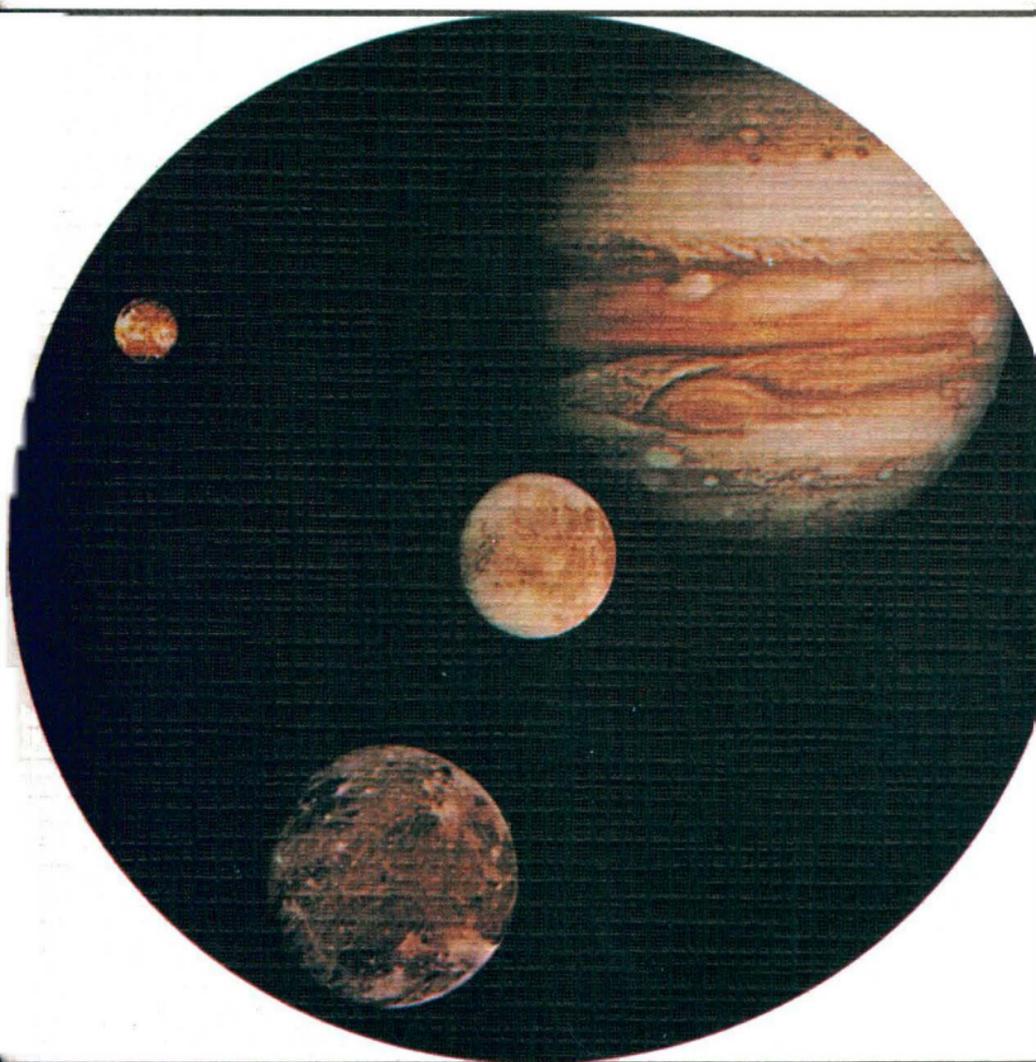


akzent

Johann Dorschner

Planeten – Geschwister der Erde?





1. Einleitung

2. Zielsetzung

3. Methodik

4. Ergebnisse

5. Diskussion

6. Zusammenfassung

7. Literaturverzeichnis

8. Anhang

9. Glossar

10. Index

11. Bibliographie

12. Literaturverzeichnis

13. Anhang

14. Glossar

15. Index

16. Bibliographie

17. Literaturverzeichnis

18. Anhang

19. Glossar

20. Index

21. Bibliographie

22. Literaturverzeichnis

23. Anhang

24. Glossar

25. Index

26. Bibliographie

27. Literaturverzeichnis

28. Anhang

29. Glossar

30. Index

31. Bibliographie

32. Literaturverzeichnis

33. Anhang

34. Glossar

35. Index

36. Bibliographie

37. Literaturverzeichnis

38. Anhang

39. Glossar

40. Index

41. Bibliographie

42. Literaturverzeichnis

43. Anhang

44. Glossar

45. Index

46. Bibliographie

47. Literaturverzeichnis

48. Anhang

49. Glossar

50. Index

51. Bibliographie

52. Literaturverzeichnis

53. Anhang

54. Glossar

55. Index

56. Bibliographie

57. Literaturverzeichnis

58. Anhang

59. Glossar

60. Index

61. Bibliographie

62. Literaturverzeichnis

63. Anhang

64. Glossar

65. Index

66. Bibliographie

67. Literaturverzeichnis

68. Anhang

69. Glossar

70. Index

71. Bibliographie

72. Literaturverzeichnis

73. Anhang

74. Glossar

75. Index

76. Bibliographie

77. Literaturverzeichnis

78. Anhang

79. Glossar

80. Index

81. Bibliographie

82. Literaturverzeichnis

83. Anhang

84. Glossar

85. Index

86. Bibliographie

87. Literaturverzeichnis

88. Anhang

89. Glossar

90. Index

91. Bibliographie

92. Literaturverzeichnis

93. Anhang

94. Glossar

95. Index

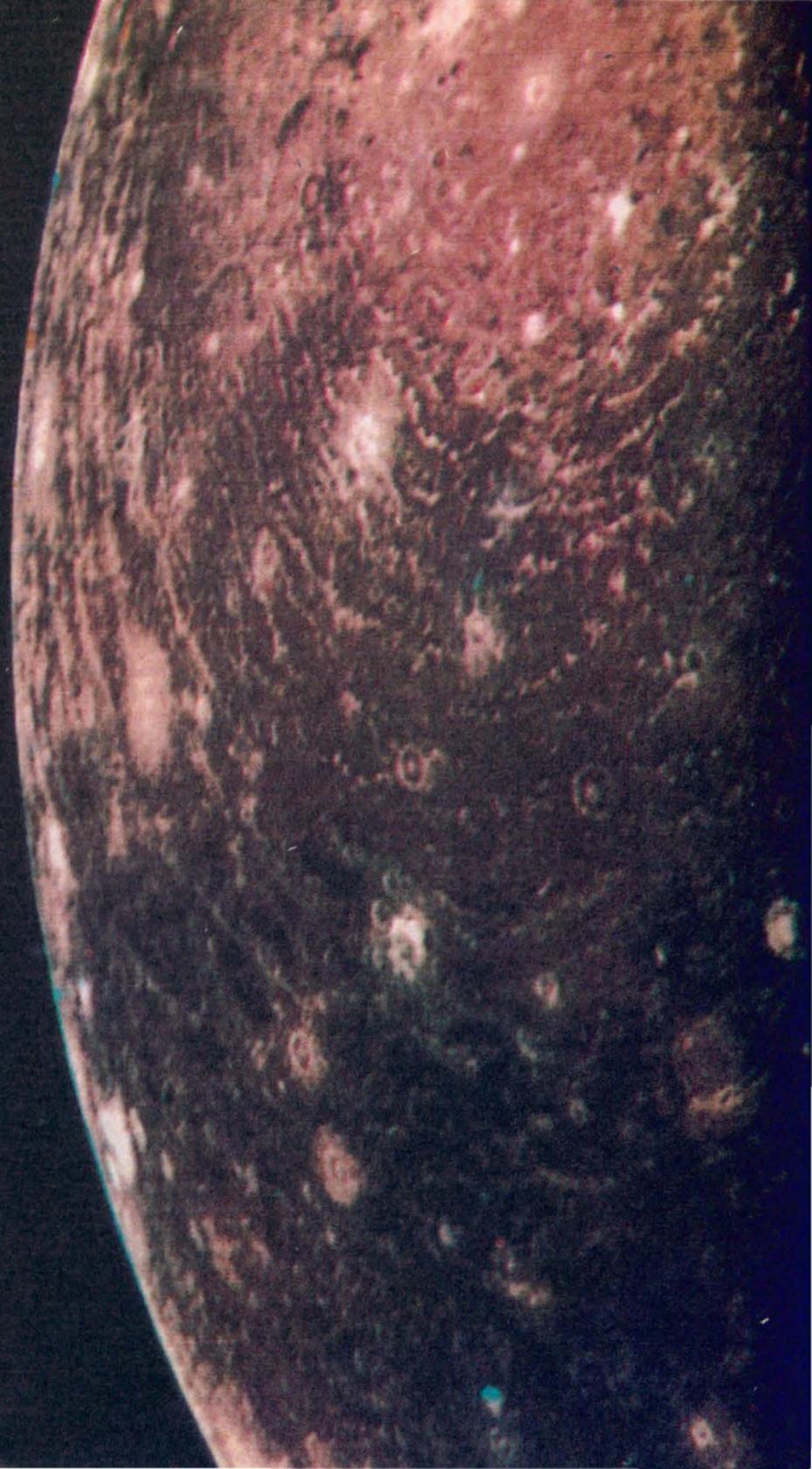
96. Bibliographie

97. Literaturverzeichnis

98. Anhang

99. Glossar

100. Index



Johann Dorschner

Planeten –
Geschwister der Erde?

Urania-Verlag Leipzig · Jena · Berlin

Autor: Dr. Johann Dorschner
Friedrich-Schiller-Universität, Jena

Illustrationen: Klaus Thieme

2., umgearbeitete Auflage 1984

31.–60. Tausend. Alle Rechte vorbehalten

© Urania-Verlag Leipzig/Jena/Berlin

Verlag für populärwissenschaftliche Literatur, Leipzig 1977

VLN 212–475/133/84 LSV 1499

Lektor: Ewald Oetzel

Umschlagreihenentwurf: Helmut Selle

Typografie: Marion Kraemer

Fotos: ADN/ZB (18/19), APN/Nowosti (48), NASA (2, 21, 22,
41, 51, 55, 57, 62, 77, 78, 86, 97, 101, 106, 109), Wilhelm Kegel,
Jena (39)

Printed in the German Democratic Republic

Gesamtherstellung: INTERDRUCK Graphischer Großbetrieb

Leipzig, Betrieb der ausgezeichneten Qualitätsarbeit, III/18/97

Best.-Nr.: 6534593

00450



Foto auf S. 2: Teil der Oberfläche des Jupitermondes Kallisto.
Die Vielringstruktur Valhalla ist das Ergebnis eines mächtigen
Einschlages in die Eiskruste des Himmelskörpers.

Inhalt

In eigener Sache 6

Von der Erd- zur Planetenwissenschaft 7

Die Erde – ein Planet 7

Etappen der astronomischen Planetenforschung 10

Die Planeten rücken näher 15

Planetengeologie, Planetengeophysik, Planetenmeteorologie 20

Die Erde und ihre Geschwister 24

Der Aufbau des Planeteninnern 24

Die Oberflächenbeschaffenheit 34

Die Gas- und Plasmahüllen 59

Die Stiefgeschwister der Erde 75

Der innere Aufbau der jupiterartigen Planeten 75

Die Atmosphären und Magnetosphären 82

Die Ringe und Satellitensysteme 99

Vom Ursprung der Planeten 112

Viele Hypothesen – aber noch keine befriedigende Theorie 112

Planetenbaumaterial im Museum 116

Der Sonnennebel 120

Wie wächst ein Planetenembryo? 124

In eigener Sache

In den wenigen Jahren, die seit dem Erscheinen der ersten Auflage dieses akzent-Bandes verflossen sind, hat das Wissen über die Planeten explosionsartig zugenommen. Der Leser, der die erste Auflage kennt, wird feststellen, daß mehrere Bilder, die Herr Klaus Thieme mit so großem Einfühlungsvermögen geschaffen hat, verschwunden sind. In der Zwischenzeit hat es nämlich der Fortschritt der Wissenschaft ermöglicht, jene bisher nur durch die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaftler und Künstler möglich gewordenen Phantasiedarstellungen durch echte Bilddokumente aus jenen fernen Welten zu ersetzen. Natürlich mußte auch im Text eine Fülle neuer Erkenntnisse, die in der Zwischenzeit gewonnen wurden, eingearbeitet werden.

Es ist mir ein Bedürfnis, dem Urania-Verlag für das großzügige Entgegenkommen bei der Gestaltung dieser völlig umgearbeiteten zweiten Auflage herzlich zu danken. Ein ebenso herzliches Wort des Dankes richte ich an Herrn Doz. Dr. Manfred Reichstein, dem ich große Teile meines Wissens zu planetengeologischen Fragen verdanke, und an meinen Kollegen Dr. Joachim Gürtler, der mir bei der Abfassung dieses Büchleins ein guter Ratgeber gewesen ist. Beide Herren haben das Manuskript kritisch gesichtet und mich auf verbesserungswürdige Stellen aufmerksam gemacht.

Ich widme dieses Büchlein Stephan, Katharina und Sebastian, die durch die populärwissenschaftliche Öffentlichkeitsarbeit des Vaters manche Einbuße an gemeinsam gestalteter Zeit hinnehmen mußten.

J. Dorschner

Von der Erd- zur Planetenwissenschaft

Die Erde – ein Planet

Bereits vor Jahrtausenden interessierte sich der Mensch für die großräumige Beschaffenheit der Erde und unternahm ständig Versuche, die Grenzen der bekannten Welt weiter hinauszuschieben. So drangen vor mehr als 3000 Jahren die kühnen Seeleute der Phöniker aus dem Mittelmeerraum bis Nordwesteuropa und Westafrika, vielleicht sogar bis Indien vor. Sie und andere Völker des Vorderen Orients machten die Erfahrung, daß das Festland anscheinend überall vom Meer umspült wird. Unter dem Eindruck dieser Erfahrungen entstand daher bei der »Gelehrtenwelt« des Zweistromlandes vor 3000 bis 4000 Jahren ein mythologisch umrahmtes Weltbild, dessen rationaler Kern sich folgendermaßen skizzieren läßt: Auf dem gewaltigen Weltmeer schwimmt die Erdscheibe, über die das Himmelsgewölbe – im Horizont fest mit der Erde verbunden – gestülpt ist. Man braucht nur ein wenig zu graben, und schon sickert wie in einem lecken Schiff das Wasser durch. Literarisch gestaltet finden wir dieses dem Augenschein entsprechende Weltbild im Schöpfungsbericht der Bibel wieder.

Den großen Denker und scharfsinnigen Naturbeobachter im antiken Griechenland entging jedoch nicht, daß eine scheibenförmige Erde und ein ebenes Meer mit einer Reihe von Tatsachen einfach nicht vereinbar waren, beispielsweise, daß man von einem weit entfernten Schiff zunächst nur die Mastspitzen sieht und erst nach und nach beim Näherkommen die tiefer liegenden Teile sichtbar werden. Neben Beobachtungstatsachen spielte

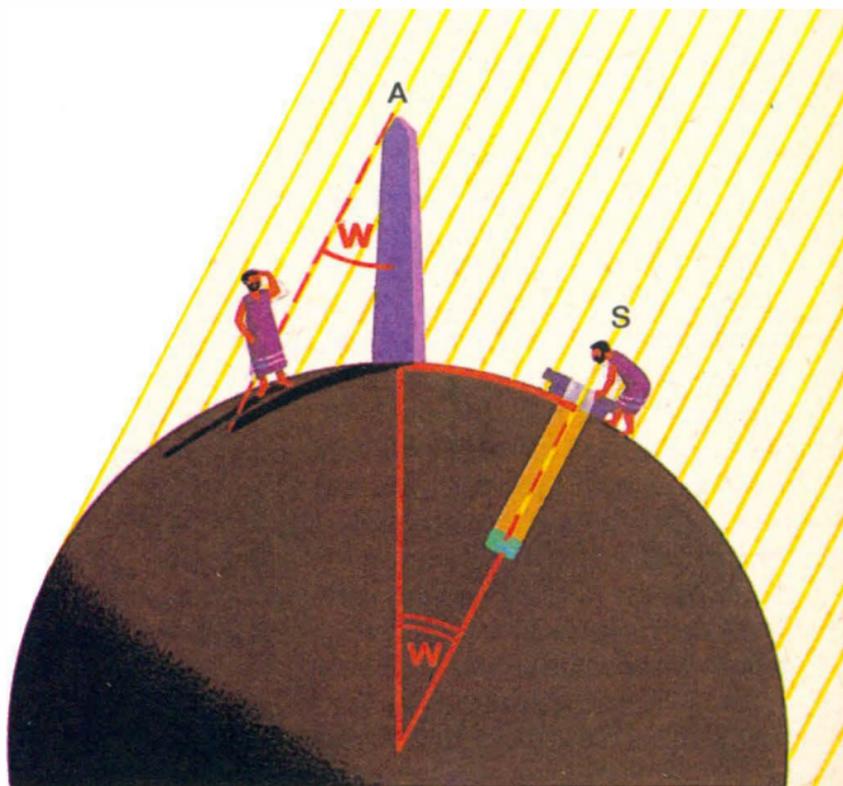


Die Erdscheibe nach dem Gelehrten Hesiod (um 700 v. u. Z.)

aber auch die philosophische Überzeugung eine wichtige Rolle, daß die Erde ein geometrischer Körper vollkommenster Symmetrie, also eine Kugel sein müsse. Im 6. Jh. v. u. Z. waren vor allem aus diesem Grunde Pythagoras und seine Schüler felsenfest von der Kugelgestalt der Erde überzeugt. In den Werken des Aristoteles (4. Jh. v. u. Z.), des größten Gelehrten des klassischen Altertums, finden wir scharfsinnige astronomische Beweise dafür, daß die Erde eine Kugel ist, z. B. das gleichmäßige Höherrücken des Polarsterns, wenn man von Süden nach Norden reist, oder den kreisförmigen Erdschatten, der bei einer Mondfinsternis auf dem Mond sichtbar wird. Hundert Jahre später bestimmte der alexandrinische Gelehrte Eratosthenes nach einer ebenso genialen wie einfachen Meßmethode den Umfang der Erde verblüffend genau zu 40 000 km.

Die Griechen fanden aber nicht nur die wahre Erdgestalt heraus, sondern sie machten sich auch über die Stellung der Erde im Kosmos Gedanken. Im Weltbild des Claudius Ptolemäus, in das die Erkenntnisse und Meinungen vieler Astronomengenerationen einfließen, bildete die Erde den Mittelpunkt des Weltgebäudes. Auf kompliziert konstruierten Kreisbahnen, in kristallinen Sphären verankert, umliefen Sonne, Mond und Planeten die im Zentrum ruhende Erde. Eingehüllt wurden die Erdkugel und das System konzentrischer Kugelschalen von der Sphäre, an der die Sterne befestigt waren.

Die Bestimmung der Größe der Erdkugel durch Eratosthenes (3. Jh. v. u. Z.). Dem Gelehrten fiel auf, daß bei Sommerbeginn die Mittagssonne in die Brunnen der Stadt Syene (Assuan) schien, während sie zur gleichen Zeit im 800 km weiter nördlich gelegenen Alexandria nicht genau im Zenit stand, so daß die Obelisken kurze Schatten warfen. Er maß den Winkel W und berechnete daraus den Erdumfang.



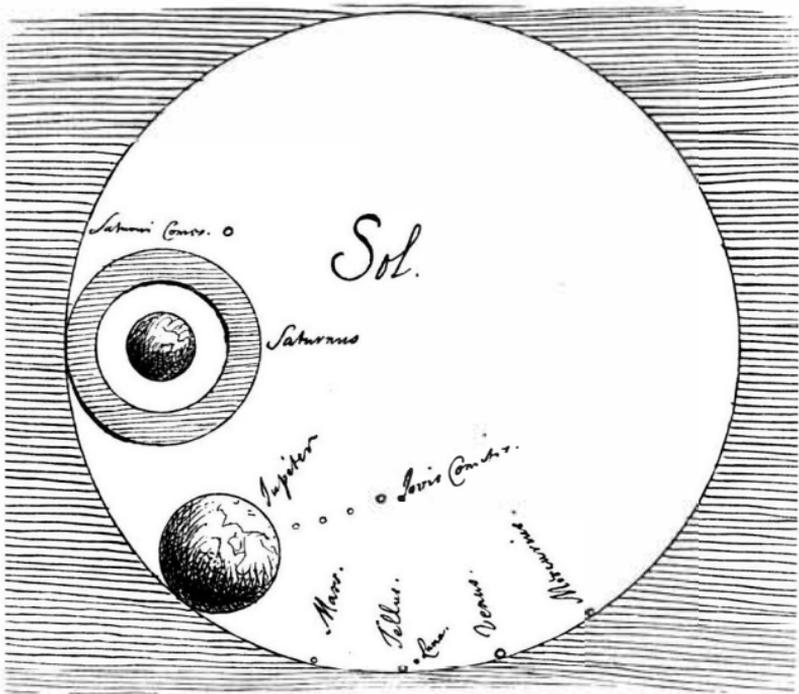
Anders als bei den Griechen interessierten sich die Gelehrten im Römischen Imperium verhältnismäßig wenig für astronomische Probleme, und das aufkommende Christentum hielt am Weltbild der Bibel fest, so daß die Erkenntnis der wahren Erdgestalt in den folgenden Jahrhunderten wieder in Vergessenheit geriet. Nur vereinzelt tauchte die antike Vorstellung von der Erdkugel auf. Erst als die Scholastiker im Hochmittelalter sich intensiv mit den Werken des Aristoteles zu beschäftigen begannen, stieß man wieder auf die verschüttete Erkenntnis der Alten. Kühne Seefahrer, wie Kolumbus und Magellan, demonstrierten schließlich im Zeitalter der Renaissance eindrucksvoll die Richtigkeit dieser Vorstellung.

Ein Renaissancegelehrter, der polnische Astronom Nikolaus Kopernikus, war es auch, der den nächsten entscheidenden Schritt auf dem Wege der Erkenntnis der Stellung der Erde im Weltall vornahm. Mit seiner Vorstellung, daß die Erdkugel nicht das Zentrum des Kosmos ist, leitete Kopernikus eine Revolution in der Entwicklung der Wissenschaft ein. Was er erkannte und seine Nachfolger Schritt für Schritt bewiesen, läßt sich auf die einfache Formel bringen: Unsere Erde ist ein Planet, ein Himmelskörper, der wie Merkur, Venus und Mars, wie Jupiter und Saturn den Stern Sonne umläuft.

Etappen der astronomischen Planetenforschung

Wenn man im Altertum von Planeten sprach, so meinte man diejenigen Gestirne, die auffällig hell waren und ständig durch die Sternbilder des Tierkreises wanderten: Mond, Merkur, Venus, Sonne, Mars, Jupiter und Saturn. Die Erde als Mittelpunkt des Weltgebäudes und Sitz der Menschheit hatte bei dieser Sicht der Dinge einen »Sonderstatus«.

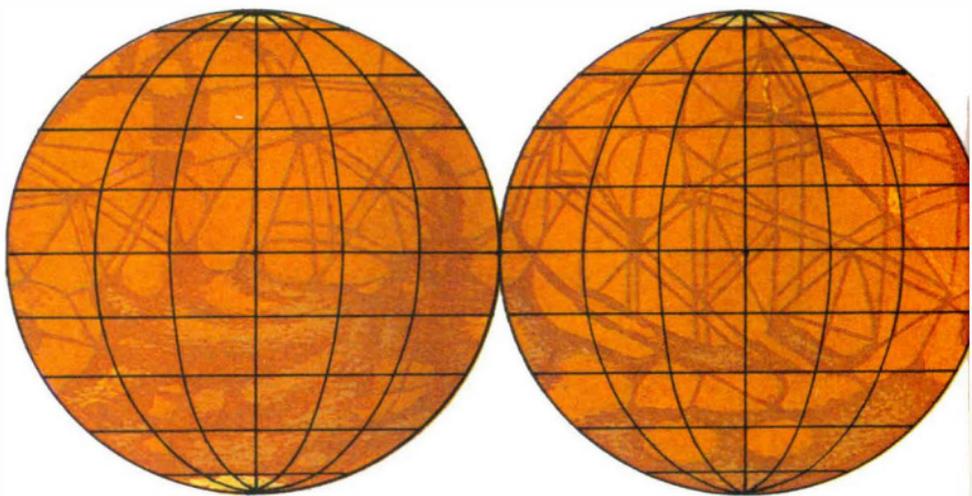
Nach der kopernikanischen Revolution schied die Sonne aus dem Kreis der Wandelsterne aus. Sie wurde als Zentralkörper des Planetensystems erkannt, während



Die Größenverhältnisse zwischen Planeten, Monden und der Sonne wurden erstmals im 17. Jh. von Huygens richtig wiedergegeben.

die Erde ihren »Sonderstatus« verlor und fortan als Planet zu betrachten war. Lediglich der Mond überstand den Umsturz im astronomischen Weltbild ohne Stellungswechsel, allerdings war er von nun an kein Planet mehr, sondern ein Satellit der Erde. Als einzigem Himmelskörper konnte man ihm bereits mit dem bloßen Auge Ähnlichkeit mit der Erde bescheinigen. Der Erdtrabant hatte offensichtlich Kugelgestalt; schon im Altertum hielt man die dunklen Flecken auf seiner Oberfläche für Meere. Ob die eigentlichen Planeten, also Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn, die ja jetzt den gleichen »Status« wie die Erde hatten, auch äußerlich unserem Planeten glichen, war zu Kopernikus' Zeiten noch nicht zu ermitteln. Erst die Erfindung des Fernrohrs brachte diese Frage einer Antwort näher.

Als der italienische Physiker Galileo Galilei im Jahre 1609 zum ersten Male das Fernrohr zur Betrachtung von



Die Marskarte von Schiaparelli zeigt zahlreiche Kanäle, die dieser Astronom seit 1877 auf dem »roten Planeten« beobachtete.

Himmelskörpern benutzte, begann die erste Etappe der Planetenforschung. Galilei fand Gebirge auf dem Mond, stellte fest, daß die Venus wie der Mond Phasen zeigt, also ebenfalls Kugelgestalt besitzt, und entdeckte, daß Jupiter von vier Satelliten umlaufen wird. Unter Galileis Nachfolgern wurde das Fernrohr zum wichtigsten Instrument der Astronomen. Den Planetenbeobachtern des 17. Jh. gelang damit eine spektakuläre Entdeckung nach der anderen. Immer deutlicher zeichnete sich die Tatsache ab: Einige Planeten sind »Geschwister« der Erde.

Besonders aufregende Entdeckungen zeitigte die Areographie, die Marsbeschreibung. Der Mars weist die gleiche Tageslänge und analoge Jahreszeiten wie die Erde auf und besitzt helle, jahreszeitlich veränderliche Polkappen. Die gleichfalls im Takte der Jahreszeiten erfolgenden Veränderungen seiner dunklen Gebiete führte man bereits im 18. Jh. auf eine Vegetation zurück, und nach der Entdeckung der »Marskanäle« im Jahre 1877 glaubte man sogar, der »rote Planet« sei von vernunftbegabten Wesen bewohnt.

Neben den »Geschwistern« der Erde wurde man aber im 17. Jh. auch auf völlig andersartige Planeten auf-

merksam, die man, um bei dem gewählten Vergleich zu bleiben, bestenfalls »Stiefgeschwister« der Erde nennen könnte. Das gilt besonders für die Riesenplaneten Jupiter und Saturn, die viel schneller rotieren und stärker abgeplattet sind als die Erde. Dem Beobachter am Fernrohr bietet sich keine Planetenoberfläche mit vertrauten Phänomenen dar, sondern eine gestreifte, farbig getönte Wolkenlandschaft mit zahlreichen veränderlichen Details. Um diese Planeten kreisen zahlreiche Monde, die eine Art »Planetensystem« im Kleinen bilden.

Zwar wurden die Teleskope ständig vervollkommnet, die Beobachter erfaßten demzufolge immer mehr Details und konnten immer bessere Planetenkarten zeichnen, aber die großen Entfernungen der Planeten und die Störungen der Erdatmosphäre setzten dennoch der Planetographie, der wissenschaftlichen Planetenbeschreibung, eine natürliche Grenze. Hinzu kam, daß man manchem Planeten, z. B. der Venus, wegen der dichten Wolkendecke mit planetographischen Mitteln einfach nicht beikommen konnte. Es war daher außerordentlich bedeutungsvoll, daß sich durch die im 19. Jh. aufkommende Astrophysik neuartige Wege in der Planetenforschung anbahnten, die die zweite Etappe kennzeichneten.

Jetzt ging man dazu über, das an der Planetenoberfläche oder der Wolkendecke reflektierte Sonnenlicht einer eingehenden physikalischen Prüfung zu unterziehen. Intensität, Farbe, spektrale Zusammensetzung und Polarisationszustand wurden möglichst genau gemessen, um daraus Schlüsse auf die Beschaffenheit des Planetengesteins, der Wolken und des atmosphärischen Gases zu ziehen.

In unserem Jahrhundert lieferte vor allem die Spektralanalyse des von den Planeten reflektierten Lichts aufschlußreiche Ergebnisse. So wurde 1932 in der Venusatmosphäre und 1947 auf dem Mars Kohlendioxid (CO_2) nachgewiesen. In den dreißiger Jahren fand man in den Spektren von Jupiter und Saturn die Banden von Methan (CH_4) und Ammoniak (NH_3); später wurde Methan auch auf Uranus, Neptun und dem Saturnmond Titan gefunden. Der Nachweis von Chlor- und Fluorwasserstoff (HCl , HF) unterstrich in den sechziger

Jahren die exotische Beschaffenheit der »Venusluft«. Die Ausdehnung der spektralen Untersuchungen in den Bereich der Infrarotstrahlung und der Mikrowellen brachte in den siebziger Jahren zahlreiche Entdeckungen ein, z. B. die von Äthan (C_2H_6) auf dem Jupiter, dem Saturn und dem Neptun, die von Phosphin (PH_3) auf den beiden Riesenplaneten, die von Methan auf dem Neptunmond Triton und die von Methanschnee an der Plutooberfläche.

Infrarot- und Mikrowellenstrahlung lieferten auch Aufschlüsse über Oberflächen- und Wolkentemperaturen der Planeten. Bereits in den zwanziger Jahren wurden erste Temperaturwerte für den Mars und den Merkur und für die Venuswolken abgeleitet. Auf radioastronomischem Wege erhielt man 1956 erste Anzeichen für eine glühend heiße Venusoberfläche. Etwa zur gleichen Zeit wurden Radioastronomen auf die starke Strahlung der Jupitermagnetosphäre aufmerksam. Sehr überraschend kam in den siebziger Jahren die Entdeckung, daß Jupiter, Saturn und Neptun rund doppelt soviel Energie im Infraroten abstrahlen, wie sie in Form von Sonnenlicht empfangen.

Ein neuer Forschungszweig, die Radarastronomie, der die Planeten mit Radarstrahlen »abtastet«, gestattete es, die Rotationsdauer von Venus und Merkur zu bestimmen und erste Aufschlüsse über die geheimnisumwitterte Venustopographie zu erlangen, die wegen der dichten Wolkendecke mit anderen astronomischen Mitteln nicht erforschbar ist.

Die zweite Etappe der Planetenforschung hat vielen romantischen Spekulationen aus dem Zeitalter der Planetographie den Nährboden entzogen, aber auch viele neue Fragen aufgeworfen, die nur durch Forschungen an Ort und Stelle geklärt werden können. Bei einigen Himmelskörpern hat diese direkte Erkundung mit den Mitteln und Methoden der Raumfahrt, also die dritte Etappe der Planetenforschung, die aus dem Bereich der Astronomie hinausführt, bereits begonnen.

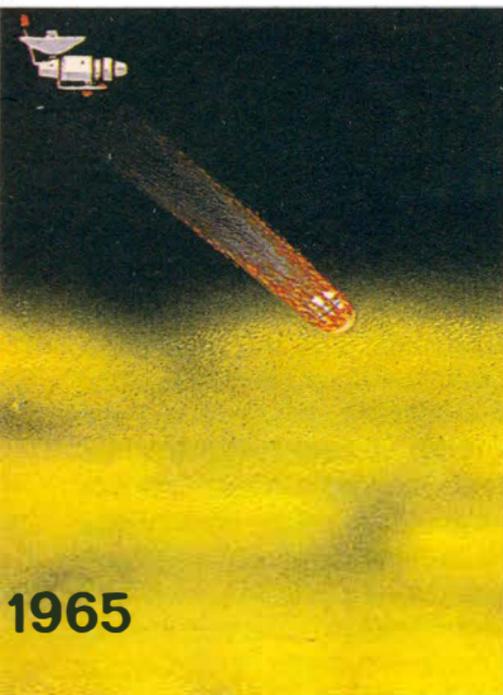
Die Planeten rücken näher

Nachdem in den ersten fünf Jahren des Raumflugzeitalters, das 1957 mit dem Start des ersten Sputniks durch die Sowjetunion eröffnet wurde, genügend flug- und gerätetechnische Erfahrungen gesammelt worden waren, konnte man in den sechziger Jahren an die Realisierung von Planetenflügen denken. Zunächst ging es darum, Sonden mit geeigneten Meßgeräten möglichst nahe an die Nachbarplaneten heranzubringen und mit ihnen von der Erde aus nicht gewinnbare Informationen zu sammeln. Erstmals glückte eine solche Planetenpassage mit funktionsfähigen Meßgeräten im Jahre 1962, als die Sonde »Mariner 2« im Abstand von 35000 km an der Venus vorbeiflog. Die Meßergebnisse dieser Sonde bewiesen eindeutig, daß die Venusoberfläche glühend heiß ist und eine Temperatur um 450 °C aufweist.

Fünf Jahre später gelang es erstmals, eine Meßsonde in die Atmosphäre eines anderen Planeten zu bringen. Die Sonde »Venus 4« (»Wenera 4«) maß 1967 Temperatur, Druck und chemische Zusammensetzung der Venusatmosphäre unterhalb der Wolkendecke. Sie und ihre erfolgreichen Nachfolgerinnen vermittelten uns die überraschende Erkenntnis, daß die heiße »Venusluft« zu rund 97 Volumenprozent aus Kohlendioxid besteht, äußerst trocken ist und einen Bodendruck von etwa 10 Millionen Pa aufweist. Der Schleier der rätselhaften Venus war etwas gelüftet worden.

Ein neuer Abschnitt der Venusforschung begann 1975 durch neuartige, aus einem Satelliten und einer Landeinheit bestehende »Wenera«-Sonden. Ihnen gelang eine astronautische Spitzenleistung, nämlich die Übertragung von Bildern des glühenden Venusbodens.

Im Jahre 1978 war die Venus Schauplatz eines Komplexeinsatzes sowjetischer und amerikanischer Raumflugtechnik. Innerhalb eines Monats gingen sieben Sonden (Komponenten von »Venus 11« und »Venus 12« und der Multisonde »Pioneer-Venus 2«) auf der Venus nieder, zwei weitere (Komponenten von »Venus 11« und »Venus 12«) passierten sie, und eine (»Pioneer-Venus 1«) wurde zu einem Satelliten, der mit Hilfe sei-



1965

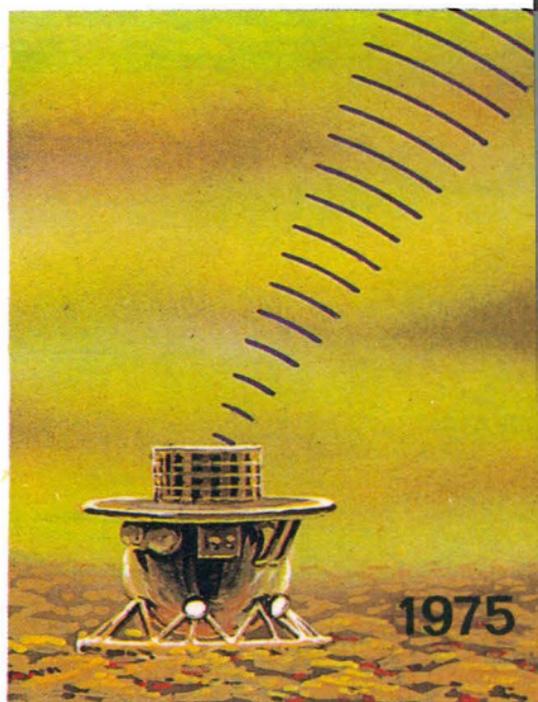
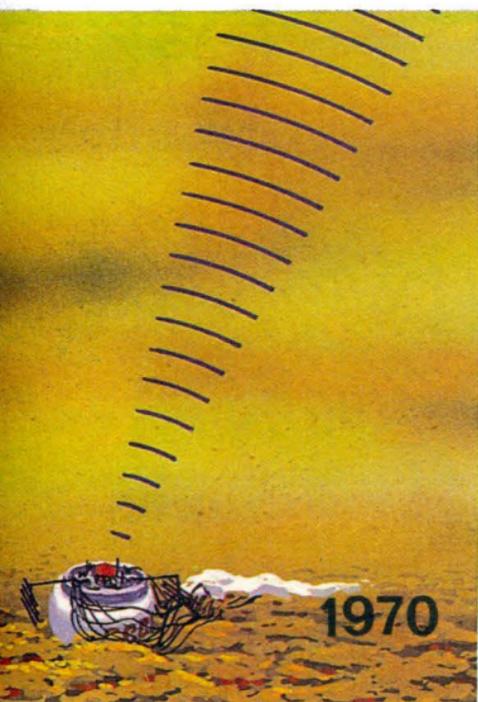


1967

Die sowjetische Venusoffensive. Von 1965 bis 1982 wurden in fast jedem Startfenster zur Venus Sonden des Typs »Wenera« (»Venus«) gestartet. »Venus 2« und »Venus 3« brachten 1965 erstmals Landekapseln in die Venusatmosphäre, von denen aber keine Daten gewonnen werden konnten. »Venus 4« ermittelte 1967 beim Durchflug der Atmosphäre sensationelle Meßwerte. Die erste Landung eines funktionsfähigen Gerätes auf dem Venusboden gelang 1970 durch »Venus 7«. Die komplexe Erforschung der unteren Atmosphäre und des Bodens begann 1975, als mit »Venus 9« und »Venus 10« das erste Paar einer neuen Generation weit leistungsfähigerer Sonden zum Einsatz kam. Diesen beiden Sonden und »Venus 13« und »Venus 14« (1982) gelang unter anderem die Übermittlung von Aufnahmen des glühenden Venusbodens.

ner Radar-Höhenmeßanlage die erste genaue Venuskarte erbrachte.

Faszinierende Ergebnisse wurden auch in der Marsforschung erzielt. Die Fernerkundung dieses Planeten begann mit dem Vorbeiflug der Sonde »Mariner 4«, die 1965 die ersten Nahaufnahmen des »roten Planeten«



übertrag. Der Marsatellit »Mariner 9« überdeckte 1971/72 den Planeten vollständig mit fotografischen Aufnahmen und ermöglichte damit die Herstellung der ersten genauen Marskarte. Mit den »Mariner«-Sonden und den seit 1971 operierenden sowjetischen Sonden des Typs »Mars« wurden auch zahlreiche Erkenntnisse über die Marsatmosphäre gewonnen.

Nachdem bereits 1971 und 1974 Landesektionen von Sonden des Typs »Mars« in die untere Atmosphäre unseres Nachbarplaneten vorgedrungen waren, setzte 1976 die komplexe Erforschung der Marsoberfläche ein. Die Landeeinheiten der »Viking«-Sonden lieferten farbige Bilder von den Landeorten, übertrugen meteorologische Daten, registrierten Marsbeben, analysierten den Marsboden und nahmen die direkte Suche nach Mikroorganismen auf.

Auch bei den weiter entfernten und darum raumflugtechnisch schwieriger zu erreichenden Planeten ist die dritte Etappe der Planetenforschung bereits angelaufen. So weiß man durch die Fernsehbilder der Venus-Mer-



Das erste Farbbild der Venusoberfläche. Es wurde aus Filteraufnahmen in den Farbbereichen Blau, Grün und Rot, die von der Sonde »Venus 13« am 1. März 1982 gewonnen wurden, rekonstruiert. Das rötlichbraune Oberflächengestein ist vulkanischen Ursprungs und von der Zusammensetzung der Basalte.

kur-Sonde »Mariner 10« von 1974, daß die Oberfläche des Merkurs der des Erdmondes ähnelt. In den Jahren 1973 und 1974 wurde der im günstigsten Falle 600 Mill. km von uns entfernte Jupiter von den Sonden »Pioneer 10« und »Pioneer 11« angefliegen. Messungen innerhalb der ausgedehnten Magnetosphäre und im Strahlungsgürtel des Riesenplaneten sowie Bilder seiner Wolkendecke und seiner Monde gehörten zur Ausbeute dieser Missionen. »Pioneer 11« flog so am Jupiter vorbei, daß die Sonde stark beschleunigt und zum Saturn »katapultiert« wurde, den sie 1979 passierte.

Den Aufklärungsflügen der »Pioneers« folgten die Missionen der außerordentlich leistungsfähigen »Voyager«-Sonden, die von 1979 bis 1981 ein komplexes Forschungsprogramm am Jupiter und am Saturn und in ihren Satellitensystemen absolvierten. Eine Fülle von z. T. völlig überraschenden Erkenntnissen über die Atmosphären und Magnetosphären der beiden Riesenplaneten, über die geologische Beschaffenheit ihrer großen



Monde und über die Feinstruktur des Saturnringes waren Frucht der Flüge von »Voyager 1« und »Voyager 2«. Ausgesprochene Sensationen stellten die Entdeckungen dar, daß der Jupitermond Io der vulkanisch aktivste Himmelskörper des Sonnensystems ist und daß der Saturnmond Titan eine dichte Stickstoffatmosphäre besitzt. Die Sonde »Voyager 2« soll 1986 noch dem Uranus und seinen Monden einen Besuch abstatten.

In weniger als 20 Jahren haben die Mond-, Venus-, Mars- und Merkursonden sowie die Raumfluggeräte, die die Riesenplaneten Jupiter und Saturn sowie ihre großen Monde Io, Europa, Ganymed, Kallisto, Mimas, Enceladus, Tethys, Dione, Rhea, Titan, Hyperion und Japetus erkundeten, weit mehr an gesicherten Fakten gesammelt als die Astronomen in den vergangenen 370 Jahren intensiver Arbeit am Fernrohr. Mit dieser Feststellung wollen wir keineswegs die Leistungen der astronomischen Planetenforschung schmälern, sondern nur die ungeheure Effektivität der raumfahrttechnischen Methoden unterstreichen, die, auf den astronomischen Erkenntnissen über die Planeten aufbauend, zu einer regelrechten Wissensexplosion über das Planetensystem führten.

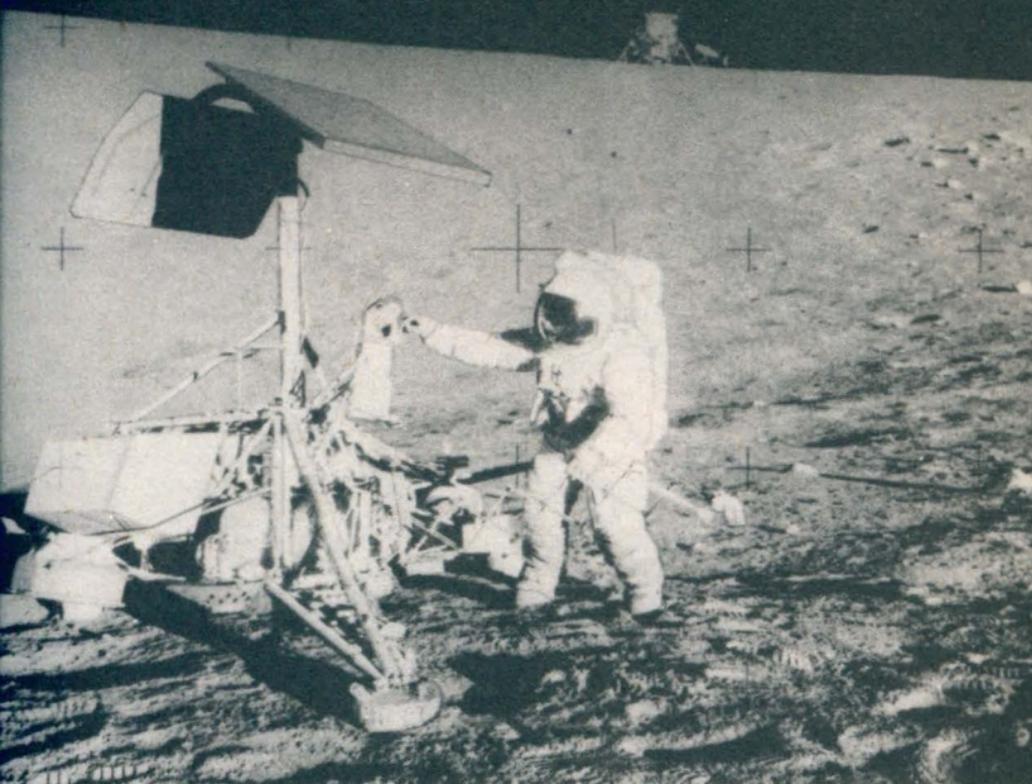
Planetengeologie, Planetengeophysik, Planetenmeteorologie

Das qualitativ Neue der modernen Planetenforschung besteht darin, daß zusätzlich zu den astronomischen Beobachtungen und den astrophysikalischen Messungen direkte Forschungsmethoden aus anderen Zweigen der Naturwissenschaft zum Einsatz kommen. Machen wir uns diesen Sachverhalt am Erdmond klar. Er ist zwar kein Planet, aber der uns am nächsten stehende Himmelskörper von planetarischen Dimensionen, für dessen Erforschung erstmalig andere als astronomische Methoden angewandt wurden.

Seitdem es (ab 1966) Mondsatelliten, die mit Fernsehkameras und Bildübertragungssystemen bestückt sind, und auf dem natürlichen Erdtrabanten arbeitende Roboter mit vielseitigem Forschungsprogramm gibt, wurden Einzelheiten auf diesem Himmelskörper bis zur Größe weniger Zentimeter sichtbar sowie eine Fülle von Daten über den Mondboden bekannt. Ausgewertet wurden diese Fakten von Geologen. Die Methoden der Geologie, die zur Erforschung der Erdoberfläche entwickelt worden waren, wurden in abgewandelter Form auf den Mond übertragen, so daß man heute von einer »Mondgeologie« spricht. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang die Tatsache, daß auf dem Erdtrabanten bereits ausgebildete Geologen bzw. geologisch geschulte Astronauten tätig waren und dabei im Prinzip genauso vorgingen, wie es die geologische Geländeerkundung auf der Erde erfordert.

Das zur Erde gebrachte Mondgestein wurde im Labor mit den Forschungsmethoden der Geochemiker, Mineralogen und Petrographen untersucht. Die auf dem Mond installierten Meßstationen registrierten Mondbeben, maßen Temperaturen, wiesen Magnetfelder nach und spürten winzige Gasmengen auf.

Auch von den Mondsatelliten kommen zahlreiche physikalische Daten, z. B. über die Massenverteilung im Mondinnern, über Magnetfelder, über verschiedene vom Mondgestein ausgehende Strahlungen. Alle diese Daten werden von Geophysikern bearbeitet, die mit ihren bei



Mensch und Automat auf dem Mond. Im Jahre 1969 inspizierte der Astronaut Conrad während der Mondexpedition »Apollo 12« den zwei Jahre vorher auf dem Erdtrabanten abgesetzten Roboter »Surveyor 3«.

der Erforschung der Erde bewährten Methoden die physikalische Beschaffenheit des Mondes ergründen. So gibt es also heute neben der Mondgeologie auch eine Mondgeophysik.

Bei den ungleich weiter entfernten Planeten ist diese Entwicklung noch nicht so weit fortgeschritten wie beim Mond, den bereits wissenschaftliche Expeditionen betreten haben. Aber im Prinzip ist der analoge Weg bereits angebahnt. So gibt es heute schon Geologen, die sich auf den Mars, die Venus oder den Merkur – neuerdings sogar auf die Jupiter- und Saturnsatelliten – spezialisiert haben. Die umfangreichen geologischen Erfahrungen, die auf dem Wege der Fernerkundung von den Oberflächen der Planeten und Monde gesammelt wurden, tra-



Jupiter und die Galileischen Monde Io, Europa, Ganymed und Kallisto. Das Bild ist eine Montage aus Aufnahmen der Sonde »Voyager 1«.

gen zweifellos zum Aufbau einer allgemeinen Wissenschaft von der Entwicklung von Planetenoberflächen bei, die wir hier einfach »Planetengeologie« nennen wollen. Auf ähnliche Weise führen die mit geophysikalischen Methoden gewonnenen Erkenntnisse über andere Himmelskörper dazu, daß auch die Geophysik »kosmische Ableger« erhält. Analog zur Wortbildung »Planetengeologie« werden wir in dieser Hinsicht von »Planetengeophysik« sprechen. Die Reihe dieser Planetenwissenschaften läßt sich sogar noch fortsetzen: So werden z. B. heute schon Bücher über »Planetenmeteorologie« geschrieben, in denen sich die neuen Erkenntnisse über die Vorgänge in den Troposphären von Venus, Mars, Ju-

piter, Saturn und Titan niederschlagen. Wenn auch die Bezeichnungen für diese neuen Fachgebiete noch nicht einheitlich sind, unverkennbar ist, daß die Erdwissenschaften eine kosmische Dimension erhalten haben.

Drängt sich hier nicht die Frage auf, wozu eine derartige Intensivierung der Planetenforschung erforderlich ist? Selbst kleine Planetensonden sind außerordentlich teuer. Sicherlich, die Erkundung fremder Welten ist eine aufregende Sache. Aber lohnt sie den Einsatz so gewaltiger Mittel? Es steht doch außer Zweifel, daß die Menschheit in absehbarer Zeit keinen anderen Planeten besiedeln wird, um das Bevölkerungsproblem auf der Erde zu lösen. Vorerst werden auch keine Rohstoffe vom Mars oder von der Venus herangeschafft werden, weil die Erschließungs- und Transportkosten unerschwinglich hoch sein würden. Wäre es daher nicht besser, alle Kräfte auf die Erkundung und Erschließung der Erde zu konzentrieren?

Genau hier liegt aber das Problem! Wir kennen nämlich unseren Planeten noch nicht sehr gut. Wir wissen über seine Entstehung so gut wie nichts und über seine Frühgeschichte kaum etwas. Welche geologischen Prozesse auf der Uerde abliefen, woraus die erste Kruste bestand, wie sich der eiserne Erdkern bildete, welche Vorgänge in der Uratmosphäre stattfanden, wodurch es zur Entstehung des Lebens kam, wann die Kontinente zu driften begannen, all das sind Fragen, auf die es noch keine sicheren Antworten gibt. Auch über die Gesetzmäßigkeiten, nach denen sich ein Planet entwickelt, ist wenig bekannt. Es wäre z. B. sehr interessant, den genauen Mechanismus des Wechsels zwischen Kalt- und Warmzeiten auf der Erde zu kennen. Zur Beantwortung dieser und vieler anderer Fragen benötigt man jenes Grundwissen über Planeten, das die Planetenwissenschaften bereitstellen. Aus diesem Grunde ist die moderne Planetenforschung kein wissenschaftlicher Luxus. Wenn heute die Aktivitäten des Menschen im Weltraum unter dem Motto »Raumfahrt für die Erde« gesehen werden, dann gilt das im übertragenen Sinne auch für die Planetenforschung, die dazu beiträgt, das Wohl der künftigen Menschheit zu sichern.

Die Erde und ihre Geschwister

Der Aufbau des Planeteninnern

Gemeinsamkeiten der erdartigen Planeten. Die der Sonne am nächsten stehenden Planeten, Merkur, Venus, Erde und Mars, besitzen interessante Gemeinsamkeiten. Ihre Massen sind relativ klein. Sie liegen – in Einheiten der Masse unseres Planeten ausgedrückt – zwischen 0,05 und 1. Die mittlere Dichte, also der Quotient aus Masse und Volumen, variiert bei Merkur, Venus und Erde innerhalb der engen Grenzen von 5,2 bis 5,5 g/cm³; nur der Mars fällt mit 4 g/cm³ etwas dagegen ab. Da man bei diesen Planeten sicher sein kann, daß ihre oberflächennahen Schichten aus Silikatgestein bestehen, dessen Dichte kaum größer als 3 g/cm³ sein dürfte, muß man tief im Innern sehr viel schwereres Material erwarten. Nach den Vorstellungen der Geophysiker besitzt die Erde einen Kern aus Eisen bzw. einer Eisenlegierung. Da Eisen im Kosmos genauso häufig auftritt wie das für Silikate notwendige Silizium, ist diese auf den ersten Blick etwas ungewöhnlich wirkende Zusammensetzung des Erdinnern unter kosmochemischen Gesichtspunkten ganz plausibel. Grundsätzlich spricht daher nichts dagegen, sich auch Merkur, Venus und Mars analog aufgebaut vorzustellen.

Himmelskörper, die aus Silikatgestein bestehen und vielleicht sogar einen Eisenkern enthalten, in denen also Elemente wie Silizium, Magnesium, Eisen, Aluminium, Kalzium, Nickel, Schwefel u. a. die entscheidende Rolle spielen, nennen wir »erdartig«.

In den folgenden Kapiteln werden wir uns mit den

physikalischen und planetologischen Besonderheiten der erdartigen Planeten näher bekannt machen. Unsere Betrachtungen gelten zunächst den Planetenkörpern, in denen fast die gesamte Masse eines solchen Himmelskörpers konzentriert ist, d. h., wir studieren den inneren Aufbau, die »Anatomie« der erdartigen Planeten. Danach werden uns Aussehen und Beschaffenheit der Oberflächen, der »Planetengesichter«, interessieren, die ja entscheidend vom Planeteninnern her geprägt wurden. Schließlich studieren wir die Atmosphären und Magnetosphären, die ihren Ursprung gleichfalls im Planeteninnern haben. Wir lösen uns damit bewußt von dem einseitigen, planetographisch orientierten Vorgehen im populärwissenschaftlichen Schrifttum der Vergangenheit. Die zahlreichen Daten über die einzelnen Planeten, sozusagen die »Steckbriefe« dieser Himmelskörper, findet der interessierte Leser im Brockhaus ABC Astronomie, 7. Auflage, Leipzig 1982, oder in der Cambridge-Enzyklopädie der Astronomie, Leipzig 1978.

Ein Blick ins Erdinnere. Das Material, aus dem unsere Erde besteht, ist für uns der Inbegriff des Stoffes überhaupt. Der Mensch verdankt dem Material der Erde seine Existenz, es dient ihm zur Produktion lebensnotwendiger Güter, er »erzeugt« daraus Energie; zur Untersuchung dieses Materials rief er zahlreiche naturwissenschaftliche Disziplinen ins Leben. Es klingt daher unglaublich, wenn wir jetzt die Feststellung treffen, daß die Kenntnis der genauen stofflichen Beschaffenheit unseres Planeten ein noch ungelöstes wissenschaftliches Problem ist.

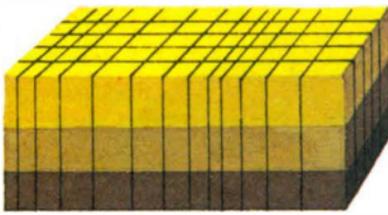
Eine einfache technische Überlegung macht diesen Umstand jedoch sofort plausibel. Es ist heute kein prinzipielles Problem mehr, zu ergründen, welche Bedingungen in der Hochatmosphäre, sagen wir in 2000 km Höhe, herrschen. Man braucht schließlich nur eine Meßsonde dorthin zu schicken. Es ist aber außerordentlich problematisch, auf einem ähnlichen Wege herauszubekommen, wie es beispielsweise in nur 20 km Tiefe aussieht. Um dorthin eine Meßsonde zu bringen, müßten wir nämlich 20 km tief bohren können; das ist aber be-

kanntlich vorerst noch nicht realisierbar. Direkt zugänglich ist uns nur eine »dünne Haut«. Es sind die oberen Schichten der Erdkruste, deren Mächtigkeit, gemessen am Erdradius, winzig ist. Über das darunterliegende Material gibt es nur theoretische Vorstellungen.

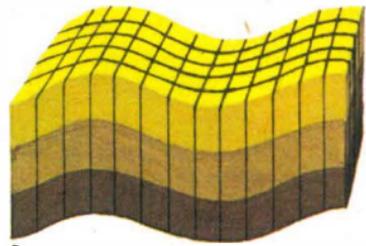
Die Geophysiker haben trotzdem Mittel und Wege gefunden, um in das Erdinnere »schauen« zu können. Die Möglichkeit dazu bot die Natur selbst an, freilich auf recht drastische Art, nämlich durch die als Naturkatastrophe von den Menschen sehr gefürchteten Erdbeben. Erdbeben kommen zustande, wenn sich irgendwo in der Erde aufgestaute mechanische Spannungen plötzlich entladen und sich in Form elastischer Wellen im Erdkörper und längs seiner Oberfläche fortpflanzen. Über einem solchen Bebenherd vibriert die Erdkruste am stärksten im Takte der sich ausbreitenden Schwingungen; Zerstörungen großen Ausmaßes können die Folge davon sein.

Mit speziellen Meßgeräten, den Seismographen, können die Erdbebenwellen auch in großen Entfernungen vom Bebenherd verfolgt werden. Ein weltweites Netz von Erdbebenwarten ermöglicht, da man die physikalischen Eigenschaften dieser für Festkörper und Flüssigkeiten typischen Wellen kennt, die genaue Lokalisierung des Bebenherdes im Erdkörper. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Dichte und der chemischen Zusammensetzung des Materials, das die seismischen Wellen passieren, abhängt, kann man auch Aussagen über die Beschaffenheit des Erdinnern gewinnen. Wie die Astronomen aus den elektromagnetischen Wellen, die aus dem Kosmos zu uns kommen, den Aufbau der Welt im Großen »herauslesen«, so erkunden die Geophysiker mit Hilfe der seismischen Wellen das Erdinnere. Im Gegensatz zu den Astronomen können sie sogar in bescheidenem Umfang mit ihrem Forschungsgegenstand, der Erde, experimentieren. Sie können beispielsweise kleine Beben genau bekannter Stärke durch Sprengungen auslösen und die Ausbreitung der seismischen Wellen studieren.

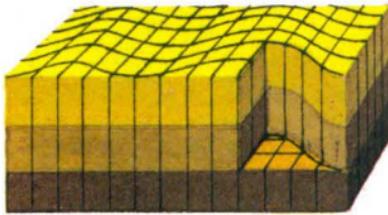
Hauptsächliches Ergebnis der geophysikalischen Erforschung des Erdinnern ist, daß die Erde aus verschie-



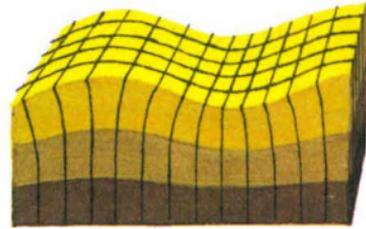
a



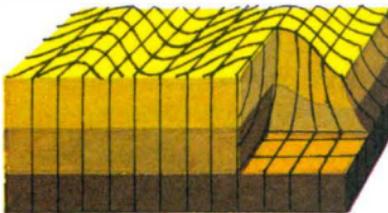
b



c



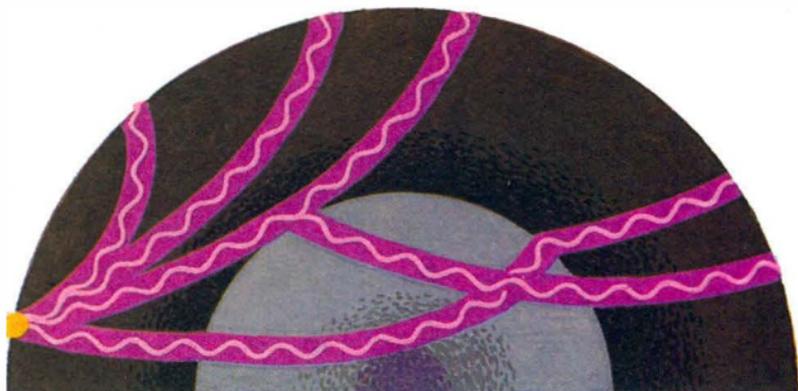
d



e

Die verschiedenen Arten von Erdbebenwellen. Bei den Kompressionswellen (a) durchlaufen Verdichtungen und Verdünnungen das Material. Bei den Scherwellen schwingt das Material senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Die Schwingungen können dabei vertikal (b) oder horizontal (c) erfolgen. Bei den Oberflächenwellen, die sich im Gegensatz zu den Kompressions- und Scherwellen nur längs der Erdoberfläche ausbreiten, unterscheidet man die an Wasserwellen erinnernden Rayleigh-Wellen (d) und die querschwingenden Love-Wellen (e).

denen Schalen besteht. Die äußerste Schale ist die Erdkruste, die zuoberst aus Sedimentgesteinen, also den abgelagerten und zu Gestein verfestigten Verwitterungsprodukten aus vergangenen Erdzeitaltern, darunter aus Gesteinen granitischer Zusammensetzung und schließlich aus Basalt besteht. Unter den Ozeanen fehlt die Granitschicht. Die untere Begrenzung der Erdkruste ist



Die Ausbreitung seismischer Wellen im Erdinnern. Die Laufzeit der Wellen zwischen dem Bebenzentrum und irgendeinem Punkt der Erdoberfläche hängt von der Länge des im Erdinnern zurückgelegten Weges und von den Eigenschaften des durchqueren Materials ab. An den Grenzflächen der einzelnen Schalen treten Reflexionen und Brechungen auf.

seismologisch einwandfrei nachweisbar, weil sich die Eigenschaften des Gesteins hier sprunghaft ändern und damit die Geschwindigkeit elastischer Wellen eine deutliche Änderung erfährt. Man spricht von der Mohorovičić-Diskontinuität, benannt nach dem jugoslawischen Geophysiker S. Mohorovičić. Unter den Ozeanen tritt diese Trennfläche in rund zehn Kilometer Tiefe auf, während sie unter den Kontinenten im Durchschnitt 30 bis 40 km tief liegt.

Unterhalb der Mohorovičić-Diskontinuität beginnt der aus verschiedenen Schalen bestehende Erdmantel, der aus schwerem Gestein zusammengesetzt ist. Wegen des Druckanstieges mit wachsender Tiefe sind die Kristallgitter der Minerale bedeutend dichter »gepackt« als beim Gestein an der Erdoberfläche. Um die physikalischen Eigenschaften des Mantelgesteins kennenzulernen, z. B. den Zusammenhang zwischen Druck und Dichte, die sogenannte Zustandsgleichung, oder die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der zwei verschiedenen Arten elastischer Wellen, der Kompressions- und der Scherungswellen, oder auch das Wärmeleitvermögen, setzt man verschiedene Materialien hohen Drücken aus und mißt die entsprechenden Eigenschaften. Fort-

schritte beim Verständnis des Erdinnern sind somit eng mit Fortschritten auf dem Gebiet der Hochdruckphysik gekoppelt.

Auf eine Besonderheit, die gelegentlich Anlaß zu Mißverständnissen gibt, wenn man das Verhalten von Stoffen unter hohem Druck noch nicht genügend kennt, müssen wir noch hinweisen. Der Erdmantel besteht zwar aus kristallinem Material, das eindeutig dem festen Aggregatzustand angehört. Die Ausbreitung von Scherungswellen, die sich in Flüssigkeiten nicht fortpflanzen können, unterstreicht das. Trotzdem besitzt dieses Material einen gewissen Grad an Plastizität. Unter dem hohen Druck ähnelt sein mechanisches Verhalten dem einer äußerst zähen Flüssigkeit, in der sogar (allerdings extrem träge) Strömungen auftreten können.

In 2900 km Tiefe springt die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Kompressionswellen von 14 auf 8 km/s, während die der Scherungswellen sprunghaft von 7 auf 0 km/s fällt. Diese berühmte Gutenberg-Wiechert-Diskontinuität, von dem Begründer der Erdbebenforschung E. Wiechert und dem Geophysiker B. Gutenberg als Grenzfläche erkannt, markiert den Beginn des Erdkerns, der überwiegend aus metallischem Eisen besteht und in seinem äußeren Teil flüssig ist. Eine weniger drastische Diskontinuität in 5100 km Tiefe belehrt die Geophysiker, daß ab hier ein fester Erdkern vorliegt.

Neben der Erdbebenforschung, der Seismologie, gibt es noch andere Arbeitsgebiete der Geophysik, die das Erdinnere erkunden und verstehen helfen, z. B. das Studium des thermischen Verhaltens. Bei Bohrungen und im Bergbau läßt sich leicht feststellen, daß die Temperatur mit der Tiefe zunimmt. Theoretische Berechnungen machen wahrscheinlich, daß im Erdzentrum eine Temperatur herrscht, die man mit der der Sonnenoberfläche vergleichen kann. »Geheizt« wird unser Planet in seinem Innern hauptsächlich durch den Zerfall radioaktiver Isotope bestimmter chemischer Elemente, z. B. Uran und Thorium. Die Geophysiker vergleichen die Erde deshalb häufig mit einer Wärmekraftmaschine. Welche Arbeit diese »Maschine« leistet, werden wir ausführlich kennenlernen.

Die durch den Erdkörper nach außen strömende Wärme verursacht interessante Vorgänge. Sie bringt die elektrisch gut leitende Flüssigkeit des äußeren Erdkerns zum Zirkulieren. Die Zirkulation in Wechselwirkung mit der Erdrotation hält übrigens das Magnetfeld unseres Planeten aufrecht. Somit trägt auch die Untersuchung des irdischen Magnetfeldes, die einen weiteren Zweig der Geophysik bildet, zum Verständnis des Erdinnern bei.

Planetenmodelle oder Modellplaneten? Der geophysikalische »Streifzug« des vorangegangenen Abschnitts machte deutlich, daß über den Aufbau des Erdinnern schon eine ganze Reihe gesicherter Tatsachen vorliegt. Die Modellerde, die aus diesen Fakten resultiert und unser heutiges Bild vom Erdinnern darstellt, ist also mehr als ein bloßes Erdmodell; wir können nämlich sicher sein, daß sie mit der realen Erde schon viele Gemeinsamkeiten hat.

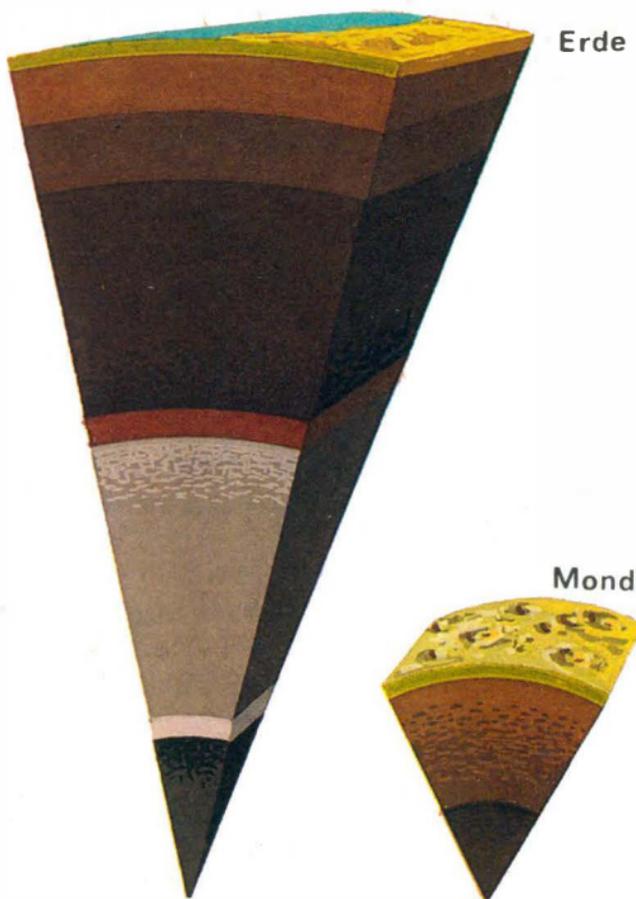
Bei den anderen erdartigen Planeten ist die Lage anders. Ausgehend von den Erfahrungen mit dem Erdinnern und den Kenntnissen über das physikalische Verhalten von kondensierter Materie unter hohem Druck, können wir von Merkur, Venus und Mars zwar Modelle entwerfen, die mit den wenigen Beobachtungsgrößen dieser Planeten, z. B. mit Masse, Radius und mittlerer Dichte, in Einklang stehen. Wir können aber noch nicht testen, ob die Dinge im Innern dieser Planeten tatsächlich so liegen, wie es die Modelle vorschreiben. Für jeden dieser Himmelskörper lassen sich nämlich eine Menge Planetenmodelle angeben, ohne daß man sagen kann, welches davon der Realität am nächsten kommt und damit die Rolle des Modellplaneten übernimmt.

Der erste Himmelskörper, bei dem die Forschung schon etwas klarer sieht, ist der Erdmond. Formal ist er natürlich kein Planet, aber seine Größe ist durchaus »planetarisch« (der Pluto ist etwa von gleicher Größe!) und seine chemische Zusammensetzung sogar »erdartig«. An seiner Oberfläche arbeiteten bereits über einen Zeitraum von mehr als 6 Jahren hinweg kontinuierlich Seismometer, Magnetometer, Wärmeflußmeßgeräte

u. a. m. Vor allem durch künstliche Mondbeben, die durch den Aufprall von Raketenendstufen und nicht mehr benötigten Landefähren des »Apollo«-Mondflugprogramms ausgelöst wurden, gelang es, die Ausbreitung seismischer Wellen durch das Mondinnere zu verfolgen und damit den inneren Aufbau dieses Himmelskörpers zu studieren. Nach diesen Forschungsergebnissen ist die Mondkruste auf der Vorderseite etwa 60 km und auf der Rückseite fast doppelt so dick. Bis in rund 1000 km Tiefe reicht der starre Mondmantel aus schwerem Silikatgestein, der den etwa 1200°C heißen Mondkern aus teilweise aufgeschmolzenen Silikaten umgibt. Wegen seiner geringen mittleren Dichte von etwa 3,3 g/cm³ kann der Mond keinen ausgedehnten Eisenkern besitzen.

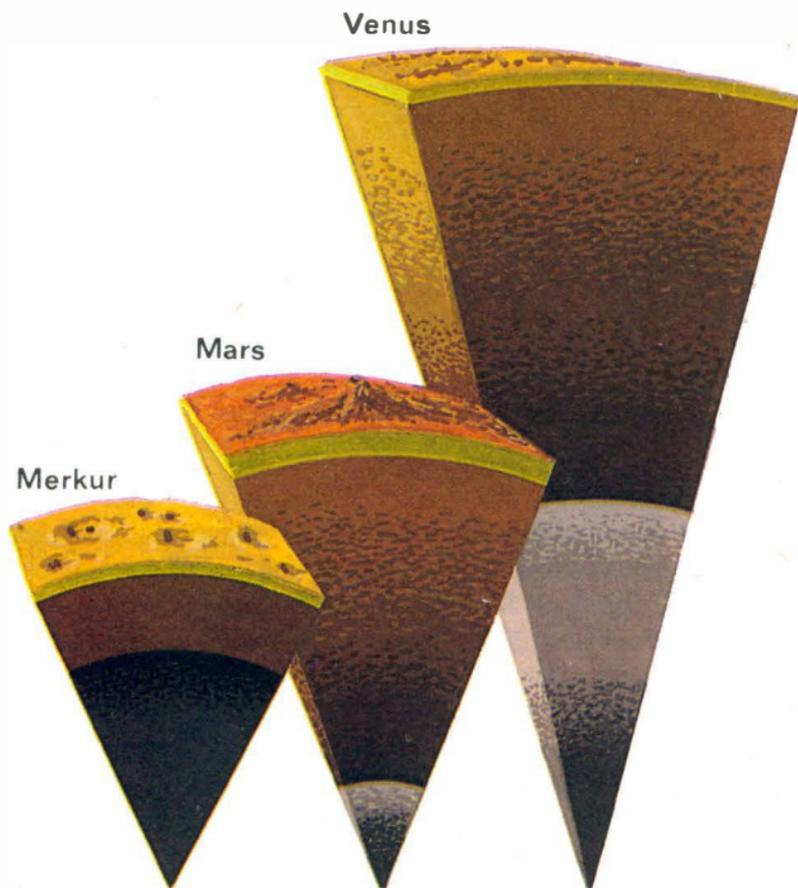
Die moderne Mondforschung hat Gewißheit darüber geschaffen, daß auch der natürliche Erdbegleiter Schalen Aufbau besitzt. Er hat also ähnlich wie die Erde nach der Entstehung eine Phase der magmatischen Differenzierung – wie es im geophysikalischen Fachjargon heißt – durchlaufen, d. h., sein Material wurde aufgeschmolzen, und die schweren Bestandteile sanken zum Zentrum, während das leichtere Gestein zur Oberfläche aufstieg. Der Mond ist damit kein primitiver »Großmeteorit« aus urtümlichem Planetenbaumaterial, sondern hat – nach Auskunft der »steinernen Dokumente«, die man an seiner Oberfläche sammelte und in irdischen Labors analysierte – genauso wie die Erde komplizierte stoffliche Umwandlungen hinter sich. Die Hoffnung, die ein namhafter Mondexperte vor der ersten Mondlandung in die Worte kleidete: »Gebt mir ein Stück Mondgestein, und ich sage euch, wie das Sonnensystem entstand!« konnte sich dadurch nicht erfüllen. Die »Tinte«, mit der der Planetenentstehungsbericht im Mondgestein niedergeschrieben ist, war bei der Differenzierung des Mondes breitgelaufen und über das zerweichende »steinerne Papier« bis zur Unleserlichkeit verschmiert worden. Erst an wenigen Stellen ist es der Wissenschaft gelungen, den »Bericht« zu entziffern.

Die Mondforschung hat die Vermutung erhärtet, daß alle erdartigen Planeten aus konzentrischen Kugelscha-



Der innere Aufbau der erdartigen Planeten und des Erdmondes. Typisch ist die Dreiteilung in Kruste (ocker), Mantel (braun) und Kern (grau). Bei der Erde kann man durch die Seismologie bereits Unterschalen und Übergangsschichten definieren. Da der Mond in seinem Kern wahrscheinlich aus dem gleichen Material besteht wie der Mantel, wurde der Mondkern auch braun dargestellt.

len mit nach innen zunehmender Dichte bestehen. Der Planet Merkur muß dabei wegen seiner relativ großen mittleren Dichte einen besonders großen und schweren Kern besitzen. Moderne Merkurmodelle sehen daher einen Eisenkern vor, der bis zu etwa 75 % des Planetenradius reicht. Er ist umgeben von einem Silikatmantel von nur etwa 600 km Dicke. Das Gestein der Kruste scheint dem Mondgestein verwandt zu sein.



Da die Venus sich hinsichtlich Größe, Masse und mittlerer Dichte nur wenig von der Erde unterscheidet, werden wir uns ihren inneren Aufbau im großen und ganzen so wie den unseres Heimatplaneten vorstellen. Anders als bei der Erde scheint es bei der extrem langsam rotierenden Venus, die 243 Tage für eine Umdrehung benötigt, nur zu einer außerordentlich trägen Zirkulation im Eisenkern zu kommen, so daß der Dynamoeffekt, der das Magnetfeld der Erde aufrechterhält, offenbar nicht wirksam werden kann. Unser Nachbarplanet hat daher kein nennenswertes Magnetfeld.

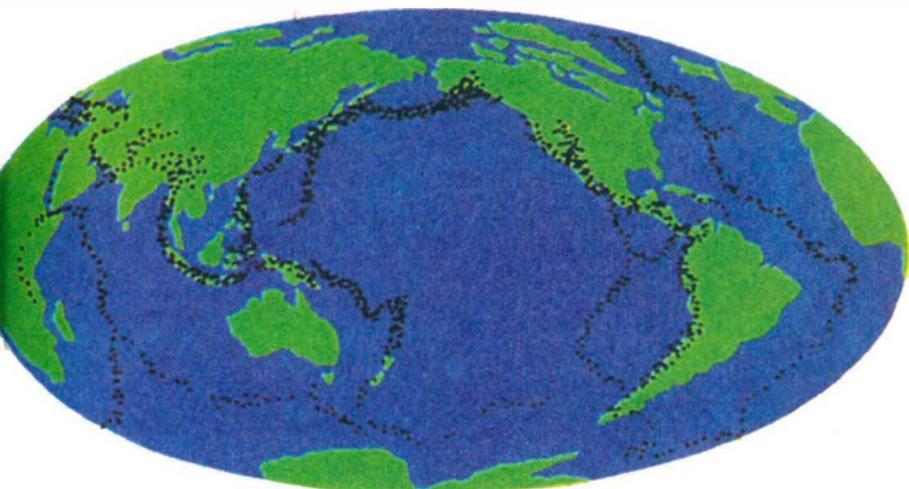
Wegen seiner geringen mittleren Dichte von nur knapp 4 g/cm^3 kann sich der Mars nur einen kleinen schweren Kern leisten, der etwa 6% seines Volumens einnimmt. Auch das schwache Magnetfeld paßt zu die-

ser Vorstellung. Aus der Oberflächenbeschaffenheit des Mars kann man schließen, daß die Kruste dicker als die unseres Planeten sein sollte. Wahrscheinlich reicht sie bis in 100 km Tiefe. Der Grund für diese Vermutung ist, daß die Marskruste bedeutend massivere Vulkanbauten trägt als die der Erde und daß man auf dem Mars kaum Anzeichen für horizontale Verschiebungen zusammenhängender Oberflächenbereiche, d. h. für Kontinentaldrift, findet.

Die Oberflächenbeschaffenheit

Schwimmende Erdteile und gebirgige Ozeane. Sieben Zehntel der Erdoberfläche sind vom Meer bedeckt. Die Becken der Ozeane sind somit das wesentliche Element des großräumigen Reliefs unserer Erde. Vom Tiefseeboden heben sich in durchweg steilem Anstieg, dem Kontinentalabhang, die großen Tafeln der Kontinente ab. Beim Vergleich der östlichen Küstenlinie Südamerikas mit der Westküste Afrikas fiel schon im Jahre 1912 dem deutschen Polarforscher Alfred Wegener auf, daß beide Kontinente fast perfekt aneinanderpassen. Diese und andere Indizien überzeugten ihn, daß sich die Kontinente im Laufe der Erdgeschichte gegeneinander verschoben und neue Ozeane zwischen sich entstehen ließen.

Mit der Konzeption der Plattentektonik hat die moderne Forschung eine Theorie erarbeitet, die nicht nur das Driften der Kontinente, sondern auch viele andere Phänomene überzeugend erklären kann. Ausgangspunkt ist dabei die Tatsache, daß es in 70 bis 250 km Tiefe im Erdmantel eine Zone aus teilweise geschmolzenem Material, die sogenannte Asthenosphäre (Schwächezone), gibt. Der darüberliegende Teil des oberen Mantels und die Kruste, die man zusammenfassend Lithosphäre (Gesteinshülle) nennt, »schwimmen« somit auf dem zähflüssigen Gestein der Asthenosphäre. Die Lithosphäre ist in zahlreiche Platten zerbrochen, deren Ränder durch verstärkte Erdbeben­tätigkeit, durch vulkanisch aktive Kettengebirge (z. B. die Kordilleren) und Inselbögen

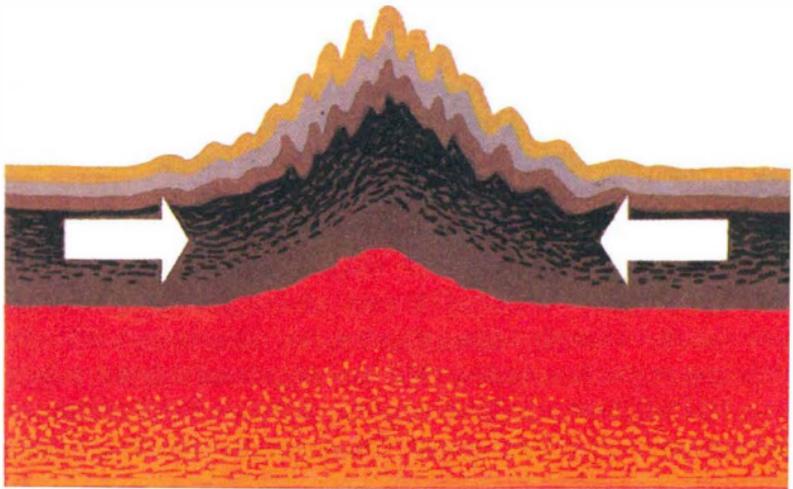
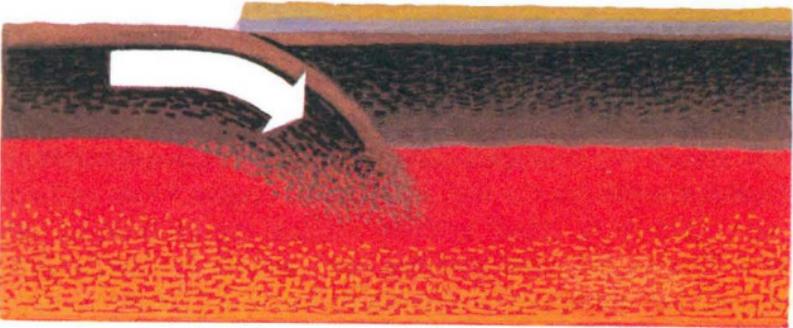
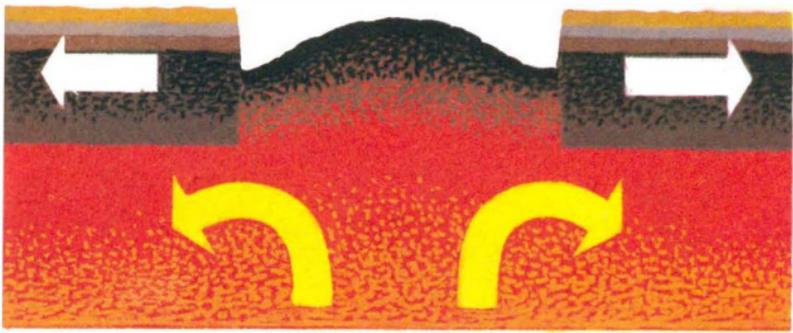


Die Ränder der Großplatten der Erdlithosphäre, markiert durch Erdbebenherde

(z. B. Japan mit den Kurilen und Aläuten), durch Tiefseegräben, durch die mittelozeanischen Rücken, aber auch durch mächtige Faltengebirge (z. B. Alpen und Himalaja) markiert sind.

Eine besonders interessante Rolle spielen die mittelozeanischen Rücken. Sie stellen die längsten Gebirge der Erde dar und bestehen aus Basaltgestein, das auch heute noch ständig aus diesen heißen Nahtstellen der Lithosphäre am Grunde der Ozeane herausquillt, die ozeanischen Platten zu beiden Seiten wegschiebt und ständig neue Erdkruste bildet. Das Wegrücken der Platten von den mittelozeanischen Rücken und das »Anstricken« von immer neuem Meeresboden hat überhaupt erst die Ozeane entstehen lassen. Südamerika und Afrika waren vor 200 Millionen Jahren also tatsächlich ein Kontinent, bevor sich die Spalte im heutigen mittelatlantischen Rücken öffnete und das emporquellende Mantelmaterial die beiden Teile des gespaltenen Kontinents auseinanderschob und den Atlantik entstehen ließ.

Da sich die Erdoberfläche insgesamt nicht vergrößert, muß natürlich irgendwo auf der Erde genausoviel Kruste wieder verschwinden, wie von den mittelozeanischen Rücken »produziert« wird. Das geschieht dadurch, daß sich an bestimmten Stellen, den sogenannten Subduk-



Ozean- und Gebirgsbildung im Lichte der Plattentektonik. Längs des Grabenbruches (Rift) reißt ein Kontinent durch Strömungsvorgänge im Untergrund auf. Emporquellendes Mantelgestein bildet um die Riftzone den vulkanisch aktiven mittelozeanischen Rücken, von dem ständig neue ozeanische Kruste nachgeliefert wird, während die beiden Kontinente unter Bil-

tionszonen (Beseitigungszonen), die von den mittelozeanischen Rücken wegdriftenden ozeanischen Platten unter benachbarte kontinentale Platten, die beträchtlich dicker sind, schieben. Sie »gleiten« in den Erdmantel hinab und lösen sich in der Asthenosphäre auf. Der »Gleitprozeß« geht allerdings keineswegs glatt vor sich; mächtige Gebirge und vulkanisch aktive Inselbögen können dabei aufgeworfen werden. Die Kordilleren und die Inselbögen des Nordpazifiks, die wir bereits nannten, sind Beispiele dafür. Verhakungen der aneinander »gleitenden« Platten sorgen für das Aufstauen mechanischer Spannungen, die sich in Form von Erd- und Seebeben lösen.

Im Rahmen der Plattendrift können natürlich auch kontinentale Platten aufeinander zulaufen. In diesem Falle schließt sich der dazwischen befindliche Ozean, und die abgelagerten Sedimente werden zusammengesoben und schlagen Falten wie ein zusammengesobenes Tischtuch. An der Verschweißstelle zweier Kontinente finden sich daher mächtige Faltengebirge. So wurden die Alpen gebildet, und das heutige Mittelmeer ist der kümmerliche Rest eines bedeutenden Ozeans in der Erdgeschichte. Bis unter den Baikalsee hat sich bereits die Platte, die Vorderindien trägt, in die große eurasische Platte hineingebohrt und aus den Falten schlagenden Meeresablagerungen den gewaltigen Himalaja aufgetürmt. Die Plattentektonik löst also auch das alte Problem der Gebirgsbildung.

Nunmehr können wir unser Bild von der »Wärme-kraftmaschine Erde« wieder aufgreifen. Das Emporquellen heißen Materials in den mittelozeanischen Rücken und das Eintauchen kühlen Gesteins in den Erdmantel muß von einer entgegengesetzt verlaufenden »Ausgleichsströmung« im Mantel der Erde begleitet

dung eines immer größer werdenden Ozeanbeckens auseinander-rücken (oben). Eine ozeanische Platte schiebt sich unter eine kontinentale (Subduktion) und wird im Erdmantel aufgelöst (Mitte). Zwei kollidierende kontinentale Platten verschweißen miteinander. Die Sedimente des früher dazwischenliegenden Ozeans werden zu einem Faltengebirge aufgetürmt (S. 36 unten).

sein. Wahrscheinlich liegt ein geschlossener Konvektionszyklus vor, der den »Motor« zur Bewegung der Erdkruste bildet. Die Arbeit, die die »Wärmekraftmaschine Erde«, von der Wärmeentwicklung durch den Zerfall radioaktiver Isotope zehrend, leistet, dokumentiert sich eindrucksvoll, wenn die mächtigen lithosphärischen Platten das Gestein des oberen Erdmantels »durchpflügen« und gleichsam nebenbei Gebirge auf-türmen und Ozeane schaffen.

»Land« und »Meer« auf Mond, Merkur, Mars und Venus. Wie bei der Erde spricht man auch beim Mond von »Festland« und »Meer«. Es handelt sich dabei um die Übersetzung der Fachtermini Terra (Mehrzahl: Terrae) und Mare (Mehrzahl: Maria) aus der Entstehungszeit der wissenschaftlichen Mondbeschreibung, der Selenographie, als man die dunklen Tiefebenen tatsächlich für Wasserflächen und die hellen, stark mit Kratern bedeckten Gegenden für Kontinente hielt. Heute ergibt sich folgendes Bild: Die hellen Mondterrae sind die älteren Teile der Mondkruste, während die dunklen, glatten Flächen der Maria erst in der zweiten Jahrmilliarde der Mondgeschichte, nämlich im Zeitraum vor 3,9 bis 3,2 Mrd. Jahren, in einer Phase globaler vulkanischer Aktivität entstanden. Dabei kam es jedoch nicht zu explosiven Eruptionen und zur Bildung hoher Vulkanbauten, sondern zu »ruhigen«, aber mächtigen flächenhaften Lavaergüssen, durch die sich die Niederungen der Mondkruste in »Basaltmeere« verwandelten. Die ganze Mondkruste wurde dermaßen mit Basaltlava, die aus dem Mantel emporstieg, »durchtränkt«, daß sich auch viele Kraterböden in »Basaltseen« verwandelten. Die Maria repräsentieren somit eine zweite Etappe der Krustenbildung auf dem Erdtrabanten. Danach erlosch jegliche innere Aktivität des Mondes, und es bildete sich die erwähnte, mehr als 1000 km dicke starre Lithosphäre, die nicht in Platten zerbrechen konnte. Damit fehlen dem Mond echte Ozeane und echte Gebirge (im tektonischen Sinne). In der Mondkruste herrscht eine eindrucksvolle seismische »Stille«, die nur durch gelegentliche Meteoriteneinschläge und durch leichte Beben



Basaltmeere des Mondes: Mare Imbrium (l. u.), Mare Serenitatis (r. u.), Mare Frigoris (Mitte o.). Die am Rande des M. I. sichtbaren Gebirge sind Reste des Walles eines Riesenkaters der Urkruste.

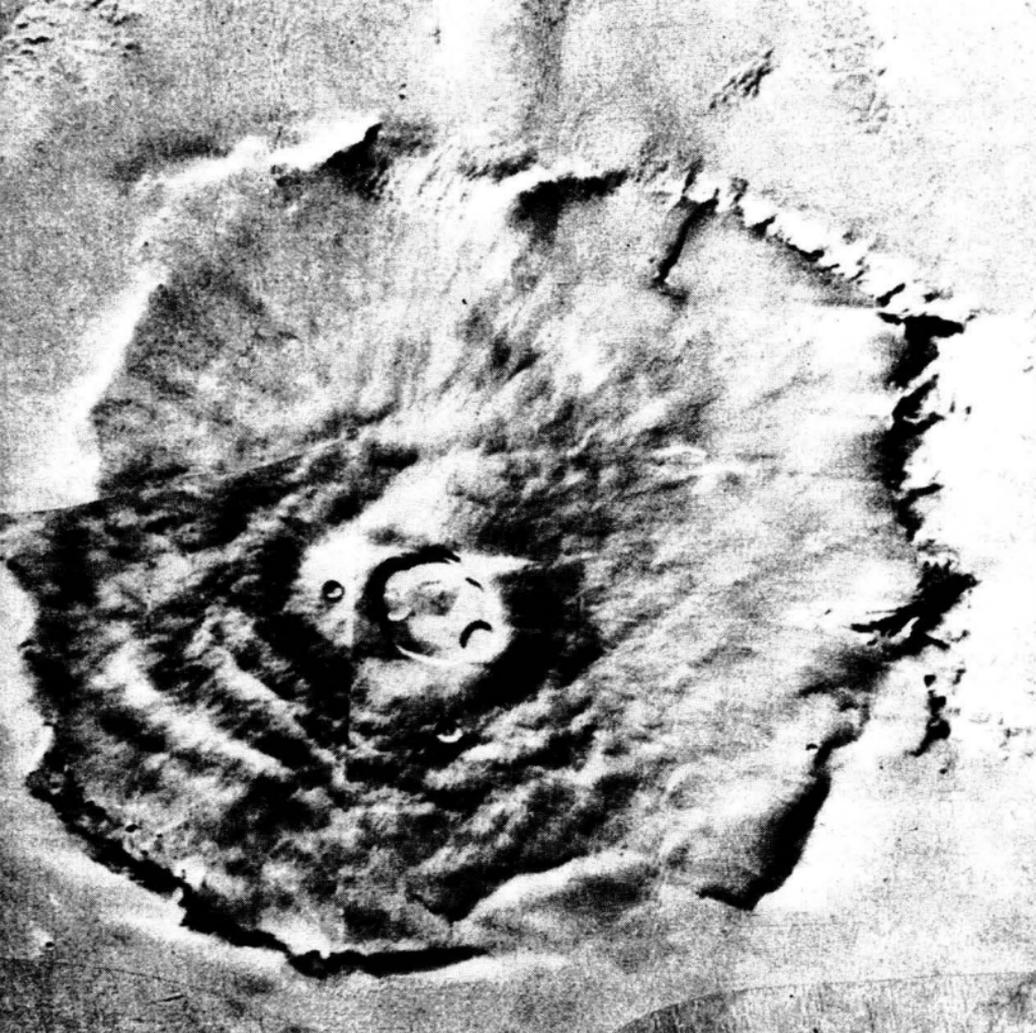
aus sehr tiefliegenden Herden unterbrochen wird. Diese werden meist dann ausgelöst, wenn der Mond in der Nähe des erdnächsten Punktes seiner Bahn verstärkter Gezeitenwechselwirkung mit der Erde ausgesetzt ist.

Zu den interessantesten Entdeckungen des Jahres 1974 auf dem Gebiet der Planetenforschung gehört die Erkenntnis, daß die Merkur Oberfläche der des Mondes zum Verwechseln ähnlich sieht. Auf den damals von der Sonde »Mariner 10« gewonnenen Nahaufnahmen zeigt

ten sich ähnliche kraterübersäte »Kontinente« und glatte, dunkle »Meere« wie auf dem Mond. Offensichtlich hat auch dieser Planet zwei Etappen der Krustenbildung hinter sich gebracht und sich dann »zur Ruhe gesetzt«. Zahlreiche »Runzeln«, die einige hundert Kilometer Länge und bis zu 2 km Höhe erreichen, weisen auf eine Schrumpfung der Merkurkruste hin, die wahrscheinlich mit der Erstarrung des großen Eisenkerns einherging.

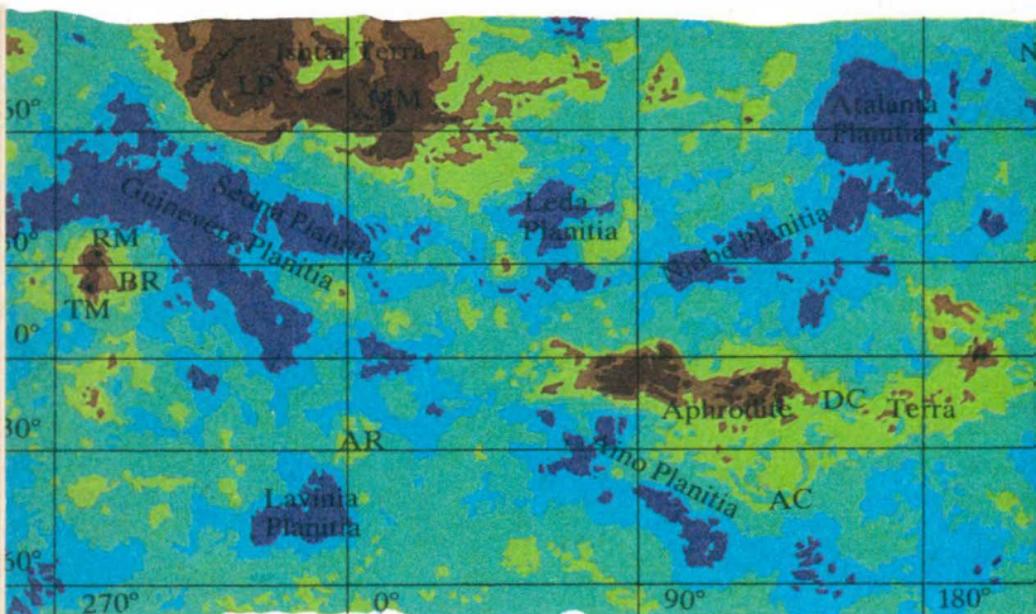
Auch die Marskruste zeigt auf den ersten Blick Partien mit »kontinentaler« und solche mit Mare-Prägung. Auf den glatten und im Gegensatz zu Mond und Merkur hellen Flächen des »roten Planeten« treten jedoch zahlreiche riesige Vulkanbauten auf. Sie sind durchweg vom Typ der Schildvulkane und erreichen, verglichen mit irdischen Vulkanen, gigantische Dimensionen. Der mächtigste von ihnen, Olympus Mons, hat einen Schild von rund 600 km Durchmesser – auf ihm hätte ein Land wie die DDR Platz – und erhebt sich bis zu 25 km über die Ebene, in der er sich befindet. Wenn diese Riesenvulkane auch sicher vor mehr als einer Milliarde Jahren erloschen sind, so prägten doch mächtige Vulkaneruptionen noch intensiv die Marslandschaft, als Himmelskörper wie Mond und Merkur geologisch längst tot waren. Der Marsvulkanismus ist auch von anderem Typ als der Mare-Vulkanismus der beiden genannten Himmelskörper gewesen. Durch den Besitz einer Atmosphäre und die durch sie ermöglichte Verwitterung und Erosion, durch seinen Gehalt an Wasser und durch die andere Beschaffenheit seines Krustengesteins hebt sich der Mars auch sonst vom Mond und vom Merkur ab.

Während sich die »Marskanäle« als eine Täuschung der Beobachter herausstellten, fanden sich auf den Nahaufnahmen der zahlreichen Marssonden Risse, Spalten, Gräben und Verwerfungen in großer Zahl, die dem »roten Planeten« größere tektonische Aktivitäten in der Vergangenheit bezeugen. Manche Geologen glauben sogar, Anzeichen für globale tektonische Vorgänge zu erkennen. So wurde z. B. das mit seinen Ausläufern fast 4000 km lange Ost-West-Grabensystem (Valles Marineris) am Marsäquator plattentektonisch interpretiert. Ob



Olympus Mons, der größte Schildvulkan des Mars. Der Schild hat einen Durchmesser von etwa 600 km und hebt sich in Form einer kliffartigen Steilstufe von rund 2 km Höhe von der umgebenden Ebene ab. Die Gipfelcaldera von etwa 80 km Durchmesser weist auf mehrere Eruptionsperioden hin. Der Vulkan besitzt eine Höhe von ungefähr 25 km.

hier das Auseinanderrücken zweier Platten, die beginnende Bildung eines Ozeanbeckens, »eingefroren« ist und nun den Marsforschern als Paradebeispiel dienen kann, muß natürlich erst noch durch detaillierte Forschungen erhärtet werden. Die auf einer Länge von 1500 km in einer Geraden aufgereihten drei großen Schildvulkane in der Landschaft Tharsis wurden gleich-



Venuskarte nach Radarhöhenmessungen von »Pioneer-Venus 1«. Wie bei den irdischen Landkarten sind die verschiedenen Höhenbereiche durch Farben gekennzeichnet: Tiefsee (dunkelblau), Meer (hellblau), Flachmeer (türkis), Tiefland (grün), Gebirge (braun), Hochgebirge (rot-braun). »Tiefsee«, »Meer« und »Flachmeer« sind bei der Venus trocken. Die Abkürzungen bedeuten: AC – Artemis Chasma, AR – Alpha Regio, BR – Beta Regio, DC – Diana Chasma, LP – Lakshmi Planum, MM – Maxwell Montes, RM – Rhea Mons, TM – Theia Mons.

falls als Beweis für globale tektonische Bildungen auf dem Mars gewertet. Im großen und ganzen findet man aber wenig, was an driftende Platten erinnert. Die Lithosphäre dieses Planeten ist wahrscheinlich doch wesentlich dicker und starrer als die irdische.

Lange Zeit schwebte über der Venusoberfläche der Schleier des Geheimnisses, weil die dichte Wolkendecke jeden Einblick verwehrte. Erst in den sechziger Jahren gelang es mit Hilfe von Radarwellen, die man mit Radioteleskopen zur Venus schickte, um die von dort zurückkommenden Echos zu studieren, durch die Wolken hindurch grobe Konturen der Venusoberfläche zu »ertasten«. Die Radar-Höhenmeßanlage von »Pioneer Venus 1« verhalf dann 1979 der Radarastronomie zum

Durchbruch und lieferte die erste komplette Venuskarte, die klare topographische Details zeigte und erste geologische Aussagen ermöglichte.

Die Venus ist zu rund 60 % von leicht welligen Ebenen mit Höhenunterschieden unter 1000 m bedeckt. Obwohl es auf der Venus kein flüssiges Wasser gibt, kann man diese Ebenen mit dem Meeresboden der Erde vergleichen. Die Trennung Kontinent/Meer ist ja auf der Erde nicht nur der Unterschied Land/Wasser, sondern kennzeichnet eine Eigenschaft des Baus der Erdkruste. Der »Meeresboden« der Venus definiert durch seine geringen Höhenunterschiede ein natürliches Normalnull (NN) für diesen Planeten.

Nur 16 % der Venusoberfläche liegen »unter NN«. Die größten zusammenhängenden »Tiefseeregionen« tragen jetzt die Namen Guinevere Planitia, Sedna Planitia und Atalanta Planitia. Die restlichen 24 % sind Hochländer, die als kontinentartige Tafeln aus dem »Meer« herausragen, oder Inseln. Der größte Kontinent, Aphrodite Terra, ist etwa von der Größe Afrikas und erstreckt sich von Ost nach West bei etwa 10° s. B. fast um die halbe Venus. Die Gebirge in seinem westlichen Teil erreichen Höhen von etwa 4000 m, während in seinem mittleren und östlichen Teil lange verzweigte Täler, z. B. das Diana Chasma und das Artemis Chasma, eingeschnitten sind, die Tiefen bis zu 2900 m unter NN erreichen. Etwa die Größe Australiens besitzt der zweitgrößte Kontinent der Venus, Ishtar Terra. Hier findet man die höchsten Berge dieses Planeten, die Maxwell Montes (eine der wenigen topographischen Formen der Venus, die keinen Frauennamen trägt), die bis zu 12000 m Höhe erreichen. Ein weiteres kontinentales Gebiet, Beta Regio, trägt die zwei 4000 m hohen Schildvulkane Rhea Mons und Theia Mons, die eine Fläche von über 2000 km Durchmesser einnehmen und wahrscheinlich die ausgedehntesten Schildvulkane des Sonnensystems darstellen. Plattenbewegungen hat es möglicherweise auf der Venus gegeben; man findet aber keine topographischen Hinweise, daß auch heute noch Krusten Neubildung, wie sie auf der Erde in den mittelozeanischen Rücken erfolgt, stattfindet.

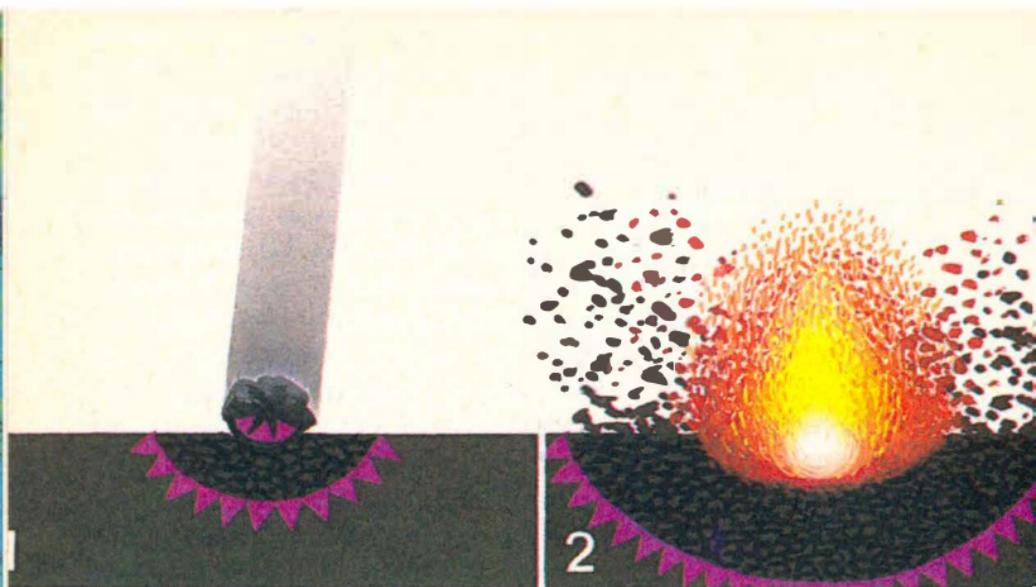
Wenn auch viele Details bei der Beurteilung der Planetenoberflächen noch unklar sind, so zeigt doch der geologische Vergleich von Mond, Merkur, Mars, Venus und Erde, daß die Krusten der erdartigen Himmelskörper mit zunehmender Masse immer beweglicher, spannungsgeladener und vulkanisch aktiver werden. Die astronautische Planetenforschung hat damit zur Erkenntnis einer fundamentalen planetologischen Gesetzmäßigkeit geführt. Wir werden bald auf weitere stoßen!

Schwerer Artilleriebeschuß aus dem Weltraum. Im letzten Abschnitt hatten wir nach Indizien für das Wirken innerer Kräfte und Prozesse – endogener Faktoren – bei der Gestaltung von Planetenoberflächen Ausschau gehalten. Vor allem bei der Suche nach Kontinenten und Ozeanen im tektonischen Sinne hatten wir die Erde zum »Maß aller erdartigen Planeten« gemacht, waren also ziemlich buchstabengetreu geologisch vorgegangen. Wenn man Planetologie treiben will, ist dieses Herangehen etwas zu einseitig. Wir werden daher jetzt einmal von der Mondoberfläche, der am besten bekannten Oberfläche eines anderen Himmelskörpers, ausgehen, um die »Planetengesichter« mit *selenologischen* »Augen« zu betrachten.

Die eindrucksvollsten Gebilde für jeden, der den Mond mit dem Fernrohr betrachtet, sind zweifellos die Krater. Bereits Galileis Zeitgenossen begannen damit, sie nach bedeutenden Gelehrten zu benennen, so daß der Mond heute – zumindest auf der Karte – einem großen »Gelehrtenfriedhof« gleicht. Bis zur Mitte des 20. Jh. herrschte die Auffassung vor, daß die Mondkrater in irgendeiner Form auf innere, endogene, Ursachen zurückzuführen sind, also z. B. Vulkankrater, vulkanische Einbruchskessel (Calderen), Ergebnisse von Gasexplosionen (Maare) u. a. m. sind. Seit langem gibt es aber auch die Vorstellung, daß die Krater »Narben« kosmischer Einschüsse (Astrobleme) sind, also Ergebnisse exogener Faktoren. Diese Auffassung, die in der Vergangenheit nur von einer Minderheit von Wissenschaftlern akzeptiert wurde, hatte sogar in theoretischer Hinsicht

einige Vorteile. Sie vermochte ganz zwanglos plausibel zu machen, wieso an einem Punkt der Mondoberfläche eine so gewaltige Energie anfallen kann, daß Hunderte oder sogar Tausende von Kubikkilometern Gestein zu einem großen Krater »umverteilt« werden konnten. Bereits vor 200 Jahren war nämlich scharfsinnigen Mondforschern aufgefallen, daß im Wall eines Kraters ungefähr so viel Material aufgetürmt ist, wie im Kraterbecken fehlt, so als sei das Gestein lediglich umgelagert worden. Eine gigantische, an einem Punkt erfolgende Explosion könnte das bewirken. Auch die zufällige Verteilung der Krater und die zahlreichen Überlappungen sprachen zugunsten der exogenen Deutung durch Einschläge aus dem Weltraum. Trotzdem setzte sich die Erkenntnis, daß die Krater infolge des »Beschusses« der Mondoberfläche mit kleinen Himmelskörpern bzw. großen Meteoriten entstanden, erst im Raumflugzeitalter endgültig durch.

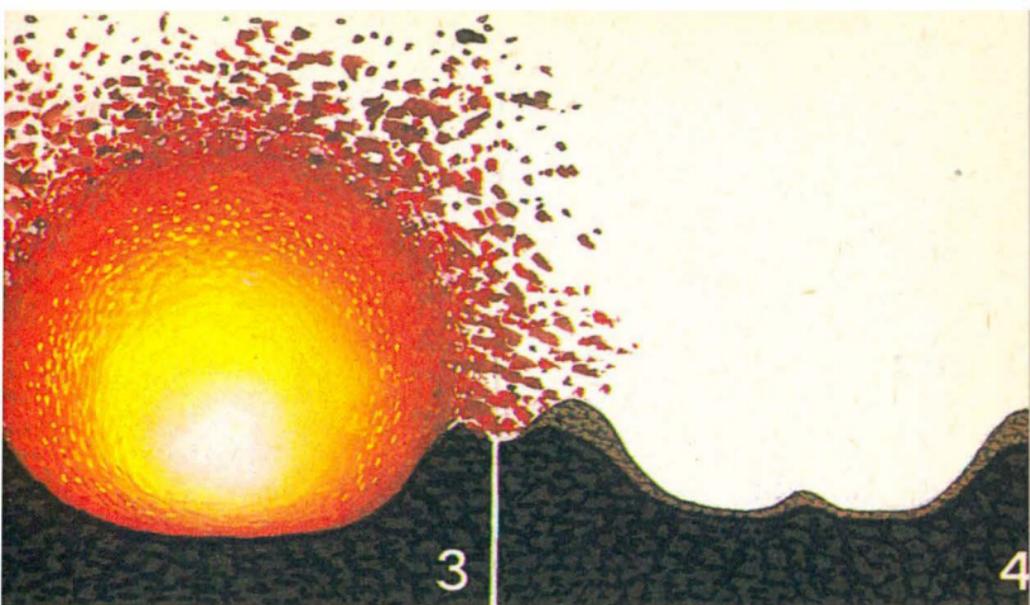
Heute ist zweifelsfrei erwiesen, daß die großen Mondkrater durch die Einschläge kosmischer »Projektil« entstanden. Skizzieren wir kurz die bei einem solchen Elementarereignis ablaufenden physikalischen Vorgänge. Der mit großer Geschwindigkeit (bis zu einigen Dutzend Kilometern je Sekunde) einstürzende Körper erzeugt beim Aufprall eine mächtige Stoßwelle, die sich im Gestein des Untergrundes ausbreitet. Der Verdichtungsstoß verdampft augenblicklich das umgebende Gestein und auch das »Projektil« selbst und zertrümmert in einem großen Volumen das Gestein des Untergrundes. Die der Kompression folgende explosive Entspannung wirft das zerstörte Material in die Höhe. So wird das Kraterbecken ausgehoben, der Wall aufgetürmt und um den Krater herum eine große Fläche mit ausgeworfenen Gesteinstrümmern aller Größen bedeckt. Hochgeschleuderte große Brocken erzeugen beim Einschlag kleine Krater, die Sekundärkrater. Das verdampfte Gestein kondensiert und »regnet« in Form kleiner Glaskügelchen vom Himmel. Geschmolzenes Gestein wird in alle Richtungen verspritzt und ist in Form heller Strahlen noch später zu sehen. Vulkanische und tektonische Vorgänge nach dem Einschlag und seinen unmittelbaren



Die Entstehung eines Einschlagskraters. Die sich im Boden ausbreitende Stoßwelle (1) verdampft das Gestein am Einschlagsort, verflüssigt die weitere Umgebung und zertrümmert den Untergrund in einem großen Volumen (2). Die dem Verdichtungsstoß folgende Verdünnungswelle wirft das schmelzflüssige bzw. zertrümmerte Gestein in die Höhe (3). Nachdem sich die Glutwolke verzogen hat, der Gesteinsdampf zu Tröpfchen kondensiert ist und alle emporgeschleuderten Trümmer heruntergereget sind, bleibt ein von Regolith bedeckter Krater (4) übrig. Das Projektil selbst wird von der eindringenden Stoßwelle in den meisten Fällen restlos zerstört.

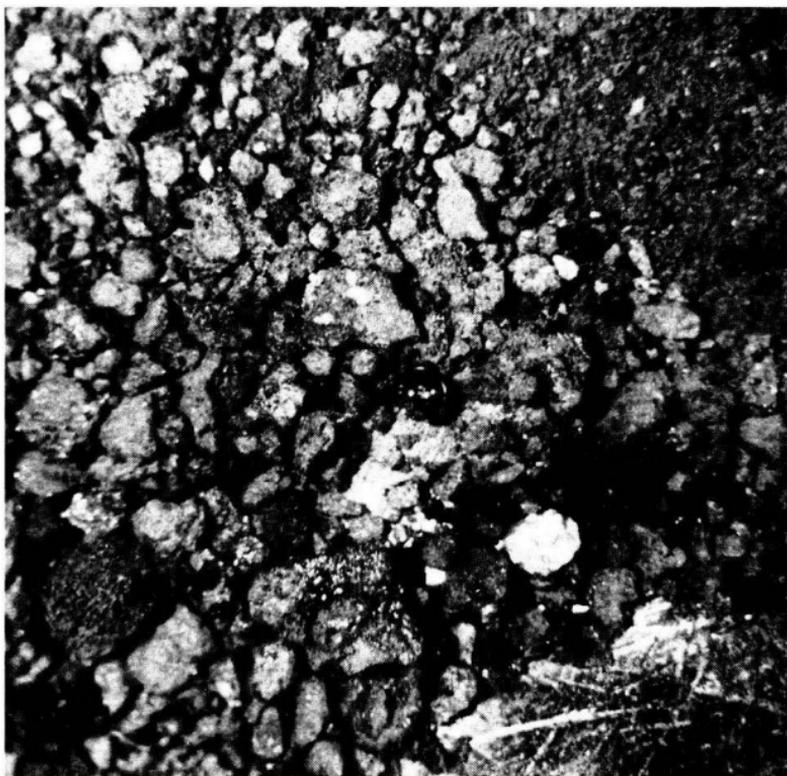
Folgen geben dann dem Krater sein heutiges Aussehen. Der Durchmesser des Kraters ist ungefähr 20mal so groß wie der des einschlagenden Geschosses.

Das »kosmische Artilleriefeuer« auf die Mondoberfläche schuf eine 6 bis 10 m dicke Schuttschicht, bestehend aus staubfeinem Material, in das Gesteinsbrocken aller Größen eingebettet sind, den sogenannten Regolith. Mineral- und Gesteinsfragmente aus dem Mondregolith ließen in der petrographischen Analyse eindeutig das kurzzeitige Einwirken extrem hoher Drücke erkennen, sozusagen den im Kristallgitter der Minerale aufgezeichneten Explosionsknall bei der Kraterbildung. Ebenso stieß man auf Glaskügelchen, also kondensier-



ten Gesteinsdampf. Manche der zahlreichen im Mondregolith vorhandenen winzigen Glatröpfchen enthielten sogar noch geringe Mengen eingeschmolzenen meteoritischen Materials. Der größte Teil des von den »Apollo«-Astronauten untersuchten Gesteins ist zusammengebackener und verfestigter Regolith. Diese sogenannten Brekzien sind entfernte »Verwandte« bestimmter irdischer Sedimentgesteine.

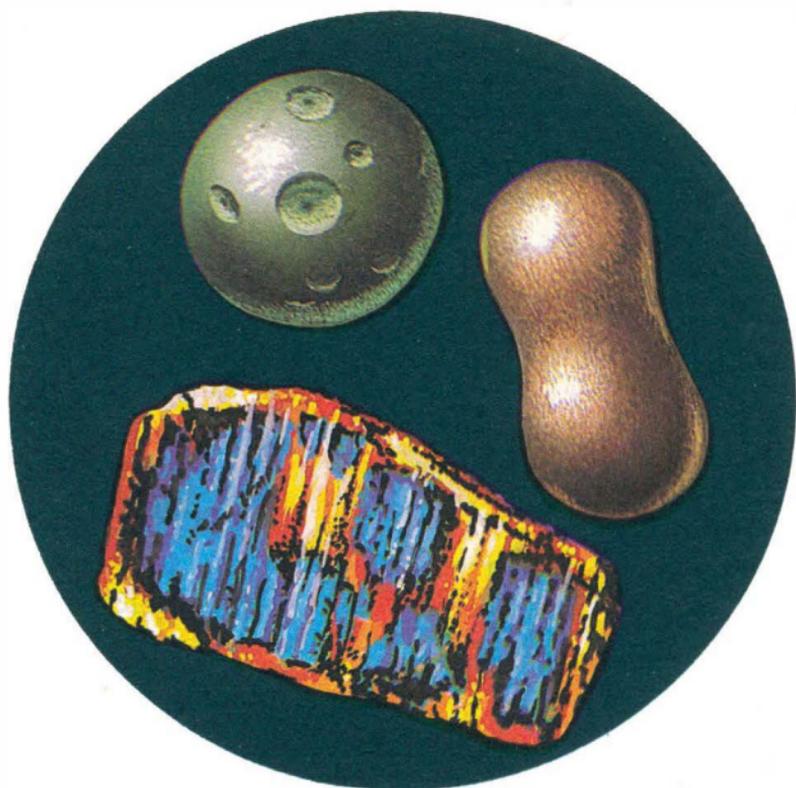
Im Verlaufe der Jahrtausenden wurde (und wird auch jetzt noch) der Mondregolith unter der Wirkung des Weltraumbeschusses »umgewälzt«. Die Auswurfdecken der Krater verloren ihr zunächst »frisches« Aussehen, die Strahlensysteme »blichen aus« und verschwanden schließlich (wir sehen sie heute nur noch bei relativ jungen Kratern), die Kraterwände »alterten«, und die Mondberge wurden »rundgeschmirgelt«. Diese rein mechanische Erosion – eine Verwitterung ohne Wasser oder Wind – wird hauptsächlich von den kleinen Meteoriten und den winzigen Mikrometeoriten bewirkt, die um viele Zehnerpotenzen häufiger auftreten als die großen kraterbildenden Brocken. Von den Mikrometeoriten, die die Mondoberfläche nach Art eines Sandstrahlgebläses bearbeiten, merken wir auf der Erde so gut wie nichts, weil sie von der Atmosphäre vollständig »abgefangen«



Bodenproben vom Erdmond im Labor. Das Foto zeigt Mondstaub aus dem Bohrkern von »Luna 16« unter dem Mikroskop. In der Mitte sieht man ein dunkles Glaskügelchen. Die meisten Gesteinsfragmente sind Brekzien, die dunklen Körnchen stammen von Mare-Basalten, während die sehr hellen Fragmente des Hochlandgesteins sind. Die Grafik rechts (S. 49) stellt ein Glaskügelchen mit Mikrometeoritenkratern, einen infolge Rotation hantelförmig gewordenen Glastropfen und das Aussehen eines Mineralkorns in einem Dünnschliff im Polarisationsmikroskop dar. Die in dem Mineralkorn sichtbar gemachten Lamellen sind Spuren, die das kurzzeitige Einwirken extrem hoher Drücke (mehr als 10 GPa!) im Kristallgitter hinterlassen hat.

werden und dann langsam zur Erdoberfläche herunterschweben.

In der Frühgeschichte des Mondes, als die »interplanetare Artillerie« noch über genügend großkalibrige Geschosse verfügte, haben Einschläge kleiner Himmelskörper auch das großräumige Mondrelief geprägt. Die



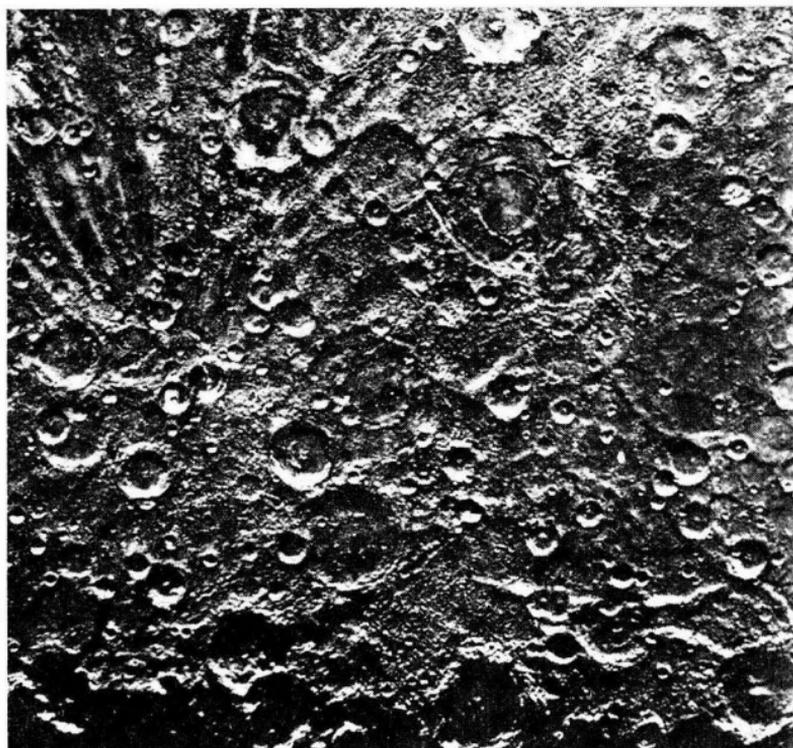
Mondgeologen können heute auf viele Indizien hinweisen, daß eine Reihe von Maria vor der großen Lavaüberflutung Riesenkrater mit Durchmessern bis zu über 1 000 km waren. Diese Maria sind kreisrund und zeigen in ihrer Umgebung viele radial von ihnen ausgehende Oberflächendetails. Die bekanntesten Mondgebirge, die Alpen, die Apenninen, der Kaukasus und die Karpaten, säumen das Regenmeer (Mare Imbrium) ein und können als Reste eines zerbrochenen Riesenkraterwalls aufgefaßt werden. Wie ein hohler Zahn wurde der mächtige Krater bei der Marebildung »plombiert«, als schwere basaltische Lava den Kessel füllte. Von den Mondsatelliten wurde eine ganze Reihe solcher »plombierter Riesen Zähne« ausgekundschaftet. Da die schweren »Plomben« sehr viel mehr Masse in sich konzentrieren als ein gleichgroßes Gebiet der Umgebung, »verbiegen« sie in auffälliger Weise die Bahnen der Mondsatelliten. Die Änderung des Bewegungsverhaltens eines Mondsatelli-

ten beim Überfliegen einer solchen Massenkonzentration kann von der Erde aus festgestellt werden. Am leichtesten »Absacken« und Schnellerwerden ihrer Landefähre konnten die »Apollo«-Astronauten die Wirkungsweise dieser Mascons – wie die Massenkonzentrationen in der Fachliteratur heißen – unmittelbar erleben.

Beenden wir jetzt unsere mondgeologische Exkursion! Krater sind nämlich keineswegs nur eine geologische Spezialität des Erdtrabanten. Wie wir bereits erwähnten, finden wir sie in großen Zahlen auch auf den kontinentalen Flächen der erdartigen Planeten. Um es vorwegzunehmen: Auch die meisten der großen Monde von Jupiter und Saturn sind mit Einschlagskratern übersät. Offensichtlich waren alle Himmelskörper des Planetensystems kurz nach ihrer Entstehung diesem »Geschoßhagel« ausgesetzt, der ihr Aussehen so entscheidend prägte. Himmelskörper, die ihre innere Aktivität bald nach ihrer Bildung einstellten und auch ihre Atmosphären zeitig verloren, haben das urtümliche »Kratergesicht« behalten.

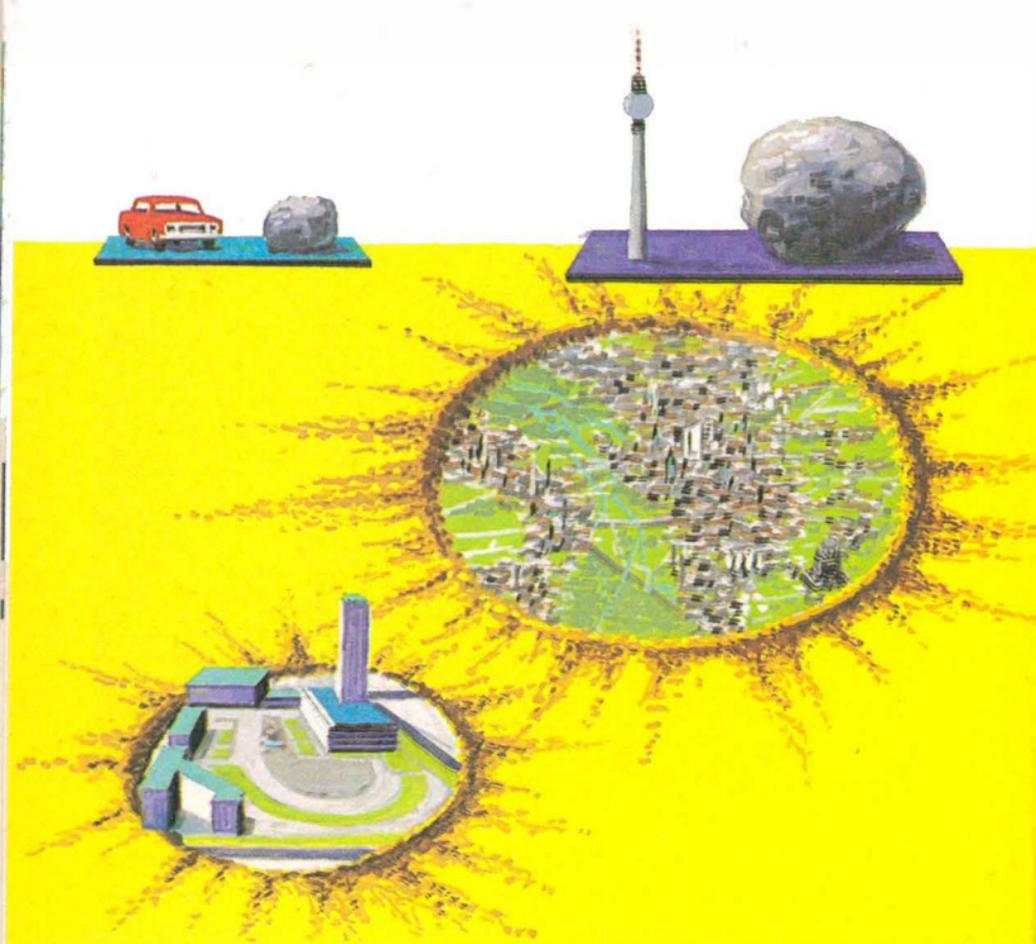
Auf den ersten Blick sehen die Krater auf den verschiedenen Planeten und Monden einander sehr ähnlich; nur der Fachmann merkt charakteristische Unterschiede zwischen den Mond- und den Merkurkratern oder zwischen den Kratern auf dem Marsmond Phobos oder dem Saturnmond Rhea. Diese morphologische Verschiedenheit geht hauptsächlich zu Lasten zweier Umstände: Die Krusten der einzelnen Himmelskörper bestehen aus unterschiedlichem Material, und an den Oberflächen sind die Wirkungen der Schwerkraft verschieden stark. Die Schwerebeschleunigung auf dem Merkur ist beispielsweise ungefähr doppelt so groß wie auf dem Erdmond. Während der Phobos aus Gestein besteht, setzt sich die Rhea aus Eis zusammen!

Durch geologische Aktivität – wir erwähnten z. B. die vulkanischen Prozesse, die zur Bildung der »Mondmeere« führten – kann es zur Neubildung von Krustenteilen auf den betreffenden Himmelskörpern kommen, so daß die Krater auf großen Flächen beseitigt werden können. Aber auch dort, wo die Krater grundsätzlich erhalten blieben, kann durch die Wirkung einer auf dem



Kraterlandschaft in der Nähe des Merkursüdpols. Der auffällige Doppelringkrater im oberen Bildteil trägt den Namen Bach, die beiden sich nach links anschließenden größeren Krater heißen Wagner und Chopin. Der sehr stark eingeebnete Doppelringkrater etwa in der Bildmitte wurde Cervantes genannt. Der Merkursüdpol liegt inmitten des Kraters Chao Meng-Fu neben der Mitte des unteren Bildrandes.

betreffenden Himmelskörper vorhandenen Atmosphäre die Kraterlandschaft allmählich zerstört werden. So zeigen z. B. die Krater auf dem Mars deutliche Merkmale von Verwitterung und Abtragung. Auch bei den »frischesten« Marskratern findet man keine Strahlensysteme, die für die jüngsten Mond- und Merkurkrater so typisch sind. Die dünne Marsatmosphäre vermochte zwar nicht die großen »kosmischen Narben« zu beseitigen, aber bei den kleinen Kratern auf dem Mars liegt eindeutig ein Defizit gegenüber der Häufigkeit auf dem Mond oder auch auf den Marsmonden Phobos und Dei-



Zusammenhang zwischen Kraterdurchmesser und Projektilgröße. Ein Himmelskörper mit dem Durchmesser der Stadt Leipzig und Umgebung würde einen Krater von der Größe Islands erzeugen. Ein Körper mit einem Durchmesser, der der Höhe des Berliner Fernsehturmes gleich wäre, ergäbe einen Krater von der Größe Leipzigs, während ein Pkw-großer Brocken ausreichte, um einen Krater von der Größe des Berliner Alex zu schaffen.

mos vor. Hier haben die Kräfte von Wind und Wasser ihre zerstörerische Arbeit geleistet, und die »Buchführung« über den »kosmischen Beschuß« ist nur noch für die letzten hundert Millionen Jahre einigermaßen lückenlos.

Auch in den weiten Ebenen, dem »Flachmeer«, der Venus fand man mit Hilfe der Radarhöhenmessung



zahlreiche runde Strukturen, die wahrscheinlich die Reste großer Einschlagskrater sind. Trotz ihrer Größe sind sie allerdings extrem stark eingeebnet. Der Höhenunterschied zwischen Wall und Boden beträgt nämlich nur einige hundert Meter. Angesichts der hohen Dichte der Venusatmosphäre ist es zunächst verwunderlich, daß man überhaupt noch derartige Krater findet, denn auf der Erde sind diese Zeugnisse aus der Urzeit des Planetensystems vollständig beseitigt.

Durch ihren großen Wassergehalt ging die Atmosphäre unseres Heimatplaneten anscheinend noch viel »rabiater« mit den Oberflächenstrukturen um als die viel dichtere, aber sehr trockene Venusatmosphäre. Soweit nicht geologische Aktivität die alten Einschlagskrater der Erde beseitigt hat, wurden sie von der Erosion

des Wassers abgetragen und eingeebnet, vom Meer überspült, unter Sedimentmassen begraben, vom Eis weggeschliffen, vom Wüstensand zugeweht ... Die rund 200 Gebilde, die die Geologen in mühsamer Detektivarbeit als Folgen des Einschlages kosmischer Projektile identifiziert haben, stammen von späten »Nachzüglern« des großen Bombardements. Manche von ihnen, z. B. der gut erhaltene Barringer-Krater in der Nähe des Canyon Diablo in Arizona (USA), sind wahrscheinlich nur einige zehntausend Jahre alt.

Zu den am besten untersuchten irdischen Einschlagskratern gehört das Nördlinger Ries im Süden der BRD. In den zahlreichen Steinbrüchen entlang des Walls dieses 25-km-Kraters trainierten die »Apollo-14«-Astronauten die geologische Untersuchung von Mondkratern. Nach neuesten Forschungen entstand der Ries-Kessel vor rund 15 Mill. Jahren durch den Einschlag eines Körpers, dessen kinetische Energie etwa die Größe der Detonationsenergie von 50 Wasserstoffbomben größter Sprengkraft (100 Megatonnen TNT) besaß. Zahlreiche Bohrungen im Ries vermittelten erstmals einen Eindruck von der zerstörenden Wirkung eines solchen Einschlags auf das Gestein des Untergrunds. Unmengen von Gesteinsfladen glasiger Beschaffenheit, beim Einschlag verspritztes flüssiges Gestein, wurden gefunden. Die Minerale im anstehenden Gestein zeigten zum Teil wie die Minerale im Mondregolith Anzeichen extrem hoher Druckbeanspruchung.

Fassen wir zusammen: Die Mittel des Raumflugzeitalters haben zur Aufdeckung einer wesentlichen planetologischen Gesetzmäßigkeit geführt, die besagt, daß die Oberflächen aller erdartigen Planeten und vieler anderer Himmelskörper des Planetensystems entscheidend durch aus dem interplanetaren Raum einstürzende Kleinkörper geprägt wurden.

Die Kräfte von Wasser und Wind. Reichte beim Mond bereits eine kleine Bodenprobe aus, um die Einschläge vom Weltraum her als maßgebenden exogenen Faktor zu erkennen, so belehrt uns eine Messerspitze Erdboden, daß auf diesem Planeten das ursprüngliche Gestein



Die Marslandschaft am Landeort von »Viking 1«. Zwischen den umherliegenden Steinen sind dünenartige Ansammlungen von windverfrachtetem feinem Bodenmaterial zu sehen. Das rostrote Aussehen dieses Marsstaubes gibt dem Planeten seine charakteristische Farbe. Wegen des hohen Staubgehaltes der Atmosphäre sieht auch der Himmel auf dem Mars rötlich aus.

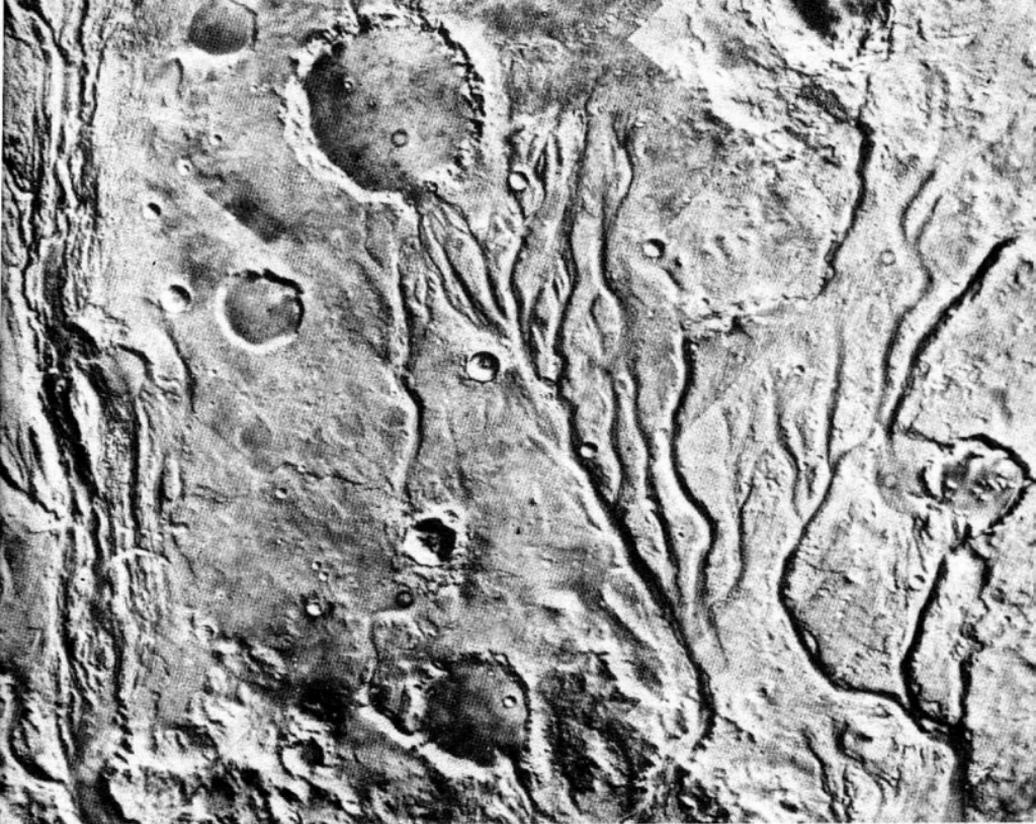
durch äußere Einwirkung in sehr vielfältiger und höchst komplizierter Weise mechanisch und chemisch verändert und zu neuem Gestein umgeformt wurde. Verwitterung, Abtragung, Verfrachtung und Ablagerung sind die entscheidenden exogenen Prozesse auf der Erde. Durch Sonneneinstrahlung, Niederschläge, Frost, chemische Reaktionen (z. B. mit Wasser und Sauerstoff, aber auch mit Stoffen aus der irdischen Biosphäre) wird jedes Gestein an der Erdoberfläche allmählich zerstört. Die dabei entstehenden Verwitterungsprodukte werden vor allem vom Wasser weggespült (Erosion). Auch der Wind kann lockere Verwitterungsprodukte transportieren (Deflation). Vor allem die Erosion sorgt für die Abtragung der irdischen Gebirge. In Form von Gletschern beteiligt sich auch Eis am »Abschleifen« der Gebirge,

während in den ariden Gegenden (arid: trocken, dürr) auch die Deflation feines Material wirkungsvoll über große Strecken befördert.

Das von Wasser, Eis und Wind transportierte Gesteinsmaterial lagert sich an geeigneten Stellen ab. Es bilden sich – entsprechend dem Transportmedium – marine, glaziale und äolische Sedimente. In erdgeschichtlichen Zeiträumen werden daraus Sedimentgesteine. In Form von Kalkstein, Sandstein, Schiefer, Ton u. a. finden wir heute die Dokumente für das Wirken der beschriebenen Prozesse in vergangenen Erdzeitaltern. Diese für die Erde typischen Gesteine sind sozusagen Gesteine zweiter und sogar noch höherer Generation. Wie die geologische Forschung zweifelsfrei beweisen konnte, tauchte in der Erdgeschichte häufig der Fall auf, daß die Gebirge eines Erdzeitalters im darauf folgenden fast vollständig abgetragen wurden und durch ihren in den Niederungen abgelagerten Schutt das »Baumaterial« für nachfolgende Gebirgsbildungsprozesse lieferten.

Da auch unser Nachbarplanet Mars eine dünne Atmosphäre besitzt, muß man ähnliche Prozesse auch dort erwarten. Die Fernerkundung dieses Planeten durch Raumfluggeräte, vor allem im Rahmen des »Viking«-Programms, hat diese Erwartung vollauf bestätigt. Auf den Fernsehbildern findet man z. B. überzeugende Beweise, wie der Wind die Marslandschaft gestaltet. Große Dünenfelder wurden gesichtet, in den Polargebieten des Mars fand man mehrere hundert Meter dicke Schichten äolischer Sedimente. An den Leseiten vieler Krater markieren helle »Fahnen« von windverfrachtetem Staub die Windrichtung. Sogar die Entstehung von Staubstürmen und die diversen Veränderungen der Landschaft nach ihrem Abflauen konnten im Bild festgehalten werden.

Bereits die ersten Satellitenmessungen aus dem Jahre 1971 zeigten, daß es heute auf dem Mars extrem trocken ist. Die über mehrere Jahre hinweg zur Erde übertragenen Wetterberichte der beiden »Viking«-Wetterstationen enthielten kein einziges Mal Angaben wie »Regen« oder »Schneefall«. Um so überraschender ist die Tatsache,



Flußtäler mit dem Namen Vedra Vallis (rechts) und Maja Vallis (links) auf dem Mars. In ihnen floß früher Wasser aus der Hochebene Lunae Planum in das Tiefland Chryse Planitia, in dem »Viking 1« landete.

daß man in einem breiten Gürtel beiderseits des Mars-äquators viele breite Stromtäler und zahlreiche schmale Flußrinnen findet. Die heute trockenen Flußbetten weisen oft einmündende Nebenflüsse auf und schlängeln sich gelegentlich über Hunderte von Kilometern hinweg in schönen mäanderartigen Bögen durch die Kraterlandschaft unseres Nachbarplaneten. Nichts anderes als fließendes Wasser kann das Zustandekommen derartiger Täler erklären. Manche Tiefländer des Mars, z. B. jene Tiefebene, in der die Sonde »Viking 1« landete und die heute auf den modernen Marskarten den Namen »Chryse Planitia« trägt, lassen sogar Spuren mächtiger Überflutungen erkennen. Breite, in den Untergrund eingekerbte Fließrinnen und stromlinienartig begrenzte In-

seln zeigen die Richtung des nach der Überschwemmungskatastrophe ablaufenden Wassers an.

Trotz der heutigen Trockenheit muß es also Perioden in der Marsgeschichte gegeben haben, in denen der »rote Planet« flüssiges Wasser zur Verfügung hatte, mit dessen Hilfe sich die erwähnten Erosionsstrukturen bilden konnten. Man nimmt an, daß das Wasser durch eine lokale Erwärmung (Vulkanismus) oder vielleicht auch im Rahmen einer Warmzeit, die der Planet durchlief, durch Schmelzen von Eis im Marsboden freigesetzt

Vergleich der höchsten Berge und der größten Täler des Mars mit den entsprechenden Bildungen der Erde. Vor dem Zentralteil des Riesenschildvulkans Olympus Mons sind das größte irdische Vulkanmassiv, die Insel Hawaii mit ihrem Sockel im Pazifik, und das Mount-Everest-Massiv im Himalaja abgebildet. Die kleine Kerbe in der Mitte des Querschnittes des großen Marsgrabensystems (Valles Marineris) ist der Grand Canyon in Arizona (unten). Zu beachten ist, daß die vertikale Skala doppelt (oberes Bild) bzw. viermal (unteres Bild) so groß gewählt wurde wie die horizontale.



wurde. Aber auch in den wärmeren und darum feuchteren Perioden seiner Geschichte stand dem Mars nur ein relativ bescheidenes Wasserangebot zur Verfügung. Es gibt keine Ablagerungen, die auf die Existenz von Marsmeeren hinweisen würden. Auch die Flüsse können nur kurzzeitig »in Betrieb gewesen« sein, sie wurden nämlich nicht wie die irdischen durch regengespeiste Quellen unterhalten, ebenso verwandelten sich die Tiefländer nur vorübergehend in Seen, wenn gerade viel Schmelzwasser anfiel.

Interessanterweise findet man in den Polargebieten des Mars Spuren einer großräumigen Vereisung, die möglicherweise sogar mehrmals erfolgte. Die heute beobachtbaren, jahreszeitlich veränderlichen weißen Polkappen bestehen allerdings zum überwiegenden Teil nur aus einem dünnen Belag von Kohlendäureschnee, der bei den tiefen Temperaturen aus der Atmosphäre ausfriert. Nur das Zentrum der nördlichen Polkappe ist auch heute von einer meterhohen Schneeschicht bedeckt. Gletscher wie in früheren Zeiten gibt es allerdings auch hier nicht.

Vergleicht man den Mars mit dem Merkur und dem Erdmond, dann ergibt sich der interessante Schluß, daß die von der Atmosphäre herrührenden exogenen Faktoren für die Prägung einer Planetenoberfläche offenbar erst entscheidend werden, wenn die Masse des betreffenden Himmelskörpers mindestens 10 % der Erdmasse ausmacht. Genauere Untersuchungen der Oberfläche der Venus, deren Masse ja zwischen der des Mars und der der Erde liegt, könnten in dieser Hinsicht außerordentlich aufschlußreich sein.

Die Gas- und Plasmahüllen

Gas- und Wasserknappheit auf dem Mars. Es mag befremden, daß wir die Betrachtungen über die Atmosphären der erdartigen Planeten nicht bei der Lufthülle der Erde beginnen, die wir natürlich am besten von allen kennen. Die Erdatmosphäre ist aber in chemischer Hinsicht durch ihren Gehalt an freiem Sauerstoff ein extra-

vaganter Fall, und auch das »Überangebot« an Wasser, das zur Bildung einer massiven Hydrosphäre führte, schafft besondere Bedingungen. In den Atmosphären unserer Nachbarplaneten Mars und Venus geht es offensichtlich in chemischer Hinsicht »normaler« zu als auf der Erde.

Die Luft auf unserem Nachbarplaneten Mars besteht zu 95,3 Volumenprozent aus Kohlendioxid (CO_2), den Rest bilden Stickstoff (N_2) mit 2,7 %, Argon mit 1,6 %, Sauerstoff (O_2) mit 0,13 %, Kohlenmonoxid (CO) mit 0,07 % und Wasserdampf mit 0,03 %. Der Druck an den Landeorten der »Viking«-Sonden schwankte je nach Jahreszeit zwischen 7 und 11 mbar. Nachts fiel die Temperatur am Boden bis auf -90°C und erreichte selbst im Sommer in der Mittagszeit nur etwa -30°C . Im Marsboden herrscht also Dauerfrost wie auf der Erde jenseits des Polarkreises. Es ist daher durchaus denkbar, daß der »rote Planet« über erhebliche Wasservorräte in Form von Grundeis verfügt. Der geringe Wasserdampfgehalt der Atmosphäre unterliegt wie die Temperatur starken Schwankungen. Könnte man alles vorhandene H_2O aus der Atmosphäre ausregnen lassen, so würde sich je nach Jahreszeit und Klimazone auf dem Mars nur ein »Wasserfilm« von 10 bis $80\ \mu\text{m}$ Dicke ergeben. Das ist 100mal weniger als in den Trockengebieten der Erde! Aus diesem Grunde ist auch die Tendenz zur Wolkenbildung auf dem Mars sehr gering. Vergessen wir aber trotzdem nicht, daß es in der Marsgeschichte Perioden gegeben haben muß, in denen der »Kriegsgott« so stark schwitzte, daß es regnete, daß sich kurzzeitig Flüsse bildeten und daß die Polargebiete vereisten!

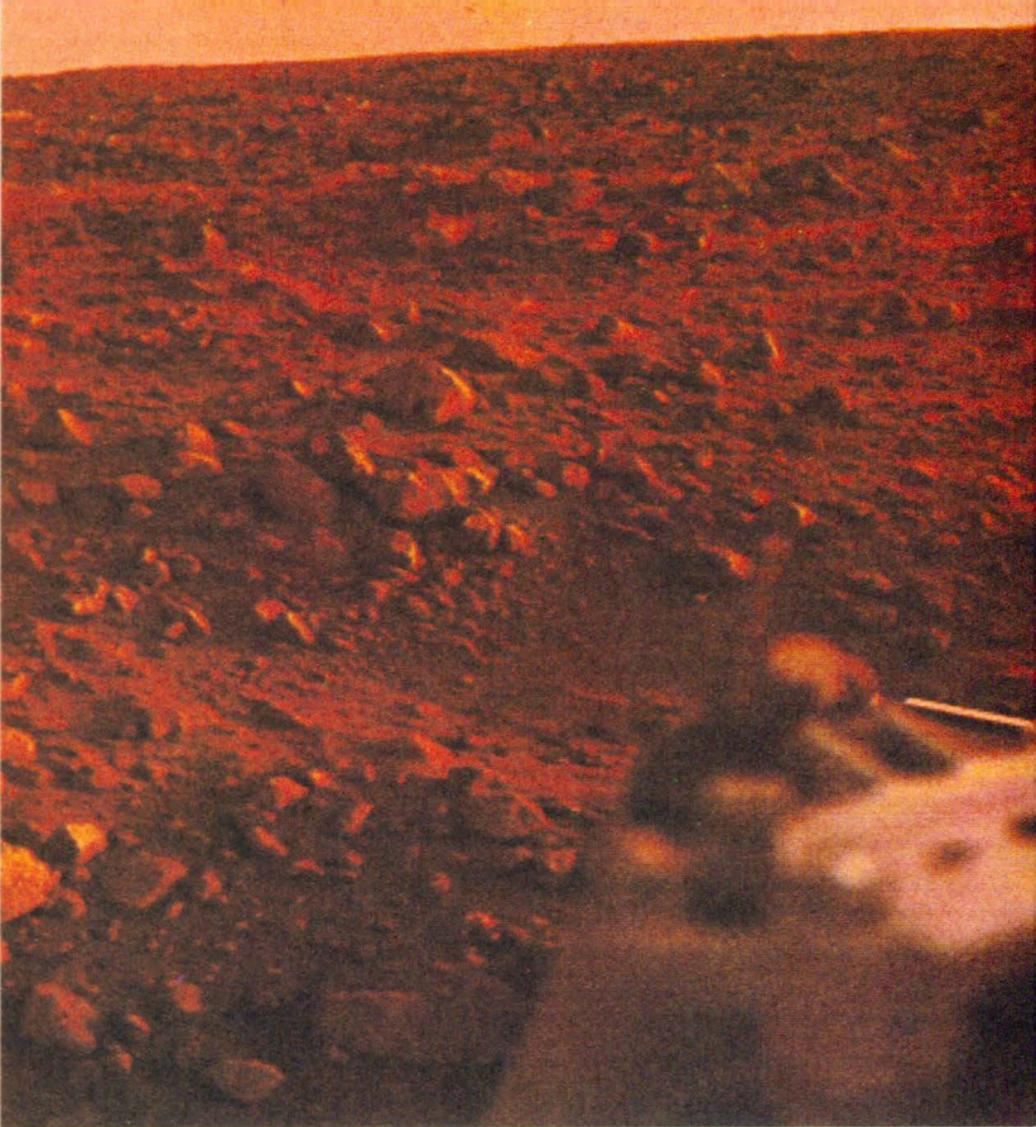
Auf die spannende Frage, ob auf dem Mars irgendwelche widerstandsfähigen Lebensformen, z. B. Mikroorganismen im Boden, existieren, gibt es bis heute keine eindeutige Antwort. Viele Experten sind in dieser Angelegenheit sehr zurückhaltend, manche sogar sehr pessimistisch geworden. Die Wissenschaftler des biologischen Programms der »Viking«-Sonden hatten zwar zunächst den Eindruck, als stünden die Sonden auf einem »Misthaufen«, so schienen die Bodenproben vor Mikroorganismen zu wimmeln. Die im Marsboden ge-

fundenen chemischen Aktivitäten flauten aber bei den Lebensnachweisexperimenten viel schneller ab, als man das von Stoffwechselfvorgängen erwartete. Außerdem gelang es nicht, im Marsboden organisches Material nachzuweisen. Es deutet alles darauf hin, daß man mit den biologischen Kleinstlabors zwar keine eindeutigen Lebensspuren, dafür aber völlig unerwartete, sehr »exotische« chemische Verhältnisse im Marsboden entdeckt hat.

Durch die Einwirkung der ultravioletten Sonnenstrahlung wurde der Marsboden wahrscheinlich hochgradig oxydiert. Seine »rostige« Farbe ist ein äußeres Zeichen für diesen Zustand. Möglicherweise wurde dadurch die oberste Schicht des Bodens so gründlich sterilisiert, daß man heute dort keine Lebensspuren mehr finden kann, obwohl es vielleicht früher tatsächlich Leben auf dem Mars gab.

Die oberen Schichten der Atmosphäre des Planeten werden ähnlich wie die der Erde von der energiereichen Sonnenstrahlung ionisiert. Im Plasma der Marsionosphäre erreichte die Dichte der freien Elektronen ihr Maximum in einer Höhe von 120 bis 130 km. Am Tage registrierte man Elektronendichten von etwa 10^5 cm^{-3} , die Nachtwerte liegen zwei Zehnerpotenzen darunter. Im Übergangsbereich zwischen Atmosphäre und Weltraum, in der Exosphäre des Mars, dominiert der Wasserstoff. Diese äußerst dünne und durch ihr Leuchten im fernen UV auffallende Wasserstoffkorona konnte bis in 20000 km Höhe nachgewiesen werden. Woher kommt diese ungewöhnliche Atmosphärenkomponente? Um diese Frage beantworten zu können, müssen wir einen kleinen Exkurs über Atmosphärenphysik einschieben.

Im »planetologischen Normalfall« besteht eine Planetenatmosphäre aus Entgasungsprodukten des Planeteninnern und davon abgeleiteten Komponenten. Wie lange das freigesetzte Gas den Planeten als Hülle umgibt, hängt davon ab, wie stark das Schwerefeld des Planeten ist (d.h., wie groß seine Masse ist) und welche Temperatur sich in der Gashülle einstellt. Je höher die Temperatur ist, um so schneller wirbeln die Gasmoleküle durcheinander, um so leichter können die schnellsten von



Der Marsboden in der Landschaft Chryse Planitia («Viking 1») bei tiefem Sonnenstand. Die zum Teil deutlich pyramidenförmigen Steine sind wahrscheinlich Windkanter. Das feine, rostbraune bis orangerote Bodenmaterial, das als dünne Decke über der Landschaft liegt, besteht hauptsächlich aus eisenreichen Tonmineralen und ist ein Verwitterungsprodukt des Marsgesteins.

ihnen die »Barriere«, die die Gravitation aufrichtet, überspringen und in den Weltraum entkommen. Da sich leichte Atome im Durchschnitt schneller bewegen als schwere, sind sie bei der »Flucht« bevorzugt. Die

schwersten Gase in einer Atmosphäre konzentrieren sich am Boden, während sich die leichtesten in Richtung Weltraum »absetzen«.

Wegen der geringen Masse des Mars können sich nur schwere Gase, z. B. Kohlendioxid und Argon, nennenswerte Zeit halten. Der bei der Zersetzung von Wasserdampf durch die ultraviolette Sonnenstrahlung frei werdende superleichte Wasserstoff geht dem Planeten ziemlich schnell verloren. Die Wasserstoffkorona des Mars ist also der »Flüchtlingstreck« der Wasserstoffatome in den Weltraum. So ganz nebenbei erfahren wir auf diese Weise, wohin das Wasser verschwindet, das von den Marsvulkanen oder aus dem Dauerfrostboden freigesetzt wird. Die CO_2 -Moleküle sind nicht so leicht von der Sonnenstrahlung »aufzuknacken« wie H_2O , aber ein Teil von ihnen wird auch zersetzt. Davon zeugt z. B. das Vorkommen von CO-Molekülen. Der in beiden Fällen, sowohl bei der Dissoziation des Wassers als auch des Kohlendioxids, anfallende Sauerstoff kann gleichfalls in den Weltraum entweichen, wenn er nicht bei der Oxydation des Oberflächengesteins fest mit dem Planeten verbunden wird.

Das glühende Venustreibhaus. Pro Flächeneinheit empfängt die Venus ungefähr doppelt soviel Sonnenlicht wie die Erde, so daß man schon seit langer Zeit auf einen ziemlich hohen Wert der mittleren Oberflächentemperatur gefaßt war. Radioastronomische Messungen enthüllten bereits Mitte der fünfziger Jahre, daß die Venusoberfläche sogar noch viel heißer sein muß, als die kühnsten Abschätzungen bis dahin ergeben hatten. Die Werte, die aus der Mikrowellenstrahlung der Venus abgeleitet wurden, waren so unglaublich hoch, daß zahlreiche Experten diesen Messungen mißtrauten. Endgültige Klarheit schufen dann Ende der sechziger Jahre die sehr erfolgreich operierenden sowjetischen Venussonden, die in die untere Atmosphäre des wolkenverhangenen Planeten vorstießen und eine wahre »Gluthölle« vorfanden.

An den Landeorten herrschten Temperaturen zwischen 450 und 470 °C, der Druck betrug je nach Höhe über NN das 85- bis 95fache des irdischen Luftdrucks.

Der Wärmeaustausch in dieser dichten Atmosphäre funktioniert so gut, daß es trotz der extrem langsamen Venusrotation (243 Tage) keine Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht gibt, ebensowenig ist es am Venusäquator heißer als in höheren Breiten. Auch jahreszeitliche Unterschiede gibt es auf der Venus nicht.

Das Gas in der unteren Venusatmosphäre besteht aus einem Gemisch von 96,4 Volumenprozent CO_2 und 3,4 % N_2 ; den Rest bilden Wasserdampf, Schwefeldioxid (SO_2), Helium und andere Edelgase und in Spuren auch Chlorwasserstoff (HCl) und Fluorwasserstoff (HF). Der gesamte Wasserdampfgehalt der Atmosphäre ergäbe in abgereinigtem Zustand ein planetenweites »Flachmeer« von rund 0,5 m Tiefe. Das ist im Vergleich zum Mars zwar sehr viel, verglichen mit den Ozeanen der Erde aber sehr wenig Niederschlagswasser.

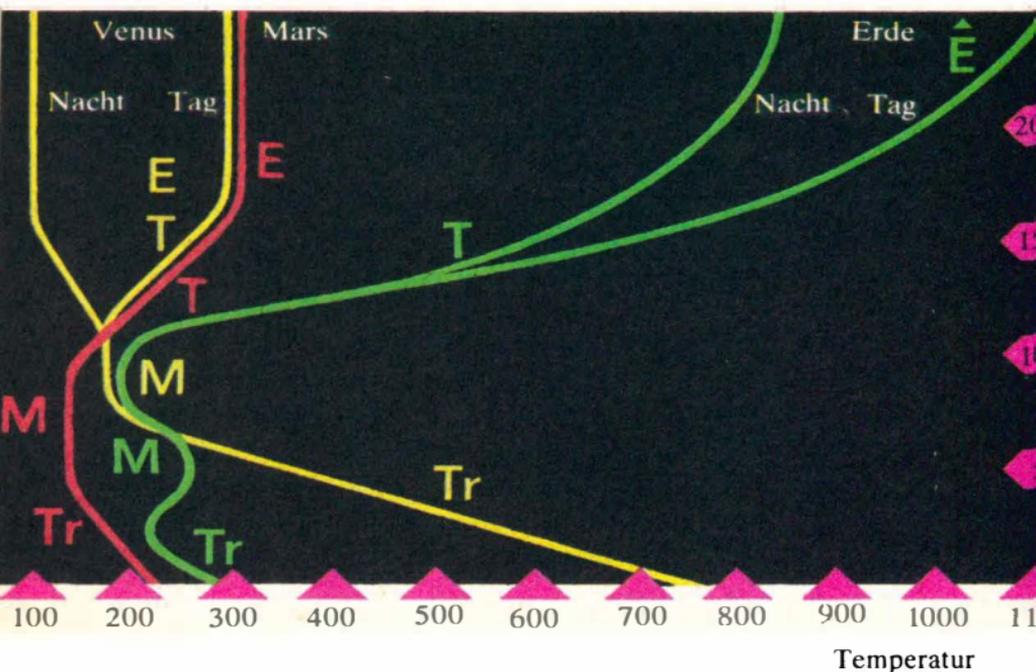
In größeren Höhen sorgt die UV-Strahlung der Sonne für zahlreiche fotochemische Reaktionen der einzelnen Atmosphärenkomponenten. So bilden sich z. B. aus dem SO_2 durch Oxydation Schwefelsäure (H_2SO_4) und durch Reduktion Schwefel; Wasserdampf wird dissoziiert, so daß auch die Venus von einer Korona entweichenden Wasserstoffs umgeben ist. Ähnlich wie beim Mars und bei der Erde sind auch die höheren Schichten der Venusatmosphäre ionisiert. Die maximale Ionenkonzentration wird am Tage in etwa 142 km Höhe erreicht.

Wegen der hohen Temperaturen der unteren Venusatmosphäre können sich Tröpfchen und Teilchen erst in weit größeren Höhen aus dem Gas ausscheiden und Wolken bilden als auf der Erde. Abgesehen von Aerosol- und Dunstschichten in geringeren Höhen, beginnt die aus mehreren Schichten bestehende Wolkendecke der Venus bei 48 km und erstreckt sich fast bis in 70 km Höhe. Die Wolken auf unserem Nachbarplaneten haben aber wenig Ähnlichkeit z. B. mit den Kumuluswolken auf der Erde, sondern sind wohl eher mit Nebelschwadern vergleichbar. Sie bestehen aus mikrometergroßen Tröpfchen aus konzentrierter Schwefelsäure und aus Schwefelpartikeln. Da sich Fluorwasserstoff chemisch an Schwefelsäure bindet, darf man in den Venuswolken sogar Fluorschwefelsäure (HSO_3F), die aggressivste

Säure der anorganischen Chemie, erwarten. Die Venuswolken bestehen damit wahrscheinlich aus der korrosivsten Flüssigkeit, die in der Natur vorkommt, und die Venussonden müssen nicht nur drucksicher und hitzefest, sondern auch säurebeständig sein.

Eine große Überraschung war die Entdeckung, daß die untere Venusatmosphäre ziemlich staubfrei ist. An der Oberfläche dieses Planeten herrscht nahezu Windstille. Mit den Anemometern der gelandeten sowjetischen Venussonden wurden nämlich nur Windgeschwindigkeiten von 0,5 bis 1 m/s gemessen. Wenn man diese Zahlen mit dem Wind auf der Erde vergleicht, muß man aber daran denken, daß die »Venusluft« am Boden rund 50mal so dicht wie unsere Luft ist und daß deswegen bereits bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten große Kraftwirkungen erzielt werden. Ab 10 km Höhe steigt dann die Windgeschwindigkeit auf der Venus ständig an. Für die mittlere Troposphäre sind Windgeschwindigkeiten um 35 m/s typisch, in Einzelfällen werden jedoch auch 60 m/s erreicht. In Wolkenhöhe wurden Werte von 100 bis 140 m/s gemessen. Hier herrscht also orkanartiger Sturm. Wie die Fernhebilder der die Venus umkreisenden oder passierenden Sonden zeigen, existiert in der Venusatmosphäre ein globales Strömungssystem, das ein äquatorparalleles Streifenmuster in der Wolkendecke erzeugt, das allerdings nur auf Aufnahmen im ultravioletten Licht sichtbar gemacht werden kann. Eine Schlüsselstellung nimmt in diesem Strömungssystem der Punkt ein, über dem die Sonne steht (subsolarer Punkt) und in dem eine sehr starke Konvektion in der Atmosphäre auftritt. Durch die genannte äquatorparallele Strömung driften die Venuswolken mit großer Geschwindigkeit westwärts, d. h. in Rotationsrichtung. Während die feste Venus 243 Tage für eine Umdrehung braucht, umrundet die Wolkendecke den Planeten in nur vier Tagen!

Die dichte Wolkendecke und die CO₂-Atmosphäre machen die hohen Temperaturen plausibel. Beide Komponenten absorbieren nämlich Infrarotstrahlung sehr gut, so daß eine ähnliche Situation wie in einem Gewächshaus entsteht. Das Sonnenlicht, das von den Wol-



Stockwerkaufbau der Atmosphären von Venus, Mars und Erde. Linear mit der Höhe abfallende Temperatur kennzeichnet die Troposphäre Tr, während in der Mesosphäre M die Temperatur ungefähr konstant bleibt. In der Thermosphäre T steigt die Temperatur mit wachsender Höhe; hier wird das Gas von der Sonnenstrahlung ionisiert (Ionosphäre). Die Exosphäre E mit konstanter Temperatur bildet den Übergang zum Weltraum.

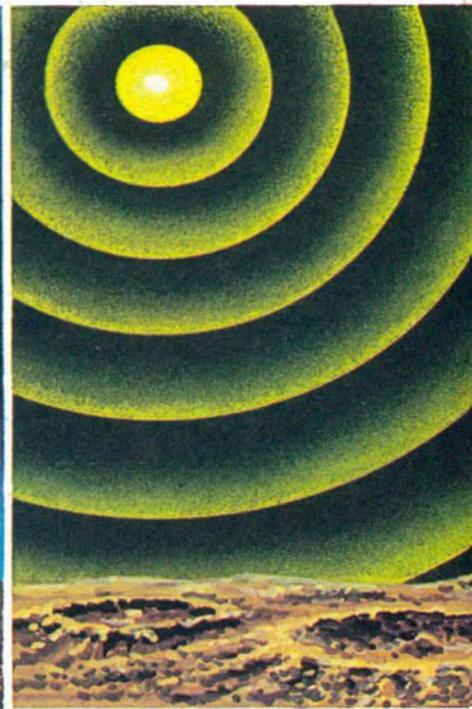
kenpartikeln gut gestreut und wenig absorbiert wird, erwärmt den Venusboden. Die vom Boden in Form von Infrarotstrahlung abgegebene Wärme wird aber vom atmosphärischen CO₂ und von den Wolken stark absorbiert und am Entweichen in den Weltraum gehindert. Genauso wirken übrigens die Glasscheiben eines Treibhauses; sie lassen das Sonnenlicht hinein, aber die Wärme nicht hinaus. Die in der Venusatmosphäre festgehaltene Wärmestrahlung bewirkt ein ständiges Aufheizen des Gases und auch des Venusbodens. Erst wenn der Venusboden so heiß geworden ist, daß er in Form von Millimeter- und Zentimeterwellen, für die Atmosphäre und Wolkendecke durchlässig sind, so viel Energie in den Weltraum zurückstrahlen kann, wie er von

der Sonne in Form von Licht erhält, stellt sich ein Gleichgewicht ein. Dieses Gleichgewicht zwischen Ein- und Ausstrahlung wird aber erst dann erreicht, wenn der Venusboden dunkelrot glüht!

Die ungewöhnliche Lufthülle der Erde. In den vorangegangenen Kapiteln lernten wir Kohlendioxid als Hauptbestandteil einer normalen Planetenatmosphäre kennen. Wie verhält es sich aber bei der Erde, in deren Lufthülle CO_2 nur mit 0,03 Volumenprozent vertreten ist und dementsprechend nur den vierten Platz in der Häufigkeitstabelle der Atmosphärenkomponenten einnimmt? Statt dessen gibt es einen hohen Anteil von freiem Sauerstoff, der jedoch ständig nachgeliefert werden muß, sonst wäre er in wenigen Jahrtausenden durch Oxydationsprozesse verbraucht. Für den massiven Nachschub dieser chemisch sehr aggressiven Komponente sorgt die irdische Biosphäre.

Beginnen wir unsere Betrachtungen über den Chemos der irdischen Lufthülle mit einem Gedankenexperiment. Wir stellen uns dazu vor, wir könnten das gesamte im irdischen Sedimentgestein, z. B. in Form von Kalziumkarbonat, gebundene CO_2 freisetzen. Das Resultat wäre ziemlich verblüffend. Die Erdatmosphäre enthielte dann rund 40mal soviel Gas wie jetzt, und es ergäbe sich, in Volumenprozent ausgedrückt, folgendes Bild der chemischen Zusammensetzung der »Luft« 97,5 % CO_2 , 2 % N_2 und 0,5 % O_2 . Ein solches Gemisch lernten wir bereits auf der Venus kennen! Im Gegensatz zur trockenen Venus konnte offenbar die feuchtere Erde große Mengen von CO_2 im Gestein chemisch binden. Durch die Photosynthese der Pflanzen wurden weitere Mengen von CO_2 »aus dem Verkehr gezogen« und zusammen mit Wasser zum Aufbau von Kohlenhydraten der lebenden Materie verwendet. Der grüne Pflanzenfarbstoff Chlorophyll war und ist dabei der entscheidende Katalysator, das Sonnenlicht die Energiequelle.

Die Photosynthese wurde von den primitiven Einzelern im Urmeer der Erde vor etwa 3,7 Mrd. Jahren »erfunden«. Erhalten gebliebenes Gestein der Kontinente vor 2 bis 3 Mrd. Jahren enthält jedoch noch Minerale

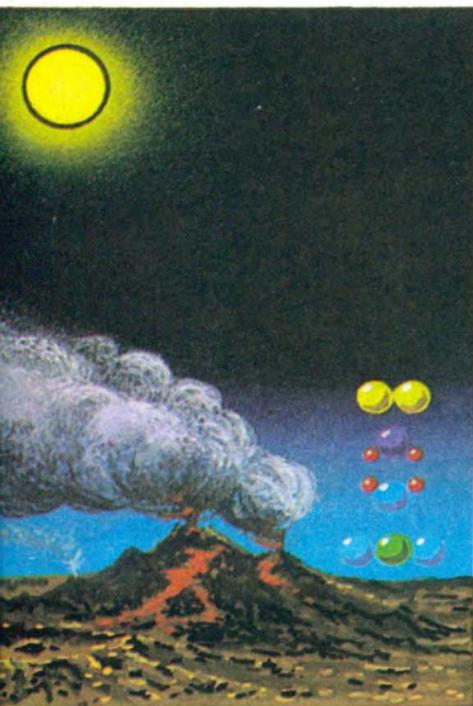


1

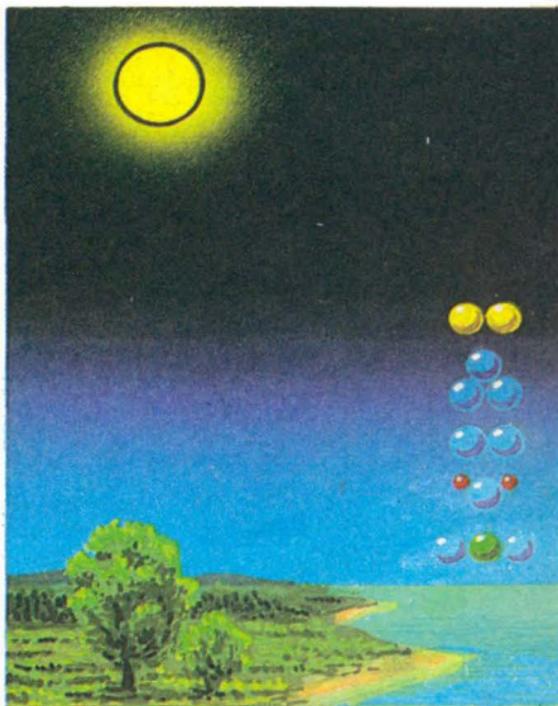
2

Die Herkunft der Erdatmosphäre. Die ursprüngliche Atmosphäre bestand aus Sonnennebelgas (1), das aber später vom Sonnenwind restlos weggeblasen wurde (2). Vulkanische Exhaleate schufen eine zweite Atmosphäre (3), die durch die Lebewesen in das heutige Gasmisch umgewandelt wurde (4).

wie Pyrit und Uraninit, die garantiert oxydiert worden wären, wenn es damals bereits freien Sauerstoff in der Erdatmosphäre gegeben hätte. Offensichtlich konnte der im Meer, z. B. durch die Photosynthese der Blaualgen, anfallende Sauerstoff noch nicht aus dem Wasser entweichen. Als maßgebliche Ursache dafür geben die Geochemiker an, daß der Sauerstoff im Meer zur Oxydation von Eisen benutzt wurde. Das in den Mineralen der ursprünglichen Erdkruste hauptsächlich in zweiwertiger Form enthaltene Eisen gelangte durch den Schlamm und das Geröll der Flüsse massenhaft ins Meer. Aus dem FeO in diesen Mineralen entstand durch Oxyda-



3



4

tion das Fe_2O_3 in den Meeresablagerungen, und der Sauerstoffkreislauf blieb vorerst im Meer »kurzgeschlossen«. Dieser Zeit verdanken wir übrigens die umfangreichsten Eisenerzvorkommen unserer Erde, ein interessantes Nebenprodukt der Entstehung des Lebens!

Die ältesten kontinentalen Rotsandsteine, in denen dreiwertiges Eisen enthalten ist (daher die rötliche Farbe), sind etwa 1,8 Mrd. Jahre alt. Offenbar war erst um diese Zeit atmosphärischer Sauerstoff verfügbar, der das Gestein der Kontinente zu oxydieren vermochte. Bevor sich jedoch freier Sauerstoff in der Atmosphäre anreichern konnte, mußte zunächst diese selbst erst einmal oxydiert worden sein. Dabei wurden wahrscheinlich Ammoniak (NH_3) zu Stickstoff (N_2), Methan (CH_4) u. a. Kohlenwasserstoffe zu Kohlendioxid und Schwefelwasserstoff (H_2S) zu Schwefelsäure bzw. zu Sulfaten oxydiert.

Das Auftreten freien Sauerstoffs in der Lufthülle be-

deutete eine Revolution in der Geschichte unseres Planeten. Es bildete sich eine Ozonschicht (O_3) aus, durch die die Erdoberfläche wirkungsvoll gegen den chemischen Einfluß der UV-Strahlung der Sonne abgeschirmt wurde. Das Leben war nunmehr wirkungsvoll gegen den »kosmischen Sonnenbrand« geschützt und konnte die Kontinente erobern. Der auf Atmung beruhende tierische Stoffwechsel war früheren Energiegewinnungsprozessen weit überlegen. Die Fauna der Erde entwickelte sich in rasantem Tempo. Während für die Entwicklung vom Einzeller zu den ersten primitiven Vielzellern fast drei Jahrmilliarden gebraucht wurden, dauerte die Entwicklung von diesen ersten vielzelligen Lebewesen bis zum Menschen nur noch ungefähr 0,7 Mrd. Jahre. Im Laufe der Erdgeschichte stellte sich dann zwischen den verschiedenen Prozessen, die die Zusammensetzung der Luft beeinflussten, z. B. Entgasung aus dem Erdinnern, Photosynthese, Atmung, Oxydation des Oberflächengesteins, Entweichen in den Weltraum, Dissoziation, jenes ungewöhnliche Gleichgewicht ein, dessen Ergebnis wir heute mit jedem Atemzug in uns aufnehmen: 78,09 (Volumen)% Stickstoff, 20,95 % Sauerstoff, 0,93 % Argon, 0,03 % Kohlendioxid.

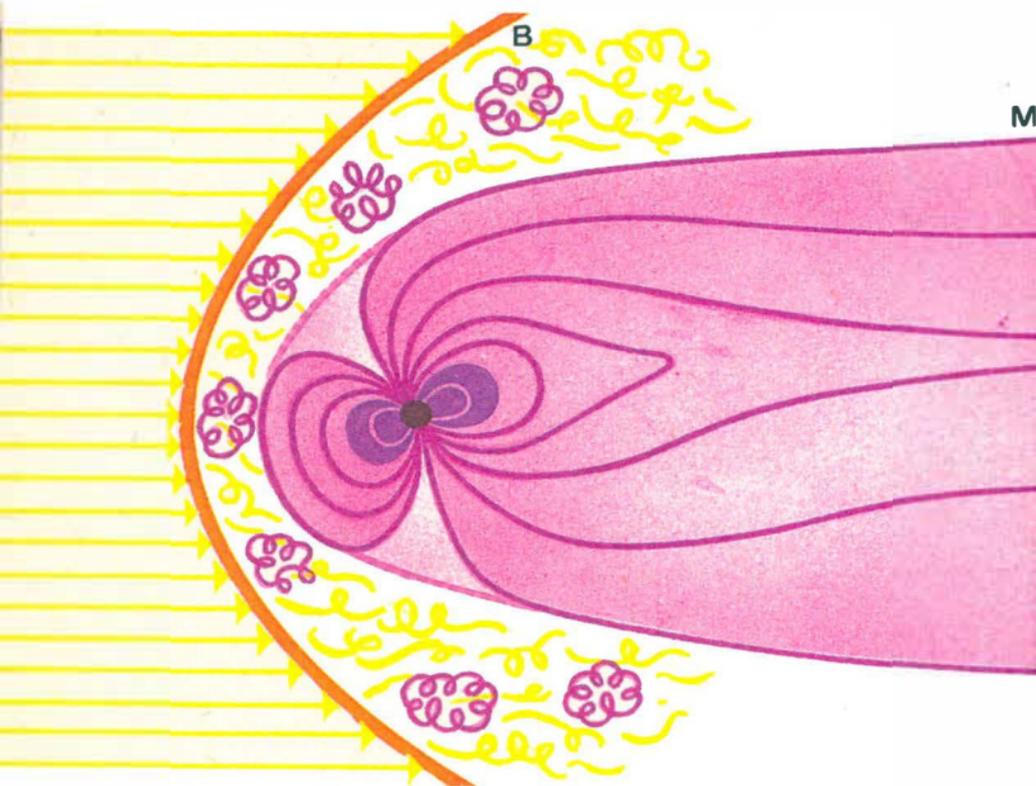
Chemische und physikalische Beschaffenheit unserer Lufthülle verändern sich allerdings mit wachsender Höhe. Die neutrale Gashülle, die dichten Schichten der bodennahen Atmosphäre, in denen sich jegliches Leben aufhält, geht zunächst in rund 65 km Höhe in ein Plasma über, weil die UV-Strahlung der Sonne dort die Luftmoleküle zu ionisieren beginnt. Es entstehen dadurch – beginnend bei 80 km Höhe – die verschiedenen elektrisch leitenden Schichten der Ionosphäre, an denen die Kurzwellen des Funkverkehrs reflektiert werden. Das Maximum der Elektronendichte wird in Höhen zwischen 200 und 300 km erreicht und liegt bei über 10^6 Elektronen pro cm^3 am Tage. Die Dichten der Ionen und Elektronen unterliegen tages- und jahreszeitlichen Schwankungen, weil sie ja von der Sonneneinstrahlung abhängig sind. Variationen der energiereichen Sonnenstrahlung, wie sie im Rahmen der Sonnenaktivität, z. B. bei Sonneneruptionen, auftreten, können kurzzeitig das

Bild der Ionosphäre drastisch verändern. Auf diese Weise nimmt unser Tagesgestirn – allerdings nur in bescheidenem Umfang – unmittelbaren Einfluß auf das irdische Geschehen. Und nicht nur hier! Denn wie wir bereits erwähnten, besitzen auch Mars und Venus Ionosphären, also »sonnenempfindliche Plasmahüllen«.

Flatternde Magnetfelder und gefangene Korpuskeln. Im Bereich des neutralen Gases der Erdatmosphäre ist die entscheidende Kraft, die auf die durcheinanderwirbelnden Moleküle einwirkt, die Schwerkraft unseres Planeten. In größeren Höhen, in denen durch die Ionisation ein Plasma vorliegt, kommt das Magnetfeld als dirigierender Faktor des mittleren Bewegungsverhaltens der geladenen Teilchen hinzu. Man nennt die Einflußzone des Magnetfeldes die Magnetosphäre der Erde.

Da ein Magnetfeld nur auf geladene Teilchen Kraftwirkungen ausüben kann, beginnt die Magnetosphäre bereits im Bereich der Ionosphäre. Besonders interessant werden die Verhältnisse in der Magnetosphäre erst jenseits der Exosphäre, in Höhen über 2000 km, wo man vor dem Jahre 1958 nur leeren Weltraum vermutete. Die ersten künstlichen Erdsatelliten belehrten die Geophysiker aber eines Besseren. Man entdeckte nämlich in diesen Höhen ein bis dahin nicht gekanntes – lediglich von einigen Experten vermutetes – Phänomen, den Strahlungsgürtel der Erde.

Der Strahlungsgürtel besteht aus Protonen und Elektronen, die im irdischen Magnetfeld »gefangengehalten« werden. Mit Geschwindigkeiten von einigen zehntausend Kilometern je Sekunde rasen diese Teilchen zwischen den beiden Polen hin und her. Dabei bewegen sie sich auf Schraubenbahnen um die Kraftlinien des Magnetfeldes, von denen sie gleichsam festgehalten werden. In den Äquatorbereichen wird die Schraubenbahn weit auseinandergezogen – sie ähnelt dann einer stark gedehnten Spiralfeder –, polwärts rücken die Schraubenwindungen immer enger zusammen. In einem charakteristischen Abstand vom Pol, dem sogenannten Spiegelpunkt, wird der »Vortrieb« der Schraube zu



Schnitt durch Magnetosphäre und Strahlungsgürtel der Erde. Die Wechselwirkung des Sonnenwinds mit dem irdischen Magnetfeld sorgt für eine klar definierte Grenze der Magnetosphäre, die Magnetopause M, und die Ausbildung einer Stoßfront, der sogenannten Bugstoßwelle B. Zwischen B und M befindet sich eine Schicht heißen Plasmas mit turbulenten Magnetfeldern. Die magnetischen Feldlinien und der Strahlungsgürtel (violette Fläche) werden auf der Tagseite an die Erde herangedrückt, während sich auf der Nachtseite der Magnetschweif ausbildet.

Null; die Teilchen kreisen dort kurzzeitig auf der Stelle um die Feldlinie und kehren um. Die eng gewickelte Schraube wird nunmehr äquatorwärts wieder auseinandergezogen. Bei der Annäherung an den anderen Pol wiederholt sich der beschriebene Prozeß, so daß die Partikeln zwischen den Spiegelpunkten hin und her geworfen werden.

Von den Teilchendetektoren der Satelliten werden

diese Partikeln als eine spezielle Korpuskularstrahlung registriert, daher die Bezeichnung Strahlungsgürtel. Schnelle Protonen mit Energien von fast 100 MeV treten am häufigsten 3000 bis 4000 km über dem Äquator auf. Sie sind auf einen torusförmigen Raum um die Erde, der sich bis maximal 40° beiderseits des Äquators erstreckt, konzentriert. Diese durch schnelle Protonen gekennzeichnete Schale bildet den inneren van Allenschen Gürtel. Das Häufigkeitsmaximum der Elektronen mit Energien über 40 keV liegt zwischen 14000 und 20000 km Höhe. Dieser äußere Van-Allen-Gürtel, im Jahre 1958 durch van Allen anhand von Meßergebnissen künstlicher Erdsatelliten entdeckt, erstreckt sich bis in große Breiten, weil die Spiegelpunkte für die Elektronen anders als für die Protonen ziemlich dicht über den Magnetpolen liegen. Energieärmere, also langsamere Elektronen, findet man im Gesamtgebiet des Strahlungsgürtels.

Die geometrische Beschaffenheit des Strahlungsgürtels ist auf der Tag- und der Nachtseite der Erde verschieden. Von der Sonne geht nämlich ein Strom heißen Plasmas, der sogenannte Sonnenwind, aus, der Magnetfelder mit sich führt. Der mit einer Geschwindigkeit von durchschnittlich 400 km/s »wehende« Sonnenwind staut sich wegen der magnetischen Wechselwirkung mit dem Kraftfeld unseres Planeten im Abstand von etwa 9 Erdradien (in Richtung zur Sonne) auf und umströmt dann die Magnetosphäre wie ein festes Hindernis. Unter dem Druck des Sonnenwindes wird die Magnetosphäre ziemlich deformiert. Auf der Tagseite werden die magnetischen Feldlinien zusammengedrückt, so daß die van Allenschen Gürtel dichter an die Erde heranrücken. Auf der Nachtseite der Erde wird die Magnetosphäre hingegen extrem auseinandergezogen. Es kommt dadurch zur Ausbildung eines regelrechten »Magnet-schweifes«, der bis in Mondentfernung nachweisbar ist und dessen Feldlinien wie Fahnen im Winde »flattern«.

Da der Sonnenwind je nach »Großwetterlage« in der Sonnenatmosphäre von einer »steifen Brise« zu einem »Orkan« werden kann, unterliegen auch die Störungen

der irdischen Magnetosphäre großen Schwankungen. Noch empfindlicher als der Plasmastrom des Sonnenwindes wirkt sich allerdings die Korpuskularstrahlung der Sonne aus, also jene schnellen Protonen und Heliumkerne, die rund zehnmals schneller als die Teilchen des Sonnenwindes fliegen und bei starken Eruptionen ausgeschleudert werden. Sie lösen geomagnetische Stürme aus, d. h., sie verursachen starke Schwankungen des Magnetfeldes, die man am »Tanzen« der Kompaßnadeln eindrucksvoll verfolgen kann. Diese energiereichen Teilchen lassen sich nämlich nicht ohne weiteres vom Magnetfeld der Erde abhalten, sondern können bis in die Atmosphäre vorstoßen, wo sie z. B. Polarlichter auslösen.

Unter den erdartigen Planeten besitzen nur noch der Merkur und wahrscheinlich der Mars Magnetosphären. Verglichen mit der Erde sind die Magnetfelder dieser Planeten aber ziemlich schwach. Daß die Venus kein meßbares Magnetfeld hat, hängt wahrscheinlich mit ihrer langsamen Rotation zusammen. Imposante Magnetosphären finden wir aber im Reich der jupiterartigen Planeten, dem wir uns jetzt zuwenden wollen.

Die Stiefgeschwister der Erde

Der innere Aufbau der jupiterartigen Planeten

Planet ist nicht gleich Planet. In der Abstandsreihe der Planeten von der Sonne beginnt jenseits der erdartigen das Reich der jupiterartigen Planeten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun. Wir lernen hier völlig andere Planetentypen kennen, die wir, um bei unserem Vergleich zu bleiben, bestenfalls »Stiefgeschwister der Erde« nennen können. Lassen wir zunächst die Beobachtungsdaten sprechen.

Jupiter und Saturn imponieren durch ihre Massen und Größen, wir nennen sie daher Riesenplaneten. Im »Leib« von Jupiter vereinigen sich 318 Erdmassen, Saturn besitzt 95mal soviel Masse wie unser Planet. Im Gegensatz zu diesen gewaltigen Werten sind aber die mittleren Dichten der beiden Riesen verblüffend niedrig; die von Jupiter beträgt nur $1,3 \text{ g/cm}^3$, die Saturndichte liegt mit $0,7 \text{ g/cm}^3$ sogar unter der des Wassers. Da unter dem Gewicht der enormen Massen das Material dieser Planeten unvergleichlich stärker komprimiert sein muß als das der erdartigen Planeten, deuten diese winzigen Dichten auf ein extrem leichtes Baumaterial hin. Die leichtesten »Baustoffe«, die zur »Konstruktion« von Himmelskörpern zu Verfügung stehen, sind Wasserstoff und Helium, die häufigsten Elemente im Weltall, aus denen die Sterne aufgebaut sind. Die Spektralanalyse des Atmosphäregases der Riesenplaneten bestätigt, daß zumindest in den äußeren Schichten diese beiden

Elemente dominieren. Die Riesenplaneten besitzen daher mit großer Wahrscheinlichkeit eine ähnliche chemische Zusammensetzung wie die Sonne.

Die Planeten Uranus und Neptun vereinigen nur 15 bzw. 17 Erdmassen in sich und besitzen mittlere Dichten von 1,2 bzw. 1,7 g/cm³. Bestünden sie wie die beiden Riesenplaneten hauptsächlich aus H und He, so würden sich, wie theoretische Berechnungen zeigen, weit niedrigere mittlere Dichten ergeben. Auf Grund ihrer kleineren Masse können sie nämlich ihr Material bei weitem nicht so stark »verdichten« wie Jupiter und Saturn und müssen darum auch merkliche Mengen schwereren Baumaterials enthalten. Aus kosmochemischen Gesichtspunkten bieten sich die in der Häufigkeitstabelle nach H und He folgenden Elemente C, N und O an. Wahrscheinlich treten sie in Form ihrer Wasserstoffverbindungen Methan (CH₄), Ammoniak (NH₃) und Wasser (H₂O) auf und bilden eine Mischung verschiedener »Eise«. Neben Planeten aus »Erdmaterial« (Eisen und Gestein) und solchen aus »Sonnenstoff« (Wasserstoff und Helium) gibt es offenbar auch »Eisplaneten«. Daß z. B. H₂O-Eis tatsächlich ein Baustoff von Himmelskörpern ist, hat die Erforschung der großen Monde der Riesenplaneten gezeigt.

Wenn sich auch Uranus und Neptun in Größe und stofflichem Aufbau etwas von Jupiter und Saturn abheben, so ist doch der Verwandtschaftsgrad dieser vier Planeten untereinander weit enger als der zu den erdartigen Planeten. Wir fassen daher auch die »Stiefgeschwister« der Erde zu einer Planetengruppe zusammen und benennen sie nach dem Prototyp Jupiter.

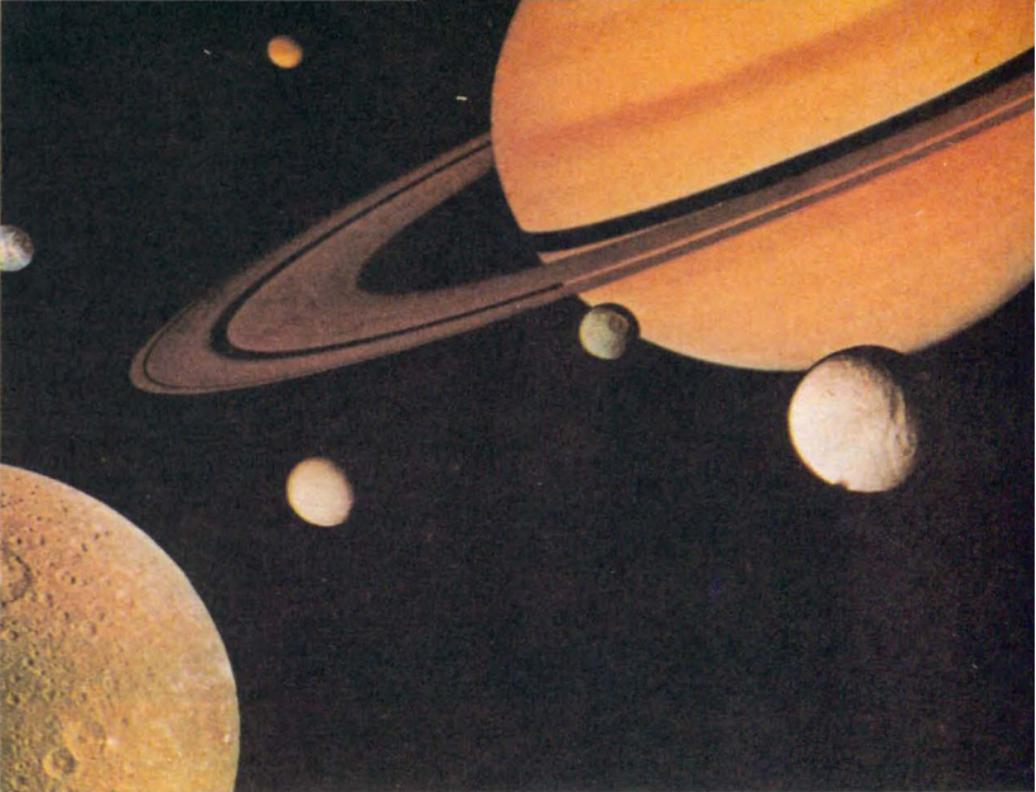
Die jupiterartigen Planeten rotieren schneller als die erdartigen und sind darum auch stärker abgeplattet. Ihr Inneres ist größtenteils flüssig und produziert – mit Ausnahme des Uranus – eine beträchtliche Menge an Wärme, so daß diese Himmelskörper weit mehr Energie in den Weltraum abgeben, als sie in Form von Sonnenlicht empfangen. Sie besitzen ausgedehnte Atmosphären mit dichten Wolkendecken und weisen – wahrscheinlich wiederum mit Ausnahme des Uranus – starke Magnetosphären auf. Charakteristisch für sie sind weiterhin



Jupiter mit seinen Monden Io (links) und Europa, die beide etwa erdmondgroß sind. Der Große Rote Fleck in der südlichen tropischen Zone des Jupiters verursacht eine große Ausbeulung in das darüber liegende südliche Äquatorband hinein, das aus den beiden dunklen Streifen besteht. Daran schließt sich die breite Äquatorzone an. Im unteren Teil des Bildes sind zahlreiche kleinere Flecke erkennbar.

Ringe und Satellitensysteme. Hier nimmt wahrscheinlich der Neptun die Außenseiterposition ein, denn bei ihm wurde bisher trotz intensiven Suchens noch kein Ring gefunden, und seine zwei Monde bewegen sich auf recht ungewöhnlichen Bahnen.

Mit einer Masse von weniger als 2 Promille von der unseres Planeten und einer Größe, die ungefähr der des Erdmondes entspricht, ist der Pluto der »Winzling« unter den Planeten des Sonnensystems. Auch er besteht aus sehr leichtem Material, möglicherweise aus festem Methan, wie es an seiner Oberfläche spektroskopisch gefunden wurde. Die größte »Rarität« dieses Planeten ist sein extrem großer Mond Charon. Das Massenverhältnis Charon/Pluto ist mit 1:9 das mit Abstand größte Verhältnis, das ein Trabant zu seinem Planeten bildet;



Wie das Bild eines Malers, mit dem man einen utopischen Roman illustrierte, mutet diese Montage des Saturnsystems aus »Voyager 1«-Bildern an.

es ist neunmal größer als der bisherige »Rekordhalter«, das Massenverhältnis Mond/Erde. Die Gezeitenwechselwirkung dieses Paares ist so groß, daß sogar Pluto seinem Mond immer die gleiche Seite zuwendet, weil seine Rotation von Charon so lange gebremst wurde, bis sie mit dem Bahnlauf des Mondes synchronisiert war.

Planetenriesen aus Superleichtmetall. Chemisch gesehen, bestehen die beiden größten Planeten, Jupiter und Saturn, zu etwa 80% aus flüssigem Wasserstoff. Sie sind gigantische, durch die schnelle Rotation merklich verformte »Wasserstofftropfen«. Gegenwärtig ist noch unbekannt, in welcher Tiefe unter der undurchsichtigen Wolkendecke der planetenumspannende Ozean aus flüssigem H_2 beginnt. Bei irdischem Luftdruck wird mole-

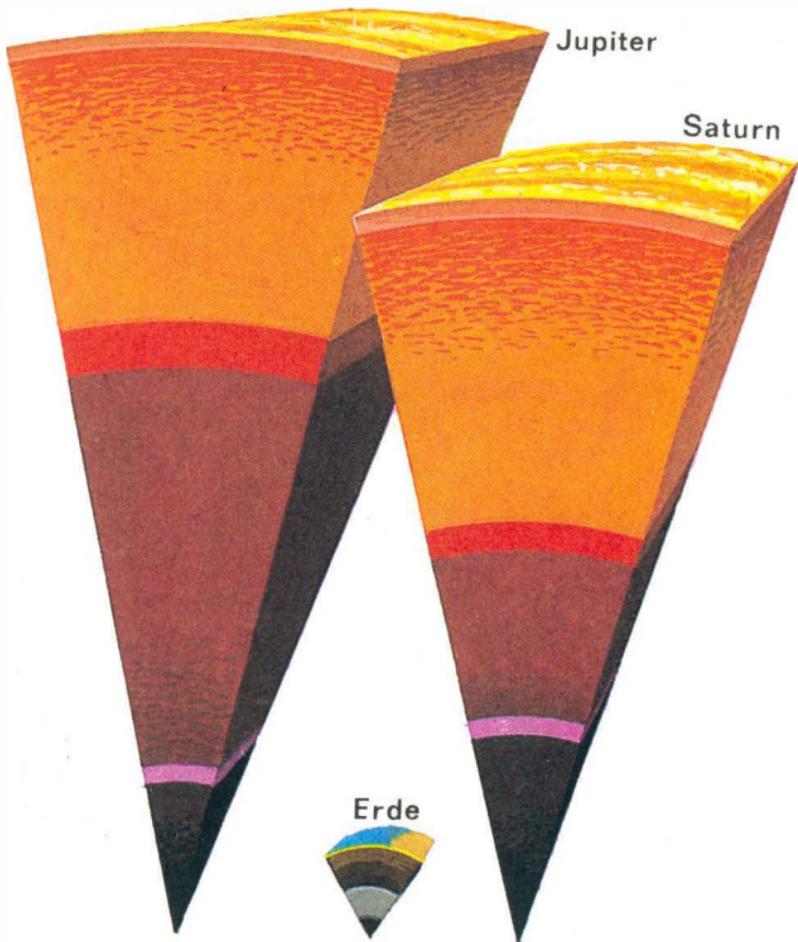
kularer Wasserstoff erst bei -253°C flüssig, am Boden der Atmosphären von Jupiter und Saturn herrscht aber mindestens das 1000fache an Druck, so daß die Verflüssigung des Wasserstoffs bereits bei viel höheren Temperaturen erfolgt.

Bei einem Druck zwischen 250 und 300 Gigapascal (dem 2,5- bis 3-Millionenfachen des irdischen Luftdruckes) ändert der Wasserstoff in sehr grundlegender Weise seine Eigenschaften. Unter diesem gewaltigen Druck »zerbricht« nämlich die chemische Bindung zwischen den H-Atomen, und die Elektronen der Wasserstoffatome »vergessen« ihre Zugehörigkeit zu einzelnen Atomen und entfalten ihr »Eigenleben«. Die Physiker sprechen von einem »entarteten« Elektronengas, wie es für Metalle charakteristisch ist. Aus dem Isolator Wasserstoff ist somit eine elektrisch leitende, metallische Form dieses Elements geworden, die wir symbolisch mit H^+ abkürzen wollen. Metallischer Wasserstoff repräsentiert das leichteste in der Natur vorkommende Leichtmetall, das im Laboratorium wegen des enormen Druckaufwandes nur sehr kurzzeitig dargestellt werden kann.

Beim Jupiter erfolgt der Übergang H_2/H^+ bereits in einer Tiefe zwischen 17 000 und 20 000 km, beim Saturn allerdings erst zwischen 36 000 und 40 000 km. Während Jupiter einen mächtigen Mantel aus metallischem Wasserstoff besitzt, der fast 40 000 bis 50 000 km dick ist, weist Saturn nur eine etwa 10 000 bis 15 000 km dicke Schale aus diesem interessanten Metall auf.

Wie die Berechnung theoretischer Planetenmodelle zeigt, müssen beide Himmelskörper innerhalb der H^+ -Zone im Planetenzentrum kleine schwere Kerne besitzen, die aus dem für die erdartigen Planeten typischen Material zu bestehen scheinen. Beim Saturn denkt man auch an einen Eiskern. Die Massen dieser festen Kerne betragen beim Jupiter rund 10, beim Saturn 15 bis 20 Erdmassen. Ihre Oberflächen sind die eigentlichen festen Planetenoberflächen. Würde man nämlich auf dem Jupiter oder dem Saturn einen Stein fallen lassen, dann würde er so lange in die Tiefe sinken, bis er die Kernoberfläche erreicht.

Daß die beiden Riesenplaneten durchweg flüssig



Der innere Aufbau der Riesenplaneten. Die orangefarbenen Schalen stellen flüssigen molekularen, die purpurfarbenen flüssigen metallischen Wasserstoff dar. Die dunklen Gebiete im Planetenzentrum sind feste Kerne aus schweren Elementen.

sind – natürlich mit Ausnahme des Kerns –, hängt in erster Linie damit zusammen, daß ihr Inneres so heiß ist, daß trotz des ungeheuren Druckes der Schmelzpunkt des metallischen Wasserstoffs nicht unterschritten wird. Nach modernen Modellierungen muß die Temperatur im Planetenzentrum weit höher als 10000°C sein, damit die große Wärmestrahlung beider Planeten bestritten werden kann. Die Temperatur ist aber auf jeden Fall viel zu niedrig, als daß Kernfusionen wie im Innern

eines Sterns, z. B. der Sonne, ablaufen könnten. Trotz ihrer sonnenähnlichen chemischen Zusammensetzung sind beide Himmelskörper also nicht als ausgekühlte oder irgendwie »verunglückte« Sterne anzusehen. Dazu ist ihre Masse zu klein. Die Wärmeabstrahlung wird nicht aus Kernenergie gedeckt, sondern aus dem Vorrat von in Wärme umgewandelter Energie des Schwerefeldes, den sich die Planeten bei ihrer Entstehung anlegten.

Alle bisher beschriebenen inneren Eigenschaften der beiden Riesenplaneten beruhen auf Modellrechnungen, die die Realität sicherlich noch nicht so gut darstellen wie die Modellerde der Geophysiker. Anders als bei der Erde verschaffte man sich die Zustandsgleichung des Materials dieser Planeten zum großen Teil durch theoretische Berechnungen, weil es noch kaum empirische Daten gibt. Glücklicherweise ist metallischer Wasserstoff ein äußerst einfaches Metall, so daß dieses Verfahren einigermaßen zuverlässige Ergebnisse liefert.

Sicher ist, daß die extrem »locker« aufgebauten Riesenplaneten mit ihren geringen Dichten zu einem beim Jupiter sogar beträchtlichen Teil aus Metall bestehen. Dieses superleichte Leichtmetall, das wegen der hohen Temperaturen in geschmolzenem Zustand vorliegt, ist eine der Spezialitäten dieser Planeten, die es anderswo im Sonnensystem nicht gibt. Die äußeren Planeten Uranus und Neptun verfügen sicherlich nicht über metallischen Wasserstoff. Es ist aber möglich, daß bei ihnen andere durch Druck metallisch gewordene Stoffe auftreten, z. B. metallisches Ammonium (NH_4^+). Der innere Aufbau dieser Planeten ist aber noch wenig erforscht und sehr problematisch. Ein chemisches System aus Wasserstoff, Helium, Neon und flüssigen oder gefrorenen Wasserstoffverbindungen von Sauerstoff, Kohlenstoff, Stickstoff u. a. unter hohen Drücken ist verständlicherweise bedeutend komplizierter als das ziemlich »einfache« H-He-Substrat bei den Riesenplaneten.

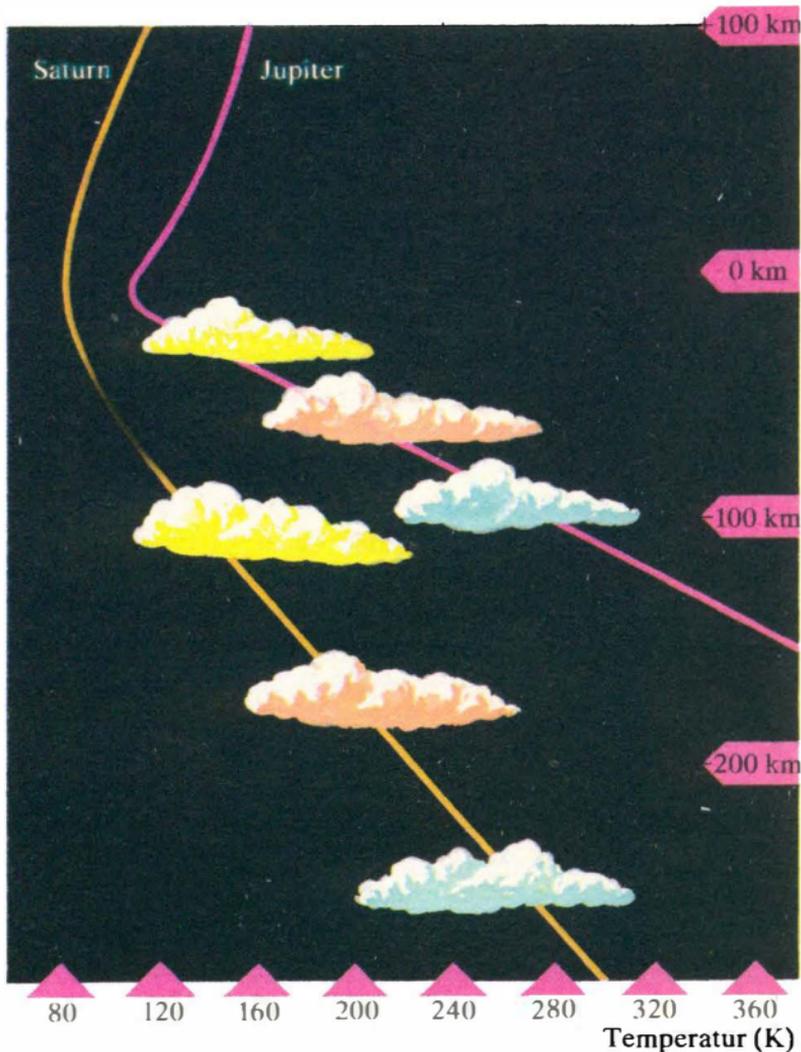
Bei den erdartigen Planeten ließen wir dem Kapitel über die innere Struktur Betrachtungen über die Oberflächenbeschaffenheit folgen, die sich jedoch vorerst bei den jupiterartigen Planeten erübrigen. Wir wissen ganz

einfach noch nichts darüber, wie die Oberflächen dieser kosmischen Wasserstofftropfen bzw. Eisbälle aussehen. Was wir bei diesen Himmelskörpern sehen, mit astrophysikalischen Meßmethoden und mit dem ausgeklügelten Bordinstrumentarium von Planetensonden nachweisen können, sind atmosphärische Phänomene, physikalische Prozesse in den Magnetosphären und Eigenschaften der Satelliten bzw. Satellitensysteme. Diesen Erscheinungen wenden wir uns jetzt der Reihe nach zu.

Die Atmosphären und Magnetosphären

Dunstkugeln oder Gasozeane? Ins Deutsche übersetzt heißt Atmosphäre schlicht und einfach »Dunstkugel«. Das klingt ziemlich harmlos. Was sich physikalisch hinter dem Begriff Planetenatmosphäre verbergen kann, lernten wir bereits am Beispiel der dichten und heißen Gasschicht mit massiver Wolkenbildung, die unseren Nachbarplaneten Venus einhüllt, ausführlich kennen. Bei den jupiterartigen Planeten müssen wir die Ansprüche an unsere Vorstellungskraft weiter »hinaufschrauben«. Die dichten Schichten dieser Atmosphären haben Mächtigkeiten von wahrscheinlich einigen hundert Kilometern.

Aber nicht nur die Dimensionen oder die Gasmengen liegen um Größenordnungen über denen unseres Planeten, sondern auch die physikalischen Bedingungen in diesen »Gasozeanen« sind entsprechend extrem. Nur an den Oberseiten der Wolkendecken herrschen Drücke, die mit dem irdischen Luftdruck am Boden vergleichbar sind. Allerdings sind die Temperaturen dort sehr viel niedriger als in der irdischen Wolkendecke. Die oberste Wolkenschicht weist auf dem Jupiter eine Temperatur von etwa -120°C auf, beim Saturn liegt der Wert bei etwa -150°C . Am »Boden« der Jupiteratmosphäre erreichen die Drücke die Größenordnung des tausendfachen irdischen Luftdruckes; das Gas verhält sich wegen seiner großen Dichte ähnlich widerstrebend wie eine Flüssigkeit. Wegen des großen Gaswiderstandes würden alle Gegenstände nur langsam und mit fast gleichförmiger



Temperaturverläufe und Wolkenhöhen in den Troposphären von Jupiter und Saturn. Der Nullpunkt der Höhenskala wurde willkürlich auf das Druckniveau von 100 mb (10^4 Pa) gelegt. Die gelben Wolken bestehen aus Ammoniak, die orangefarbenen aus Ammoniumhydrogensulfid, die blauen aus Eiskristallen und Wassertröpfchen. Beim Saturn »hängen« die Wolken tiefer in der Troposphäre als beim Jupiter.

ger Geschwindigkeit fallen. Die Fallgeschwindigkeit hinge empfindlich von der Masse und von der Form der Körper ab.

In chemischer Hinsicht unterscheiden sich die Atmo-

sphären der jupiterartigen Planeten markant von denen der erdartigen. Das atmosphärische Gas besteht bei den Riesenplaneten hauptsächlich aus Wasserstoff und Helium, denen Ammoniak, Methan und andere Kohlenwasserstoffe, Wasserdampf sowie Kohlenmonoxid und Phosphin (PH_3) beigemischt sind. Neben diesen Hauptkomponenten vermutet man eine große Anzahl weiterer Gase als Bestandteile. Bei Uranus und Neptun tritt vor allem Methan stark in Erscheinung. Während sich bei den erdartigen Planeten beim Übergang Planeteninneres/Atmosphäre der Chemismus sprunghaft ändert – über Silikatgestein befindet sich beim Mars z. B. ein $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-Ar}$ -Gemisch –, bleibt bei den Riesenplaneten die chemische Zusammensetzung im wesentlichen gleich. Nur die Dichte erleidet beim Phasenübergang flüssig/gasförmig einen leichten Sprung. Die Flüssigkeit an der Oberfläche und das hochkomprimierte Gas der Atmosphäre sind miteinander im Gleichgewicht. Im Mittel verdampft genausoviel Oberflächenmaterial, wie Atmosphärenmaterial kondensiert. Bei den erdartigen Planeten gibt es solche Gleichgewichte nur zwischen einzelnen Komponenten, z. B. zwischen dem CO_2 der Marspolkappen und dem atmosphärischen CO_2 oder zwischen dem Wasser der irdischen Hydrosphäre und dem atmosphärischen Wasserdampf.

Wolkenwelten mit Riesenwirbelstürmen und Superorkanen. Über die in den mächtigen Atmosphären der jupiterartigen Planeten ablaufenden Vorgänge erreichen uns nur kümmerliche Informationen. Sie sind zu gewinnen, indem man die an den »Oberflächen« der Gasozeane »schwimmenden« Wolkenmassen, die jeden Einblick in tiefere Gefilde verwehren, beobachtet.

Jedem Planetenbeobachter ist das »Streifengesicht« des Jupiters ein Begriff. Helle, äquatorparallele Streifen – als »Zonen« bezeichnet – wechseln mit dunkleren Bändern ab, die auch gelegentlich »Gürtel« genannt werden. Zonen und Bänder erhielten Namen, die von den entsprechenden irdischen Klimazonen entlehnt sind. Es gibt eine Äquatorzone, an die sich jeweils ein nördliches und ein südliches Äquatorband, eine nördli-

che und eine südliche tropische Zone und entsprechend gemäßigte und arktische Bänder und Zonen anschließen.

Seit Jahrhunderten beobachtete man die unregelmäßig begrenzten, in Breite, Helligkeit und Farbton variierenden Wolkenformationen. Aus ihrer schnellen Veränderlichkeit konnte man auf mächtige Strömungen in west-östlicher Richtung schließen. So wurden äquatoriale Westwinde von Orkanstärke, die Spitzengeschwindigkeiten von 500 km/h erreichen, nachgewiesen. Unter dem Einfluß der schnellen Rotation wird jede vertikale in eine horizontale Strömung umgebogen. Diese West-Ost-Strömungen sind letztlich auch die Ursache der Bänderung. Je nachdem, ob die Strömung schneller oder langsamer als die durch die Planetenrotation vorgegebene Geschwindigkeit ist, spricht man von einem West- oder von einem Ostwind.

Es blieb dem Raumflugzeitalter vorbehalten, auch die dritte Dimension und das genaue Strömungsmuster in der gigantischen Wolkenlandschaft des Jupiters sichtbar zu machen. Mit Hilfe der Temperaturmessungen der »Pioneer«- und »Voyager«-Sonden konnte man nämlich ermitteln, daß die Wolken der Zonen höher liegen und kühler sind als die der Bänder. Letztere sind daher als Unterbrechungen in der obersten Wolkendecke interpretierbar, durch die der Blick auf eine zweite, tiefer liegende, dunkler bzw. »farbiger« erscheinende und wärmere Schicht von Wolken fällt. Die Auswertung des »Voyager«-Bildmaterials enthüllte ein Muster von abwechselnden West- und Ostwinden, wobei die Geschwindigkeitsspitzen immer an den Grenzen der Streifen auftreten.

Es sind also nicht nur die Temperatur- und Höhenunterschiede und die durch die verschiedene Färbung zum Ausdruck kommende chemische Verschiedenheit, die das Muster der Zonen und Bänder charakterisieren, sondern auch die Windtätigkeit unterstreicht das Streifenmuster.

Die wohl verblüffendste Erscheinung in der »Wolkenwelt« des Jupiters ist der Große Rote Fleck (GRF) in der südlichen tropischen Zone. Dieser seit drei Jahrhun-



Der Große Rote Fleck, ein gigantischer Wirbelsturm von der Größe der Erdoberfläche. Die weißen und bläulichen ovalen Flecken sind ähnliche Gebilde.

dernten bekannte, meist deutlich rötliche – zeitweise aber auch sehr »ausbleichende« – ovale Fleck von der Größe der Erdoberfläche »schwimmt« fast ortsfest in der Jupiteratmosphäre. Bei dieser Erscheinung handelt es sich offensichtlich um einen Riesenwirbel, der sich in sechs Tagen einmal im Gegenuhrzeigersinn dreht und dessen Wolkenspirale noch höher als die Zonen aus der allgemeinen Wolkendecke herausragt. Was diesen Wirbelsturm von einem irdischen Hurrikan unterscheidet, sind nicht nur seine gewaltigen Dimensionen, sondern auch seine lokale »Verankerung« in der Jupiteratmosphäre und vor allem seine zeitliche Stabilität, die den Fachleuten große Rätsel aufgeben. Die Nahaufnahmen der Jupitersonden haben übrigens zahlreiche weitere Wirbel,

kleinere »Geschwister« des GRF von meist weißlicher Färbung und wahrscheinlich kürzerer Lebenszeit, enthüllt.

Zahllos sind die strukturellen Einzelheiten und Ereignisse, die in den Zonen und Bändern entdeckt wurden. In der Äquatorzone beobachtet man z. B. schnelle Aufhellungen durch die Bildung weißer Wolken, die sich fächerartig wie helle Rauchfahnen ausbreiten und eine Länge von mehreren zehntausend Kilometern erreichen. Auf den neuen Jupiterkarten bilden sie ein auffälliges planetenumspannendes System. Ein anderes globales System bilden langgestreckte braune Flecken, die wärmer als ihre Umgebung sind, deren Natur aber unbekannt ist. In mehreren Zonen bilden die hellen Wolken ein Fischgrätenmuster, in den Bändern beobachtet man farbige Wolken, die sich wie Schlieren von Zigarettenrauch winden. Überall in der Jupiteratmosphäre sieht man es wallen, quirlen und strömen, ein Beobachter vor Ort würde es rauschen, pfeifen und dröhnen hören.

Alle diese Erscheinungen sind aber kein Sondergut des größten Planeten. Auch der Saturn zeigt im Teleskop ein »Streifengesicht«, allerdings heben sich Zonen und Bänder viel weniger voneinander ab, die Strukturen sind »verwaschener« und die Farbtöne »flauer« als beim Jupiter. Der Schein trügt indessen, und die Wolkenlandschaft des Saturns ist keineswegs so eintönig, wie sie sogar auf den Sondenbildern zunächst aussah. Das wahre Gesicht dieses Planeten ist lediglich hinter einer Dunstdecke verborgen, die nur die größeren Konturen erkennen läßt. Mit den an Kriminalistik grenzenden Feinheiten der modernen Computerbearbeitung von Bildern ist es nämlich gelungen, die Feinstruktur der Zonen und Bänder, die einzelnen Wolkenformationen, viele ovale Flecken und Wirbel, darunter auch eine Art GRF des Saturns, aus dem Dunst »herauszuholen«.

Der dicke Dunst über den Saturnwolken erklärt sich aus zwei Umständen: Auf dem Saturn ist erstens die Schwerebeschleunigung nicht halb so groß wie auf dem Jupiter, so daß die Atmosphäre viel »lockerer« aufgebaut ist und sich in größere Höhen erstreckt als auf dem Jupiter. Zweitens ist es in den oberen Bereichen der Wol-

kendecke, in denen die Sonneneinstrahlung die wichtigste Rolle für den Wärmehaushalt spielt, auf dem Saturn kälter als auf dem Jupiter. Über den Saturnwolken befindet sich daher noch relativ viel Gas, aus dem bei den tiefen Temperaturen Bestandteile ausfrieren können, die den besagten Dunst bilden.

Es hat sogar den Anschein, als ob es auf dem Saturn noch »wilder« zugeht als auf dem Jupiter. Die Windgeschwindigkeit am Saturnäquator ist nämlich mindestens 3- bis 4mal so groß wie der entsprechende Wert auf dem Jupiter, die äquatorialen Westwinde erreichen Spitzengeschwindigkeiten von 1800 km/h. Wenn wir die maximale Windtätigkeit auf dem Jupiter als »Orkan« einstufen, dann müssen wir auf dem Saturn die Windstärke-skala nach oben fortsetzen und einen »Superorkan« einführen, für den es glücklicherweise keine Parallele auf der Erde gibt.

Möglicherweise ist auch beim Uranus und beim Neptun die eventuell vorhandene streifige Wolkendecke unter dichtem Dunst verborgen. Beim Uranus glaubten zwar manche Beobachter, eine Bänderung entdeckt zu haben; auf den Aufnahmen mit der bisher höchsten Bildgüte, die von Bord eines Stratosphärenballons gemacht wurden, fanden sich aber keine Anzeichen von Zonen und Bändern.

Kurioserweise liegt die Rotationsachse des Uranus fast in der Bahnebene, d. h., die Streifen, die ja parallel zum Äquator liegen, sind nur zu bestimmten Zeiten – und dann senkrecht zur Bahnebene – zu sehen, während man zu anderen Zeiten auf Nord- und Südpol des Planeten blickt. Interessant ist die bläulich-grünliche Färbung des Uranus. Sie kommt durch die starken Absorptionsbanden des Methans im roten Teil des Spektrums zustande. Auch Neptun, der im Fernrohr fast punktförmig erscheint, zeigt einen ähnlichen Farbton, so daß man gleichfalls auf eine große Methanhäufigkeit in seiner Atmosphäre schließen muß. Ansonsten ist über die Atmosphären dieser Planeten wenig bekannt.

Meteorologie à la Zeus. Das Studium der Zirkulation und der thermodynamischen Verhältnisse in der Jupiter-

atmosphäre erfreut sich zunehmender Beliebtheit unter den Theoretikern in der Meteorologie. Das ist zunächst etwas verwunderlich, weil ja das thermische Regime und das Zirkulationsmuster in dieser Atmosphäre völlig verschieden von den Gegebenheiten in der Lufthülle unseres Planeten sind. Hier merkt man etwas von der Kompliziertheit des Erkenntnisprozesses. Um bestimmte Naturvorgänge besser verstehen zu können, studieren die Wissenschaftler häufig auch die von der Natur angebotenen Alternativen dieser Vorgänge, selbst wenn diese Dinge für den Menschen keine Bedeutung haben. Man kommt auf diesem vermeintlichen Umweg aber in der Regel schneller zur Erkenntnis wichtiger Gesetzmäßigkeiten, als wenn man nur Fakten des aus praktischen Gründen interessierenden Vorgangs sammelt.

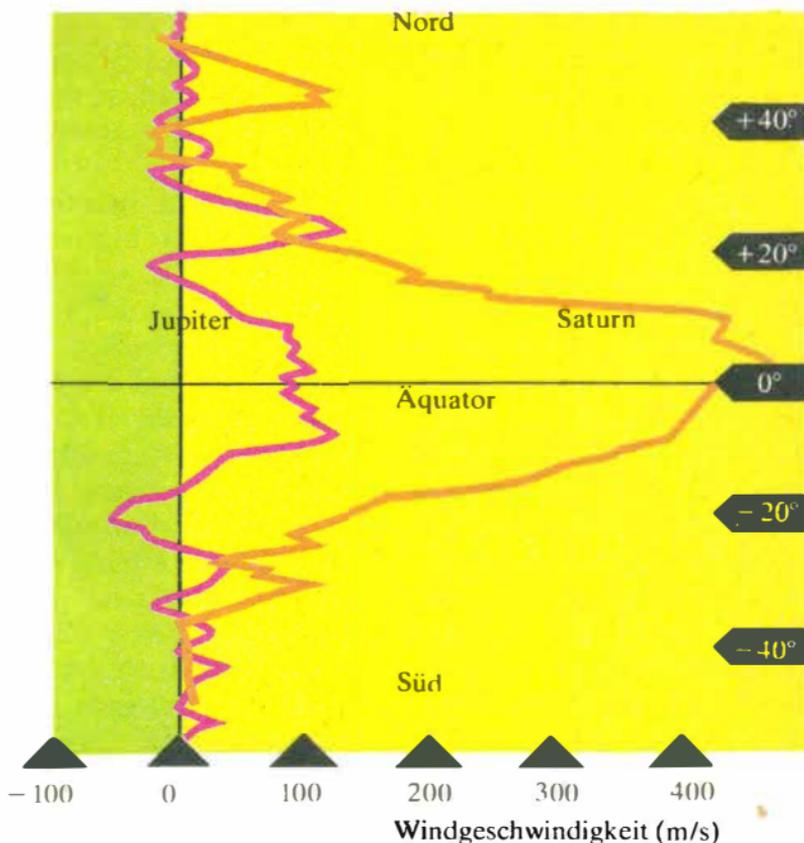
Jupiter heizt seine Atmosphäre selbst und macht somit sein eigenes skurriles Wetter, bei dem die Sonneneinstrahlung eine völlig untergeordnete Rolle spielt. Lediglich an der Oberseite der Wolkendecke ist das Sonnenlicht ein wesentlicher meteorologischer Faktor. Was sich in tieferen Schichten abspielt, ist vorerst der direkten Erforschung noch verschlossen. Man kann natürlich aus den Modellvorstellungen, die über die Jupiteratmosphäre existieren, vermuten, daß dort dieser oder jener meteorologische Vorgang auftritt. In diesem Sinne sind die folgenden Betrachtungen zu verstehen.

Da das Jupiterwetter von der Wärme aus dem Planeteninnern »angekurbelt« wird, gibt es keine Tag-Nacht-Schwankungen und keine jahreszeitlichen Effekte. In der Atmosphäre herrscht eine intensive Zirkulation, die letztlich das Streifengesicht des Jupiters verursacht. In den hellen Zonen steigt heißes Gas auf, kühleres schlägt sich in den dunklen Gürteln nieder, in denen die obersten Wolkenschichten fehlen, so daß der Blick auf tieferliegende Wolkenfelder fällt, die demzufolge dunkler erscheinen müssen. Es liegen also planetenumspannende Tief- und Hochdruckgebiete vor, die parallel zum Äquator angeordnet sind.

Werfen wir noch einen Blick auf die Jupiterwolken. Ihre chemische Zusammensetzung ist heute noch ein ungelöstes Problem, wenngleich bereits ein gewisser Rah-

men für die Diskussion des Wolkenchemismus abgesteckt wurde. Da NH_3 in der Jupiteratmosphäre nachgewiesen wurde und auch unter den Bedingungen, wie sie in der Höhe der oberen Schichten der Wolkendecke vorliegen sollten, kondensieren kann, spielt es die zentrale Rolle in der Diskussion. Besondere Bedeutung mißt man der Verbindung Ammoniumhydrogensulfid, NH_4SH , bei, die bei der chemischen Reaktion von Ammoniak mit Schwefelwasserstoff (H_2S) entsteht. Sie bildet Polymere, deren Färbung je nach Länge der Kette und Temperatur zwischen Gelb und Bräunlich variiert. Schwefelverbindungen werden heute bevorzugt als Chromophore – also Substanzen, die die Färbung der Wolken hervorrufen – diskutiert. Wenn man die chemischen Verhältnisse im Labor simuliert und H_2S als wahrscheinliche Komponente der Jupiteratmosphäre zuläßt, dann fallen meist irgendwelche Polymere an, in denen die Schwefelatome Färbungen im gewünschten Sinne erzeugen.

Nach dem allgemein akzeptierten Wolkenmodell besteht die oberste und teilweise durchlässige Wolken-schicht aus Ammoniakkristallen mit einer Temperatur von -120°C . Darunter wird eine Schicht von Ammoniumhydrogensulfid bzw. anderen Chromophoren angenommen, die zumindest die wichtigsten Farbeffekte erklären kann. In der Nähe des 0°C -Niveaus erwartet man Wolken aus Eiskristallen. H_2O wurde zwar erst 1975 auf dem Jupiter endgültig nachgewiesen, gilt aber, da es immerhin eine wasserstoffreiche, kosmisch häufige Verbindung ist, schon lange als »Kandidat« für das Wolkenmaterial. Die Eiswolken gehen dann wahrscheinlich in Wolken aus Salmiakgeisttröpfchen (wäßrige Lösung von NH_3) über, die Temperaturen von 30 bis 40°C aufweisen sollten. Bei Temperaturen bis zu 200°C kommt eventuell noch Ammoniumchlorid (NH_4Cl) als Wolkenkondensat in Frage, wenn es auf dem Jupiter Chlorwasserstoff gibt. Die Dicke der Wolkenhülle, gezählt von den reinen NH_3 -Wolken bis zu den Wolken aus Salmiakgeisttröpfchen, wird auf etwa 80 km geschätzt. Man stelle sich das Wetter in diesem Bereich der Atmosphäre vor: Ammoniak-Schneesturm,



Das Windmuster in den Atmosphären von Jupiter und Saturn. Generell dominieren Westwinde (gelber Bereich); beim Saturn sind Breitenzonen mit Ostwind (grüner Bereich) eine Seltenheit.

Hagel aus gelbbraunem NH_4SH , Gewitterguß aus Salmiakgeist...

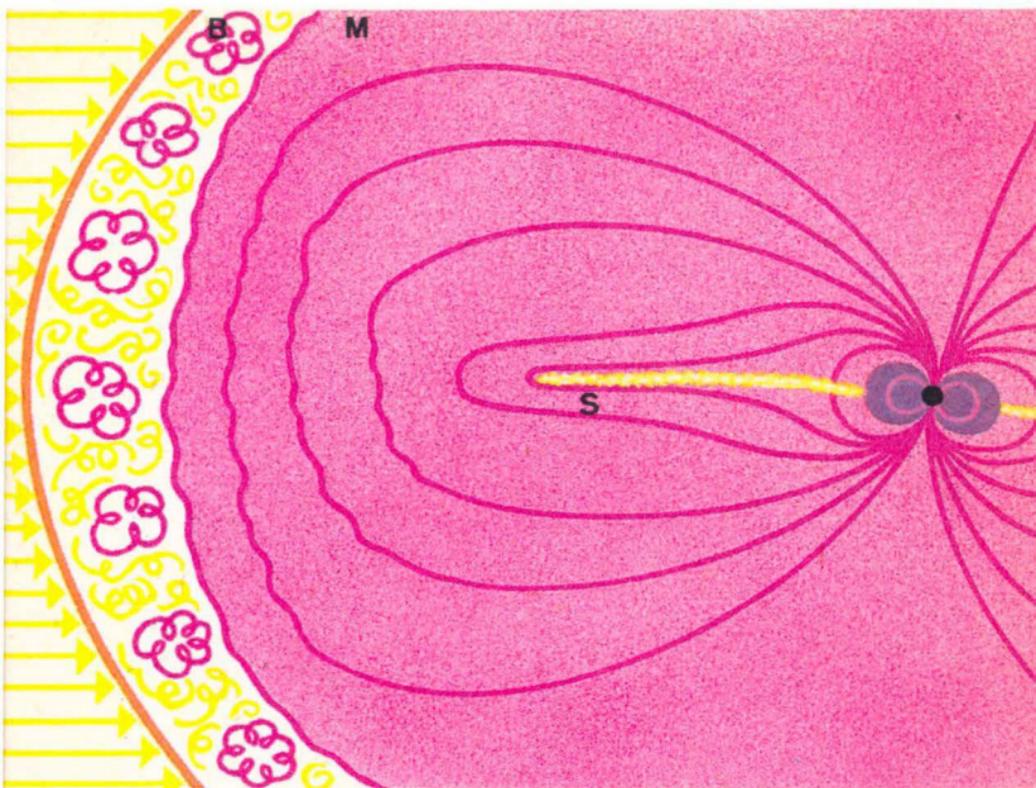
In der Jupiteratmosphäre finden gewaltige elektrische Entladungen statt. Die Radioastronomen auf der Erde empfangen ständig kurze Strahlungsstöße im Bereich der Dekameterwellen (Wellenlängen über 10 m). Zum ersten Male wurde man auf dieses »Geknistern« und »Geknatter« des Riesenplaneten, das an Gewitterstörungen beim Rundfunkempfang erinnert, im Jahre 1955 aufmerksam. Die Intensität dieser Stöße im Dekametergebiet zeigt, daß die Jupiterblitze millionen- bis milliardenfach energiereicher sind als die irdischen. Wenn

Zeus zu dem Blitzbündel greift, mit dem er in der Antike oft dargestellt wurde, dann würde ein irdischer Beobachter eine Schreckensszenerie geboten bekommen, denn die Blitzentladungen gleichen Kernwaffendetonationen.

Gewitterartige Erscheinungen dürften ein wichtiger Stimulator für chemische Reaktionen in der Jupiteratmosphäre sein. Abschätzungen ergaben, daß ungefähr alle 10 Minuten auf der Fläche von 1 km^2 ein Blitz die Atmosphäre durchzuckt. Die gewaltigen Stoßwellen des Donners setzen dann wahrscheinlich einen Teil des Methans in das ebenfalls nachgewiesene, aber sehr kurzlebige Azetylen (C_2H_2) um. Auf dem gleichen Wege könnten auch Zyanverbindungen, z. B. HCN , entstehen.

Vorerst sind das Hypothesen, aber sie sind attraktiv, weil sie weitere Ansatzpunkte liefern, die Färbung der Jupiterwolken zu verstehen: C_2H_2 -Polymere sind gelb bis braun, HCN liefert rubinrote Polymere. Diese Chromophore könnten vielleicht denen auf Schwefelgrundlage wirksam Konkurrenz machen. Verbindungen wie HCN sind sehr wichtig im Zusammenhang mit den chemischen Voraussetzungen für die Entstehung des Lebens. Die Jupiteratmosphäre stellt allem Anschein nach ein natürliches Laboratorium dar, in dem biochemisch sehr bedeutsame Stoffe »müheless« synthetisiert werden könnten, z. B. Aminosäuren oder Bausteine der DNS. Ob sich aus dieser »bunten Palette« organischer Moleküle Lebewesen organisieren konnten wie auf der Erde, ist fraglich. Aber ein Blick in dieses »präbiologische Labor« könnte die Diskussion um die Entstehung des Lebens auf der Erde außerordentlich bereichern. In der Atmosphäre des Riesenplaneten ist wahrscheinlich der Urzustand der Erdatmosphäre konserviert geblieben. Vielleicht ist dieser Teilaspekt der Jupiterforschung eine von manchem Leser sicher mit einiger Überraschung zur Kenntnis genommene Teilantwort auf die Frage: »Wozu Planetenforschung?«

Energiegeladene Magnetosphären und lautstarke Strahlungsgürtel. Wie wir bereits durchblicken ließen, macht der größte Planet des Sonnensystems auch im Radioge-



Schnitt durch die Jupitermagnetosphäre. Der grundsätzliche Aufbau ist derselbe wie bei der Erdmagnetosphäre (S. 72). Durch die schnelle Rotation bildet sich anders als bei der Erde die Magnetscheibe S aus. Die innere Jupitermagnetosphäre ist symmetrisch zur Magnetachse, die äußere symmetrisch zur Rotationsachse aufgebaut. Die gelbe Schicht ist Plasma.

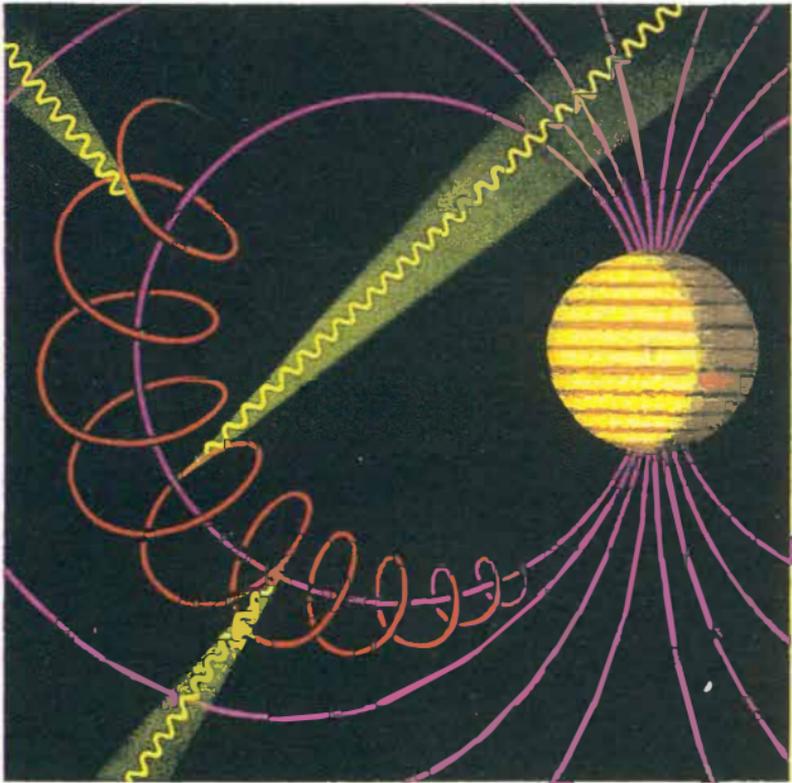
bietet eine »eindrucksvolle Figur«. Die Ausbrüche von Dekameterwellen hatten wir bisher als Folgen blitzartiger Entladungen gedeutet. Diese Blitze entstehen aber zum großen Teil – wie eine Entdeckung des Jahres 1964 unterstreicht – auf einem anderen Wege als die irdischen. Man fand nämlich, daß die Strahlungsstöße immer dann gehäuft auftreten, wenn der innerste der vier Galileischen Jupitermonde, Io, bestimmte Abschnitte seiner 42-Stunden-Bahn passiert. Es ist natürlich völlig ausgeschlossen, daß ein 350000 km über der Wolkendecke kreisender Mond Gewitter »zusammenbraut«, bei denen Blitze mit der Sprengkraft einer 10-Megatonnen-

Bombe auftreten. Der Satellit kann bestenfalls auf den »Auslöser« solcher Prozesse drücken, im physikalischen Sinne verursachen kann er sie nicht. Das Glied, das die 350000 km lange Verbindung zwischen Io und der Jupiteratmosphäre herstellt, ist die Magnetosphäre des Planeten.

Daß der Planetenriese ein starkes Magnetfeld und einen Strahlungsgürtel besitzt, haben gleichfalls Radioastronomen herausgefunden. Lange bevor man den irdischen Strahlungsgürtel entdeckte, wurde man auf die starke Strahlung des Jupiters im Dezimetergebiet, zwischen 10 und 170 cm Wellenlänge, aufmerksam, die Merkmale einer magnetischen Bremsstrahlung, der sogenannten Synchrotronstrahlung, aufwies. Offensichtlich gingen diese Dezimeterwellen von Elektronen aus, die sich mit großen Geschwindigkeiten um die Kraftlinien des Magnetfeldes »schraubten« und diesen Gewaltakt mit intensiver »Proteststrahlung« beantworteten. Aus der Verteilung der Synchrotronstrahlung in der Umgebung der sichtbaren Jupiterscheibe konnte man die grobe Struktur der Magnetosphäre ableiten.

Die vier Sonden, die bisher den Jupiter anfliegen, haben das radioastronomisch gewonnene Bild von der Jupitermagnetosphäre erheblich präzisiert, sie haben aber auch zahlreiche völlig unerwartete Phänomene entdeckt. Obwohl wir in den vorangehenden Kapiteln Jupiters Hang zum »Gigantismus« bereits zur Genüge kennengelernt haben, werden wir im folgenden doch sagen müssen, daß die Magnetosphäre des »Planetenkönigs« die kühnsten Erwartungen der Forscher übertroffen hat. Das magnetische Moment, d. h. die gesamte in diesem Planeten enthaltene »Menge« von Magnetismus, ist ungefähr 20000mal so groß wie die entsprechende der Erde.

Bereits im Abstand von 100 bis 50 Jupiterradien – das ist die 20- bis 10fache Entfernung des Mondes von der Erde! – »bemerkt« der durch den interplanetaren Raum fegende Sonnenwind das »magnetische Hindernis« und erzeugt beim »Aufprall« die Bugstoßwelle des Jupiters. Ihr genauer Abstand vom Planeten hängt von der »Stärke« des Sonnenwindes ab. Rund 20 Jupiterradien



Das Zustandekommen von Synchrotronstrahlung in einem Strahlungsgürtel. Geladene Teilchen müssen sich auf Schraubenbahnen um die magnetischen Feldlinien bewegen und senden dabei in einem schmalen Kegel polarisierte elektromagnetische Strahlung aus. Die Frequenz dieser Strahlung hängt von der Umlauffrequenz der geladenen Teilchen um die Feldlinien ab.

innerhalb der Stoßwelle trafen die Sonden auf die Begrenzung der Magnetosphäre, die Magnetopause. Auf der sonnenabgewandten Seite erstreckt sich der Magnetoschweif mit einem Durchmesser von 300 bis 400 Jupiterradien bis jenseits der Saturnbahn! Zu bestimmten Zeiten liegt also selbst der Saturn noch innerhalb der Jupitermagnetosphäre.

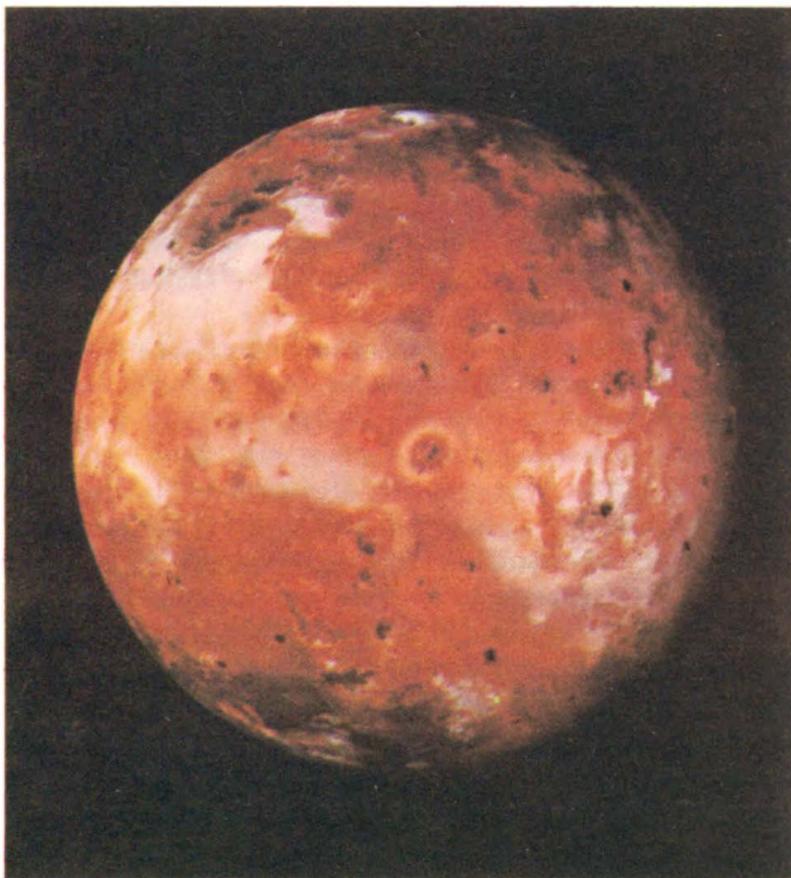
In der Höhe der Jupiterwolken beträgt die magnetische Kraftflußdichte noch einige 10^{-3} Tesla, ist also einige dutzendmal größer als die magnetische Kraftflußdichte an der Erdoberfläche, die unsere Kompaßnadeln

festhält. Bis zu 20 Jupiterradien Abstand kann das Magnetfeld in erster Näherung als ein Dipolfeld beschrieben werden, wobei die Achse des Dipols ähnlich wie bei unserem Planeten um etwa 10° gegen die Rotationsachse geneigt und der gesamte Dipol etwas exzentrisch im Planetenkörper verankert ist. Die Polung ist aber anders als bei der Erde, beim Jupiter liegen »geographischer« und magnetischer Nordpol nämlich auf der gleichen Hemisphäre (bei der Erde liegt der magnetische Nordpol in Antarktika). Zur genauen Beschreibung des Jupitermagnetfeldes werden aber selbst in Planetennähe neben dem Hauptfeld mit Dipolcharakter noch kleine Quadrupol- und Oktupolanteile benötigt.

Dieser innere Teil der Jupitermagnetosphäre rotiert starr mit dem Planeten. In ihm befinden sich wie bei der Erde die verschiedenen den Strahlungsgürtel bildenden Zonen gefangener Elektronen und Protonen. Hier befindet sich aber auch kühles und heißes Plasma, dessen Bewegungsverhalten gleichfalls vom Magnetfeld bestimmt wird. Zu allem Überfluß wird die physikalische Situation noch dadurch erheblich kompliziert, daß die Galileischen Monde, die sich ja nicht dem Magnetfeld des Jupiters, sondern nur seinem Schwerfeld »verpflichtet« fühlen, ein »Rührwerk« in der Magnetosphäre bilden.

Am auffälligsten verhält sich dabei der Mond Io; er »rührt« nicht nur die Magnetosphäre »um«, sondern »schlägt« sogar »Schaum«. Längs seiner Bahn befindet sich das dichteste, heißeste (einige hunderttausend Kelvin) und in chemischer Hinsicht extravaganteste Plasma, das vor allem Ionen aus Schwefel, Sauerstoff und Natrium enthält. Die äußerst »hitze« Io wirkt nämlich bei ihren Vulkanausbrüchen – den heftigsten, die es im Planetensystem zur Zeit gibt! – ständig Schwefelverbindungen in den Weltraum, die dort dissoziieren und deren Bestandteile von den schnellen Elektronen der Jupitermagnetosphäre ionisiert werden.

Die Io, die sich selbst ein magnetisches Moment größer als das des Planeten Merkur »leistet«, sorgt für eine beträchtliche Störung des Jupitermagnetfeldes. Dabei kommt es zur Ausbildung eines »Stromschlauches« zwi-



Der Jupitermond Io, ein erdartiger Himmelskörper, dessen Oberfläche durch einen intensiven Schwefelvulkanismus geprägt ist.

schen dem Trabanten und dem Jupiter, in dem Ströme von 5 Mill. Ampere nachgewiesen wurden. Sie erbringen eine elektrische Leistung, die dem 20fachen aller irdischen Kraftwerke zusammengenommen entspricht. Wenn in der Jupitermagnetosphäre solche gewaltigen »Kraftwerke« am Arbeiten sind, dann brauchen wir uns nicht mehr über die mächtigen Strahlungsstöße im Dekameterwellenbereich zu wundern, die die Io auslösen kann. Die übrigen Galileischen Monde, Europa, Gany-med und Kallisto, »mischen« sich in erster Linie dadurch in die »Angelegenheiten« der Magnetosphäre ein, daß sie an ihren Oberflächen große Mengen von Kor-

puskeln des Strahlungsgürtels absorbieren und damit längs ihrer Bahnen »strahlungsfreie Zonen« von sichelförmigem Querschnitt schaffen.

Im Abstand von 20 bis 50 Jupiterradien werden die Magnetlinien zu einer flachen Scheibe auseinandergezogen, in der eine fast konstante Kraftflußdichte von 10^{-8} Tesla herrscht. Hier befinden sich große Mengen von Plasma, in dem gleichfalls beträchtliche Ströme fließen.

Ähnlich wie die Erde verdankt auch der Jupiter sein Magnetfeld einem Dynamoprozeß in seinem Innern. Waren es bei der Erde die Strömungen im flüssigen Eisen des äußeren Kerns, so ist es hier die Zirkulation des metallischen Wasserstoffs, die von der Planetenrotation in Gang gehalten wird und das Magnetfeld aufrechterhält. Ein solcher Planetendynamo verwandelt also Rotationsenergie in Energie des Magnetfeldes.

Beim Saturn ist die Dicke der H^+ -Schale weit kleiner als beim Jupiter, und das ist wahrscheinlich der Grund dafür, daß das magnetische Moment dieses Planeten etwa 30mal kleiner ist als das des Jupiters. Auch ist das Saturnmagnetfeld in sehr guter Näherung ein Dipolfeld; die Achse dieses Feldes stimmt fast genau mit der Drehachse des Planeten überein.

Die Bugstoßwelle befindet sich beim Saturn in einem Abstand von etwa 30 Saturnradien; das ist etwa das 5fache des Abstandes Erde – Mond. Die Magnetopause beginnt auf der Sonnenseite bei etwa 20 Rädien Abstand vom Planeten, nur wenig außerhalb der Bahn von Saturns größtem Mond Titan. An besonders »stürmischen Tagen« kann der Sonnenwind die Magnetopause so weit nach innen schieben, daß der Titan seine Bahn im »Freien« zieht, ohne die Magnetosphäre zu behelligen.

Generell stören die Saturnmonde die Magnetosphäre weniger als die großen Jupitermonde. Der Titan gibt zwar ständig Gas aus seiner dichten Atmosphäre ab und ist sicherlich auch die Hauptquelle für den ausgedehnten Gasring aus neutralem Wasserstoff, der sich innerhalb der Titanbahn erstreckt, so daß der Satellit in seinem äußeren Randbereich kreist. Ein weiterer solcher

Torus, wie es in der Fachsprache heißt, diesmal aber aus extrem heißem Plasma bestehend, schließt die Monde Tethys und Dione ein. Mit etwa 600 Mill. K ist dieses Plasma das heißeste im Planetensystem beobachtete.

Ähnlich wie die Jupitertrabanten absorbieren auch die des Saturns die gefangenen Korpuskeln des Strahlungsgürtels und sind daher von sichelförmigen korpuskelfreien Zonen umgeben. Besonders intensiv ist die Absorption dieser Protonen und Elektronen durch die Partikeln des Saturnringsystems, die sich dadurch elektrisch aufladen. Wahrscheinlich kommen auf diesem Wege die elektrischen Entladungen im Ringsystem zustande, die man anhand ihrer Radiowellenemission beobachtet hat. Diese langwelligigen Strahlungsstöße ähneln denen irdischer Blitze, die freiwerdende Energie ist aber 10000-bis 100000mal größer.

Die Ringe und Satellitensysteme

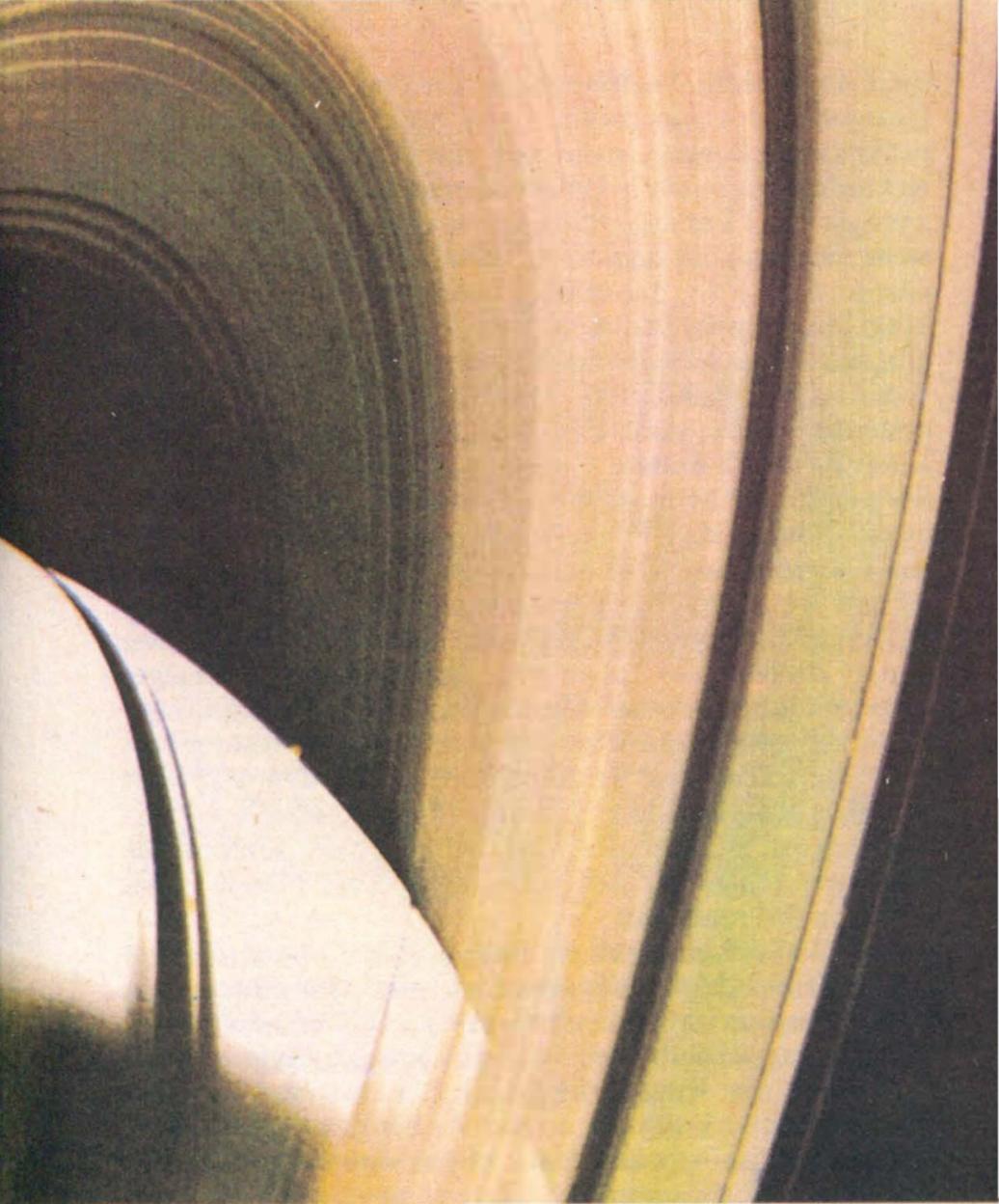
Konkurrenz für den Saturnring? Als die erste Auflage dieses Büchleins erschien, war der Saturn noch der einzige »beringte« Planet des Sonnensystems. Im gleichen Jahr, 1977, machten jedoch Astronomen, die die Bedeckung eines Sterns durch den Uranus beobachtet hatten, die sensationelle Entdeckung, daß auch dieser Planet von einem Ringsystem umgeben ist. Die extrem schmalen und durch größere Lücken voneinander getrennten Uranusringe reflektieren jedoch nur so wenig Licht in Richtung Erde, daß sie bisher auch in den größten Teleskopen unsichtbar blieben. Nur ihre absorbierende Wirkung auf das Licht jenes Sterns, den der Planet am 10. März 1977 bedeckte, sorgte für einen meßbaren Effekt der Ringe.

Als fast genau auf den Tag zwei Jahre später die Sonde »Voyager 1« den Jupiter passierte, war die nächste Ringentdeckung fällig, und das im wahrsten Sinne des Wortes; denn die Sonde war darauf programmiert, den Jupiterring zu entdecken, und leistete am 5. März 1979 ganze Arbeit. Vergleicht man die nunmehr bekannten drei Ringe bzw. Ringsysteme miteinander,

dann fallen bei aller Verschiedenheit auch interessante gemeinsame Merkmale auf: Alle drei Ringe ordnen sich ungefähr im Abstand des doppelten Planetenradius an und bestehen aus kleinen, vielleicht metergroßen Brocken, die den Planeten genau in der Äquatorebene umkreisen. In diesem Abstandsbereich könnte gar kein großer Himmelskörper existieren, er würde nämlich von den Gezeitenkräften, die der Planet in ihm auslöst, einfach zerrissen werden. Dieser Umstand gibt uns einen groben Fingerzeig in Richtung auf mögliche Ursachen für das Zustandekommen des Ringphänomens. Es könnte sich nämlich um das Baumaterial eines Satelliten handeln, dessen Bildung der Planet durch seine massive »Einmischung« hintertrieb, oder ein weiter außen gebildeter Mond gelangte auf irgendeine Weise in die »Todeszone«, und seine Trümmer verteilten sich in der Bahnebene und hinterließen uns den Ring.

Während bereits der Teil des Saturnringsystems, der von der Erde aus gut beobachtet werden kann, rund 60000 km breit ist und durch große Helligkeit auffällt, bringt es der Jupiterrings nur auf eine Breite von etwa 6000 km, aber auch er zeigt Andeutungen von einer inneren Struktur. Beim Uranusringsystem verteilen sich mindestens neun scharf begrenzte, aber weniger als 100 km breite Ringe auf eine Abstandszone von 9000 km Breite. Die neuentdeckten Ringe sind also keine ernsthafte »Konkurrenz« für den Saturnring. Der Saturn bleibt weiterhin das »Schmuckstück« des Sonnensystems und der »Liebling« der Planetenbeobachter. Das gilt sogar erst recht, seitdem man die Ringe des Saturns aus nächster Nähe zu betrachten vermag.

Die Kameras der ersten Saturnsonden, die den ringgeschmückten Planeten aufnahmen, bestätigten nicht nur, daß es neben den klassischen Ringkomponenten A, B und C noch weitere, weit schwächere Ringe gibt, die die Bezeichnungen D, E, F und G erhielten, sondern enthüllten auch gerade in den klassischen Ringen eine unerwartete Feinstruktur. Auf den Aufnahmen ließen sich nämlich einige tausend »Unterringe« bis herunter zur Breite von 10 km nachweisen. Als der Saturnring beim Anflug von »Voyager 2« einen Stern bedeckte, so daß

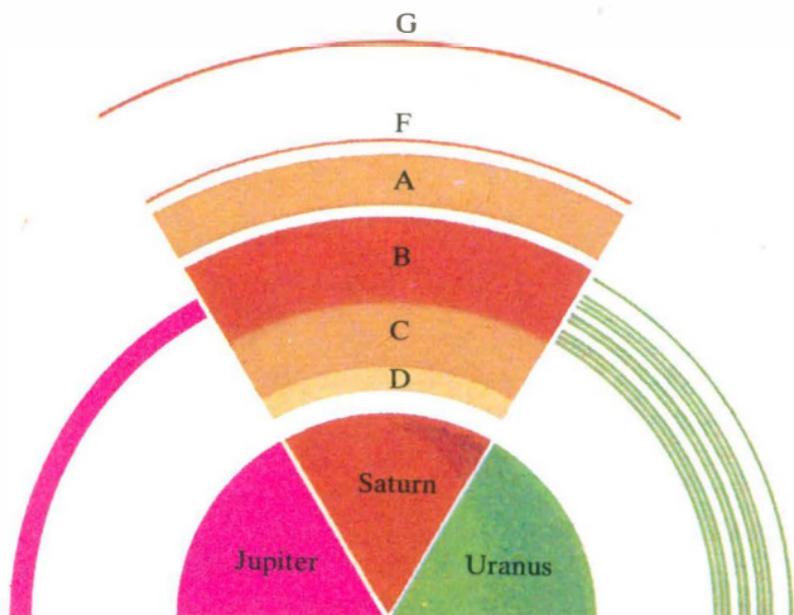


Das Saturnringsystem. Während, von der Erde aus betrachtet, nur die groben Ringstrukturen sichtbar sind, löste sich das rund 60000 km breite Ringsystem bei der Fernerkundung durch die »Voyager«-Sonden in Tausende schmale, durch Lücken getrennte Ringe auf. Es mögen 100000 schmale und sehr schmale Ringe sein. Sie bestehen aus kleinen, höchstens metergroßen Brocken, die den Riesenplaneten genau in der Äquatorebene umkreisen.

man das gleiche Verfahren wie bei der Entdeckung der Uranusringe – nur diesmal von Bord der Sonde aus – praktizieren konnte, lösten sich die »Unterringe« in weitere scharfbegrenzte »Unterunterringe« mit Breiten von weniger als 1 km auf. Der Saturn ist also von einem System umgeben, zu dem etwa 100000 schmalste Ringe gehören. Sogar in der Cassinischen Teilung, der etwa 3000 km breiten Lücke zwischen B-Ring und A-Ring, gibt es zahlreiche schwach leuchtende, schmale Ringe.

Bei der detaillierten Erforschung des Saturnring-systems wurde auch deutlich, welche große Rolle die Monde für die äußere Gestalt des Ringsystems spielen. So sorgt z. B. Mimas, der innerste der großen Saturnmonde, dafür, daß die äußere Begrenzung des B-Ringes zur Cassinischen Teilung hin kein Kreis, sondern eine Ellipse ist, d. h., die »Unterringe« am Außenrand des B-Ringes sind elliptisch verformt. Alle diese elliptischen Ringe drehen sich aber mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit, mit der Mimas den Saturn umläuft. Offensichtlich liegt hier eine Art von Gezeitenwirkung vor. Im Unterschied zum Erde-Mond-System, das ja für die die Erde umlaufenden Flutberge in den Ozeanen verantwortlich ist, ist aber der »Flutberg« an der Grenze des B-Ringes gegenüber der Verbindungslinie Planet – Satellit um 90° verdreht.

Die Außenkante des A-Ringes, die Grenze des im Fernrohr sichtbaren Ringsystems, wird von einem etwa 40 km großen Mond »bewacht«. Da er sich etwa 1000 km außerhalb des A-Ringes bewegt, läuft er langsamer als die Ringpartikeln und bremst durch seine Schwerkraftwirkung die an der Außenkante des A-Ringes kreisenden Brocken etwas ab, so daß sie gezwungen werden, in das Innere des Ringes zu driften. Wie der Schäferhund bei der Herde sorgt dieser 1980 entdeckte Mond dafür, daß die Ringpartikeln nicht »weglaufen« können. Zwei weitere solche »Schäferhunde« wurden im gleichen Jahr beiderseits des 1979 von der Sonde »Pioneer 11« gefundenen F-Ringes entdeckt. Hier ist die »Bewachung« noch perfekter: Einer der 100 bis 150 km großen Monde kreist nämlich an der Innenseite, der andere an der Außenseite des schmalen Ringes. Ein »Ent-



Vergleich der Größenverhältnisse der Ringe bzw. Ringsysteme der Planeten Jupiter, Saturn und Uranus relativ zur Größe der Planeten. Der Jupiterring, die dichtesten Teile des Saturnring-systems und die zahlreichen Uranusringe befinden sich ungefähr im Abstand von einem Planetenradius. Die großen Buchstaben bezeichnen die Ringkomponenten des Saturnring-systems.

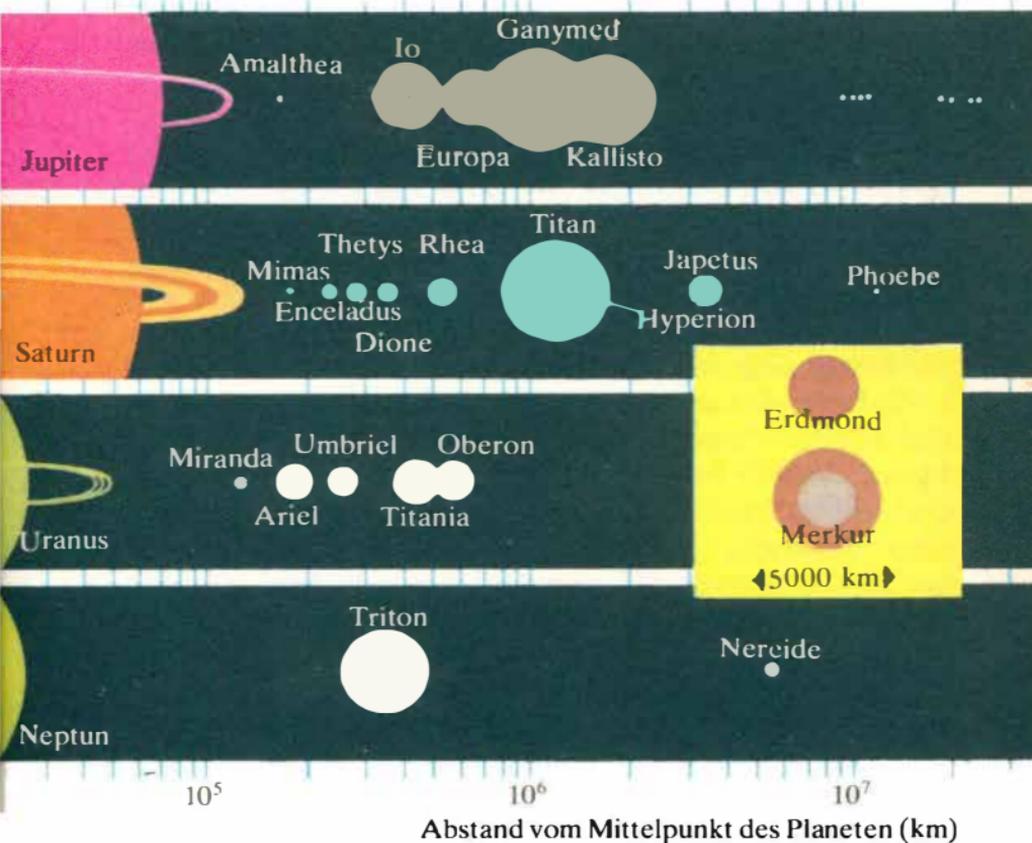
kommen« von Ringpartikeln ist damit in beide Richtungen unmöglich. Interessanterweise wurde ein solcher »Schäferhund-Mechanismus« bereits vor seiner Entdeckung vorgeschlagen, und zwar zur Erklärung der Stabilität der schmalen Uranusringe.

Planetensysteme en miniature. Im Gegensatz zu den Geschwistern der Erde sind die Stiefgeschwister von ausgeprägten Satellitensystemen umgeben, deren innerste Bestandteile die Ringe sind. Kernstück dieser Satellitensysteme ist jeweils – mit Ausnahme des Neptuns – eine regelmäßige Anordnung relativ großer kugelförmiger Monde, die in oder nahe der Äquatorebene im Rotationssinn des Planeten kreisen. Diese regulären Mondsysteme haben Gemeinsamkeiten mit dem Planetensystem. Sie sind auf den ersten Blick bestechend.

Benutzt man als Größenmaßstab einmal den Radius des Zentralkörpers, dann stehen diese Monde ihren Planeten viel näher als die Planeten der Sonne. Aus diesem Grunde konnte auch durch Gezeitenwechselwirkung das Rotationsverhalten der Monde stark »vereinheitlicht« werden, sie rotieren nämlich alle – wie der Erdmond – gebunden. Beim Planetensystem dagegen konnte die Sonne lediglich die Rotation des Merkurs entscheidend bremsen und sie in Form einer Resonanz im Verhältnis 2:3 binden, d. h., während zweier Sonnenumläufe dreht sich der Planet dreimal. In den Bahnen der großen Satelliten der jupiterartigen Planeten steckt auch weniger Drehimpuls als in den Planeten selbst. Im Planetensystem haben Jupiter und Saturn den »Löwenanteil« am Gesamtdrehimpuls, die Sonne hat nur etwa 2% davon inne. Lediglich die Massenverhältnisse Satellit/Planet und Planet/Sonne sind von vergleichbarer Größe.

Zumindest beim Jupiter ist das »Miniaturplanetensystem«, das die vier Galileischen Monde bilden, in eine ganze »Wolke« kleiner Himmelskörper eingebettet. Bei ihnen handelt es sich um irregulär geformte Brocken im Größenbereich von einigen Kilometern bis zu über 100 km, die in einem ziemlich großen Volumen »herumschwärmen«. Die Bahnen dieser irregulären Monde haben große Neigungen zur Ebene des regulären Mondsystems und weisen auch große Exzentrizitäten auf; manche von ihnen umlaufen den Planeten in der »verkehrten« Richtung. Mit Sicherheit handelt es sich bei diesen kleinen Monden um vom Jupiter nachträglich eingefangene, im interplanetaren Raum früher in großen Mengen vorhandene Kleinkörper. Wie die »Voyager«-Bilder zeigen, gibt es aber auch im Bereich zwischen dem Jupiterringsystem und dem innersten Galileischen Mond Io außer der bereits früher entdeckten Amalthea noch mehrere kleinere Monde.

Im Saturnsystem sind der äußerste Mond Phoebe, der sich rückläufig bewegt, und wahrscheinlich auch der inmitten des regulären Systems kreisende Hyperion sowie mehrere erst 1980 entdeckte Monde, die sich in den Lagrange-Punkten der Bahnen der Dione und der Tethys



Die Mondsysteme der jupiterartigen Planeten im Vergleich. Die Planetenoberflächen und die Ringe sind nur angedeutet. Für die Mondgrößen gilt der Maßstab rechts im Bild; zum Vergleich sind der Erdmond und der Merkur mit aufgenommen. Die chemische Beschaffenheit der Monde wurde durch Farben angedeutet: Eisen (grau, nur beim Merkur), Silikatgestein (braun), Eis bzw. flüchtiges Material (blau), unbekannte Zusammensetzung (weiß).

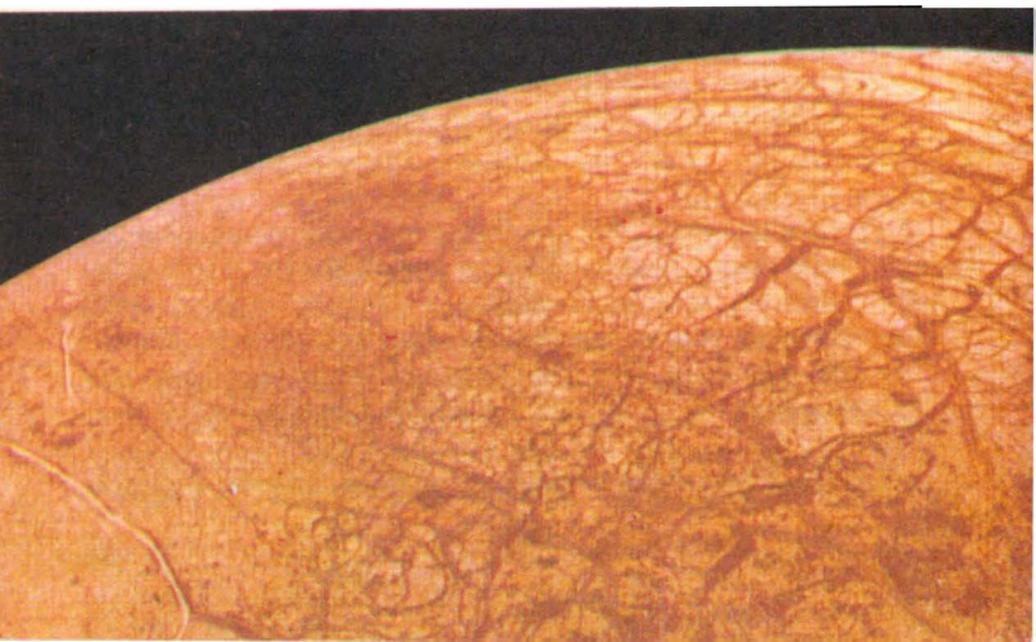
(60° voraus- und 60° nachlaufend) bewegen, solche »aufgelesenen« und »seßhaft« gemachten interplanetaren »Landstreicher«. Analog zum Jupiter gibt es auch beim Saturn eine ganze Reihe kleinerer Monde, die innerhalb der Bahn des innersten regulären Mondes, des Mimas, kreisen, z. B. die bereits erwähnten »Schäferhunde«.

Die fünf Monde des Uranus scheinen alle dem regulä-

ren System anzugehören; es bestehen aber keine Zweifel, daß auch dieser Planet irreguläre Satelliten aufzuweisen hat. Lediglich beim Neptun vermißt man das regelmäßig gebaute Mondsystem. Einige Astronomen haben den Vorschlag gemacht, daß das reguläre Satellitensystem dieses Planeten infolge eines himmelsmechanischen »Unglücksfalles« zerstört worden sein könnte. Neptuns ehemalg größter Satellit sei dabei aus dem System »herausgeworfen« worden und umlaufe jetzt unter dem Namen Pluto die Sonne als neunter Planet, ein weiterer großer Mond, Triton, habe seinen Umlaufsinn umgekehrt – er ist heute der einzige große Mond im Planetensystem, der sich rückläufig bewegt –, und auch Neptuns zweiter Mond Nereide verdanke seine ungewöhnliche Bahn, die die größte Exzentrizität unter den Satelliten aufweist, diesem Ereignis. Natürlich ist das vorerst nur eine interessante Hypothese, die exakter Beweise bedarf, die aber noch längere Zeit auf sich warten lassen werden.

Monde mit Planetencharakter. Bereits beim Erdmond hatten wir festgestellt, daß er Planetencharakter besitzt und daß er deswegen in die planetologische Reihe der erdartigen Planeten einbezogen werden muß. Bei den großen Monden der jupiterartigen Planeten wird der

Das Spaltennetz des Jupitermondes Europa



planetarische Charakter noch viel deutlicher, denn hier begegnen uns auch »Planetentypen«, die weder erdnach jupiterartig sind. Wir können hier buchstäblich einen Blick in die »Werkstatt« der Natur werfen und müssen überrascht feststellen, daß sie neben den beiden uns geläufigen Planetensorten auch noch andere »hergestellt« hat und sie in den Satellitensystemen als »Versuchsmuster« erprobt.

Im Jupitersystem fallen uns zunächst die Monde Io und Europa auf, die auf Grund ihrer mittleren Dichten von 3,5 und 3,1 g/cm³ von erdarter Beschaffenheit sein müssen. Die Io ist etwas größer als der Erdmond und fiel den Astronomen schon seit geraumer Zeit durch ihre auffällige rötliche Färbung, durch die sie umgebende Wolke aus Natriumdampf und durch andere exotische Merkmale auf. Deshalb wurde auch der erste »Voyager« sehr dicht an diesen Himmelskörper herangeführt, um ihn genauer »unter die Lupe nehmen« zu können. Was dabei zum Vorschein kam, kann man getrost als die verblüffendste Entdeckung der bisherigen Raumfahrt betrachten. Die Io erwies sich nämlich als der vulkanisch aktivste Himmelskörper des Planetensystems. Vulkanausbrüche haben ihre ursprüngliche Oberfläche so »umgekrempelt«, daß keine Einschlagskrater mehr zu finden sind, dafür aber Hunderte von erloschenen Vulkanen. Sieben tätige Riesenvulkane, die mächtige Fontänen von Förderprodukten in mehr als 100 km Höhe emporschleudern, wurden von den »Voyager«-Sonden aufgenommen. Im Unterschied zur Erde fördern die Io-Vulkane durchweg Schwefel und Schwefelverbindungen. Da Schwefel bei verschiedenen Temperaturen unterschiedliche Farben zeigt, sieht die Io-Oberfläche ziemlich bunt aus, man findet gelbe, orangefarbene, rote, braune und schwarze Gegenden, je nachdem, mit welcher Temperatur sich die Schwefellava in die kalte Io-Landschaft ergoß. Auch das bei Vulkaneruptionen freiwerdende Schwefeldioxid kondensiert bei dieser tiefen Temperatur und liefert weiße Flächen auf der Io.

Unter der tiefgefrorenen Io-Oberfläche befinden sich offenbar Seen aus heißem, flüssigem Schwefel. Für die

Wissenschaftler ergibt sich damit natürlich die sehr gehaltvolle Frage: Wie kann ein so kleiner und (an der Oberfläche) so kalter Himmelskörper sein Inneres so stark aufheizen, daß der »Schwefelkessel« ständig am Kochen bleibt und oft genug überkocht? Bisher gibt es nur Vermutungen zu dieser Frage. Sind es Auswirkungen der Gezeitenwechselwirkung mit dem Jupiter, wird die Io durch ihre Bewegung durch die Jupitermagnetosphäre elektrisch geheizt, hat dieser Mond bei seiner Entstehung mehr wärmespendende radioaktive Elemente mitbekommen als andere Himmelskörper...?

Bei der Europa, die etwas kleiner als der Erdmond ist, waren die Astronomen darauf gefaßt, an ihrer Oberfläche auf Eis zu stoßen, denn das Infrarotspektrum dieses Mondes wies starke Banden von H_2O -Eis auf. Auf den Sondenbildern kam ein ideal kugelförmiger Himmelskörper zum Vorschein, auf dem es kaum Höhenunterschiede gibt. In dem hellen Material seiner Oberfläche fand man aber Unmengen von wirr durcheinanderlaufenden dunklen und hellen Strichen, die Breiten von einigen wenigen bis zu einigen Dutzend Kilometern und Längen von mehr als 1 000 km erreichen. Eine plausible Deutung dieser »Europa-Kanäle« war schnell gefunden: Der steinerne Mond ist offenbar an seiner Oberfläche von einem Eispanzer umgeben, der zahllose Sprünge aufweist, vergleichbar etwa einer Autofrontscheibe, auf die ein Stein geprallt ist. Die Europa muß demnach früher einmal so weit aufgeheizt worden sein, daß das in ihrem Gestein enthaltene Wasser freigesetzt wurde, einen globalen Ozean bildete und dort gefror. Die von den Gezeiten hervorgerufenen Spannungen in dieser Eisdecke haben dann für die Sprünge gesorgt, die wir heute beobachten.

Eine noch bedeutsamere Rolle muß Wasser bzw. Eis bei den beiden größten Jupitermonden, Ganymed und Kallisto, spielen. Ganymed, der größte Mond des Sonnensystems, übertrifft den Merkur an Größe, und Kallisto ist fast ebensogroß. Ihre mittleren Dichten liegen bei 1,9 bzw. 1,8 g/cm^3 . Da an ihren Oberflächen gleichfalls Eis spektroskopisch nachgewiesen ist, muß man bei ihnen ebenfalls H_2O als Baumaterial einbeziehen, wegen



Krustenverschiebungen an der Oberfläche des Jupitermondes Ganymed. Der helle Streifen mit gefurchtem Terrain, der den Namen Tiamat Sulcus trägt, wurde in der Mitte abgeschert, und die beiden Teile sind um 50 km gegeneinander versetzt. Außer der Erde ist Ganymed der einzige Himmelskörper, der solche lateralen Verschiebungen zeigt.

der niedrigen mittleren Dichten sogar erhebliche Mengen. Aus diesem Grunde sehen die Modelle für diese »Planeten« Gesteinskerne vor, die von dicken Wasser- oder Eismänteln umgeben sind. Das an den Oberflächen anstehende Krusteneis ist, wie aus seinem niedrigen Reflexionsvermögen folgt, stark verunreinigt; man kann es am besten mit gefrorenem Schlamm vergleichen.

Die Kallisto, der äußerste der Galileischen Monde, zeigt eine sehr urtümliche Kruste mit zahlreichen Kratern, sogar Vielfachringstrukturen von mehr als 1000 km Durchmesser sind vertreten. Im Gegensatz zu

den Mondkratern fällt aber bei denen der Kallisto – übrigens auch beim Ganymed – auf, daß sie ein äußerst flaches Relief besitzen, also ziemlich »zusammengefallen« sind. Schuld daran trägt das Krustenmaterial, das ja, wie uns die Gletscher der Erde lehren, unter Belastung zu fließen beginnt.

Eine geologische Sensation präsentiert uns die Ganymedoberfläche. Hier gibt es nämlich mehrere Krustengenerationen, und die jüngeren, helleren und von zahlreichen parallelen Furchen bedeckten Krustenschollen lassen Anzeichen von horizontalen Verlagerungen erkennen. Es gibt hier Schollen, die sich nach ihrem Zerreißen unter der Wirkung von Scherkräften gegeneinander verschoben haben. Solche lateralen Verwerfungen (wie der geologische Fachausdruck lautet) findet man sonst nur noch auf der Erde, mit deren mobiler Kruste wir uns ja schon befaßt hatten. Auf dem Ganymed findet man Streifen gefurchten Terrains, die einfach übereinandergeschoben wurden. Vielleicht sind die Furchen überhaupt Stauchungsfiguren, Falten im Eis.

Auf dem größten Mond des Sonnensystems finden wir also Anzeichen für Plattentektonik und ihre Begleiterscheinungen, allerdings nicht wie bei der Erde in einer Lithosphäre, sondern in einer Eiskruste. Für die Planetologen bleibt unklar, warum sich zwei fast gleichgroße und analog aufgebaute »Wassermantelplaneten« an ihren Oberflächen so grundlegend voneinander unterscheiden. Anscheinend besaß Ganymed in der Vergangenheit eine Wärmequelle, die der Kallisto fehlte.

Mit großer Wahrscheinlichkeit hat auch Saturns größter Mond Titan, der gleichfalls den Merkur an Größe übertrifft, einen ähnlichen inneren Aufbau wie Ganymed und Kallisto. Seine mittlere Dichte beträgt $2,0 \text{ g/cm}^3$. Das Ungewöhnliche an diesem Satelliten ist seine dichte, wolkenverhangene Atmosphäre, die den Blick auf die Oberfläche verwehrt. Die spektrometrischen Messungen von »Voyager 1« zeigten den überraschten Experten, daß diese Atmosphäre am Boden ungefähr anderthalbmal so dicht ist wie die Erdatmosphäre und zu mindestens 80 % aus Stickstoff besteht. Methan, das seit Jahrzehnten als Hauptbestandteil der Titanatmo-

sphäre gilt, ist nach Argon nur mit etwa 6% vertreten. Nachgewiesen wurde auch in kleinen Mengen eine ganze Reihe von Kohlenwasserstoffen. Die Titanatmosphäre wirft ein völlig neues Licht auf die mögliche Beschaffenheit der Uratmosphäre der Erde, die von Anfang an stickstoffbeherrscht gewesen sein könnte.

Daß der Titan, dessen Masse 40mal kleiner als die Erdmasse ist, sich trotzdem eine so dichte Atmosphäre halten konnte, liegt an seiner sehr niedrigen Oberflächentemperatur, die bei etwa -180°C liegen dürfte. Die Gasatome bewegen sich daher viel träger als auf der Erde, und die Verlustrate in den Weltraum ist viel kleiner. Sehr interessant dürfte die Meteorologie auf diesem Mond sein. Wegen der niedrigen Temperaturen kann nämlich CH_4 beim Titanwetter die Rolle des Wassers beim irdischen Wetter übernehmen: Es kann also Methan regnen und schneien, und die Polkappen des Titans könnten Methangletscher tragen. Vielleicht kondensiert auch Stickstoff in dieser Atmosphäre.

Die anderen großen Monde des Saturns, Mimas, Enceladus, Tethys, Dione, Rhea und Japetus, sind zwar wesentlich kleiner als der Erdmond – ihre Durchmesser liegen zwischen 400 und 1500 km –, zeigen aber alle Kugelgestalt. Nach Auskunft ihrer mittleren Dichten, die zwischen 1,1 und 1,4 liegen, müssen sie zum größten Teil aus Eis bestehen. Ihre Oberflächen sind mit Ausnahme des Enceladus dicht mit Einschlagskratern bedeckt, es gibt aber auch einige Bildungen, die auf einen bescheidenen Grad an innerer Aktivität hinweisen. Beim Enceladus muß es allerdings massive Schmelzprozesse gegeben haben, bei denen die meisten Krater der Oberfläche »gelöscht« wurden. Das Problem der Erklärung der inneren Wärmequellen steht also auch bei den Saturnmonden, die als »Eisplaneten« eine planetologische Eigenständigkeit beanspruchen.

Über die Uranusmonde, über Neptuns großen Mond Triton, der eine Atmosphäre besitzt, und über den extravaganten Plutomond Charon ist noch zu wenig bekannt, als daß man diese Himmelskörper planetologisch beurteilen könnte. Vielleicht lernen wir hier in einigen Jahren neue »Planetentypen« kennen.

Vom Ursprung der Planeten

Viele Hypothesen – aber noch keine befriedigende Theorie

Wenn man das wissenschaftliche Ringen um die Aufklärung der Herkunft der Planeten betrachtet, stößt man auf zahlreiche »Ungereimtheiten«, gegen die der »gesunde Menschenverstand« gern protestiert. Man merkt an dieser Stelle etwas von den »verschlungenen Wegen«, die die menschliche Erkenntnis kosmischer Phänomene durchläuft, ehe sie zu einer einigermaßen widerspruchsfreien Erklärung der Natur gelangt. Ungefähr 50 theoretische Konzeptionen wurden in den verflorbenen 300 Jahren systematischer Planetenforschung von namhaften Gelehrten mit dem Anspruch vorgelegt, das Problem zu lösen. Manche Konzeptionen feierte man bereits als endgültige Theorien, andere lösten sehr schnell Skepsis in der wissenschaftlichen Welt aus und wurden schweigend ad acta gelegt, viele erledigten sich von selbst, weil ihre physikalischen Grundlagen zum Zeitpunkt der Formulierung noch zu wenig bekannt waren, noch mehr »verstarben« bei der Konfrontation mit neuen Beobachtungstatsachen über das Planetensystem.

Heute kann man resümieren: Eine umfassende und in sich geschlossene Theorie vom Ursprung der Planeten, die im »Kreuzverhör« der Wissenschaft dem Faktenmaterial der modernen Planetenforschung gewachsen ist, gibt es noch nicht! Es läßt sich lediglich eine Handvoll theoretischer Konzeptionen aus unserem Jahrhundert

angeben, die die Grundeigenschaften des Planetensystems und der einzelnen Planeten einigermaßen plausibel machen können. Es gibt weiterhin eine Reihe von theoretischen Mechanismen, die bestimmte Detailprobleme dieses kosmogonischen Prozesses beleuchten und spezielle planetarische Entwicklungsstadien verstehen helfen.

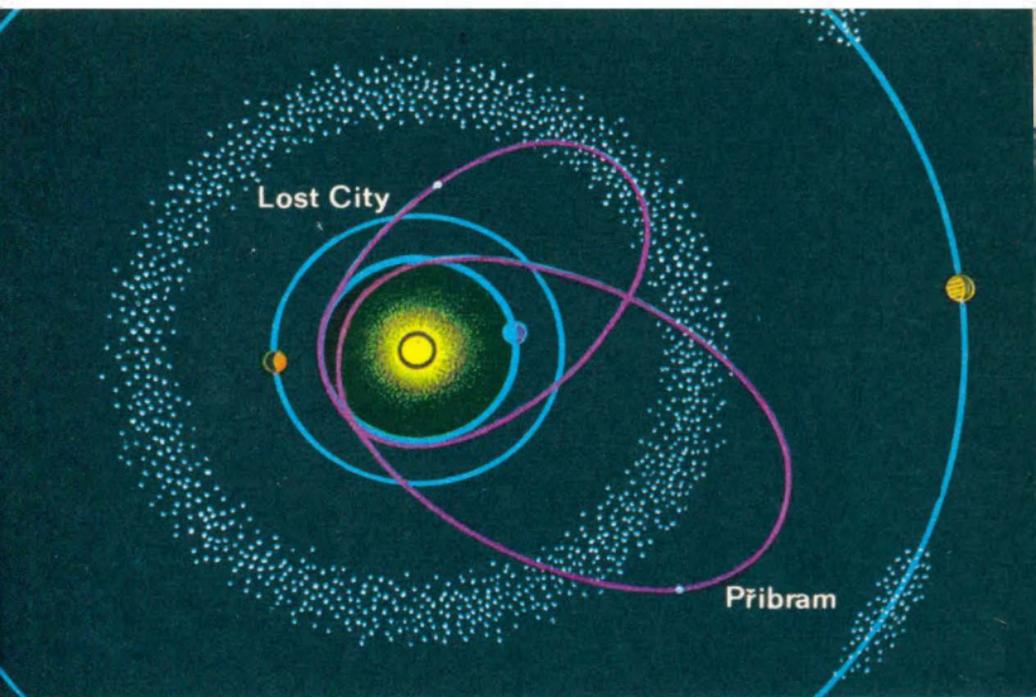
Ein Blick auf das Inhaltsverzeichnis dieses Taschenbuches offenbart bereits eine fundamentale Eigenschaft des Planetensystems: Es gibt verschiedene Planetensorten. Mindestens ebenso grundlegend wie dieser chemische Umstand sind aber auch die dynamischen Charakteristika, die wir im vorangegangenen Kapitel andeuten. Da ist beispielsweise die ungewöhnliche Verteilung von Masse und Drehimpuls zwischen der Sonne und den anderen Körpern des Systems. Nur 1,3 Promille der Gesamtmasse entfallen auf die Planeten, ihre Satelliten und die diversen Kleinkörper. Das Massenverhältnis zwischen solarem Gas und umgebender kondensierter Materie beträgt rund 750:1. Massenmäßig ist also das Planetensystem gegenüber der Sonne ziemlich belanglos; die Erdmasse ist im Vergleich zur Sonnenmasse weiter nichts als eine »Prise Schnupftabak«. Aber diese »Prise« macht sich dynamisch durchaus bemerkbar. Vergleichen wir den in der Erdbahn gespeicherten Drehimpuls mit dem in der Sonne steckenden Drall, dann sind beide fast ebenbürtig. Wenn wir die Bahndrehimpulse aller Planeten summieren, dann ist dieser Betrag etwa 186mal so groß wie der Drehimpuls der Sonne. In einem Gramm Planetenmaterial steckt also rund 100000mal soviel Drehimpuls wie in einem Gramm Sonnengas. Das ist ein ziemlich verblüffender Tatbestand, an dem alle bis 1950 vorgebrachten Hypothesen zur Entstehung des Planetensystems letztlich scheiterten.

Alle Planeten haben einen einheitlichen Umlaufsinn; nämlich den der Sonnenrotation, und auch die Bahnebenen stimmen – sieht man vom sonnennächsten und vom sonnenfernsten Planeten ab – fast mit der Ebene des Sonnenäquators überein. Das ganze System ist außerordentlich flach. Die Planeten bewegen sich auf nahezu

kreisförmigen Bahnen, und ihr Abstand von der Sonne befolgt die nach ihren Entdeckern J. K. Titius (1729–1796) und J. E. Bode (1747–1826) benannte Gesetzmäßigkeit (Titius-Bodesche Reihe). Mit Ausnahme von Venus und Uranus respektieren die Planeten den einheitlichen Drehsinn des Systems auch bei ihrer Rotation. Auch sind die Rotationsperioden bei den meisten Planeten von der gleichen Größenordnung.

In eigenartigem Kontrast zu diesen auffälligen Regelmäßigkeiten im Reich der Planeten (und auch in den Satellitensystemen) steht das über weite Strecken ziemlich regelwidrige »Benehmen« der Kleinkörper. Die Planetoiden – auch kleine Planeten oder Asteroiden genannt –, die sich zum überwiegenden Teil in der Bahnücke zwischen Mars und Jupiter bewegen und wahrscheinlich von »erdartiger« Beschaffenheit sind, umlaufen die Sonne meist auf merklich elliptischen Bahnen, deren Neigungen über einen breiten Bereich streuen. Sie respektieren aber den einheitlichen Umlaufsinn der Planeten. Anders die Kometen, jene kosmischen »Eisklumpen«, die sich in Sonnennähe mit einer Atmosphäre leuchtenden Gases umgeben und unter der Wirkung des Sonnenwindes einen Schweif ausbilden. Sie bewegen sich auf außerordentlich stark exzentrischen Bahnen, die größtenteils weit über die Bahn des äußersten Planeten hinausreichen. Bei diesen Körpern mit »jupiterartigem« Chemismus sind grundsätzlich alle Bahnneigungen, auch solche über 90° , vertreten. Diese Himmelskörper beachten die »Vereinbarungen« über die Flachheit des Systems und den einheitlichen Drehsinn nicht und »geistern« in einem Volumen, das wahrscheinlich bis zu einem Lichtjahr weit reicht, ziemlich regellos umher. Nur ein kleiner Bruchteil von ihnen wurde zur »Räson« gebracht, nämlich diejenigen, die bei einem »Besuch« der Innenbezirke des Planetensystems von den großen Massen der äußeren Planeten so stark gebremst wurden, daß sich ihre Bahnen um die Sonne stark verkleinerten, die Neigung zur Ebene der Planetenbahnen herabgesetzt und der Umlaufsinn dem allgemeinen Trend angepaßt wurde.

Bei der Betrachtung aller dieser allgemeinen Charak-



Der Planetoidengürtel und die berechneten Bahnen der Meteorite Pribram und Lost City

teristika des Sonnensystems ergeben sich sofort zahlreiche Fragen, die mühelos zu formulieren sind, deren Beantwortung aber die Experten in manche Verlegenheit bringt: Wie alt sind die Planeten? Woher stammt das Baumaterial dieser Himmelskörper? Wie gelangte so viel Drehimpuls in dieses Material hinein? Warum wurden so verschiedenartige Planeten daraus »hergestellt«? Was haben die Kleinkörper mit den Planeten zu tun?

Die verschiedenen, seit 300 Jahren vorgebrachten Hypothesen haben Antworten auf diese und viele andere Fragen zu geben versucht. Die zahlreichen Konzeptionen lassen sich nach gewissen Grundvoraussetzungen klassifizieren. So gibt es monistische und dualistische Planetenentstehungshypothesen, je nachdem, ob das Sonnensystem ohne äußere »Einmischung« – monistisch – entstand oder eine andere kosmische Masse, z. B. ein vorüberziehender Stern oder eine interstellare

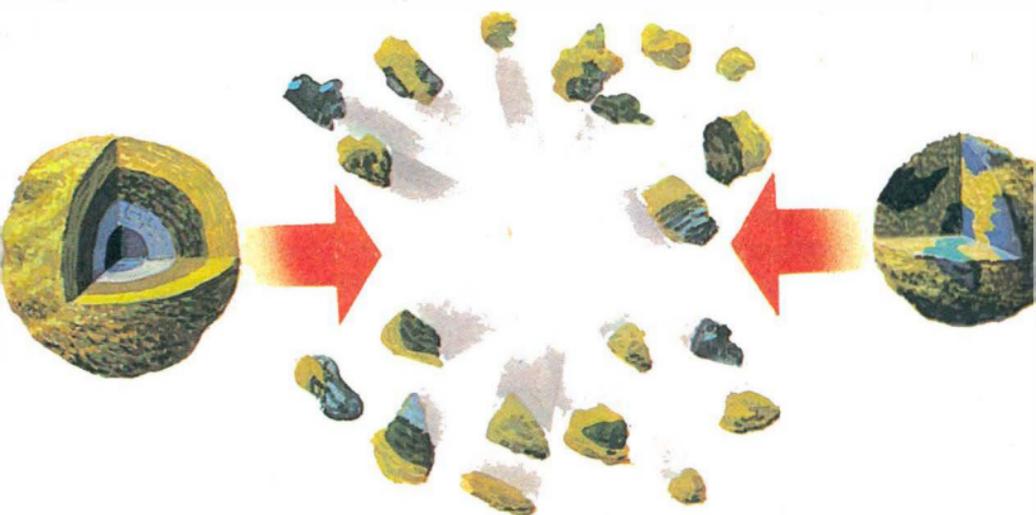
Wolke, die Sonne zum »Planetenkriegen« veranlaßte. Es gibt Evolutions- und Katastrophenhypothesen, je nachdem, ob man sich das Planetensystem als Ergebnis eines stetigen Entwicklungsprozesses oder eines kosmischen »Unglücksfalles«, z. B. einer Sternexplosion oder eines Zusammenstoßes von Sternen, vorstellt. Es gibt heiße und kalte Planetenbildungshypothesen, je nachdem, ob die Temperatur im Ausgangsmaterial hoch oder niedrig war ... Die moderne Forschung bevorzugt eindeutig die monistische Denkweise, faßt die Entstehung des Planetensystems als einen Entwicklungsprozeß auf und läßt die Planeten auf kaltem Wege ins Dasein treten.

Planetenbaumaterial im Museum

Für das Studium der Planetenentstehung gibt es glücklicherweise eine außerordentlich ergiebige Informationsquelle. Es sind jene eigenartigen Brocken, die hin und wieder unter eindrucksvollen optischen und akustischen Begleiterscheinungen die Erdatmosphäre durchschlagen, bei einigem Glück auf der Erde oder im Boden gefunden werden und in die Labors der Chemiker, Mineralogen und Physiker gelangen. Grob eingeteilt, gibt es drei Sorten solcher außerirdischer Boten: die Steinmeteorite, die Eisenmeteorite und als Zwischenglied die Stein-Eisen-Meteorite.

In den Vitrinen naturkundlicher Museen sieht man meist Eisenmeteorite. Diese zum Teil recht großen Brocken aus einer Eisen-Nickel-Legierung – der größte auf der Erde gefundene Eisenmeteorit hat eine Masse von fast 70 Tonnen – sind, wie die Statistik der beobachteten Meteoritenfälle zeigt, keineswegs die am häufigsten nieder gehende Sorte. Sie überstehen lediglich die »Feuertaufe« in der Atmosphäre am besten, sind am leichtesten auf der Erde aufzufinden und verwittern im Boden sehr langsam. 80 % aller niedergegangenen Projektile, die beobachtet werden konnten, bestehen aus Gestein.

Die Steinmeteorite, die in der Erdatmosphäre oft in viele Einzelstücke zerplatzen und im Erdboden leicht verwittern, können in zwei große Familien eingeordnet



Kollidierende Planetoiden können, je nach innerem Aufbau der beteiligten Objekte, sehr verschiedene Arten von Meteoriten erzeugen.

werden, die sich ihrerseits in zahlreiche Typen aufspalten. Die meisten niedergehenden Meteorite gehören zur Familie der Chondrite. Sie haben ihren Namen von den kleinen, meist glasigen Kügelchen aus Olivin oder Mineralen der Pyroxengruppe, den Chondren, die in eine feinkörnige Masse aus Silikaten – Olivin, Pyroxenen und Feldspäten – mit Zusatz von Nickeleisen, Troilit und Chromit »ezementiert« sind. In ihrem inneren Gefüge unterscheiden sich die Chondrite sehr deutlich von irdischen Gesteinen mit einem ähnlichen Mineralbestand. Allem Anschein nach ist dieses Meteorgestein nicht aus einer magmatischen Silikatschmelze auskristallisiert, sondern aus Bestandteilen sehr verschiedener Herkunft »zusammengebacken« worden.

Besonders interessant für die Forschung sind die sogenannten kohligen Chondrite. Die dunkle Grundmasse dieser Meteorite weist einen bestimmten Gehalt an organischen Verbindungen auf, wie man sie beispielsweise im Teer vorfindet. Im Gegensatz zu den gewöhnlichen Chondriten enthalten die kohligen auch Silikate, in denen Wasser chemisch gebunden ist. Wegen ihrer geringeren mechanischen Festigkeit und wegen der in ihnen

vorkommenden wasserlöslichen Minerale verwittern sie im Boden sehr schnell, so daß man diese Meteorite nur findet, wenn man den Fall beobachtet hat.

Die zweite Familie von Steinmeteoriten sind die Achondrite, die keine Chondren enthalten. Sie kann man am ehesten mit bestimmten magmatischen Gesteinen der Erdkruste vergleichen; denn verschiedene Typen dieser Meteorite kristallisierten mit Sicherheit aus einer Silikatschmelze aus. Diese Achondrite ähneln im Gefüge den Basalten. Mineralogisch gesehen, sind Achondrite im Durchschnitt reicher an Pyroxenen und Feldspäten und ärmer an Olivin, Nickeleisen und Troilit als Chondrite.

Mineralogen, Geochemiker und Kernphysiker haben die Meteorite gründlich ins »Verhör« genommen und zahlreiche wichtige Daten über das frühe Sonnensystem aus ihnen »herausgequetscht«. Aus der Untersuchung verschiedener radioaktiver Isotope in den Meteoriten konnte man interessante Episoden aus der »Geschichte« dieses Gesteins rekonstruieren. Es stellte sich heraus, daß die chemischen Elemente, aus denen die Minerale in den Meteoriten aufgebaut sind, vor rund 6 Mrd. Jahren gebildet wurden. Vor etwa 4,5 Jahrmilliarden fügten sich die Bestandteile dieses Gesteins zusammen bzw. kristallisierten die Achondrite aus. Weiterhin zeigte sich, daß die einzelnen Meteorite unterschiedlich lange der Wirkung der Korpuskularstrahlung im Weltraum ausgesetzt waren. Offenbar gingen die Brocken, die auf die Erde fielen, erst vor 100000 bis 100 Mill. Jahren aus größeren Körpern hervor, die die kosmische Teilchenstrahlung nicht zu durchdringen vermochte. Das Studium einzelner aus dem Gesteinsverband herausgelöster Chondren und Mineralkörner ergab, daß sie von allen Seiten ziemlich gleichmäßig von Teilchen der »weichen« kosmischen Strahlung durchsetzt wurden. Da diese energiearmen Partikeln aber nicht in der Lage gewesen wären, den gesamten Brocken zu durchdringen, aus dem das einzelne untersuchte Körnchen stammte, muß man schließen, daß diese Körnchen bzw. Chondren eine Zeitlang frei im Weltraum »herumschwärmten«, bevor sie im Gesteinsverband der Meteorite »seßhaft« wurden.

Damit ergibt sich etwa folgendes Bild: Die Meteorite sind Bruckstücke größerer Himmelskörper, die ihrerseits durch das Zusammenballen vieler staubförmiger Partikeln und Tröpfchen entstanden. Diese Körper bildeten sich zur gleichen Zeit wie Erde und Mond; sie stammen aus der Urzeit des Sonnensystems. Aus der Kristallstruktur des Nickeleisens der häufigsten Eisenmeteorite, aber auch der Eisenkörner in den Steinmeteoriten konnten die Forscher sogar ableiten, wie schnell sich diese Legierung abgekühlt haben muß. Die Abkühlrate in der Größenordnung von 1 bis 10 °C pro Jahrmillion bedeutet, daß die Himmelskörper, in denen das Nickeleisen der Eisenmeteorite kristallisierte, einen Durchmesser von mindestens 100 bis 200 km gehabt haben müssen, bevor sie in Stücke gingen. Untersuchungen des Gallium- und des Germaniumgehaltes der Eisenmeteorite zeigen auch, daß die bisher untersuchten Exemplare aus verschiedenen derartigen Körpern stammen müssen.

Nach der heute unter den Meteoritenforschern vorherrschenden Meinung bildete das Material der Eisenmeteorite einstmals die Kernregion kleiner Himmelskörper. Diese Objekte von der Größe der großen Planetoiden wurden durch Aufhäufen von Material von der Zusammensetzung der kohligen Chondrite gebildet. Für die »Ursprünglichkeit« gerade dieses Materials spricht vor allem der Gehalt an flüchtigen Substanzen (Wasser, organische Verbindungen) und der Umstand, daß in ihm die schwereren Elemente genau in der Proportion vertreten sind, wie sie das Sonnengas zeigt. Nachdem sich dieses »Urmaterial« zu Körpern der genannten Größe vereinigt hatte, kam es unter der Wirkung des Zerfalls der in ihm enthaltenen radioaktiven Isotope zu einer inneren Aufheizung, die zum Aufschmelzen des Gesteins führte. Das Nickeleisen schmolz aus dem Gemisch heraus und sickerte unter der Wirkung der Schwerkraft zum Zentrum des Körpers. Die leichteren flüssigen Silikate stiegen auf und schwammen auf dem Eisenkern. Beim nachfolgenden Abkühlen kristallisierten aus dieser Silikatschmelze die Achondrite aus. Über dem achondritischen Gesteinsmantel befand sich aber noch Gestein, das zwar erhitzt, aber nicht voll-

ständig aufgeschmolzen wurde, das Gestein der Chondrite. Das zuoberst liegende Material blieb wahrscheinlich fast unverändert.

Wenn zwei derartige Himmelskörper mit einer Relativgeschwindigkeit von einigen km/s aufeinanderprallten, dann entstanden Bruchstücke, die man als Eisenmeteorite, Achondrite, Chondrite und kohlige Chondrite klassifizieren würde. Daß es Zusammenstöße kleiner Himmelskörper gab, beweist die Erforschung der Planetoiden, die zum größten Teil irreguläre Brocken sind. Daß kleine Himmelskörper auf größere prallten, beweisen die Riesenkrater auf den erdartigen Planeten.

Der Sonnennebel

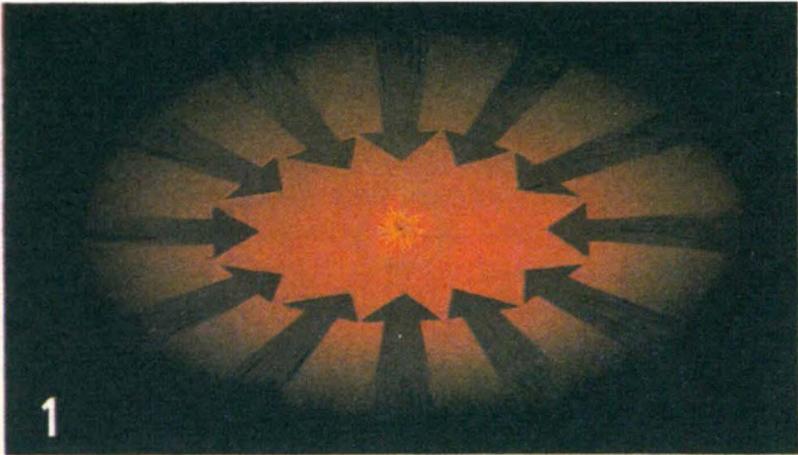
Das von den Theoretikern diskutierte Milieu, in dem sich feste Teilchen bilden konnten, die in der Nähe der Sonne zu Himmelskörpern »verschweiß« wurden, ist ein rotierender und daher abgeplatteter Nebel. Ob das Nebelgas von der sich rasant drehenden Ursonne abgeschleudert wurde oder ob es ein Überrest der Gaswolke ist, aus deren Zusammensturz die Sonne entstand, ist noch nicht klar. Man kann aber mit ziemlicher Sicherheit sagen, daß der Sonnennebel bei der Bildung der Sonne entstand. Die Planetenkosmogonie ist daher heute völlig im Forschungskomplex der Sternentstehung verankert.

Die Mindestmasse des ursprünglichen Sonnennebels läßt sich durch ein Gedankenexperiment abschätzen. Man stellt sich dazu vor, man hätte aus einem Gas der gleichen chemischen Zusammensetzung wie die Sonne Planeten herzustellen. Die für die erdartigen Planeten benötigten chemischen Elemente sind zusammengenommen rund 300mal seltener als Wasserstoff und Helium. Also muß man mindestens 300mal so viel Sonnennebelgas »verarbeiten«, wie die Gesamtmasse dieser Planeten heute beträgt. Bei Uranus und Neptun braucht man etwa das 60fache ihrer jetzigen Masse. Da Jupiter und Saturn ungefähr Sonnenzusammensetzung besitzen, setzen wir nur so viel Sonnennebelgas in Rechnung, wie

ihre Massen erfordern. Addierte man die aufgeführten Beträge, dann ergibt sich eine Nebelmasse von 1 bis 2% der Sonnenmasse. Anschaulich formuliert läuft unser Gedankenexperiment darauf hinaus, daß wir uns die Planeten wie verschieden stark gedörrte Weinbeeren vorstellen. Die Riesenplaneten sind noch ziemlich saftige Trauben, Uranus und Neptun haben schon sehr viel Saft verloren, während die erdartigen Planeten prassel-dürren Rosinen gleichen, die nur noch Trockengewicht haben.

Durch die Größe der Nebelmasse sind natürlich die Planetenmassen bei der Bildung des Sonnensystems festgelegt. Die durch die Rotation bedingte Scheibenform des Sonnennebels erklärt die Flachheit des Planetensystems. Die im Zentrum des Nebels befindliche Sonne muß bei ihrer Entstehung sehr viel schneller rotiert haben als heute. Beim Zusammensturz der interstellaren Gas-Staub-Wolke, aus der die Sonne hervorging, blieb nämlich der Drehimpuls erhalten, d. h., je mehr die Wolke »schrumpfte«, um so schneller mußte sie sich drehen. Man nimmt nun an, daß zwischen der sich schnell drehenden Ursonne und dem umgebenden Sonnennebel eine Kopplung bestand. Das Nebelgas konnte daher ständig Drehimpuls übernehmen, bewegte sich dadurch schneller und driftete durch die zunehmende Fliehkraft nach außen, während die Sonne immer mehr gebremst wurde. Über die Natur dieser Kopplung gibt es noch keine einheitliche Meinung unter den Experten. Es werden sowohl magnetohydrodynamische Effekte als auch Reibungskräfte im turbulenten Gas dafür in Anspruch genommen.

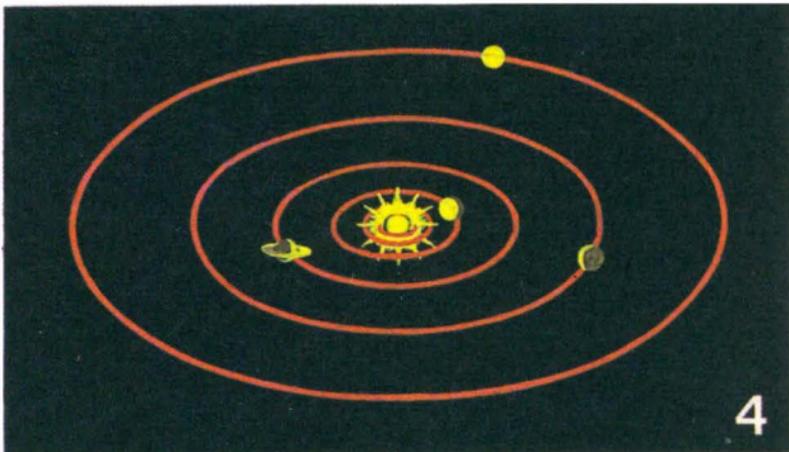
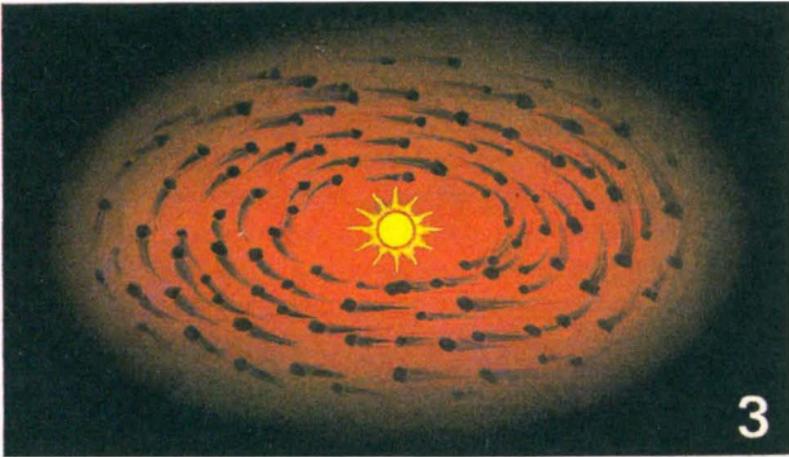
Vor wenigen Jahrzehnten herrschte noch die Vorstellung vor, daß die Planeten aus besonders großen Wirbeln hervorgingen, die sich infolge der im heißen Sonnennebelgas herrschenden Turbulenz ausbildeten. Der Urzustand eines Planeten wäre also ein heißer »Gasballen« gewesen, der sich abkühlte und kondensierte. Aus der Meteoritenforschung und auch aus der Untersuchung des irdischen Gesteins ergaben sich aber ziemlich tiefe Temperaturen, nämlich nur rund 300 °C, für die Bildung dieser Himmelskörper. Es sieht also ganz so



Die Entwicklung des Sonnennebels. Unter der Wirkung der Schwerkraft beginnt ein dichter Gasballen in einer interstellaren Wolke zusammenzufallen und einen ellipsoidischen Nebel zu bilden (1). Die im Innern dieses Nebels entstehende, schnell rotierende Ursonne gibt ständig Drehimpuls an das umgebende Nebelmateriale, das dadurch die Form einer flachen Scheibe annimmt (2). Die in der Nebelscheibe anfallenden Kondensationsprodukte bilden Planetesimals (3). Fusion und Akkretion der Planetesimals bilden schließlich Planeten (4).

aus, als ob die Planeten auf kaltem Wege gebildet wurden und sich erst dann bis zur Schmelztemperatur aufheizten.

In den Innenbezirken des Sonnennebels müssen zu-



nächst die gleichen Temperaturen geherrscht haben wie in den äußeren Schichten der Ursonne, nämlich etwa 3000 K. Mit wachsender Entfernung von der Sonne lagen die Temperaturen natürlich niedriger, und außerdem kühlte das Nebelgas ziemlich schnell ab. Damit wurden vielfältige chemische Reaktionen im Gas möglich, durch die sich zahlreiche Substanzen bildeten, die in Form von festen Partikeln oder Tröpfchen aus dem Gas ausfallen konnten. Im Bereich der erdartigen Planeten schieden sich zunächst hitzebeständige Oxide ab, denen ab 1300 °C metallisches Eisen und unter 1100 °C Silikate folgten. Wasserhaltige Silikate und andere flüchtige Stoffe beschlossen bei der Erde bei etwa 300 °C die Reihenfolge der Kondensate.

In größerem Sonnenabstand, z. B. jenseits der Marsbahn, kondensierte in großen Mengen Wasserdampf und noch weiter außen auch Ammoniak, schließlich Methan und eine unübersehbare Mannigfaltigkeit flüchtiger Verbindungen. Durch diese wasserstoffreichen Moleküle konnte der Wasserstoff, der ebenso wie die Edelgase im Sonnennebel nicht zu kondensieren vermochte, »überlistet« und wenigstens teilweise in das Sonnennebelkondensat »geschmuggelt« werden. Die Schichtung der Kondensationsprodukte im Sonnennebel – entsprechend der nach außen zu abnehmenden Temperatur – erklärt zwanglos, warum es »erdartige« und »jupiterartige« Planeten gibt.

Die im Sonnennebel ausgefallenen Stäubchen und Tröpfchen absorbierten wirkungsvoll das Licht der gerade entstehenden Sonne. Die Partikeln erwärmten sich dadurch und gaben – entsprechend der sich in ihnen einstellenden Temperatur – Wärmestrahlung ab. Während das Sonnenlicht bereits in der unmittelbaren Sonnenumgebung restlos absorbiert wurde, konnte die Infrarotstrahlung der Kondensate den Nebel verlassen. Die Strahlung der Ursonne wurde also vollständig »thermalisiert«. Ein äußerer Beobachter hätte zwar die junge Sonne durch den Staubvorhang des Nebels nicht sehen können, aber der gesamte Sonnennebel wäre ihm als Infrarotquelle aufgefallen. Man kennt heute eine ganze Reihe von »Infrarotsternen«, die als solche thermalisierende Staubhüllen gerade entstehender Sonnen gedeutet werden. Vielleicht spielen sich in manchen dieser »Staubkokons« ähnliche Prozesse ab wie vor 4 bis 5 Mrd. Jahren im Sonnennebel.

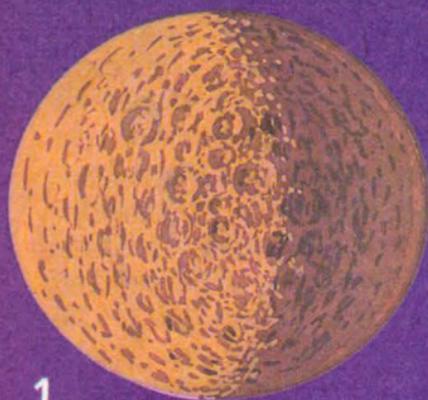
Wie wächst ein Planetenembryo?

Das schwierigste Problem für die Theoretiker auf dem Gebiet der Planetenkosmogonie ist, aus den Kondensaten des Sonnennebels Planeten »herzustellen«. Wahrscheinlich haben in diesem Embryonalstadium der Planetenbildung folgende Prozesse stattgefunden: Die im Sonnennebel kondensierten Partikeln vergrößerten sich

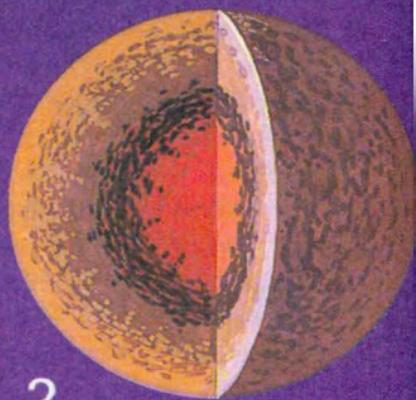
ständig, weil sich an ihren Oberflächen laufend bestimmte Bestandteile des Sonnenebelgases niederschlagen konnten. Auf diesem Wege dürften Brocken von ziemlich lockerem Aufbau, die Planetesimals, entstanden sein. Sie wurden vom rotierenden Nebelgas einfach »mitgeschleift«. Da sie in großer Dichte vorhanden waren und große benachbarte Planetesimals im Sonnenebel keine großen Relativgeschwindigkeiten zueinander aufgewiesen haben können, »verschweißten« sie beim Kollidieren und bildeten so immer größere Brocken. Bei diesen größeren Brocken wurde dann allmählich die Kopplung an das Nebelgas aufgehoben, weil mit zunehmender Planetesimalmasse die Anziehungskraft zwischen Sonne und Planetesimal größer wurde als die Reibungskraft zwischen Gas und festem Brocken.

Das Zusammenkleben benachbarter Planetesimals bildete wahrscheinlich die erste Stufe eines Wachstumsprozesses, den die Experten Akkretion nennen und der ziemlich schnell zur Bildung von »Planetenembryonen« geführt haben kann. Das Hauptproblem dabei ist, daß einerseits die vom Gas abgekoppelten und sich auf selbständigen Bahnen um die Sonne bewegendes Planetesimals nur noch sehr »sacht« zusammenstoßen dürfen, damit sie sich nicht gegenseitig zertrümmern, daß aber andererseits die Relativgeschwindigkeit nicht zu klein sein darf, damit sehr viele Zusammenstöße stattfinden und ein sehr schnelles Wachstum möglich wird. Sobald sich nämlich die Sonne als Stern etabliert hat, bläst sie mit Hilfe des Sonnenwindes das Nebelgas und die kondensierten Partikeln weg. Dann wird die Bildung von »Planetenkeimen« problematisch.

Was ist eigentlich ein »Planetenembryo«? Wir bezeichnen damit einfach ein Planetesimal, dessen Masse so groß ist, daß sein Schwerfeld auf die Umgebung merklich einwirken kann. Ein derartiger Körper sollte einen Durchmesser von mindestens einigen hundert Kilometern besitzen. Durch seine Anziehungskraft lenkt er verstärkt die in seiner Nachbarschaft befindlichen Sonnenebelkondensate auf sich, und je größer seine Masse wird, um so mehr Material »regnet« auf ihn herab. Der »Planetenembryo« schlägt so eine immer breiter wer-



1

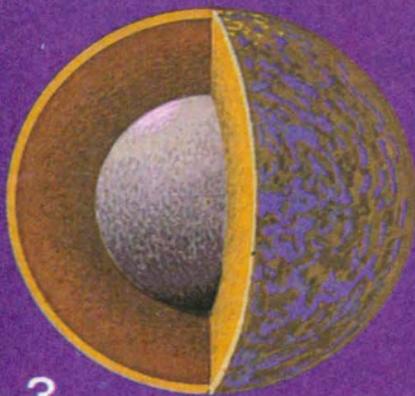


2

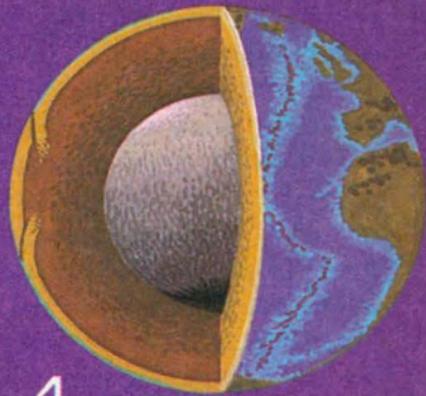
Die Entwicklung der Erde. Nach der Auflösung des Sonnenebels war die Erde ein dicht mit Kratern aller Größen bedeckter Planet (1). Millionen Jahre später führte die innere Aufschmelzung zu einer Entmischung der verschiedenen schweren Bestandteile (2). Vor etwa 3 Mrd. Jahren hatten sich Kern, Mantel und Kruste der Erde ausgebildet, und der Planet kühlte sich ab (3). Die dicker werdende Kruste zerbrach in Platten, die auf dem Mantel schwammen (4).

dende »Schneise« in den »Wald« von Planetesimals längs seiner Bahn um die Sonne. Wenn fast alles in seiner Reichweite befindliche »Planetenbaumaterial« vereinnahmt wurde, kommt das Wachstum zum Stillstand. Aus dem Embryo ist ein Planet geworden, und die Breite der »Schneise« gibt zumindest andeutungsweise eine Erklärung für das Zustandekommen des Abstandsgesetzes der Planeten. In dem Abstandsbereich von der Sonne, wo heute die Riesenplaneten kreisen, waren offensichtlich die Wachstumsbedingungen im Sonnenebel so günstig, daß die dort entstehenden Körper sogar große Mengen von Gas in sich vereinigen konnten, bevor die Sonne den Urnebel hinwegfegte. Das erklärt den Chemismus von Jupiter und Saturn und die großen Massen dieser Planeten.

Bei der Planetenbildung wurden natürlich nicht alle



3



4

Planetesimals verbraucht. Was wurde aus diesen Körpern? Man findet ihre Spuren heute z. B. in der Planetenlücke zwischen Mars und Jupiter. Wahrscheinlich gab es dort eine Reihe von »Planetenenbryonen«, die einfach nicht weiterwachsen konnten, weil ihnen der Riesenplanet das Baumaterial wegging. Durch Zusammenstöße zertrümmerten sich einige von ihnen gegenseitig und lieferten die vielen tausend Bruchstücke, die heute den Planetoiden- oder Asteroidengürtel bilden. In diesem Zusammenhang entstanden sicher auch die Meteorite, und wir können durchaus annehmen, daß die »Eltern« der Meteorite solche im Wachstum behinderten »Planetenenkeimlinge« waren.

In den Innenbezirken des Planetensystems zeugen die zahlreichen Einschlagskrater vom Ende der Planetesimals. Die Krater beweisen übrigens auch, daß die Planeten tatsächlich durch Akkretion entstanden! Die Oberflächen von Mond, Merkur und Mars haben sozusagen die Schlußphase des Planetenwachstums mustergültig konserviert.

Eine Reihe von Planetesimals wurde auch von den Planeten eingefangen. Das gilt wahrscheinlich für die Marsmonde Phobos und Deimos ebenso wie für die »verkehrt« kreisenden Satelliten von Jupiter und Saturn. Andere Planetesimals wurden bei nahen Vorüber-

gängen an den Riesenplaneten stark beschleunigt und aus dem eigentlichen Planetensystem »herauskatapultiert«. Sie bilden die Kometenwolke der Sonne, die wahrscheinlich bis in Entfernungen von mehr als 1000 »Plutoabständen« von der Sonne reicht. Im »Kühlschrank« der Außenbezirke des Sonnensystems hielten sich diese Planetesimals besonders frisch. Während die Planetoiden »ausdörrten«, behielten die Kometen alle flüchtigen Bestandteile und repräsentieren damit fast unverfälschtes Baumaterial der äußeren Planeten. Möglicherweise stellen die Kometen auch eine Population andersartiger Planetesimals dar, die von vornherein in großen Abständen von der Sonne beheimatet waren und nur in Ausnahmefällen einmal in das eigentliche Planetensystem gelangen. Eine solche Portion »Sonnennebeleis« ins Labor zu holen, wird eine der für die Aufklärung der Entstehungsbedingungen der Planeten bedeutungsvollsten Leistungen der Raumfahrt der Zukunft sein.

Aus den unter der Wirkung der Schwerkraft zu kugelförmigen Himmelskörpern »zusammengesackten« Anhäufungen Tausender Planetesimals gingen also die Planeten hervor. Aufschmelzprozesse im Innern sorgten für die Differentiation des Materials; entsprechend ihrer Dichte ordneten sich die verschiedenen Komponenten in Schalen an. Strömungsvorgänge in flüssigen, metallischen Planetenkernen bewirkten die Ausbildung großräumiger planetarischer Magnetfelder. Auch bei den sonnennahen Planeten, bei denen der Sonnenwind die Uratmosphäre hinweggefegt hatte, bildete sich aus den durch das Aufschmelzen freiwerdenden Entgasungsprodukten eine Gashülle. Sprunghaft – wahrscheinlich in weniger als 100 Millionen Jahren – waren im Sonnennebel die Bedingungen für eine neue Phase der kosmischen Entwicklung entstanden: die Jahrmilliarden umspannende Planetenevolution, der wir hier auf der Erde unsere Existenz verdanken.

»akzent« – die Taschenbuchreihe
mit vielseitiger Thematik:
Mensch und Gesellschaft,
Leben und Umwelt, Naturwissenschaft
und Technik. – Lebendiges Wissen
für jedermann, anregend und aktuell,
konkret und bildhaft.

In den wenigen Jahren, die seit dem
Erscheinen der ersten Auflage dieses
akzent-Bandes verfließen sind, hat das
Wissen über die Planeten explosions-
artig zugenommen. Der Autor hat des-
halb eine Umarbeitung vorgenommen,
die mehr als die Hälfte der Abbildungen
und des Textes berührt.
