmenden Plasmawolken sowie deren Magnetfeldern aufgebaut wird. Die so entstehende *Magnetosphäre* der Erde zählt seither zu den wichtigsten Forschungsobjekten der solar-terrestrischen Physik.

Die ersten Untersuchungen ergaben jedoch noch nicht gleich die wahre Struktur der Magnetosphäre. Man fand vielmehr zunächst zwei etwa in der Äquatorebene liegende ringförmige Gebiete starker Konzentration von Strahlungsteilchen (Elektronen und Protonen), die durch die Magnetosphäre gefangen gehalten werden, dabei Bewegungen entlang den Magnetfeldlinien ausführen und zugleich um die Erde driften. Über die solare Herkunft der Partikel in dem Magnetkäfig, zumindest in den äußeren Konzentrationsbereichen, besteht heute kein Zweifel mehr. Der doppelte

Strahlungsgürtel zeichnet nun sozusagen das „Gerüst“ der Magnetosphäre nach. Allerdings weicht diese in den Außenbereichen von der idealen Form eines Dipolfeldes sehr stark ab. Und zwar drückt dort der ständig anströmende Sonnenwind den großen „Magnetkäfig“ auf seiner der Sonne zugewandten Seite beträchtlich ein, während das Magnetfeld auf der entgegengesetzten Seite schweifartig weit in den interplanetaren Raum hinausgedrängt wird. Das schmale Übergangsgebiet zwischen dem interplanetaren Raum und der Magnetosphäre heißt *Magnetopause*. Zur Sonne hin bildet sich in einem Abstand von der Magnetopause eine sogenannte Stoßfront heraus, die der anströmende Sonnenwind verursacht.

Wie die Untersuchungen seither gezeigt haben, beeinflussen die solaren Plasmawolken gerade die Außenbereiche der Magnetosphäre erheblich. Zu den ausgeprägtesten Wechselbeziehungen, deren Wirkung auf Vorgänge innerhalb der Atmosphäre sowie der Biosphäre heute noch nicht zu durchschauen ist, gehört die Kopplung der „eingefrorenen“ Magnetfelder mit dem Kraftfeld der Magnetosphäre, als deren Folge die erwähnten Magnetstürme auftreten. Ferner entstehen durch das Eindringen der zu den Magnetpolen hin abgelenkten Plasmateilchen in der Hochatmosphäre die Leuchterscheinungen der Polarlichter.

Mit diesen Erfahrungen über einige Teilmechanismen der solar-terrestrischen Beziehungen befindet sich die Wissenschaft zweifellos erst am Anfang des Studiums kosmischer Einflüsse auf das Erdgeschehen. Ob und inwieweit sich diese Kette überhaupt bis in Feinheiten der natürlichen Lebenssphäre des Menschen verfolgen lassen wird, ist gegenwärtig noch nicht abzusehen.

Eine schon jetzt gültige, äußerst wichtige Erkenntnis verdient jedoch unbedingt hervorgehoben zu werden. Sie besagt, daß die Existenz der Magnetosphäre mit Sicherheit grundlegende Bedeutung für die Entstehung und Entwicklung des Lebens auf der Erde hat. Während die Ozonosphäre den lebensnotwendigen Schutz gegen die hochenergetische Wellenstrahlung der Sonne bietet, wirkt die Magnetosphäre als ebenso wichtige Schutzvorrichtung gegen das Bombardement der solaren Strahlungspartikel.

Die Wissenschaftler setzen ihre Bemühungen um die Aufklärung der solar-terrestrischen Beziehungen fort. Auf diesem Gebiet besteht auch weiterhin eine umfassende internationale Zusammenarbeit. So wurde unter anderem in den Jahren 1964 und 1965 als Ergänzung zu den Unter-

suchungen im Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957/58 ein weiteres Unternehmen durchgeführt, das die Bezeichnung *Internationales Jahr der ruhigen Sonne* erhielt, weil es während eines solaren Aktivitätsminimums stattfand. Hierbei ging es vor allem darum, die normalen Einflüsse der wenig gestörten Sonnenstrahlung auf die Erde zu studieren.

Bringen Sonnenflecke schlechtes Wetter?

Im Zusammenhang mit den Erscheinungen der Sonnenaktivität wird immer wieder nach deren Einfluß auf das Wettergeschehen gefragt. Wir haben aber schon angedeutet, wie schwierig es ist, aus der Fülle der Wechselwirkungen solche Beziehungen herauszufinden oder zuverlässig nachzuweisen. Direkt zu beobachtende enge Verbindungen bestehen zweifellos nicht. Wenn überhaupt, können solche Einflüsse nur durch langfristige statistische Untersuchungen aufgedeckt werden. Bemühungen dieser Art gibt es schon seit einiger Zeit. Eine mehr oder weniger unmittelbare Auswirkung der Sonnenaktivität auf die Wetterentwicklung oder das Klima ließ sich jedoch auch auf diesem Wege bisher noch nicht zuverlässig bestätigen. Trotzdem wird von den Fachleuten heute kaum noch bestritten, daß solche Beziehungen wahrscheinlich sind. Das „Herausschälen“ der solaren Ursachen aus der vielgliedrigen Kette der Überlagerungen und Kombinationen, die das Wettergeschehen beherrschen, bereitet der wissenschaftlichen Analyse enorme Schwierigkeiten. Der Grund liegt nicht zuletzt darin, daß die allgemeinen Energieumsetzungen im Wettergeschehen sehr viel größer sind als der Energiezustrom bei den solaren Störwirkungen.

Offen ist allein schon die Frage, ob die Steuerung des Großwetters ausschließlich von der ersten Heizfläche, der Erdoberfläche, her erfolgt, oder ob auch die zweite Heizfläche, nämlich die Obergrenze der Ozonschicht, und die veränderlichen thermischen Verhältnisse in der Hochatmosphäre daran teilhaben. Für die beiden zuletzt genannten Bereiche wäre durchaus ein empfindliches Reagieren auf Änderungen des solaren Zustroms denkbar. Am deutlichsten ist wohl bisher der elfjährige Aktivitätszyklus der Sonne in verschiedenen atmosphärischen Erscheinungen nachgewiesen. Der Begründer der Großwetterforschung, *Franz Baur*, sieht vor allem in den sehr wahrscheinlichen Änderungen der Solarkon-

stante eine mögliche Ursache für Anomalien der Großwetterlage. Nach neueren Untersuchungen scheint für einige Gegenden der Erde eine gewisse Beziehung zwischen der Sonnenfleckenzahl und der Gewitterhäufigkeit zu bestehen. Von den „Skylab“-Besatzungen vorgenommene Untersuchungen deuten die Möglichkeit eines engen Zusammenhangs zwischen der solaren Partikelstrahlung und Änderungstendenzen der Großwetterlage an. Außerdem werden Beziehungen zwischen Sonneneruptionen und Sturmaktivitäten auf dem Schwarzen Meer vermutet.

Die sowjetischen Wissenschaftler, die sich mit solar-terrestrischen Problemen beschäftigen, vertreten die Ansicht, daß der Einfluß auf die Wetterentwicklung vornehmlich vom „Umkippen“ wetterbestimmender Faktoren (Druckverlauf, Luftmassenströmungen) in Bereichen der Atmosphäre ausgeht, wo die Entwicklungstendenz dieser Faktoren sehr veränderlich ist. Unter solchen Bedingungen könnte auch der verhältnismäßig geringe Energieausstoß durch die Sonnenaktivität hinreichende Wirkungen erzielen. Ferner sehen die sowjetischen Fachleute die Hauptursachen weniger in den kurzzeitigen solaren Störungen (Eruptionen) als vielmehr in den mittel- und langfristigen Schwankungen des gesamten Strahlungsstromes. Von allen Wissenschaftlern wird jedoch immer wieder betont, daß die meteorologische Seite der solar-terrestrischen Beziehungen gerade in den Einzelheiten noch zahlreicher Klärungen bedarf.

Beeinflußt die Sonnenaktivität unsere Gesundheit?

Besonderes Interesse erweckt die Frage nach dem Einfluß der Sonnenaktivität auf die Biosphäre. Gerade für die Welt des Lebendigen ist ja schon seit langem die völlige Abhängigkeit von der Energiespenderin Sonne erkannt. Jeder lebende Organismus stellt ein sogenanntes offenes System dar, das heißt, er steht in ständiger lebensnotwendiger Wechselwirkung mit seiner Umgebung (Energieaustausch, Stoffwechsel). Das macht es höchstwahrscheinlich, daß er auf Änderungen im physikalischen Geschehen der Sonne reagiert. Wie merklich die Umweltbedingungen den Organismus beeinflussen können, ist vielen Menschen von verschiedenartigen Beeinträchtigungen ihres körperlichen Befindens bei Witterungsschwankungen gut bekannt. Ähnlich wie in der Meteorologie bereitet es auch hier

den Wissenschaftlern die größten Schwierigkeiten, aus der Fülle der sonstigen Umwelteinflüsse den Anteil der Sonne mit hinreichender Sicherheit herauszufinden. Viele Untersuchungen ergaben daher nur mehr oder weniger vage Andeutungen möglicher Beziehungen. Erst in neuerer Zeit scheinen die spezieller und zuverlässiger gewordenen Methoden der Forschung im Bereich der *Heliobiologie*, wie man dieses Arbeitsgebiet verschiedentlich nennt, die äußerst wahrscheinlichen biologischen Wirkungen der Sonnenaktivität immer mehr zu bestätigen. Dabei kommt es vor allem auf eine sehr enge Zusammenarbeit von Biologen und Medizinern mit sonnenphysikalischen Instituten an.

Die heliobiologische Forschung kann zwei Untersuchungswege beschreiten: Der eine führt über statistische Analysen, bei denen vor allem Aufzeichnungen über epidemische Erscheinungen sowie klinische Unterlagen über verschiedenartige gesundheitliche Störungen ausgewertet werden, der andere über Laboratoriumsexperimente und Einzeluntersuchungen. Einer der bemerkenswertesten Befunde, den man bisher erhielt, ist der offensichtliche Einfluß von Schwankungen des geomagnetischen Feldes auf Vorgänge in allen Ebenen des biologischen Geschehens (Moleküle, Zellen, Gesamtorganismus). So haben langjährige statistische Beobachtungen ergeben, daß an Tagen mit verstärkter Unruhe des Erdmagnetfeldes – als Folge erhöhter Sonnenaktivität – sowohl die Erkrankungsziffern als auch die Sterblichkeit oft um ein mehrfaches größer sind als an anderen Tagen. Besonders deutlich läßt sich diese Beziehung bei Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems erkennen. Beispielsweise zeigte die Statistik des medizinischen Notdienstes in Simferopol (Ukrainische SSR) mit dem Ansteigen der Sonnenaktivität zum Maximum im Jahre 1968 eine Zunahme der Herzinfarkte und der Gehirntrombosen. Zu Zeiten von Magnetstürmen war die Zahl der tödlichen Ausgänge bei Infarkten um das Sechzehnfache erhöht. Zum Teil wurden diese Beobachtungen inzwischen durch die Ergebnisse von Einzeluntersuchungen erklärt, die eine deutliche Abhängigkeit der Gerinnungsfähigkeit des Blutes von akuten Störungen des geomagnetischen Feldes auswiesen.

Bei ähnlichen Untersuchungen, die in enger Zusammenarbeit zwischen dem Medizinischen Institut in Simferopol und dem Astrophysikalischen Observatorium auf der Krim erfolgten, offenbarten sich auch Zusammenhänge zwischen den biochemischen Prozessen der Blutbildung und der Sonnenaktivität. Und schließlich kam man bei Laboratoriumsexperimen-

ten in verschiedenen Ländern zu der ziemlich sicheren Erkenntnis, daß Mikroorganismen teilweise ebenfalls sehr empfindlich auf Magnetfelder im allgemeinen und deren Änderungen im besonderen reagieren. Hierin glaubt man einen Ansatzpunkt gefunden zu haben, um Zusammenhänge zwischen dem Auftreten von Epidemien und der Sonnenaktivität zu erklären, die sich in Statistiken schon früher zeigten.

All diese Anzeichen für eine Existenz heliobiologischer Mechanismen, von denen die meisten zwar noch einer weiteren Bestätigung und Vertiefung bedürfen, lassen die Arbeit auf diesem interessanten Gebiet als sehr bedeutsam erscheinen. Nach Ansicht verschiedener Wissenschaftler wären, gesicherte Erkenntnisse vorausgesetzt, auf diesem Wege wesentliche Beiträge zur Verbesserung der Gesundheitsfürsorge für zahlreiche Menschen zu erwarten. Voraussagen der Sonnenaktivität beziehungsweise die Frühbeobachtung sporadischer solarer Ausbrüche würden vorbeugende Maßnahmen in Krankenhäusern und Ambulatorien ermöglichen, die den dafür besonders empfänglichen Menschen helfen, die Perioden ungünstigen „kosmischen Wetters“ besser zu überstehen.

Wie wir daraus ersehen, können sonnenphysikalische Grundlagenforschung und ein Sonnen-„Unwetterwarndienst“, wie er sich mit Hilfe von Raumflugkörpern leicht weit draußen im Weltraum unterhalten läßt, sogar unmittelbar zum Nutzen des Menschen angewendet werden.

Energiereserven gesucht!

Die Bedeutung der Sonnenenergie für die Menschheit besteht jedoch nicht nur in ihrem Einfluß auf die rein biologischen Bedingungen. Alle natürlichen Energiequellen, die sich der Mensch schrittweise erschloß, sind letztlich ihre Folgeprodukte. Das betrifft sowohl die fossilen Brennstoffe (Torf, Kohle, Erdöl, Erdgas), die sämtlich in energetischer Hinsicht fotochemische Erzeugnisse der Sonnenstrahlung sind, als auch solche Energiequellen wie Wind- und Wasserkraft.

Aus dieser engen Kopplung von technisch-produktiver Entwicklung und Energiebedarf erwächst bei dem in den letzten Jahrzehnten stürmisch gesteigerten Tempo der industriellen Produktion ein brennendes Problem. Der enorme und immer mehr zunehmende Energiebedarf der Menschheit läßt die Frage akut werden, wie lange die natürlichen Energiereserven der

Erde diesen Ansprüchen noch genügen können oder wann mit ihrer Erschöpfung zu rechnen ist. Untersuchungen zeigen, daß von einigen Energieträgern zwar beträchtliche Vorräte, jedoch keine unerschöpflichen Mengen vorhanden sind. Manche Forscher sehen bei weiter steigendem Energieverbrauch bereits in den nächsten 80 bis 150 Jahren ernsthafte Probleme für die gesamte Menschheit voraus, andere rechnen immerhin noch mit Reserven für mehrere hundert Jahre. Doch auf jeden Fall ist schon jetzt die Suche nach Wegen zur Erschließung anderer Energiequellen dringend notwendig.

Einer dieser Wege führt zur technisch-industriellen Nutzung der Kernenergie über Kernkraftwerke mit Spaltungsreaktoren, von denen heute bereits eine größere Anzahl in Betrieb ist, und kann von den Energieträgern her für einen sehr langen Zeitraum Reserven schaffen. Einen zweiten, ebenfalls kernphysikalischen, aber sehr schwierigen Weg, von dem man noch nicht allzu genau weiß, wann er zum Ziel führen wird, versucht man mit der technischen Beherrschung der Energieentwicklung bei Kernfusionsprozessen zu gehen. Auf dieses Verfahren, das wegen des nahezu unerschöpflichen Vorrats eine einzigartige Perspektive der Energieversorgung bieten würde, werden wir noch zurückkommen. Hier mag die Feststellung genügen, daß beide kernphysikalischen Wege die einzig nennenswerten Möglichkeiten einer autonomen irdischen, also nicht von der Sonne abhängigen Energieversorgung für die Menschheit bedeuten. Ob und wann vielleicht einmal auch die praktisch unerschöpfliche Wärmeenergie des Erdinnern in größerem Umfang für diese Zwecke genutzt werden kann, ist nämlich heute noch nicht abzusehen.

Am nächsten aber liegt wohl die direkte Nutzung des ständig von der Sonne zur Erde fließenden Energiestroms. Die Daten für die enorme Strahlungsleistung der Sonne und das Energieäquivalent an der Obergrenze der Erdatmosphäre (Solarkonstante) haben wir schon mehrfach genannt. In Gestalt der solaren Strahlung bietet die Natur dem Menschen also eine geradezu phantastische Energiequelle, deren Leistung es mit möglichst hohem technischem Wirkungsgrad in nutzbare Energieformen (Wärme, Dampf, Elektrizität) umzuwandeln gilt. Der berühmte französische Kernphysiker *Frédéric Joliot-Curie* (1900–1958) äußerte einmal, die Nutzung der Sonnenenergie sei für die Menschheit wichtiger als die Bändigung des Atomkerns.

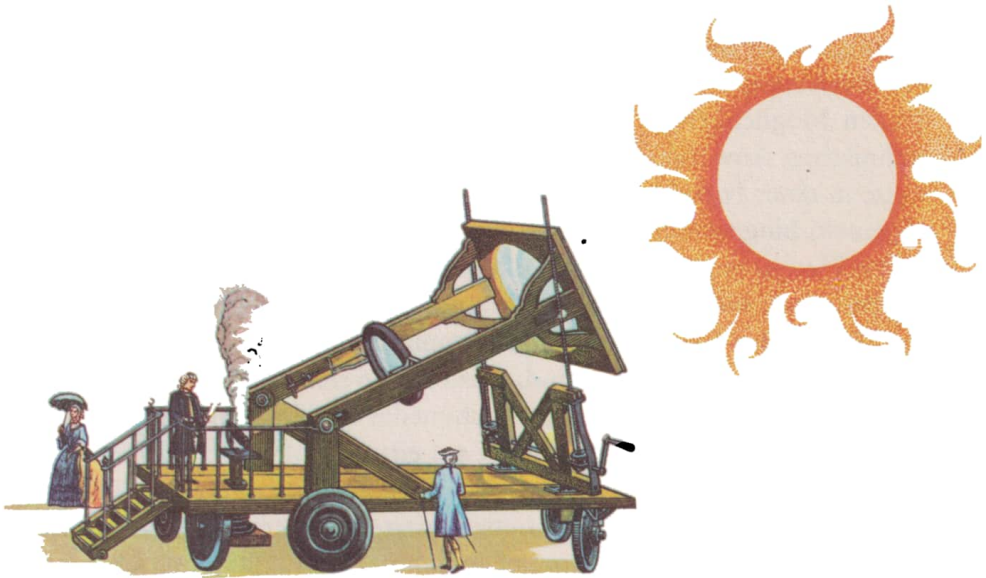
Die solare Strahlungsenergie steht in praktisch unerschöpflicher Menge

zur Verfügung, ihre Umsetzung und Verwertung ist mit keinerlei Verbrauch von irdischen Rohstoffreserven verbunden und verläuft oben-
drein ohne jegliche negativen Einflüsse auf die natürliche Umwelt des Menschen. (Bekanntlich stellen gerade die verschiedenen Formen der Umweltschädigung die schwierigsten Probleme dar, die alle anderen Verfahren bei weiterer Steigerung der irdischen Energieproduktion mit sich bringen.) Zu berücksichtigen ist bei den technischen Überlegungen allerdings, daß für den Strahlungsempfänger an der Erdoberfläche Verluste durch Reflexion und Absorption in der Erdatmosphäre entstehen, deren Ausmaß von der geographischen Breite, der Höhenlage, der Tages- und der Jahreszeit sowie dem Klimagebiet abhängt. Strahlungsempfänger in hochgelegenen Wüstengebieten oder in Wüsten niedriger geographischer Breiten würden danach die besten Bedingungen haben.

Gehen wir von dem idealen Wert für die Solarkonstante aus, so ergibt eine oberflächliche Abschätzung, daß durch Sonnenstrahlung pro Jahr rund 700mal mehr Energie auf die Erde gelangt, als alle derzeit erkundeten Erdölvorkommen liefern könnten. Wenn wegen der erwähnten Verlustfaktoren davon im Jahresmittel auch nur rund ein Drittel als ausnutzbare Energie die Erdoberfläche erreicht, so bedeutet dieser Strom dennoch ein enormes Energiepotential. Setzt man voraus, daß unter günstigen Bedingungen an der Erdoberfläche etwa 1 cal/min cm^2 zur Verfügung steht, dann erhält man bei achttündiger Sonnenscheindauer pro Tag auf 100 m^2 eine eingestrahlte Energie von $4,8 \cdot 10^5 \text{ kcal}$. Das entspricht einem Äquivalent von 558 kWh oder 65,5 kg Kohle oder 119 kg Holz oder 63 l Benzin. Eine andere, technisch durchaus realistische Vergleichsrechnung zeigt, daß bei Ausnutzung der solaren Einstrahlung auf die Fläche der Wüste Karakum (etwa $300\,000 \text{ km}^2$) mit einem Wirkungsgrad von nur 10 Prozent der gesamte gegenwärtige Energiebedarf der Sowjetunion gedeckt werden könnte.

Sonnenöfen und Strahlungsfallen

Die Versuche zur technischen Nutzung der Sonnenenergie reichen bis ins Altertum zurück. Von dem griechischen Gelehrten *Archimedes* (um 287–212 v. u. Z.) wird berichtet, daß es ihm erstmalig gelungen sei, mit Hilfe eines Brennspiegels Wasser zum Kochen zu bringen. Diese Technik



Apparatur mit großen Sammellinsen, die der Franzose Bernières 1757 zu Brennversuchen benutzte

der Strahlungskonzentration durch konkave Spiegelflächen ist bis zum heutigen Tag die meistgenutzte geblieben, nur vereinzelt wurden auch große Sammellinsen für Experimente mit der Sonnenstrahlung verwendet. Anfangs galt das Interesse an solchen Anlagen oft mehr ihrer Eigenschaft als Erzeuger extrem hoher Temperaturen. So schuf der französische Astronom *Giovanni Domenico Cassini* (1625–1712) einen Hohlspiegel von 1,10 m Durchmesser, in dessen Brennpunkt er Temperaturen von etwa 1000 °K erzielte, die für Schmelz- und andere physikalische Versuche dienten.

Nach diesem von Cassini eingeführten Prinzip wird aber auch heute noch mit *Sonnenöfen* experimentiert. Mit modernen leistungsfähigen Konstruktionen vermag man Temperaturen bis 8000 °K zu erreichen. Unterhalb von 4000 °K läßt sich das Hochtemperaturverhalten verschiedener Werkstoffe prüfen, und man kann im Vakuum spezielle Stoffe mit extrem hohem Reinheitsgrad (zum Beispiel Halbleitermaterialien) erschmelzen. Einrichtungen dieser Art befinden sich unter anderem in den klimatisch bevorzugten südlichen Regionen der Sowjetunion. Dort sind

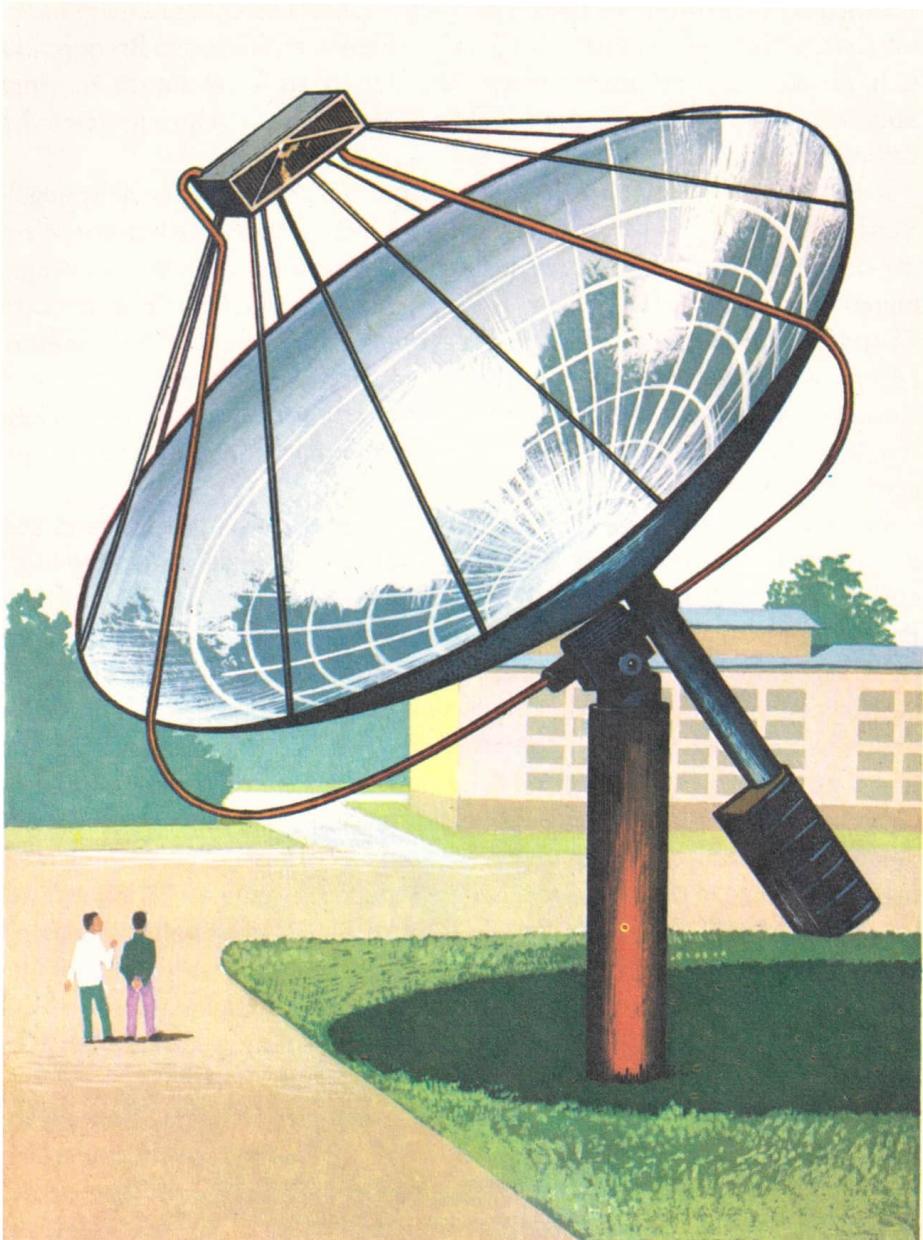
weitere Anlagen geplant, die mit Spiegeln von 25 m und 32 m Durchmesser ausgerüstet werden und eine konzentrierte Strahlungsleistung von etwa 250 beziehungsweise 400 kW erbringen sollen. Auf die kaum abzuschätzenden Möglichkeiten, die sich aus der experimentellen und fertigungstechnischen Anwendung dieser Methode im freien Weltraum, beispielsweise in einer Forschungsraumstation, ergeben können, sei hier nur ganz allgemein hingewiesen.

Das Hauptinteresse wird in Zukunft jedoch unbedingt dem Umwandeln der primären solaren Strahlungsenergie in sekundäre Energieformen gelten, die für den Betrieb von Industrieanlagen und für andere Gebrauchszwecke weiterzuverwenden sind. Dazu bieten sich mehrere Verfahren an. Eines entspricht dem bereits von Archimedes entwickelten Prinzip, mittels eines Hohlspiegels Sonnenstrahlung auf einen Verdampfer zu konzentrieren und den entstehenden Dampf als sekundären Energieträger zu nutzen. Um die Mitte des vorigen Jahrhunderts wurden die ersten Versuche unternommen, auf diesem Weg Sonnenkraftmaschinen (Dampfmaschinen) zu entwickeln. So schuf der amerikanische Ingenieur *John Bricson* (1803–1889) eine derartige Anlage, die immerhin schon 2,5 PS leistete.

Moderne Sonnenkraftwerke, an deren Entwicklung vor allem die Sowjetunion mit großer Intensität arbeitet, haben ein ähnliches Blockschema wie konventionelle Wärmekraftwerke. Der Unterschied besteht lediglich darin, daß hier der Verdampferkessel durch konzentrierte Sonnenstrahlung beheizt wird und nicht mit fossilen Brennstoffen. Der erzeugte Dampf wird in Turbinen entspannt, die ihrerseits Elektrogeneratoren antreiben. Das zur Zeit größte Sonnenkraftwerk befindet sich in der Armenischen SSR; es arbeitet mit einem Dampfdruck von 30 kp/cm² und hat eine Leistung von 1,2 MW. Der Strahlungssammler besteht aus 1300 Einzelspiegeln mit je 15 m² Fläche. Das Spiegelsystem wird mit Hilfe einer Fotozellensteuerung durch Elektromotore auf einer Schienenbahn um den zentral liegenden Verdampferkessel der täglichen Sonnenbewegung nachgeführt.

Sonnenspiegel mit Verdampfersystemen können aber noch anderen Zwecken dienen. Im Süden der Sowjetunion sind schon seit einigen Jahrzehnten Anlagen in Betrieb, deren Dampf zur Heizung in Küchen oder in Konservenfabriken verwendet wird. Auf diese Weise lassen sich auch Kühlaggregate und Eiserzeuger betreiben, was übrigens bereits 1878 der Franzose *Augustin Bernard Mouchot* (1825–1911) versuchte.

Großer Heliospiegel eines Sonnenenergie-Kraftwerks



Eine reizvolle Variante dieses Prinzips ist der „Sonnenkocher“ oder die „Sonnenküche“ für Haushalte, wie sie ebenfalls in den sonnenscheinreichen südlichen Gebieten der Sowjetunion, aber auch in Indien verschiedentlich schon erprobt werden. Ein solches Gerät besteht aus einem nachführbaren Hohlspiegel von 1 bis 2 m Durchmesser, in dessen Brennpunkt sich die kleine Verdampferanlage befindet. Man kann damit in einer Stunde etwa 6 l Wasser zum Kochen bringen; das entspricht etwa der Leistung eines Elektroherdes von 600 W.

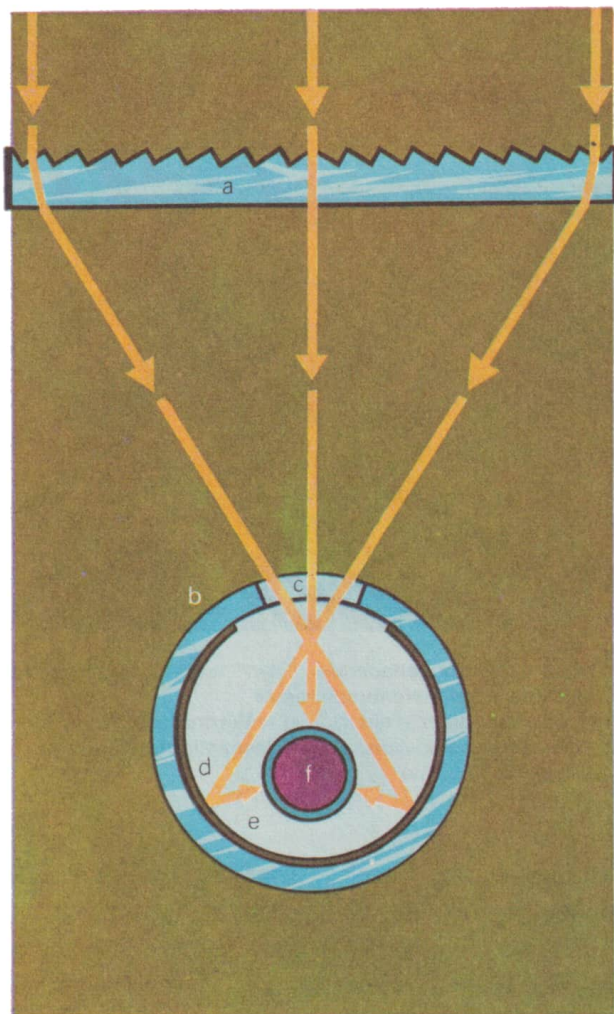
Eine weitere, sehr wichtige Anwendungsmöglichkeit für Sonnenspiegel-Verdampfer-Systeme ist das Entsalzen von Meerwasser. Sie hat vor allem für die landwirtschaftliche und industrielle Erschließung von Trockengebieten hohen Wert, die im Küstenbereich salzhaltiger Gewässer liegen (zum Beispiel mittelasiatische Wüsten). Das vom Prinzip her einfache Verfahren, Meerwasser zu verdampfen und das entsalzte Frischwasser aus einem Kondensator abziehen, bereitet jedoch in der Praxis einige Schwierigkeiten, weil die konzentrierte Sole im Verdampfer leicht feste Salzablagerungen entstehen läßt.

Aus entsalztem Meer- oder Tiefenbrackwasser durch direkte Nutzung der solaren Strahlungsenergie Frischwasser zu gewinnen wird aber auch auf anderen Wegen möglich. Das einfachste Verfahren beruht auf dem Prinzip der „Strahlungsfallen“, wie es vom Treibhauseffekt her bekannt ist. Glaswände und Glasdach eines Treibhauses lassen zwar die sichtbare elektromagnetische Wellenstrahlung von außen hindurchtreten, ihre Reflexion verhindert aber den Rückfluß der Infrarot-Wärmestrahlung, die durch Absorption der Lichtstrahlung im Bodenmaterial des Treibhauses entsteht. In den Aufbereitungsanlagen leitet man das salzhaltige Wasser durch flache Becken, die mit gegen die Sonne geneigten Glasscheiben oder lichtdurchlässigen Spezialfolien bedeckt sind und eine strahlungsabsorbierende Bodenfläche haben. Durch die absorbierte Strahlungsenergie und die reflektierte Infrarotstrahlung wird das Wasser bis zum Verdampfen aufgeheizt und danach in einem Kühlkreislauf zu Frischwasser kondensiert. Die ersten größeren Versuche in dieser Richtung fanden übrigens schon im Jahre 1883 in Chile statt.

Moderne Anlagen sind vor allem in Turkmenien (UdSSR) in Betrieb, wo überglaste Wannen von 25 m Länge und 600 m² Fläche verwendet werden. Man erhält auf diese Weise in 24 Stunden etwa 8 bis 12 m³ destilliertes Wasser, was unter normalen Witterungsbedingungen im Jahr ungefähr

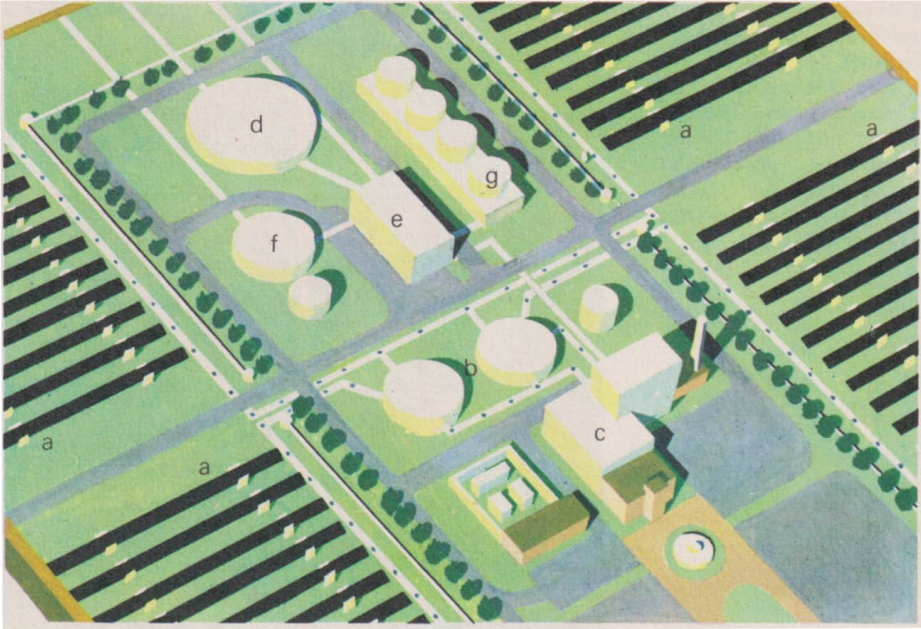
Schematischer Schnitt durch ein „Sonnenfallen“-Element

a = Sammeloptik;
 b = evakuiertes Glasrohr;
 c = Eintrittsspalt; d = verspiegelte Innenwand;
 e = beschichtetes Stahlrohr;
 f = Aufheizstoff (Flüssigmetall)



2400 m³ ergibt. Zum Vergleich sei daran erinnert, daß für das Verdampfen von 1 m³ Wasser sonst etwa 100 kg Kohle nötig sind.

Die sehr guten Erfahrungen, die man in der Sowjetunion bei Versuchsbetrieben machte, führten schließlich Ende der sechziger Jahre in Turkmenien zur Erprobung einer vollen Sonnenenergieversorgung (Heizung, Trinkwasseraufbereitung und anderes) mehrgeschossiger Wohnhäuser. Die dafür entwickelten *helio-technischen Dächer* (flache Spezialwannen-



Modell einer Sonnenenergie-„Farm“ auf Wüstenterrain mit einer Entsalzungsanlage für Tiefenbrackwasser

a = „Sonnenfallen“-Felder; b = Wärmespeicher; c = Turbinenhaus;
d = Brackwasserspeicher; e = Destillationsanlage; f = Süßwasserspeicher; g = Kühltürme

konstruktionen) sollen etwa 50 bis 70 Prozent der einfallenden Sonnenenergie für die Gebäudeheizung nutzbar werden lassen. Im Frühjahr 1975 wurden auch in Südschweden die ersten mit Sonnenenergie beheizten Häuser erbaut. Ihre Dächer haben einen Belag aus Mineralwolle, die mit geschwärzter Aluminiumfolie beschichtet ist. Eingebettet sind dünnwandige Aluminiumrohre, in denen das für den Wärmetransport verwendete Wasser zirkuliert.

Darüber hinaus gibt es auch schon verschiedene Projekte, die das Strahlungsfallenprinzip für den Betrieb von Sonnenkraftwerken anwenden. Allerdings geht man dabei etwas anders vor. Entweder werden lichtdurchlässige Materialien als Filterflächen verwendet, die Infrarotstrahlung reflektieren, oder lichtsammelnde Glasflächen, unter denen Wärmesammelflächen oder Rohrkonstruktionen liegen, die ein aufheizbarer Stoff (flüssiges Natrium) durchströmt. Dieser kann Temperaturen um 500°C errei-

chen. Der Kreislauf der aufgeheizten Flüssigkeit transportiert die Wärmeenergie dann in temperaturisolierte Behälter mit einer speziellen Mischung geschmolzener Salze. So ließe sich eine Energiespeicherung erzielen, was eine kontinuierliche Stromerzeugung, also auch während der Nachtstunden, ermöglicht. Geht man von etwa 8 km² Auffangfläche und einem Speicherkreislauf von 50 Millionen Litern aus und nimmt einen für dieses Verfahren als realistisch anzusehenden Wirkungsgrad von 25 Prozent an, so soll nach Ansicht der Projektanten bei einer Leistung von 1000 MW elektrischer Strom zu einem Preis von nur 0,02 bis 0,04 Mark pro kWh abgegeben werden können. Zur Zeit stellt sich allerdings die Fertigung der Spezialfilter noch ziemlich teuer, so daß erst nach weiteren Fortschritten in dieser Richtung mit einer Nutzung des Verfahrens in großem Maßstab zu rechnen ist.

Sonnenkraftwerke im Weltraum

Die im Prinzip technisch einfachste Methode für die Weiterverwertung solarer Strahlungsenergie ist deren direkte Umwandlung in Elektroenergie, wie sie der fotoelektrische Effekt möglich macht. Bekanntlich haben einige Halbleitermaterialien die Eigenschaft, auffallende Sonnenstrahlung unmittelbar in elektrischen Strom zu verwandeln. Allerdings liegt der Wirkungsgrad dieser Umwandlung auch bei den derzeit besten Halbleitersubstanzen auf Silizium- oder Galliumarsenidbasis noch immer recht niedrig, meist zwischen 10 und 15 Prozent. Man rechnet aber für die Zukunft mit Verbesserungen. Die in Form einzelner kleiner und dünner Plättchen gefertigten fotoelektrischen Empfangselemente, *Solarzellen* genannt, werden für höhere elektrische Leistungsabgaben zu größeren Sammelflächen zusammengeschaltet. In der Regel führt man die anfallende Elektroenergie Speicherelementen (zum Beispiel Nickel-Kadmium-Akkumulatoren) zu und speist von dort das Verbrauchernetz.

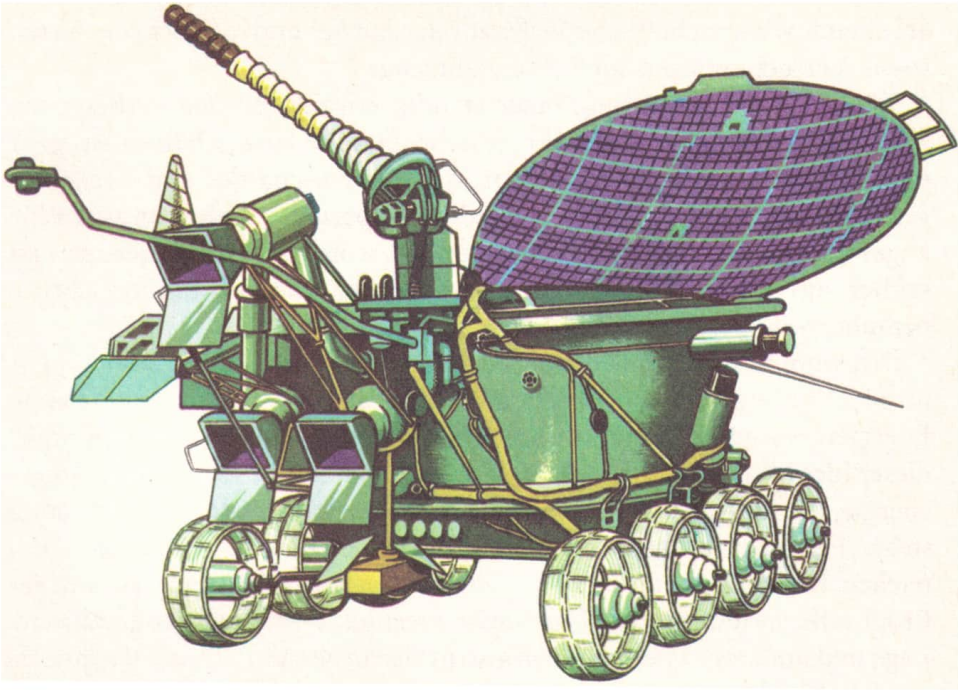
Derartige, als *Solarbatterien* bezeichnete Energieversorgungssysteme wurden bisher vor allem in der Raumflugtechnik angewendet, wo die Energieversorgung der bemannten oder unbemannten Raumflugkörper ein sehr wichtiges technisches Problem darstellt. Diesem Bereich verdankt daher die Solarzellentechnik auch ihre größten Fortschritte. Außerhalb der

Erdatmosphäre steht die Sonnenstrahlung mit voller Intensität und – wenn wir einmal von der möglichen Schattenwirkung der Erde bei künstlichen Satelliten absehen – auch ununterbrochen als Primärenergie zur Verfügung. Ein mit Solarzellen ausgerüsteter Raumflugkörper braucht folglich keinen besonderen Energieträger, wie bei der Verwendung von Brennstoffelementen oder Radioisotopenbatterien, mitzuführen und kann auf einen unbegrenzten Energievorrat zurückgreifen. So finden wir Solarbatterien als Bordenergieversorgungssysteme bei fast allen bisher gestarteten Forschungs- und Erprobungssatelliten, Mond- und Planetensonden sowie Raumfahrzeugen und Raumstationen.

Das wohl eindrucksvollste Beispiel für diese Art der Energieversorgung eines extraterrestrischen Forschungsgerätes lieferten die sowjetischen Mondfahrzeuge vom Typ „Lunochod“. Über deren hermetisch geschlossener Gerätezelle befand sich jeweils ein aufklappbarer Deckel, dessen Innenseite mit Solarzellen belegt war und zum „Auftanken“ der Strahlungsenergie bei Haltepausen auf die Sonne gerichtet wurde. Mit dem auf diese Weise äußerst ökonomisch erneuerten Energievorrat unternahmen die beiden Mondfahrzeuge monatelang ausgedehnte Exkursionsfahrten auf der Mondoberfläche und führten zahlreiche und vielseitige wissenschaftliche Untersuchungen aus.

Der niedrige Wirkungsgrad macht allerdings für hohe elektrische Leistungsabgaben relativ große Sammelflächen erforderlich. Beispielsweise wurden für die amerikanische Raumstation „Skylab“ zur Sicherung eines Energiebedarfs von 10,5 kW insgesamt 272 640 Solarzellen benötigt. Sie waren auf zwei Auslegern von jeweils 65 m² Fläche untergebracht, die aus je drei ausklappbaren Einzelfeldern bestanden. Die autonome Stromversorgung (maximal 10,5 kW) des Sonnenteleskopmoduls erfolgte durch Solarzellen auf 4 entfaltbaren Auslegern von jeweils 13,6 m Länge und 2,65 m Breite. Wegen ihrer Größe werden die Solarzellenflächen meist als entfalt-, neuerdings auch als entrollbare Strukturen gefertigt. Dank ständiger Verbesserungen in der Leichtbauweise kann man heute schon für Raumflugzwecke Solarzellenanlagen bis zu 50 kW bei einer Flächenleistung von etwa 100 W/m² bereitstellen.

Die für den Weltraum entwickelte Solarzellentechnologie ermöglicht es nun auch, Energieversorgungssysteme für den Gebrauch auf der Erde zu schaffen. Erste Erprobungen mit größeren stationären Anlagen dieser Art finden wiederum vornehmlich im Süden der UdSSR statt. Besonders inter-



Mondmobil „Lunochod 2“ mit aufgeklapptem Solarzellendeckel zum „Nachtanken“ von Sonnenenergie

essant erscheint ein kombiniertes Verfahren zur Gewinnung von Frischwasser aus Tiefenbrackwasser, das auf einer Sowchose am Rande der Wüste Karakum angewendet wird. Mit Hilfe einer Solarzellenanlage (Siliziumhalbleiter) gewinnt man dort elektrischen Strom zum Betrieb einer Pumpe, die das Brackwasser aus einer Tiefe von 12 m fördert. Dieses Wasser wird anschließend in flachen Destillationsbecken nach dem uns schon bekannten Prinzip entsalzt. Wie außerordentlich ökonomisch dieses Verfahren unter den gegebenen Umständen ist, ersehen wir daraus, daß die beschriebene Anlage einen Kubikmeter Frischwasser für einen Aufwand von etwa 2 Rubel liefert, während das sonst erforderliche Herantransportieren des Wassers 400 Rubel pro Kubikmeter kosten würde.

Für die Energieversorgung kleiner transportabler oder mobiler technischer Geräte erprobt man ebenfalls schon seit längerem Solarzellen. So gibt es Rundfunkempfänger, deren Strombedarf auf diese Weise gedeckt wird, ebensolche transportablen Telefon- und Funksprechgeräte, automatisch

arbeitende wissenschaftliche Meßstationen auf See und in Trockengebieten sowie Versuchsanlagen für Elektrofahrzeuge.

Wie hoch die Bedeutung einer ständig erweiterten und verbesserten Nutzung der Sonnenenergie für irdische Zwecke einzuschätzen ist, geht unter anderem auch daraus hervor, daß Wissenschaftler und Techniker verschiedener Nationen 1956 erstmalig ein spezielles Weltsymposium für angewandte Sonnenenergie (Phoenix und Tucson, USA) veranstalteten und seither auf internationaler Ebene weiter um Entwicklungsfortschritte bemüht sind.

Das wohl faszinierendste Projekt, das in den letzten Jahren immer mehr in den Vordergrund des Interesses rückte, ist eine ständige umfassende Energieversorgung der Erde aus dem Weltraum. Den Ausgangspunkt dieser Idee bildete der Gedanke an den enormen Strom solarer Strahlungsenergie, der im freien Weltraum unvermindert und ständig zur Verfügung steht. Für Einrichtungen im Weltraum gelten überdies auch die zahlreichen Einschränkungen nicht, denen Sonnenenergieempfänger auf der Erdoberfläche unterliegen (Tag-Nacht-Wechsel, Witterung, geographische Lage und anderes). Hier bestehen also in vielem geradezu ideale Voraussetzungen für derartige Energieversorgungssysteme. Über die mit großen Sammelflächen zu erzielenden Leistungen haben wir schon im Zusammenhang mit den erdfesten Anlagen gesprochen. Als Energiewandlersysteme kommen wiederum in erster Linie Solarzellenbatterien in Betracht, wofür die Erfahrungen der Raumflugtechnik die technologische Grundlage liefern.

Es ginge also darum, mit Hilfe von Trägerraketen oder Raumtransportern großflächige Solarzellenanlagen auf Erdumlaufbahnen zu bringen, die dort als selbständige Sonnenkraftwerke arbeiten. Das könnte einmal in Form mittelgroßer Einzelmoduln (etwa 10 000 bis 50 000 m²) geschehen, die sich in der Umlaufbahn schirmartig entfalten, oder in Gestalt noch größerer Flächen, die aus kleineren Einheiten in der Umlaufbahn zusammengesetzt beziehungsweise -geschaltet werden und etliche Megawatt Elektroenergie liefern würden. Die anfallende Sonnenelektroenergie soll mittels Mikrowellen (etwa im 3-cm-Bereich) zu Empfangsstationen auf der Erde übertragen werden. Dieses einfach anmutende Verfahren bereitet jedoch zahlreiche grundlegende technische Schwierigkeiten. Auch ist bisher nicht genau abzusehen, welche Folgen sich aus dem ständigen Durchgang der hochintensiven Mikrowellenstrahlung für die Atmosphäre ergäben, da die

zwangsläufigen Absorptionsverluste in dieser eine zusätzliche Energieaufnahme, also Aufheizung, bewirken müßten.

Ob und inwieweit künftig vielleicht sogar einmal stationäre Sonnenenergieanlagen auf dem Mond für die Erde nutzbar werden könnten, läßt sich gegenwärtig noch nicht sagen. Die physikalischen Bedingungen an seiner Oberfläche – keine Atmosphäre, langsame Rotation – würden den Mond zu einer durchaus geeigneten Weltraumbasis machen.

Sternenfeuer für die Erde

Bei der Suche nach dem Schlüssel für das ernste Problem des ständig wachsenden Energiebedarfs der Menschheit hat nun die Sonne nicht nur als die leistungsfähigste Primärenergiequelle Bedeutung. Sie weist außerdem den Weg, auf dem der Mensch aus eigener Kraft die Voraussetzungen für eine Lösung finden kann, die ihn über unabsehbare Zeiträume hinweg praktisch aller Energiesorgen enthebt und ihn sogar weitgehend von der solaren Energiezulieferung unabhängig macht. Die Grundlage dafür ist derselbe physikalische Prozeß, der auch der Sonne zu ihrem ungeheuren Energieaufkommen verhilft und den wir schon als Quelle des Sternenfeuers im Sonnenkern kennengelernt haben: die Kernfusion. Nachdem Sonnen- und Kernphysiker das Geheimnis der solaren Energieentwicklung gelüftet hatten, wurde zwangsläufig der Wunsch wach, diesen phantastischen Energiemechanismus auf der Erde – zunächst im Laboratorium, aber eines Tages auch im großen Maßstab – zu beherrschen. Gehen wir von dem im Sonneninnern vorgeführten Prinzip der Heliumsynthese aus Wasserstoffkernen aus, so stünde dafür auf der Erde im Wasservorrat der Weltmeere tatsächlich ein ungeheures und für viele Jahrmillionen ausreichendes Energiereservoir zur Verfügung.

Doch der Weg dorthin, so klar vom Prinzip her die Wissenschaftler ihn auch vor Augen haben, ist voller unabsehbarer Schwierigkeiten. Immerhin soll ja in irdischen Laboratorien ein physikalischer Mechanismus zum Funktionieren gebracht werden, der sonst nur unter den außergewöhnlichen Bedingungen des Sonneninnern ablaufen kann. Das heißt, der aus Protonen bestehenden Reaktionssubstanz müssen extrem hohe Temperaturen und Dichten vermittelt werden. Die dazu entwickelten kernphysika-

lischen Anlagen beruhen auf verschiedenen Prinzipien. Besonders aussichtsreich waren bisher die Arbeiten an den sowjetischen „Tokamak“-Anlagen, deren Muster schon in den frühen fünfziger Jahren in Betrieb genommen wurde. Aber auch die in den USA und in Westeuropa geschaffenen Systeme vom Typ „Stellarator“ und „Theta-Pinch“ liefern bedeutende Forschungsergebnisse.

Allen gemeinsam ist, daß die Reaktionssubstanz in einem Vakuumbehälter durch enorm starke elektrische und magnetische Kräfte in ein Hochtemperaturplasma verwandelt wird. Gleichzeitig bewirken speziell geformte, starke Magnetfelder die Konzentration des Plasmas zu höchsten Dichten im Zentrum des Vakuumbehälters und damit auch seine Trennung von der Behälterwand. Letzteres ist ebenso wichtig wie die Dichtheit der einschließenden „Magnetfallen“ oder „Magnetflaschen“, da die sonst eintretenden Strahlungs- und Substanzverluste den Reaktionsmechanismus im Plasma sofort aufhören lassen. Gerade hier liegen nun in der Praxis die entscheidenden Probleme. So konnte ein stabiler Plasmaaufbau bisher nur für winzige Sekundenbruchteile erreicht werden, während die erzielten Temperaturen verschiedentlich schon in der angestrebten Größenordnung von etlichen Millionen Grad K lagen. Eine energieökonomische Fusionsreaktion war auf diesem Weg noch nicht zu erzielen; denn erst einmal müßten ja die enormen Energieaufwendungen ausgeglichen werden, die der Betrieb solcher Anlagen erfordert.

Obwohl in zahlreichen Laboratorien der Welt intensiv geforscht wird, kommt man dem großen Ziel nur äußerst langsam näher. Zeitweilig scheint es, als würde man es vielleicht niemals erreichen. Ob andere Verfahrenstechniken als die hier beschriebenen – zum Beispiel der Einsatz von Laserenergie – schneller zum Erfolg führen könnten, ist noch ungewiß. Eines aber steht fest: Der schöpferische Mensch wird sich unablässig darum bemühen, auch dieses Problem zu lösen und schließlich doch das Sternenfeuer des Sonnengottes unserer Urahnen zu seinem Nutzen auf die Erde zu holen.

Inhalt

- 5 „Achtung – in zehn Sekunden Totalität!“
- 17 Als der Drache der Finsternis
den Gott des Lichts verschlang
- 20 Dämonen beherrschen das Himmelsgeschehen
- 23 Sonnengötter bringen das Licht
- 32 Der „Strahlende“ wird berechenbar
- 35 Vom Sonnenjahr zum Kanon der Finsternisse
- 36 Am Beginn der Zeitrechnung
- 40 Der Sonnenlauf hat seine Gesetze
- 43 Das Zeitmaß wird verfeinert
- 46 Jahreslängen und ihre Tücken
- 50 Die Sorgen der Kalendermacher
- 53 Auch das Spiel der Finsternisse folgt festen Regeln
- 59 Die Sonne und ihre Familie
- 60 Die Erde – das Zentrum der Welt?
- 61 Copernicus setzt die Sonne in den Mittelpunkt
- 63 Kepler findet die Gesetze aller Bewegungen um die Sonne
- 66 Isaac Newton entdeckt die Sonnenanziehung
- 69 Die Entfernung Erde–Sonne wird zur kosmischen „Elle“
- 73 Ein „Steckbrief“ der Sonne

75	Die Geschwister der Erde
85	Klein- und Kleinstkörper im Sonnensystem
89	Die Sonne – ein glühender kosmischer Gasball
90	Das Fernrohr eröffnet neue Welten
97	Was die Gaskugel zusammenhält
104	Spektralanalyse – der Schlüssel zur Sonnenphysik
109	Die Sonne unter der Lupe
110	„Pflastersteine“ auf der Sonnenoberfläche
112	„Kühlmaschinen“ im Sonnengas
117	Die „Fieberkurve“ der Sonne
121	Das zweite „Stockwerk“ der Sonnenatmosphäre
124	Glühende Gaswolken über der Sonnenoberfläche
127	Eine hauchdünne, aber sternenheiße Krone
132	Die Sonne krümmt den Weg des Lichts
137	Aus der Werkstatt des Sonnenphysikers
138	Sonnentürme der Wissenschaft
148	Radiosender Helios
157	Sonnenteleskope am Ballon
165	Sonnenobservatorien im Weltall
166	Höhenraketen im Dienste der Sonnenforschung
170	Automatische Sonnenobservatorien in der Erdumlaufbahn
178	Raumstationen als „Sonnenwarten“
185	Sternenfeuer im Sonnenkern
186	Das Rätsel der Sonnenenergie wird gelöst
196	Wie sind Sonne und Planeten entstanden?

199	Sonne und Erde
200	Lebensmotor für die Erde
202	Energietransport durch Wellen und Teilchen
208	Der Strahlungskäfig der Erde
211	Bringen Sonnenflecke schlechtes Wetter?
212	Beeinflußt die Sonnenaktivität unsere Gesundheit?
214	Energiereserven gesucht!
216	Sonnenöfen und Strahlungsfallen
223	Sonnenkraftwerke im Weltraum
227	Sternenfeuer für die Erde