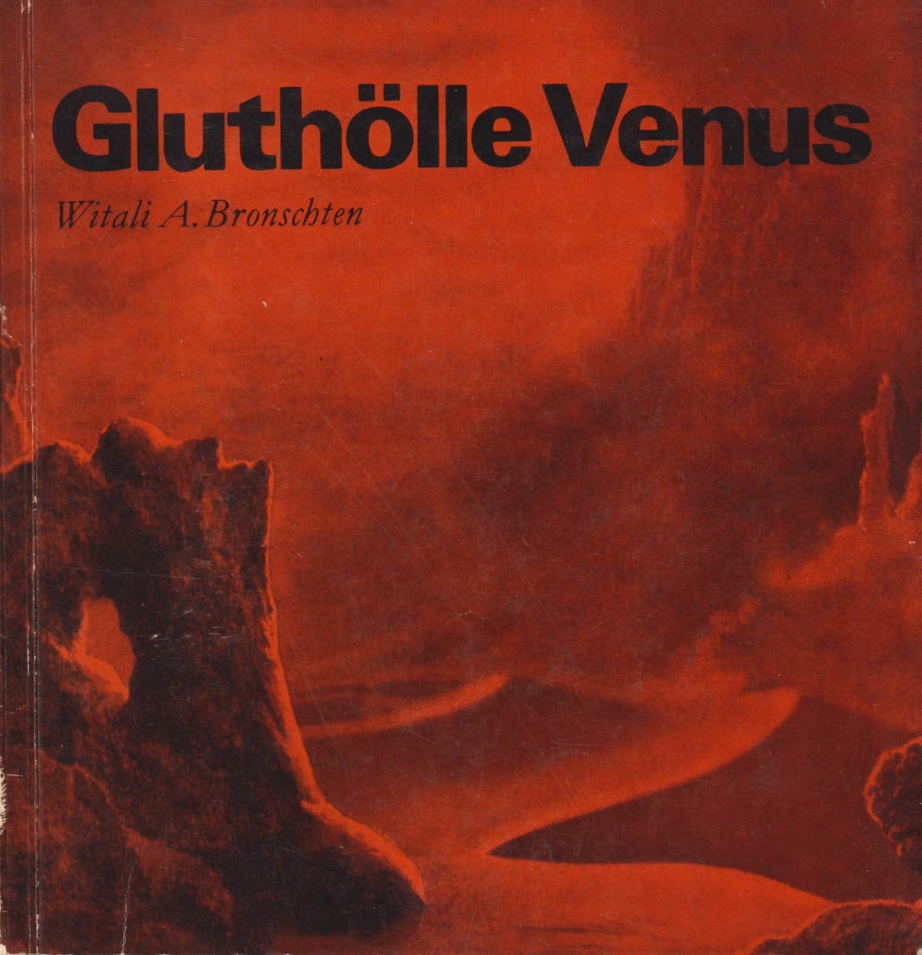


Gluthölle Venus

Witali A. Bronschten



Witali A. Bronschten

Gluthölle Venus

Urania-Verlag

Leipzig · Jena · Berlin

Originaltitel : Planeta Wenera.
Verlag »Snnaije«, Moskau 1971
Übersetzung aus dem Russischen :
Dr. Joachim Gürtler

Redaktionsschluß: 6. Juni 1972

Lektor: Ewald Oetzel

1. Auflage 1972

1.-6. Tausend

Copyright by Urania-Verlag Leipzig/Jena/Berlin

Verlag für populärwissenschaftliche Literatur

VLN 212 - 475/47/72 ES 5 C

Gesamtgestaltung: Hans-Jörg Sittauer

Zeichnungen: Hasso Seyferth

Einbandfoto: Archiv Dr. Johannes Dorschner,

Venus-Landschaft nach einer Darstellung

von Bonestell

Fotos: Nowosti (6), Archiv des Verlages (11)

Satz und Druck: Buch- und Stahlstichdruck Greiz,

Werk III des VEB Druckwerke Reichenbach,

Werkteil Zeulenroda

Buchbinderei: VEB Spezialbuchbinderei, Leipzig

Printed in the German Democratic Republic

4,-

Inhalt

1 Die Venus — ein Planet der Rätsel 7

2 Allgemeine Angaben über die Venus 9

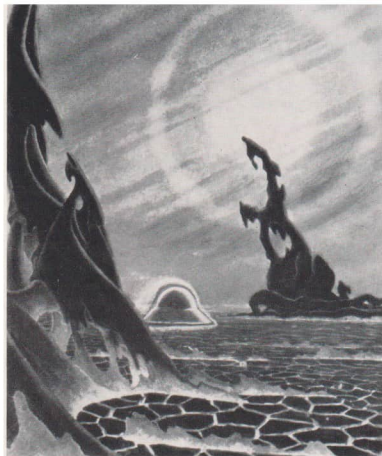
**3 Die Erforschung der Venus
mit den klassischen Methoden
der Astronomie 15**

**4 Anwendung der Methoden der Radioastronomie
und der Funkortung 21**

**5 Erfolge der Infrarotspektroskopie
der Venus 32**

**6 Die Erforschung der Venus
durch unbemannte Raumsonden 36**

Die Venus – ein Planet der Rätsel



Eine Landung in der Glutbölle der Venus stellt sich der sowjetische Maler A. Sokolow so vor: Schwer hat es das Raumfahrzeug, wenn ringsum die Felsen schmelzen

In letzter Zeit wandten die Astronomen ihre Aufmerksamkeit immer stärker dem erdnächsten Planeten des Sonnensystems, der Venus, zu. Ihrer Erforschung ist eine große Zahl sowohl beobachtender als auch theoretischer Arbeiten gewidmet. In den letzten zehn Jahren wurden zehn Raumsonden, darunter acht sowjetische, zu diesem Planeten geschickt, während immerhin in der gleichen Zeit zum Mars insgesamt sieben Raumflugkörper gestartet wurden.

Bei einem solchen »Sturm auf die Venus« ließen die Ergebnisse nicht auf sich warten. In diesen Jahren erfuhren wir über die Venus mehr als in den vorhergegangenen 350 Jahren ihrer Erforschung mit Fernrohren und anderen astronomischen Geräten.

Die Untersuchung der Venus ist schwierig. Eine dichte Atmosphäre und eine gewaltige Wolkendecke verhüllen ihre Oberfläche vollständig. Es bleibt nicht die geringste Lücke, durch die unser Blick dringen könnte. Die Anwendung neuer Methoden in der Venusforschung, der Radioastronomie und der Funkortung, brachte neue Fragestellungen hervor (z. B. die Frage nach der Ursache der hohen Temperatur des Planeten), deren Lösung den Theoretikern viel Mühe bereitete. Trotz aller Erfolge der Wissenschaftler blieben aber einige Rätsel der Venus bis heute ungelöst.

Was war aber nun der Grund dafür, daß der Venus eine solche Aufmerksamkeit geschenkt wurde, dem Planeten also, dessen Untersuchung lange Jahre hin-



Die scheinbaren Schleifen in den Bahnen von Mars, Venus und Merkur sowie die rückläufigen Bewegungen von Jupiter und Saturn sind in der Photographie aus dem Münchener Planetarium sehr gut zu erkennen. Hier wurden die Planetenbahnen für einen Zeitraum von 17 Jahren simuliert

durch in astronomischen Kreisen nicht einmal als ernsthafte Angelegenheit angesehen und an die Liebhaber-astronomen »verpachtet« worden war?

Die geringe Entfernung der Venus ermöglichte ihre Erforschung durch Raumfluggeräte. Der Start von Raumsonden zur Venus war nach den Flügen zum Mond am leichtesten zu verwirklichen, denn er benötigte weniger Energie, Geschwindigkeit und Flugzeit als die Flüge zu den anderen Planeten. Zur richtigen Vorbereitung der Flüge, für die Auswahl und Bemessung der Geräte der Sonde mußte man soviel wie möglich mit erdgebundenen Methoden in Erfahrung bringen.

Aber auch dies war nicht der Hauptgrund für die wachsende Aufmerksamkeit, die der Natur der Venus

zuteil wurde. Vielmehr ähnelt sie in ihren Abmessungen, der Entfernung von der Sonne und anderen Merkmalen der Erde am meisten. Die Untersuchung eines anderen Planeten – einer Schwestererde – kann eine große Bedeutung für das Verständnis der Erde selbst, ihres inneren Aufbaus, der Herkunft ihres Magnetfeldes, der Atmosphäre und schließlich des Ursprungs und der Entwicklung der Erde als Ganzes haben. Deshalb nahm die Erforschung der Natur der Venus in den letzten Jahren einen solch gewaltigen Aufschwung.

Wir wollen uns in dieser Broschüre bemühen, das zu berichten, was die Astronomen in dreieinhalb Jahrhunderten Venusforschung erkannten und was wir heute von der Natur der Venus wissen.

Die Venus ist dem Abstand von der Sonne nach der zweite Planet des Sonnensystems. Nur Merkur ist näher an der Sonne, und auf die Venusbahn folgt die der Erde.

Die Venus umkreist die Sonne in einem Abstand von 108 Millionen km und vollendet einen Umlauf in 225 Tagen. Die Venusbahn ist fast genau ein Kreis; sie weist die geringste Exzentrizität aller Bahnen des Sonnensystems auf. Deshalb verändert sich der Abstand dieses Planeten von der Sonne nur sehr gering. Er kann höchstens um 700 000 km vom Mittelwert abweichen.

Unsere Erde bewegt sich dagegen in einer mittleren Entfernung von 149,6 Millionen km um die Sonne. Sie nähert sich ihr bis auf 147 Millionen km und entfernt sich von ihr bis auf 152 Millionen km. Die Umlaufzeit der Erde um die Sonne beträgt 365,24 Tage.

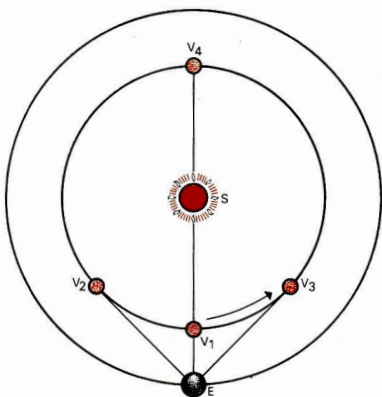
Ein Vergleich dieser Zahlen zeigt sofort, daß der kürzeste Abstand zwischen Erde und Venus 38 Millionen km betragen kann. Dazu müssen Sonne, Venus und Erde in einer Linie stehen (eine solche Stellung der Venus in bezug auf Sonne und Erde nennt man *untere Konjunktion*) und die Erde sich gleichzeitig im sonnennächsten Punkt ihrer Bahn (im *Perihel*), die Venus sich dagegen im sonnenfernsten Punkt (im *Aphel*) befinden.

Diese drei Bedingungen sind äußerst selten gleichzeitig

erfüllt. Es läßt sich unschwer ausrechnen, in welchen Zeitabständen eine untere Konjunktion eintritt. Dazu muß die Venus, deren Bahngeschwindigkeit im linearen Maß und im Winkelmaß größer ist als die der Erde, unseren Planeten nach einem Umlauf genau eingeholt haben. An einem Tage legt die Venus ein Zweihundertfünfundzwanzigstel ihrer Bahn zurück, die Erde den dreihundertfünfundsechzigsten Teil. Demzufolge holt die Venus gegenüber der Erde an

einem Tag $\frac{1}{225} - \frac{1}{365} = \frac{1}{584}$ des Kreisumfangs auf.

Also benötigt die Venus 584 Tage, um die Erde nach einem Umlauf einzuholen. Das ist demnach auch die Zeit zwischen zwei unteren Konjunktionen oder die sogenannte *synodische* Umlaufzeit der Venus. Sie beträgt 1,599 Jahre. Untere Konjunktionen finden daher in unterschiedlichen Bahnpunkten statt. Die synodische Umlaufzeit der Venus verhält sich zu einem Jahr fast genau wie 16 : 10 oder 8 : 5. Fand also eine untere Konjunktion im Januar statt, die Erde befindet sich zu dieser Zeit im Perihel, so gibt es nach 5 synodischen Umläufen der Venus oder ungefähr 8 Jahren erneut eine untere Konjunktion im Januar. In dieser Zeitspanne vollendet Venus genau 13 Umläufe um die Sonne, und alle Sichtbarkeitsbedingungen wiederholen sich. Deshalb existiert ein achtjähriger Zyklus in den Sichtbarkeitsbedingungen der Venus.



Die Stellungen der Venus in Bezug auf die Erde. Die Venus ist ein Morgenstern, wenn sie sich bei V_3 und ein Abendstern, wenn sie sich bei V_2 befindet. Bei V_4 ist sie sich in oberer, bei V_1 in unterer Konjunktion

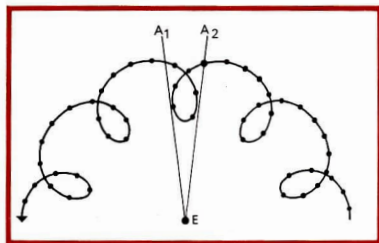
Wie ist Venus an unserem Himmel zu sehen? Schon lange hat dieser Planet die Aufmerksamkeit der Menschen erregt, einmal wegen seiner großen Helligkeit, die die jedes anderen Sterns oder Planeten übertrifft, zum andern wegen seiner eigentümlichen Stellung am Himmel. Denn entweder ist er in der Abenddämmerung im Westen oder in der Morgendämmerung im Osten zu sehen. Niemals ist die Venus nachts am Südhimmel sichtbar, und mitunter ist sie unseren Blicken für eine längere Zeitspanne verborgen.

Die Ursachen dieses seltsamen Verhaltens sind leicht zu verstehen. Betrachten wir die Bahnen von Venus und Erde. Die Venusbahn liegt vollständig innerhalb der Erdbahn. Wir befinden uns im Punkte E und können die Venus niemals in einem Winkelabstand von der Sonne beobachten, der größer ist als der Winkel SEV_2 (oder der gleich große Winkel SEV_3). Dieser Winkel beträgt 48° , und die Stellungen V_2 und V_3 , in

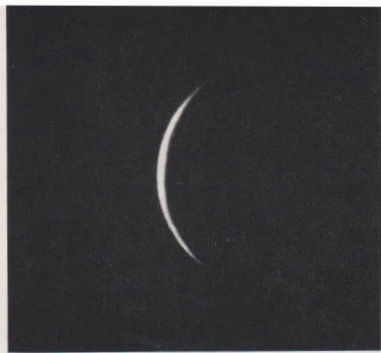
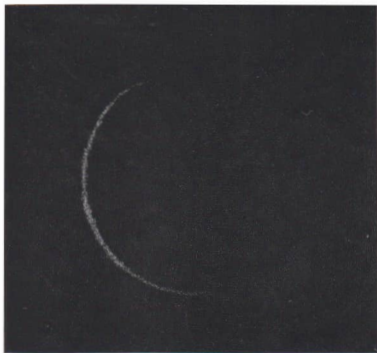
denen sich die Venus um diesen Winkel von der Sonne entfernt, nennt man größte Elongation des Planeten. Dabei heißt die Stellung V_2 östliche Elongation (und der Planet ist am Abend sichtbar) und V_3 westliche Elongation (und Venus ist am Morgen sichtbar).

In nebenstehender Abbildung sind auch die anderen besonderen Stellungen der Venus in Bezug auf Sonne und Erde dargestellt. V_1 ist die uns bereits bekannte untere Konjunktion und V_4 die obere Konjunktion. In ihr steht der Planet hinter der Sonne und hat den größten Abstand von der Erde (er kann maximal rund 260 Millionen km betragen).

Es ist leicht einzusehen, daß sich Venus während der Konjunktionen in der gleichen Richtung wie auch die Sonne befindet und daher in deren Strahlen verborgen ist. Beobachtungen des Planeten sind in dieser Zeit schwierig, da er sich am Taghimmel aufhält und nur im Fernrohr zu sehen ist. Die günstigste Zeit der Venussichtbarkeit sind die größten Elongationen, aber auch sie eignen sich nicht alle gleich gut. Damit Venus während der Elongation hoch am Himmel steht und lange sichtbar ist, muß die östliche Elongation im Winter oder Frühling und die westliche im Winter oder Herbst stattfinden. Unter diesen Bedingungen liegt der tägliche Weg der Venus am Himmelsgewölbe oberhalb der Sonne, und der Planet ist gut sichtbar. Die ungünstigste Jahreszeit, um die Venus in der Elon-



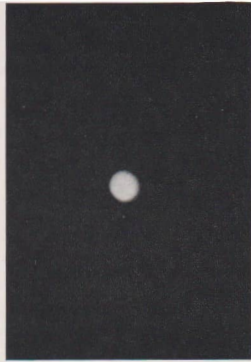
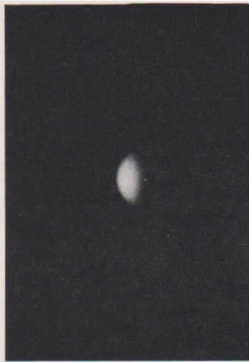
Scheinbare Bewegung eines Planeten von der Erde aus gesehen. Der Planet bewegt sich von EA_2 zur Linie EA_1 und dann wieder zurück zur Linie EA_2

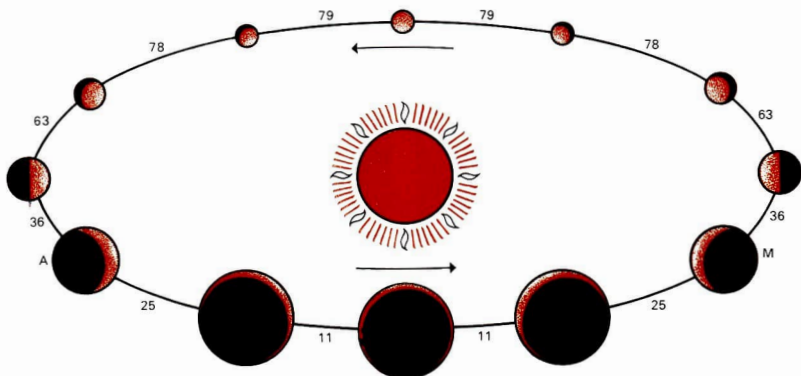


Befindet sich die Venus zwischen Erde und Sonne (Entfernung Erde-Venus etwa 38 Mill. km), so erscheint sie als »Neuvenus« relativ groß. Sie ist dabei von einem schmalen, hellen Schimmer umgeben, verursacht durch die Lichtstreuung in der dichten Venusatmosphäre

Auf ihrer Bahn um die Sonne – als Morgenstern – wird die Venus zu einer schmalen, großen Sichel, dabei ständig kleiner und voller werdend

Die Venus wird auf ihrer Bahn jenseits der Sonne zur »Vollvenus« (Erde-Venus jetzt 258 Mill. km entfernt)





Venus in verschiedenen Phasen während eines synodischen Umlaufs (größte Helligkeit der Venus: A am Abendbimmel, M am Morgenbimmel). Die Zahlen geben die Tage zwischen den einzelnen Phasen an

gation zu beobachten, ist der Sommer. Der tägliche Weg der Sonne liegt dann selbst so hoch, daß sich Venus nicht merklich höher befinden kann. Erst Ende August werden die Sichtbarkeitsbedingungen besser.

1972 ist ein außerordentlich günstiges Jahr, um die Venus zu beobachten. Im Frühling war sie in der östlichen Elongation (abends) lange sichtbar, und am Ende des Sommers wird sie es in der westlichen (morgens) sein. Außerdem ist der Anfang des Jahres 1977 für Beobachtungen während der östlichen und der Herbst 1975 für Beobachtungen während der westlichen Elongation günstig.

Von der östlichen Elongation bis zur unteren Konjunktion vergehen gewöhnlich 72 Tage und ebensoviel von dieser Konjunktion bis zur westlichen Elongation. Nach 220 Tagen ist die obere Konjunktion und nach nochmals 220 Tagen eine neue östliche Elongation erreicht. Von da ab wiederholt sich der Kreislauf. In dem Monat nach der östlichen und in dem vor der westlichen Elongation besitzt die Venus die größte Helligkeit. Der Planet ist dann mit unbewaffnetem

Auge sogar am Tage zu sehen, aber um ihn zu finden, muß man den Ort am Himmel genau kennen.

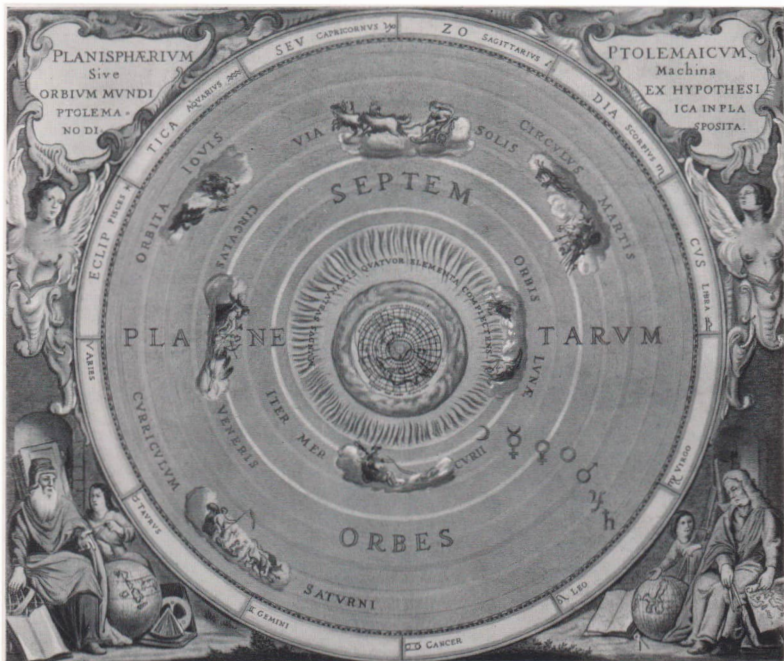
Die verschiedenen Stellungen, die die Venus in bezug auf die Sonne nacheinander einnimmt, führen zu einem Phasenwechsel. Die Phasen der Venus wurden bereits 1610 von Galileo Galilei entdeckt, dem ersten Astronomen, der den Planeten mit einem Fernrohr beobachtete. Seine Entdeckung verschlüsselte er in einem Anagramm (einem Satz mit vertauschten Buchstaben). Später, nachdem er sich von der Zuverlässigkeit seiner Beobachtungen überzeugt hatte, gab Galilei die Entschlüsselung des Anagramms an, die in deutscher Übersetzung folgendermaßen lautet: »Die Mutter der Liebe ahmt die Figur der Cynthia nach.« Bekanntlich war Venus bei den alten Römern die Göttin der Liebe und Schönheit, und Cynthia ist ein Name des Mondes. Demnach war der Sinn von Galileis Satz: »Die Venus zeigt die gleichen Phasen wie der Mond.«

Der Wechsel der Mondphasen wird damit erklärt, daß der Mond eine dunkle Kugel ist, die von der Sonne beschienen wird und deren Strahlen zurückwirft.

Galileis Entdeckung bewies, daß auch die Venus eine Kugel ist, die Sonnenstrahlen reflektiert. Darüber hinaus stellte Galilei fest, daß der scheinbare Durchmesser der Venus größer ist, wenn diese wie eine schmale Sichel aussieht, als wenn sie eine fast volle Scheibe zu sein scheint. Das zeigt, daß uns die Venus in der unteren Konjunktion bedeutend näher ist als

in der oberen Konjunktion. Also bewegt sie sich nicht um die Erde, sondern um die Sonne. Dadurch unterstützte Galileis Entdeckung die Lehre des Kopernikus von der zentralen Stellung der Sonne in unserem Planetensystem und der verwandten Natur der Planeten und der Erde. Zusammen mit den anderen Entdeckungen, die Galilei mit Hilfe des Fernrohrs ge-

Eine geozentrische Darstellung des Sonnensystems, wie sie vor Kopernikus üblich war



langen, spielte sie eine wichtige Rolle bei der Festigung des kopernikanischen heliozentrischen Weltbildes und zog Galilei den Zorn der »allerheiligsten« Inquisition zu.

Bereits im 17. Jahrhundert begann die sorgfältige Beobachtung der Venus und die Messung ihres scheinbaren Durchmessers. Die Meßtechnik wurde schrittweise verbessert, und am Ende des 19. Jahrhunderts galt 16", 82 als wahrscheinlichster Wert für den scheinbaren Durchmesser des Planeten in einer Entfernung von einer astronomischen Einheit.¹ Diesem Wert entspricht ein linearer Durchmesser von 12 200 km, was nur unwesentlich weniger als ein Erddurchmesser (12 750 km) ist.

Der scheinbare Venusdurchmesser schwankt zwischen 67" bei der geringsten Entfernung (in der unteren Konjunktion) und 10" in der oberen Konjunktion.

Der oben angegebene Durchmesser der Venus ist aus optischen Beobachtungen abgeleitet und stellt nicht die Abmessungen des eigentlichen Planeten dar. Schon früh fiel auf, daß auf der Venuscheibe keine Einzelheiten sichtbar waren, die man in einer Karte hätte verzeichnen können. In der Folgezeit wurde klar, daß wir nicht die Oberfläche des Planeten, sondern eine ihn umgebende Wolkenschicht beobachten. Folglich sind die 12 200 km der Durchmesser des Planeten plus Wolkenhülle und nicht der festen Planetenkugel allein.

Erst in den letzten Jahren (1965–1968) gelang es mit

der Methode der Funkortung (Radar), den wahren Durchmesser der Venus bestimmen. Diese Methode wird weiter unten ausführlich dargestellt. Hier geben wir nur den wahrscheinlichsten Wert des Venusdurchmessers an, der auf diese Weise erhalten wurde, nämlich 12 106 km. Bei Zugrundelegung dieses Zahlenwertes beträgt die Oberfläche der Venus 90,4% und ihr Volumen 85,9% der entsprechenden irdischen Werte.

Die Venusmasse wurde 1962 beim Vorüberflug der amerikanischen Raumsonde Mariner 2 genau bestimmt. Sie beträgt 81,5% der Erdmasse. Hieraus kann man unschwer die mittlere Dichte der Venus zu 5,23 g/cm³ (die der Erde beträgt 5,55 g/cm³), die Schwerebeschleunigung an der Oberfläche zu 887 cm/s² (90% der Erdbeschleunigung) und die planetare Fluchtgeschwindigkeit, die zur Überwindung der Anziehung des Planeten nötig ist, zu 10,36 km/s (bei der Erde 11,18 km/s) errechnen.

Wir sehen, daß sich die Venus in den geometrischen und dynamischen Kennziffern wenig von der Erde unterscheidet. Da sie sich ungefähr 1,4mal näher an der Sonne befindet als die Erde, erhält sie von ihr doppelt so viel Licht und Wärme. Das bedeutet, daß es auf ihr bedeutend wärmer ist als auf der Erde. Scheinbar beschränkte sich der Unterschied zwischen der Venus und unserem Planeten im wesentlichen darauf. Doch die Welt der Venus erwies sich als ganz anders – unähnlich der Welt der Erde.

¹ Astronomische Einheit (AE): Einheit der Länge für Entfernungsangaben innerhalb des Sonnensystems. 1 AE = 149,6 Mill. km (entspricht etwa der mittleren Entfernung Erde–Sonne)

Die Erforschung der Venus mit den klassischen Methoden der Astronomie

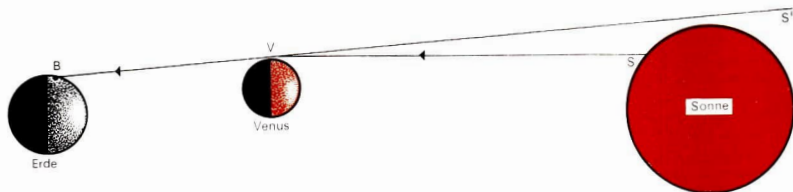
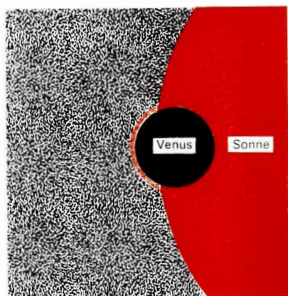
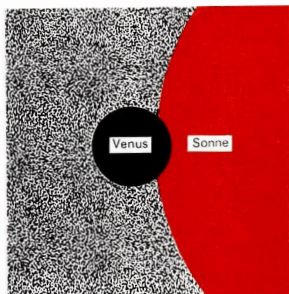
Die ersten Venusbeobachter (Cassini, Bianchini u. a.) versuchten vergebens, auf der Scheibe des Planeten irgendwelche unveränderlichen Einzelheiten aufzufinden, um daraus eine Karte zu zeichnen und die Rotationsperiode zu bestimmen. Obwohl jeder von ihnen einen anderen Periodenwert angab, wurde keine dieser Perioden bestätigt. Nicht mehr und nicht weniger als 85 solcher Versuche wurden im Verlaufe von 300 Jahren unternommen. Auch als die Astrophysik entstand und Photographie und Spektralanalyse den visuellen Beobachtungen zu Hilfe kamen, hütete der eigensinnige Planet zunächst das Geheimnis seiner Rotation.

150 Jahre nach den ersten Fernrohrbeobachtungen Galileis trat das Ereignis ein, das die Ursache dieser Mißerfolge teilweise enthüllte, nämlich die Entdeckung der Venusatmosphäre.

Während der unteren Konjunktion geht die Venus gewöhnlich etwas oberhalb oder unterhalb an der Sonne vorbei, denn ihre Bahn ist um 3° gegen die Erdbahnebene geneigt. Nur manchmal, zweimal in einem Jahrhundert, findet ein sogenannter *Durchgang der Venus* vor der Sonnenscheibe statt. Einer dieser Durchgänge ereignete sich am 6. Juni 1761. Die Astronomen der verschiedenen Länder bereiteten sich auf die Beobachtung dieses Ereignisses vor, um es zu einer genaueren Bestimmung der Entfernung der Erde von der Sonne, der astronomischen Einheit, zu benutzen.



Die Planetenbahnen, wie sie Kopernikus in seinem großen Werk »De Revolutionibus Orbium Coelestium« beschrieben



Das »Lomonossow-Phänomen«. Oben: So sah M. W. Lomonossow am 26. Mai 1761 (6. Juni 1761) die Atmosphäre der Venus. Unten: Erklärung des Lomonossow-Phänomens: Durch die Strahlenbrechung in der Venusatmosphäre V gelangt Licht vom Punkt S der Sonne ins Auge des Beobachters auf der Erde

Denn die Fortschritte der Himmelsmechanik ermöglichten es damals zwar, die relativen Entfernungen der Planeten von der Sonne und untereinander recht genau zu bestimmen, die Länge der astronomischen Einheit – des Grundmaßstabs im Sonnensystem – aber war praktisch unbekannt. Andererseits genügt es, den Durchgang der Venus vor der Sonnenscheibe von zwei weit entfernten Punkten der Erdkugel, deren Abstand voneinander bekannt ist, zu beobachten, um aus dem Unterschied in den gemessenen Ein- und Austrittszeiten der Venus in bezug auf die Sonnenscheibe zuerst die Venus-Parallaxe und dann auch die Parallaxe der

Sonne berechnen zu können.¹ Die Länge der astronomischen Einheit ist, wovon man sich leicht überzeugt, gleich dem Radius der Erde, geteilt durch den Tangens der Sonnenparallaxe.

Unter den Wissenschaftlern, die sich auf die Beobachtung vorbereiteten, war auch der bedeutende russische Gelehrte M. W. Lomonossow. Er rüstete zwei Expeditionen nach Sibirien, nach Irkutsk und Selenginsk,

¹ Als Parallaxe bezeichnet man den Winkel, unter dem der Äquatorhalbmesser der Erde von dem Mittelpunkt eines Himmelskörpers (des Sonnensystems) aus erscheint

aus und organisierte die Beobachtungen in St. Petersburg. Lomonossow selbst wollte diese Erscheinung ebenfalls beobachten, doch mit dem Ziel, mögliche physikalische Phänomene zu untersuchen. Seine Hoffnungen wurden voll erfüllt.

Als die schwarze Venusscheibe in den östlichen Sonnenrand eintrat, erschien letzterer Lomonossow als ausgehöhlt und unscharf. Der Gelehrte beschloß, auf den Austritt der Venus zu warten, der nach 6 Stunden erfolgen mußte. Der Augenblick war da. Die Venusscheibe erreichte den Sonnenrand. Es hatte den Anschein, daß sie gleich mit dem dunklen Himmels-hintergrund verschmelzen werde. Aber es kam anders. Der Sonnenrand wölbte sich auf und bildete um die Venus einen blendend hellen Saum. Als ein Drittel der Venusscheibe die Sonne schon verlassen hatte, war der Saum immer noch zu sehen. Doch plötzlich zerriß er in der Mitte und verschwand, worauf die Venus-scheibe mit dem Himmels-hintergrund verschmolz.

Diese Erscheinung (die die Bezeichnung »Lomonossow-Phänomen« erhielt) nahmen außer ihm noch viele andere Beobachter wahr. Aber nur Lomonossow gab ihre richtige Deutung, die er in seiner Arbeit »Die Erscheinung der Venus auf der Sonne, beobachtet an der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften zu St. Petersburg am 26. Mai 1761« im Juli des gleichen Jahres in russischer und deutscher Sprache veröffentlichte.

Die Ursache des »Lomonossow-Phänomens« ist die Brechung der Sonnenstrahlen in der Atmosphäre, die die Venus umgibt. Deshalb erschien Lomonossow und den anderen Beobachtern der Sonnenrand nach der vom Mittelpunkt des Planeten abgewandten Seite hin verschoben.

Leider blieb die Arbeit Lomonossows unbeachtet. Dreißig Jahre später, in den 90er Jahren des 18. Jahrhunderts, entdeckten der deutsche Astronom J. H. Schröter und der englische Astronom W. Herschel die Venusatmosphäre zum zweiten Male. Sie schlossen auf das Vorhandensein einer Atmosphäre aus dem Übergreifen der Hörner der Venusichel in den kleinen Phasen, das sie der Brechung und Streuung des Lichtes in der Venusatmosphäre zuschrieben. Diese Erscheinung wurde in der Folge, darunter auch in der jüngsten Zeit, sorgfältig untersucht. Die Arbeiten des

deutschen Astronomen W. Rabe, des tschechoslowa-kischen Wissenschaftlers F. Link und des sowjetischen Astronomen W. W. Scharonow zeigten, daß bei dem Übergreifen der Hörnerspitzen die Lichtstreuung in der Atmosphärenschiicht oberhalb der Wolken die Hauptrolle spielt. Nach Meinung des amerikanischen Gelehrten G. Edson erfolgt diese Streuung in einer dünnen Schicht aus einer Art Federwolken, die einige Kilometer oberhalb der Hauptwolkendecke liegt.

Eine eingehende Untersuchung des »Lomonossow-Phänomens« führte 1952 W. W. Scharonow durch. Er verwendete alle Beobachtungen dieser Erscheinung bei den Venusdurchgängen von 1761, 1769, 1874 und 1882 und zeigte, daß die Lichtbrechung in der atmo-sphärischen Schicht über den Wolken 22" nicht über-schreitet. Wir wissen, daß die Refraktion durch die Erdatmosphäre an der Oberfläche 34" oder fast 2 000" erreicht, d. h. die der Venus hundertmal übertrifft. Da der Brechungswinkel proportional der optischen Masse des Gases ist, die der Strahl durchdringt, die Abmessungen der beiden Planeten aber fast gleich sind, kann man daraus schließen, daß der Druck an der oberen Wolkengrenze der Venus etwa 0,01 at oder ungefähr 10 mbar beträgt. Wie wir später sehen wer-den, widerspricht diese Abschätzung nicht den übrigen Befunden.

Durch die Arbeiten sowjetischer Gelehrter, vor allen W. W. Scharonows, ist Lomonossows Priorität bei der Entdeckung der Venusatmosphäre heute in der ganzen Welt anerkannt. Woraus besteht nun aber diese Atmo-sphäre? Aus welchen Teilchen besteht die Wolken-schiicht?

Die Astronomen versuchten bereits in den 60er Jahren des vergangenen Jahrhunderts, die Spektralanalyse auf die Untersuchung der Venusatmosphäre anzu-wenden. Sauerstoff- und Wasserdampfbanden schienen im Venusspektrum verstärkt aufzutreten. Im Lichte unseres heutigen Wissens ist jedoch klar, daß der Wunsch, eine Ähnlichkeit im Aufbau der Atmosphäre von Venus und Erde zu finden, stärker war als die wissenschaftliche Unvoreingenommenheit.

Im 20. Jahrhundert begann erneut die Suche. A. A. Belopolski in Pulkowo und W. M. Slipher in Flag-staff, Arizona, versuchten vergeblich, in ihren zahl-reichen Spektrogrammen Anzeichen von Sauerstoff-

und Wasserdampfbanden zu finden. 1921 beteiligten sich die amerikanischen Astronomen C. E. St. John und S. B. Nicholson an der Suche. Sie benutzten dafür das damals größte Fernrohr der Welt auf dem Mt. Wilson. Aber auch ihre Anstrengungen waren erfolglos.

Erst 1932 entdeckten die Astronomen W. S. Adams und T. Dunham von der gleichen Sternwarte dank einer neuen Plattensorte, deren Empfindlichkeit bis ins nahe Infrarot (bis 9000 Å) reichte, im Venuspektrum drei starke Banden bei 7820, 7883 und 8689 Å Wellenlänge. Sie stammen alle vom gasförmigen Kohlendioxid (CO_2). Ihre Stärke wies darauf hin, daß dieses Gas in der Venusatmosphäre viele Male häufiger ist als in der Erdatmosphäre.

Wir machen eine kleine Rechnung. Die Erdatmosphäre enthält 0,03 % Kohlendioxid. Wenn wir unsere Lufthülle soweit zusammendrücken könnten, daß in ihr überall die gleiche Dichte und der gleiche Druck herrschen und diese den Werten in Meereshöhe entsprechen, so betrüge die Höhe einer solchen homogenen Atmosphäre 8 km. Wenn wir ferner alle Gase der Luft voneinander trennen könnten, so hätte die Stickstoffschicht eine Höhe von 6,25 km, die des Sauerstoffs eine von 1,7 km, des Argons eine von 80 m usw. In der Wissenschaft nennt man die Höhe solcher Schichten vertikale Dicke des betreffenden Gases und mißt sie in den Einheiten kmat, mat oder cmat (Kilometeratmosphäre, Meteratmosphäre, Zentimeteratmosphäre). Man berechnet leicht, daß die vertikale Dicke des Kohlendioxids in der Erdatmosphäre $8000 \cdot 0,0003 = 2,4$ mat beträgt.

Wie der Vergleich der CO_2 -Banden im Venusspektrum

mit den Laboratoriumsintensitäten zeigte, war die vertikale Dicke des Kohlendioxids in der Venusatmosphäre mindestens 1300mal größer und erreichte nach Adams' und Dunhams Abschätzungen 3,2 kmat. Dabei war der spektralen Untersuchung nicht die gesamte Atmosphäre, sondern nur der Teil, der über der Wolkenschicht liegt, zugänglich. Das heißt, der gesamte CO_2 -Gehalt der Venusatmosphäre muß noch größer sein!

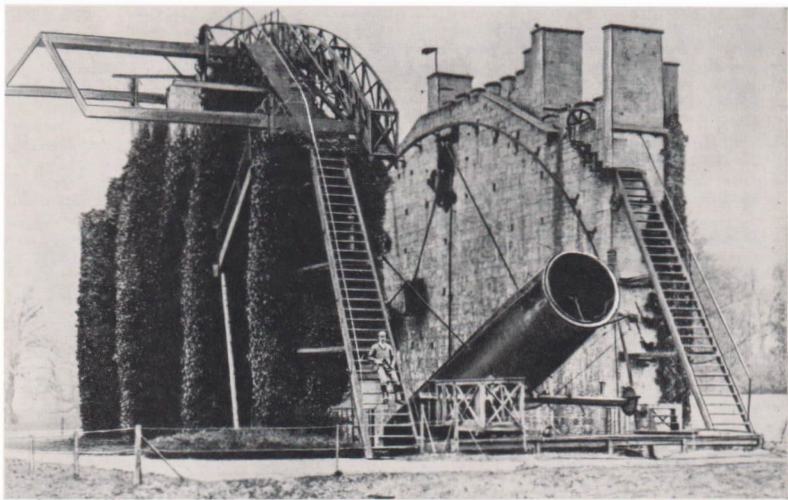
Versuche, in der Venusatmosphäre andere Gase zu entdecken, blieben lange Zeit erfolglos. Abschätzungen für den oberen Grenzwert in der Häufigkeit solcher Gase wie Sauerstoff, Kohlenmonoxid (CO) und Stickstoffdioxid (N_2O) ergaben weniger als 1 mat. Stickstoff und Argon besitzen keine Absorptionslinien und -banden im sichtbaren Teil und im nahen Infrarotbereich des Spektrums.

Die Wissenschaftler begannen, die Wolkenhülle der Venus zu erforschen. Zuerst gelang die Bestimmung ihrer Temperatur. Dazu verwendete man ein Thermoelement, das im Brennpunkt eines Spiegelfernrohrs angebracht war. (Ein Linsenfernrohr ist ungeeignet, da die Linsen die infraroten Strahlen verschlucken.) Ein Thermoelement stellt bekanntlich die Lötstelle zweier dünner Drähte aus verschiedenen Metallen (z. B. Kupfer und Wismut) dar, die in einen Stromkreis eingefügt ist. Wenn Strahlung auf die Lötstelle fällt, so entsteht zwischen dieser und einer zweiten Lötstelle (die der Strahlung nicht ausgesetzt ist) eine elektrische Spannung, und in dem Kreis fließt ein Strom, der gemessen werden kann.

Die Strahlung eines beliebigen Planeten besteht aus zwei Anteilen: reflektierter Sonnenstrahlung und vom

Infrarotspektrum der Sonne (a) und der Venus (b), (c) mit Absorptionsbanden des Kohlendioxids (7820 Å und 7883 Å). Im Sonnenspektrum fehlen diese Banden





Der Earl of Rosse-Reflektor aus den vierziger Jahren des vorigen Jahrhunderts, bekannt als Leviathan von Parsonstown, ein »klassisches« Teleskop, das im vorigen Jahrhundert von seinem Erbauer vor allem zur Erforschung der »Nebelflecken« benutzt wurde

Planeten selbst ausgesandter Eigenstrahlung. Glücklicherweise ist wegen des großen Temperaturunterschiedes zwischen der Sonne und den Planeten die reflektierte Strahlung hauptsächlich im sichtbaren und die Eigenstrahlung im infraroten Teil des Spektrums konzentriert. Mit Hilfe verschiedener Filter können sie getrennt werden, und aus der Stärke des Strahlungsstromes des Planeten läßt sich seine Temperatur bestimmen.

Temperaturmessungen an der Wolkenhülle der Venus wurden 1923 von E. Pettit und S. B. Nicholson an der Mt.-Wilson-Sternwarte begonnen und seither von vielen Astronomen oft wiederholt. Die zuverlässigsten Werte erhielten 1955 W. M. Sinton und J. Strong.

Die Temperatur der Wolkenschicht ergab sich zu etwa 233 bis 240 °K (ungefähr – 40 °C). In der Nähe der Pole sank die Temperatur auf 205 bis 213 °K. Spätere Untersuchungen bestätigten diese Ergebnisse.

Daß sich die Temperatur der Wolkenschicht der Venus als so niedrig herausstellte, war nicht erstaunlich. Auch bei uns herrschen in der Stratosphäre niedrige Temperaturen. Die thermoelektrische Methode konnte keine Aussagen über die Temperatur an der Planetenoberfläche machen. Die infraroten Strahlen, die von der Oberfläche ausgesandt werden, vermögen nicht die untere Atmosphäre und die Wolkenschicht zu durchdringen.

Was für Teilchen bilden die Venuswolken? Zur Beant-

wortung dieser Frage benutzen die Wissenschaftler vielfältige Methoden der Photometrie (Messung der Intensität des Lichtes, das von der Wolkenschicht reflektiert wurde) und Polarimetrie (Messung der Polarisation dieses Lichtes). In der Sowjetunion führten N. P. Barabaschow, W. W. Scharonow, W. I. Jeserski u. a. zahlreiche photometrische Beobachtungen aus. Aus dem Vergleich dieser Beobachtungen mit der von W. W. Sobolew entwickelten Theorie der Streuung des Lichts in dichten Planetenatmosphären folgt als einziges sicheres Ergebnis, daß die Teilchen in der Wolkenschicht der Venus offenbar Durchmesser von der Größenordnung Mikrometer besitzen. Auch die polarimetrische Methode ergab Abmessungen von der gleichen Größenordnung. Während der französische Wissenschaftler B. Lyot im Polarisationsverhalten eine Ähnlichkeit zwischen den Venuswolken und Wolken aus Wassertröpfchen feststellte, bestätigte der amerikanische Astronom G. Kuiper diesen Befund nicht. Die zahlreichen photometrischen und polarimetrischen Untersuchungen an der Wolkenschicht der Venus offenbarten wichtige Tatsachen und Einzelheiten (z. B. den »Spiegeleffekte« in den Venuswolken, den N. P. Barabaschow und W. I. Jeserski entdeckten, oder die Gebiete anomaler Polarisation, die der französische Astronom A. Dollfus fand). Diese Methoden konnten aber keine klare Deutung der Natur der Wolkenschicht der Venus geben. Am Ende der 50er Jahre wurde deutlich, daß die Möglichkeiten der

klassischen Methoden der Venusforschung ausgeschöpft waren.

Wie sah das Bild von der Natur der Venus am Ende der »klassischen« Zeit ihrer Erforschung aus?

Der Planet Venus ist von einer dichten Atmosphäre und einer gewaltigen Wolkenschicht umgeben. Die Venuswolken ähneln am meisten den irdischen, d. h., sie bestehen aus Wassertröpfchen. Die Venus ist näher an der Sonne und empfängt zweimal soviel Sonnenwärme. Deshalb ist die Temperatur an ihrer Oberfläche etwa 60 bis 70 °K höher als die irdische. Die warme, feuchte Atmosphäre, die eine große Menge Kohlendioxid enthält, fördert die Entwicklung von Pflanzen. – Fast die gleichen Bedingungen herrschten auf der Erde während der Steinkohlenzeit vor etwa 250 Millionen Jahren. Damals wuchsen auf der Erde riesige Schachtelhalme, baumartige Farne und Bärlappe. Sie verbrauchten das Kohlendioxid der Atmosphäre, reicherten diese mit Sauerstoff an und ermöglichten so das Erscheinen der Tiere auf dem Festland. Sie starben aus, nachdem sie für uns die Steinkohlevorräte »angelegt« hatten.

Gleicht die Venus unserer Erde in der Vergangenheit? Gibt es vielleicht auf diesem Planeten eine üppige Pflanzenwelt, und werden in Zukunft Bedingungen für ein Leben entstanden sein, das dem unseren in nichts nachsteht? Leider ließen die Untersuchungen der letzten Jahre von diesem anziehenden, aber völlig falschen Bilde nichts übrig.

In der Mitte der fünfziger Jahre hatte eine neue Methode zur Erforschung des Weltalls – die Radioastronomie – bereits große Erfolge verbucht. Die Astronomen untersuchten die Radiostrahlung der äußeren Schichten der Sonne – Korona und Chromosphäre – und erfuhren dadurch viel Neues über deren Natur. Einzelne Quellen der kosmischen Radiostrahlung (sogenannte diskrete Radioquellen), Radio-Gasnebel und Radiogalaxien, wurden entdeckt, untersucht und gedeutet und die allgemeine kosmische Hintergrundstrahlung erforscht. Für die Untersuchung der Planeten wurde diese Methode recht spät, erst nach 1955, angewandt.

Im Mai 1956 empfingen C. H. Mayer, R. M. Sloanaker und T. P. McCullough vom U. S. Naval Research Laboratory mit einem 15-m-Parabol-Radioteleskop als erste bei einer Wellenlänge von 3 cm Strahlung von der Venus. In dem Maße, wie sich der Planet der Erde näherte, nahm die Stärke des Signals zu, so daß an seiner Herkunft keine Zweifel aufkamen. Nicht lange danach gab J. D. Kraus von der Ohio State University den Empfang von Signalen der Venus bei 11 cm bekannt. Sie stellten eine Art kurzzeitiger Ausbrüche dar, die er als Folge gewitterähnlicher Entladungen in der Venusatmosphäre deutete. Tatsächlich waren es aber Störungen irdischer Herkunft, was Kraus selbst bald darauf feststellte.

Wir erklären kurz, wie ein Radioteleskop arbeitet und



Mit den Geräten der Radioastronomie konnte manches Geheimnis ferner Himmelskörper enträtselt werden

warum die Planeten Radiowellen aussenden können. Ein Radioteleskop ist eine Richtantenne, die einen im Brennpunkt eines riesigen Parabolspiegels angebrachten Strahlungsempfänger darstellt. Der Spiegel reflektiert alle Strahlen, die seine Oberfläche erreichen, auf die Antenne, sofern sie parallel zur Achse des Parabolspiegels einfallen. Das von der Antenne aufgenommene Signal wird dann auf elektronischem Wege verstärkt und durch eine Registriereinrichtung aufgezeichnet. In der Regel ist die Anlage für eine bestimmte Wellenlänge ausgelegt, in der dann die Beobachtungen erfolgen.

Die Erdatmosphäre läßt Radiowellen mit Längen zwischen 1 bis 2 mm und 15 bis 20 m durch, und dies ist auch der Wellenlängenbereich, der in der Astronomie verwendet wird.

Die Radiostrahlung der Himmelskörper hat verschiedene Ursachen. Radiowellen werden erzeugt durch Plasmashwingungen geladener Teilchen in den oberen atmosphärischen Schichten einiger Planeten und in der Sonnenkorona, durch Abbremsung schneller Elektronen in den interstellaren Magnetfeldern, bei gewaltigen elektrischen Entladungen. Dies sind alles Quellen *nichtthermischer* Radiostrahlung. Daneben sendet jeder Körper in Abhängigkeit von seiner Temperatur zusammen mit anderen Arten von elektromagnetischer Strahlung auch Radiowellen aus. Die unmittelbare Ursache dieser *thermischen* Strahlung stellt die ungeordnete Wärmebewegung der Moleküle und Atome des betreffenden Körpers dar. Wenn der Körper heiß genug ist, sendet er neben Radiowellen (die eine vergleichsweise niedrige Frequenz haben) auch Strahlung höherer Frequenz, nämlich infrarotes und sichtbares Licht, aus. Im letzteren Falle haben wir es mit glühenden, selbstleuchtenden Körpern (Sonne, Sterne) zu tun. Die Planeten senden nur infrarote und thermische Radiostrahlung aus.

Die Flußdichte der Radiostrahlung eines Planeten (ihr entspricht die Beleuchtungsstärke bei sichtbarem Licht) ist dessen Temperatur direkt und dem Quadrat der Wellenlänge umgekehrt proportional. Deshalb ist die langwellige Radiostrahlung der Planeten schwieriger zu messen, und man geht im allgemeinen nicht weiter als bis in den Dezimeterbereich (20 bis 70 cm). Sehr kurze (Millimeter-) Wellen erfahren in der Erdatmo-

sphäre eine beträchtliche Absorption. Daher sind Zentimeterwellen zur Messung am besten geeignet.

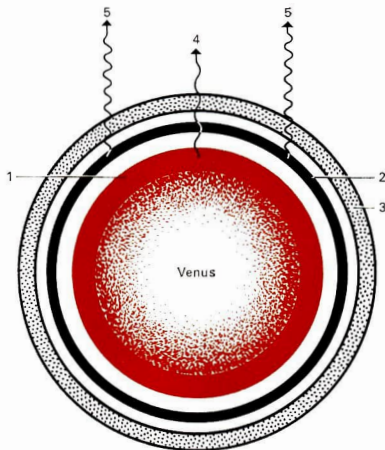
Aus dem gemessenen Radiostrahlungsstrom eines Planeten läßt sich seine *Strahlungstemperatur* berechnen. Es ist die Temperatur, die ein vorgestellter, völlig schwarzer Planet der gleichen Größe haben müßte, damit man von ihm aus der gleichen Entfernung den gleichen Radiostrahlungsstrom empfängt. Da die Planeten ganz allgemein keine völlig schwarzen Körper für Radiowellen sind (d. h., sie nicht vollständig absorbieren, sondern auch reflektieren, allerdings sehr schwach), ist die Strahlungstemperatur eines Planeten etwas niedriger als seine wirkliche Temperatur.

Radiowellen des Zentimeterbereiches gehen ungehindert durch die Erdatmosphäre und die Wolken hindurch. Für sie sind sowohl die für andere Strahlung undurchdringlichen Wolken als auch die dichte Atmosphäre der Venus kein Hindernis. Die Radiowellen waren die ersten Boten, die über die Natur der Oberfläche und der unteren Schichten der Atmosphäre der Venus berichteten.

Als Mayer und seine Mitarbeiter die Strahlungstemperatur der Venus maßen, waren sie überrascht. – Die Temperatur betrug etwa 600 °K (mehr als +300 °C). Sie übertraf die Temperatur der Erde nicht um 60 bis 70 °C, sondern um ganze 300 °C.

Mehrere Wissenschaftler überprüften dieses Ergebnis bei verschiedenen Wellenlängen zwischen 3 und 10 cm, aber die Temperatur blieb mit 535 bis 675 °K nach wie vor hoch.

1959 begannen die sowjetischen Radioastronomen A. D. Kusmin und A. E. Salomonowitsch mit der Messung der thermischen Radiostrahlung der Venus. Sie führten eine Reihe von Messungen bei 8 mm durch, d. h. bei einer bedeutend kürzeren Wellenlänge als zuvor. Sie benutzten dazu mit dem 22-m-Radioteleskop der Station Serpuchow des Lebedew-Instituts für Physik der Akademie der Wissenschaften der UdSSR das größte, für Messungen im mm-Bereich geeignete Radioteleskop und fanden, daß die Strahlungstemperatur der Venus bei 8 mm bedeutend niedriger ist als bei 3 oder 10 cm und im Mittel 405 °K beträgt. Bei einer Wiederholung dieser Messungen 1961 und 1962 ergaben sich 382 °K bzw. 394 °K. Fast das gleiche Ergebnis erhielten 1964–1965 die Wissenschaftler der



Das Modell der heißen Oberfläche (Glasbaushypothese): 1 heiße Oberfläche; 2 Wolken-schicht (H_2O und CO_2), oben Eiskristalle; 3 kühlere Ionosphäre; 4 Zentimeterwellen von der Oberfläche; 5 Radiowellen des Millimeterbereichs. Die Kurve gibt die Zentimeterstrahlung der Oberfläche an

University of California W. J. Welch und D. D. Thornton. Das heißt, der Unterschied in der Strahlungstemperatur der Venus bei den Zentimeter- bzw. Millimeterwellen ist reell und keine Folge von Meßfehlern.

Die wirkliche Oberflächentemperatur der Venus muß aber ein und dieselbe sein und darf nicht von der Meßmethode oder der verwendeten Wellenlänge abhängen. Zur Erklärung der angeführten Unterschiede in den Strahlungstemperaturen wurden fast gleichzeitig (1960–1961) drei Hypothesen aufgestellt. Zwei davon gehen von der Vorstellung einer heißen Oberfläche und einer kalten Atmosphäre aus, die dritte dagegen von einem Modell mit einer heißen Atmosphäre und einer verhältnismäßig kühlen Oberfläche.

Das Modell mit heißer Oberfläche und kalter Atmosphäre wurde 1960 von A. D. Kusmin und A. E. Salomonowitsch vorgeschlagen. Es bildete die Grundlage der folgenden beiden Hypothesen:

1. Bei den Zentimeterwellen beobachten wir die Temperatur der von der Sonne aufgeheizten Venusoberfläche. Die Wolken der Venus reflektieren mehr als 60 % der Sonnenstrahlen. Die verbleibenden 40 % werden in den unteren atmosphärischen Schichten oftmals gestreut, bevor sie die Planetenoberfläche erreichen. Die aufgeheizte Oberfläche sendet thermische, infrarote Strahlung aus. Die Abgabe dieser Strahlung wird durch zwei Gase, das in der Venusatmosphäre so häufige Kohlendioxid und den Wasserdampf, behindert, die den Strom der Infrarotstrahlung »auffangen« und durch dessen Energie eine Aufheizung der Atmosphäre und eine Anregung der CO_2 - und H_2O -Moleküle erfolgt. Aus der Wolkenschicht kommt eine Strahlung heraus, die einer beträchtlich niedrigeren Temperatur – etwa 235 °K – entspricht. Die Radiowellen des Millimeterbereichs werden auch durch den Wasserdampf und die Wolken absorbiert. Deshalb ergeben sie einen falschen (zu niedrigen) Wert der Oberflächentemperatur. Die ganze Venusatmosphäre wirkt insgesamt wie ein riesiges Glashaas. Deshalb erhielt diese von dem amerikanischen Gelehrten C. Sagan vorgeschlagene Hypothese die Bezeichnung *Glasbaushypothese*.

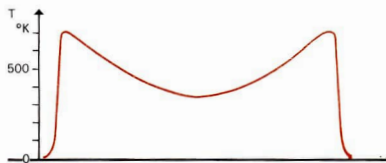
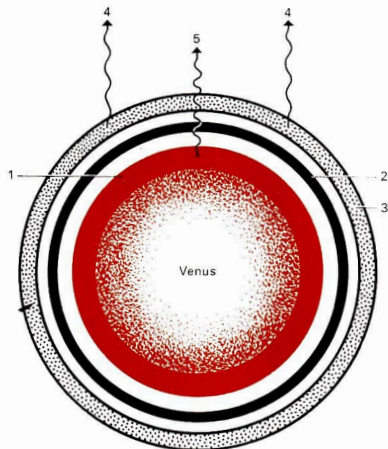
2. Die Zentimeterwellen vermitteln eine richtige Vorstellung von der Oberflächentemperatur. Die Ursache der starken Erwärmung ist jedoch kein von der Atmosphäre herrührender Glashaaseffekt, sondern gewaltige Stürme wirbeln Staubwolken auf, und deren Reibung am Boden stellt die Wärmequelle dar. Diese Hypothese stammt von dem irischen Astronomen

E. J. Öpik. Sie trägt den Namen *Äolosphärenhypothese*. Eine dritte Hypothese geht von einem Modell mit heißer Atmosphäre aus: Die verstärkte Radiostrahlung im Zentimeterwellengebiet kommt nicht von der Oberfläche, sondern aus der heißen Ionosphäre der Venus. Wie bei der Erde kann es auch in der Venusatmosphäre eine mit geladenen Teilchen (Ionen und Elektronen) angereicherte Schicht, eine *Ionosphäre*, geben. Diese Ionosphäre stellt die Quelle der Zentimeterwellen dar. Demnach hat die Venusoberfläche die Temperatur, die aus den Messungen an Millimeterwellen folgt. Die Zentimeterwellen ergeben eine höhere, unter dem Einfluß der Ionosphäre verfälschte Temperatur. Diese *Ionosphärenhypothese* schlug D. E. Jones vor.

Wie kann man entscheiden, welche der drei Hypothesen die richtige ist? Hier müssen wir uns erinnern, wie wissenschaftliche (in diesem Fall astronomische) Hypothesen untersucht und geprüft werden. Es gibt im allgemeinen zwei Wege zur Überprüfung von Hypothesen: der Vergleich mit Beobachtungsergebnissen und der Vergleich mit den Voraussagen einer Theorie. Leider unterscheiden manche Leser nicht »Hypothesen« und »Theorien«, obwohl es völlig verschiedene Begriffe sind. Die Hypothese ist eine wissenschaftliche Annahme, die Theorie eine strenge (gewöhnlich mathematische) Beschreibung dieser oder jener Erscheinung auf der Grundlage gut bekannter Naturgesetze.

Die Theorie der Ausstrahlung von Radiowellen durch feste Oberflächen von Planeten wurde bereits 1954 von dem sowjetischen Gelehrten W. S. Troizki ausgearbeitet. Die Theorie der Ausstrahlung durch Ionosphären und des Durchgangs von Radiowellen durch eine Ionosphäre ist ebenfalls schon lange bekannt. Aus der Theorie folgt, daß die Anzahl der geladenen Teilchen in der Venusionosphäre (vom Standpunkt der Ionosphärenhypothese aus) 10^9 cm^{-3} betragen muß, d. h. 1 000mal größer ist als in der F-Schicht der irdischen Ionosphäre.

Was konnte eine solch gewaltige Ionosphäre bei der Venus hervorrufen? Die Sonnenstrahlung ist dort bekanntlich doppelt so stark wie auf der Erde. Der Strom der von der Sonne wegliegenden geladenen Teilchen ist ebenfalls zweimal größer. Venus hat aber,



Das Ionosphärenmodell: Strahlung der Oberfläche und der heißen Atmosphäre der Venus: 1 kältere Oberfläche; 2 Wolkenschicht (H_2O und CO_2); 3 heiße Ionosphäre; 4 Zentimeterwellen aus der Ionosphäre; 5 Millimeterwellen von der Oberfläche. Die Kurve kennzeichnet die Zentimeterstrahlung der Ionosphäre

wie die Messungen der amerikanischen Raumsonde Mariner 2 zeigten, fast kein Magnetfeld. Strahlungsgürtel, die aus Teilchen bestehen, die von der Sonne stammen und durch das Magnetfeld »eingefangen«

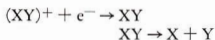
wurden, besitzt sie nicht. Diese Teilchen erreichen vielmehr ungehindert die obersten Schichten der Venusatmosphäre und können dort eine beträchtlich stärkere Ionisation hervorrufen. Einen Unterschied um das 1 000fache erhält man aber auch unter den günstigsten Voraussetzungen nicht.

Die sowjetischen Wissenschaftler A. D. Danilow und S. P. Jazenko machten einen anderen Vorschlag, um die ungewöhnlichen Eigenschaften der angenommenen Venusionosphäre zu erklären. Die Ionisation (das Lösen der Elektronen von den Atomen) steht im Gleichgewicht mit dem entgegengesetzten Vorgang, der Rekombination (dem Einfangen der Elektronen durch die Ionen und Bildung neutraler Atome). Wenn die Rekombination langsamer erfolgt als in der Erdatmosphäre, so kann eine starke Anreicherung an geladenen Teilchen auch bei nicht sehr häufigen Ionisationen stattfinden.

Den Wissenschaftlern sind zwei Arten von Rekombinationen bekannt: die Strahlungsrekombination, bei der sich das Elektron mit einem Atomion vereinigt und den Energieüberschuß als Strahlung abgibt,



(X ist das Atom, X^+ das positive Ion, e^- das Elektron und h das Symbol für das Strahlungsquantum), und die Dissoziationsrekombination, bei der sich das Elektron mit einem Molekülion vereinigt, das daraufhin in zwei Atome zerfällt (dissoziiert),



(Y ist das andere Atom im Molekül, $(XY)^+$ das Molekülion und XY das Molekül).

Der Unterschied zwischen diesen beiden Rekombinationsarten liegt nicht nur im Wesen, sondern auch in der Schnelligkeit des Vorgangs: Die Strahlungsrekombination verläuft mindestens hunderttausendmal langsamer als die Dissoziationsrekombination. Wenn in der irdischen Ionosphäre, wie Raketenanstiege zeigten, die Zahl der Molekülionen ziemlich groß ist (und folglich die Dissoziationsrekombination die Hauptrolle spielt), so braucht dies in der Venusatmosphäre nicht der Fall zu sein. Wenn dort die Atomionen vor-

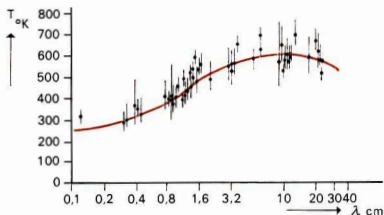
herrschen, so werden ihre Rekombinationen mit den Elektronen langsamer verlaufen, und damit kann die Dichte der Ionen und Elektronen bedeutend höher sein als in der Erdatmosphäre.

Soweit die theoretischen Gesichtspunkte im Zusammenhang mit der Ionosphärenhypothese. Einige Beobachtungstatsachen bleiben noch zu erklären. So reflektierte der Planet bei Radarbeobachtungen im Wellenlängenbereich von 10 bis 70 cm etwa 10^{10} der Strahlung. Dabei müßte die dichte Atmosphäre Dezimeterwellen, besonders bei 70 cm und mehr, fast vollständig absorbieren und Wellen, die kürzer als 10 cm sind, durchlassen. Das Reflexionsvermögen müßte sich um das Tausendfache unterscheiden. Doch aus den Beobachtungen folgt für diesen ganzen Wellenlängenbereich ein einheitlicher Wert.

Die Untersuchung der Radiostrahlung der Venus zeigte, daß die Strahlungstemperatur nicht nur nach der Seite der Millimeterwellen, sondern auch nach der Seite der Dezimeterwellen hin abfällt. Allerdings ist der Abfall auf der Dezimetersseite nicht so stark wie bei den Millimeterwellen. Die Strahlungstemperatur sinkt von 600 bis 700°K zwischen 3 und 20 cm Wellenlänge auf 500°K zwischen 30 bis 70 cm, d. h. um etwa 150°K und nicht um 300°K wie auf der Seite der Millimeterwellen. Dennoch muß man diese Erscheinung erklären.

Den Versuch einer solchen Erklärung unternahmen vom Standpunkt der Ionosphärenhypothese aus die sowjetischen Geophysiker A. D. Danilow und S. P. Jazenko. Sie schlugen ein Modell mit einer »durchlöcherten« Ionosphäre vor, die aus einzelnen Wolken hoher Ionen- und Elektronendichte besteht, die durch Gebiete getrennt sind, wo die Dichte nicht höher ist als in der irdischen Ionosphäre. Ein solches Modell erklärte die Radarergebnisse (die Dezimeterwellen gehen durch die »Fenster« der Ionosphäre hindurch) und den Temperaturabfall im Dezimeterwellenbereich.

Dennoch hielt die Ionosphärenhypothese der Überprüfung durch die Beobachtungen nicht stand. 1964 führte der sowjetische Radioastronom A. D. Kusmin zusammen mit dem amerikanischen Wissenschaftler B. G. Clark eine Reihe von Beobachtungen der Radiostrahlung der Venus durch. Sie benutzten die einzig-



Spektrum der Radiostrahlung der Venus. (Die senkrechten Striche geben die Fehlergrenzen der Messungen an.)

artige Radiointerferometeranlage des Owen Valley Radio Observatory. Diese Anlage besteht aus zwei riesigen 26-m-Parabolantennen, deren gegenseitiger Abstand (die Basis des Interferometers) und deren Orientierung in bezug auf den Beobachtungsgegenstand veränderbar ist. Aus dem Interferenzbild, das durch die Überlagerung der Signale der beiden Antennen in verschiedenen gegenseitigen Stellungen entsteht und aus seinen Veränderungen im Verlaufe von einigen Stunden Beobachtungszeit konnte durch ziemlich schwierige Berechnungen die Verteilung der »Radiohelligkeit« über der Venuscheibe ermittelt werden.

Kusmin und Clark erhielten starke Beweise dafür, daß die Quelle der Radiostrahlung die Planetenoberfläche und nicht die Ionosphäre ist. Es gelang ihnen, die Polarisation der Radiostrahlung der Venus in den Ebenen parallel und senkrecht zur Interferometerbasis zu messen. Die Radiostrahlung von einer festen Oberfläche ist an den Scheibenrändern teilweise polarisiert. Wenn wir feststellen, daß die Radiohelligkeit an den Scheibenrändern, die in der Polarisationsrichtung liegen, größer ist als an den Rändern, die senkrecht auf ihr stehen, so beweist das, daß die Oberfläche der Planetenkugel die Strahlungsquelle ist und nicht eine diffus strahlende Gasmasse oder Wolken. Im letzteren Falle gäbe es keine Unterschiede in der Radiohelligkeit bei den zwei Orientierungen bezüglich der angenommenen Polarisationssebenen.

Somit bewiesen Kusmin und Clark die Unrichtigkeit

der Ionosphärenhypothese. Die Venusoberfläche war also wirklich heiß. Dieses Ergebnis bestätigte zwei Jahre später die sowjetische Raumsonde Venus 4. Es blieb die Entscheidung zwischen der Glashaushypothese und der Äolosphärenhypothese zu fällen. Wegen ihrer Künstlichkeit fand die Äolosphärenhypothese kaum Unterstützung. Aber auch für die Anhänger der Glashaushypothese gab es Schwierigkeiten. Vor allem, welches Gas ist (oder welche Gase sind) für die Glashaushypothese verantwortlich? Kohlendioxid, das auf der Venus sehr häufig ist, absorbiert Strahlung in einer ziemlich schmalen Bande zwischen etwa 13 und 17 μm . (Es gibt daneben noch andere Absorptionsbanden, doch sind diese viel schwächer.) Notwendig ist auch eine gewisse Menge Wasserdampf, der umgekehrt fast die gesamte Infrarotstrahlung absorbiert und nur im Bereich 1 bis 3 μm und 8 bis 13 μm »Fenster« läßt.

Berechnungen des amerikanischen Wissenschaftlers A. H. Barrett aus dem Jahre 1960 zeigten, daß, um Übereinstimmung mit dem beobachteten Radiofrequenzspektrum zu erzielen, ein 1 bis 3%iger Gehalt an Wasserdampf notwendig ist, sofern ein Druck von 20 bis 10 at an der Planetenoberfläche angenommen wird. Man kann jedoch weder einen so hohen Wasserdampfgehalt noch solche hohen Drücke zulassen. Denn, als wichtigstes, der Wasserdampf gäbe bei 1,35 cm Wellenlänge eine Absorptionsbande, die bisher niemand beobachtet hat.

1962 wurde die amerikanische Raumsonde Mariner 2 zur Venus geschickt. Sie war mit zwei Radiometern ausgerüstet, die auf den Wellenlängen 1,35 und 1,9 cm arbeiteten. (Die zweite Wellenlänge diente Vergleichszwecken.) Die Sonde flog in 34 000 km Entfernung an der Venus vorbei, jedoch gelangen nur Messungen der Radiotemperaturen bei 1,9 cm Wellenlänge.

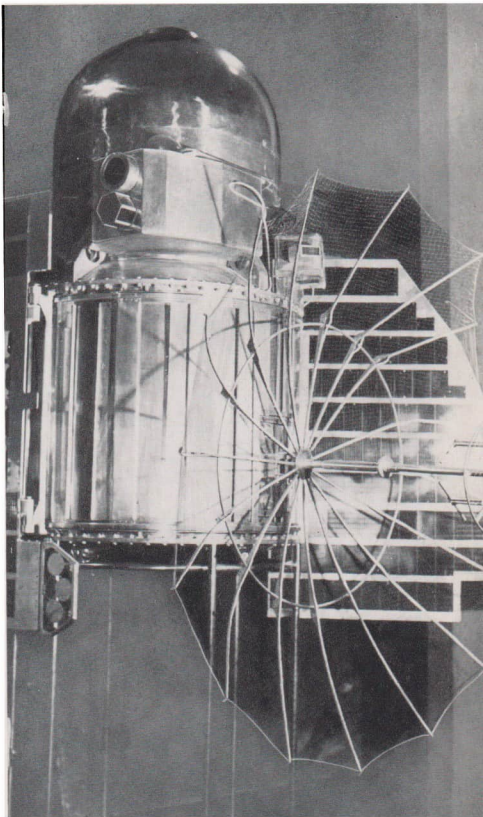
1963 führten J. E. Gibson und H. H. Corbett die ersten Messungen der Strahlungstemperatur bei 1,35 cm Wellenlänge durch und erhielten 520°K, was nicht niedriger als bei den benachbarten Wellenlängen war. Im Jahre 1965 fanden sie schließlich bei dieser Wellenlänge 435°K und A. H. Barrett und D. H. Saelin sogar 404°K. Diese Werte entsprachen den Erwartungen. Doch W. J. Welch und D. D. Thornton erhielten auf der gleichen Wellenlänge 540°K. Ju. N. Wetuchnowskaja und A. D. Kusmin ermittelten bei der

nahegelegenen Wellenlänge 1,31 cm die Temperatur 470 °K. Es ist schwer zu entscheiden, welcher Messung der Vorzug zu geben ist.

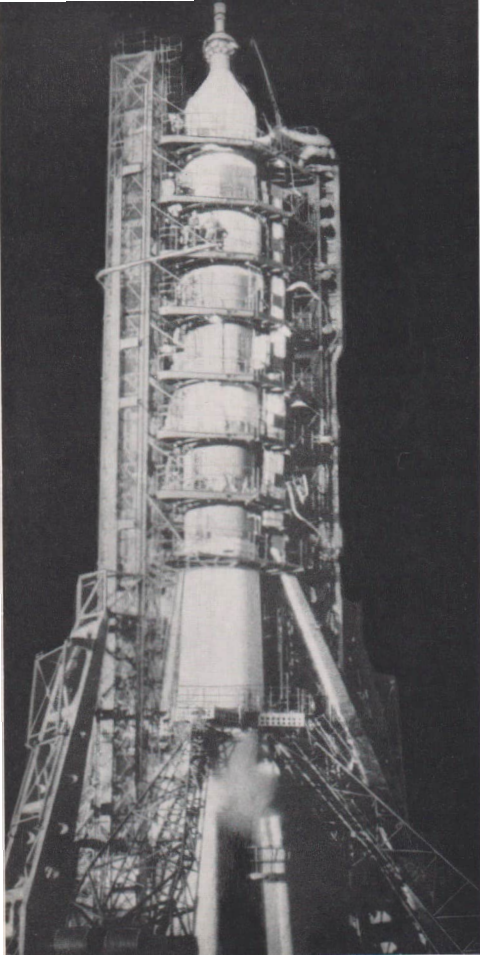
Der amerikanische Wissenschaftler C. Sagan vermutete, daß die aus Tröpfchen flüssigen Wassers bestehenden Wolken der Venus die Hauptrolle bei der Entstehung der Glashauswirkung spielen. In den letzten Jahren konnte der junge Radioastronom G. M. Strelkow zeigen, daß die Tiefe der Absorptionsbande bei 1,35 cm stark von der Wassersättigung der Wolken abhängt. Bei kleinen Sättigungswerten ist sie (mit der heutigen Meßgenauigkeit) fast nicht zu erkennen. Deshalb sagt das Fehlen von Anzeichen dieser Bande noch nichts über das Vorkommen oder Fehlen von Wasserdampf in der Venusatmosphäre aus.

In allen diesen Arbeiten blieb eine wichtige Feststellung aus dem Jahre 1968 unberücksichtigt, daß nämlich der Druck an der Venusoberfläche beträchtlich höher ist als der vorher angenommene Wert von 10 bis 20 at und am ehesten 70 bis 100 at beträgt. Mit diesem Druck und der von den unbemannten sowjetischen Raumsonden Venus 4, 5 und 6 gemessenen Wasserdampf- und Kohlendioxidmenge fand die Glashauswirkung auch zahlenmäßig eine Erklärung.

Es bleibt noch der oben besprochene Abfall der Radiotemperatur der Venus im Dezimeterwellenbereich zu deuten. Auch hier wurden mehrere Deutungsmöglichkeiten geäußert. Man kann damit rechnen, daß, wie dies beim Monde der Fall ist, die längerwellige Radiostrahlung aus größeren Tiefen zu uns gelangt. An und für sich unterliegt diese Feststellung keinem Zweifel und folgt aus den Bedingungen für den Durchgang von Radiowellen durch einen festen Körper. Dann aber müßte man annehmen, daß die Temperatur der äußeren Schicht der Venus mit wachsender Tiefe sinkt, und das führt unausweichlich zu einem Wärmestrom in das Innere des Planeten. Scheinbar ist an einer solchen Annahme nichts Besonderes: Durch die Glashauswirkung wird die Planetenoberfläche erhitzt, und die heiße Oberfläche leitet die Wärme nach innen weiter. Es ist uns aber gut bekannt, daß die Temperatur der Erde (und des Mondes) mit der Tiefe wächst, weil



Die sowjetische Raumsonde Venus 1, die 1961 als erster Raumflugkörper in Richtung Venus gestartet wurde



es im Inneren Wärmequellen gibt und der Stoff durch die Schwerkraft zusammengepreßt wird. Also müßte es in einer bestimmten Tiefe eine Schicht geben, in der die Temperatur einen Tiefstwert erreicht und die ihre Wärme aus dem Planeteninneren und von der heißen Oberfläche erhält. Es ist leicht einzusehen, daß sich eine solche Schicht bald bis auf die Oberflächentemperatur erwärmt hätte.

Eine andere Möglichkeit, den Abfall im Dezimeterwellengebiet zu erklären, besteht darin, daß sich das Ausstrahlungsvermögen des Oberflächenmaterials so mit der Wellenlänge verändert, daß es bei 20 cm Wellenlänge einen Höchstwert erreicht. Eine solche Eigenschaft besitzen einige zähe, polare Flüssigkeiten (z. B. Glycerin), aber die Vorstellung, es könnte solche Flüssigkeiten oder gar Metall- oder Silikatschmelzen in einigen Metern Tiefe unter der Venusoberfläche geben, erscheint heute wirklichkeitsfremd.

Eine dritte Erklärung besteht in der Absorption der Radiowellen im Dezimeterbereich durch eine kalte Ionosphäre der Venus. Berechnungen, die schon 1964 von A. D. Kusmin für Modelle mit einer »halbdurchsichtigen« und »durchlöchernten« Ionosphäre angestellt wurden, zeigten, daß eine solche Annahme völlig einleuchtend ist, anderen Beobachtungen nicht widerspricht und eine ziemlich geringe Elektronendichte in der unteren Ionosphäre der Venus von 10^4 bis 10^5 cm^{-3} bei einer Dicke der Ionosphärenschicht von 10 km verlangt.

Schließlich wurde von G. M. Strelkow 1968 eine vierte Deutung vorgeschlagen, nach der die äußere Hülle der Venus aus einer dünnen oberen und einer dichteren unteren Schicht besteht. Die Strahlung (im wesentlichen Dezimeterwellen) erfährt zwei Reflexionen: an der Grenze zur dünneren oberen Schicht und an der oberen Grenze der letzteren. Die dünne Schicht strahlt hauptsächlich im Zentimeterbereich, und diese Strahlung erfährt nur eine Reflexion an der oberen Grenze. G. M. Strelkow gelangte zu einer guten Übereinstimmung seiner Theorie mit den Beobachtungen. Er erklärte auch den Unterschied in den Werten für die Dielektrizitätskonstante der Oberflächenschicht der

Vorbereitungen zum Start eines Raumflugkörpers am Startplatz im sowjetischen Raumflugzentrum

Venus aus den Daten der Polarisations- und Radarbeobachtungen, worüber weiter unten gesprochen wird.

Gleichzeitig mit der Entwicklung der radioastronomischen Untersuchungen führte auch die Anwendung der Funkortung (Radar) zu großen Erfolgen in der Venusforschung. Diese Methode erlaubte eine genaue Bestimmung der Venusentfernung und damit der astronomischen Einheit (mittlere Entfernung der Erde von der Sonne). Einen großen Beitrag zur exakten Bestimmung der Länge der astronomischen Einheit durch Radarbeobachtungen leistete eine Gruppe sowjetischer Wissenschaftler unter Leitung des Akademienmitgliedes W. A. Kotelnikow. Gleichzeitig wurden aus diesen Beobachtungen die Kenngrößen der Venus selbst, Radius, Rotationsgeschwindigkeit und -richtung, abgeleitet.

Schon 1964 hatten A. D. Kusmin und B. G. Clark mit dem Radiointerferometer als Radius der festen Venuskugel 6057 km bestimmt. Aber der mittlere Meßfehler war mit ± 55 km ziemlich groß. Zwei Jahre später erhielt der amerikanische Radiophysiker I. Shapiro mit 6056 km fast den gleichen Wert, aber mit einem Fehler von nur ± 2 km. Weitere Bestimmungen sowjetischer und amerikanischer Wissenschaftler gaben nahe benachbarte Werte: 6050, 6053 und wiederum 6056 km. Gegenwärtig kann man das Mittel aus diesen Zahlen, d. h. 6053 km, als den wahrscheinlichsten Wert ansehen.

Beispielhaft war auch die Verbesserung der Angaben über die Rotationsperiode der Venus. Bereits 1962 war klar, daß die Rotation rückläufig war und etwa 250 Tage betrug. Verschiedene Forscher in der UdSSR und den USA erhielten mit unterschiedlichen Methoden Perioden zwischen 230 und 250 Tagen. Eine der Methoden beruhte darauf, daß infolge der Bewegung des Planeten um seine Achse das von ihm zurückgeworfene Radiosignal in der Frequenz »verschmiert« ist. Denn der eine Rand des Planeten nähert sich uns (und die Frequenz des reflektierten Signals ist wegen des Dopplereffekts vergrößert) und der andere Rand entfernt sich (und die Frequenz des reflektierten Signals ist kleiner). Aus der Größe der »Verschmierung« kann man auf die Rotationsgeschwindigkeit des Planeten schließen.



Elektronische Datenverarbeitungsanlagen dienen im Koordinations- und Rechenzentrum der Erfassung und Auswertung der von den Raumflugkörpern übermittelten Daten

Die andere Methode hängt mit dem Vorhandensein von groben Unebenheiten auf der Venusoberfläche zusammen, die das Signal verstärkt zurückwerfen. Ihre Verlagerung infolge der Rotation des Planeten führt zu einer Verschiebung zusätzlicher reflektierter Signale, aus der die Geschwindigkeit der Rotation abgeleitet wird.

Mit jedem Jahr nahm die Genauigkeit der Bestimmung zu, und schließlich lieferten beide Methoden übereinstimmende Ergebnisse: Die Rotationsperiode der Venus beträgt, wie bereits oben gesagt, 243,1 Tage.

Die Radarbeobachtungen der Venus ermöglichten es auch, die Lage der Planetenachse im Raum zu bestimmen. Die Achse der Venus steht nahezu senkrecht auf ihrer Bahnebene (der Winkel ist 87°). Die Radarbeobachtungen vermögen uns aber nicht nur rein geometrische Kenngrößen der Venus wie Radius, Achsenlage, Geschwindigkeit, Richtung und Periode der

Rotation zu liefern. Sie können auch zu physikalischen Untersuchungen ausgenutzt werden.

Weiter oben wurde davon gesprochen, daß das Reflexionsvermögen der Venus im Wellenlängenbereich 10 bis 70 cm etwa gleichbleibend 10 bis 15 % beträgt. Seinerzeit spielte diese Tatsache neben anderen eine verhängnisvolle Rolle für die Ionosphärenhypothese. Doch bald kam ein neuer, unerwarteter Befund hinzu: Bei 3 cm Wellenlänge sinkt das Reflexionsvermögen plötzlich auf 1 % ab.

Weil zu dieser Zeit die Ionosphärenhypothese schon aufgegeben worden war, mußte die Erklärung in den Eigenschaften der Planetenoberfläche zu suchen sein. Nach der Theorie der Reflexion von Radiowellen an festen und flüssigen Oberflächen hängt das Reflexionsvermögen R eng mit der Dielektrizitätskonstanten ϵ des Oberflächmaterials zusammen, nämlich

$$\epsilon = \left(\frac{1 + \sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}} \right)^2, \quad R = \left(\frac{\sqrt{\epsilon} - 1}{\sqrt{\epsilon} + 1} \right)^2$$

Die Messungen bei 10 bis 70 cm und auch bei 8 m Wellenlänge ergaben $\epsilon = 3,7$ bis 6,4, die Messungen bei 3,6 cm lieferten $\epsilon = 1,5$.

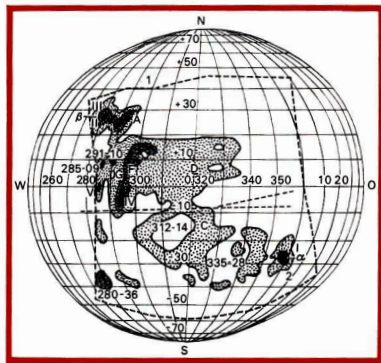
Vor allem zeigten diese Messungen, daß es auf der Venus große Wasserflächen nicht geben kann. (Für Wasser ist $\epsilon = 80$.) Die für die Dezimeter- und Meterwellen gefundenen ϵ -Werte paßten zur Dielektrizitätskonstanten von Magnetit sowie Quarz- und Limonit-sand (3,5 bis 5,0) und Enstatit (5,2 bis 6,0), waren aber niedriger als bei Granit (7,7). Weiter stellte sich heraus, daß durch eine starke Auflockerung (auf eine Volumendichte von 0,5 g/cm³) die Dielektrizitätskonstante bei der Mehrzahl der Gesteine auf 1,5 bis 1,7 sinkt, d. h. auf jenen Wert, der bei 3 cm gefunden wurde.

Es ist gut bekannt, daß die kurzwellige Radiostrahlung von der obersten Schicht reflektiert werden kann, während die längeren Wellen eindringen und von tieferen Schichten reflektiert werden. Man kann daher den Schluß ziehen, daß die äußerste Oberflächenschicht der Venus porös ist und aus feinkörnigem Sand besteht. Je tiefer wir kommen, um so festeres Gestein treffen wir an. Die Ursache für die Auflockerung der oberen Gesteine der Venus könnte die Wirkung von Stürmen sein, die zwar nicht zu einer Aufheizung der Ober-

fläche durch Reibung des von ihnen aufgewirbelten Staubes führt, wohl aber eine starke Erosion (Verwitterung) der Oberflächengesteine hervorruft.

Bereits 1964 fanden B. G. Clark und A. D. Kusmin einen neuen Effekt, der einer Erklärung bedurfte. Aus der von ihnen mit dem Radiointerferometer gemessenen differentiellen Polarisation der Radiostrahlung der Venus kann man ebenfalls die Dielektrizitätskonstante der Oberfläche bestimmen. Kusmin und Clark fanden bei 10 cm Wellenlänge $\epsilon = 2,7$, d. h. etwas weniger, als aus den Radarmessungen folgte. Einige Wissenschaftler (darunter Kusmin selbst) sahen die Ursache dieses Unterschiedes in der Wirkung der Venusatmosphäre. Der Grundgedanke dieser Erklärungsversuche war der, daß zu der polarisierten Strahlung der Venusoberfläche die nichtpolarisierte Strahlung der Atmosphäre hinzutritt, was dann zu einer Erniedrigung des aus der polarisierten Strahlung des Planeten abgeleiteten Wertes für ϵ führt.

Doch besteht keine zwingende Notwendigkeit für solche Deutungen. Auch beim Mond (der ganz bestimmt keine Atmosphäre besitzt) wird genau der



Radarkarte der Venus (nach Angaben amerikanischer Wissenschaftler)

gleiche Effekt beobachtet: Die Dielektrizitätskonstante ist nach den Polarisationsmessungen kleiner als nach den Radarbeobachtungen. Das hängt damit zusammen, daß die Bedingungen für den Durchgang der Eigen- und der reflektierten Strahlung in den oberen Gesteinen des Mondes verschieden sind. Beim Mond nimmt die Dichte und auch die Größe von ϵ mit der Tiefe zu, besonders in der obersten Schicht, in einigen Zentimeter Tiefe. So finden die beiden angeführten Effekte ihre Erklärung von einem einheitlichen Standpunkt aus.

Wie schon oben erwähnt, wurden in den letzten Jahren auf der Venus Gebiete mit erhöhtem Reflexionsvermögen entdeckt. Diese Gebiete sind ortsfest und drehen sich gemeinsam mit dem Planeten. Nach dem, was über den Zusammenhang zwischen R und ϵ gesagt wurde, bestehen diese Gebiete wahrscheinlich aus Gesteinen mit einer höheren Dielektrizitätskonstante (z. B. aus Graniten).

Die amerikanischen Radioastronomen A. E. E. Rogers

und R. P. Ingalls zeichneten nach ihren Beobachtungen bei 3,8 cm im Jahre 1969 eine Radiokarte eines Teils der Venusoberfläche. Es wurden im wesentlichen drei Gebiete mit erhöhtem Reflexionsvermögen entdeckt. Das hellste davon hat einen Durchmesser von 240 km und liegt auf 25° nördlicher Breite. Es wurde mit β (Beta) bezeichnet. 1 000 km südlich davon befindet sich das zweite α (Alpha). Außerdem gibt es noch ein drittes, weniger auffälliges Gebiet dieser Art in dem untersuchten Bereich. Alle drei Gebiete depolarisieren von der Erde ausgesandte polarisierte Radiostrahlung. Das heißt, sie sind rauer als ihre Umgebung. Die Durchmesser der Unebenheiten sind größer als die Wellenlänge, d. h. von der Größenordnung Dezimeter oder Meter. Möglicherweise handelt es sich um gebirgige Gegenden der Venusoberfläche.

Die ständige Verbesserung der Technik und der Methoden der Funkortung läßt uns hoffen, daß wir in naher Zukunft eine ins einzelne gehende Karte der Venus aufstellen können.

Die Entschleierung der Venus mit den Methoden der Radio- und Radarastronomie wurde von einer Vervollkommnung der spektralen Forschungsmethoden begleitet. Sie bestand vor allem in einer Ausweitung des erfaßten Wellenlängenbereiches nach der infraroten Seite hin.

Schon in den dreißiger Jahren wurde mit einer besonderen Plattensorte das Venuspektrum bis fast 9000 Å, d. h. bis 0,9 µm, aufgenommen. Die Erdatmosphäre läßt die Infrarotstrahlung bis etwa 4 µm und dann zwischen 8 und 13 µm durch. Für diese Strahlung sind Photoplaten unbrauchbar, man benötigt andere Strahlungsempfänger, Photowiderstände und Bolometer.

1947 benutzte der bekannte amerikanische Astronom G. Kuiper erstmals einen Bleisulfid-Photowiderstand zur Aufzeichnung von Planetenspektren bis 2,5–3 µm. Neue Geräte – Infrarotspektrometer – wurden aus den Prismen- und Gitterspektrographen, in denen man die Photoplatte durch den Photowiderstand ersetzte, entwickelt. Durch eine leichte Drehung des Prismas oder eines der Spiegel wird das ganze Spektrum nacheinander über den Photowiderstand geführt. Ein am Ausgang der elektrischen Schaltung befindlicher Schreiber zeichnet die Intensitätsverteilung im Spektrum auf. Bald stellte sich heraus, daß sich die Empfindlichkeit des Gerätes erhöhte und der Spektralbereich sich erweiterte, wenn der Photowiderstand mit festem Kohlendioxid (»Trockeneis«) oder flüssigem Stickstoff

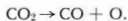
gekühlt wurde. Neben Photowiderständen dienten auch Halbleiterdetektoren als Strahlungsempfänger. Germanium-Photowiderstände ermöglichen es, zu noch längeren Wellen, bis 9–15 µm vorzudringen. Die Infrarotspektroskopie der Planeten und besonders der Venus erfuhr hauptsächlich in der UdSSR und den USA eine rasche Entwicklung. Wesentliche Beiträge zu ihrer Vervollkommnung leistete der sowjetische Astronom W. I. Moros.

Was ergab die Untersuchung des Infrarotspektrums der Venus? Vor allem wurde eine Vielzahl (einige Dutzend) Kohlendioxidbanden entdeckt. Scheinbar bedeutet diese Tatsache nichts Neues, da CO₂-Banden bereits 1932 im photographischen (nahen) Infrarot gefunden worden waren. Die Untersuchung der infraroten CO₂-Banden lieferte jedoch viele neue, bemerkenswerte Ergebnisse.

Es stellte sich heraus, daß ein Teil der entdeckten Banden zu Isotopvarianten des CO₂-Moleküls gehört. Das »gewöhnliche« CO₂-Molekül besteht aus einem Kohlenstoffatom ¹²C und zwei Sauerstoffatomen ¹⁶O. Man kann es als ¹²C¹⁶O₂ schreiben. Im Jahre 1964 entdeckte aber Moros Banden, die zu den Molekülen ¹³C¹⁶O₂ und ¹²C¹⁶O¹⁸O gehören, d. h., an denen das Kohlenstoffisotop ¹³C und das Sauerstoffisotop ¹⁸O beteiligt sind. Die relative Häufigkeit dieser Isotope, d. h. das Verhältnis ¹³C/¹²C bzw. ¹⁸O/¹⁶O, war die gleiche wie auf der Erde. Dieser Befund unterstreicht die

Einheitlichkeit der Gesetze, die den Aufbau und die Entwicklung der Materie sowohl auf der Erde als auch auf den anderen Himmelskörpern bestimmen.

1961 entdeckte der amerikanische Astronom W. M. Sinton im Venusspektrum die Banden des Kohlenmonoxids bei 2,35 μm . 1963 bestätigte W. I. Moros diesen Fund. Die Bildung von CO in der Venusatmosphäre erklärt sich leicht durch Photodissoziation von CO₂ unter der Einwirkung ultravioletter Sonnenlichts:



Das Häufigkeitsverhältnis von CO zu CO₂ beträgt nach W. I. Moros 1 : 10 000. Theoretische Berechnungen zeigen, daß ein solcher Wert durchaus wahrscheinlich ist.

Durch eine genaue Untersuchung des Aufbaus der verschiedenen CO₂-Banden konnten eine Reihe von Wissenschaftlern unabhängig von thermoelektrischen Messungen die Temperatur in der Venusatmosphäre am Entstehungsort dieser Banden ableiten. Sie lag in den Grenzen zwischen 250 und 320 °K. Der wahrscheinlichste Wert war mit 285 bis 295 °K um 50 bis 60 °K höher als die Temperatur der Wolkenschicht nach den Messungen mit dem Thermolement. Die Ursache dieses Unterschiedes sah man anfangs darin, daß die CO₂-Absorption oberhalb der Wolkenschicht erfolgt (bevor die Strahlen auf die Wolkenoberfläche auftreffen und nachdem sie durch sie reflektiert wurden). Wir wissen, daß die Temperatur in den obersten Schichten der Erdatmosphäre (oberhalb 80 km) infolge der Absorption des ultravioletten Sonnenlichts durch den Sauerstoff, der dadurch dissoziiert wird, rasch mit der Höhe wächst. Das O₂-Molekül zerfällt in zwei O-Atome. Man kann vermuten, daß das CO₂-Molekül in den obersten Schichten der Venusatmosphäre eine entsprechende Absorberrolle spielt.

In Wirklichkeit liegen die Verhältnisse nicht so einfach. Die Wolkenschicht hat keine glatte Oberfläche, die die Sonnenstrahlen zurückwirft. Das Licht wird vor der Reflexion zur Erde oftmals an den Molekülen und größeren Teilchen (Tröpfchen, feste Kristalle) innerhalb der Wolkenschicht gestreut. Also bezieht sich die Temperatur, die aus den Intensitäten der Spektrallinien, aus denen sich die CO₂-Banden zusam-

mensetzen, abgeleitet wird, auch auf eine größere Tiefe, als sie der Oberfläche der Wolkenschicht entspricht. Das beweist noch einmal, daß die Temperatur in der Venusatmosphäre mit Annäherung an die Oberfläche zunimmt.

1959 führte eine Gruppe amerikanischer Wissenschaftler unter Leitung von J. Strong Messungen des infraroten Venusspektrums in 24 km Höhe von Bord eines Stratosphärenballons aus durch, um nach Wasserdampf zu suchen. Eine solche Höhe war notwendig, um die Wasserdampfabsorption in der Erdatmosphäre auszuschalten. Um sicherzugehen, daß die H₂O-Banden zur Venus und nicht zu den obersten Schichten unserer Atmosphäre gehörten (wo es, wenn auch in geringen Mengen, noch Wasserdampf gibt), nahmen die amerikanischen Wissenschaftler Kontrollspektren des hellen Sternes Wega auf, der sich in der gleichen Zenitdistanz wie die Venus befand. In der Wega-Atmosphäre herrscht eine Temperatur von 10 000 °K, und Wasserdampf kommt dort selbstverständlich nicht vor. Deshalb konnte Strong aus den unterschiedlichen Intensitäten der H₂O-Banden in den Spektren von Venus und Wega den Schluß ziehen, daß es in der Venusatmosphäre Wasserdampf geben muß.

1964 wurden die Messungen mit beträchtlich verbesserten Geräten wiederholt. Das Fernrohr in der Kabine des Stratosphärenballons wurde selbstständig auf die Venus ausgerichtet. Danach schaltete sich ein lichtelektrisches Leiröhr ein, das diese Einstellung genau aufrechterhielt. Für die Messung war die H₂O-Bande bei 1,14 μm ausgewählt worden. Um völlig sicher zu sein, daß genau diese Bande gemessen wurde, verwendete man die folgende scharfsinnige Vorrichtung. In das Gerät wurde eine Blende eingeschaltet, die 14 schmale Spalte entsprechend den 14 stärksten Linien der H₂O-Bande hatte. Diese Blende bewegte sich mit gleichbleibender Frequenz schnell hin und her, was zu einer Modulation des Strahlungsstroms und folglich des Photostroms des aufzeichnenden Photowiderstandes führte. Die elektrische Schaltung des Gerätes ließ nun nur modulierte Schwingungen durch. Wenn es in dem betreffenden Teil des Spektrums keine H₂O-Bande gibt, bleibt der Strom unmoduliert. Die Aufzeichnung zeigte deutlich das Vorhandensein der H₂O-Bande und ergab eine ungefähre Wasserdampfhäufig-

keit in den obersten (beobachtbaren) Schichten der Venusatmosphäre von weniger als 10^{-4} (d. h. 0,01 %). Man muß dabei beachten, daß die spezifische Feuchtigkeit in der irdischen Stratosphäre auch nicht höher als dieser Wert ist.

1962 suchten W. K. Prokowjew und N. N. Petrowa vom Astrophysikalischen Observatorium auf der Krim nach Sauerstoff in der Venusatmosphäre. Diese Aufgabe war wegen der großen Häufigkeit des Sauerstoffs in der Erdatmosphäre außerordentlich schwierig. Um die Spuren des Venussauerstoffs nachzuweisen, benutzten die sowjetischen Astronomen eine alte, erprobte Methode: Sie fotografierten das Spektrum der Venus zu dem Zeitpunkt, als sie sich mit der größten Geschwindigkeit der Erde näherte bzw. entfernte. Die größtmögliche Geschwindigkeit bei der Annäherung bzw. Entfernung beträgt 13,7 km/s und wird während der größten Elongation erreicht. Die Verschiebung der Spektrallinien durch den Dopplereffekt beträgt im Falle der Venus

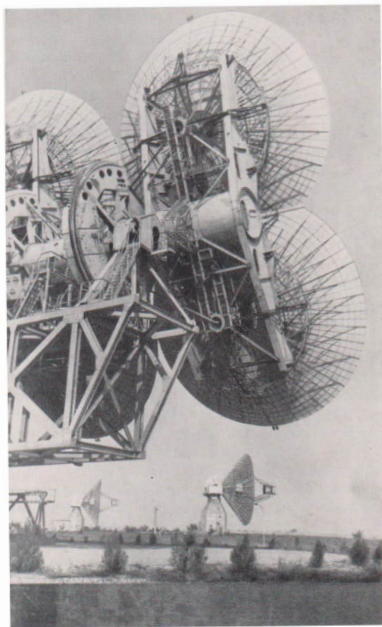
$$\Delta\lambda = \lambda \frac{v}{c},$$

wobei λ die Wellenlänge, v die Geschwindigkeit längs der Sichtlinie und c die Lichtgeschwindigkeit sind. Prokowjew und Petrowa benutzten das A-Band des molekularen Sauerstoffs bei 7 600 Å. Setzen wir die Werte für λ , v und c in die Formel ein, so erhalten wir $\Delta\lambda = 0,35$ Å. Es mußten daher Verschiebungen von der Größenordnung 0,3 Å meßbar sein. Die Halbwertsbreite der Linien des irdischen A-Bandes sind größer. Die Wirkung des Venussauerstoffs würde also darin bestehen, daß das Profil der irdischen Linien in einem der Linienflügel eine Vertiefung aufweist. Durch Mittlung einer ganzen Anzahl von Linienprofilen, die sowohl in Zeitpunkten der Annäherung als auch der Entfernung aufgenommen waren, entdeckten Prokowjew und Petrowa Anzeichen einer Depression, die mit der Anwesenheit von molekularem Sauerstoff in der Venusatmosphäre zusammenhing. Seine Häufigkeit erwies sich mit 170 cmat als sehr gering.

Die amerikanischen Wissenschaftler H. Spinrad und A. Richardson versuchten auf die gleiche Weise, doch ohne Erfolg, von der Venus herrührende »Satelliten« der tellurischen (von der Erde stammenden) Sauerstofflinien zu finden. Da sie nicht mehrere Profile

mittelten, kann ihr Ergebnis die Entdeckung des Sauerstoffs in der Venusatmosphäre nicht widerlegen. 1968 untersuchten die amerikanischen Astronomen M. J. S. Belton und D. M. Hunten erneut sorgfältig das A-Band des Sauerstoffs, als sich die Venus von der Erde entfernte. Sie fanden keine auf den Doppler-

*Riesige Antennen im Raumfahrtzentrum der Akademie der Wissenschaften der UdSSR dienen der Erforschung des Welt-
raums und der Verbindung mit weit entfernten Raumflug-
körpern*



effekt zurückgehenden Spektrallinien. Nach ihrer Abschätzung beträgt die relative Häufigkeit des Sauerstoffs in der Venusatmosphäre nicht mehr als $4 \cdot 10^{-3}$. Ein großer Fortschritt in der Infrarotspektroskopie der Venus war die Anwendung der sogenannten *Fourier-Spektroskopie* durch das französische Astronomenehepaar Pierre und Janine Connes. Der Grundgedanke dieser vielversprechenden Methode besteht darin, daß ein Lichtstrahl von der Venus in einem besonderen Gerät – dem Michelson-Interferometer – in zwei Strahlen geteilt wird, die auf verschiedenen Wegen weiterlaufen und schließlich wieder zusammengeführt werden, um miteinander zu interferieren. Wenn während des Versuchs die Länge des einen Lichtweges stetig verändert wird (was durch die Verschiebung eines der die Strahlen reflektierenden Spiegel erreicht wird), so ändert sich die Intensität des austretenden Strahls ebenfalls stetig. Aus der gemessenen Intensitätskurve (dem Interferogramm) kann durch ein mathematisches Verfahren, die Fourier-Transformation, der Verlauf des Spektrums, das Spektrogramm, ermittelt werden. Das Spektrum erhält man, weil die Art der Interferenz vom Verhältnis des Wegeunterschiedes der Strahlen zur Wellenlänge abhängt.

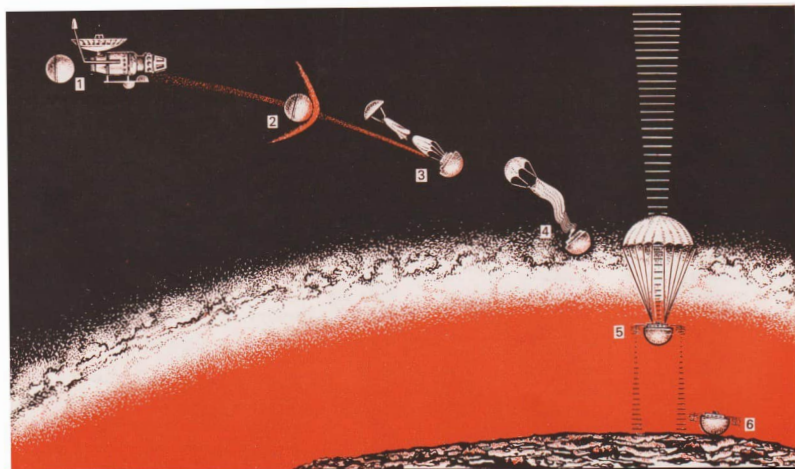
Auf den ersten Blick könnte es scheinen, als ob das Licht der verschiedenen Wellenlängen bei der Aufzeichnung des Interferogramms so vermischt wird, daß es unmöglich ist, es wieder voneinander zu trennen, denn es gelangen alle Teile des Spektrums gleichzeitig in das Gerät. Doch das ist nicht so, weil der Forscher den zu untersuchenden Teil des Spektrums von vornherein durch Filter aussondert. Die Fourier-Transformation wird mit Hilfe eines Elektronenrechners durchgeführt.

Die Fourier-Spektroskopie führt im Infrarotgebiet zu einem nie dagewesenen Auflösungsvermögen, d. h., dicht beieinander liegende Linien lassen sich trennen, ihre Feinstruktur kann untersucht werden usw. Die ersten vom Ehepaar Connes erhaltenen Ergebnisse führten zu einer unerwarteten Entdeckung. Außer einer Vielzahl von CO_2 -Banden wurden Banden von Chlorwasserstoff (HCl) und Fluorwasserstoff (HF) gefunden. Chlorwasserstoff trat in zwei Isotopverbindungen auf, mit ^{35}Cl und ^{37}Cl . Die Häufigkeit dieser Verbindungen war gering. Das Verhältnis HCl/ CO_2 war kleiner als 10^{-6} und das Verhältnis HF/ CO_2 kleiner als 10^{-9} . Und diese Methode läßt den Nachweis von noch geringeren Stoffmengen zu.

Die Arbeit des Ehepaars Connes zeigte, daß Kohlendioxid der Hauptbestandteil der Venusatmosphäre ist und nicht nur eine verhältnismäßig kleine Beimischung darstellt, wie die Mehrheit der Wissenschaftler im Folge des amerikanischen Spektroskopikers H. Spinrad annahm, der den CO_2 -Anteil auf 4% schätzte. Als Hauptbestandteil der Venusatmosphäre wurde in Anlehnung an die Erdatmosphäre Stickstoff angesehen, obwohl es keinerlei Beweise dafür gab.

Wie wir sehen, geben die Methoden der Spektroskopie vom Erdboden aus keine eindeutige Antwort auf die Frage nach der Zusammensetzung der Venusatmosphäre und dem Beitrag der einzelnen Bestandteile. Vieles hängt von dem vorausgesetzten Atmosphärenmodell, der Art der Lichtstreuung und anderen Umständen ab.

Den besten Einblick in die chemische Zusammensetzung der Venusatmosphäre ermöglichten die sowjetischen Raumsonden Venus 4, 5, 6 und 7.



Abstiegsphasen einer Venussonde: 1 Abtrennung der Landekapsel; 2 Eintauchen der Landekapsel in die Venusatmosphäre; 3 Abwurf des Deckels und Ausstoß des Bremsfallschirms; 4 Ausziehen des Hauptfallschirms; 5 Ausklappen des Radarhöhenmessers und wissenschaftliche Messungen im Abstieg (Sendebeginn); 6 Aufsetzen des Landekörpers

Die erste unbemannte Raumsonde zur Venus wurde am 12. Februar 1961 in der Sowjetunion gestartet. Diese Sonde (Venus 1) legte den Weg zur Venusbahn in 97 Tagen zurück und flog am 19./20. Mai in etwa 100 000 km Entfernung an dem Planeten vorbei.

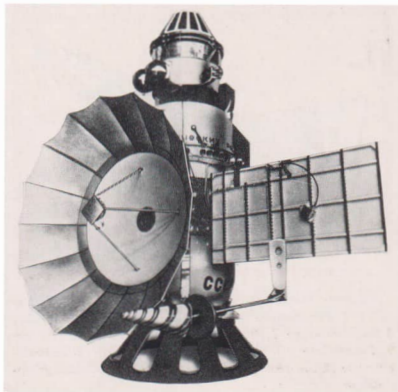
Eine Raumsonde kann nicht zu jeder beliebigen Zeit, sondern nur in fest vorgegebenen Zeiträumen zur Venus geschickt werden. Sie hängen ab von der gegenseitigen Stellung der Planeten in der Bahn und von der Geschwindigkeit, die die Trägerrakete der Sonde zu geben vermag. Da sich eine bestimmte Stellung von Erde und Venus nach einem synodischen Umlauf (584 Tage) wiederholt, ist das ungefähr der Abstand zwischen den Startzeiten von Venussonden. Vom günstigsten (optimalen) Zeitpunkt ist eine Abweichung von zwei Wochen in jeder Richtung möglich, so daß die geeignete Zeitspanne einen Monat beträgt.

In der unten gegebenen Tabelle sind die Start- und Ankunftszeiten aller bis jetzt zur Venus gestarteten Raumsonden, die Flugdauern und die Zeiten zwischen den Starts (in Tagen) angeführt. (Wenn in einer bestimmten Frist zwei Sonden gestartet wurden, wird mit der mittleren Startzeit gerechnet.)

Sonde	Land	Start	Ankunft	Flug- dauer	Zwischen- raum
Venus 1	UdSSR	12.02.61	20.05.61	97	561
Mariner 2	USA	27.08.62	14.12.62	109	
Venus 2	UdSSR	12.11.65	27.02.66	108	1174 = 2 · 587
Venus 3	UdSSR	16.11.65	1.03.66	106	
Venus 4	UdSSR	12.06.67	18.10.67	128	578
Mariner 5	USA	14.06.67	19.10.67	127	
Venus 5	UdSSR	5.01.69	16.05.69	131	575
Venus 6	UdSSR	10.01.69	17.05.69	127	
Venus 7	UdSSR	17.08.70	15.12.70	120	586
Venus 8	UdSSR	27.03.72 ¹			588

¹ Venus 8 wird um den 25. 7. 72 nach etwa 120 Tagen auf dem Nachbarplaneten niedergehen (bei Redaktionsschluß befand sich der Raumflugkörper noch auf dem Flug dorthin)

Aus der Tabelle wird ersichtlich, daß der Zeitraum zwischen den Starts der synodischen Umlaufszeit un-

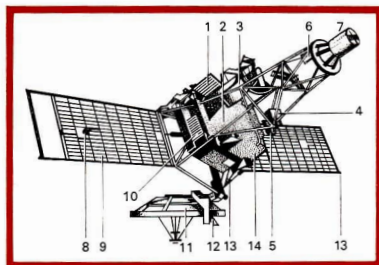


Der sowjetische Raumflugkörper Venus 7

gefähr (doch niemals genau) entspricht. Die günstige Startzeit Anfang April 1964 wurde nicht ausgenutzt. Daher liegen zwischen Mariner 2 und Venus 2 zwei synodische Umläufe.

Die ersten wissenschaftlichen Ergebnisse, die sich auf die physikalischen Eigenschaften der Venus bezogen, erbrachte der Flug der amerikanischen Venussonde Mariner 2 (1962). Aus der Bewegung der Sonde im Schwerfeld der Venus konnte ein verbesserter Massewert des Planeten (0,81485 Erdmassen) abgeleitet werden. Das Magnetfeld der Venus erwies sich als sehr schwach und war in 35 000 km Abstand nicht größer als 5γ .¹ Das ist 20- bis 30mal weniger als die magnetische Feldstärke der Erde im gleichen Abstand. Das Zählrohr für die kosmische Strahlung entdeckte in dieser Entfernung keine Erhöhung in der Anzahl der geladenen Teilchen. (Eine solche Erhöhung hätte mit Strahlungsgürteln des Planeten in Zusammenhang gebracht werden können.)

¹ Als Einheit der magnetischen Feldstärke ist $1 \gamma = 10^{-5}$ Oe



*Venussonde Mariner 2: 1 Temperaturreglergerät; 2 Geräte-
zelle; 3 Radiometer; 4 Teilchendetektor; 5 Ionen-zähler;
6 Magnetometer; 7 Rundstrahlantenne; 8 Empfangsantenne;
9 Solarzellen; 10 Temperaturregelblende; 11 Richtstrahl-
antenne; 12 Erdsensor; 13 Sonnensensor; 14 Mikrometeoriten-
detektor*

Günstige Termine für Starts zur Venus

1972 15. März bis 10. April
1973 20. Oktober bis 15. November
1974 kein günstiger Zeitpunkt
1975 27. Mai bis 20. Juni

Mariner 2 bestimmte auch die Temperatur in mehreren Punkten der Venusscheibe und lieferte dadurch Beweise für die Hypothese von der heißen Oberfläche, wie oben bereits besprochen wurde.

Am 1. März 1966 erreichte die sowjetische Sonde Venus 3 als erste die Venus und brachte Wimpel mit dem Wappen der Sowjetunion auf ihre Oberfläche.

Ein neuer Abschnitt in der Venusforschung begann mit dem Flug und dem gebremsten Abstieg von Venus 4 durch die Venusatmosphäre (am 18. Oktober 1967). Über einen Höhenunterschied von 26 km ermittelten die Geräte der Sonde Druck, Dichte und Temperatur in der Venusatmosphäre und entnahmen Proben zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung.

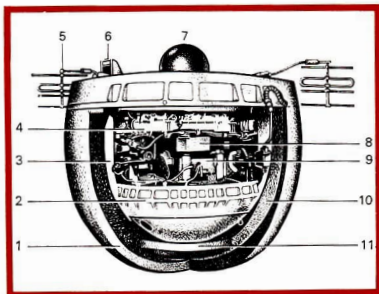
Einen Tag später flog die amerikanische Raumsonde Mariner 5 dicht an der Venus vorbei. Aus dem Durch-

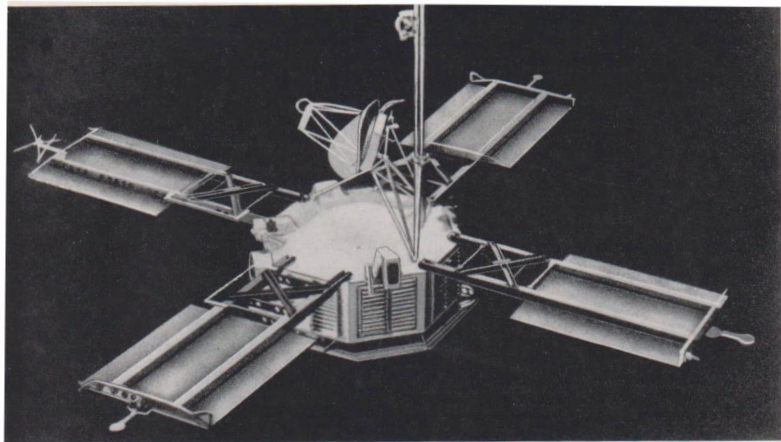
gang von Radiowellen durch die Venusatmosphäre konnte ebenfalls der Gang von Druck und Temperatur mit der Höhe abgeleitet werden. Mariner 5 begann und beendete seine Messungen jedoch in größeren Höhen als Venus 4. In einem Bereich überdeckten sich die Angaben der beiden Sonden, was von großer Bedeutung für ihre gegenseitige Kontrolle war.

Wir wollen uns eingehender mit dem Aufbau und den Meßverfahren der beiden Sonden beschäftigen.

Venus 4 war mit einer großen Anzahl wissenschaftlicher Geräte ausgerüstet, die zur Erforschung nicht nur der Venus und des planetennahen Raumes, sondern auch des interplanetaren Mediums, der kosmischen Strahlung und der Sonnenstrahlung bestimmt waren. Im Bahnteil der Sonde befanden sich Zählrohre für die kosmischen Strahlen, Langmuir-Sonden zur Untersuchung des »Sonnenwindes« (das sind Ströme geladener Teilchen, die von der Sonne ausgehen), ein Magnetometer zur Untersuchung des Magnetfeldes der Venus und der interplanetaren Magnetfelder sowie ein Ultraviolett-Zweikanal-Photometer, das zur Aufzeichnung

Aufbauschema der Eintauchkapsel von »Venus 4«: 1 äußerer Hitzeschutz; 2 Halterungsrahmen für Geräte; 3 innere Hülle; 4 Wärmeübertrager; 5 Antenne für Doppler-Höhenmessung; 6 Entfaltungsmechanismus für Antenne; 7 Aufsatz und Antenne für Meßwertübertragung; 8 Steuerungselektronik; 9 Batterie; 10 innere Wärmedämmung; 11 Dämpfungsmaterial





Die im Jahre 1967 zur Venus gestartete amerikanische Raumsonde vom Typ Mariner

der Ultraviolettstrahlung der Sonne und des Leuchtens der obersten Schichten der Venusatmosphäre bestimmt war. Der nahezu kugelförmige Landeteil war mit chemischen Gasanalysatoren zur Untersuchung der Zusammensetzung der unteren Venusatmosphäre, Temperatur- und Druckanzeigern, Radarhöhenmessern sowie Hilfseinrichtungen zur Aufzeichnung und Übertragung der Meßergebnisse ausgestattet.

Die Sonde ging auf der Nachtseite der Venus nieder. Die Messungen des Magnetometers zeigten, daß die Stärke des Magnetfeldes des Planeten weniger als ein Dreitausendstel der irdischen beträgt. Sie liegt unter 35 γ. Da die Venus kein merkliches Magnetfeld besitzt, konnte sie, im Gegensatz zur Erde, keine Strahlungsgürtel ausbilden. Demnach ist auch die Wechselwirkung der Venus mit den Strömen aus Sonnenplasma andersartig. Der auf die Venus treffende Plasmastrom bildet ininigem Abstand vom Planeten einen Dichte-

sprung, eine sogenannte Kopfwelle, aus. Hinter dem Planeten, auf seiner Nachtseite, besteht umgekehrt eine Verdünnungszone. Beide Raumsonden näherten sich der Venus in einer Richtung, die einen Winkel von fast 90° mit der Richtung zur Sonne bildete. Mariner 5 durchschnitt die Front der Kopfwelle von der Seite her, durchquerte die Verdünnungszone und traf erneut auf den Teilchenstrom. Venus 4 durchschnitt die Kopfwelle etwas näher an ihrem Stirnpunkt und gelangte nach der Durchquerung der Verdünnungszone auf den Planeten. Bemerkenswerterweise schirmte der Planet die Sonde von den kosmischen Strahlen ab, nachdem sie bis auf geringe Entfernung an die Venus herangeflogen war.

Wie die Meßgeräte von Venus 4 zeigten, begann die Stärke der ultravioletten Strahlung in der Lyman-α-Linie des atomaren Wasserstoffs in drei Planetenradien (18 000 km) Abstand zuzunehmen. In 100 km

Höhe übertraf sie die Hintergrundstrahlung des interplanetaren Raumes um das Dreifache. Das bedeutet, daß die Venus von einer Wasserstoffhülle umgeben ist. Als höchste Dichten werden dort 1000 Wasserstoffatome je cm^3 erreicht.

Den Messungen zufolge überschreitet die Elektronendichte auf der Nachtseite der Venus in Höhen über 300 km nicht 1000 cm^{-3} und ist damit um 2 bis 3 Größenordnungen kleiner als die höchsten Elektronendichten in der Erdatmosphäre.

Mariner 5 entdeckte ebenfalls die Wasserstoffkorona der Venus. Sie erstreckt sich über einige tausend Kilometer und hat mit 700°K statt 1000°K und mehr eine niedrigere Temperatur als die Wasserstoffkorona der Erde. Der Grund für den »Temperaturrückgang« in der äußeren Atmosphäre der Venus, die sich doch näher an der Sonne befindet als die Erde, liegt darin, daß es in der Venusatmosphäre sehr wenig Sauerstoff gibt, der die ultravioletten Sonnenstrahlen absorbiert und so für die Aufheizung sorgt.

Ein bemerkenswertes Verfahren wandten die amerikanischen Wissenschaftler an. Mariner 5 näherte sich der Venus nicht weiter als auf 4000 km und konnte immerhin die Atmosphärenschichten oberhalb von 35 km Höhe untersuchen. Das gelang mit der Methode der »Radioverfinsterung«. Von der Sonde ausgestrahlte Radiowellen wurden beim Durchgang durch die dichteren Schichten der Venusatmosphäre während des Verschwindens der Sonde hinter dem Planeten gebrochen und absorbiert. Dabei verändert sich die Stärke, die Frequenz und die Phase des empfangenen Signals. Durch den Vergleich der beobachteten Frequenzänderung mit der, die als Folge des Dopplereffekts (die Sonde entfernte sich zu dieser Zeit mit 6,2 km/s von der Erde) beim Nichtvorhandensein der Atmosphäre zu erwarten war, konnte die Höhenabhängigkeit des Brechungsindex im Höhenbereich von 70 bis 35 km untersucht werden. Außerdem konnte aus dem Zeitpunkt, zu dem das Signal verstummte, weil die Sonde hinter dem Planeten verschwunden war, und dem Zeitpunkt des Wiederempfangs in Verbindung mit den Messungen der Frequenzverschiebung die sogenannte Skalenhöhe der Venusatmosphäre bestimmt werden. Mit der Bedeutung dieser sehr wichtigen Kenngröße müssen wir uns eingehender befassen.

Bekanntlich nehmen die Dichte φ und der Druck P der Erdatmosphäre gemäß der barometrischen Höhenformel

$$\varphi = \varphi_0 e^{-h/H} \quad P = P_0 e^{-h/H}$$

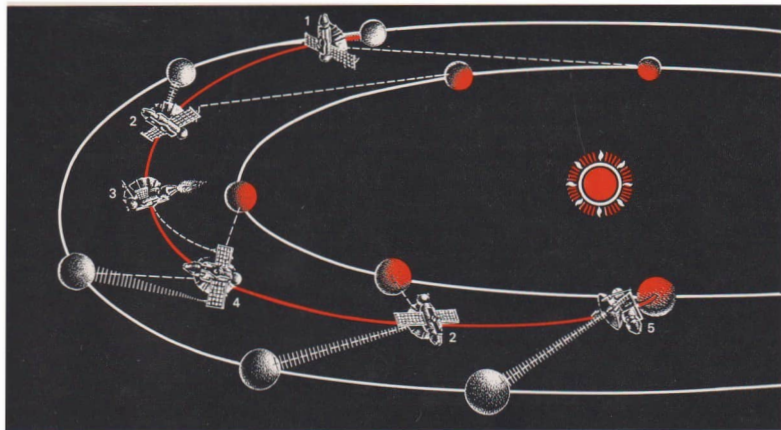
mit wachsender Höhe h ab. Hier bedeuten φ_0 und P_0 die Dichte und den Druck auf einem unteren Niveau (insbesondere in Meereshöhe), $e = 2,718 \dots$ die Basis der natürlichen Logarithmen und H eine Größe, die die Stärke der Dichte- und Druckabnahme mit der Höhe kennzeichnet. Wenn $h = H$ ist, dann sind φ und P auf den $\frac{1}{e}$ ten Teil gesunken. Ein solcher Höhenbereich heißt Skalenhöhe. Er hat noch eine andere Bedeutung. Wenn man den Ausdruck für die Dichte benutzt, um die Masse der Atmosphäre in einer Säule vom Querschnitt eins zu berechnen, so findet man leicht $\varphi_0 H$, d. h. die Masse einer Säule einer homogenen Atmosphäre der Dichte φ_0 und der Höhe H . Deshalb heißt H auch *Höhe der homogenen Atmosphäre*. An der Erdoberfläche ist $H = 8 \text{ km}$.

Wovon hängt die Skalenhöhe ab? Nach der Theorie besteht mit der Schwerebeschleunigung g (in einem festen Abstand vom Planetenmittelpunkt), dem mittleren Molekulargewicht der Atmosphäre μ und der Temperatur T der Zusammenhang

$$H = \frac{RT}{\mu g},$$

worin R die universelle Gaskonstante ist.

Bereits 1959 bestimmten die amerikanischen Wissenschaftler D. Menzel und G. de Vaucouleurs sowie, unabhängig von ihnen, der sowjetische Wissenschaftler D. Ja. Martynow aus Beobachtungen der Bedeckung des Sterns Regulus durch die Venus die Skalenhöhe der Venusatmosphäre in 115 km Höhe über der Oberfläche, wo die Helligkeit des Regulus auf die Hälfte gesunken war. Die Skalenhöhe betrug dort 6,0 bis 6,2 km. Wenn man die Schwerebeschleunigung kennt und einen Wert für μ annimmt, kann die Temperatur ermittelt werden. Für die »Höhe der Regulus-Bedeckung« lag sie zwischen 270 und 305°K (wenn als chemische Zusammensetzung der Venusatmosphäre 90% CO_2 , 9% Stickstoff und 1% Argon angenommen wird). Andere Voraussetzungen über die Zusammensetzung



Sendestapen des Raumflugkörpers Venus 5: 1 Radioverbindung mit der Erde über eine Richtantenne; 2 Funkverbindung mit Hilfe der scharf bündelnden Parabolantenne; 3 Orientierung auf einen Stern, Bahnkorrektur; 4 Funkverbindung über eine Antenne mit geringer Richtwirkung; 5 Übermittlung der Meßdaten zur Erde bei Annäherung an den Planeten und beim Niedergehen in der Venusatmosphäre

der Atmosphäre ergeben andere Temperaturwerte. Es besteht also eine gewisse Unbestimmtheit.

Bei dem Experiment mit Mariner 5 gelang es, diese Unbestimmtheit zu beseitigen, weil die Zusammensetzung und damit auch das mittlere Molekulargewicht der Venusatmosphäre aus den Angaben von Venus 4 bekannt waren. Die Skalenhöhe im Bereich von 70 bis 90 km über der Oberfläche betrug 5,4 km. Wenn die Venusatmosphäre zu 90 % aus CO_2 und zu 10 % aus Stickstoff besteht, so beträgt, da CO_2 und Stickstoff das Molekulargewicht 44 bzw. 28 haben, das mittlere Molekulargewicht der Venusatmosphäre 42,4 und die Temperatur auf dem 70-km-Niveau 241 °K. Wenn wir die Häufigkeit von CO_2 zu 75 % annehmen, so erhalten wir 228 °K. Beide Temperaturwerte für das 70-km-

Niveau kommen der mit dem Radiometer gemessenen Temperatur der Wolkenschicht nahe.

Amerikanische Wissenschaftler bestimmten unter Zugrundelegung dieses mittleren Molekulargewichtes für die gesamte Venusatmosphäre aus der Änderung der Brechung der Radiowellen die Dichteänderung der Venusatmosphäre mit der Höhe, berechneten dann aus Dichte und Schwerebeschleunigung den Gang des Druckes und erhielten schließlich aus dem Vergleich von Druck und Dichte die Temperaturkurve. Obwohl die Werte mittelbar erhalten wurden, stimmen sie gut mit den direkten Messungen von Venus 4 überein.

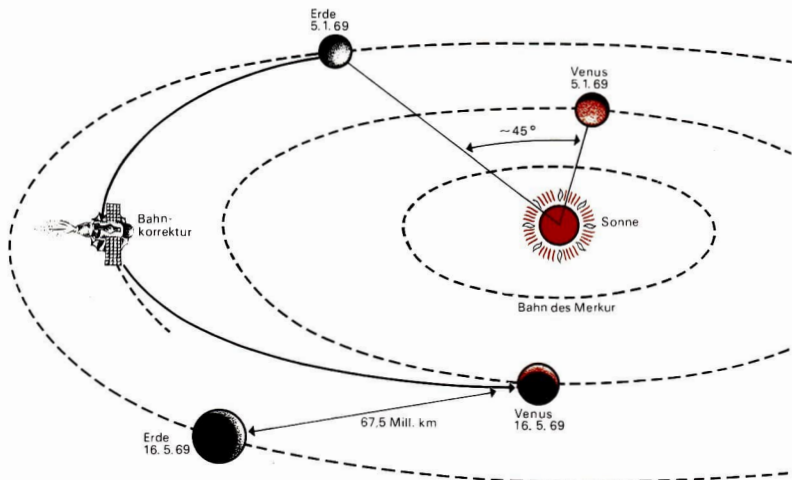
Aus den Messungen der Frequenz der Radiowellen von Mariner 5, die durch die Venusatmosphäre hin-

durchgegangen waren, ermittelten amerikanische Wissenschaftler für die Elektronendichte in der Ionosphäre des Planeten als Höchstwert auf der Tagseite $5 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$ (in rund 140 km Höhe) und auf der Nachtseite 10^6 cm^{-3} , d. h. 10mal höhere Werte als die von Venus 4 gefundene obere Grenze. Es liegt aber kein Widerspruch vor, denn der von Mariner 5 bestimmte Wert bezieht sich auf eine Höhe von 150 km, die Messungen von Venus 4 dagegen endeten in 300 km Höhe.

Venus 4 lieferte sehr viele, wertvolle wissenschaftliche Ergebnisse. Zum Teil wurden sie schon beschrieben. Bei der Bearbeitung des Materials, das der Flug der Sonde erbrachte, und bei seinem Vergleich mit den radioastronomischen Befunden tritt immer wieder eine

Unbestimmtheit in der Verknüpfung der Meßwerte mit der Höhe auf. Der Höhenmesser zeigte bei Arbeitsbeginn der Sonde 28 km an, was zur Länge des Meßbereichs paßte. Demzufolge konnte man vermuten, daß die Messung der Zustandsgrößen der Venusatmosphäre bis zur Oberfläche erfolgt war und daß sich der im niedrigsten Punkt gefundene Temperatur- (544°K) und Druckwert ($20 \pm 3 \text{ at}$) auf das Oberflächenniveau bezieht.

Der Vergleich der Druck- und Temperaturkurven nach den Angaben von Venus 4 und Mariner 5 zeigte, daß sie in dem gemeinsam überdeckten Bereich nur dann fast zusammenfallen, wenn man annimmt, daß Venus 4 die Messungen 25–30 km über dem Oberflächenniveau der Radarbeobachtungen eingestellt hat.



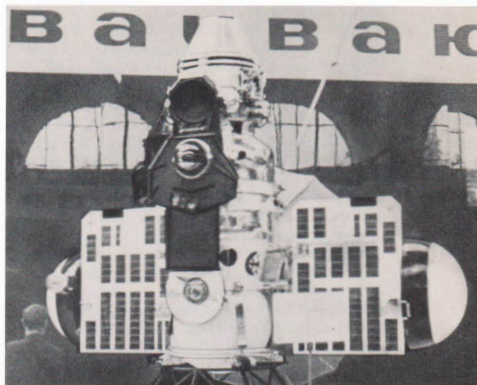
Schematische Darstellung des Fluges von Venus 5 im Jahre 1969. Durchschnittliche Bahngeschwindigkeit der Erde: 107 280 km/h; durchschnittliche Bahngeschwindigkeit der Venus: 126 000 km/h. Der Raumflugkörper muß also ein kompliziertes »Überholmanöver« vornehmen, um die »schnellere« Venus zu erreichen

Die Flugbahn von Mariner 5 lag durch die Angaben der Bahnvermessung in bezug auf den Venusmittelpunkt fest. Die Flughöhe bestimmte sich aus der Entfernung der Sonde vom Planetenmittelpunkt und dem mittels Radarmessungen bestimmten Radius der Venus. Die Höhe von Venus 4 über der Planetenoberfläche wurde mit einem Radarhöhenmesser ermittelt. Zu einer Anzeige des Höhenmessers von Venus 4 konnten aber 2 Höhenwerte gehören, die um etwa 30 km auseinanderliegen. Eine solche Unbestimmtheit ist für Höhenmesser mit periodischer Frequenzmodulation kennzeichnend. Es tauchten Vermutungen auf, daß der Landeteil der Sonde Venus 4 die Messungen beendete, bevor er die Oberfläche erreicht hatte, weil der Außendruck der Atmosphäre den zulässigen Grenzwert überschritt, die Außenhülle des Geräteteils eindrückte und die Sendeeinrichtungen zerstörte, wodurch auf dem verbleibenden Abschnitt der Landung der Sonde Venus 4 keine Messungen mehr durchgeführt wurden.

Um neu entstandene Fragen zu beantworten und um die wissenschaftlichen Ergebnisse von Venus 4 zu überprüfen und zu verbessern, mußte die Erforschung des widerspenstigen Planeten durch unbemannte Sonden fortgesetzt werden. Zu diesem Zweck wurden am 5. und 10. Januar 1969 in der Sowjetunion zwei neue Raumsonden, Venus 5 und Venus 6, zu dem Planeten der Rätsel gestartet. Am 16. und 17. Mai 1969 erreichten sie die Venus und landeten wie Venus 4 weich. Die Geräte beider Sonden arbeiteten planmäßig, und das vorgesehene Forschungsprogramm wurde erfüllt.

Die Sonden Venus 5 und 6 ähnelten in ihrem Aufbau Venus 4. Einige Systeme und Geräte wurden jedoch vervollkommen, und der Landeteil war für höhere Belastungen, Temperaturen und Drücke berechnet. Es gab einen neuen Radarhöhenmesser und verbesserte Gasanalysatoren.

Wie schon Venus 4, näherten sich beide Sonden der Venus auf der Nachthalbkugel und durchschnitten die von der Umströmung des Planeten durch den Sonnenwind herrührende Kopfwelle in 30 000 km Abstand vom Planetenmittelpunkt statt in 20 000 km wie Venus 4. In beiden Sonden befanden sich lichtelektrische Photometer zur Messung der Wasserstoffstrahlung in der ultravioletten Lyman- α -Linie. Sie entdeck-



Modell der Raumsonde Venus 5 auf einer Raumfabrausstellung

ten bereits in 25 000 km Entfernung vom Planeten die ersten Anzeichen der Wasserstoffkorona, deren Dichte in 10 000 km Abstand 100 Atome je cm^3 betrug. Diese Ergebnisse bestätigten und ergänzten die Untersuchungen der Wasserstoffkorona durch Venus 4.

Die Sonden Venus 5 und 6 traten mit einer Geschwindigkeit von 11,2 km/s und unter einem Winkel von 65° gegen den örtlichen Horizont in die Venusatmosphäre ein. Nach kurzer Zeit war die Geschwindigkeit der Landekapsel durch aerodynamische Bremsung auf rund 200 m/s gefallen. Es öffneten sich nun die Brems- und Hauptfallschirme und für länger als 50 Minuten begannen die wissenschaftlichen Messungen an der Atmosphäre. Die Sonden landeten 2 700 km vom Terminator der Venus entfernt und in ungefähr 300 km Abstand voneinander.

Venus 5 entnahm bei 0,5 und 5 at und Venus 6 bei 1 und 10 at Außendruck Proben aus der Venusatmosphäre. Die neuen Angaben über die chemische Zusammensetzung der Venusatmosphäre, die das Kol-

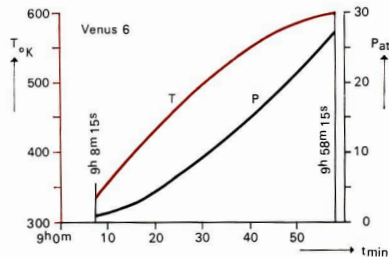
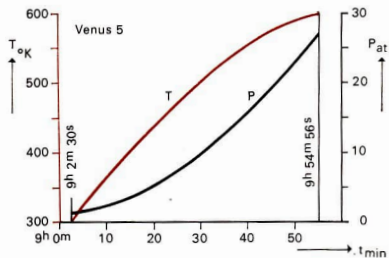
lektiv sowjetischer Wissenschaftler unter Leitung des Akademiemitgliedes A. P. Winogradow erhielt, bestätigen und verbessern die Messungen von Venus 4. Die chemische Zusammensetzung der Venusatmosphäre sieht nach den Angaben der sowjetischen unbemannten Sonden folgendermaßen aus: CO_2 $97 \pm 4\%$, N_2 $< 2\%$, O_2 $< 0,1\%$, H_2O $0,05\%$.

Der hier angegebene Wasserdampfgehalt stellt das Mittel aus allen vermessenen Teilen der Venusatmosphäre dar. Gleichzeitig bestimmte ein Meßgerät an Bord von Venus 5 den Feuchtigkeitsgehalt in verschiedener Tiefe. Den erhaltenen Daten kommt der Hauptteil der Feuchtigkeit in der Wolkenschicht und unmittelbar darunter vor, und der Feuchtigkeitsgehalt nimmt mit der Annäherung an die Oberfläche ab.

Kehren wir zu den Ergebnissen der Temperatur- und Druckmessungen zurück. In den vermessenen Gebieten ändert sich die Temperatur von 298 auf 593°K und der Druck von 0,5 auf 27 at. Der von den Messungen erfaßte Höhenbereich beträgt 34 bis 37 km. Die Messungen wurden etwa 20 km über der mittleren Oberfläche der Venus beendet. Die örtliche Höhenlage der Oberfläche an den Landeplätzen unterschied sich für beide Sonden im Mittel um 13 km. Da der von beiden Sonden bei Beendigung der Messungen angezeigte Druck von 27 at ein und demselben Atmosphärenniveau entspricht und die Landung in verschiedenen Teilen der Planetenoberfläche stattfand, kann man vermuten, daß die unterschiedliche Anzeige der Radarhöhenmesser der beiden Sonden durch Ungleichmäßigkeiten im Oberflächenrelief der Venus zu erklären ist. Auch auf der Erde beobachten wir Höhenunterschiede bis zu 20 km (Himalaya – Marianengraben im Stillen Ozean). Auf der Venus gibt es zwar kein flüssiges Wasser und auch keine Meere, aber die Rauheit der Oberflächenformen kann den gleichen Maßstab besitzen wie auf der Erde.

Wie ändern sich in der Venusatmosphäre Druck, Dichte und Temperatur mit der Höhe? Oder anders gefragt, wie sieht das Modell der Venusatmosphäre aus?

Die Aufstellung eines Atmosphärenmodells für die Venus beschäftigte viele Wissenschaftler schon lange vor dem Flug von Venus 4, der die ersten unmittelbaren Druck- und Temperaturmessungen lieferte.



Gang von Temperatur und Druck in der Venusatmosphäre nach den Angaben von Venus 5 und 6. Der in der Abzisse angegebenen Fallzeit entspricht eine durchfallene Höhen-differenz von 50 bis 10 km $\pm 5\%$

Einige Dutzend Modelle wurden aufgestellt. Als Grundlage dienten die Messungen der Oberflächen-temperatur durch die radioastronomische Methode im Bereich der Zentimeterwellen und die Temperaturmessungen an der Wolkenschicht mit der radiometrischen Methode. Um aber die Steilheit der Temperaturabnahme mit der Höhe zu bestimmen, mußte die Höhe der Wolkenschicht bekannt sein. Sie konnte erst ermittelt werden, nachdem der Radius der festen Venus-kugel mit Radarmethoden gemessen worden war. Die auf diesem Wege gefundene Höhe war um nicht weni-

ger als ± 10 km unsicher. Der wahrscheinlichste Wert betrug 50 bis 65 km. Über diesen Höhenunterschied änderte sich die Temperatur von 600 bis 700 °K auf 235 °K, was einem senkrechten Temperaturgradienten (Stärke der Änderung) von rund 7,3 °K/km entsprach.

Nach den genaueren Angaben der Sonden Venus 5 und 6 beträgt der senkrechte Temperaturgradient in der Venusatmosphäre 8 bis 8,6 °K/km, mit anderen Worten, bei einer Höhenzunahme von 1 km sinkt die Temperatur um 8 °K.

Der Temperaturgradient kann auch theoretisch berechnet werden unter der Annahme, daß in der Venusatmosphäre adiabatische Gleichgewichte herrscht, d. h., Wärmequellen und -senken fehlen. Der adiabatische Temperaturgradient ergibt sich dann aus der einfachen Beziehung

$$\Gamma_a = \frac{A_g}{C_D},$$

in der $A = 2,388 \cdot 10^{-8}$ cal/erg das mechanische Wärmeäquivalent, C_D die spezifische Wärme bei konstantem Druck und g die Schwerebeschleunigung sind.

Setzen wir für die Größen Zahlenwerte ein, so finden wir für die Venusatmosphäre $\Gamma_a = 8,9$ °K/km. Der beobachtete Temperaturgradient unterscheidet sich also wenig vom adiabatischen. Es ist erwähnenswert, daß in der Erdatmosphäre (genauer in der Troposphäre) der Gradient im Mittel 5,8 °K/km beträgt, obwohl der adiabatische Gradient $\Gamma_a = 9,8$ °K/km ist. Anders ausgedrückt, der wirkliche Gradient beträgt nur 60% des adiabatischen. Dieser Unterschied ist auf die Feuchtigkeit in der Atmosphäre zurückzuführen, denn der Wasserdampf ist in der Lage, bei Kondensations- und Verdampfungsvorgängen Energie in Form von Strahlung freizusetzen bzw. zu absorbieren.

Welche Bedingungen herrschen an der Venusoberfläche? Die sowjetischen Wissenschaftler W. S. Awdujewski, M. Ja. Marow und M. K. Rosdestwenski berechneten, daß an der mittleren Oberfläche (die das arithmetische Mittel aus den Anzeigen der Radarhöhenmesser der beiden Sonden ist) die Temperatur 770 °K und der Druck 100 at mit einem möglichen Fehler von ± 60 °K bzw. ± 40 at betragen, wenn sich

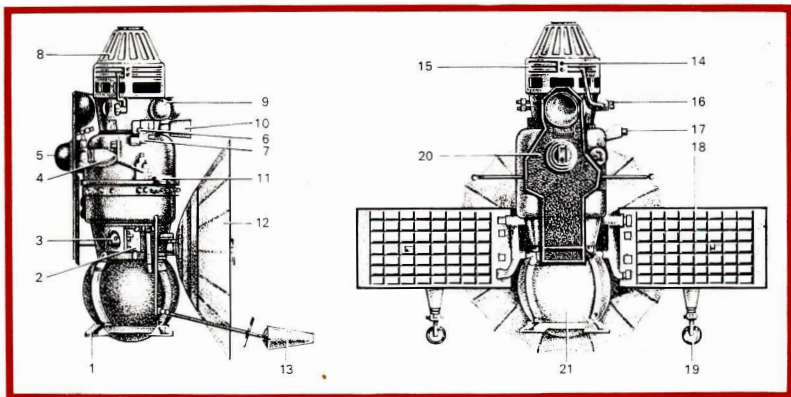
die Temperatur bis zur Oberfläche gemäß dem adiabatischen Gradienten ändert. Es gibt allerdings Grund zu der Annahme, daß wegen der starken Absorption der Strahlung durch das Gas und den Staub in den unteren Schichten der Venusatmosphäre der Temperaturgradient allmählich gegen den Wert Null an der Oberfläche strebt. Dann betragen Temperatur und Druck an der Planetenoberfläche 685 ± 10 °K und 110 ± 50 at.

Diese ungeheuren Temperaturen und Drücke stellen die bekannten Schwierigkeiten für die unmittelbare Untersuchung der untersten Schichten der Venusatmosphäre dar. Ein Druck von 100 at entspricht dem in 1000 m Wassertiefe. Nur besondere Tauchgeräte – Bathyskaphen – widerstehen solchen Drücken. Bis jetzt darf man nicht an die Landung von Raumfahrern auf der Venusoberfläche denken. Menschen, auch wenn sie Taucherausrüstung trügen, würden durch den ungeheuren Druck einfach zerquetscht. Außerdem liegt die Temperatur an der Venusoberfläche höher als der Schmelzpunkt von Zinn und Blei.

Deshalb kommt Versuchen, die Venus mit vollständig automatisierten Sonden zu erforschen, die nicht nur physikalische Messungen auf anderen Planeten durchführen, sondern auch Bodenproben entnehmen und zur Erde zurückbringen können, große Bedeutung zu.

Am 15. Dezember 1970 beendete die am 17. August gestartete neue sowjetische Raumsonde Venus 7 den 120tägigen Flug und trat in die Atmosphäre des Planeten ein. Während der aerodynamischen Abbremsung verringerte sich die Geschwindigkeit des Landekörpers von 11,5 km/s auf 200 m/s. Der Bremsdruck erreichte dabei 350 g ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$), die Temperatur zwischen der Stoßwellenfront und der Außenwandung des Landegeräts bis zu 11000 °K. In 60 km Höhe über der Planetenoberfläche wurde der Fallschirm bei einem Außendruck von 0,7 at automatisch geöffnet. Während des 35 Minuten dauernden Abstiegs wurden Signale von den Geräten der Sonde auf der Erde empfangen. Am 15. Dezember 6 Uhr 34 Minuten 10 Sekunden (MEZ) setzte die Landekapsel auf der Venusoberfläche auf.

Zur Messung des Drucks und der Temperatur der Venusatmosphäre war der Landekörper mit Geräten



Aufbau von Venus 5: 1 Halterung mit Stützring (wird bei der Abtrennung der Landekapsel abgesprengt); 2 Steuerungselektronik für das Orientierungssystem; 3 Druckgasbehälter für das Orientierungssystem; 4, 5, 6, 7 Geber des Orientierungssystems (Sonnen- und Sternsensoren); 8 Triebwerk für Bahnkorrekturen; 9 Treibstoffbehälter; 10 Blende des Orientierungsgebers (Erdsensor); 11 Ultraviolett-Strahlungsmesser; 12 Parabolantenne; 13, 19 Wendelantennen; 14, 15, 16 Mikrotriebwerke (Düsen) des Orientierungssystems; 17 Teilchenzähler (Ionenfalle); 18 Solarzellenausleger; 20 Sensor für die Astroorientierung (Sonnensensor); 21 Landekapsel

ausgerüstet, mit denen sich die Temperatur im Bereich zwischen 298 und 813 °K, der Druck zwischen 0,5 und 150 at messen ließen. Da die vorangegangenen Unternehmen eine sehr heiße Planetenatmosphäre angezeigt hatten, empfahl es sich, Vorkehrungen für ein möglichst schnelles Tiefergehen der Landungssohle zu treffen. Aus diesem Grunde hatte man die Konstruktion des Fallschirmsystems erheblich verändert, und die Kapsel von Venus 7 passierte die oberen Bereiche der Venusatmosphäre wesentlich schneller als die früheren Geräte.

Beim Abstieg in der Atmosphäre verändert sich die Geschwindigkeit des Eintauchkörpers, und durch den Dopplereffekt verändert sich für einen Beobachter auf der Erde somit auch die Frequenz der empfangenen Signale. Aus den Änderungen der Dopplerfrequenz

läßt sich also bestimmen, wie schnell der Flugkörper sinkt. Und wenn die Abstiegszeit bekannt ist, kann die Länge des zurückgelegten Weges festgestellt werden.

Der Landekörper von Venus war mit hochstabilen Frequenzgeneratoren ausgerüstet worden, die während des Fluges mehrfach geprüft und mit der Frequenz von Eichgeneratoren auf der Erde verglichen wurden. Dadurch konnte die Sinkgeschwindigkeit der Kapsel in der Venusatmosphäre mit großer Genauigkeit bestimmt werden. Am Ende der Abstiegsphase wurde an den Frequenzänderungen des Funksignals festgestellt, daß die Sinkgeschwindigkeit relativ zum Planeten gleich Null und somit die Landung vollzogen war. Nach der Landung wurden noch 23 Minuten lang Signale des Landekörpers empfangen, deren Stärke

jedoch hundertmal geringer als bei der Landung war, was mit einer Änderung der Ausrichtung der Sendeanenne nach der Landung als wahrscheinlichster Ursache erklärt wurde.

Die Analyse der Meßwerte, die während des Abstiegs und nach der Landung empfangen werden konnten, ergab, daß das Bordsystem, das die aufeinanderfolgende Befragung der verschiedenen Geräte besorgen sollte, in der Schaltstellung für die Temperaturmeßwerte blockiert geblieben war. Dadurch erhielt man lediglich Temperaturangaben als einzige Strukturparameter der Planetenatmosphäre. Aus den zeitlichen Änderungen der gemessenen Temperaturen und der Sinkgeschwindigkeit wurde das Abhängigkeitsverhältnis der Atmosphärentemperatur von der Höhe bis zur Planetenoberfläche herab bestimmt. Es zeigte sich, daß die Temperaturänderungen annähernd adiabatisch verlaufen. Diese Feststellung ist von grundlegender wissenschaftlicher Bedeutung.

Unter Bezug auf die Messungen der früheren sowjetischen Eintauchsonden konnte der Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Druck in der Atmosphäre bis in etwa 20 km Höhe als hinreichend bekannt gelten. Aus den Messungen von Venus 7 ließen sich dann, unter Voraussetzung hydrostatischen Gleichgewichts, mit Hilfe der Gasgesetze sowie der Messungen der ersten Eintauchgeräte die Höhenverteilung des Drucks und der Dichte in der Venusatmosphäre bis zur Oberfläche hin berechnen.

Mögliche Meßfehler einkalkuliert, konnten die Toleranzen für die so gewonnenen Druck- und Temperaturwerte geschätzt werden. Diese Atmosphärenparameter betragen auf der Venusoberfläche am Landeort von Venus 7: Temperatur $748 \pm 20^\circ\text{K}$, Druck 90 ± 15 at. Damit ist endgültig erwiesen, daß die Venus eine ungewöhnlich heiße Atmosphäre besitzt, die an der Planetenoberfläche mindestens 60mal so dicht ist wie die der Erde.

Die hohe Dichte der Venusatmosphäre führt zu einer starken Brechung nicht nur der Radio-, sondern auch der Lichtwellen. Bis zu 35 km Höhe über der Oberfläche herrschen auf der Venus die Bedingungen der »Überbrechung«, d. h., die Krümmung der Lichtstrahlen ist größer als die Krümmung der Planetenoberfläche. Einen Horizont im gewöhnlichen Sinne gibt



Die Landekapsel eines Venus-Raumflugkörpers geht auf dem Nachbarplaneten nieder

es nicht. Einem Beobachter käme es vor, als befände er sich am Grunde einer riesigen Schale, auf der die ziemlich weit entfernten Gegenstände verzerrt abgebildet sind. Wegen der starken Absorption des Lichtes

in der heißen Atmosphäre kann man dort allerdings nicht in weite Entfernungen schauen.

Große Aufmerksamkeit fanden die Überlegungen des Akademiest Mitglieds A. P. Winogradow hinsichtlich der Entwicklungswege der Venusatmosphäre. Da sich die Venus nahe der Sonne befindet und äußerst langsam rotiert, mußte sie auf über 50 °C erwärmt werden. Bei einer solchen Temperatur fand eine starke Verdunstung statt. Der Wasserdampf erzeugte die Glashaushwirkung, und dadurch steigerte sich die Temperatur noch mehr. Bei den wachsenden Temperaturen reagierten das Kalzium- und Magnesiumkarbonat der Planetenrinde mit den Silikaten. Dabei wurde Kohlendioxid an die Atmosphäre abgegeben, was den Glashaushseffekt noch verstärkte. Die »Selbsterhitzung« setzte sich fort, und fast das gesamte Kohlendioxid der Rinde

gelangte in die Atmosphäre. Unterdessen fand in der Ionosphäre des Planeten eine unaufhörliche Zersetzung des Wassers durch photochemische Reaktionen statt. Das führte zur Oxydation von Eisen, Mangan, Schwefel und anderen Stoffen der Planetenrinde. Der freigesetzte Wasserstoff bildete die Wasserstoffkorona, die der irdischen vergleichbar ist oder sie sogar übertrifft. Aber der Wasserstoff strömt ständig ab, er dissipiert. Das führt zur Austrocknung der Venusoberfläche, die man sich als heiße, steinige Wüste vorstellen mag, die durch Eisenoxide rotgefärbt ist. Heftige Winde glätten die Unebenheiten des Geländes, wirbeln Staubwolken auf und tragen den Gesteinsschutt hinweg. So malen wir uns heute die Natur dieses immer noch rätselhaften Planeten aus. Künftige Forschungen werden aber auch seine Geheimnisse entschleiern helfen.

