

GEOkompakt Nr. 21

Die Grundlagen des Wissens

DAS SONNENSYSTEM

Planeten, Monde und ein Stern:
Die Geschichte unserer
kosmischen Heimat



SONNE

Wann das Feuer in unserem
Stern einst zündete

MARS

Was nötig wäre, um den
Roten Planeten zu besiedeln

SATURN

Wie eine Raumsonde seine
Geheimnisse erforscht

VENUS

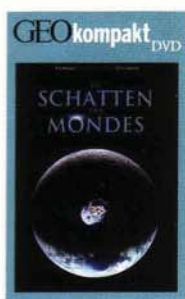
Weshalb aus ihr keine
zweite Erde wurde



Liebe Leserin, lieber Leser,

das Sonnensystem ist unsere Heimat und nähere Nachbarschaft im All. Doch obwohl es für das menschliche Vorstellungsvermögen unfassbar groß erscheint, verschwindet es im kosmischen Maßstab der Milchstraße, ist es nicht viel mehr als eine Insel im Nichts.

Denn während der Abstand zwischen der Sonne und dem Kuiper-Gürtel am Rande unseres Planetensystems im Mittel gigantische zehn Milliarden Kilometer beträgt, findet sich der nächste Stern erst in 40 Billionen Kilometer Distanz, gut 4000-mal weiter entfernt.



Dieses Heft gibt es auch zusammen mit einer Dokumentation über die erste Mondlandung*

Dazwischen: nur Gesteinsbrocken und Staubpartikel, die sich in der Einöde des Raums verlieren.

Unsere Nachbarplaneten sind daher die einzigen Himmelskörper, die wir direkt erforschen können. Und so hat die Menschheit schon vor 50 Jahren begonnen, Späher in die Tiefen des Sonnensystems zu schicken. Als Erste startete 1959 die eher primitiv konstruierte sowjetische Sonde „Lunik 1“, die zum Mond flog, aber noch keine Steuerdüsen für Kurskorrekturen besaß – und so ihr Ziel knapp verfehlte.

Inzwischen werden Hightech-Kundschafter wie die Sonde „New Horizons“ ins All geschossen, die seit 2006 auf dem Weg zum Kuiper-Gürtel ist und auf kleinstem Raum technisch so hoch entwickelte Instrumente versammelt wie kaum ein anderes je von Menschenhand gefertigtes Raumfahrzeug.

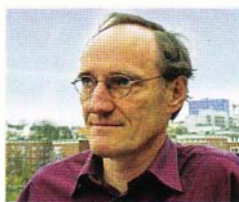
New Horizons hat unter anderem Kameras für sichtbares und infrarotes Licht an Bord, ein Ultraviolett-Spektrometer zur Untersuchung von Atmosphären, ein Instrument zur Analyse von Staubpartikeln und eines zur Messung des Sonnenwinds. Unterwegs wird der Raumspäher im Jahr 2015 den Zwergplaneten Pluto besuchen, ihn fotografieren, im Vorbeiflug seine Oberfläche und Atmosphäre untersuchen – und all diese Daten dann aus etwa sechs Milliarden Kilometer Entfernung zurück zur Erde funken.

Einigen Sonden setzen wir in dieser Ausgabe ein kleines Denkmal. Auf Seite 74 zeigen wir, wohin bisher die meisten Missionen geschickt wurden (Spitzenreiter ist – keine Überraschung – der Mond). Auf Seite 124 stellen wir Ihnen „Cassini“ vor, die sich vor zwölf Jahren auf den Weg an den Rand des Sonnensystems gemacht hat und seither mehr als 140 000 Fotos zurückgefunkt hat. Und auf den Seiten 116 und 126 erzählen wir, wie es mithilfe zweier Sonden gelungen ist, die Gasplaneten Jupiter und Saturn genauer zu erforschen.

Aber wir widmen uns in diesem Heft auch der bemannten Raumfahrt. So rekonstruieren wir das größte Abenteuer, das sich die Menschheit je vorgenommen hat: die Landung auf dem Mond (und erklären, weshalb sie beinahe missglückt wäre).

Zudem präsentieren wir Ihnen ein Szenario, wie die nächste bemannte Mission – der Flug zum Mars – vorbereitet werden müsste. Das klingt zunächst zwar wie Science-Fiction, erweist sich aber bei näherer Betrachtung als deutlich leichter realisierbar als zunächst gedacht.

Ein Teil dieser Ausgabe erscheint in Kombination mit der DVD „Im Schatten des Mondes“, die das Apollo-Programm der NASA rekonstruiert und dabei jene Männer



zu Wort kommen lässt, die vor gut 40 Jahren jenen für sie kleinen, für die Menschheit aber gigantischen Schritt wagten: den von der Leiter ihrer Landefähre auf die Oberfläche des Mondes.

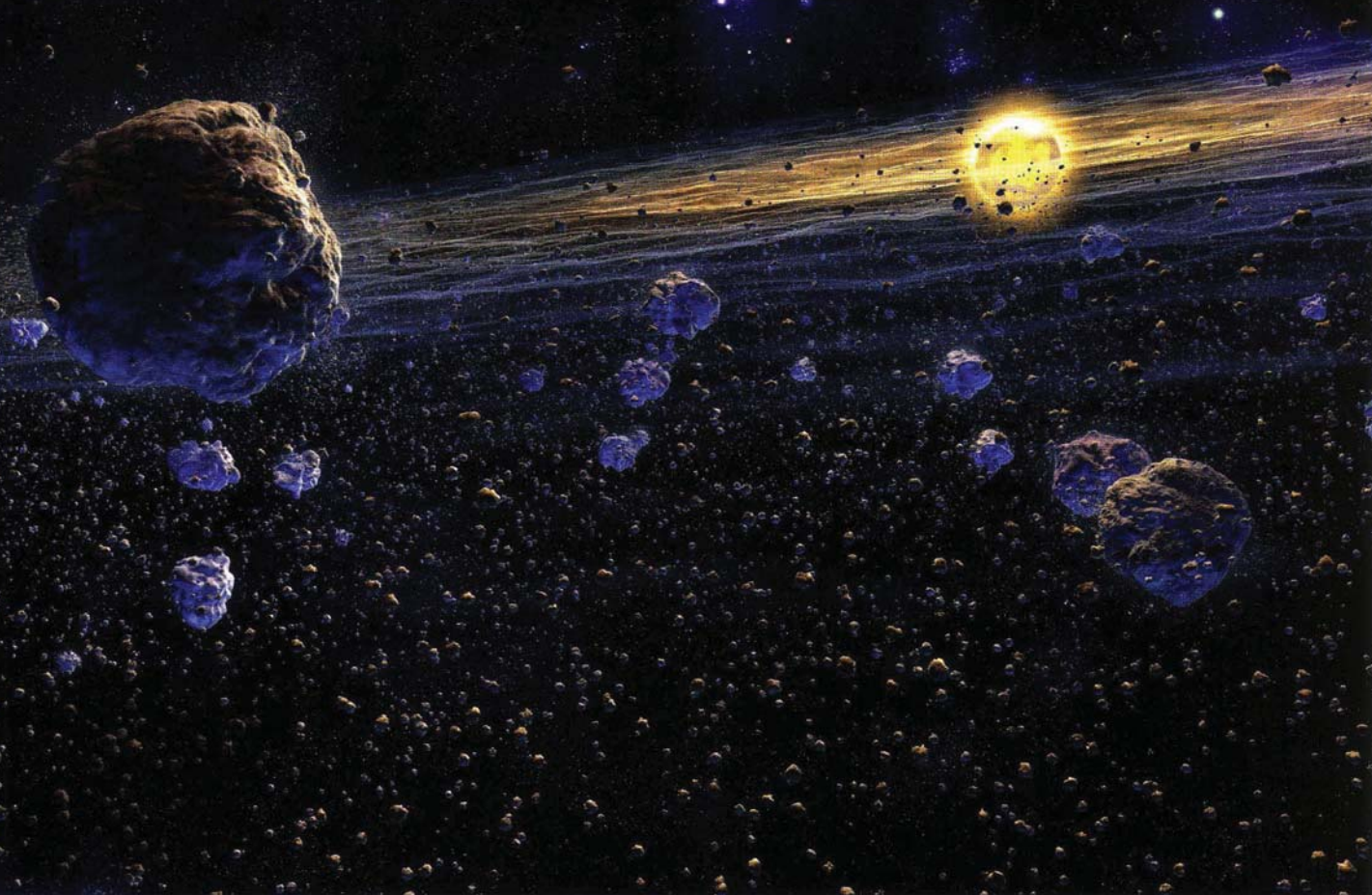
Astronauten wie Edwin „Buzz“ Aldrin und Gene Cernan erzählen davon, wie es war, in klobigen Raumanzügen durch den Staub des Trabanten zu stapfen, seine geringe Gravitation zu spüren, Experimente aufzubauen.

Und: Wie andächtig ihnen zumute war, als sie über den Mondhorizont blickten und dort jenes blau schimmernde Juwel erblickten, das wir „Erde“ nennen und das unsere Basis ist im Tiefschwarz des Alls.

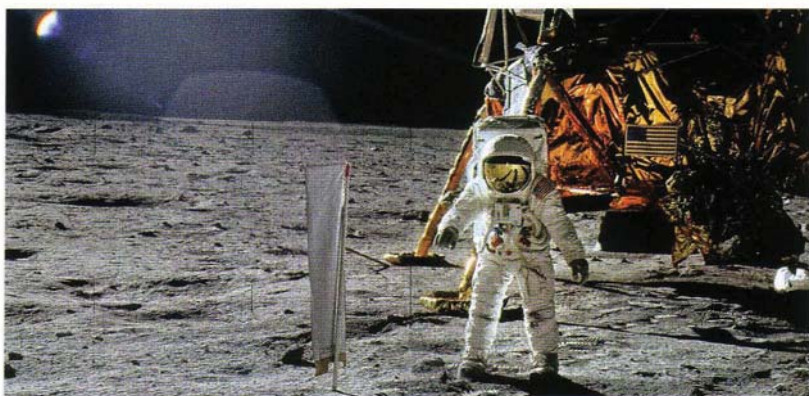
Herzlich Ihr

Michael Steger

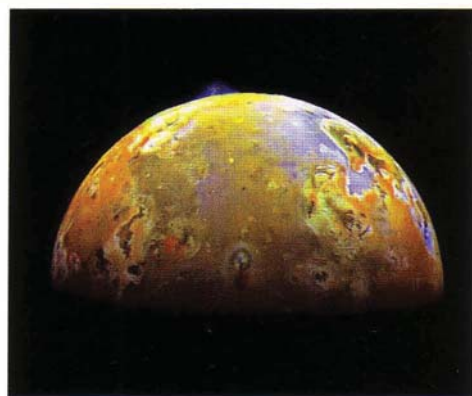
* 15,90 Euro; erhältlich im ausgewählten Zeitschriften- und Buchhandel sowie über den GEO-Leserservice



Geboren aus Gas und Staub. Kurz nach ihrer Bildung drohte die Sonne zu zerreißen – die dramatische Geschichte unseres Sterns. [Seite 30](#)



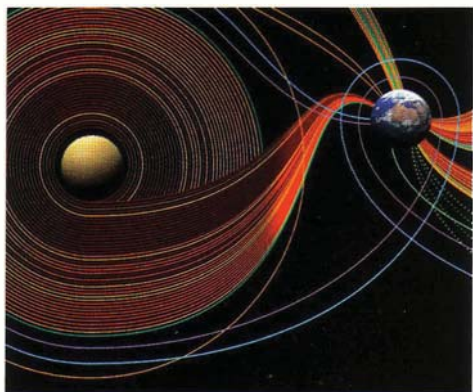
Mondlandung. Wie Neil Armstrong beim Landeanflug fast der Treibstoff ausgegangen wäre – und was beim Flug von Apollo 11 sonst noch misslang. [Seite 76](#)



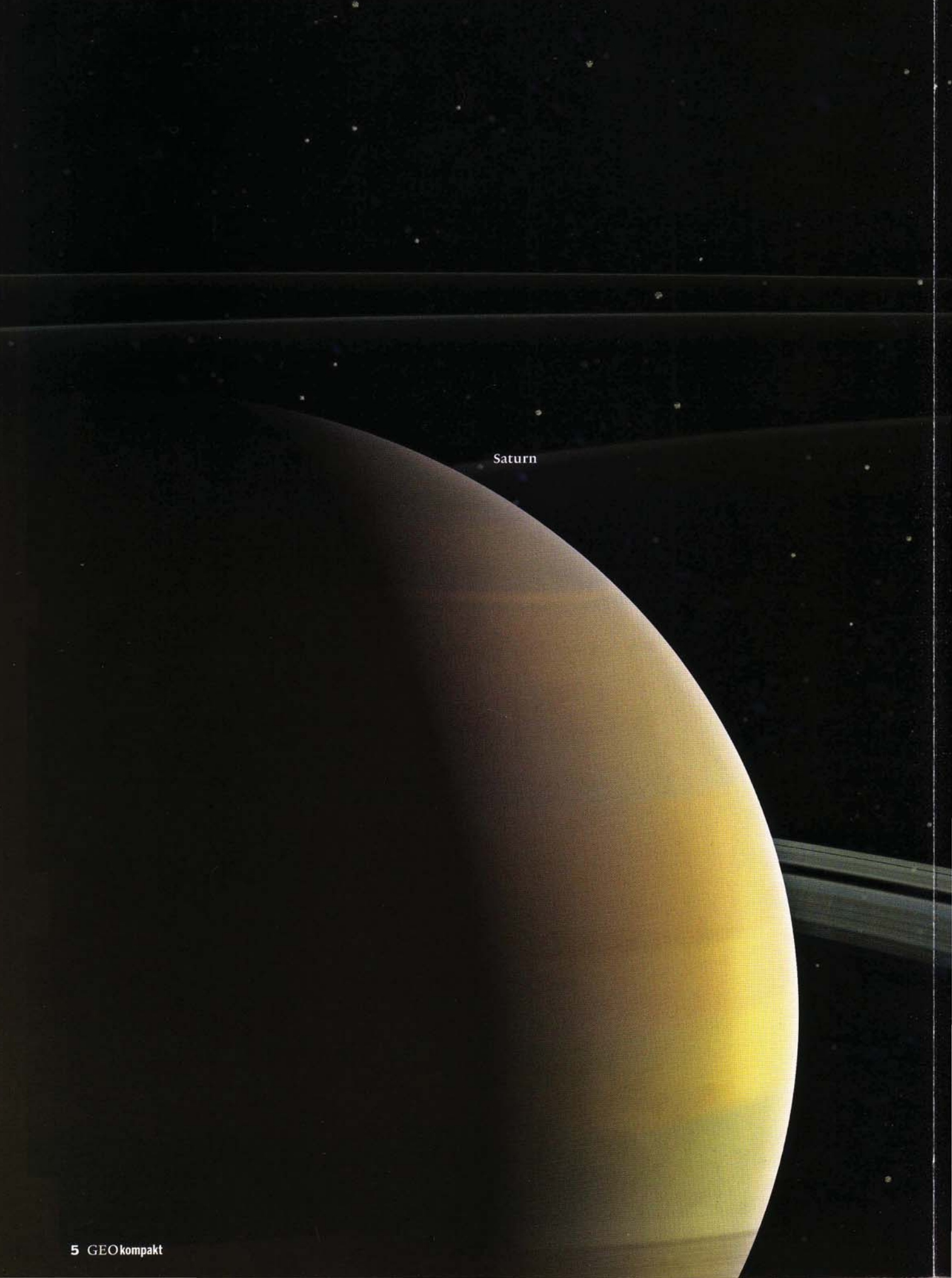
Gasgigant Jupiter. Der Riesenplanet hat 63 Monde (hier: Io). Ist er fast eine Sonne? [Seite 116](#)



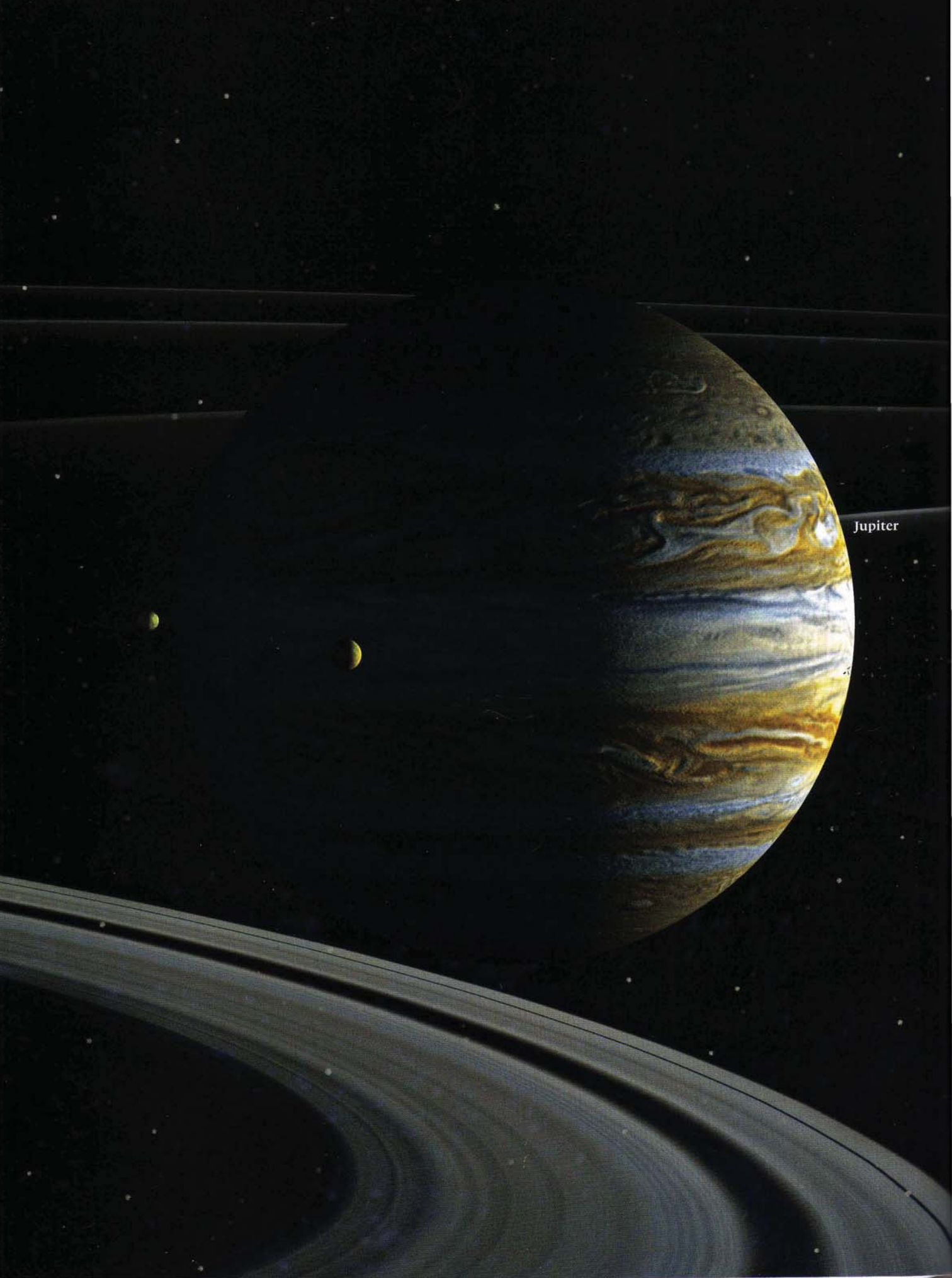
Mission Mars. NASA-Ingenieure planen, wie Astronauten einen Flug zum Roten Planeten überstehen können. [Seite 98](#)



Kundschafter. Alle bislang gestarteten Sonden und ihre Weltraumziele im Überblick. [Seite 74](#)



Saturn



Jupiter

Acht Planeten, mehr als 160 Monde, mindestens fünf Zwergplaneten sowie Millionen von Asteroiden und Kometen umrunden den Stern in der Mitte unserer kosmischen Heimat. Die Sonne ist das Zentrum und die Macht, um die sich alles dreht.

Sie vereint 99,86 Prozent der Gesamtmasse des Systems und bestimmt die Bahn auch des fernsten Kometen. Innen kreisen die vier erdähnlichen Planeten Merkur, Venus, Erde und Mars, aufgebaut aus metallischem Kern und Gesteinsmantel (die Abstandsverhältnisse der Planeten gibt die Grafik unten wieder). Dann folgt eine Lücke, in der sich – vermutlich wegen des Einflusses des Jupiters – kein Planet formen konnte und deshalb zahllose Asteroiden um die Sonne zirkeln. Dem Asteroidengürtel schließen sich

die vier Gasriesen Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun an, deren äußere Schicht überwiegend aus dem leichten Element Wasserstoff besteht. Noch weiter außen, in mehr als viereinhalb Milliarden Kilometer Entfernung – das Licht benötigt bis dorthin gut vier Stunden – umrunden Zwergplaneten (zu denen inzwischen auch Pluto gerechnet wird), Kometen und kleinere Brocken das Zentralgestirn. Kuiper-Gürtel wird dieser Außenposten des Sonnensystems genannt. Weit jenseits von ihm, in einer Distanz, die das Sonnenlicht erst in 0,6 bis 1,5 Jahren erreicht, umgibt eine kugelförmige Region unsere Sonne: die Oortsche Wolke. In ihr ziehen wohl mehr als 100 Milliarden Kometen einsam ihre Bahnen – Überbleibsel aus der Entstehungszeit des Sonnensystems.

Illustration: Tim Wehrmann

Asteroidengürtel

Mars

Erde

Venus

Sonne
Merkur
Venus
Erde
Mars

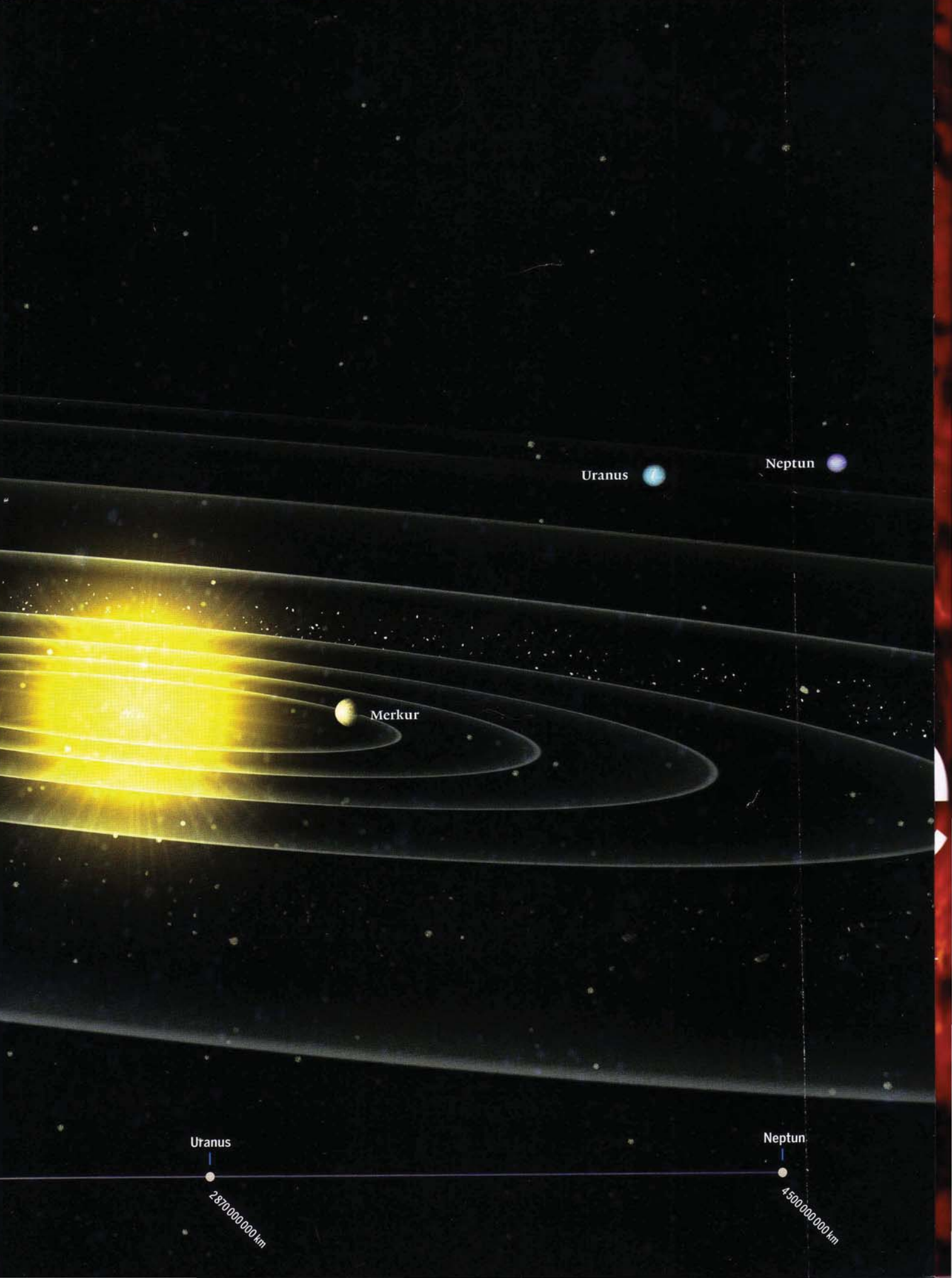
58.000.000 km
108.000.000 km
150.000.000 km
228.000.000 km

Jupiter

778.000.000 km

Saturn

1.430.000.000 km



Uranus

Neptun

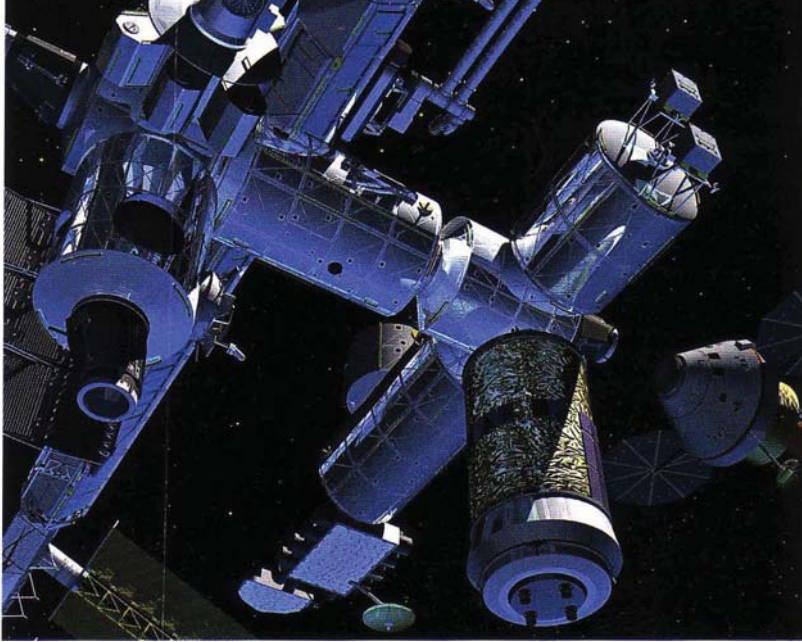
Merkur

Uranus

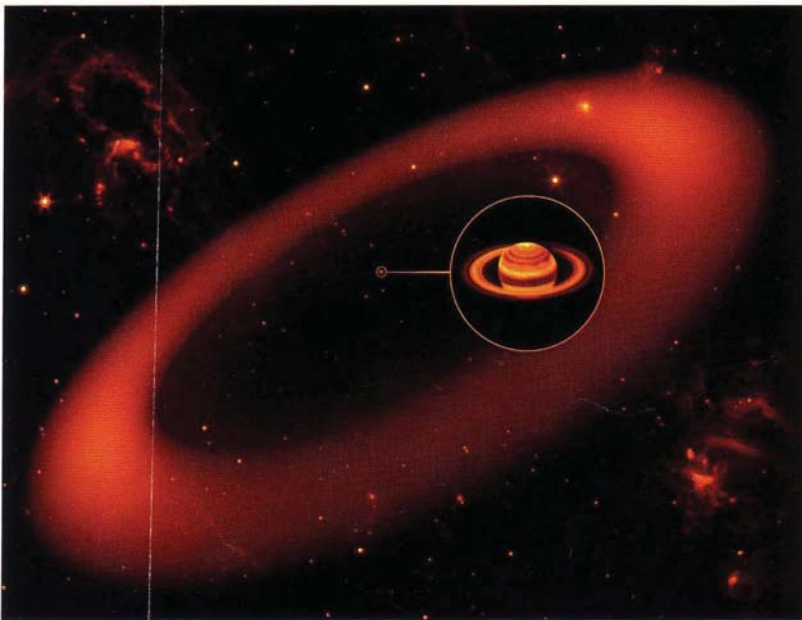
Neptun

2870000000 km

4500000000 km



Zu neuen Welten. Mit Raumfahrzeugen wie der Kapsel „Orion“ (oben rechts, an der Internationalen Raumstation) könnten Menschen Mond und Mars erreichen. **Seite 96**



Reif aus Eis und Gestein. Wie kam der Saturn zu seinen Ringen? Die Sonde „Cassini“ flog 3,5 Milliarden Kilometer, um dieses und andere Rätsel zu lösen. **Seite 126**



Das Rätsel Neptun. In einem einmaligen Wettrennen versuchen mehrere Wissenschaftler im Sommer 1846, die Existenz eines achten Planeten zu beweisen. **Seite 138**

URSPRUNG & ÜBERBLICK

IM BANN DES FEUERS Steckbriefe der Sonne und ihrer acht Planeten **10**

GEBOREN AUS GAS UND STAUB Wie eine kosmische Wolke zum Stern wuchs **30**

DIE INNEREN PLANETEN

DER SONNE GANZ NAH Auf dem Merkur dauert der Tag länger als das Jahr **44**

DIE ANDERE ERDE Weshalb die Venus zum Höllenplaneten wurde **48**

DAS BLAUE WUNDER Ist das Leben auf der Erde ein reiner Glücksfall? **54**

DER GRAUE GEFÄHRTE Wie die Meere auf den Mond kamen **64**

KUNDSCHAFTER DER MENSCHHEIT Hightech-Sonden erforschen das All **74**

DER TRIUMPH DES ADLERS Die erste Mondlandung – fast eine Katastrophe **76**

ZU NEUEN WELTEN Raumfahrzeuge sollen ferne Himmelskörper ansteuern **96**

DIE LÄNGSTE REISE ALLER ZEITEN Weshalb eine Mars-Mission riskant ist **98**

GEFAHR AUS DEM ALL Können wir uns vor Asteroiden schützen? **108**

DIE ÄUSSEREN PLANETEN

IM SOG DES GASGIGANTEN Das Geheimnis im Inneren des Jupiters **116**

SPÄHER IM REICH DES RINGPLANETEN Datenjagd mit Radar und Sensoren **124**

REIF AUS EIS UND GESTEIN Wie die Ringe des Saturns entstanden **126**

DAS RÄTSEL JENSEITS DES URANUS Der Streit um die Entdeckung Neptuns **138**

PLANET NR. 9 Weshalb Pluto heute nur noch als Zwergplanet gilt **148**


Bildnachweis 135
Impressum 105
Vorschau: »Wissenschafts-Expeditionen« 154

Redaktionsschluss: 12. November 2009

Alle Fakten und Daten in diesem Heft sind vom GEOkompakt-Verifikationsteam auf ihre Präzision, Relevanz und Richtigkeit überprüft worden.

Informationen zum Thema und Kontakt zur Redaktion unter www.geokompakt.de

Titelbild: Tim Wehrmann (Blick vom Mond Enceladus auf den Saturn und die dahinter aufgehende Sonne)



Unser Planetensystem

Im Bann de

Seit 4,6 Milliarden Jahren schleudert der gigantische Kernfusionsofen unseres Zentralgestirns Licht in die Tiefen des Alls – zu den Planeten. Sie alle sind einzigartige Welten. Die der Sonne nahe liegenden erhalten reichlich Energie, die äußeren dagegen empfangen wenig Strahlung und sind frostig kühl. Nur die Erde kreist in genau jener Entfernung, in der dauerhaft Ozeane aus Wasser auf der Oberfläche existieren können und so ideale Bedingungen für das Leben herrschen

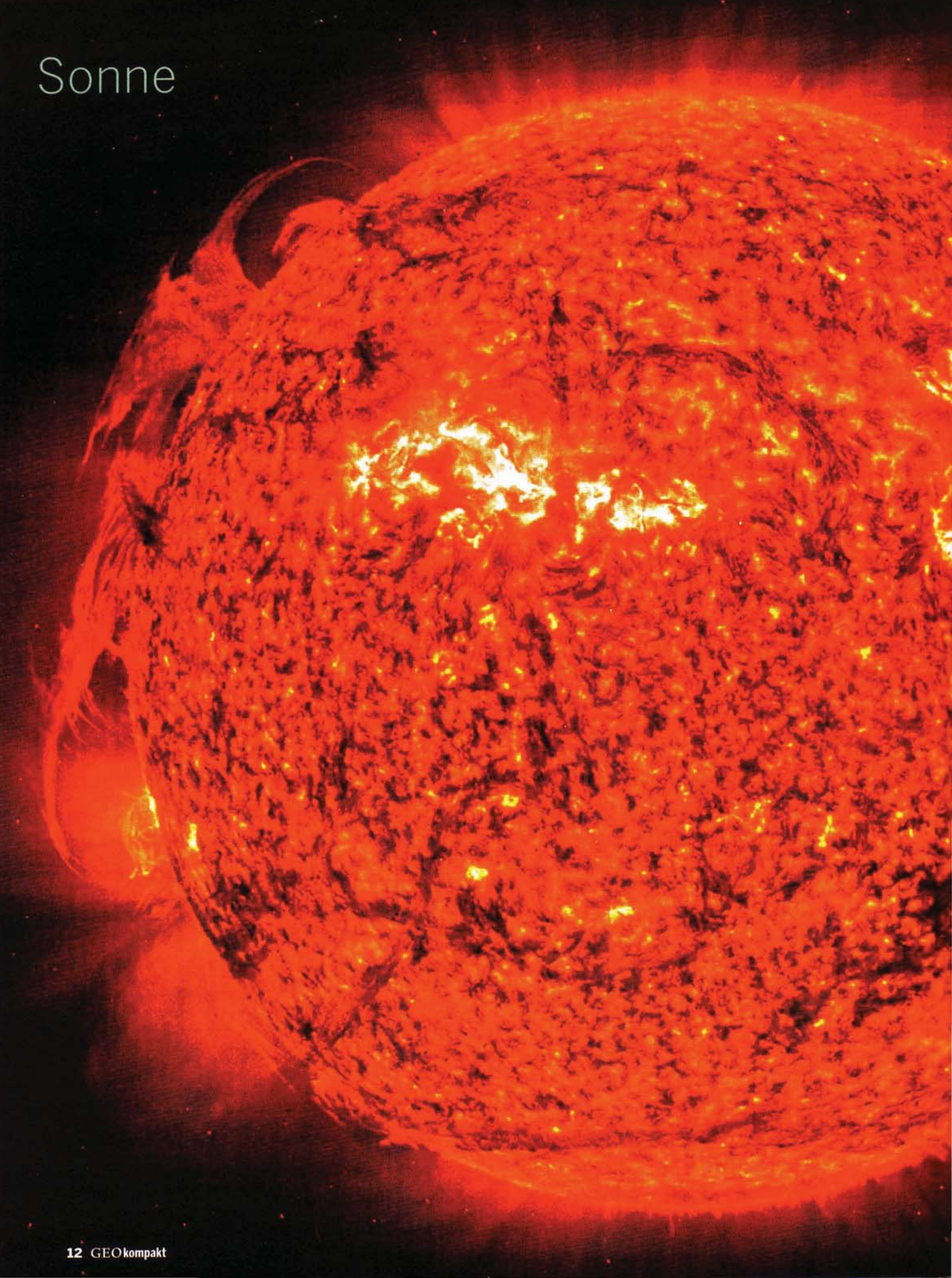


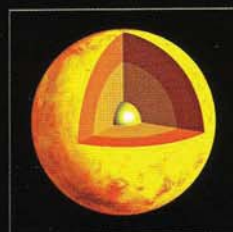
GASWIRBEL

Sonnenflecken – hier durch ihre Magnetfelder sichtbar gemacht – sind Bereiche, die etwas weniger heiß sind als die sonstige Oberfläche des Sterns. Der strahlt in jeder Sekunde gut 100 Trillionen Kilowattstunden Energie ins All ab. Das ist theoretisch genug, um den Energiebedarf der Menschheit für eine Million Jahre zu decken

s Feuers

Sonne





AUFBAU

Die Sonne besteht zu knapp 75 Prozent aus Wasserstoff (H) und zu etwa 25 Prozent aus Helium (He). Im Zentrum verschmilzt H zu He, in der mittleren Zone steigt die entstandene Strahlung auf, in der obersten verwirbeln sich die heißen Gasmassen

Durchmesser

1,4 Mio. km

Volumen

1300 000 (Erde = 1)

Masse

333 000 (Erde = 1)

Umdrehungsdauer

25 Tage (am Äquator)

35 Tage (Pole)

Leuchtkraft

$3,8 \times 10^{26}$ Watt

Schwerkraft

27,9 g (Erde = 1 g)

Temperatur (Zentrum)

15 Mio. °C

Temperatur (Oberfläche)

5500 °C

Magnetfeld

sehr stark

Alter

4,6 Milliarden Jahre

KRAFTWERK

Weil Wasserstoff in ihrem Inneren zu Helium verschmilzt, produziert die Sonne eine ungeheure Energie – mit der sie unter anderem Bögen aus Plasma* Zehntausende Kilometer weit ins All schießt



Erde

Sonne

* Gasgemisch aus Elektronen, elektrisch geladenen und neutralen Atomen

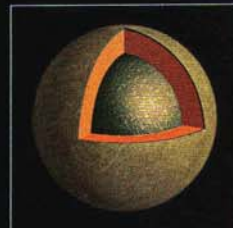
Merkur





KRATERWELT

Der schnellste und der Sonne nächstliegende Planet ist kaum größer als unser Mond. Er hat keine Atmosphäre, die Temperaturen schwanken um gut 600 Grad



AUFBAU

Kruste und Mantel aus Silikatgestein. Darunter ein riesiger, teilweise flüssiger Eisenkern, der ein schwaches Magnetfeld erzeugt

Durchmesser
4879 km

Volumen
0,06 (Erde = 1)

Masse
0,06 (Erde = 1)

Umlaufzeit um die Sonne
88 Erdentage

Geschwindigkeit
47,9 km/sek

Abstand zur Sonne*
58 Mio. km

Tageslänge
176 Erdentage

Schwerkraft
0,38 g (Erde = 1 g)

Temperatur
-180 bis +430 °C

Atmosphäre
ohne

Anzahl Monde
keine



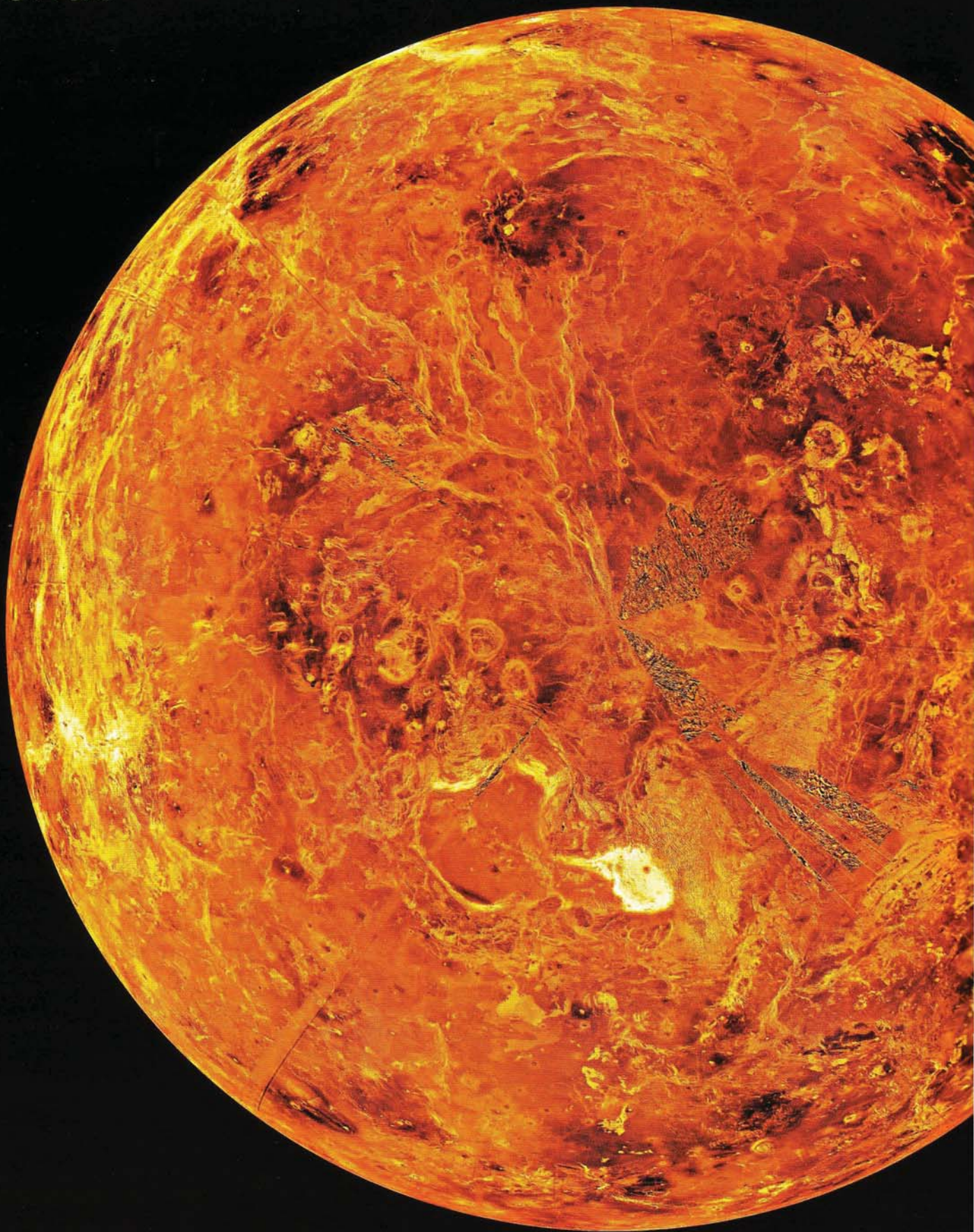
Erde

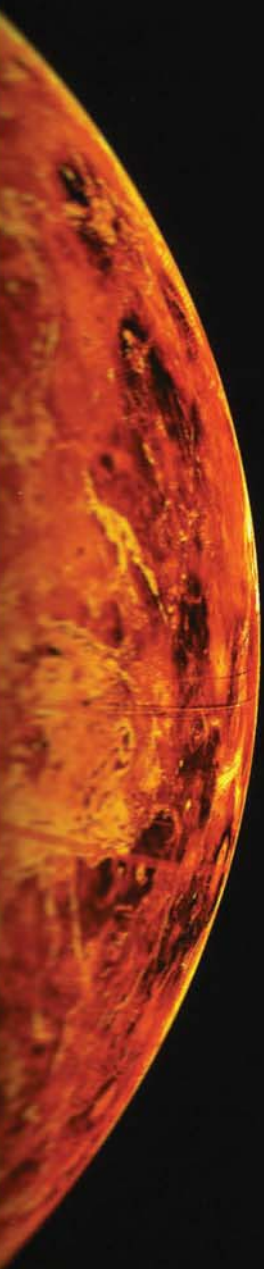


Merkur

* Angegeben ist der mittlere Abstand, da sich die Planeten nicht auf kreisförmigen, sondern elliptischen Bahnen bewegen und der Abstand somit variiert.

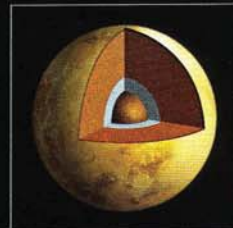
Venus





SCHWEFELHÖLLE

Einst ähnelten sich Venus und Erde. Doch die klimatische Entwicklung unseres Nachbarplaneten machte ihn zu einer unwirtlichen, mehr als 460 Grad heißen Welt (Radarbild)



AUFBAU

Innerer und äußerer Kern aus Metall, Mantel und Kruste aus Gestein – wie bei der Erde. Allerdings keine Plattentektonik und kein Magnetfeld

Durchmesser

12 104 km

Volumen

0,86 (Erde = 1)

Masse

0,82 (Erde = 1)

Umlaufzeit um die Sonne

225 Erdentage

Geschwindigkeit

35,0 km/sek

Abstand zur Sonne

108 Mio. km

Tageslänge

117 Erdentage

Schwerkraft

0,9 g (Erde = 1 g)

Temperatur

+462 °C

Atmosphäre

96,5 % Kohlendioxid

Anzahl Monde

keine



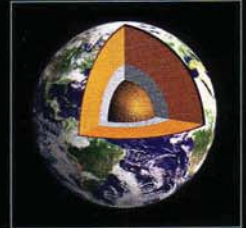
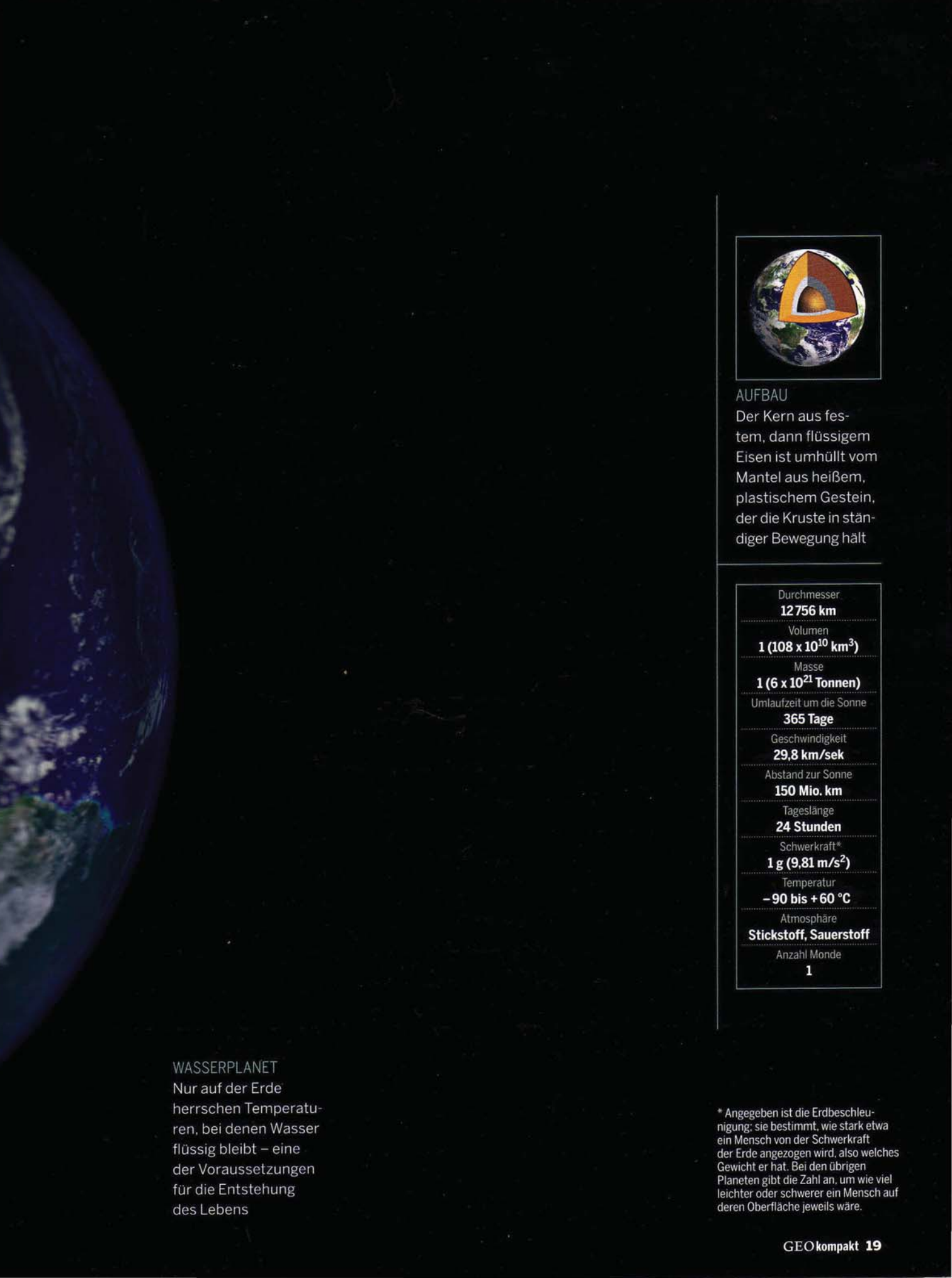
Erde



Venus

Erde





AUFBAU

Der Kern aus festem, dann flüssigem Eisen ist umhüllt vom Mantel aus heißem, plastischem Gestein, der die Kruste in ständiger Bewegung hält

Durchmesser
12 756 km

Volumen
1 ($108 \times 10^{10} \text{ km}^3$)

Masse
1 (6×10^{21} Tonnen)

Umlaufzeit um die Sonne
365 Tage

Geschwindigkeit
29,8 km/sek

Abstand zur Sonne
150 Mio. km

Tageslänge
24 Stunden

Schwerkraft*
1 g ($9,81 \text{ m/s}^2$)

Temperatur
-90 bis +60 °C

Atmosphäre
Stickstoff, Sauerstoff

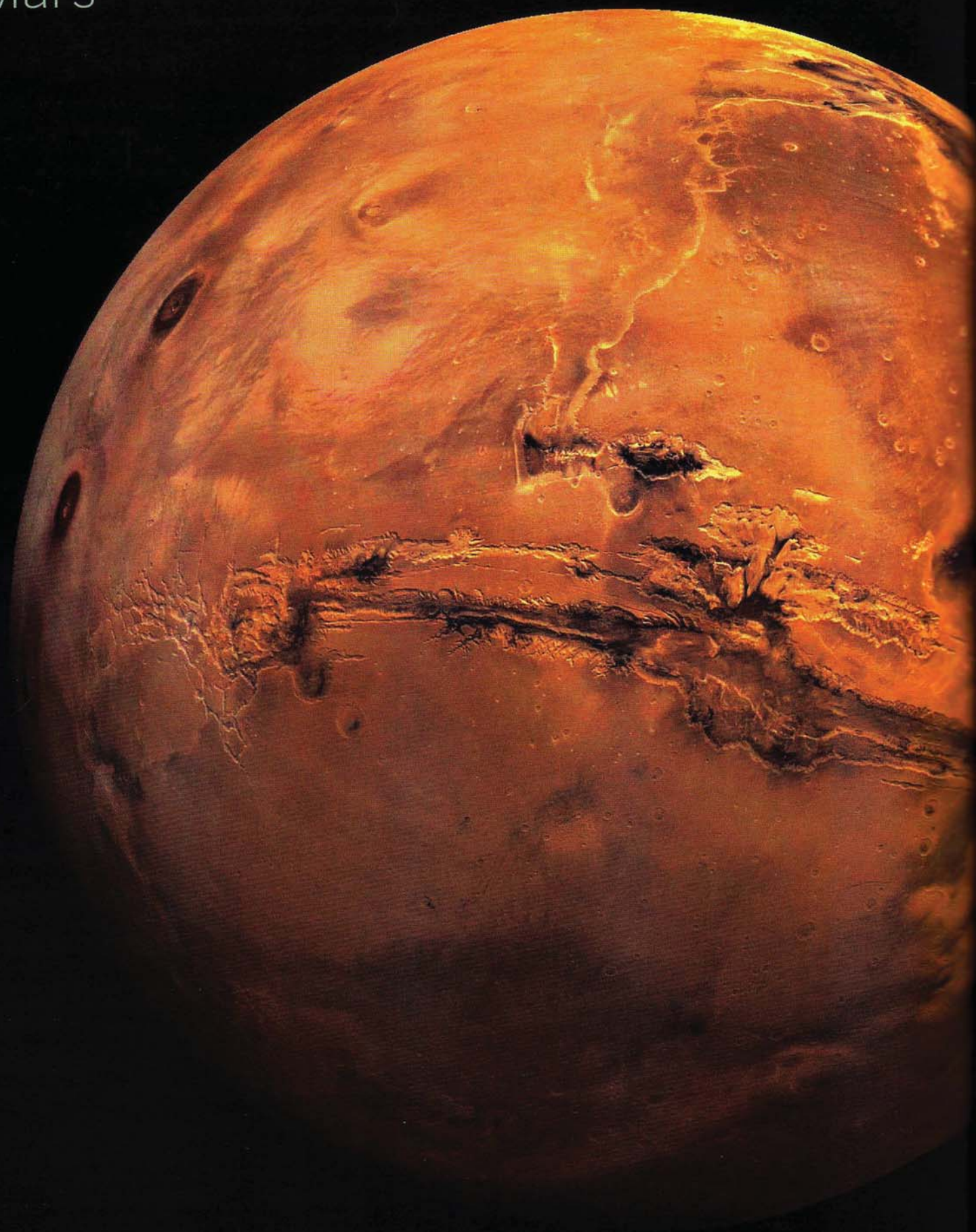
Anzahl Monde
1

WASSERPLANET

Nur auf der Erde herrschen Temperaturen, bei denen Wasser flüssig bleibt – eine der Voraussetzungen für die Entstehung des Lebens

* Angegeben ist die Erdbeschleunigung; sie bestimmt, wie stark etwa ein Mensch von der Schwerkraft der Erde angezogen wird, also welches Gewicht er hat. Bei den übrigen Planeten gibt die Zahl an, um wie viel leichter oder schwerer ein Mensch auf deren Oberfläche jeweils wäre.

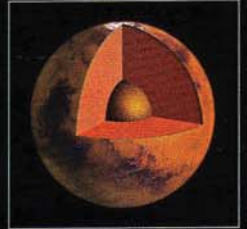
Mars





STAUBWÜSTE

Trocken, staubig und stürmisch ist es auf dem Roten Planeten. Ob das Leben hier je eine Chance hatte, ist noch ungeklärt



AUFBAU

Vermutlich flüssiger Kern aus Eisen und Schwefel, umgeben von mächtigem Gesteinsmantel. Dicke unbewegliche Kruste. Kein Magnetfeld

Durchmesser

6794 km

Volumen

0,15 (Erde = 1)

Masse

0,11 (Erde = 1)

Umlaufzeit um die Sonne

687 Erdentage

Geschwindigkeit

24,1 km/sek

Abstand zur Sonne

228 Mio. km

Tageslänge

24,6 Erdenstunden

Schwerkraft

0,38 g (Erde = 1 g)

Temperatur

-140 bis +20 °C

Atmosphäre

95 % Kohlendioxid

Anzahl Monde

2

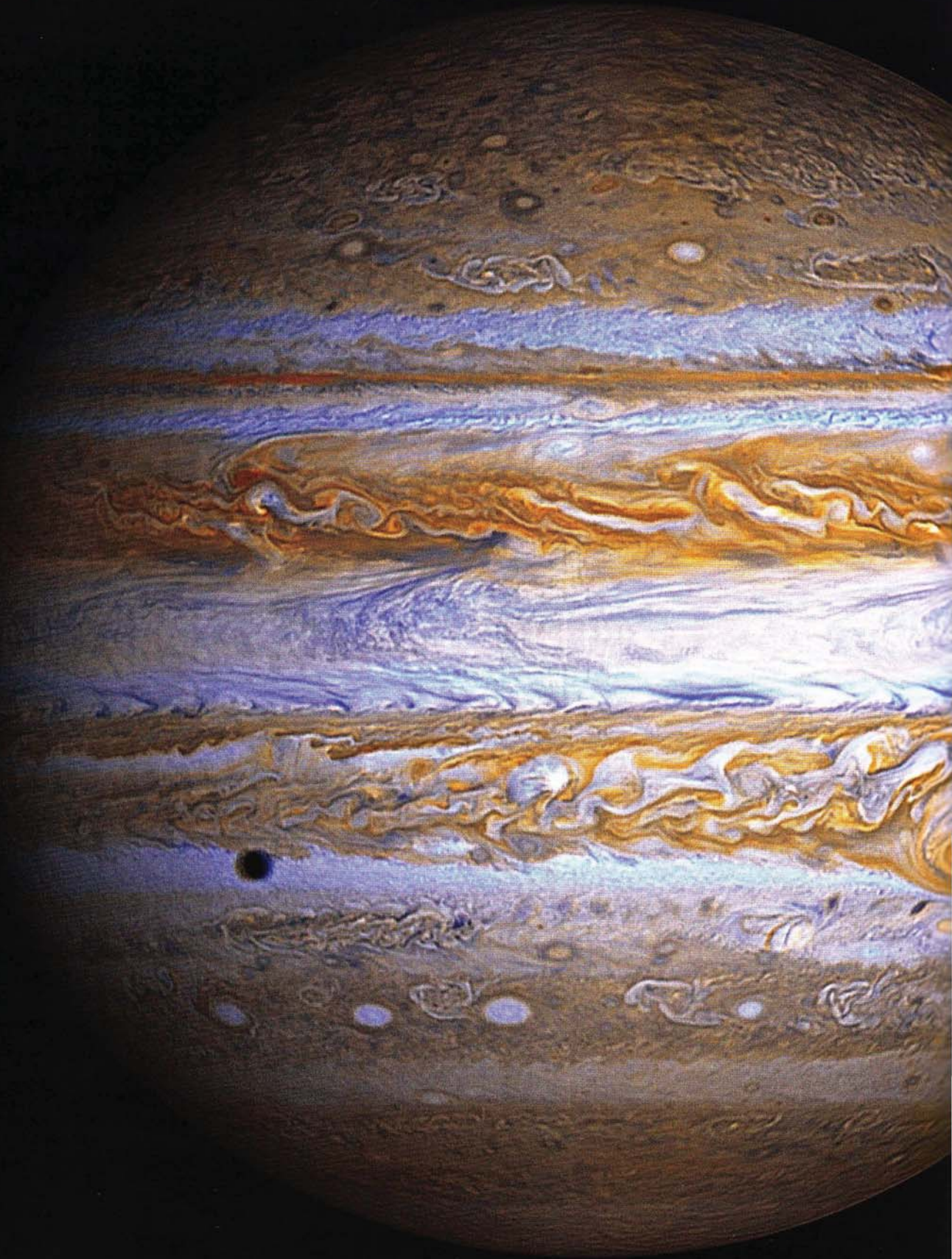


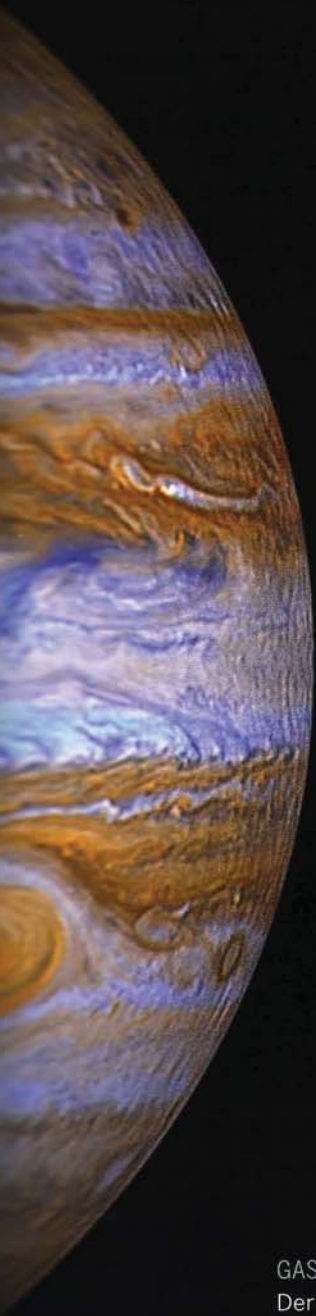
Erde



Mars

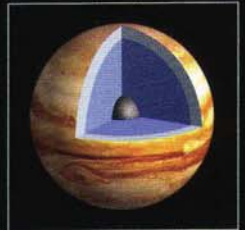
Jupiter





GASGIGANT

Der weitaus größte Planet besteht überwiegend aus Wasserstoff. Stürme, Gewitter sowie eine schnelle Drehung geben ihm sein Muster aus Wolkenstreifen



AUFBAU

Kleiner Kern aus schweren Elementen, Mantel aus metallischem und darüber flüssigem Wasserstoff. Dichte Atmosphäre

Durchmesser

142 984 km

Volumen

1321 (Erde = 1)

Masse

318 (Erde = 1)

Umlaufzeit um die Sonne

11,9 Erdenjahre

Geschwindigkeit

13,1 km/sek

Abstand zur Sonne

779 Mio. km

Tageslänge

9,8 Stunden

Schwerkraft*

2,36 g (Erde = 1 g)

Temperatur*

- 130 °C

Atmosphäre

Wasserstoff, Helium

Anzahl Monde

mindestens 63

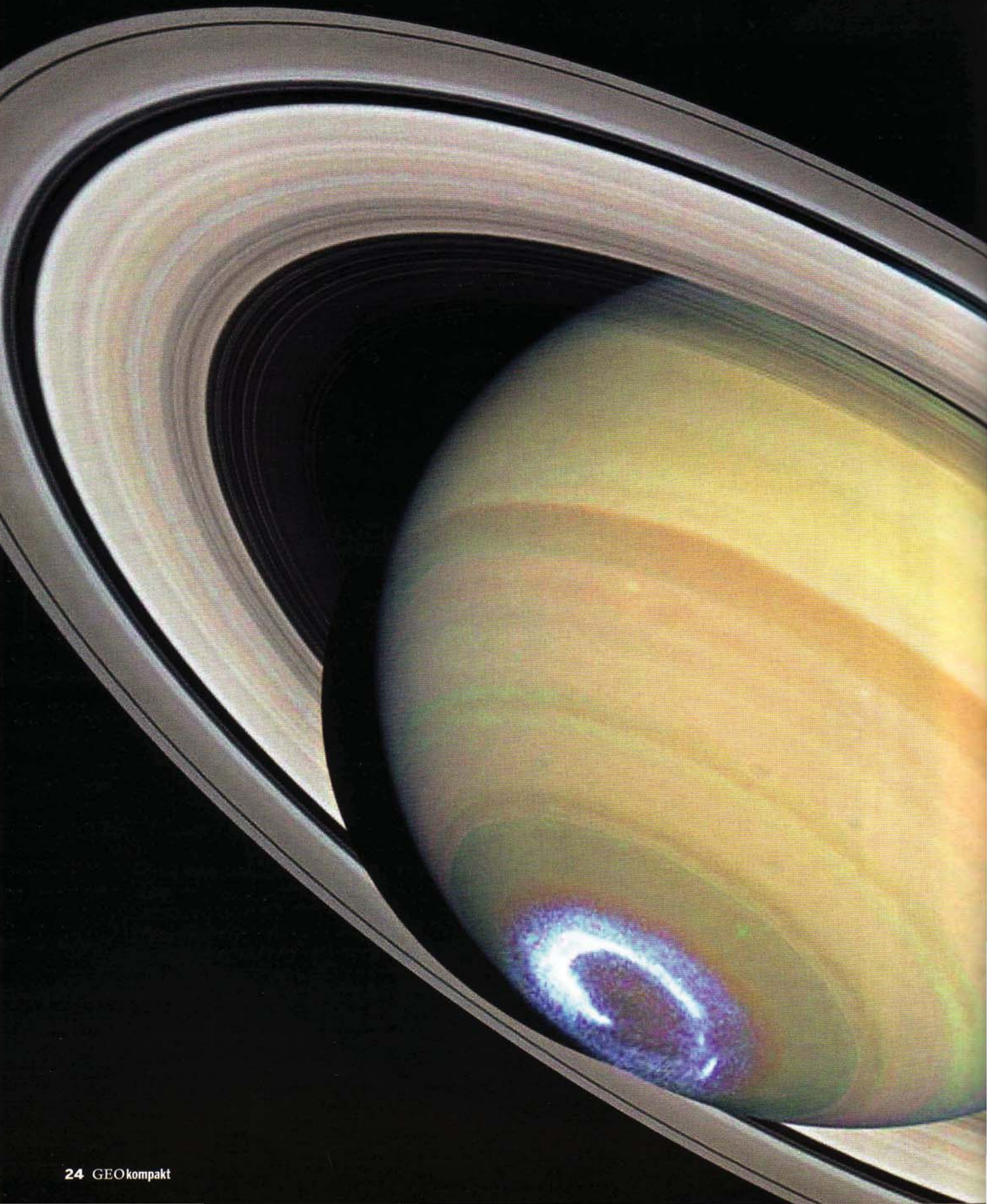


Erde

Jupiter

* Bei Jupiter und den übrigen Gasplaneten beziehen sich Temperatur und Schwerkraft auf die Wolkenobergrenze.

Saturn



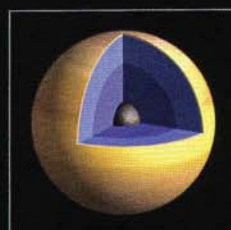
RINGSYSTEM

Auch andere Planeten haben Ringe aus Eis und Gestein – doch bei keinem sind sie so groß (knapp 300 000 Kilometer Durchmesser) und so auffällig. Die Leuchterscheinungen am Pol ähneln dem Polarlicht der Erde



Erde

Saturn



AUFBAU

Ähnlich wie Jupiter: fester Gesteinskern, darüber Schichten aus metallischem und flüssigem Wasserstoff. Atmosphäre aus Wasserstoff

Durchmesser

120 536 km

Volumen

764 (Erde = 1)

Masse

95 (Erde = 1)

Umlaufzeit um die Sonne

29,5 Erdenjahre

Geschwindigkeit

9,7 km/sek

Abstand zur Sonne

1433 Mio. km

Tageslänge

10,2 Stunden

Schwerkraft

0,92 g (Erde = 1 g)

Temperatur

-180 °C

Atmosphäre

96 % Wasserstoff

Anzahl Monde

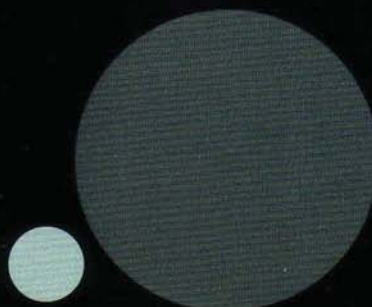
mindestens 61

Uranus



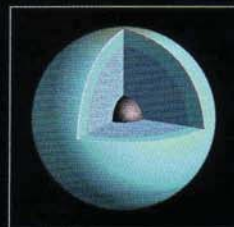
FROSTWELT

In der Atmosphäre dieses kühlen Gasplaneten fernab der Sonne geht es eher ruhig zu, weil keine Wärme aus dem Inneren des Planeten aufsteigt



Erde

Uranus



AUFBAU

Kern aus Eis und Gestein, umgeben von Mantel aus Wassereis, Methan und Ammoniak. Darüber Gasschicht aus Wasserstoff, Helium und Methan

Durchmesser

51 118 km

Volumen

63,1 (Erde = 1)

Masse

14,5 (Erde = 1)

Umlaufzeit um die Sonne

84 Erdenjahre

Geschwindigkeit

6,81 km/sek

Abstand zur Sonne

2871 Mio. km

Tageslänge

17,2 Stunden

Schwerkraft

0,9 g (Erde = 1 g)

Temperatur

-220 °C

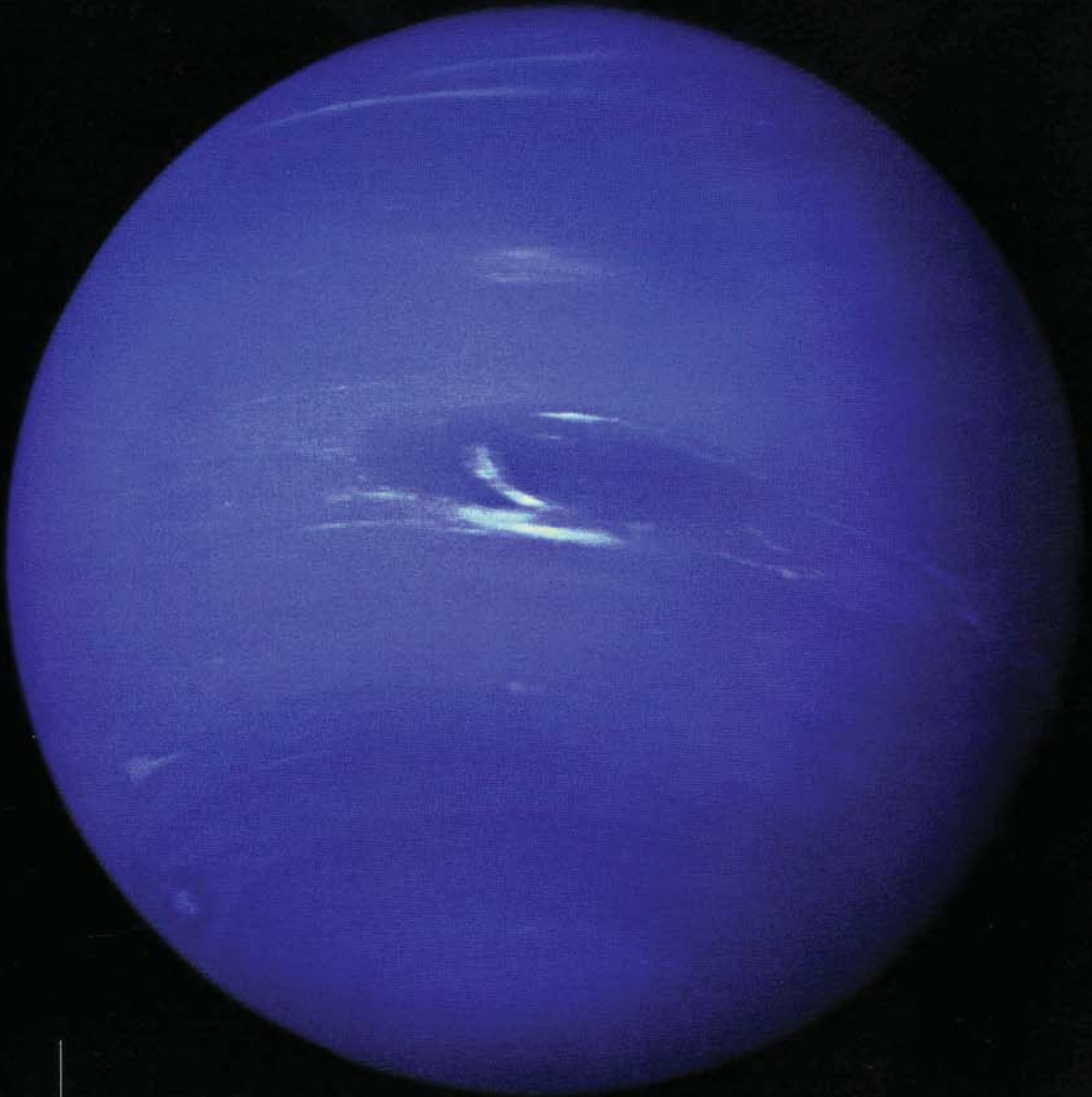
Atmosphäre

**Wasserstoff,
Helium, Methan**

Anzahl Monde

27

Neptun



Durchmesser

49 528 km

Volumen

57,7 (Erde = 1)

Masse

171 (Erde = 1)

Umlaufzeit um die Sonne

165 Erdenjahre

Geschwindigkeit

5,43 km/sek

Abstand zur Sonne

4 495 Mio. km

Tageslänge

16,1 Stunden

Schwerkraft

1,14 g (Erde = 1 g)

Temperatur

-216 °C

Atmosphäre

**Wasserstoff,
Helium, Methan**

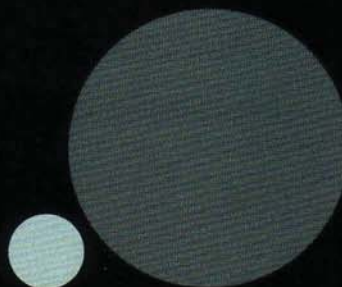
Anzahl Monde

13



AUFBAU

Fester Kern, Mantel aus Eis, Methan und Ammoniak, darüber Wasserstoff, Helium, Methan in Gasform. Rätselhafte Wärmequelle im Inneren



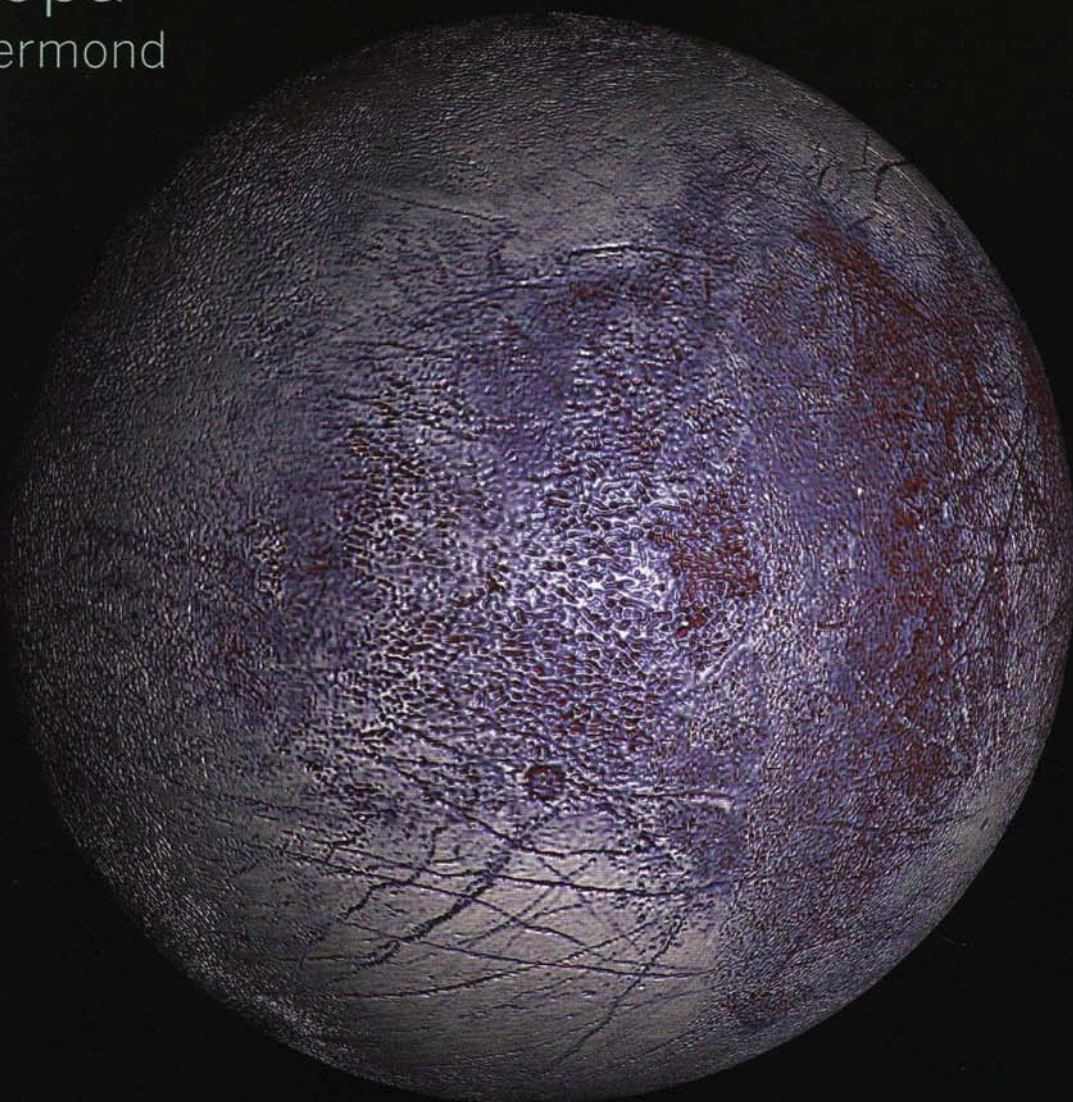
Erde

Neptun

WASSERSTOFFBALL
Neptun ähnelt in Größe und Aufbau stark Uranus, doch toben in seiner Atmosphäre mehr Stürme – angetrieben von einer noch unbekannten Energiequelle im Inneren

Europa

Jupitermond



DIE BEGLEITER

Monde – also Himmelskörper, die einen Planeten umkreisen – können unregelmäßig geformte Gesteinsbrocken von wenigen Kilometern Durchmesser sein oder planetengroße, runde Gebilde. Die beiden gewaltigsten, der Jupitermond Ganymed und der Saturnmond Titan, übertreffen mit mehr als 5000 Kilometer Durchmesser sogar den Merkur, und manche, wie Titan, besitzen eine Atmosphäre. Andere Monde erweisen sich als verblüffende Welten. So offenbart der Jupitermond Europa eine Oberfläche aus Eis mit Rissen, manche davon mehr als 1000 Kilometer lang. Unter der gefrorenen Decke liegt ein Wasserozean. Vermutlich »kneten« Gravitationskräfte des Jupiters den Mond, erhitzen ihn so und halten das Wasser in der Tiefe flüssig.



Erde

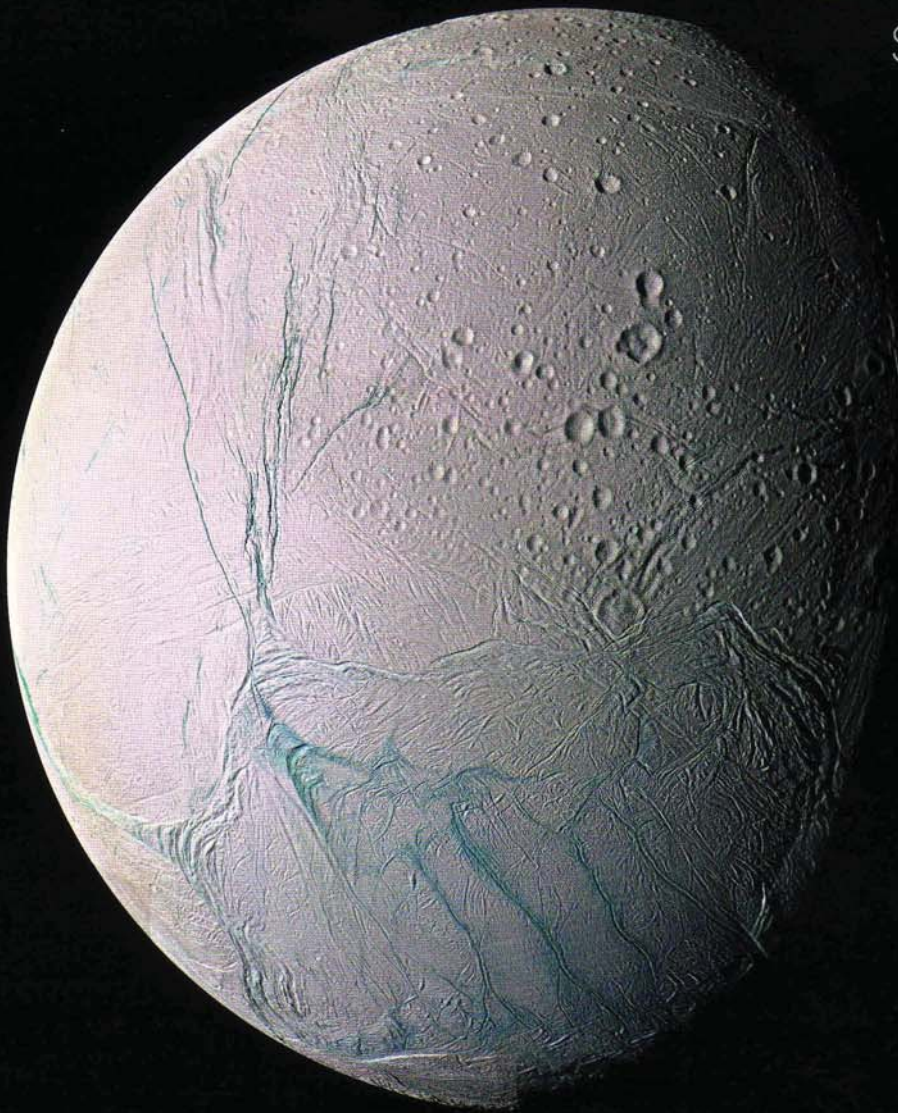


Europa

Durchmesser
3130 km
Masse
0,008 (Erde = 1)
Umlaufzeit
3,55 Erdentage
Umdrehungsdauer
3,55 Erdentage
Abstand zum Jupiter
670 900 km
Schwerkraft
0,134 g (Erde = 1 g)
Temperatur
- 223 bis - 163 °C
Oberfläche
Eis, darunter Wasser
Inneres
Gestein, Eisenkern
Entdeckung
1610 – Galileo Galilei

Enceladus

Saturnmond



Durchmesser

504 km

Masse

0,000018 (Erde = 1)

Umlaufzeit

1,37 Erdentage

Umdrehungsdauer

1,37 Erdentage

Abstand zum Saturn

237 950 km

Schwerkraft

0,0113 g (Erde = 1 g)

Temperatur

- 240 bis - 128 °C

Oberfläche

Eis

Inneres

vermutl. Gesteinskern

Entdeckung


1789 – William Herschel



Erde Enceladus

SCHNEEMOND

Aus den Streifen am Südpol von Enceladus schießen feinste Eispartikel heraus. Sie stammen vermutlich aus einem See im Untergrund, der möglicherweise organische Substanzen – Zutaten des Lebens – enthält □



Bildung des Sonnensystems

Geboren aus Gas und Staub

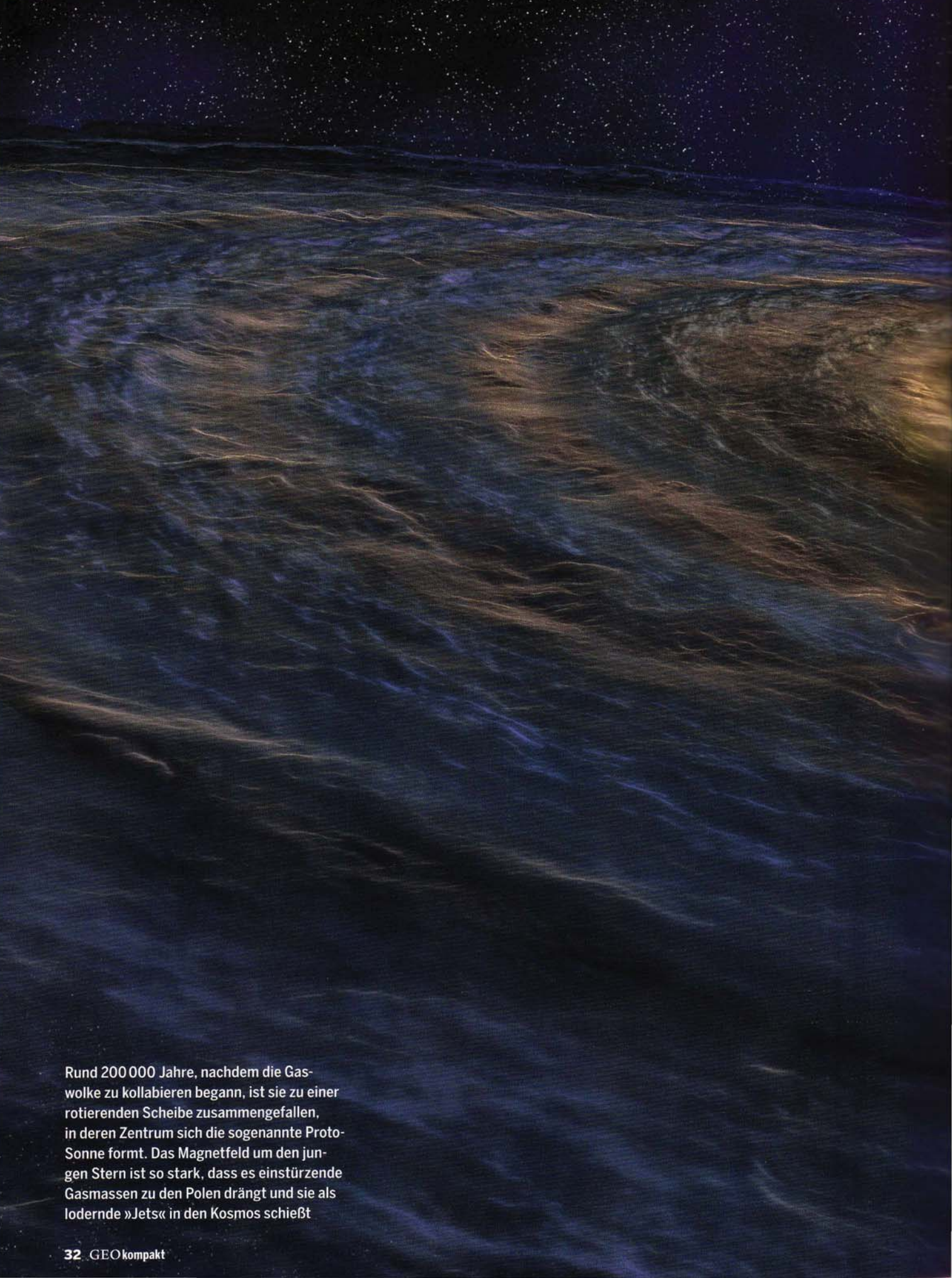
Als vor gut 4,6 Milliarden Jahren in einem Außenbezirk unserer Milchstraße ein gewaltiger Gasnebel in sich zusammenfällt, beginnt die stürmische Entstehungsgeschichte unserer Heimat im All: Im Zentrum der rotierenden Gasmassen ballt sich der Vorläufer der Sonne zusammen – und zündet schließlich

Text: Rainer Harf

Illustrationen: Jochen Stuhmann

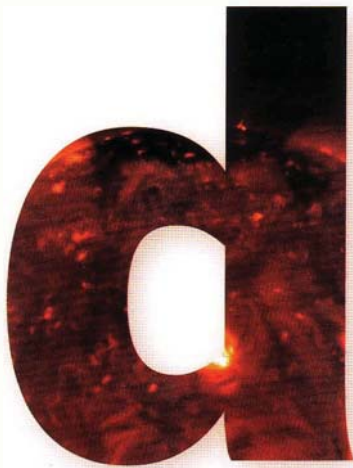


Die Brutstätte unseres Sonnensystems:
ein gewaltiger kosmischer Nebel aus winzigen
Staubkörnern sowie aus Wasserstoff
und Helium. Der wolkige Koloss misst mehrere
Billiarden Kilometer im Durchmesser –
ehe er unter seiner eigenen Schwerkraft
allmählich in sich zusammenfällt



Rund 200 000 Jahre, nachdem die Gaswolke zu kollabieren begann, ist sie zu einer rotierenden Scheibe zusammengefallen, in deren Zentrum sich die sogenannte Proto-Sonne formt. Das Magnetfeld um den jungen Stern ist so stark, dass es einstürzende Gasmassen zu den Polen drängt und sie als lodernde »Jets« in den Kosmos schießt





DIES IST DIE GESCHICHTE eines kosmischen Dramas. Sie erzählt von der wundersamen Geburt eines Sterns und seiner Planeten, von seinem stürmischen Werdegang und seinem unaufhaltsamen Todeskampf.

Es ist die Biografie der Sonne – jenes Himmelskörpers, dem wir unser Leben verdanken.

Die Geschichte beginnt vor rund fünf Milliarden Jahren in einem Außenbezirk der Milchstraße, am Rande des Orionarms. Dort wabert die Brutstätte unserer künftigen Heimat: eine gewaltige dunkle Wolke aus Gas und Staub – ein mächtiger Nebel, der sich über viele Billionen Kilometer in die finsternen Weiten des Alls erstreckt.

Ein Lichtstrahl, 300 000 Kilometer pro Sekunde schnell, brauchte etwa ein Jahr, um diese Wolke zu durchqueren.

In ihrem Inneren sind die Gasmoleküle und -atome, zumeist Wasserstoff und Helium, äußerst dünn verteilt; in einem Kubikzentimeter schwirren gerade einmal um die 1000 Teilchen.

Das ist ein Nichts, bestenfalls ein Hauch von Materie. Verschwindend wenig im Vergleich zur heutigen irdischen Atmosphäre, wo sich auf Meereshöhe 27 Trilliarden Moleküle in jedem Kubikzentimeter Luft ballen (das ist eine Zahl mit 21 Nullen).

In noch geringerer Menge schweben mikroskopisch kleine Staubteilchen im kosmischen Dunst umher. Etwa metallische Partikel aus Eisen, Silizium, Nickel oder Gold, die nicht mehr als

ein Millionstel Meter messen. Es ist die Asche längst erloschener Riesen Sonnen, in deren Kern sie Jahrmilliarden zuvor unter Druck und Hitze aus leichteren Elementen wie Wasserstoff und Helium gebacken worden sind.

Diese mächtigen Sterne haben ihren Brennstoff vor geraumer Zeit verbraucht, sind dann unter ihrer eigenen Schwerkraft kollabiert und haben schließlich in einer gigantischen Explosion einen Großteil ihrer Materie ins All geschleudert.

Weit älter noch als der Staub sind die Gasatome in der Wolke. Ihre Herkunft reicht bis an den Anfang aller Dinge – damals, vor nunmehr 13,7 Milliarden Jahren, als sich im Urknall das Universum selbst gebar. Als sich die gesamte Energie des Kosmos, gestaucht auf einen Punkt, mit einem Mal aufblähte und Raum und Zeit erschuf.

Ein Teil dieser Energie wandelte sich augenblicklich in Materie um. Bereits Sekundenbruchteile nach der Genesis bildeten sich winzige Elementarteilchen: negativ geladene Elektronen, positiv geladene Protonen und ladungsfreie Neutronen.

Dann verstrichen 380 000 Jahre, das Universum dehnte sich aus, kühlte dabei ab, und die Elementarteilchen formten neue Materiebausteine.

Es entstanden Wasserstoff- und Heliumatome, die einfachsten und leichtesten aller Atome. In jedem dieser Partikel rasen die kleinen Elektronen um größere, im Zentrum vibrierende Atomkerne, die aus Protonen und Neutronen bestehen.

Wasserstoff und Helium stellen auch heute noch den Großteil sämtlicher Elemente im Universum. Allenthalben haben Astronomen gewaltige Gasnebel aus diesen Stoffen entdeckt, die um das Zentrum der Galaxis kreisen.

Vor etwas mehr als 4,6 Milliarden Jahren (so eine Hypothese) kommt es in der Nähe unserer Urwolke am Rande des Orionarms zu einer verheerenden Katastrophe – die zugleich die Geburt unseres Sonnensystems auslöst.

Ein sterbender Riesenstern birst: Mit mehreren Tausend Kilometern pro Sekunde schleudert die gewaltige Explosion die stellaren Überreste in den Raum.

Eine mächtige Druckwelle breitet sich in der Finsternis des Alls aus – und trifft mit voller Wucht auf die Urwolke.

Durch den enormen Druck verdichten sich in manchen Bereichen des dünnen Dunstes die Gas- und Staubteilchen millionenfach.

Die Dichte der Materie ist nun so groß, dass Tag für Tag zufällig Gaspartikel zusammenstoßen. Ähnlich wie Gummikugeln prallen die Atome gegeneinander und fliegen wieder auseinander. Bei solchen Karambolagen geben sie stets einen Teil ihrer Bewegungsenergie ab; die entweicht in Form von Strahlung ins All.

Dabei kühlt die Wolke ab, denn physikalisch ist Wärme nichts anderes als die Bewegungsenergie von Teilchen.

Und ähnlich wie in einem Dampfkochtopf, dessen Inhalt allmählich erkaltet, nimmt mit schwindender Temperatur der Druck des Gases ab. Dadurch aber kann sich in dem Urnebel nun jene fundamentale Gewalt entfalten, die noch heute Sonne und Planeten zusammenhält: die Gravitationskraft.

Denn je kälter das Gas wird, je langsamer also die Atome und Moleküle in der Wolke umherfliegen, desto mächtiger wirkt ihre gegenseitige Anziehungskraft, desto enger rücken sie zusammen.

Die Folge: Der Nebel verdichtet sich. Immer mehr Masse ballt sich auf gleichem Raum, immer stärker ziehen sich die Gaspartikel an.

AUF DIESE WEISE KOMMT ein sich selbst verstärkender, unumkehrbarer Prozess in Gang: Die prästellare Wolke, aus der Jahrtausenden später unser Sonnensystem entstehen wird, kollabiert allmählich unter ihrer eigenen Masse.

Da der gewaltige Gasnebel langsam um sich selbst rotiert, fällt er nicht gleichförmig von allen Seiten in sich zusammen. Denn die Drehung setzt

der Gravitation eine nach außen gerichtete Gewalt entgegen, die Fliehkraft (die gleiche Macht, die Menschen auf einem Karussell nach außen treibt).

Das Gas sinkt also über Jahrmillionen zu einer flach gedrückten Spindel zusammen, einem kreiselnden Diskus, der „Akkretionsscheibe“ (von lat. *accretio* = Anwachsen). Im Zentrum dieses kosmischen Strudels knäuelte sich ein dicker kugelförmiger Kern zusammen.

Es ist die „Proto-Sonne“: ein galaktischer Riese mit einem Durchmesser von mehreren Hundert Millionen Kilometern, millionenfach voluminöser als das heutige Zentralgestirn.

Dieser solare Vorläufer zieht aufgrund seiner Schwerkraft immer mehr Wasserstoff und Helium aus seiner Umgebung an. Schließlich hat der Koloss einen Großteil der Akkretionsscheibe in sich aufgesogen.

Die Proto-Sonne schrumpft dabei immer weiter. Unter der stärker werdenden Schwerkraft nähern sich die Teilchen mehr und mehr an, der Druck im Inneren der Kugel nimmt zu – und damit auch die Temperatur.

Dies ist die Folge eines universalen Naturgesetzes. Das Gleiche geschieht, wenn man den Reifen eines Fahrrads aufpumpt: Der Kolben presst das Gas in der Pumpe zusammen, die gestauchte Luft erwärmt sich.

Das Innere des Wolkenkerns heizt sich folglich auf, die Temperatur steigt auf mehrere Hundert Grad Celsius an. Dabei setzt der kollabierende Gigant gewaltige Mengen an Energie frei – und strahlt sie als Infrarotstrahlung ins All.

Die Proto-Sonne beginnt zum ersten Mal zu leuchten (wenn auch nicht im sichtbaren Bereich). Nun steht die eigentliche Sternstunde unserer kosmischen Heimat bevor.

Unter dem Druck und der Hitze wimmeln in der Proto-Sonne bald derart viele Atome umeinander, quetschen sich auf engstem Raum und kollidieren miteinander, dass das Sternengas nach und nach seine physikalischen Eigenschaften verändert.

Elektronen, die zuvor um die Protonen und Neutronen geflogen sind, werden aus ihren winzigen Umlaufbahnen gerissen und rasen fortan frei in einer Atomkernsuppe umher.

Wissenschaftler sprechen dabei von Plasma: einem vierten Zustand der Materie. Denn anders als feste, flüssige oder gasförmige Stoffe, wie sie auf der Erde vorkommen, besteht Plasma nicht aus elektrisch neutralen Atomen oder Molekülen, sondern aus deren elektrisch geladenen Bausteinen. Diese Komponenten vermögen sich folglich völlig unbunden im Plasma zu bewegen.

EINIGE HUNDERTTAUSEND JAHRE sind vergangen, seit die dunkle, kalte, dünne Urwolke begonnen hat, in sich zusammenzufallen. Nun brodeln die Gasmassen in einer kosmischen Hexenküche, einer dicken Brühe aus Wasserstoff und Helium, mehr als eine Million Grad heiß.

Immer mehr Gas aus der Akkretionsscheibe fliegt in den Gravitations-Klumpen und nährt dessen Masse.

Da wird im Inneren der Sonne ein Vorgang angestoßen, der beinahe wie Zauberei anmutet. Eine atomare Ver-

einigung, die physikalisch so komplex ist, dass sie die Vorstellungskraft der meisten Menschen übersteigt.

Im glutheißen Plasma kommt es zur nuklearen Zündung. Einer wirkmächtigen Reaktion: Ein Kern „schweren“ Wasserstoffs – er besteht aus einem Proton und einem Neutron – stößt mit solcher Kraft auf ein einzelnes Proton, dass die beiden Teilchen aneinander hängen bleiben und miteinander verschmelzen. Ein neues Element entsteht: Helium-3.

Dies ist die erste Kernfusion im Sonnensystem – und sie setzt eine verborgene Energie frei.

Denn während sich kurz nach dem Urknall Energie in Materie verwandelte, läuft jetzt der entgegengesetzte Prozess ab: Materie verstrahlt und verflüchtigt sich zu Energie.

Das kommt daher, dass jeder neu geschaffene Heliumkern etwas weniger als das Proton und der Deuteriumkern zusammen wiegt – die beiden Teilchen also, die ihn gebildet haben.

Die verschwundene Masse verwandelt sich in reine Energie: in Strahlung.

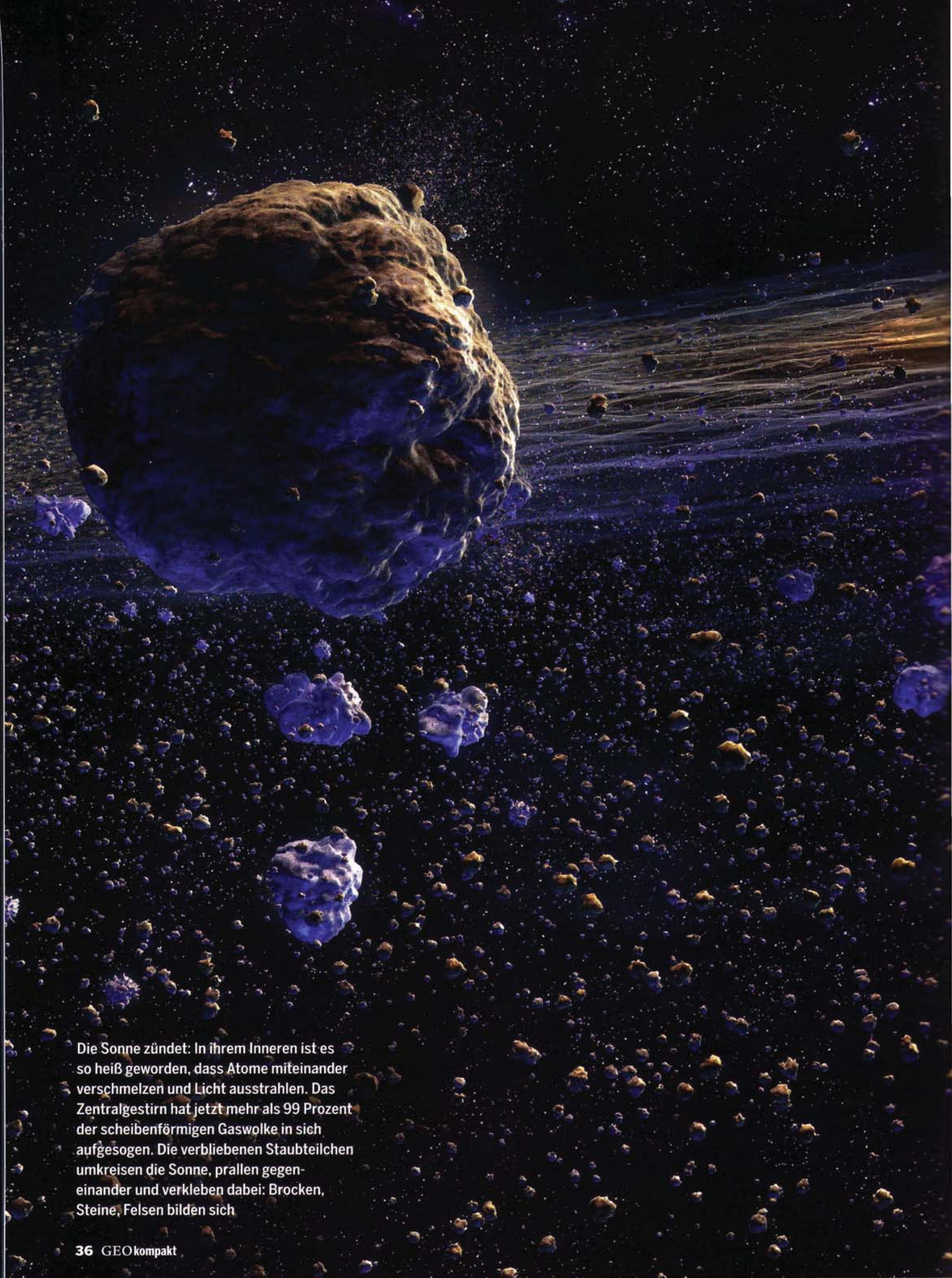
Zwar geht bei dieser Verschmelzung nur der Bruchteil eines Massenprozents als Strahlung verloren. Doch diese Winzigkeit lässt gigantische Energien frei. Der Sonnenreaktor läuft nun in einer ersten von zwei Stufen an.

Es klingt wie Magie, was dort im Sternenzentrum vor sich geht. Etwa so, als verrührte man exakt ein Kilogramm Mehl und ein Kilogramm Zucker miteinander und erhielt anschließend nicht zwei Kilogramm, sondern ein bisschen *weniger* Zuckermehl – die fehlende Masse wäre einfach als Licht verloren gegangen.

Von nun an beginnt sich die Sonne gleichsam selbst zu fressen. Denn mit jeder einzelnen Kernfusion büßt sie an Masse ein, sie wird also Stück für Stück leichter.

Während es im Herzen des Sterns immer heißer wird, bahnen sich die ersten bei der Kernfusion freigesetzten Strahlen ihren mühsamen Weg an die Oberfläche. Doch in der dicken Glut sto-

**Kurz nach
ihrer
Zündung
droht die
Sonne sich
selbst
wieder aus-
zulöschen**



Die Sonne zündet: In ihrem Inneren ist es so heiß geworden, dass Atome miteinander verschmelzen und Licht ausstrahlen. Das Zentralgestirn hat jetzt mehr als 99 Prozent der scheibenförmigen Gaswolke in sich aufgesogen. Die verbliebenen Staubteilchen umkreisen die Sonne, prallen gegeneinander und verkleben dabei: Brocken, Steine, Felsen bilden sich



ßen sie ständig gegen die Teilchen des Plasmas und werden dabei von ihnen verschluckt und wieder abgestrahlt. Es dauert Abertausende Jahre, bis die ersten zarten Strahlen die Sonne verlassen.

Dieser flackernde Schein vermag das All noch nicht zu erhellen – dicke Nebelschwaden verdunkeln das stellare Leuchtfeuer. Immer noch stürzen Gasströme aus der wirbelnden Akkretions-scheibe in den Sternen-Embryo.

ES IST EIN GEFÄHRLICHER Strudel, in dem die junge Sonne jetzt rotiert: Und fast überlebt unser Muttergestirn diese Phase nicht, beinahe verliert es seine kompakte Kugelform und verwandelt sich in ein diskusförmiges Objekt.

Denn je kleiner und komprimierter ein Stern wird, je mehr Teilchen sich in ihm drängeln, desto schneller rotiert er.

Physiker führen das Phänomen auf die Erhaltung des Drehimpulses zurück. Es ist der gleiche Effekt wie bei einer Eiskunstläuferin, die sich zunächst mit ausgestreckten Armen langsam um die eigene Achse dreht, dann ihre Arme an den Körper zieht und dadurch in immer rasanteren Pirouetten herumwirbelt.

Die nach außen drängenden Fliehkräfte könnten theoretisch irgendwann die Gravitationskraft übersteigen und den Stern auseinanderzerren. Das System würde sich also selbst auslöschen.

Doch im Inneren der Akkretions-scheibe laufen erstaunliche Vorgänge ab, die den Gasball in ihrer Mitte vor dem Exitus bewahren: Die rotierende Materie erzeugt ein ebenfalls rotierendes Magnetfeld, rund 1000-mal stärker als jenes, das die Sonne heute umgibt.

Ein Teil der Gasmassen, die immer noch auf die Sonne stürzen, werden auf Bahnen entlang der Magnetfeldlinien gezwungen, beschleunigt und schließlich über die Pole des Sterns gelenkt.

Dort schießt das Gas in den interstellaren Raum. Es ist, als speie die Sonne aus Nord- und Südpol zwei gewaltige Leuchtfontänen ins kosmische Dunkel. Für den heranwachsenden Stern ist

dies ein Segen: Denn das davonstiebende Material – Abermilliarden Tonnen Gas lodern rund 100 000 Jahre lang empor – reißt einen Teil des Drehimpulses mit sich.

Zusätzlich tragen hochkomplexe Prozesse zwischen den Teilchen in der Akkretionsscheibe dazu bei, dass die Rotationsgeschwindigkeit des neuen Sterns nicht ständig weiter anwächst.

Die Sonne beruhigt sich allmählich, kreiselt langsamer. Und hat schließlich ihre Zerreißprobe überstanden.

Bald klart die Umgebung auf, der Nebellichtet sich, die Sonne erstrahlt – wenn auch noch in fahlem Licht.

Und weil sie jetzt nicht mehr so schnell um ihre Achse wirbelt, schrumpft die Sonne durch die Gravitationskraft in ihrer Ausdehnung: Druck und Dichte in ihrem Zentrum nehmen zu.

Die Hälfte der gesamten Sonnenmasse drängt sich nun in einem Kern, der weniger als zwei Prozent des Sternvolumens ausmacht. Darin nimmt die Hitze auf 15 Millionen Grad zu.

Es kommt zur zweiten Sonnennzündung, und im Grunde genommen ist der Vorgang ganz ähnlich wie bei der ersten Kernfusion. Aber der Prozess setzt eine

Wie Staub-sauger verschlucken die Planeten die Teilchen auf ihren Orbits

entscheidende Stufe früher an und verläuft in einer dreistufigen Reaktion.

1. Zwei Protonen vereinigen sich zu „schwerem“ Wasserstoff.

2. Dieser schwere Wasserstoff verschmilzt mit einem weiteren Proton. Ein neues Element entsteht: Helium-3.

3. Zwei Helium-3-Kerne verschmelzen zu einem Helium-4-Kern und geben dabei zwei Protonen frei.

Kurz gesagt: Jeweils vier Protonen verwandeln sich in einen Helium-4-Kern (siehe auch Seite 43).

Diese zweite Kernfusion setzt bei der Zerstrahlung von Materie noch mehr Energie frei als die erste Stufe: Ein Gramm umgewandelter Materie entfesselt 25 Millionen Kilowattstunden (um diese Energie zu erzeugen, müsste man 3000 Tonnen Steinkohle verfeuern).

Der solare Glutofen entwickelt jetzt zwei Drittel der Strahlkraft der heutigen Sonne; in den folgenden Jahrmilliarden wird ihre Leuchtstärke beständig zunehmen.

Riesige Blasen heißen Plasmas wallen während dieses Prozesses aus Schichten auf, die den feurigen Kern und die darumliegende Strahlungszone umhüllen. An der Außenseite kühlen sie ab, sinken herab, heizen sich in der Tiefe wieder auf – und steigen von Neuem empor.

Feuerstürme tosen auf der brodelnden Oberfläche der Sonne. Leuchtende Gasbögen ragen Zehntausende Kilometer hoch über den Rand des Gestirns. Sie folgen dem komplexen Magnetfeld, das den Leuchtkörper umgibt.

Manchmal vernichten sich Bereiche des Magnetfeldes gegenseitig, dann schießen Eruptionen ins All. Dabei erbricht die Sonne so viel Energie wie Milliarden explodierender Atombomben.

Zudem bläst sie beständig einen mehrere Millionen km/h schnellen Wind aus geladenen Teilchen ins All.

DIE HITZE und die nach außen drückende Strahlung halten die Lichtmaschine davon ab, noch weiter zu kollabieren. Von nun an – rund 20 Millionen Jahre, nachdem die Gas- und Staubwolke be-

genommen hat, in sich zusammenzufallen – wird sich der Durchmesser der Sonne (1,4 Millionen Kilometer) für Jahrmillionen kaum noch ändern.

Sie hat ihr Gleichgewicht gefunden – und inzwischen weit mehr als 99 Prozent der Akkretionsscheibe in sich aufgezogen.

Bereits vorher aber beginnen in der bläulich schillernden Scheibe aus Gas- und Staubresten, die um die glühende Kugel rotiert, weitere erstaunliche Vorgänge.

Im Umkreis einiger Hundert Millionen Kilometer um die Sonne brennt das Sternenfeuer schon so stark auf die letzten, leichten Gaswölkchen aus Wasserstoff und Helium, dass sie von dem stetigen Sonnenwind in die frostige Kälte weiter außen liegender Umlaufbahnen gepustet werden.

Nur die etwas schwereren Staubteilchen trotzen dem Sturm und schweben weiter auf den inneren Orbits um das Gestirn.

Es bricht die Zeit der Planeten an.

ÜBERALL IN DER STAUBSCHEIBE prallen Mikropartikel zusammen, hier und da bleiben sie aneinander haften. Sie gehen dabei chemische Verbindungen ein oder verkleben durch elektrische Anziehungskräfte miteinander.

Nach und nach verschmelzen immer mehr Teilchen miteinander. Aus dem Sternenstaub formen sich kleine Bröckchen, Fäden, Eiskristalle und Körner. Bald kreisen zentimeterlange Flocken, dann kleine Steine um die Sonne; schließlich, nach mehreren Tausend Jahren, sind es Felsen. Immer wieder krachen auch sie zusammen und verklumpen dabei.

Mittlerweile ist es aber nicht mehr nur der Zufall, der sie kollidieren lässt. Vielmehr ziehen sich die Brocken durch ihre Schwerkraft gegenseitig an. Im Laufe der Jahrzehntausende bilden sich Lücken in der Akkretionsscheibe.

Denn nun fliegen Abermillionen steinerne Inseln um den glühenden Stern, einige so massig wie ganze Gebirgsketten. Diese „Planetesimale“ sind die Vorläufer unserer Planeten.

Aber- millionen steinerne Inseln rasen anfangs um den Stern

Manche zerbrechen unter der Wucht der ständigen Kollisionen, andere verbleiben sich einander ein und wachsen weiter.

Wie gewaltige Gravitationsstaubsauger rotieren die Planetesimale um die Sonne und verschlucken den restlichen Staub in ihrer jeweiligen Umlaufbahn.

Auf einem eisigen Orbit, knapp 800 Millionen Kilometer entfernt vom Muttergestirn, hat sich ein besonders mächtiger „Proto-Planet“ gebildet, der junge Jupiter.

Dieser Himmelskörper entwickelt eine solche Gravitationskraft, dass er nicht nur Staub, Felsen und kleinere Planetesimale an sich reißt, sondern sogar umherirrende Gasmoleküle an seine Oberfläche bindet.

Zwar ist in den Jahrmillionen zuvor der meiste Wasserstoff in die Sonne gestürzt, doch die übrig gebliebenen dünnen Schwaden reichen aus, um eine stürmische Atmosphäre auf dem Jupiter aufzubauen. Lawinenartig wächst diese Gashaut an, bis sie so dick ist, dass sich die unteren Lagen unter dem Druck der darüberliegenden Schichten verflüssigen (siehe auch Seite 116).

Vermutlich braucht Jupiter nur zehn Millionen Jahre, um zum schwersten al-

ler Planeten heranzuwachsen – massiver als alle anderen Fels- und Gastrabanten im Sonnensystem zusammen.

Ähnlich wie der Jupiter entstehen zur gleichen Zeit drei weitere Gasriesen:

- Saturn, gut 1,4 Milliarden Kilometer von der Sonne entfernt;

- Uranus, Abstand knapp 2,9 Milliarden Kilometer;

- Neptun, der das Gestirn in einem Radius von 4,5 Milliarden Kilometern umrundet und in den eisigen Außenbezirken Staub und Gas einsammelt.

Jenseits des Neptuns ist die Materiedichte zu gering, als dass sich große Planeten bilden könnten. Dort formt sich ein viele Milliarden Kilometer breites Band aus torkelnden Brocken, Planetesimalen und Zwergplaneten: der Kuiper-Gürtel (siehe Seite 148).

WÄHREND DIE GASPLANETEN allmählich ihre heutige Gestalt annehmen, bilden sich in den gasfreien Regionen in Sonnennähe mond- bis marsgroße Planeten-Embryos.

Sie formen sich hauptsächlich aus metallischen und mineralischen Teilchen, die nicht von unserem Zentralgestirn weggepusht worden sind.

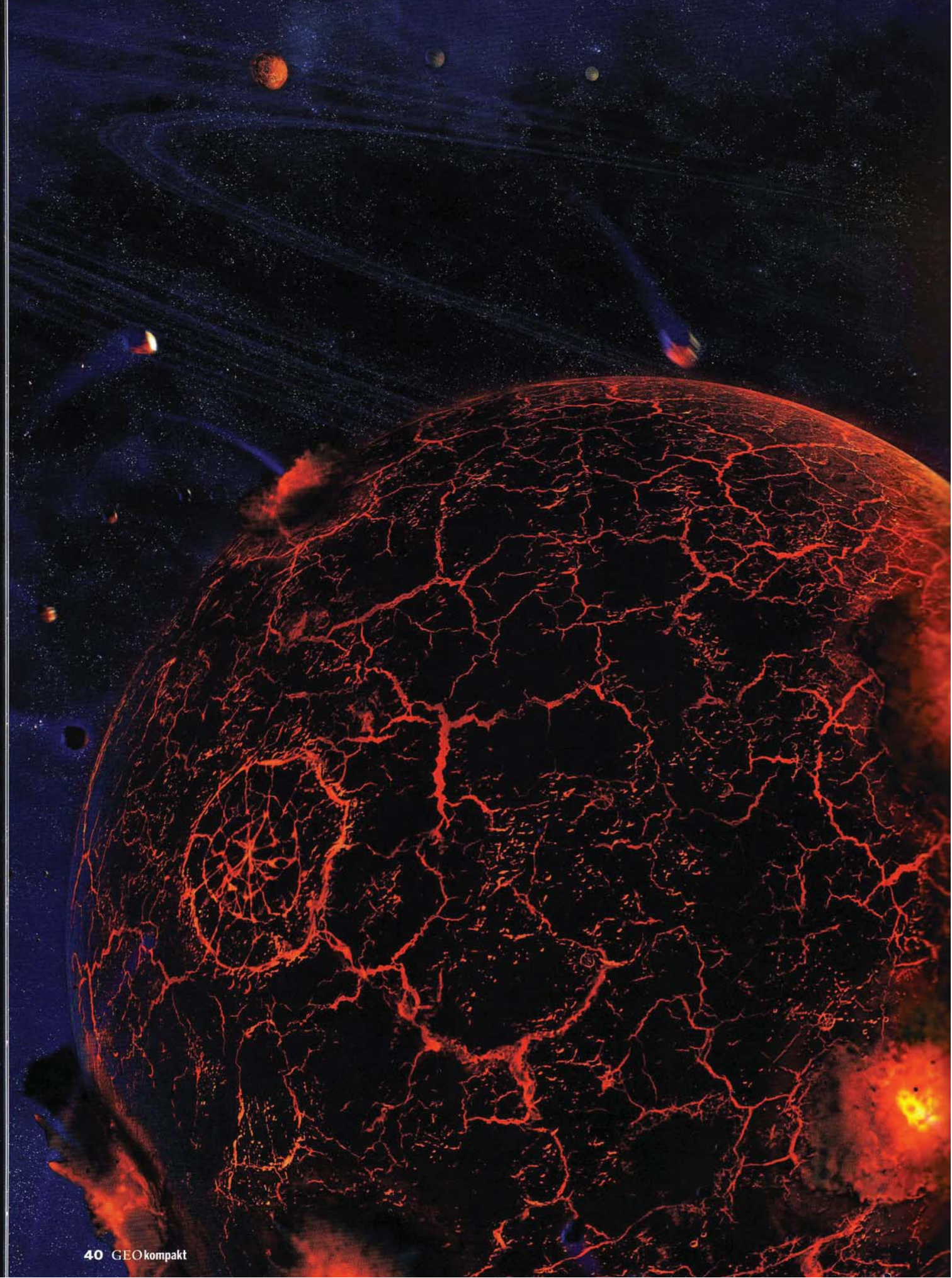
Da auf den sonnennahen Umlaufbahnen weniger Staub schwebt als auf den sonnenfernen Orbits, reifen sie bei Weitem nicht so rasch wie die Gasplaneten. Ihre Masse nimmt langsamer zu – und mithin auch ihre Schwerkraft.

Es dauert deshalb mehrere zehn Millionen Jahre, ehe sich einige stattliche Planetenvorläufer gebildet haben.

Wie viele dieser terrestrischen Himmelskörper zu diesem Zeitpunkt um die Sonne rasen, weiß niemand. Es mögen acht sein, vielleicht auch zehn.

Einer davon ist die „Proto-Erde“: ein marsgroßer Himmelskörper, der sich vor über 4,5 Milliarden Jahren aus Planetesimalen zusammengeklumpt hat.

Noch aber existieren zu viele Proto-Planeten, noch kann sich kein harmonisches Gleichgewicht zwischen ihnen einstellen. Manche Orbits überschneiden sich, Himmelskörper brechen aus





Im Verlauf von Jahrzehntausenden haben sich in Sonnennähe aus dem einstigen Staub kilometergroße Planetesimale gebildet: Planeten-Vorläufer, die durch ihre Schwerkraft andere Felsbrocken auf ihren Umlaufbahnen an sich ziehen. Bei den Einschlägen entsteht Hitze, die die Steinriesen glühen lässt

ihrem Kurs, poltern gegeneinander, zerschmettern oder vereinigen sich zu größeren Globen. Andere werden durch komplexe Gravitationskräfte aus ihren Umlaufbahnen geschleudert, fliegen ins All hinaus und driften durch die Galaxis. Das System ist noch instabil.

Immer weniger Objekte bleiben dabei übrig, immer weniger Planetenvorläufer umkreisen die Sonne. Zu ihnen gehören der junge Merkur, die Proto-Venus, die Proto-Erde, und jenseits der Erdbahn der Proto-Mars.

Es sind glutheiße Gebilde mit aufgeschmolzener Oberfläche. Denn jeder Einschlag erzeugt Hitze und lässt Gesteine, Minerale und Erze schmelzen.

Nur zwischen Mars und Jupiter haben sich keine Planeten gebildet. Dort taumeln in einem Asteroidengürtel Millionen Brocken umher, manche kleiner als ein Meter, andere Kilometer groß.

Vermutlich werden sie von den ungeheuren Gravitationskräften des Jupiters daran gehindert, zu einem weiteren Planeten zu verbacken (siehe Seite 108).

DIE PROTO-ERDE, die inzwischen fast ihre heutige Größe erreicht hat, zieht etwa 150 Millionen Kilometer von der Sonne entfernt ihre Bahn. Dann, vor 4,53 Milliarden Jahren, trifft sie ein schwerer Schlag, vielleicht der heftigste in der Geschichte des Sonnensystems: Ein marsgroßes Geschoss kracht mit 36 000 km/h auf den Vorläufer unseres Heimatplaneten.

Der Crash setzt die Energie von zehn Billionen Wasserstoffbomben frei. Ein Blitz, heller als die Sonne, leuchtet auf.

Der Einschlag reißt eine tiefe Wunde in den glühenden Erdmantel. Das Geschoss selbst zerbricht, seine Trümmer stieben empor. Von der Schwerkraft gebunden, umkreisen Gase und Abermillionen Gesteinsbröckchen die Erde.

Erst allmählich kühlt diese Tausende Grad heiße Wolke ab. Nun beginnen die Körnchen – ähnlich wie einst die Partikel in der Akkretionsscheibe – zu verklumpen. Schließlich beherrscht ein besonders großer Brocken das Bild: In-

nerhalb weniger Monate saugt er die restlichen Splitter auf – und begleitet fortan als Mond unseren Globus.

BIS ABER DAS LEBEN auf der Erde erwacht, werden noch eine Milliarde Jahre vergehen. Denn zu jener Zeit ist sie noch ein denkbar unwirtlicher Ort: Vulkane speien Magma, Lavaströme wälzen sich über das Land, Schlote pusten giftige Gase in die Atmosphäre. Mit einem Satz: Die Erde gleicht einer Hölle.

Es dauert Jahrtausende, bis sich ihre Kruste abgekühlt hat. Dampf aus dem Erdinneren regnet als Wasser ab und sammelt sich in Talbecken zu Meeren. Zudem speisen gigantische „Schneebälle“ – Kometen aus den äußeren Regionen des Sonnensystems, die damals häufig auf die Erde stürzen – die Gewässer. Schließlich erheben sich aus einem weltumspannenden Ozean die Kontinente (siehe auch GEOkompakt „Naturgewalten“).

Womöglich kommt es in den Tiefen dieses Gewässers, an den Rändern unterseischer Schornsteine zu dem großen Wunder: Leblose Materie ordnet sich in der Dunkelheit zu lebenshungrigen Urwesen – zu winzigen Zellen, die sich

600 Millionen Tonnen Wasserstoff verschmelzen in der Sonne Sekunde für Sekunde zu Helium

von Ausflüssen aus dem Erdinneren ernähren. Das Leben entsteht.

Mehrere Jahrhundertmillionen später, vor gut 2,5 Milliarden Jahren, entdecken einige Mikroorganismen dann eine neue Energiequelle, die fortan das Leben auf der Erde speist: die Sonne.

Es ist dieser Stern, der Kernfusionsreaktor in seinem Inneren, der es den Lebewesen überhaupt erst ermöglicht, höhere Stufen auf der Evolutionstreppe zu erklimmen. Cyanobakterien beginnen das Sonnenlicht zu nutzen, um energiereiche chemische Verbindungen zu bauen. Aus ihnen entwickeln sich Pflanzen, die wiederum Tiere ernähren.

Und schließlich, vor rund 200 000 Jahren, bringt die Natur, getrieben von der Sonne, auch den *Homo sapiens* hervor: jenes Lebewesen, das sich erstmals Gedanken macht. Über sich und seine Welt – und darüber, wie Sonne und Planeten entstanden sind.

HEUTE VERSCHMELZEN in dem glühenden Ball an unserem Himmel in jeder Sekunde knapp 600 Millionen Tonnen Wasserstoff zu Helium. Die frei werdende Energie würde ausreichen, um den derzeitigen Energiebedarf der Menschheit rund eine Million Jahre lang zu decken.

Es sind gewaltige Mengen an Materie, die unser Muttergestirn Tag für Tag, Jahr für Jahr verliert. Und doch wird die Sonne den Globus noch lange erhellen: Das Kraftwerk in seinem Kern hat erst knapp die Hälfte seiner Wasserstoffvorräte aufgebraucht.

In etwa sechs Milliarden Jahren aber wird der Brennstoff im Zentrum des Sterns allmählich zur Neige gehen. Die Temperatur sinkt, der Druck im Sterninneren nimmt ab – die Schwerkraft lässt den Kern weiter kollabieren.

Aus den darüberliegenden Schichten rückt Wasserstoff nach, das atomare Feuer entflammt von Neuem.

Dessen enorme Strahlung bläht die äußere Hülle des Sterns bis ins Riesenhafte auf. Er schwillt an, auf den zehn-, zwanzig-, hundertfachen Durchmesser.

Die Oberfläche der Sonne – inzwischen auf das Zehntausendfache angewachsen – kühlt nun ab, da sie pro Quadratmeter viel weniger Energie durchströmt; sie scheint gelb, dann rötlich. Unser Zentralgestirn wird zum „Roten Riesen“.

Ihre Schale wächst immer weiter an, die Sonne verschluckt den Merkur, die Venus, und vielleicht verleibt sich der Gigant irgendwann auch unseren Heimatplaneten ein.

In dieser Phase bläst der Stern fast ein Drittel seiner Masse ins All: Fortan umschillert ihn ein planetarischer Nebel.

Im Inneren des Roten Riesen fällt die Materie weiter in sich zusammen; so hoch steigt der Druck, dass selbst Heliumkerne verschmelzen und ein neues Element bilden: Kohlenstoff.

Nach rund 100 Millionen Jahren ist das Helium vollständig zu Kohlenstoff verbrannt: Der atomare Sternenofer erlischt. Die sterbende Sonne hat nun keine Kraft mehr, der eigenen Gravitation zu widerstehen.

Im Verlauf einiger Tausend Jahre schrumpft sie auf Erdengröße zusammen. Ein Teelöffel ihrer nun extrem verdichteten Masse würde auf unserem Globus eine Tonne wiegen.

Unter diesem enormen Druck erhitzt sich die Materie ein letztes Mal auf 100 000 Grad und lässt den stellaren Winzling aufglimmen.

Die Sonne ist nun ein Weißer Zwerg, dazu verdammt, langsam auszuglühen. Vielleicht dauert das weitere Milliarden Jahre. Doch irgendwann danach wird von unserer einstigen Heimat nichts übrig bleiben als eisige Schwärze.

Dann ist es in unserer Milchstraße, am Rande des Orionarms, wieder ein wenig dunkler geworden.

□

Rainer Harf, 33, ist Redakteur im Team von GEOkompakt. **Jochen Stuhmann**, 33, ist Illustrator in Hamburg. Wissenschaftliche Beratung: **PD Dr. Hubert Klahr**, Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg.

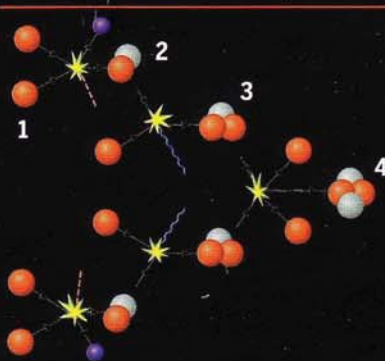
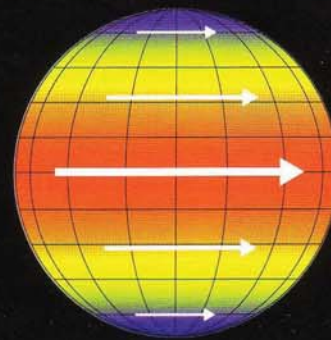
Weiterführende Literatur: Bernd Lang, „Das Sonnensystem – Planeten und ihre Entstehung“, Spektrum Akademischer Verlag.

PROFIL SONNE

Wie der Sonnenreaktor funktioniert, weshalb unser Zentralgestirn Flecken hat, und wie Forscher in sein Inneres schauen können

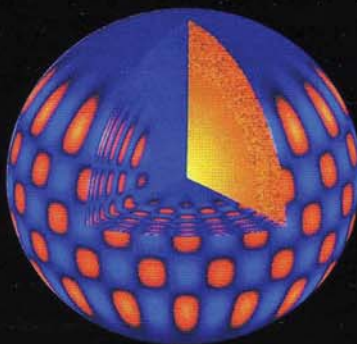
DER VERDREHTE STERN

Anders als die Erde dreht sich die Sonne nicht überall gleich schnell (rot = hohe, gelb-grün = mittlere, blau = geringe Geschwindigkeit). Am Äquator rotiert ihr Gas in 25 Tagen um die Achse des Glutballs, an den Polen braucht es dafür 35 Tage. Durch diese unterschiedlichen Bewegungen wird das Magnetfeld so stark verzerrt, dass es häufig auseinanderreißt



DIE ENERGIE AUS DEN ATOMEN

In der Sonne prallen Protonen (1) aufeinander und verschmelzen zu »schwerem« Wasserstoff (2), der aus einem Proton (rot) und einem Neutron (weiß) besteht. Der vereinigt sich mit einem weiteren Proton zu Helium-3 (3), und zwei Helium-3-Teilchen verbinden sich zu Helium-4 (4). Dabei wandelt sich Materie in Strahlung: Ein Gramm liefert die Energie einer Atombombenexplosion



DAS SONNENMUSTER

Riesige Regionen der Oberfläche des Sterns schwingen um bis zu 15 Kilometer auf (blau) und ab (rot). Die Vibrationen werden durch gewaltige Gasbewegungen in tieferen Schichten hervorgerufen. Astronomen können mithilfe dieser Schwingungsmuster die innere Struktur der Sonne entschlüsseln



LÖCHER IN DER STERNENHAUT

Die Außenseite der Sonne ist überzogen von dunkleren Bereichen, den Sonnenflecken. • Dort ist das Gas nur 4000 Grad Celsius heiß, es sind die kühleren Regionen des Sterns. Sonnenflecken entstehen dadurch, dass das Magnetfeld an manchen Stellen den Wärmetransport aus der Tiefe behindert



EINE KRONE AUS STRAHLEN

Bei einer totalen Sonnenfinsternis schiebt sich die dunkle Scheibe des Neumonds vor das gleißende Gestirn. Dann erstrahlt mit einem Mal die äußere Atmosphärenschicht der Sonne als »Korona«. Diese Gashölle ist mehr als eine Million Grad heiß und reicht etliche Millionen Kilometer weit ins All

Merkur

Der **Sonne** ganz nah

Seine Tage dauern zwei Jahre, sein Inneres ist aus Eisen und seine Kruste tagsüber so heiß wie flüssiges Blei. Der Merkur galt lange als unscheinbarster Planet des Sonnensystems – zu Unrecht. Denn der nächste Begleiter unserer Sonne ist voller Extreme

Text: Jonathan Stock und Joachim Telgenbüscher

D

Das Weltraumteleskop Hubble hat 13 Milliarden Lichtjahre entfernte Galaxien fotografiert, den Nebelschweif des Orions und Kometeneinschläge auf Jupiter – ein Bild aber fehlt. Es ist das Porträt eines Himmelskörpers, auf dem der Tag zwei Jahre dauert und die Sonne manchmal rückwärts wandert, das Porträt des kleinsten, schnellsten, merkwürdigsten und

am wenigsten erforschten Planeten unseres Sonnensystems: des Merkurs.

Kein Astronom wird es je wagen, die Öffnung des Super-Fernrohrs zum engsten Begleiter der Sonne auszurichten: Zu gefährlich wäre es, bei einem noch so geringen Fehler, in den grellen Strahlen unseres Zentralgestirns Spiegel und Sensoren des Hubble-Teleskops zu verbrennen.

Merkurs Nähe zur Sonne ist ein Grund dafür, dass wir über ihn so wenig wissen – obwohl er bereits seit 5000 Jahren bekannt ist. Nur wer es riskierte, sich durch das Sonnenlicht die Netzhaut zu verbrennen, konnte einen Blick auf den Planeten wagen.

Heute studieren ihn Forscher durch Spezialfilter – für das menschliche Auge aber zieht er tagsüber unsichtbar im Glanz der Sonne über den Himmel. Nur in der Abend- und Morgendämmerung leuchtet er schwach über dem Horizont.

Der Planet ist unser drittnächster Nachbar – doch zu ihm zu gelangen ist schwieriger als die Erforschung des viel weiter entfernten Plutos. Denn die Schwerkraft der Sonne zieht jede Sonde so stark an, dass sie ohne jahrelange, komplexe Bahnmanöver in unserer Zentralgestirn stürzen würde.

Und so hat Merkur bislang nur eine Sonde erreicht, „Mariner 10“, die 1974/75 aber nicht einmal die Hälfte des Planeten kartographierte.

Im März 2011 wird nun die Raumsonde „Messenger“ – zum ersten Mal überhaupt – in eine Umlaufbahn um den Merkur einschwenken.

In 200 Kilometer Mindestabstand soll sie dessen exzentrische Bewegung um die Sonne mitmachen.

KAUM 88 ERDENTAGE braucht Merkur für eine Umrundung der Sonne – kein anderer Planet jagt so schnell durchs All, nirgendwo sonst ist das

Jahr so kurz wie hier. Ein Merkurtag jedoch dauert zwei Merkurjahre. Denn nur alle 176 Erdentage geht auf dem Planeten die Sonne auf.

Dieser Kalender ist das Ergebnis einer einzigartigen Himmelsmechanik: Denn so schnell Merkur um die Sonne fliegt, so langsam dreht er sich um die eigene Achse.

Während die Erde bei einem Sonnenumlauf 365-mal rotiert, schafft Merkur bei seinem Orbit nur 1,5 Umdrehungen. Dieses Verhältnis ist ungewöhnlich, aber nicht zufällig.

Wahrscheinlich hat das Wechselspiel zwischen Merkurs exzentrischer Umlaufbahn und den Tidenkräften der Sonne diese Kopplung geschaffen.

Die Folge der extremen Tageslänge: Die Sonne wandert so langsam über den Merkurhimmel, dass man ihre Bewegung am Boden kaum bemerken würde. Auf ihrem schleppenden Weg zum Zenit scheint das leuchtende Ge-

stirn sogar zu wachsen, weil Merkur ihm immer näher kommt.

Hat die Sonne dann den Scheitelpunkt erreicht, stoppt sie scheinbar, ändert für kurze Zeit die Richtung und setzt dann ihre ursprüngliche Bahn fort.

Die Erklärung für dieses merkwürdige Phänomen: Merkurs Umlaufbahn ist zu einer Ellipse gestaucht – seine Entfernung zur Sonne schwankt zwischen 46 und 70 Millionen Kilometern. Immer wenn er dem Zentralgestirn am nächsten ist, beschleunigt ihn dessen Anziehungskraft so sehr, dass der Planet schneller fliegt, als er sich um die eigene Achse dreht.


Folge: Das Leuchtfeuer scheint am Himmel umzukehren. Doch sobald Merkur sich wieder vom Zentralgestirn entfernt, verliert er an Schwung, und die Sonne nimmt ihren vorherigen Lauf am Firmament wieder auf.

Ihre Strahlen bescheinen eine pockennarbige, kraterübersäte, seit mehreren Hundert Millionen Jahren unveränderte Ödnis. 500 Kilometer lange Steilhänge von bis zu drei Kilometer Höhe ziehen sich über die Oberfläche. Weder Wind noch Regen haben jene Einschläge verwittert, die Meteoriten aus dem Planeten herausgebombt haben. Kein Mond zeigt sich am Himmel, es gibt keine Atmosphäre, nur wenige Gasmoleküle – etwa Sauerstoff, Natrium und Helium.

Merkur erscheint als eine tote Welt.

Der Feuerschein des nahen Sterns erhitzt die Oberfläche am Tag auf bis zu 430 Grad Celsius. Nachts wiederum kann es minus 180 Grad kalt werden. Auf keinem anderen Planeten des Sonnensystems schwanken die Temperaturen derart extrem.

Noch etwas unterscheidet Merkur von den anderen Planeten: Seit seiner Entstehung vor rund 4,6 Milliarden



Sechs Milliarden Kilometer hat die Raumsonde Messenger zurückgelegt, um die Krater des Merkurs zu fotografieren

Jahren ist er um mehrere Kilometer geschrumpft.

Die Ursache dafür ist ein Eisenkern, der im Verhältnis zur Größe bei Merkur mächtiger ist als bei jedem anderen Planeten. Er kühlt seit 3,8 Milliarden Jahren ab und zieht sich dabei zusammen. Als Folge knittert die Planetenkruste und faltet sich auf. An manchen Stellen ist Lava durch Spalten an die Oberfläche gepresst worden und hat sich über die zernarbte Landschaft ergossen.

Die Entstehung dieses Kerns gibt Astronomen bis heute Rätsel auf. Sie fragen sich, wie es dazu kommen konnte, dass der eiserne Nukleus trotz der geringen Größe des Merkurs fast doppelt so groß ist wie der Erdkern. Nach einer Theorie war Merkur möglicherweise einst so groß wie der Mars, ehe ein anderes Objekt einschlug und Teile seines Mantels absprengte.

Trotz aller Abkühlung ist der Rand dieses Eisenkerns noch immer flüssig, und er zirkuliert. Er erzeugt ein schwaches Magnetfeld – eine kleine Sensation. Denn ein solches Feld kannte man bisher nur von der Erde (sowie von den Gasplaneten, deren Magnetfelder aber anders entstehen).

Das Verwirrende: Der Kern des Merkurs ist zu kalt, um flüssiges Eisen zu enthalten. Weshalb dort dennoch Metallströme fließen, ist ungeklärt.

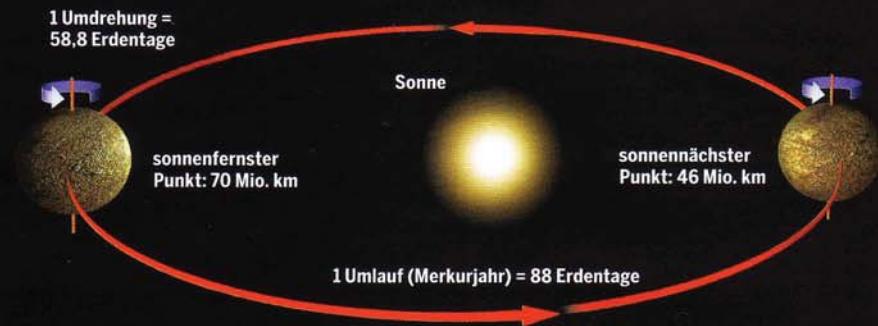
Möglicherweise sind Verbindungen zwischen Eisen und Schwefel die Ursache: Sie haben einen niedrigeren Schmelzpunkt als reines Eisen, sodass der Kern des Merkurs trotz der geringen Temperatur immer noch flüssig genug sein könnte, um ausreichende Strömungen zu entwickeln.

Eine Antwort wird vielleicht die Messenger-Sonde finden.

DREIMAL SCHON ist die vor fünf Jahren gestartete Sonde auf ihrem verschlungenen Weg bislang am Merkur vorbeigeflogen – zuletzt am 29. Sep-

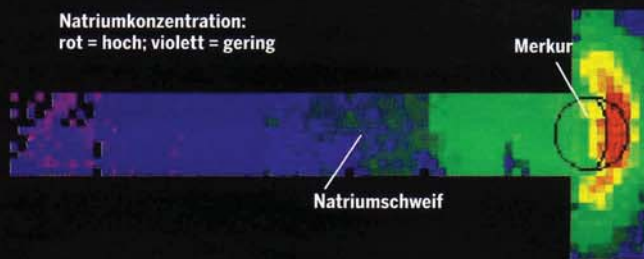
PROFIL MERKUR

Weshalb der kleinste Planet die ungewöhnlichste Umlaufbahn hat, er einen Schweif hinter sich herzieht, und ein Tag auf ihm so ungemein lange andauert



IN 88 ERDENTAGEN UM DIE SONNE

Weil seine Bahn stark elliptisch verläuft, schwankt Merkurs Distanz zur Sonne zwischen 46 und 70 Millionen Kilometern. Während einer Umrundung (= 1 Merkurjahr) dreht sich der Planet nur anderthalbmals um sich selbst. Es dauert zwei Merkurjahre, ehe die Sonne wieder über der gleichen Stelle auf dem Planeten leuchtet – also ein Merkurtag vergangen ist



SPUR AUS GAS

Den 2,5 Mio. km langen Schweif aus Natrium und anderen Elementen hat der Sonnenwind aus der Merkur-Oberfläche herausgeschlagen

tember 2009. Knapp 200 Kilogramm Raketentreibstoff sowie die Gravitation von Venus, Erde und Merkur haben den 2004 gestarteten Raumspäher nach und nach ins Zentrum unseres Sonnensystems geschleudert.

Doch es wird noch bis zum 18. März 2011 dauern, ehe Messenger in eine Umlaufbahn einschwinkt. Dann wird die Sonde rund 2400 Tage im All unterwegs gewesen sein; 7,9 Milliarden Kilometer werden hinter ihr liegen.

Geschützt hinter einem Hitzeschild werden die hochauflösenden Kameras und Spektrometer dann ihre Arbeit beginnen.

Sie sollen weitere Schlüsselfragen beantworten: Woraus genau besteht Merkurs extrem dünne Gashülle? Wie ist der Planet einst entstanden? Lagert in seinen schattigen Kratern Eis?

Die Antworten werden auch die Geschichte unseres Sonnensystems fortschreiben. Denn die Messenger-Geräte werden uns von jener Zeit berichten, als die heutigen Planeten noch Staub- und Gasmassen im solaren Urnebel waren und Merkur sich von allen Himmelskörpern bei den höchsten Temperaturen formte.

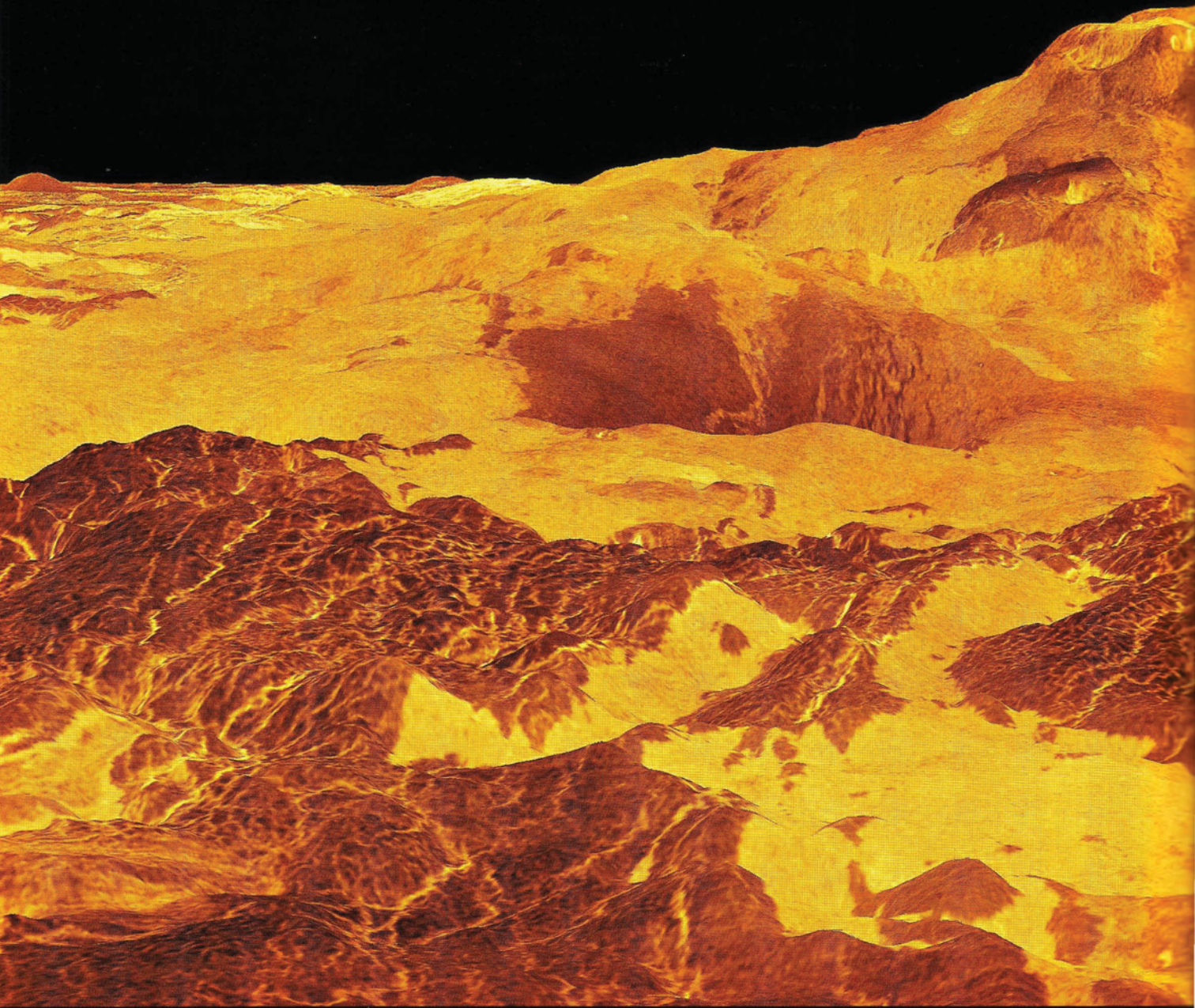
Ein Rätsel hat Messenger schon jetzt gelöst – im Vorbeiflug. Bei ihren drei Passagen schickte die Sonde 2800 Bilder zurück zur Erde. Sie füllen jene Lücken, die Mariner 10 bei ihrem Flug 1974 offengelassen hat.

Und zeigen uns erstmals die bislang unbekannte Seite des Exzentrikers. □

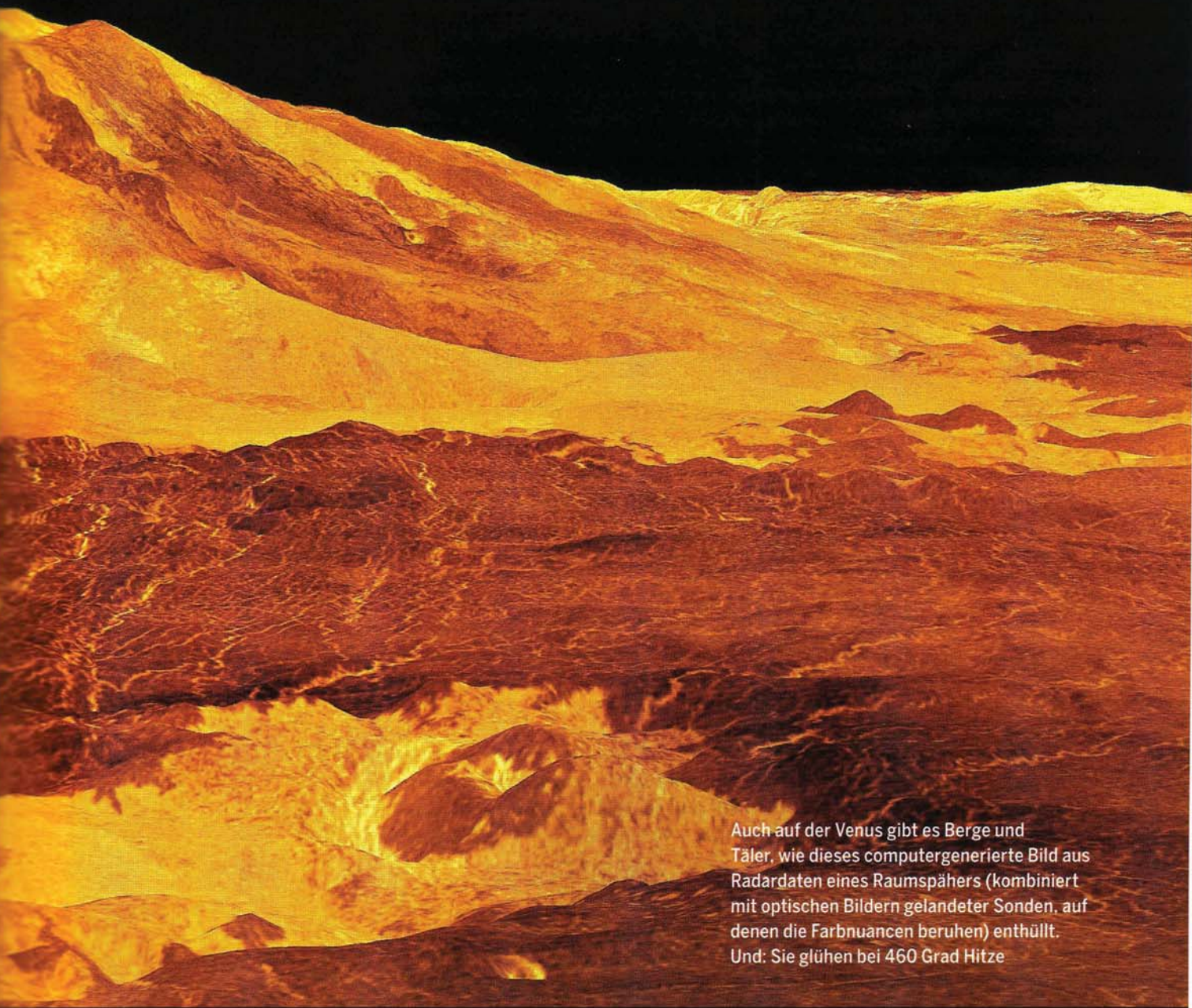
Jonathan Stock, 26, und Joachim Telgenbüscher, 28, sind Schüler der Henri-Nannen-Journalistenschule in Hamburg.

Venus

Die andere Erde



In der Frühzeit des Sonnensystems gleichen sich Venus und Erde: Beide sind etwa gleich groß, sie haben einen ähnlichen inneren Aufbau sowie eine dichte Atmosphäre – und dank ihrer Entfernung zur Sonne ist es auf ihnen weder zu heiß noch zu kalt für die Entstehung von Leben. Doch dann nimmt die Entwicklung der Venus einen dramatischen Verlauf



Auch auf der Venus gibt es Berge und Täler, wie dieses computergenerierte Bild aus Radardaten eines Raumpähers (kombiniert mit optischen Bildern gelandeter Sonden, auf denen die Farbnuancen beruhen) enthüllt. Und: Sie glühen bei 460 Grad Hitze

Das Sonnensystem zu einer Zeit vor 4,2 Milliarden Jahren: Erst gut 300 Millionen Jahre sind vergangen, seit sich die Sonne in seinem Zentrum zusammengeballt und acht Planeten um sich versammelt hat. Der zweite und dritte Planet, die den Stern umkreisen, ähneln sich. Ja, sie gleichen sich extrem.

Die Umlaufbahnen der beiden Himmelskörper liegen nur rund 40 Millionen Kilometer auseinander, und so haben sie sich aus dem gleichen Material des solaren Urnebels geformt. Beide messen im Querschnitt gut 12 000 Kilometer, haben einen Mantel aus Gestein und einen Kern aus Eisen.

Ihre Atmosphären bestehen im Wesentlichen aus Kohlendioxid (CO_2), aus Stickstoff und Schwefelverbindungen – sowie aus Wasserdampf, der möglicherweise nach Zusammenstößen mit Kometen und Asteroiden übrig geblieben ist. Vulkane schleudern ständig weiter Gase in den Himmel.

Die Temperaturen auf den Oberflächen sind gemäßigt, sie betragen deutlich unter 100 Grad Celsius. Womöglich schwappen auf beiden Planeten bereits Ozeane über die jungen, noch heißen Krusten. In einem endlosen Kreislauf verdunstet das Wasser, sammelt sich in Wolken und regnet wieder herab.* Heute aber, gut vier Milliarden Jahre später, sind die einstigen Zwillingswelten so verschieden wie Himmel und Hölle:

Der eine Planet – die Erde – hat sich in einen Hort des Lebens verwandelt. Die Atmosphäre enthält 21 Prozent Sauerstoff, ein reaktionsfreudiges Gas, das ständig von Pflanzen und Cyanobakterien nachgeliefert wird. Das Treibhausgas Kohlendioxid, das früher einen großen Teil der Atmosphäre ausmachte, hat sich in kilometerdicke Kalksteinmassive verwandelt. Die Luft enthält gerade genug CO_2 , um die Durchschnitts-

temperatur auf angenehme 15 Grad zu heben. Die weitgehend durchsichtige Atmosphäre gibt den Blick frei auf blauschimmernde Ozeane und grün-braun bewachsene Kontinente. Lebensformen aller Art besiedeln den Boden, tummeln sich in den Ozeanen oder fliegen durch die Atmosphäre.

Dagegen ist die Venus von einer dichten Wolkendecke eingehüllt, die sie wie eine Perle im All leuchten lässt. Doch unter dem Schleier verbirgt sich kein üppiger Urwald, sondern eine trostlose Einöde. Ihre Oberfläche ist gut 460 Grad heiß, das Basaltgestein an ihrem Boden glüht. Der Luftdruck ist mehr als 90-mal so hoch wie auf der Erde.

Die Oberfläche der Venus ist eine wüstenähnliche Vulkanlandschaft, tagsüber in rötliches Dämmerlicht getaucht, da die Wolkendecke in 50 bis 70 Kilometer Höhe kaum Sonnenlicht durchlässt. Diese Schicht besteht vor allem aus Schwefelsäure-Tröpfchen. Das Wasser, das die Venus einst besaß, ist fast komplett verschwunden. Selbst in der Atmosphäre gibt es davon nur noch Spuren.

WAS GENAU IST mit der Venus schiefgelaufen? Seit Forscher Anfang der 1960er Jahre entdeckt haben, wie unterschiedlich die beiden einst so ähnlichen Planeten sind, sinnieren sie darüber, wann und warum sich deren Wege trennten.

Und dazu haben sie inzwischen einige Vermutungen. Ihre Szenarien zeichnen das Bild eines unaufhaltsamen Nie-

Rund 40 Millionen Kilometer Differenz erscheinen zwar nicht viel, wenn man sie mit den gewaltigen Entfernungen zwischen den äußeren Planeten vergleicht. Aber sie bedeuten, dass auf die Venus knapp doppelt so viel Sonnenstrahlung trifft wie auf die Erde.

Anfangs ist das kein Problem: Vor 4,2 Milliarden Jahren strahlt die Sonne erst mit knapp drei Vierteln ihrer heutigen Leuchtkraft. Ohne Lufthülle läge die Oberflächentemperatur der Venus sogar unter dem Gefrierpunkt. Doch die Treibhausgase Wasserdampf, Kohlendioxid und Schwefeldioxid in der Atmosphäre wärmen den Planeten. Sie halten einen Teil der Sonnenenergie gefangen, die der Boden zurück Richtung All strahlt.

Wolken dagegen wirken abkühlend, denn sie reflektieren einen Teil des Sonnenlichtes, ehe es auf die Oberfläche trifft. Beide Effekte wirken so zusammen, dass die Temperaturen auf der Venus vor mehr als vier Milliarden Jahren deutlich unter 100 Grad liegen.

Auf dem Planeten kommt in jener Zeit wohl ein intensiver Wasserkreislauf in Gang. Die Niederschläge waschen CO_2 und Schwefeldioxid aus der Luft. Das Regenwasser wird dadurch leicht sauer und löst Elemente wie Kalzium, Magnesium und Eisen aus der Kruste.

Die Mischung rinnt ins Meer, wo sich Säuren und Metalle zu Mineralen wie Kalk und Gips verbinden, die sich am Meeresboden absetzen. Große Mengen der Treibhausgase sind nun gebunden und können nicht in die Atmosphäre

Der TREIBHAUS-EFFEKT heizt den Planeten dramatisch auf

dergangs, wie er dramatischer kaum sein könnte. Die Hauptrolle dabei spielt eine Klimakatastrophe, die den Planeten bis in sein tiefstes Inneres umkrepelte.

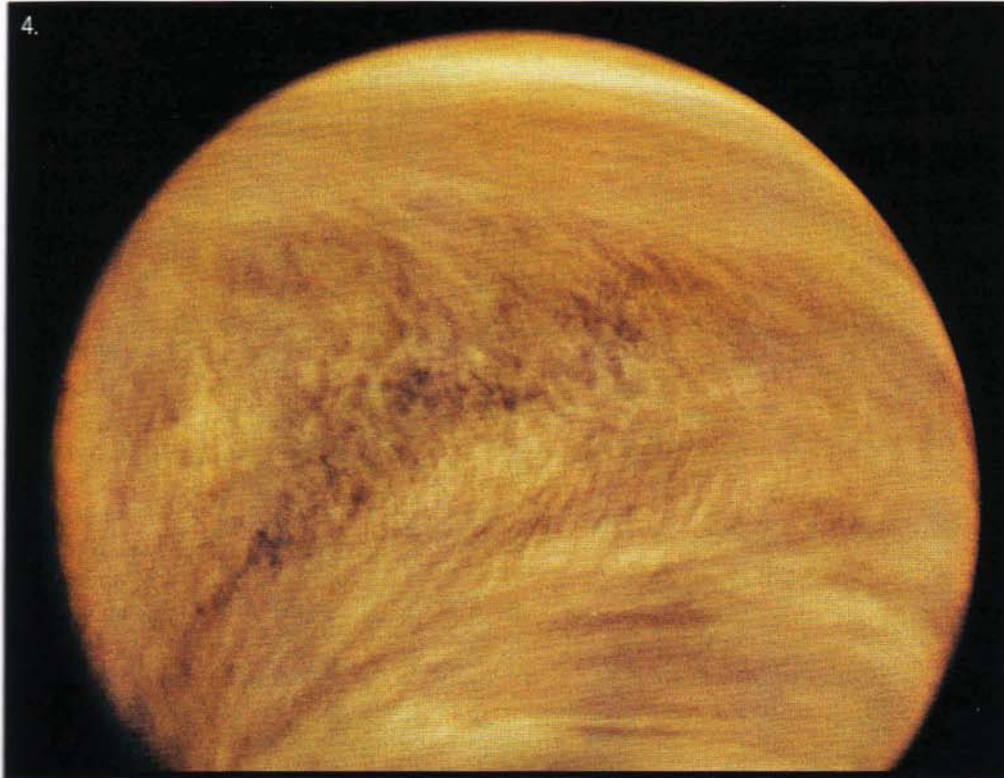
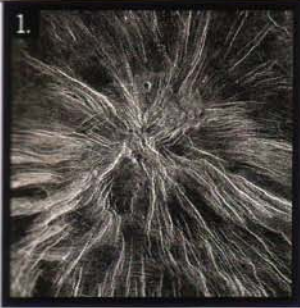
Ausgangspunkt ist ein Unterschied, der anfangs kaum ins Gewicht fällt: Die Erde kreist in 150 Millionen Kilometer Entfernung um die Sonne, die Venus in 108 Millionen Kilometern.

zurück. Auf diese Weise helfen die Ozeane, die Temperatur zu regulieren.

Vermutlich wird noch ein weiterer Prozess angestoßen, der das Klima stabilisiert: die Plattentektonik.

Wie auf der Erde könnte dieser planetare Gesteinskreislauf den CO_2 -Gehalt der Venus-Atmosphäre regulieren, weil abtauchende Platten das im Kalkstein

* Es ist nicht klar, ob es Ozeane auf der Venus gab, das ist ein mögliches, durchaus nicht unrealistisches Szenario, aber eben nicht sicher – wie die gesamte hier dargestellte folgende Entwicklung. Da vor etwa 500 bis 700 Millionen Jahren fast die gesamte Oberfläche der Venus erneuert und somit die Geschichte des Planeten zum Großteil ausgelöscht wurde, gibt es bislang keinerlei gesicherte Erkenntnisse darüber.



STERN AUS GRÄBEN

1. Die dicke, wasserlose Kruste der Venus bringt spezielle Strukturen hervor: etwa sternförmige Gräbensysteme.

WOLKENWIRBEL

2. Durch zwei gigantische Wirbel am Nordpol (Grafik) sinken abgekühlte Gasmassen aus den oberen Luftschichten spiralförmig ab und strömen dann zum Äquator zurück.

METEORITENTREFFER

3. Spuren von Einschlägen, wie hier der Krater Aurelia, sind rar und gleichmäßig verteilt – ein Indiz dafür, dass die Oberfläche relativ jung ist.

HEXENKÜCHE

4. Diese UV-Aufnahme des Pioneer Venus Orbiter von 1979 macht die Wolkenbewegungen in der Atmosphäre sichtbar.

gebundene Gas in die Tiefe befördern (siehe auch Seite 54).

Die Platten nehmen zudem Wasser mit, das das Gestein weich macht und wie ein Schmiermittel für die tektonischen Bewegungen wirkt. Vermutlich erzeugen Strömungen im Eisenkern der Venus zudem auch ein Magnetfeld.

Diese eher lebensfreundlichen Bedingungen bleiben wohl einige Hundert Millionen Jahre lang bestehen, vielleicht sogar ein oder zwei Milliarden Jahre. In dieser Zeit ist die Venus unserem Planeten sehr ähnlich. Gut möglich, dass sich in den Ozeanen zeitgleich mit der Erde primitive Lebewesen entwickeln.

ABER DAS GLEICHGEWICHT ist nicht von Dauer. Die Strahlung der Sonne gewinnt an Kraft, sie steigt alle 100 Millio-

nen Jahre um ein Prozent. So kommt die Venus allmählich ins Schwitzen, immer mehr Wasser verdunstet.

Zunächst wirken die Wolken der Erwärmung entgegen, aber da auch Wasserdampf ein Treibhausgas ist, steigen die Temperaturen allmählich.

Vor 2,5 Milliarden Jahren schließlich wird der bis dahin gut funktionierende Thermostat mit der überschüssigen Hitze nicht mehr fertig.

Nun beginnt eine fatale Entwicklung, die das Gleichgewicht kippen lässt: Da die Venus-Kruste durch die steigende Oberflächentemperatur allmählich austrocknet, wird das Gestein immer härter und steifer. In der Folge erlahmt auch die Plattentektonik.

Daher kann der Planet seine Wärme nur noch über Vulkanausbrüche abge-

ben. Die Feuerberge aber schleudern CO_2 und Schwefeldioxid in die Atmosphäre – Treibhausgase. Und wegen der erlahmten Plattentektonik werden sie nicht mehr ins Venus-Innere recycelt. So reichern sie sich in der Atmosphäre an und verstärken die Erwärmung.

Aber es kommt noch schlimmer: Unter der Hitze bläht sich die Lufthülle auf – die Wassermoleküle gelangen erstmals in die obere Atmosphäre, in Höhen von 100 Kilometern und mehr. Dort sind sie der Sonnenstrahlung ungeschützt ausgeliefert. Deren UV-Licht spaltet die Wassermoleküle auf: Nun schwirren in der oberen Atmosphäre große Mengen positiv geladener Wasserstoff- und negativ geladener Sauerstoff-Ionen herum.

Das erweist sich als fatal, denn die Ionen sind eine leichte Beute für den

Sonnenwind. Dieser stete Teilchenstrom von unserem Zentralstern reißt das Venus-Wasser mit ins All. Die schweren CO₂-Moleküle bleiben dagegen zurück.

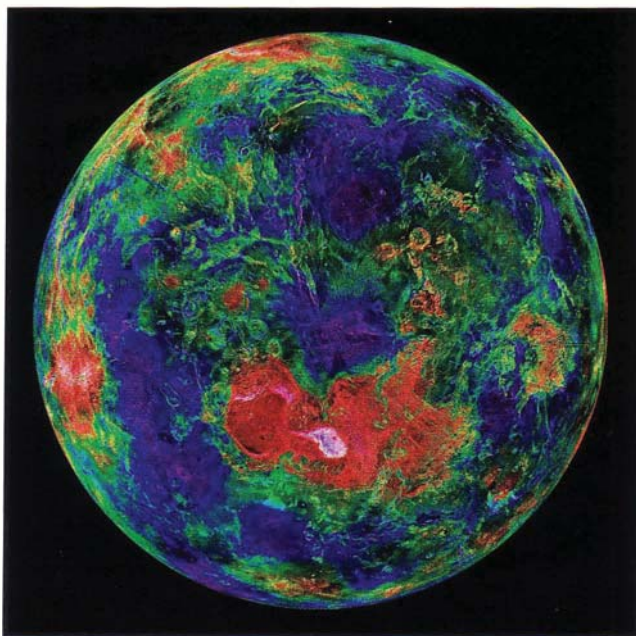
Zu Beginn dieser Treibhaus-Katastrophe sind die Teilchen noch durch das Magnetfeld der Venus gegen den Sonnenwind geschützt. Doch das Erlahmen der Plattentektonik bedeutet auch das Ende des Magnetfelds. Ein solches Feld entsteht, wenn das flüssige Metall im äußeren Eisenkern des Planeten in Bewegung ist. Dieser Dynamo wird durch Temperaturdifferenzen im Inneren des Planeten angetrieben. Doch er stoppt, sobald die Platten stillstehen. Die Folge: Das Magnetfeld bricht zusammen.

Das geschieht vor rund zwei Milliarden Jahren. Nun ist die Erosion der Atmosphäre nicht mehr aufzuhalten. Gewaltige Mengen Wasser verschwinden im All, zudem entfacht der immer stärkere Treibhauseffekt eine enorme Hitze. Vor vielleicht 1,8 Milliarden Jahren beträgt die Temperatur am Boden bereits über 350 Grad. Kalk und andere Minerale, in denen Kohlendioxid gebunden waren, lösen sich auf. Das Treibhausgas heizt die Atmosphäre weiter auf.

Auch ist ein kritischer Punkt überschritten: Bei mehr als 374 Grad kann Wasser nicht mehr flüssig existieren, egal wie hoch der Druck ist. Als Konsequenz verdampfen die verbliebenen Reste der Ozeane. Nach nur wenigen Hundert Millionen Jahren hat der Sonnenwind die Venus ihres gesamten Wassers beraubt.

andauernder Prozess zu dieser Zeit verblüffende Konsequenzen:

Wie alle Planeten zieht die Venus gegen den Urzeigersinn um die Sonne, (von einem Punkt über dem Nordpol der Erde aus betrachtet). Und wie die anderen dreht sie sich zunächst gegen den Urzeigersinn um sich selbst. Doch die Gezeitenkräfte der nahen Sonne, die



WÜSTENPLANET

Die Oberfläche der Venus wurde durch Vulkanismus geformt. (Radarkarte; rot = Berge, blau = Täler, grün = mittlere Höhen)

ständig an ihr zerren, und Reibungsprozesse im Inneren zwischen Kern und Mantel bremsen allmählich ihre Eigenrotation. Die Venus-Tage werden immer länger. Und weil sie keinen Mond hat, der ihre Rotation stabilisiert, schwankt ihre Achse chaotisch, ähnlich wie bei

sich allein deshalb kein stabiles Klima wie auf der Erde ausprägen können.

All diese Kräfte sowie das chaotische Taumeln der Achse wirken schließlich so zusammen, dass der Planet beginnt, rückwärts zu rotieren. Die Sonne geht nun morgens im Westen auf.

Dann bahnt sich eine neue Katastrophe an: Die sich nicht mehr bewegenden

Platten der Venusoberfläche werden immer dicker und schwerer; darunter aber staut sich die Hitze, die nach wie vor im Inneren durch radioaktiven Zerfall entsteht.

Vor etwa 500 bis 700 Millionen Jahren schließlich sucht sich das heiße Gestein einen Weg an die Oberfläche. Die Kruste reißt auf, Magma quillt hervor. Die alte Oberfläche versinkt größtenteils im Inneren des Planeten. Etwa vier Fünftel der Venusoberfläche werden von Lava überflutet. Nur ein Teil entgeht der Zerstörung und bildet kleine Hochländer, die einige Kilometer über den Rest der Landschaft hinausragen.

Wiederum reichern sich vulkanische Gase in der Atmosphäre an. Die Temperaturen steigen für einige Hundert Millionen Jahre noch einmal stark an, auf 560 Grad. Es ist so heiß, dass Schmelzen aus salzreicher Lava Kanäle in den Untergrund fressen. Die Rinnen ähneln irdischen Flussläufen und sind bis zu 7000 Kilometer lang.

Durch die Hitze dehnt sich die gesamte Venuskruste aus. Besonders auf den alten Hochländern hinterlässt diese Verformung eigenartige Rissmuster.

Vor etwa 100 Millionen Jahren dann sinken die Temperaturen auf den heutigen Wert von gut 460 Grad, da einige Treibhausgase allmählich aus der Gas-hülle verschwinden.

Weil das wasserlose Krustengestein viel widerstandsfähiger ist als irdisches Gestein, bilden sich auf der Venus geologische Strukturen aus, wie man sie sonst nirgendwo im Sonnensystem findet: etwa die „Coronae“ – konzentrische Brüche mit einem Durchmesser von 50

Die VENUS dreht sich anders als die übrigen Planeten des Sonnensystems

Vor 1,5 Milliarden Jahren ist der Planet daher kochend trocken und von einem dichten Ozean aus Kohlendioxid umgeben. Zudem hat möglicherweise noch ein weiterer, seit Jahrmilliarden

einem taumelnden Kreisel. Sie kippt manchmal fast in die Waagerechte und richtet sich dann wieder auf.

Selbst wenn es weniger heiß und trocken auf der Venus gewesen wäre, hätte

bis 2600 Kilometern. Oder die ebenfalls runden „Arachnoiden“, deren Rissmuster zum Teil an Spinnennetze erinnern.

Ob der Planet endgültig zur Ruhe gekommen ist, weiß niemand. Es könnte durchaus sein, dass sich die nächste Katastrophe anbahnt: Berechnungen zeigen, dass die Venus nur etwa die Hälfte der Wärme abgibt, die in ihrem Inneren entsteht. In einigen Hundert Millionen Jahren könnte sie erneut überkochen.

UND LEBEN auf der Venus? Astrobiologen schließen nicht aus, dass sich in den Anfangszeiten Mikroben entwickelt haben. Einige könnten das Inferno an lebensfreundlichen Zufluchtsorten überstanden haben. Am aussichtsreichsten erscheinen die Schwefelsäure-Wolken. In 50 Kilometer Höhe liegt die Temperatur bei 70 bis 80 Grad, der Druck bei einem Bar, und die Bedingungen für Photosynthese sind nicht schlecht.

Konzentrierte Schwefelsäure ist zwar für viele Mikroben tödlich, doch auch auf der Erde leben einige Einzeller in extrem sauren Milieus. Das größte Problem ist wohl die starke UV-Strahlung in der Höhe. Aber auch damit könnten Mikroben fertigwerden. Sie könnten einen Sonnenschutz aus Schwefelverbindungen entwickeln. Oder sie wandeln die UV-Strahlen durch Pigmente in sichtbares Licht um, aus dem sie dann per Photosynthese Energie gewinnen.

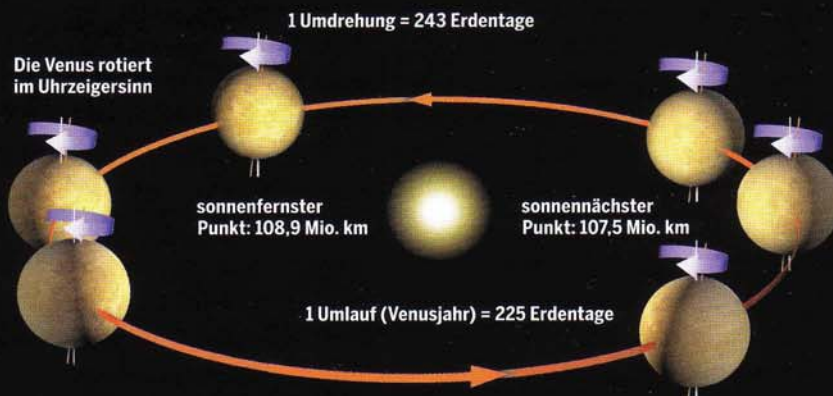
Tatsächlich gibt es in den Venus-Wolken bestimmte Schwefelmoleküle, die bei solchen Photosynthese-Prozessen entstehen. Sollten dort oben Mikroben tatsächlich überlebt haben, könnten sie uns zeigen, wie sich das Leben womöglich auch bei uns wandeln wird:

Denn in 3,5 Milliarden Jahren wird die Sonne ihre Leuchtkraft so weit erhöht haben, dass unsere Ozeane verdampfen. Die Erdkrustenplatten werden aufhören, sich zu bewegen, die endgültige Treibhauskatastrophe wird einsetzen. Der Erde droht dann das gleiche Schicksal wie der Venus – und nur noch wenige, zähe Lebensformen könnten sich dann behaupten: an Rückzugsorten wie etwa diesen Wolken. □

Ute Kehse, 40, ist Wissenschaftsjournalistin in Delmenhorst.

PROFIL VENUS

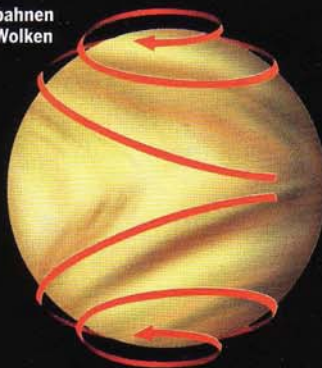
Weshalb die Rotation des zweiten Planeten einzigartig ist, wie sein Wettersystem funktioniert, und auf welche Weise Kohlendioxid sein Klima kippen ließ



DIE AUS DER REIHE TANZT

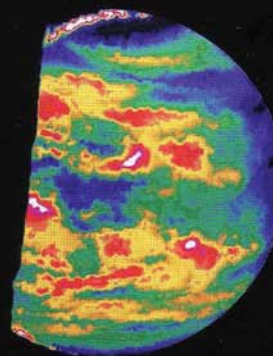
Weil die Venus der einzige Planet ist, der – vom Nordpol aus gesehen – im Uhrzeigersinn rotiert, geht bei ihr die Sonne im Westen auf und im Osten unter. In 243 Erdtagen dreht sie sich ein Mal – das ist länger als das Venusjahr (225 Erdtage). Wegen der »verkehrten« Drehrichtung hat ein Venustag (Sonnenaufgang zu Sonnenaufgang) dennoch nur 117 Erdtage

Zugbahnen der Wolken



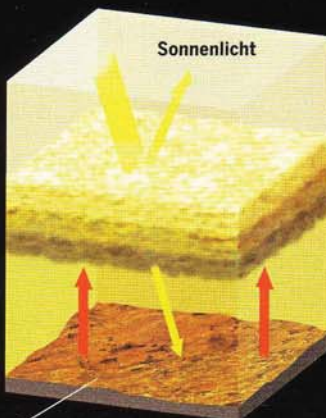
DAS VENUS-WETTER

Die Sonne heizt die Atmosphäre am Äquator auf; die Gase steigen hoch. Sie strömen spiralförmig in Richtung der Pole, wo sie sich abkühlen und absinken. Die Wolken bewegen sich in der Drehrichtung des Planeten – allerdings 60-mal schneller



BLICK IN DIE WOLKEN

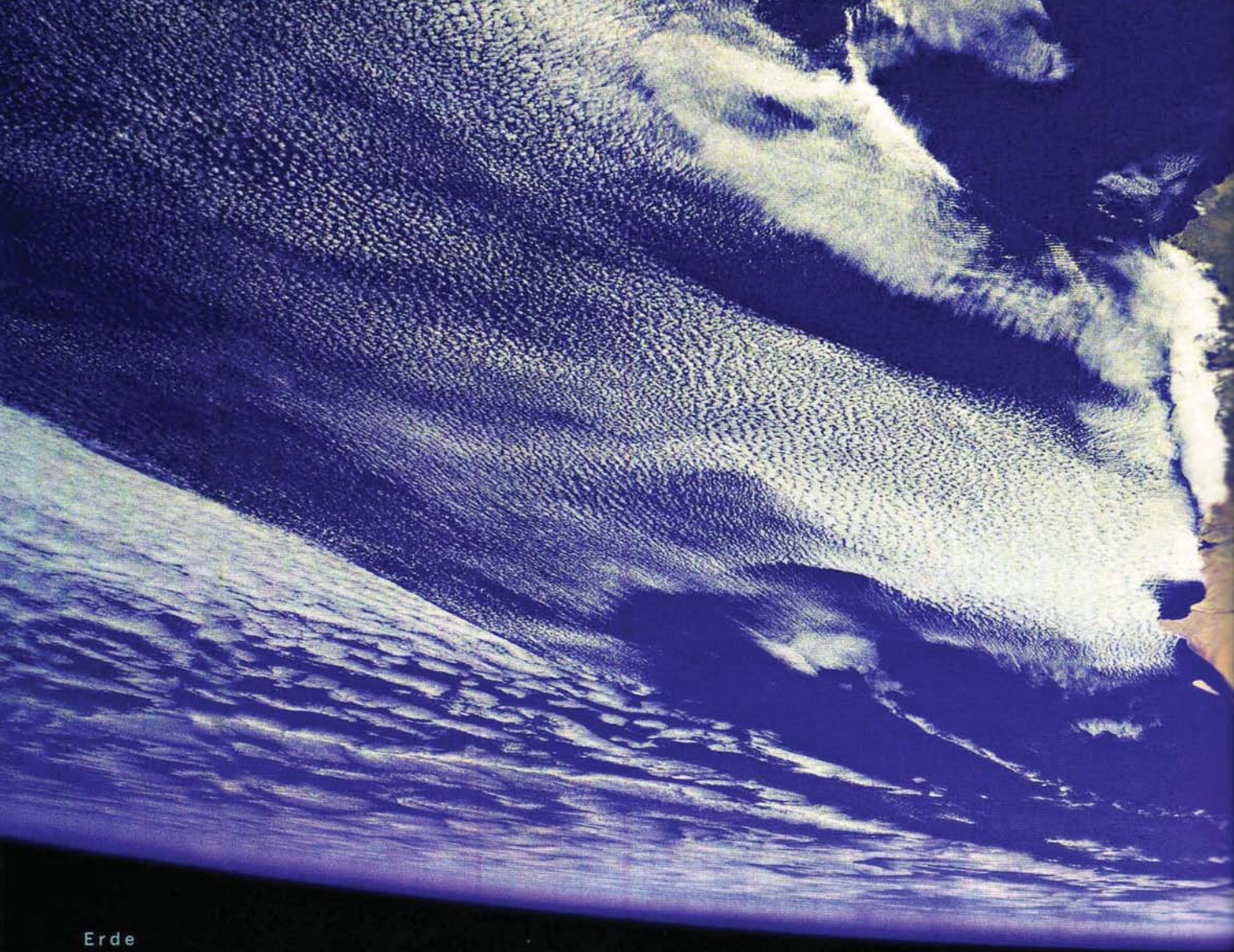
Dieses Infrarotbild zeigt, wo viel (rote und weiße Bereiche) und wo wenig (blau und schwarz) Wärmestrahlung aus der unteren Atmosphäre der Venus die Wolken durchdringt. Dünne und dichte Wolkenregionen werden so indirekt sichtbar



Oberfläche der Venus

EXTREMES TREIBHAUS

In 50 bis 70 km Höhe erstrecken sich drei Wolkenschichten aus unterschiedlich dicken Schwefelsäure-Tröpfchen. Sie reflektieren knapp 80 Prozent des Sonnenlichtes (gelb); nur etwa 20 Prozent erreichen den Boden. Die Oberfläche strahlt die Energie als Infrarotstrahlung (rot) wieder ab, doch die aus 96,5 Prozent Kohlendioxid bestehende Atmosphäre absorbiert die Strahlung und heizt die Venus auf über 460 Grad Celsius auf



Erde

DAS BLAUE WUNDER

Wäre die Sonne nur etwas größer oder kleiner gewesen. Hätte die Erde zu ihr nur ein wenig mehr oder weniger Abstand gehabt. Hätte sie kein Magnetfeld oder keine Plattentektonik: Es hätte sich auf ihr wohl nie Leben entwickeln können – und schon gar kein intelligentes. Die Geschichte einer wunderbaren Reihe von Zufällen



Schon auf den ersten Blick ist die Erde einzigartig: Über eine Milliarde Kubikkilometer Wasser und eine schützende Atmosphäre schaffen ideale Bedingungen für das Leben

Text: Martin Paetsch

Das Sonnensystem ist über weite Strecken ein Ort des Todes. Vom Merkur bis zum Neptun reihen sich fast nur Wüstenwelten aneinander: Die einen darben unter höllischer Hitze wie die Venus, andere sind in eisiger Kälte versunken wie der Mars.

Und wieder andere, so der riesenhafte Jupiter, hüllen sich in Wolken aus gefrorenem Ammoniak. Darunter gibt es nicht einmal eine feste Oberfläche, sondern bis in große Tiefe

nur Schichten aus Gas und flüssigem Wasserstoff.

Diese Kette der Kargheit wird nur einmal unterbrochen: Der dritte Planet in der Reihe, die Erde, ist eine einzigartige Welt des Reichtums und der Fülle. Woran es auf anderen Planeten mangelt, besitzt sie im Überfluss.

Zum Beispiel flüssiges Wasser an der Oberfläche. Die Erde verschwindet fast darunter: Rund 70 Prozent ihrer Oberfläche sind von Ozeanen bedeckt. Die unvorstellbare Menge

von 1,4 Milliarden Kubikkilometern Wasser verleiht dem Planeten seine weithin sichtbare blaue Farbe.

Auch die Kontinente durchzieht ein nasses Netzwerk. Millionen von Flüssen schlängeln sich auf die Meere zu, manche von ihnen mehrere Tausend Kilometer lang. Nur im äußersten Norden und Süden des Planeten, wo sich gewaltige Eismassen auf türmen, lassen Minusgrade das Wasser erstarren. Anderswo aber auf der Erde sind die Temperaturen fast überall

Wie ein gläserner Kokon umspannt
die Lufthülle unseren Planeten, schirmt
die Organismen weitgehend gegen
UV-Strahlung ab und enthält jene Gase,
die sie für ihren Stoffwechsel brauchen





ideal für die Entwicklung eines Phänomens, das bislang nirgendwo sonst gefunden worden ist: Leben.

Könnte man von einem anderen Planeten sagen, es gebe dort Leben, wäre das eine Sensation. Bei der Erde ist es dagegen eine Untertreibung – es ist fast unmöglich, auf ihrer Oberfläche einen unbelebten Fleck zu finden.

Ein Kubikmeter Boden enthält Milliarden von Mikroorganismen. Einige existieren sogar drei Kilometer unter der Erdoberfläche. Und manche Tiere kommen in gewaltigen Massen vor: Allein eine Trillion Ruderfußkrebse bevölkern die Ozeane, im Schnitt rund 2800 von ihnen unter jedem Quadratmeter Meeresoberfläche.

Der Reichtum des irdischen Lebens ist kaum zu ermessen. Bislang haben Wissenschaftler rund zwei Millionen Tier- und Pflanzenarten benannt und katalogisiert.

Wie viele Spezies es insgesamt auf der Erde gibt, weiß niemand – die Schätzungen schwanken zwischen zehn und 100 Millionen. Alle Lebewesen zusammen bringen es auf ein Gewicht von rund zwei Billionen Tonnen.

Einige Arten haben es im Lauf von Jahrmillionen zu erstaunlichen Fähigkeiten gebracht – allen voran der Mensch. Sein hoch entwickeltes Gehirn erlaubt es beinahe jedem Individuum, sich in einer oder gar

Erdgeschichte. Ihre Entstehung folgte einer Choreografie, die sich vielleicht an keinem anderen Ort im Universum auf diese Weise vollzogen hat.

Denn damit die Erde zu einer Oase des Lebens werden konnte, mussten etliche ungewöhnliche Umstände zusammentreffen.

ES BEGANN vor gut 4,5 Milliarden Jahren: Damals formte sich die Sonne zur richtigen Zeit am richtigen Ort. Denn in der Milchstraße, unserer Heimatgalaxie, können Planetensysteme längst nicht überall bestehen.

Fast eine Milliarde Jahre braucht ein Planet vermutlich, damit auf ihm primitive Organismen heranwachsen können. Selbst nach kosmischen Maßstäben ist das eine lange Zeitspanne, in deren Verlauf sich leicht verheerende Katastrophen ereignen können.

Besonders oft geschieht dies in der Nähe des galaktischen Zentrums, wo sich die Sterne dicht an dicht drängen. Einige von ihnen enden in gewaltigen Explosionen – und die Wahrscheinlichkeit, dass sich solch ein Ereignis in der Nachbarschaft eines jungen Planetensystems abspielt, ist in dieser Zone wegen der hohen Sternendichte sehr viel höher.

Die dabei freigesetzte Strahlung vermag die Oberfläche eines nahe gelegenen Planeten zu sterilisieren.

Fast eine Milliarde Jahre dauert es, bis auf einem Planeten Leben entstehen kann

mehreren von insgesamt rund 6000 Sprachen zu verständigen. Der *Homo sapiens* hat gelernt, seine Umwelt zu erforschen, technische Geräte zu bauen – und sogar die Erde hinter sich zu lassen.

Menschen, Pflanzen und Tiere bilden eine einzigartige Biosphäre; sie ist das Ergebnis von Milliarden Jahren

Auch dicht vorbeiziehende Sterne können aufkeimendes Leben vernichten: Sie werfen Planeten aus der Bahn oder lenken aus der Kometenwolke, die wohl jedes Sternsystem wie eine Hülle umgibt, zahlreiche eisige Geschosse nach innen ab – die prasseln dann als höllischer Kometenhagel auf die Planeten nieder.

Doch auch die galaktischen Außenbezirke sind für die Planetenentstehung nicht ideal. Damit sich erdähnliche Himmelskörper bilden können, muss die Staubwolke, aus der sie entstehen, genügend schwere Elemente wie Eisen oder Kohlenstoff enthalten. Deren Konzentration aber nimmt zum Rand der Milchstraße hin ab; deshalb erreichen Planeten dort vermutlich nur selten jene Masse, die nötig ist, um später eine lebenserhaltende Atmosphäre an sich zu binden.

Als nun unsere Sonne zu leuchten begann, befand sie sich in einer schmalen, verhältnismäßig ruhigen Zone – nicht zu nah am infernalischen Zentrum der Milchstraße, nicht zu nah an ihren metallarmen Rändern.

Und sie erwies sich als perfekter Lebensspender. Ihre Masse geriet weder zu klein – dann hätte sie die Oberfläche der Erde kaum mit genügend Wärme versorgen können. Noch zu groß – dann hätte sie ihren Brennstoff schon nach wenigen Milliarden Jahren aufgezehrt und der ja sehr langsam fortschreitenden Evolution keine Zeit gelassen.

FAST EINE MILLIARDE Jahre lang aber war es für das Leben unmöglich, sich auf der Erde dauerhaft zu etablieren.

Denn die blieb vorerst ein unwirtlicher Ort – unter anderem deshalb, weils anfangs unablässig Meteoriten und Kometen auf ihr einschlugen.

sammenballte. Denn in den Brocken, die ihn nach und nach anwachsen ließen, war wohl auch Wasser chemisch gebunden, oder es waren Eiskörner in ihnen eingeschlossen, die sich zuvor in kalten Staubschwaden gebildet hatten.

Vielleicht aber – so eine These – gelangte der größte Teil erst mit jenen eishaltigen Kometen auf die Erde, die immer wieder auf sie einprasselten.

Sicher ist: Schon vor etwa vier Milliarden Jahren war unser Planet eine Wasserwelt. Und er konnte das Nass bis heute bewahren.

Seine Ozeane verdampften nicht – wie wohl auf der Venus, die zu nah um die Sonne kreist. Sie froren auch nicht zu – wie es geschehen würde, wenn die Erde das Zentralgestirn auf der Höhe des Mars umrundete.

Doch die richtige Umlaufbahn um die Sonne war allein noch kein Garant für ein lebensfreundliches Klima – manche Planeten taumeln wie aus der Balance geratene Kreisel um unseren zentralen Stern: Im Laufe von Jahrmillionen kippt ihre Rotationsachse um mehrere zehn Grad. Die Drehachse des Mars zum Beispiel neigt sich bisweilen so stark zur Seite, dass sich das Klima deutlich ändert und sich an seinem Äquator zuweilen Gletscher bilden.

Für die Erde – die ja schon eine Eiszeit erleben kann, wenn sich die Rotationsachse nur um wenige Grad

Solch extreme Bedingungen aber würden vermutlich heute bei uns herrschen, wäre es nicht schon kurz nach der Erdentstehung vor rund 4,5 Milliarden Jahren zu einem höchst ungewöhnlichen Unfall gekommen.

Ein Himmelskörper, so groß wie der Mars, schlug auf dem jungen Planeten ein. Doch statt frontal auf die unfertige Erde zu prallen und sie dabei zu zerreißen, traf er sie seitlich versetzt. Der immer noch gewaltige Aufschlag katapultierte Bruchstücke in eine Umlaufbahn. Diese Trümmer verklumpten sich im Lauf der Zeit zu einem in vieler Hinsicht einzigartigen Trabanten: dem Mond (so zumindest eine These zu seiner Entstehung).

Zwar kreisen natürliche Satelliten auch um Mars, Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun, doch keiner davon ist im Vergleich zu seinem Mutterplaneten so groß geraten. Durch seine Schwerkraft vermag der Mond nicht nur Gezeiten zu erzeugen – er dämpft auch Taumelbewegungen der Erdachse, die sonst zu einem Klimachaos führen würden.

Eine Katastrophe, die den Planeten fast vernichtet hätte, brachte also die- sen Satelliten hervor und begünstigte so die Voraussetzungen für eines der größten Wunder: die Entwicklung höheren Lebens.

VOR ETWA 3,5 MILLIARDEN Jahren reihten sich zunächst in den Urozeanen – möglicherweise am Rand unterseeischer vulkanischer Schlote – Kohlenstoff, Sauerstoff, Wasserstoff, Stickstoff und andere chemische Elemente zu immer komplexeren Molekülgebilden aneinander, aus denen sich schließlich die Zellen der ersten Lebewesen formten.

So rätselhaft die Genese dieser bakterienähnlichen Pionierwesen bislang noch ist: Im Prinzip könnte sie sich auch auf anderen Planeten vollzogen haben, die über Wasser und Vulkanismus verfügen. Und die fertigen Mikro-

Erst eine Katastrophe ermöglichte die Entwicklung höheren Lebens

Und noch fehlte ihr die wichtigste Zutat für die Entwicklung des Lebens: flüssiges Wasser.

Wie das Lebenselixier auf die Erde kam, ist noch nicht gewiss. Vermutlich war es bereits in dem Rohmaterial enthalten, aus dem sich der Planet zu-

neigt – wären größere Schwankungen fatal. Manche Landstriche würden sich auf bis zu 100 Grad Celsius aufheizen, weite Flächen dagegen für Monate in Dunkelheit versinken – keine guten Voraussetzungen für die Entstehung von Leben.



Verlässt der Mensch die schützende Atmosphäre seines Heimatplaneten, muss er sich mit einem Raumanzug gegen kosmische Strahlen und das Vakuum wappnen

ben waren so widerstandsfähig, dass sie sich, in Meteoriten eingebettet, möglicherweise sogar von einem Himmelskörper zum nächsten ausgebreitet haben.

Auf der Erde allerdings ging die Evolution noch einen entscheidenden Schritt weiter. Nachdem das Leben mehr als zwei Milliarden Jahre lang nur Einzeller hervorgebracht hatte, begannen die sich zu Gemeinschaften zusammenzuschließen: Sie hefteten sich aneinander, tauschten chemische Stoffe aus – und konnten so miteinander kommunizieren.

Im Lauf der Zeit übernahmen die Mitglieder dieser Zellkommunen unterschiedliche Aufgaben: Die Zellen an der Außenseite spezialisierten sich beispielsweise darauf, die Gemeinschaft vor schädlichen Umwelteinflüssen zu schützen – so entstanden unterschiedliche Gewebetypen wie etwa die Außenhaut, die die Körper höherer Lebewesen umhüllt.

Die ersten dieser Koloniewesen gab es womöglich schon vor 1,5 Mil-

liarden Jahren. Damals lebten am Meeresgrund merkwürdige, an Perlen-schnüre erinnernde Organismen: Sie bestanden aus regelmäßig aufgereihten Kugeln, die über einen Schlauch miteinander verbunden waren. Vermutlich hielt ein festes Außengewebe den Verbund zusammen – der damit ein Mehrzeller gewesen wäre.

Andere frühe Koloniegeschöpfe waren vielleicht ähnlich aufgebaut wie heutige Schwämme: Diese äußerst primitiven, jedoch seit Hunderten von Jahrmillionen höchst erfolgreichen Mehrzeller bestehen zwar aus unterschiedlichen Zelltypen, besitzen aber weder ein Nervensystem noch einen Verdauungstrakt oder irgendwelche anderen Organe.

Vor etwa 542 Millionen Jahren schließlich kam es zum Urknall des höheren Lebens: Innerhalb von 50 Millionen Jahren – einer nach evolutionären Maßstäben erstaunlich kurzen Zeit – traten fast alle noch heute bekannten Tierstämme in Erscheinung. In den Weltmeeren wimmelte

es schon bald von bizarren Armfüßern, Weichtieren und Stachelhäutern.

Doch wäre es zu dieser Artenexplosion ohne manche Prozesse im Inneren der Erde wohl nie gekommen. Dort, in großer Tiefe, ist heute noch Wärme aus der Entstehungszeit des Planeten gespeichert.

Die Hitze sorgt dafür, dass flüssiges Eisen im äußeren Teil des Erdkerns permanent in Bewegung ist. Ähnlich einem Dynamo erzeugt das strömende Metall ein Magnetfeld, das die Erde seit Milliarden Jahren wie ein Schirm umspannt. Elektrisch geladene Partikel des Sonnenwindes werden so zum größten Teil abgefangen: Sie würden sonst nach und nach die Atmosphäre zerstören und alles Leben vernichten.

ABER DIE UNGLAUBLICHE Hitze im Erdinneren bewirkt noch mehr. Unter ihrem Einfluss steigt heißes, verformbares Gestein bis unter die Oberfläche auf, wo es zur Seite strömt, sich abkühlt und dann wieder absinkt. Auf diesen gewaltigen Gesteinswirbeln treibt die feste äußere Erdschicht.

Die Tiefenströme halten die in mehrere Platten zerbrochene Erdoberfläche in ständiger Bewegung: Die Bruchstücke treiben mal in die eine, mal in die andere Richtung, fallen auseinander oder prallen zusammen. Wo sie aneinandergeraten, brechen Vulkane aus. Schiebt sich eine Platte unter eine andere, türmen sich auf der einen Seite lange Gebirgsketten auf, während auf der anderen Gesteinsmassen in der Tiefe verschwinden.

Dieses gigantische geologische Umwälzwerk, die Plattentektonik, wird von Hitzeströmen im Erdmantel angetrieben. Sie hat in Millionen von Jahren Kontinente und Ozeanbecken geformt und laufend das Antlitz der Erde verändert (siehe auch GEOkompakt „Naturgewalten“).

Zugleich funktioniert es wie eine Art globaler Thermostat, ohne den

sich der Planet vermutlich längst in eine lebensfeindliche Kältewüste verwandelt hätte.

Denn die Temperaturen auf der Erde sind nur deshalb so angenehm, weil die Atmosphäre Treibhausgase wie Wasserdampf und Kohlendioxid enthält – und zwar in der richtigen Konzentration. Diese Gase verhindern, dass zu viel Wärme durch Infrarotstrahlung ins Weltall entweicht.

Im Laufe der natürlichen Verwitterung aber reagiert Kohlendioxid mit der Erdoberfläche, wird im Gestein gebunden und in die Ozeane gespült.

Erde Kontinente – und so jene flachen Küstengewässer, aus denen sich vor rund 375 Millionen Jahren die ersten Wirbeltiere auf Trockene wagten.

Auch an Land trieb die Plattentektonik das Leben weiter voran: Wann immer Kontinente auseinanderbrachen, entwickelten sich aus voneinander isolierten Tiergruppen neue Arten.

Diese wachsende genetische Vielfalt half dem Leben auch über verheerende Katastrophen hinweg – so vor 65 Millionen Jahren, als die Dinosaurier untergingen, sehr wahrscheinlich weil ein riesiger Meteorit auf der Erde

Doch die meisten dieser Himmelskörper sind eher ein Beispiel dafür, wie desaströs die Biografien von Planeten verlaufen können: Manche sind ihrem Heimatstern zu nah geraten und verlieren nun im Rekordtempo ihre Gashülle (sofern sie eine haben), andere kreisen auf stark elliptischen Bahnen und durchlaufen dabei höllische Temperaturextreme.

Für das Leben ist auf solchen gemarterten Welten kein Platz.

Ob das auch auf erdgroße Planeten zutrifft, ist noch unklar, denn alle bislang entdeckten Objekte sind deutlich

In der Milchstraße gibt es rund 250 Milliarden Planeten – doch fast alle sind lebensfeindliche Welten

So verschwindet nach und nach immer mehr von diesem Treibhausgas aus der Atmosphäre, die Temperaturen sinken.

Doch dank der Plattentektonik wird das im Ozeanboden gespeicherte Kohlendioxid recycelt: Die Bewegung des Meeresgrundes befördert es langsam zum Rand der jeweiligen Platte, wo es mit dieser in das heiße Erdinnere absinkt. Dort wird das gebundene Gas wieder freigesetzt – und gelangt durch Vulkanausbrüche zurück in die Atmosphäre.

Auf diese Weise trägt die Plattentektonik entscheidend dazu bei, dass langfristig ausreichend Kohlendioxid in der irdischen Lufthülle vorhanden ist – und sorgte so im Verlauf der Erdgeschichte für jenes relativ konstante Klima, ohne das die langwierige Entwicklung vom Einzeller zum Zweibeiner kaum vorstellbar gewesen wäre.

Zudem steuerte die geologische Umwälzung auch den Verlauf der Evolution. Denn erst durch die Plattentektonik entstanden auf der jungen, fast vollständig von Wasser bedeckten

einschlug. Damals begann die Erfolgsgeschichte der Säugetiere.

Und damit die des Menschen.

DASS DIESES ZUSAMMENSPIEL von Land und Leben in unserem Sonnensystem einmalig ist, zeigt schon ein Blick auf die Nachbarplaneten. Auf Merkur, Venus oder Mars sucht man vergebens nach sichtbaren Beweisen für Plattentektonik wie etwa langgezogenen Gebirgszügen.

Bislang ist die Erde der einzige bekannte Planet, der von so einem Prozess profitiert – und der darüber hinaus über einen im Verhältnis zur eigenen Größe riesigen Mond sowie überreiche Wasservorräte und eine lebenserhaltende Atmosphäre verfügt.

All dies macht den blauen Planeten zu einem Sonderfall, zumindest nach heutigem Wissen.

Ähnlich glückliche Umstände könnten sich zwar theoretisch auch anderswo aneinandergereiht haben – in der Milchstraße gibt es immerhin vermutlich 250 Milliarden Planeten (nachgewiesen wurden bislang rund 400).

größer. Die meisten wurden zudem nur indirekt nachgewiesen, etwa durch Taumelbewegungen ihrer Heimatsterne – die wenigen direkt beobachteten Planeten sind Riesenwelten, größer noch als der Jupiter.

Für hochauflösende Fotografien kleinerer Himmelskörper reichen die bisherigen Teleskope noch nicht aus. Zwei geplante Weltraumobservatorien könnten zumindest optische Belege von ihnen liefern.

Diese Satelliten sollen im Lichtspektrum ferner Planeten nach Merkmalen suchen, die auf Sauerstoff und Wasserdampf in der Atmosphäre deuten – sowie auf andere Gase wie etwa Methan, die von Organismen produziert werden könnten.

Doch selbst wenn die Forscher so einen belebten Planeten finden sollten: Die vielen Zufälle, die den Kurs der Evolution auf der Erde beeinflusst haben, machen es sehr wahrscheinlich, dass das Leben anderswo einen völlig eigenen Weg gegangen ist.

Pflanzen zum Beispiel müssen nicht grün sein – je nachdem, wel-

ches Licht ihr Heimatstern abstrahlt und welche Art von Blattfarbstoff sie verwenden würden, könnten sie auch rot oder blau erscheinen.

Auf Planeten mit dichter Atmosphäre als der unseren könnten sie zudem deutlich höher emporwachsen – möglicherweise bis zu einem Kilometer. Wie Biomechaniker berechnet haben, würden es solche Gashüllen selbst schwergewichtigen Tieren erlauben, sich fliegend fortzubewegen – denkbar wären walähnliche Kreaturen, die auf meterlangen Schwingen durch die Lüfte gleiten.

Und schließlich könnte das Leben auf fremden Planeten sogar auf völlig anderen chemischen Grundlagen beruhen. Während die irdische Biochemie auf Kohlenstoffverbindungen aufbaut, könnten anderswo zumindest theoretisch auch Organismen existieren, deren wichtigster Bestandteil ein anderes Element ist – zum Beispiel Silizium oder das seltene Bor.

Auch die Rolle des Wassers könnten andere Flüssigkeiten wie Ammoniak-Lösung oder flüssiger Stickstoff übernehmen. Eine Biochemie wie die irdische wäre zwar in solchen Lösungsmitteln nicht möglich. Doch gerade auf eisigen Welten, wo es nur gefrorenes Wasser gibt, stellen sie möglicherweise den einzigen denkbaren Weg dar, um Leben hervorzu- bringen.

Ob auf fernen Himmelskörpern tatsächlich Silizium-Wesen existieren, ist bislang natürlich Spekulation – und erst recht, wie diese aussehen könnten.

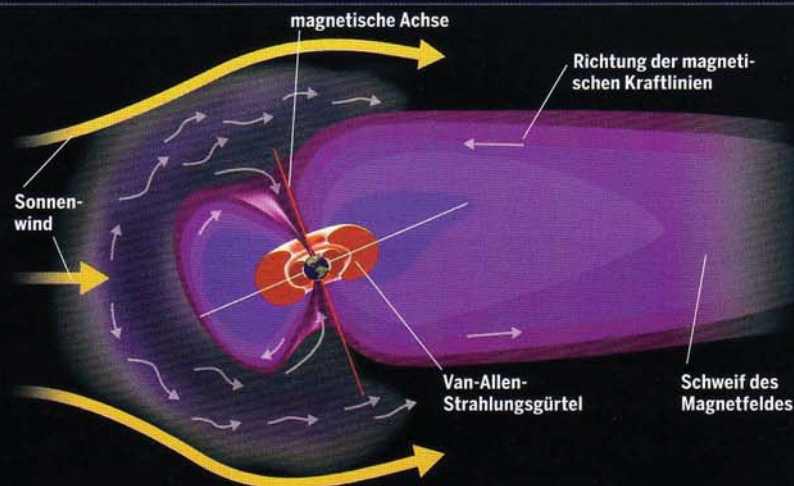
Denn falls es wirklich derartige Lebensformen geben sollte: Mit Organismen, wie wir sie von der Erde kennen, hätten sie nur wenig gemein. □

Martin Paetsch, 38, ist Wissenschaftsjournalist in Hamburg. Wissenschaftliche Beratung: **Prof. Dr. Gerhard Neukum**, Institut für Geologische Wissenschaften der Freien Universität Berlin.

Literaturtipps: Peter D. Ward und Donald Brownlee, „Unsere einsame Erde“, Springer.

PROFIL ERDE

Weshalb das Erdmagnetfeld vor kosmischer Strahlung schützt, wie Finsternisse entstehen, und warum Mondphasen eine Sache der Perspektive sind



MAGNETISCHER SCHILD

Tief im Erdinneren erzeugen flüssige Metallströme ein Magnetfeld, das sich wie ein schützender Schirm um den Planeten spannt. Elektrisch geladene Partikel des Sonnenwinds werden von dem Feld abgelenkt und um die Erde herumgeleitet. Nur über den Polen dringen einige der Teilchen durch und verursachen Polarlichter

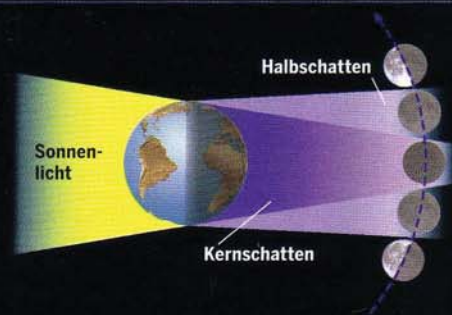


SONNENFINSTERNIS

Sie findet statt, wenn sich der Mond zwischen Sonne und Erde schiebt – dort, wo sein Schatten auf die Erde fällt

MONDFINSTERNIS

Dazu kommt es, wenn der Mond durch den Erdschatten wandert. Im Halbschatten (hellblau) erscheint er dunkler, im Kernschatten (dunkelblau) ist er kaum zu sehen



Sonnenlicht



MONDPHASEN

Während der Mond die Erde umkreist, sehen Erdbewohner mal mehr, mal weniger von seiner sonnenbeschienenen Seite – und somit verschiedene Phasen. Bei Neumond fällt gar kein Sonnenlicht auf die der Erde zugewandte Seite



Monatlicher Zyklus: von der Sichel über den Voll- bis zum Neumond



Mond

Der graue



Gefährte

Farblose Ödnis, ewige Stille, kein Windhauch, glühend heiße Tage, eiskalte Nächte: Der Mond ist eine sonderbare Welt für sich. Obwohl uns kein Himmelsobjekt näher liegt, enthüllen Forscher erst allmählich seine Geheimnisse – und sind dabei sogar auf Wasser gestoßen



Text: Ute Eberle

Es dauerte gut 200 000 Jahre, ehe der *Homo sapiens* erstmals die Rückseite des Mondes sah. Am 7. Oktober 1959 gelang es der russischen Raumsonde Luna 3, den Trabanten zu umfliegen und seine erdabgewandte Seite zu fotografieren. Die 29 Bilder aus 60 000 Kilometer Höhe waren grob und verschwommen – und dennoch eine Sensation. Sie zeigten einen anderen Mond als den, den der Mensch bis dahin kannte.

Von der Erde aus ist nur die Vorderseite des Mondes zu sehen, denn seine Drehung ist mit der Bewegung um den Mutterplaneten synchronisiert. Das bedeutet, dass sich der Erdtrabant – von der Sonne aus gesehen – genau in der Zeit einmal um seine Achse dreht, die er braucht, um unseren Planeten zu umrunden. Deshalb währt ein Tag auf ihm

29,5 Erdentage, und er wendet uns stets die gleiche Seite zu (aufgrund der elliptischen Umlaufbahn, die die Geschwindigkeit des Mondes variiert, sowie leichter Taumelbewegungen entlang der Rotationsachse kann ein Beobachter auf der Erde aber immerhin 59 Prozent der Mondoberfläche erspähen).

Die Aufnahmen von Luna 3 zeigten, dass der Trabant auf seiner Rückseite weitaus mehr Einschlagkrater hat als vorn. Umgekehrt fehlen sie fast völlig an jenen dunklen Mare-Regionen (Kratern, die mit Lava gefüllt sind), die oft mit bloßem Auge von der Erde aus erkennbar sind. Diese Regionen prägen 30 Prozent der erd zugewandten Oberfläche – aber nur knapp drei Prozent der Rückseite.

Die Menschen früherer Zeiten, die die dunklen Flächen sahen, glaubten,

es handele sich dabei um Wasserozeane. Zwei Jesuiten gaben einigen der Dunkelregionen auf der Vorderseite im 17. Jahrhundert poetische Namen, die bis heute verwendet werden – etwa Mare Serenitatis (Meer der Heiterkeit), Mare Crisium (Meer der Gefahren) oder Oceanus Procellarum (Ozean der Stürme).

Die Faszination, die der Erdbegleiter auf den Menschen ausübt, ist aber noch viel älter. In Knowth, Irland, fanden Archäologen einen Erdwall, in den Steinzeitmenschen vor 4800 Jahren Linien gekratzt hatten, die offenbar lunare Mare-Regionen darstellen – die älteste überlieferte Mondkarte.

Die Bahn des Trabanten bestimmt auch das Datum vieler religiöser Feste, etwa Ostern oder Ramadan. Der graue Erdgefährte war zudem eines der ersten Objekte, auf die Galileo Galilei 1609



Der Astronaut Harrison Schmitt entdeckte 1972 an diesem Krater 3,5 Milliarden Jahre alte glasige Asche – Beweis früher vulkanischer Aktivität

sein Fernrohr richtete und die er im Detail untersuchte. Und er ist der einzige Himmelskörper, der je betreten wurde.

71 Sonden und Raumschiffe wurden seit 1959 gen Mond geschickt. Zwölf Menschen verbrachten bisher insgesamt zwölf Tage, elf Stunden, 29 Minuten und 47 Sekunden auf seiner Oberfläche.

Cernan an einer Stelle am südöstlichen Rand des Mare Serenitatis. Der Ausblick überwältigte die Astronauten: Am Horizont ragten die Taurusberge mehr als 1000 Meter in den tief-

Auch Harrison Schmitt, der Geologe der Mission, war ergriffen. Sofort fielen ihm die Spuren großer Gesteinsbrocken auf, die vor Jahrmillionen die Berge hinabgerollt sein mussten und nun wie Findlinge in der Ebene lagen.

Er sammelte Proben, bohrte Löcher in den staubigen Untergrund und entdeckte glasige Asche, die vor 3,5 Milliarden Jahren durch Mondvulkanismus entstanden war.

Jedes Jahr **entfernt** sich der Mond weiter von der Erde – um etwa 3,8 Zentimeter

Am längsten hielten sich die Apollo-17-Astronauten Eugene A. Cernan und Harrison H. Schmitt auf dem Erdtrabanten auf: genau drei Tage und drei Stunden.

Im Dezember 1972 landete die Mondfähre „Challenger“ mit Kommandant

schwarzen Himmel. Einer der Berge, Sculptured Hill, erinnerte Cernan an „die zerfurchte Haut eines hundertjährigen“ Mannes.

„Mein Gott, ist das schön hier“, funkte er ins Kontrollzentrum nach Houston.

DANK DER BEMANNTEN Apollo-Missionen sowie der hochgeschickten Sonden und vieler raffinierter Tests haben Forscher inzwischen viel über den Mond herausgefunden. Sie haben ihn mit Radiowellen beschossen, mit Radar und wärmeempfindlichen Kameras abgetastet und die Wellenlängen des Sonnenlichts, das er reflektiert, so genau

aufgeschlüsselt, dass sie die Geochemie der Steine herauslesen konnten. Wie Gerichtspathologen, die aus kleinsten Indizien einen Tathergang rekonstruieren, haben Planetologen aus solchen Details die Geschichte unseres Erdbegleiters und sein geologisches Profil enträtselt.

So ist der Mond für einen Satelliten ausgesprochen voluminös. Mit seinen 3475 Kilometer Durchmesser würde er genau in den Atlantischen Ozean passen, zwischen Neufundland und Portugal. Seine Oberfläche entspricht der gemeinsamen Landfläche Afrikas und Europas. Er ist größer als Pluto, erreicht mehr als zwei Drittel des Durchmessers von Merkur und besitzt ein Viertel des Erdumfangs. Keiner der gut 160 anderen Monde des Sonnensystems erreicht so sehr die Dimensionen seines Planeten.

Wie viel Distanz zwischen der Erde und ihrem Trabanten liegt, lässt sich

seit dem 21. Juli 1969 auf drei Zentimeter genau bestimmen – seit Neil Armstrong und Edwin Aldrin, die ersten Menschen auf dem Mond, ein paar koffergroße Reflektoren auf ihm angebracht haben. In klaren Nächten schießen Forscher Laserstrahlen in den

384 400 Kilometer). Wegen der Abbremsung durch die Gezeitenkräfte* entfernt er sich zwar stetig von der Erde, aber nur so schnell, wie Fingernägel wachsen: 3,8 Zentimeter pro Jahr.

Auf der Oberfläche des Trabanten findet man einen der größten bekannten

Der Mond ist uns 100-mal **näher** als die Venus – und 400-mal näher als die Sonne

Himmel und messen, wie lang es dauert, bis sie von den Reflektoren zurückgeworfen werden.

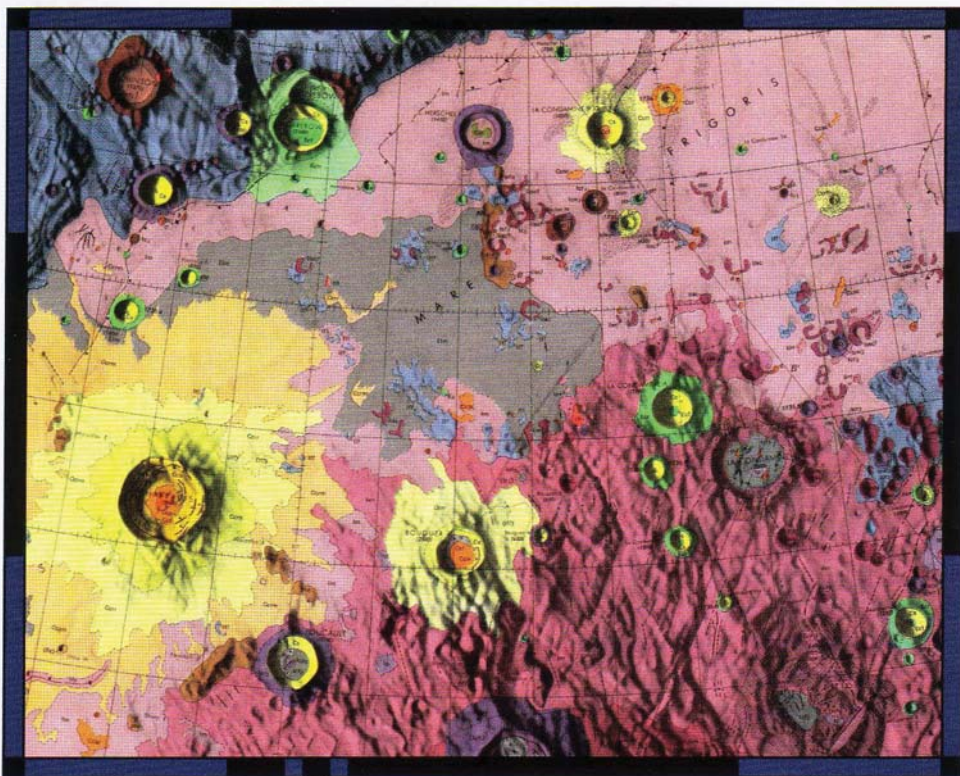
Je nachdem, wo sich der Mond auf seiner elliptischen Umlaufbahn befindet, muss das Licht – pro Strecke – zwischen 356 000 und 407 000 Kilometer zurücklegen (im Durchschnitt sind es

Einschlagkrater des Sonnensystems: das Südpol-Aitken-Becken, 2500 Kilometer im Durchmesser.

Ein Mensch müsste rund sieben Wochen lang täglich zehn Stunden marschieren, um diesen Krater zu durchwandern. Zunächst müsste er freilich etwa zwölf Kilometer die Kraterwand hinabklettern – das ist dreimal so tief wie das tiefste Bergwerk der Erde. Unten wäre es pechschwarz und mancherorts minus 240 Grad Celsius kalt. Denn die Sonne hat hier seit Jahrmilliarden nicht mehr geschienen.

DAS SÜDPOL-AITKEN-BECKEN ist einer von Zehntausenden Kratern auf dem Mond. Allein auf der erdzugewandten Seite gibt es vermutlich 30 000 Kessel mit einem Durchmesser von über einem Kilometer. 1700 messen mehr als 100 Kilometer im Durchmesser, 30 sogar mehr als 300 Kilometer. Asteroiden und Kometen haben sie in die Kruste geschlagen.

Weshalb die großen Geschosse auf der Mondvorderseite mehr mit Lava gefüllte Becken und auf der Rückseite mehr ungefüllte Krater hinterließen, ist noch ein Rätsel. Seismologische Tests und Frequenzverschiebungen bei Radiowellen (die Rückschlüsse auf die von Ort zu Ort variierende Schwerkraft und damit auf die Masseverteilung des jeweiligen Himmelskörpers erlauben) zeigen,



Diese Aufnahme zeigt Gesteine und Strukturen des Mondes. Hellrosa und grau sind die flachen Lavafelder eines Meeres markiert, gelb, grün, blau und dunkelrosa stehen für Material, das bei Einschlägen zerstört oder durch Vulkanausbrüche ausgeworfen wurde

* Durch die Gezeitenkräfte entstehen Wasserberge an zwei Seiten der Erde: das führt zu einem Reibungsverlust, die Erddrehung verlangsamt sich in 100 000 Jahren um 1,6 Sekunden. Dadurch wiederum erfolgt eine Übertragung des Drehimpulses auf den Mond, sodass sich dessen Erdentfernung vergrößert.



1. Apollo 11, 1969
2. Apollo 12, 1969
3. Apollo 14, 1971
4. Apollo 15, 1971
5. Apollo 16, 1972
6. Apollo 17, 1972

dass die Kruste des Mondes auf dessen Rückseite deutlich dicker ist als vorn, durchschnittlich 80 statt 60 Kilometer.

Zugleich aber hat sich in der erdzu-gewandten Hemisphäre mehr schweres Gestein angesammelt, sodass der Masse-schwerpunkt des Mondes um zwei Kilo-meter von seiner geometrischen Mitte Richtung Erde verschoben ist.

Dies könnte mit der Anziehungskraft unseres Planeten zu tun haben. Oder damit, dass zufällig mehr kosmische

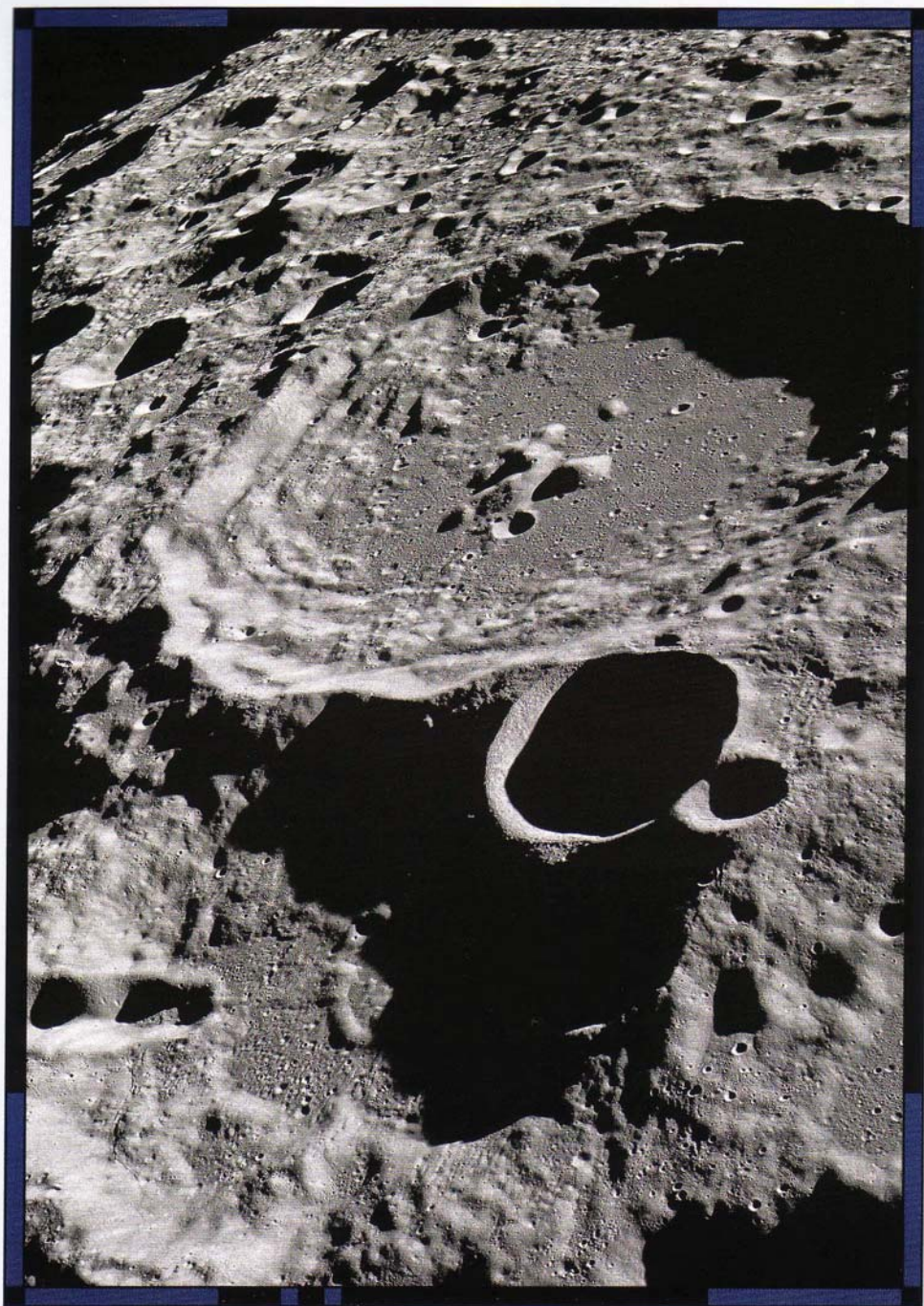
Zwölf Menschen sind bei sechs Apollo-Missionen auf der Vorderseite des Tra-banten gelandet – häufig am Rand der Mondmeere

Geschosse auf die Mondvorderseite prallten – vor allem solche, deren gewaltiger Aufschlag die Kruste ausdünnte.

Aus den Breiten und Tiefen der Krater haben Forscher berechnet, dass einige Brocken mehrere zehn Kilometer Durchmesser gehabt haben müssen. Als sie auf den Mond krachten, warf

sich dessen Kruste rings um die Ein-schlaglöcher in Minuten zu teilweise kilometerhohen Gebirgen auf. Die aber waren instabil, sackten sofort wieder zusammen und bildeten terrassenför-mige Kraterränder.

Bei solch gewaltigen Einschlägen presste der Meteorit das Gestein in der Kratermitte zusammen, anschließend federte es zurück und stülpte sich zu Zentralbergen auf. Abgesprengte Felsen flogen zum Teil um den ganzen Mond



Wegen der fehlenden Atmosphäre auf dem Mond schlagen Geschosse mit bis zu 150 000 km/h ein. Doch 90 Kilometer breite Krater wie »Dae-dalus« entstehen nur sehr selten

(auch deshalb, weil die Schwerkraft dort wegen seiner geringeren Masse nur ein Sechstel der irdischen beträgt).

Ähnlich wie auf der Erde messen die höchsten Gipfel gut 8000 Meter. Doch während sich unsere Gebirge in Jahrtausenden durch die Plattentektonik auffalteten, entstanden die Mondberge durch Auswurf und zurückfederndes Gestein in weniger als einer Stunde.

Die meisten kosmischen Geschosse kollidierten vor etwa 4,5 bis 3,9 Milliarden Jahren mit dem Erdtrabanten. Das haben Geologen aus den gut 380 Kilogramm Mondgestein geschlossen, das die Apollo-Astronauten zurückbrachten.

Darin fanden sie chemische Elemente, die gewöhnlich in verschiedenen Varianten (Isotopen) vorkommen. Manche dieser Isotope sind instabil und zerfal-

len nach einem vorgegebenen Rhythmus, sie sind radioaktiv. Die Forscher maßen, wie viel dieses strahlenden Materials noch in den Steinen vorhanden war, und berechneten daraus, wie lange sie bereits existierten.

Auf der Erde sind nur fünf Prozent des Gesteins der oberen Schichten älter als drei Milliarden Jahre. Das liegt daran, dass die Plattentektonik kontinuierlich Bodenmaterial recycelt, indem sie es in den Untergrund zieht, aufschmilzt und wieder ausstößt (siehe auch GEOkompakt »Naturgewalten«). Auf dem Mond fehlen diese Faktoren, sodass nur ein Prozent der Oberfläche jünger als drei Milliarden Jahre ist. Die ältesten bisher gefundenen Fragmente reichen sogar gut 4,5 Milliarden Jahre zurück.

Das bedeutet, dass sich der Erdtrabant 30 bis 50 Millionen Jahre nach der Bildung des Sonnensystems geformt haben muss.

DIE ANALYSEN verrieten zudem: Die Gesteine von Mond und Erde sind ähnlich zusammengesetzt. Die meisten Forscher sehen das als Beweis, dass der Mond entstand, als vor 4,5 Milliarden Jahren ein marsgroßer Körper auf der sogenannten Proto-Erde einschlug und eine gigantische Wolke aus Gas und geschmolzenem Gestein ins All schleuderte (siehe Seite 54).

Diese Partikel klumpten anschließend durch Gravitationskräfte und Kollisionen zusammen, wuchsen allmählich zum »Proto-Mond«. Immer weitere Brocken krachten in den neuen Himmelskörper und wandelten dabei ihre Bewegungsenergie in Hitze um. Dadurch wurde er derart heiß, dass viele flüchtige Elemente und Verbindungen (wie Wasserdampf, Kohlendioxid, Zink oder Phosphor) ins All entwandten.

Die Folge: Der Mond hat heute praktisch keine Atmosphäre, es finden sich dort nur geringe Mengen an Gasen wie Neon, Helium, Argon und Wasserstoff.

Vermutlich bekam der Erdbegleiter bei dem Crash vor 4,5 Milliarden Jahren auch einen Kern aus Eisen mit. Denn aus

der Kraft, die er auf die Erde ausübt (wodurch die in ihrer Bahn um die Sonne messbar wackelt), lässt sich berechnen, dass seine Masse 73 Trillionen Tonnen beträgt – mehr, als sich mit den gefundenen Gesteinsarten erklären lässt.

Zu den immer noch ungelösten Rätseln der Planetologie zählt die Frage, ob dieser Mondkern anfangs ein erdähnliches Magnetfeld hatte. Darauf scheinen zumindest manche Mondsteine hinzuweisen, die magnetisiert sind.

Nach seiner Entstehung blieb der Mond noch Millionen Jahre lang heiß und damit plastisch verformbar. In diesem Magmazoan trieben leichte Stoffe nach oben, etwa Feldspat, ein Aluminium-Silizium-Mineral. Schwere, an Magnesium- und Eisenverbindungen reiche Stoffe dagegen sanken ab.

Weil die Feldspatschicht direkt an den kalten Weltraum grenzte, erstarrte sie als Erstes und bildete eine Kruste – die hellen Hochländer des Mondes. In diese Kruste schlugen Meteoriten zahllose Krater, bis vor knapp vier Milliarden Jahren das heftige Bombardement nachließ.

Von der Kruste gegen die Kälte des Alls abgeschirmt, verharrte der Mantel noch lange im liquiden Zustand oder wurde durch regional konzentrierte radioaktive Elemente sogar wieder erhitzt und erneut aufgeschmolzen.

Das heiße Gestein konnte durch Risse und Spalten aufsteigen, sich an der Oberfläche verteilen und viele der großen Krater und Becken füllen. So entstanden vor 3,8 bis 3,1 Milliarden Jahren die dunklen Mare-Ebenen, die reich an Magnesium- und Eisenbindungen sind.

Wie mächtig manche dieser Lavaströme gewesen sein müssen, belegen die Rinnen, die sie hinterließen, so das 160 Kilometer lange, zehn Kilometer breite und ein Kilometer tiefe Schroeteri-Tal.

Ist das Mondinnere auch heute noch flüssig und geologisch aktiv? Viele Beobachter glaubten über die Jahrhunderte, Lichterscheinungen oder Verfärbungen auf dem Trabanten erspäht zu haben.

Zudem registrierten die von den Apollo-Astronauten hinterlassenen Seismographen etliche größere Beben,

die sich nicht mit dem Lösen von Gezeitenspannungen erklären lassen (die aufgrund der gegenseitigen Anziehung von Mond und Erde in der Mondkruste entstanden sind).

Dennoch halten Geologen unseren Satelliten für geologisch weitgehend tot. Allenfalls, so glauben sie, könnten sich noch kleinere Gasansammlungen ihren Weg an die Oberfläche brechen.

Da der Erdgefährte keine Atmosphäre hat, die das Sonnenlicht streuen würde, ist der Himmel auf dem Mond stets schwarz, und es gibt keine Dämmerung. Und wenn nach jeweils 14 Tagen und 18,3 Stunden die Nacht anbricht, geschieht das so unvermutet, als würde jemand einen Schalter kippen. Die Temperaturen fallen dann von plus 130 Grad auf minus 170 Grad Celsius.

Zudem ist es auf dem Trabanten vollkommen lautlos, weil keine Gasteilchen

39 Prozent). Damit schimmert der Vollmond für einen irdischen Beobachter genauso hell wie eine Kerze im Abstand von 1,8 Metern. Dennoch ist er für uns das hellste Objekt am Nachthimmel.

IN FRÜHERER ZEIT vermuteten die Menschen auf dem Mond eine blühende Welt mit Meeren und Lebewesen. Doch dann zeigten Forschungsergebnisse: Der Himmelskörper ist staubtrocken.

Es fehlen ihm nicht nur Fluss- und Seebetten, sondern auch wasserhaltige Minerale wie etwa Ton. Und als 1970 die dritte Raketenstufe von Apollo 13 auf den Trabanten zurückfiel, vibrierte er vier Stunden lang – für Geologen ein Zeichen, dass keine Flüssigkeit die Erdschütterung dämpfte.

Umso überraschender war es, als Forscher im Jahr 2008 in altem, vulkanischem Auswurfmaterial aus großer

Was verbirgt sich in den eiskalten, nachtschwarzen **Kratern** des Mondes?

Schallwellen übertragen. Und ohne Wind und Regen sehen die Fußspuren der Apollo-Astronauten so frisch aus, als wären sie erst gestern geprägt worden. Löscht kein Meteoriteneinschlag sie aus, werden sie noch Jahrtausende überdauern.

Der feine Mondstaub, in den die Astronauten ihre Stiefel gedrückt haben, ist Teil der äußersten Schicht des Erdtrabanten. Dabei handelt es sich um Krustengestein, das durch die permanente Bombardierung aus dem All zermahlen wurde.

Denn ohne eine bremsende Atmosphäre prasseln selbst kleinste kosmische Krümel mit bis zu 150 000 km/h auf den Mond ein – und pulverisieren, was immer sie treffen.

Dieser Staub bedeckt die Mondoberfläche mit durchschnittlich vier bis zehn Meter Dicke und reflektiert nur sieben Prozent des Sonnenlichts (auf der Erde sind es unter anderem dank der Wolken

Mondtiefe Spuren von Wassermolekülen entdeckten: ein Indiz dafür, dass der Erdtrabant bei seiner Entstehung weniger trocken war als heute.

Und könnte nicht in den dunkelsten Kratern – etwa dem Südpol-Aitken-Becken – noch das Wasser lagern, das die Asteroiden und Kometen einst mitbrachten? Schließlich ist es auf dem Grund dieses Kessel so kalt, dass selbst Fluchtiges nicht verdampft.

Tatsächlich fing die Raumsonde „Lunar Prospector“ rund um die Mondpole Neutronenstrahlung mit dem Energieprofil von Eis ein. Berechnungen zufolge könnte dort genug Wasser lagern, um einen zwei Kilometer breiten, zwei Kilometer langen und 200 Meter tiefen See zu füllen – eine Menge von fast einem Kubikkilometer.

Nach neuesten Messungen einer irdischen Sonde findet sich sogar auf der gesamten Mondoberfläche Wasser – wenn auch in geringen Mengen. Wissen-

schaftler vermuten, dass die H_2O -Moleküle entstehen, wenn geladene Wasserstoff-Teilchen aus dem Sonnenwind mit dem Sauerstoff des Gesteins reagieren.

In den nächsten Jahren werden weitere Sonden zum Mond geschickt. Nach den USA und Russland haben nun auch Europa, Indien, China und Japan begonnen, den Trabanten zu erkunden. Einige werden ihn mit präzisen Instrumenten umkreisen, andere unbemannte Rover und Roboter absetzen. Auch neue Astronautenmissionen und eine permanente Mondbasis sind geplant.

Ab 2024 könnte so eine Station Wirklichkeit werden – wenn die Finanzierung klappt. Bereits jetzt schauen Forscher nach den besten Landeplätzen für zukünftige Astronauten, die Sonde „Luna Reconnaissance Observer“ fotografiert und vermisst dafür die Polregionen metergenau. Die NASA bevorzugt dabei einen Platz am Südpol, an der Grenze zwischen Licht und Schatten: Dort wo stets die Sonne scheint, würden Astronauten Solarzellen installieren und im Schatten das gefrorene Wasser suchen.

Am 9. Oktober 2009 kam es zu einem besonders spektakulären Experiment: Die NASA ließ eine rund 750 Kilogramm schwere Raketenstufe in einen Polkrater am Südpol einschlagen, um einen künstlichen Krater zu erzeugen. Das verdampfte Gestein sowie feine Trümmer wurden sechs bis acht Kilometer in die Höhe geschleudert.

Untersuchungen der Einschlagwolke haben kurz danach ergeben, dass sie tatsächlich Wassermoleküle enthält.

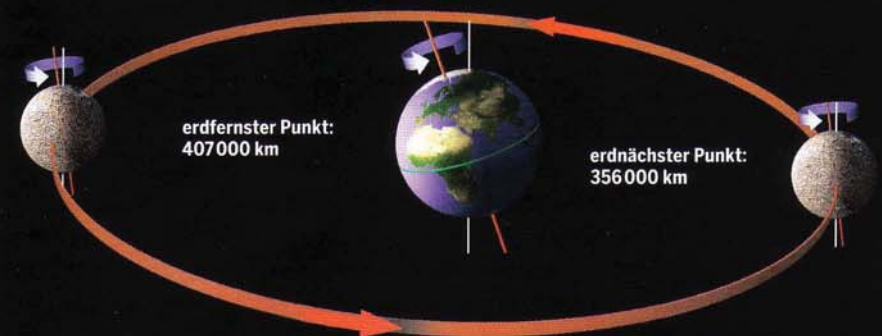
So wird auch nach 4800 Jahren Beobachtung, 72 Missionen zum Mond sowie sechs Landungen auf seiner Oberfläche die Neugier der Menschheit auf ihren kosmischen Nachbarn immer wieder neu entfacht. □

Ute Eberle, 38, ist Wissenschaftsautorin in Leiden, Niederlande. Wissenschaftliche Beratung: **Prof. Dr. Ralf Jaumann**, Institut für Planetenforschung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt in der Helmholtz-Gesellschaft, Berlin.

Literaturtipps: Edwin Aldrin, Ralf Jaumann, Ulrich Köhler, Thomas Reiter, „Der Mond – Entstehung, Erforschung, Raumfahrt“, Fackelträger-Verlag.

PROFIL MOND

Auf welchen Bahnen sich der Trabant um die Erde bewegt, wie seine Oberfläche geformt ist, und wie bei der Umkreisung unseres Planeten Ebbe und Flut entstehen



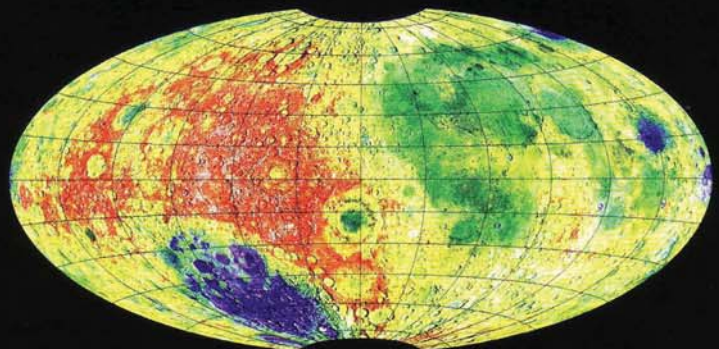
DIE WEGE DES MONDES

Auf einer elliptischen Bahn zieht der Trabant um die Erde, daher variiert ständig die Distanz zwischen beiden. Zugleich ändert sich die Bahngeschwindigkeit des Mondes – in Erdnähe bewegt er sich schneller als in Erdferne. Seine eigene Drehgeschwindigkeit bleibt jedoch konstant. Von der Erde aus sind insgesamt rund 59 Prozent der Mondoberfläche zu sehen



ROTATION IM GLEICHAKT

Seit der Mondentstehung haben sich seine Drehbewegungen so verändert, dass er unseren Planeten, von der Sonne aus gesehen, in 29,5 Erdtagen einmal umkreist. Da er in diesem Zeitraum auch einmal um die eigene Achse rotiert (gegen den Uhrzeigersinn), zeigt sich einem Beobachter auf der Erde immer die gleiche Seite



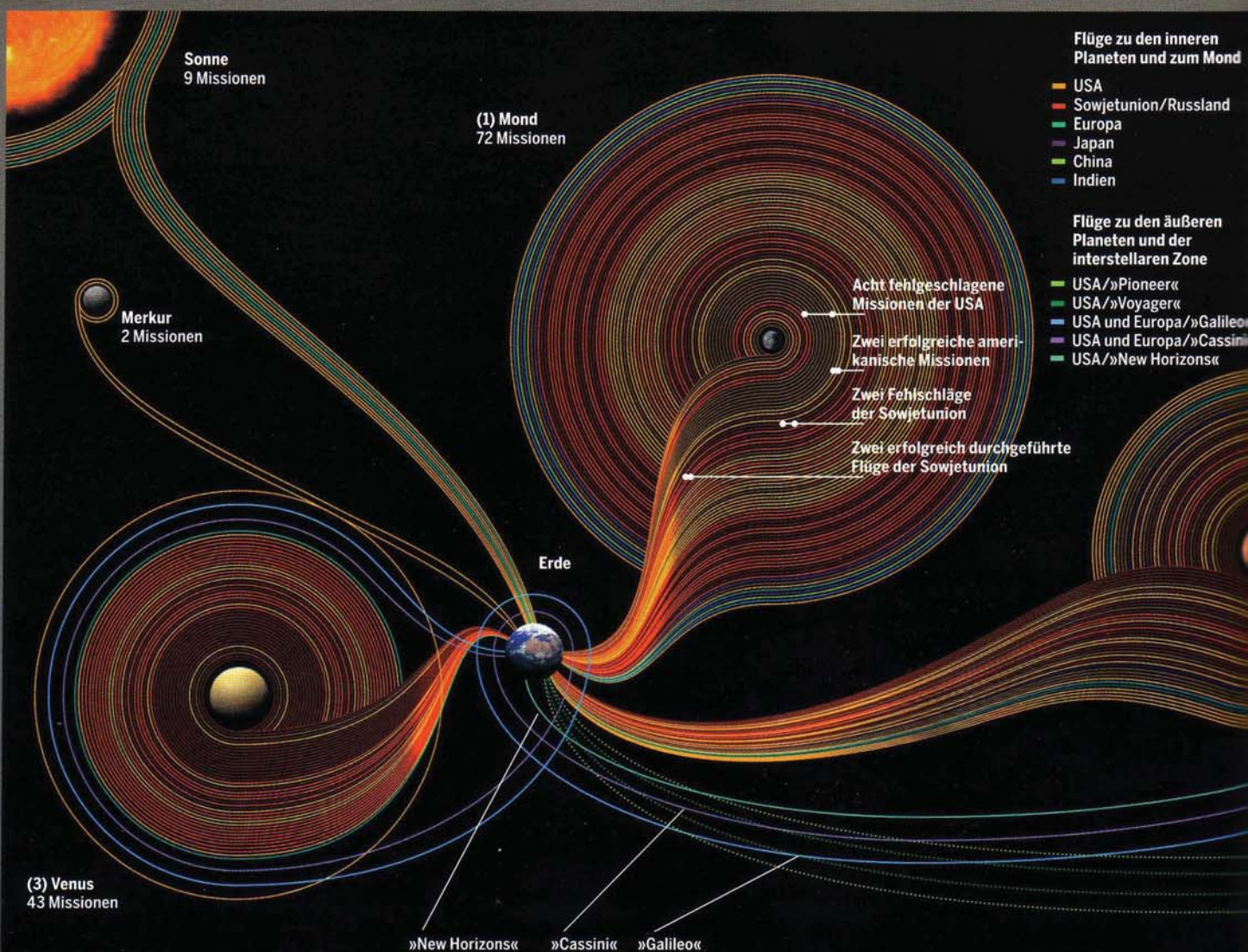
DIE GROSSE VERMESSUNG

Mit einem Laser tastete die amerikanische Sonde »Clementine« ab 1994 die Oberfläche des Erdtrabanten ab und erzeugte ein höchst detailreiches Bild der Strukturen beider Seiten (o. l. die erdabgewandte, o. r. die sichtbare). Rote Farben zeigen gewaltige Gebirge, grüne mäßig erhabene Zonen und blaue tief liegende Gebiete an – wie etwa das Südpol-Aitken-Becken (l.)

IM SCHWUNG DER GEZEITEN

Der Mond zieht Ozeanwasser an; ein Flutberg bildet sich. Die Fliehkraft (sie wirkt, da Erde und Mond um einen gemeinsamen Schwerpunkt kreisen) verursacht einen zweiten Berg. Beide bewegen sich, weil der Planet sich unter ihnen wegdreht





Missionen im All

Die **Kundschafter** der Menschheit

Mit immer raffinierteren Fluggeräten erkundet der Mensch seit 50 Jahren das Sonnensystem und hat dabei bisher fast 200 Raumschiffe und Sonden zu den benachbarten Himmelskörpern geschickt. Einige der Späher sind immer noch auf dem Weg – oder sogar bereits dabei, in die interstellare Zone vorzustoßen



Fehlschläge auf dem Weg zu den inneren Planeten und zum Mond

USA
Sowjetunion/Russland
Europa
Japan

(5) Asteroiden und Kometen

Mithilfe von 17 Sonden untersuchen Forscher die kleineren Himmelskörper, darunter den Asteroiden Eros (siehe unten), auf dem im Februar 2001 das Gefährt »NEAR Shoemaker« landet. Beim Vorbeiflug an Ida registriert die Sonde »Galileo« erstmals die Existenz eines Asteroiden-Trabanten: Der Gesteinsbrocken Dactyl umkreist Ida

(10) »New Horizons«
erreicht Pluto
am 14. 7. 2015

(12) Neptun
1 Mission

(11) Uranus
1 Mission

(9) Saturn
5 Missionen

(6) Jupiter
9 Missionen

(2) Mars
40 Missionen

(9) Erforschte Saturnmonde:

22 der 61 Saturnmonde erkundet »Cassini«. Auf dem größten Trabanten, dem Titan (in der Abfolge ganz links), landet das unter anderem mit einer Kamera ausgerüstete Modul »Huygens«, nachdem es sich von Cassini getrennt hat

(7) Erforschte Jupitermonde (v. l.):

Amalthea
Io
Europa
Ganymed
Kallisto

(8)

Vorbeiflug
»Galileo«

Ida

»Pioneer 11«

»Voyager 1«

»Voyager 2«

»Pioneer 10«

Im Januar 1959 nähert sich zum ersten Mal eine irdische Raumsonde einem fremden Himmelskörper: Die sowjetische »Lunik 1« passiert den Mond (1) in 5600 Kilometer Entfernung. Damit beginnt ein neues Zeitalter der Erforschung des Sonnensystems – Amerikaner und Sowjets, später auch Europäer, Russen, Chinesen und Inder bringen immer neue Missionen auf den Weg. 1960 hebt die erste zum Mars ab (2), 1961 die erste zur Venus (3). Nicht alle sind erfolgreich (4), doch Techniker und Forscher sammeln

Erfahrungen für weitaus komplexere Erkundungen, wie etwa die »Galileo«-Expedition ab 1989. Innerhalb von sechs Jahren durchquert diese Raumsonde den Asteroiden-Gürtel (5), erreicht den Jupiter (6) und zeichnet auf, wie der Komet Shoemaker-Levy 9 auf dessen Oberfläche einschlägt (s. S. 116). Danach erforscht »Galileo« fünf der 63 Jupitermonde (7) und verglüht schließlich im September 2003 in der Atmosphäre des Gasplaneten (8). Noch nicht beendet sind die Missionen von »Cassini« zum Saturn und dessen

Monden (9, s. S. 126) sowie von »New Horizons« zum Pluto (10, s. S. 148). Die größten Distanzen haben die in den 1970er Jahren gestarteten Pioneer- und Voyager-Sonden zurückgelegt: »Voyager 2« etwa stieß im September 2007 in die Grenzregion des Sonnensystems vor, nachdem sie zuvor an Uranus (11) und Neptun (12) vorbeigeflogen war: Als dritte Sonde erreichte die Kapsel die Übergangszone zum interstellaren Raum – knapp acht Millionen Meilen von unserem Zentralgestirn entfernt.

Inter-
stellare Zone ►

Sonde
»Pioneer 11«

Sonde
»Voyager 2«

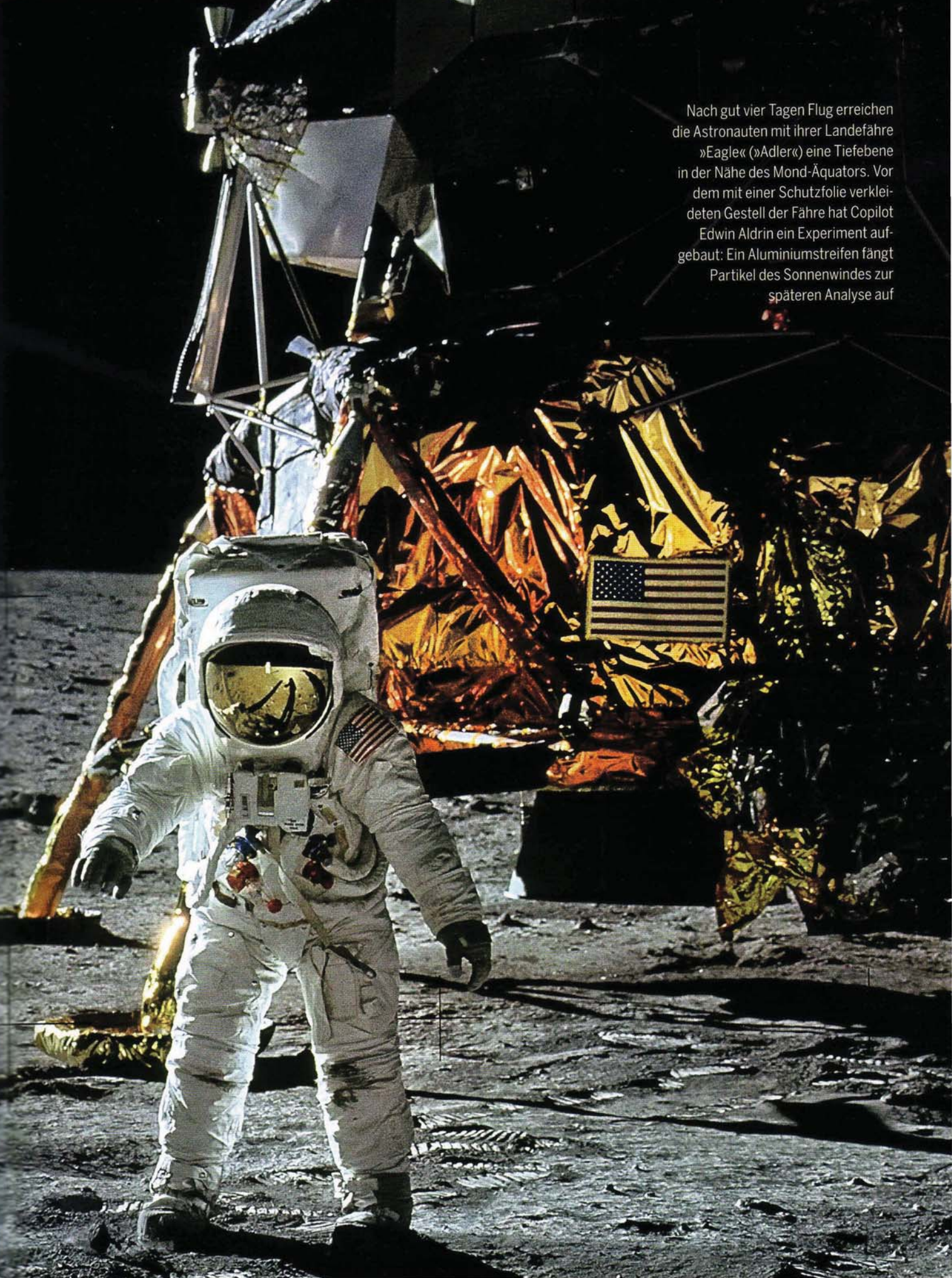
Sonde
»Pioneer 10«

Sonde
»Voyager 1«

Der Triumph des Adlers

Es ist die Erfüllung eines uralten Traums, als nach achtjähriger Entwicklungszeit drei US-Astronauten am 16. Juli 1969 an der Spitze einer gewaltigen Rakete zum Mond aufbrechen. Doch trotz aller Vorbereitung bleibt ihre Reise bis zur letzten Sekunde ein ungeheures Wagnis

Nach gut vier Tagen Flug erreichen die Astronauten mit ihrer Landefähre »Eagle« (»Adler«) eine Tiefebene in der Nähe des Mond-Äquators. Vor dem mit einer Schutzfolie verklebten Gestell der Fähre hat Copilot Edwin Aldrin ein Experiment aufgebaut: Ein Aluminiumstreifen fängt Partikel des Sonnenwindes zur späteren Analyse auf





Wenige Monate vor dem Start posieren die »Apollo 11«-Astronauten Edwin Aldrin, Michael Collins und Neil Armstrong (v.l.) an einem Modell des Mondes. Jedes topographische Detail des Landeareals hat Kommandant Armstrong mithilfe von Fotos auswendig gelernt. Landen soll die Crew im »Meer der Ruhe« (siehe Kreuz)



Text: Cay Rademacher

An Bord der Mondlandefähre, Ende Juni 1969. Seit Stunden schon harren die Astronauten Neil Armstrong und Edwin Aldrin in einem Cockpit aus, das kaum größer ist als eine Telefonzelle. Sitze gibt es nicht. Überall Kabel und Leitungen, dazwischen Hunderte von Kontrollinstrumenten und Schaltern. Mitten in den Raum ragt ein vibrierender, metallisch verkleideter Konus: eines der Raketentriebwerke. Mit einer Geschwindigkeit von mehr als 7000 km/h rast die Kapsel durchs All.

In den zwei winzigen Cockpitfenstern zeichnet sich eine vernarbte Landschaft ab, die mit jeder Sekunde größer wird: der Mond. Kommandant Armstrong schaut hinaus; er sucht einen felsfreien Platz zur Landung. Da gerät die Staubwüste vor seinen Augen plötzlich ins Schlingern.

Aldrin, der Copilot, starrt aufgeregt auf den Höhenmesser: Der Wert fällt rasend schnell. Nur noch wenige Hundert Meter. Das Raumschiff taumelt immer heftiger.

Vom Kontrollzentrum in Houston, das den Flugverlauf verfolgt, kommt der Funkspruch: „Apollo 11, wir schlagen vor, dass ihr abbrecht!“ Doch für die 384400 Kilometer zwischen Erde und Mond benötigt die Übertragung 1,3 Sekunden. Da ist es schon zu spät.

Apollo 11 schlägt im „Meer der Ruhe“ auf: viel zu schnell und viel zu hart für das fragile Raumschiff, das in unzählige Trümmer zerfetzt wird. Armstrong und Aldrin wären sofort tot – wäre dies nicht ein Flug im Simulator gewesen.

Abstürze gehören zum Training der Apollo-Astronauten – solange die Crew noch unerfahren ist. Aber Armstrong und Aldrin werden, gemeinsam mit Michael Collins, schon in drei Wochen starten, um als erste Menschen einen fremden Himmelskörper zu betreten. Ihre Mission soll die weiteste, spektakulärste, triumphalste Entdeckungsreise aller Zeiten werden.

Tatsächlich aber ist sie ein höchst riskantes, in kürzester Zeit vorbereitetes Vabanquespiel an der Grenze des menschlich und technisch Möglichen. Eine Expedition, die den Astronauten Manöver abverlangen wird, die nie zuvor geprobt worden sind. Und von deren Ziel niemand weiß, was die Männer dort eigentlich erwartet.

„**ICH GLAUBE, DASS SICH** unsere Nation verpflichten sollte, vor dem Ende dieser Dekade einen Mann zum Mond zu bringen und sicher wieder zurück zur Erde“, verkündet Präsident John F. Kennedy acht Jahre zuvor, am 25. Mai 1961 – 43 Tage nachdem die USA beim Wettlauf um die Vorherrschaft im All zum zweiten Mal von der Sowjetunion geschlagen worden sind: Schon 1957 haben die Russen mit dem „Sputnik“ den ersten Satelliten gestartet, nun haben sie auch den ersten Menschen ins All gebracht, den Kosmonauten Jurij Gagarin.

Welche Demütigung für die USA, einen Staat, der sich in Technik und Wissenschaft für unbesiegbar hält. Kennedy muss reagieren – und gibt seinem Land eine Vision vor, wie sie typisch ist für den

charismatischen Präsidenten: kühn bis zur Provokation, fortschrittsgläubig und dennoch romantisch. Mit ihr überträgt Kennedy die mythenbeladene Sehnsucht der Amerikaner nach dem unberührten Land im Westen vom 19. Jahrhundert in das Weltraumzeitalter.

Amerikas Traum, verkündet Kennedy, ist nicht tot.

Die Erfüllung dieses Traums erlebt der Präsident freilich nicht mehr. Zweieinhalb Jahre später wird Kennedy erschossen, und Amerika stürzt in seine vielleicht traumatischste Dekade des 20. Jahrhunderts. Auch die Weltraumflüge der „Mercury“- , dann der „Gemini“- Astronauten sind eine Serie politischer Niederlagen: Denn ob beim ersten Flug zweier Menschen im All, beim ersten Rendezvous zweier Raumschiffe, beim ersten Weltraumspaziergang – stets sind die Russen um Monate voraus.

Unterdessen arbeiten überall in den USA, koordiniert von der zivilen Raumfahrtbehörde NASA, Techniker und Wissenschaftler an Universitäten und Privatfirmen fieberhaft an der Vision

Für Apollo
arbeiten
400 000
Forscher und
Techniker



1961 initiiert US-Präsident John F. Kennedy mit »Apollo« das ehrgeizigste Wissenschaftsprojekt der Geschichte, um den technischen Vorsprung der Sowjetunion aufzuholen. Bei einem Besuch im Weltraumbahnhof Cape Canaveral lässt er sich den Fortschritt des Programms erläutern

„Apollo“. In der Endphase des Projekts sind 400 000 Menschen damit beschäftigt, einen Amerikaner auf den Mond zu bringen – und die UdSSR endlich einmal zu übertrumpfen.

Zunächst muss eine Rakete konstruiert werden, die kräftig genug ist, ein Raumschiff bis zum Mond zu tragen. Die Entwicklung dieses Geschosses überträgt die NASA dem wohl genialsten – und umstrittensten – Raketenbauer jener Zeit: Wernher von Braun. Als junger Wissenschaftler hat von Braun für die Nationalsozialisten in Peenemünde die „V2“ entwickelt, die

erste Langstreckenrakete der Geschichte. Rund 40 000 Zwangsarbeiter mussten dafür schuften, viele wurden hingerichtet oder starben vor Erschöpfung.

Unmittelbar nach Kriegsende hat sich von Braun mit seinen Mitarbeitern in einer Geheimoperation der US Army nach Amerika abgesetzt. Dort ist niemals Anklage gegen ihn erhoben worden, im Gegenteil: „Mr. Moon“, wie der Deutsche später genannt wird, gehört zu den privilegiertesten Wissenschaftlern weltweit. Seit 1945 entwickelt er Raketen für den Kalten Krieg. Und 1959 präsentiert sein Team einen der ersten Vorschläge für eine lunare Militärbasis.

Wernher von Braun kommt kurz darauf zur NASA – und krönt dort sein Lebenswerk mit der „Saturn V“-Rakete: einem weißen, 110 Meter hohen und rund 2880 Tonnen schweren Geschoss.

Allein die erste der drei Stufen, die beim Flug der Saturn V nacheinander abgesprengt werden, verbrennt während ihres nur zweieinhalbminütigen Einsatzes fast 1,9 Millionen Liter Kerosin und flüssigen Sauerstoff – und

erreicht damit einen Schub von rund 160 Millionen PS.

An der Spitze dieses antriebsstärksten Gefährts aller Zeiten sitzen zwei Raumschiffe: die Kommandokapsel, die die Astronauten von der Erde bis zum Mondorbit und wieder zurück tragen wird. Und die Mondlandefähre „Eagle“, mit der zwei der drei Astronauten den Erdtrabanten erreichen sollen.

Ein Raketenantrieb wird dabei den Sturz der „Eagle“ bremsen, denn Fallschirme wären auf dem Mond, der fast keine Atmosphäre hat, sinnlos. Und um das Gefährt auf komplizierten Kursen bis zum Landeplatz zu navigieren, muss ein Computer mit 33 000 Wörtern Speicherkapazität genügen, einer Rechenleistung, mit der ein heutiger PC nicht einmal hochgefahren werden könnte.

Doch es läuft zunächst nicht gut für das Projekt: Am 27. Januar 1967 verbrennen die drei Astronauten der geplanten Apollo-1-Mission bei einem Test am Boden in ihrer Kapsel – darunter Virgil Grissom, der aussichtsreichste Kandidat für den ersten Flug zum Mond.

Plötzlich heult
eine **Sirene**
auf – ist der
Rechner
überlastet?

1968, beim zweiten unbemannten Testflug der Saturn V, wird die Rakete von unerklärlichen Vibrationen geschüttelt. Und als am 11. Oktober 1968 erstmals drei Astronauten in einer Apollo-Kapsel in die Erdumlaufbahn aufsteigen, schimpfen die Männer, als säßen sie am Stammtisch. Fast scheint es, als überfordere Apollo selbst die erfahrensten Piloten.

Kurz zuvor hat die CIA gemeldet, die UdSSR baue eine neue, gewaltige Rakete – groß genug, um Menschen zum Mond zu tragen. Werden die Kosmonauten auch diesmal die Ersten sein?

Schon im Sommer 1968 haben sich die NASA-Direktoren deshalb dazu entschlossen, den Flug von Apollo 8, der nur als vorsichtiger Auftakt einer umfangreichen Testserie geplant war, bis in die Umlaufbahn des Mondes auszuweiten: Die Astronauten sollen nun fast 300-mal weiter in den Weltraum vordringen als je ein Mensch zuvor.

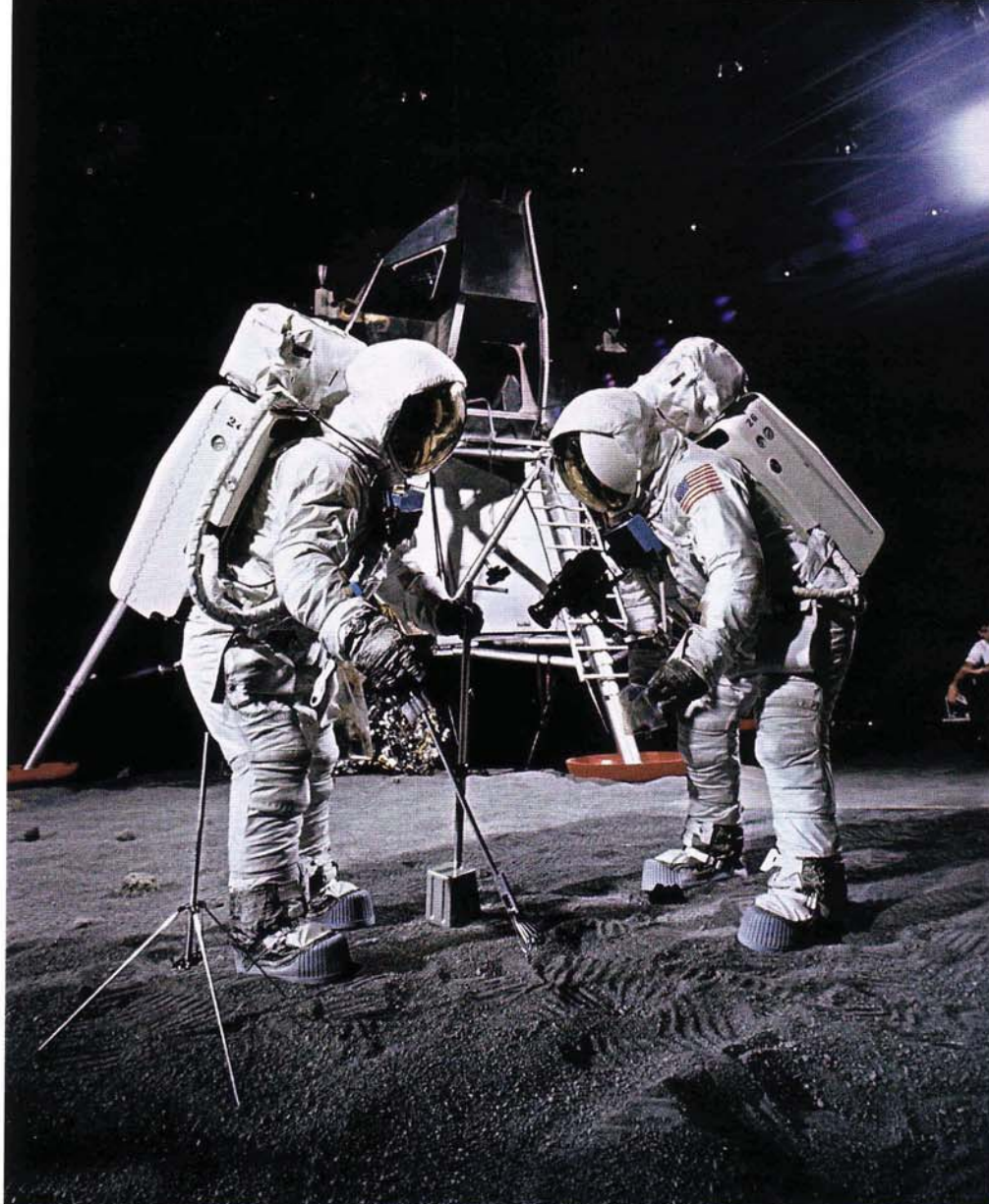
Das Unternehmen ist riskant, aber es glückt: Zu Weihnachten 1968 umkreisen Frank Borman, James Lovell und William Anders den Mond. Im Frühjahr 1969 starten Apollo 9 und 10 zu weiteren Testflügen. Die Systeme arbeiten nun einwandfrei. Im Juli 1969, fünf Monate vor der von Kennedy versprochenen Frist, ist die NASA schließlich bereit, die Reise zum Mond zu wagen.

Aber wer soll fliegen?

RUND ZWEI DUTZEND Männer sind für die Apollo-Mission ausgewählt worden – fast alle frühere Testpiloten, physisch und psychisch extrem belastbar, meist zwischen 30 und 40 Jahre alt; viele haben bereits an den Mercury- und Gemini-Programmen teilgenommen.

Zwischen ihnen tobt ein versteckter Konkurrenzkampf, bei dem jedoch keiner der Astronauten die Kriterien kennt, nach denen ihr Chef, der ehemalige Mercury-Pilot Donald Slayton, die Crews zum Teil Jahre im Voraus für die Apollo-Missionen einteilt. „Jede Crew ist austauschbar“, beteuert Slayton stets.

Nach dem triumphalen Flug von Apollo 8 weicht er allerdings von dieser Regel ab: Frank Borman, der Kommandant von Apollo 8, soll auch als erster Mensch den Mond betreten. Doch Borman, erfüllt von dem Stolz, ohnehin



In einer Halle proben Aldrin (oben links) und Armstrong in voller Montur die Bergung von Mondgestein. Jede Probe soll zunächst in unberührtem Zustand fotografiert werden



Wernher von Braun (hier im Marshall Space Flight Center in Alabama) konstruiert die 110 Meter hohe und 2880 Tonnen schwere »Saturn V«, die größte jemals gebaute Rakete

Freunde sind sie nicht, aber
ein professionelles Team, das
über Monate in fast intimer
Nähe zusammenarbeitet:
Armstrong (links) und Aldrin
bei Ausrüstungstests





schon als Erster um den Mond geflogen zu sein, lehnt ab.

Also bleibt es bei der hergebrachten Crew-Einteilung. Und weil der Flug von Apollo 8 weitaus reibungsloser verlief als erwartet, kann auf zusätzliche Tests verzichtet werden. Kurz entschlossen nominieren die NASA-Direktoren die Crew von Apollo 11 – eigentlich für einen weiteren Vorbereitungsflug eingeteilt – für die erste Mondlandung.

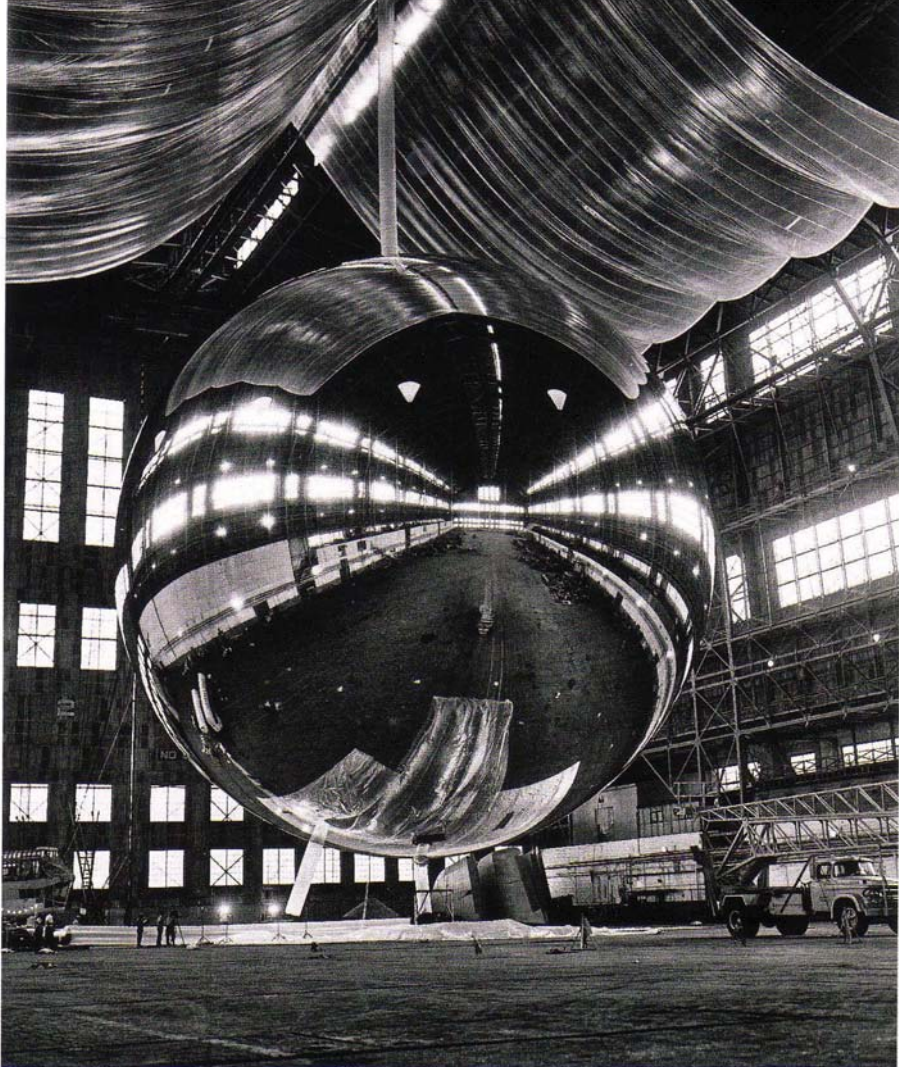
ES IST ALSO REINER ZUFALL, dass gerade Neil Armstrong, Edwin Aldrin und Michael Collins für den spektakulärsten Flug in der Geschichte der Menschheit ausgewählt werden.

Die drei Astronauten kennen sich vom Gemini-Projekt. Armstrong, blass und still, ist ein schüchterner Einzelgänger, verschlossen bis zur Schroffheit; selbst seine wenigen Freunde wissen nie genau, was ihn gerade umtreibt.

Edwin Aldrin, den alle „Buzz“ nennen, seit seine kleine Schwester im Babyalter das Wort „brother“ nur als „buzzer“ herausbrachte, ist lebhafter, aber ähnlich kompliziert wie Armstrong. Auch er war früher Kampfpilot, hat dann an der Elitehochschule MIT Raumfahrttechnik studiert und ist der erste Astronaut mit einem Doktorgrad. Seine Kameraden bewundern ihn für sein Wissen – aber halten ihn für geradezu brutal direkt und akademisch-arrogant, unfähig zur unverbindlichen Plauderei.

Aldrin verkündet bei der NASA jedem lautstark, dass bei den Gemini-Flügen stets der Kommandant die Kontrolle über das Raumschiff behalten habe, während sein Kopilot andere Aufgaben erfüllen musste, etwa einen Weltraumspaziergang unternehmen. Weshalb sollte man diese Regel bei Apollo 11 ändern? Also müsse der Kommandant, Armstrong, in der Kapsel am Steuer bleiben, während der Kopilot, also Aldrin, als Erster den Mond betreten werde.

Armstrong sagt nichts zu diesem Vorschlag, sondern überlässt die Entscheidung den NASA-Direktoren. Die beschließen im Frühjahr 1969, nur Wochen vor dem Start, dass der Kommandant und nicht sein Stellvertreter den Mond als Erster betreten soll. Armstrong und Aldrin reden danach



Schon Jahre vor der Mondmission transportieren amerikanische Raketen große Lasten in den Orbit: etwa Ballonsatelliten (o.), die sich in der Höhe aufblähen und Radiosignale reflektieren

nie wieder über dieses Thema, doch ihr Verhältnis kühlt deutlich ab.

Michael Collins, der dritte Mann im Team, der an Bord der Kommandokapsel um den Mond kreisen wird, während seine Kameraden den historischen Abstieg zum Erdtrabanten wagen, ist das Gegenteil der beiden: ein offener, fröhlicher Mensch. Und ein brillanter Flieger, der sich allerdings nicht besonders um die Technik kümmert. Stattdessen liebt er Wein und gute Bücher, züchtet Rosen und versucht sich als Maler.

Armstrong, Aldrin und Collins sind drei hervorragende Astronauten und dank ihres monatelangen Trainings ein eingespieltes Team.

Freunde aber sind sie nicht.

20. JULI 1969, 12.46 Uhr Houston-Zeit, an Bord von Apollo 11. Vor vier Tagen, vier Stunden und 14 Minuten ist das Team gestartet. Bis jetzt war es ein perfekter

Flug. Nun soll das Landemanöver beginnen. Armstrong und Aldrin haben sich mit ihren Raumanzügen in die Landefähre „Eagle“ gezwängt, Collins bleibt in der Kommandokapsel zurück.

„Passt auf euch auf!“, funkt er, als sich die beiden Module langsam voneinander trennen.

„See you later“, antwortet Armstrong – und steuert die „Eagle“ Richtung Mond.

Die Landung ist das komplizierteste Manöver des gesamten Fluges. Armstrong selbst hat vor dem Start alle Faktoren abgeschätzt – und ist auf eine Erfolgchance von 50:50 gekommen.

Auch bei der NASA sind insgeheim mehrere Szenarien des Scheiterns durchkalkuliert worden: Sollten die Astronauten beispielsweise auf dem Mond stranden – also landen, aber aus irgendwelchen Gründen nicht mehr starten können –, bliebe dem Kontrollzentrum in Houston nichts anderes übrig, als die Funkverbindung zu unterbrechen;



Ein letzter Gruß: Armstrong besteigt als Erster den Bus, der die Astronauten zur Abschussrampe bringt. Während des Aufstiegs wird die Crew über Schläuche mit Sauerstoff versorgt

Armstrong und Aldrin würden in völliger Einsamkeit langsam ersticken.

Doch in diesem Moment hat der Apollo-Kommandant keine Zeit, an so etwas zu denken. Seine Konzentration gilt einzig dem Ort, an dem sie landen sollen. „Site 2“ haben Wissenschaftler den rund 18,5 Kilometer langen und 4,8 Kilometer breiten Streifen im „Meer der Ruhe“ nahe dem Mond-Äquator genannt (siehe Karte Seite 69). Diese Region, ungefähr so lang wie Manhattan und etwas breiter, scheint weniger von Kratern vernarbt zu sein als der Großteil des Trabanten; auf dieser Ebene dürfte eine Landung noch die geringsten Gefahren mit sich bringen.

Armstrong hat alle Fotos, die unbemannte Sonden und die Apollo-8-Astronauten zuvor von dem Areal aufgenommen haben, ausgiebig studiert. Er kennt „Site 2“ so gut wie auswendig.

14.48 Uhr. „Eagle“ taucht nach 48 Minuten wieder aus dem Mondschatten

auf – jenem Abschnitt der Umlaufbahn, in dem ein Kontakt zur Erde unmöglich ist. Doch auch jetzt bleibt die Funkverbindung nach Houston schlecht. Immer wieder wird der Datenstrom, der den Männern im Kontrollzentrum alle Messwerte von Apollo 11 auf die Bildschirme transportiert, unterbrochen.

15.05 Uhr, genau 15 240 Meter über der Mondoberfläche. Die Bremsrakete der „Eagle“ zündet. Der *powered descent* beginnt, die Landung auf dem bremsenden Raketenstrahl des Triebwerks.

Die Landefähre nähert sich dabei auf einer spiralförmigen Bahn dem geplanten Aufsetzpunkt: Sie verringert kontinuierlich die Geschwindigkeit, mit der sie den Mond umrundet, und sinkt so herab. Armstrong und Aldrin blicken sich kurz an. Ihre Gesichter unter den Raumhelmen sind dunkel von ihren Vier-Tage-Bärten, ihre Kehlen trocken vom reinen Sauerstoff, der durch das Atemsystem der Raumanzüge strömt.

Armstrong späht aus einem der kleinen, dreieckigen Fenster. Und stutzt: Alle markanten Landschaftsmerkmale der Mondoberfläche – die Krater, Felsen, Berge –, über die sie jetzt mit einer Geschwindigkeit von immer noch mehr als 5000 km/h hinwegrasen, erscheinen aus einem unbekannten Grund zwei Sekunden früher als vorausberechnet. Das bedeutet bei ihrem bogenförmigen Abstieg, dass sie rund 3,6 Kilometer vor dem anvisierten Zielgebiet landen werden.

14020 Meter Höhe. Armstrong dreht die „Eagle“ so, dass das Landeradar die Mondoberfläche erfassen kann. Das Triebwerk feuert jetzt mit verminderter Leistung.

12192 Meter. Das Landeradar nimmt die Arbeit auf. Die Steuerraketen, die die „Eagle“ auf Kurs halten sollen, zünden viel häufiger als jemals im Simulator.

Der Flug ist unruhiger als erwartet. Die vom Radar übermittelten Daten zur Höhe des Raumschiffs über dem Mond stimmen nicht mit den Berechnungen des Bordcomputers überein.

Armstrong und Aldrin beschließen, dem Computer vorzugeben, dass er die Daten des Radars akzeptieren muss. Sie wollen Houston informieren. Plötzlich heult eine Alarmsirene.

„Program alarm!“, funkt Armstrong sofort nach Houston. Aldrin sieht eine Anzeige auf dem Display: „1202“. Das hat er niemals im Simulator erlebt. Was bedeutet 1202? Er glaubt, dass der Computer möglicherweise überlastet ist, doch jetzt ist nicht die Zeit, Handbücher zu wälzen.

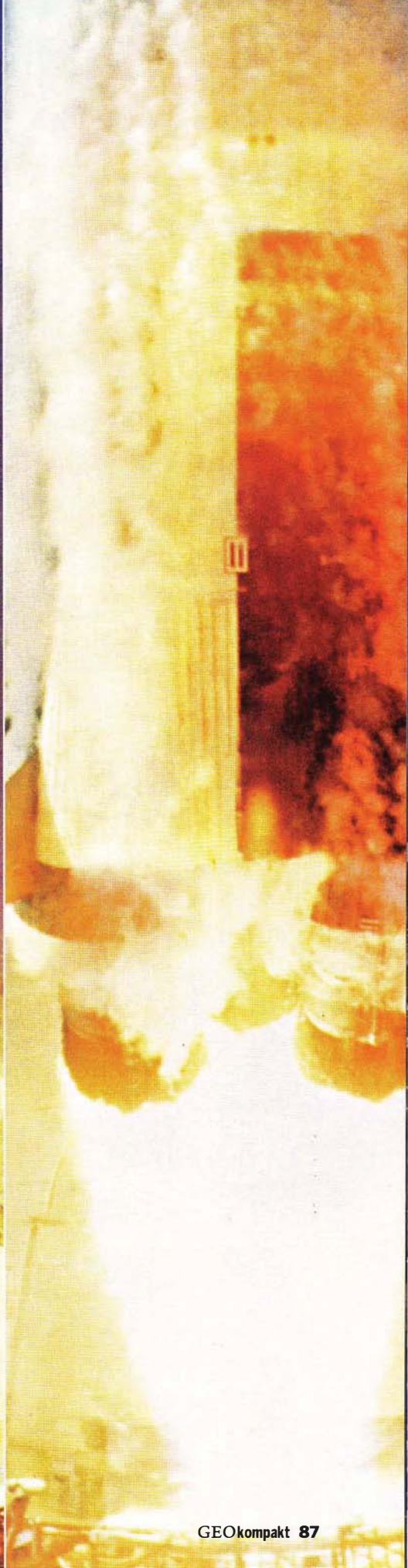
In Houston wird es hektisch. Computerspezialisten überprüfen den Alarm.

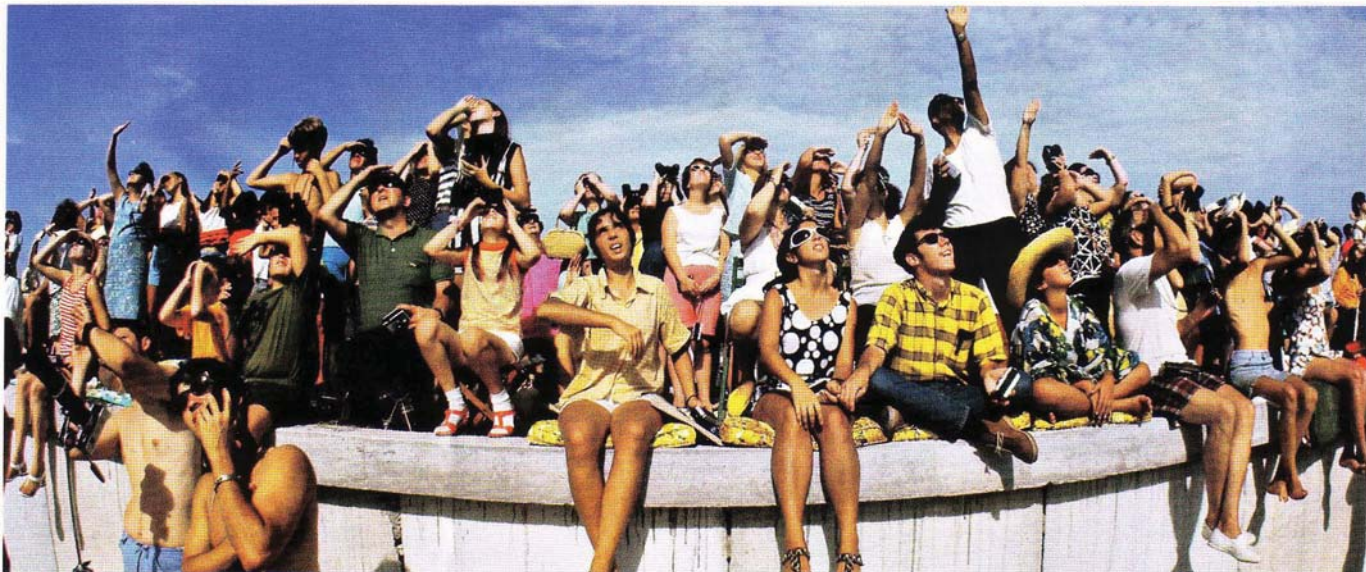
„We are Go on that alarm“, funkt ein Controller Richtung Mond. Die Experten haben beschlossen, dass man die

Der Flug ist
unruhiger,
als zuvor
im Simulator
erprobt

16. Juli, 8.32 Uhr: Die »Saturn V« hebt ab. Unterhalb des torpedoförmigen Nottriebwerks trägt die Rakete das Kommandomodul »Columbia«, in dem die drei Astronauten festgeschnallt sind. Darunter befindet sich die noch verstaute Landefähre »Eagle«, in die Armstrong und Aldrin schließlich umsteigen







Der Start von Apollo 11 ist die Manifestation des amerikanischen Ideals, die Grenzen immer weiter zu verschieben. Den Aufbruch der drei Männer zum Mond verfolgen Tausende Zuschauer nahe der Abschussrampe in Florida – und Abermillionen am Fernsehschirm

Warnmeldung ignorieren kann, solange sie nur sporadisch erscheint.

7620 Meter. Die Bremsrakete drosselt, genau wie geplant, ihre Leistung automatisch auf nur noch halben Schub. Armstrong und Aldrin fühlen sich plötzlich leichter, obwohl sie stehend festgeschnallt sind.

2286 Meter. Die Fähre, die bis jetzt schräg abwärts stürzte, wird vom Computer in die aufrechte Landeposition gesteuert, damit kurz vor dem Aufsetzen Bremsstrahl und die Beine des Landegestells zur Mondoberfläche weisen.

1524 Meter. Mit einer Geschwindigkeit von rund 31 Metern pro Sekunde, knapp 112 km/h, stürzen Armstrong und Aldrin auf den Erdtrabanten zu.

Der Kommandant übernimmt vom Computer kurz die Kontrolle der Brems- und Steuerraketen, um zu testen, ob der Flug manuell ähnlich gut steuerbar ist wie vom Rechner. Armstrong ist mit dem Flugverhalten zufrieden und schaltet die Computerkontrolle wieder ein.

914 Meter. Sinkgeschwindigkeit etwa 21 Meter pro Sekunde. „You are Go for landing“, sagt ein Controller.

„Program alert! 1201“, funkt Aldrin plötzlich. Ein neuer Alarmcode des Computers.

„Go!“, antwortet ein Controller.

Armstrong blickt auf das Landegebiet, das noch fast zwei Kilometer entfernt ist. „Es sieht nicht schlecht aus“, meldet er. Immer wieder heulen Alarmsirenen, ausgelöst vom überlasteten Computer.

305 Meter. Der Alarm verklingt. Jetzt erkennt Armstrong Details des Landegebietes: einen Krater von der Größe eines Fußballfeldes, darum zahllose Felsen, manche so groß wie Autos.

Das ist für eine Landung viel zu gefährlich.

107 Meter. Armstrong greift ein und übernimmt vom Computer die Steuerung. Er hält die Fähre jetzt einigermaßen auf Höhe und sucht im Horizontalflug dicht über der Mondoberfläche nach einer besseren Landezone. Jetzt kann er sich nicht mehr auf technische Geräte verlassen, sondern allein auf seine Augen.

Aldrin starrt unterdessen die Computer- und Radaranzeigen an und liest pausenlos die Messwerte ab. Er hat nicht eine Sekunde Zeit, um aus dem Fenster zu blicken, und weiß deshalb nicht, weshalb der Flug nicht mehr so verläuft wie eigentlich geplant.

Auch in Houston haben die Controller gemerkt, dass Armstrong die Steuerung übernommen hat. Doch niemand

ahnt den Grund dafür. „Ich glaube, wir sollten jetzt besser still sein“, sagt der Funker dem Leiter der Flugkontrolle.

Armstrong steuert nach links, um großen Felsen auszuweichen.

91 Meter. „Was ist mit dem Treibstoff?“, fragt er.

„Acht Prozent“, antwortet Aldrin. Das ist weniger, als sie jemals zuvor in einer



Per Handschlag gratuliert der Deutsche Kurt Debus, Leiter des »Kennedy Space Centers«, seinem Team zum Start der Mission

Simulation noch übrig hatten. Sollte der Treibstoff ausgehen, müssten sie die Landung abbrechen und mit dem oberen Teil der „Eagle“, der mit eigenem Triebwerk und Tank ausgestattet ist, zurück in den Mondorbit fliegen.

„Okay“, sagt Armstrong, „sieht aus wie ein gutes Areal da vorn.“ Er steuert die Fähre weiter.

67 Meter. Doch auch die von ihm angepeilte Region ist voller Hügel. „Ich muss direkt über einen Krater hinweg“, meldet Armstrong. Dann sieht er eine ebene Fläche von etwa 60 Meter Kantlänge, zwischen Kratern und Felsen.

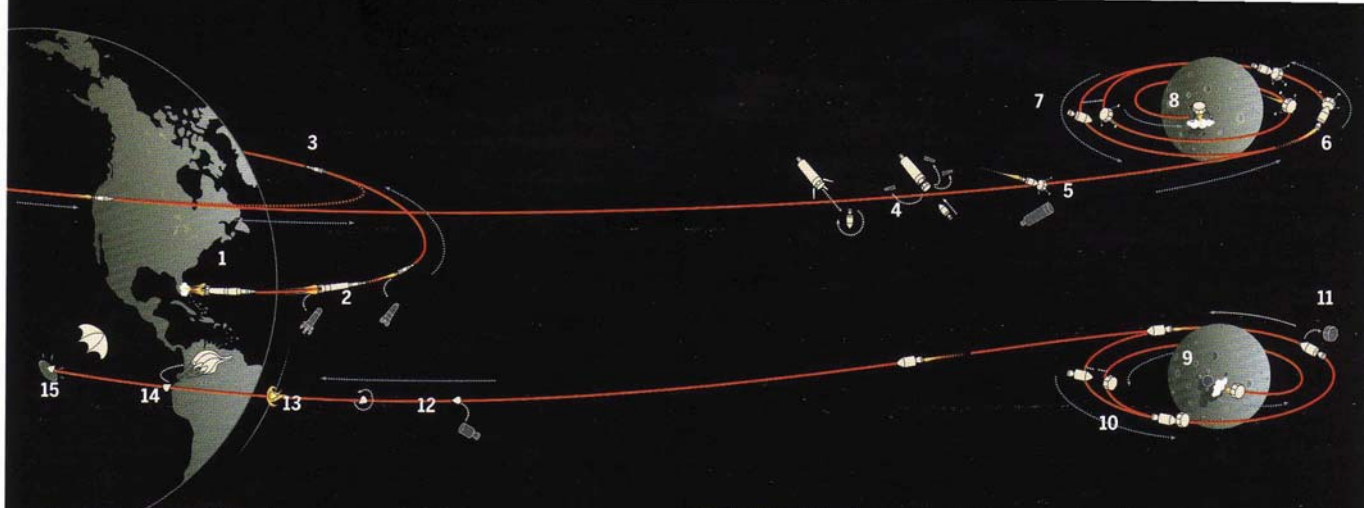
Der Treibstoff
schwindet.
Es bleiben
nur noch
70 Sekunden

Tag drei der Apollo-Mission.
Aldrin überprüft bei einem Routine-
check die Landefähre. Kleine
Raketentriebwerke werden das nur
sechs Meter mal vier Meter große
und 15 Tonnen schwere Gefährt beim
Abstieg zum Mond abbrem sen



20. Juli, das Kommandomodul
110 Kilometer oberhalb der Mondober-
fläche: Armstrong und Aldrin sind
bereits in die Landefähre umgestiegen
und fotografieren das Mutterschiff. Jetzt
kann der Landeanflug beginnen





Der Weg zum Mond. (1) Raketentart. (2) Die ersten beiden Stufen werden nacheinander abgesprengt. (3) Bei einer Erdumkreisung überprüft die Crew alle Systeme und steuert dann Richtung Mond. (4) Das Raumschiff, in dem die drei Astronauten sitzen, wird von der dritten Raketenstufe abgetrennt, schwenkt herum, während Teile der Umhüllung abgeworfen werden. Dann schwebt es zurück, koppelt an die Mondlandefähre und zieht sie aus der dritten Stufe heraus. (5) Das Raumschiff mit der Landefähre fliegt per Raketentriebwerk zum Mond. (6) Beide treten in eine Umlaufbahn um den Trabanten ein. (7) Armstrong und Aldrin steigen in die Mondfähre und trennen sie vom Mutterschiff. Collins bleibt zurück und umrundet den Mond. (8) Die Fähre sinkt unterdessen auf einer spiralförmigen Bahn immer tiefer, Bremsraketen zünden – der „Adler“ landet.

Die Rückkehr. (9) Der Start: Dazu hebt nur der obere Teil der Landefähre ab – angetrieben von eigenen Miniraketen; das Landegestell bleibt zurück. (10) In der Mondumlaufbahn dockt die Fähre erneut an die Kommandokapsel an. Armstrong und Aldrin steigen um. (11) Die Fähre wird wieder abgestoßen und zerschellt später an einem unbekannten Ort auf dem Erdtrabanten, die Kommandokapsel fliegt in Richtung Erde. (12) Vor dem Eintritt in die Erdatmosphäre koppelt die Crew den unteren Teil des Raumschiffs ab, den Maschinenteil. Nur das Kommandomodul mit den drei Astronauten fliegt weiter. (13) Die Kapsel dreht ihr stumpfes Ende in Flugrichtung, übersteht dank eines Wärmeschildes die Reibungshitze in der Atmosphäre. (14) Fallschirme öffnen sich in rund 6000 Meter Höhe. (15) Die Kapsel landet im Pazifik.

Sein neues Ziel.

„Descent QTY“ leuchtet auf dem Instrumentenpaneel auf: Der Treibstoff schwindet. Den Astronauten bleiben für das Landemanöver nur noch 70 Sekunden.

31 Meter. Armstrong weiß, dass die „Eagle“ genau senkrecht aufkommen muss, denn schon bei leichten horizontalen Bewegungen könnten die Landestützen brechen. Er will sich an großen Felsen orientieren, um zu sehen, ob die Fähre nun senkrecht absinkt. Doch inzwischen wirbelt das Raketentriebwerk so viel Staub von der nahen Mondoberfläche auf, dass es vor dem Fenster im Sonnenlicht flimmert.

18 Meter. Ein Controller meldet sich: „Noch 60 Sekunden Treibstoff.“

Neun Meter. Die „Eagle“ treibt jetzt horizontal rückwärts. Armstrong weiß nicht, weshalb das Raumschiff taumelt, aber er steuert gegen.

Sechs Meter. Die Landefähre driftet nun seitwärts. Die Sicht ist fast null, denn inzwischen quellen draußen große Staubwolken hoch. „30 Sekunden“, meldet Houston.

Da ruft Aldrin plötzlich: „Contact light.“

Eine Lampe auf dem Instrumentenpaneel zeigt an, dass sie die Mondoberfläche erreicht haben. Eigentlich hätten sie aus Sicherheitsgründen das Triebwerk dicht über dem Boden abschalten müssen. Doch nun ist die Landung so sanft verlaufen, dass ihnen erst die Instrumente verraten, dass sie angekommen sind.

Armstrong betätigt den „Engine stop“-Schalter.

„Shutdown“, lautet sein erstes Wort vom Mond.

Die beiden Astronauten gehen rasch eine Checkliste durch, dann meldet sich Armstrong: „Houston, this is Tranquility Base. The eagle has landed.“

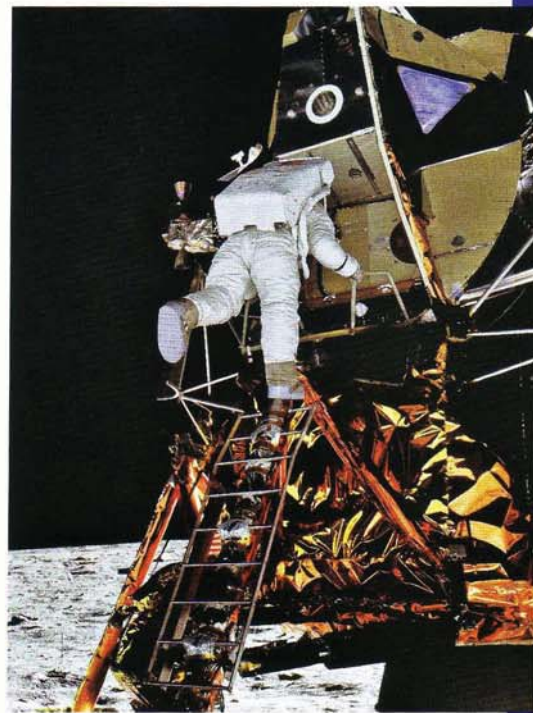
„Roger, Tranquility, wir verstehen euch“, antwortet ein Controller. „Euretwegen sind hier eine ganze Menge Leute blau angelaufen. Jetzt atmen wir wieder. Danke schön.“

Der Treibstoff hätte noch für rund 20 Sekunden gereicht, sonst hätten sie die Landung abbrechen müssen.

UM 21.39 UHR HOUSTON-ZEIT beginnt Armstrong am 20. Juli 1969 langsam und vorsichtig über eine schmale

Leiter ins Freie zu steigen. Der Raumanzug, den er sich zuvor in einer stundenlangen Prozedur für diesen ersten Gang ins Unbekannte angelegt hat, schützt ihn wie ein eigenes kleines Raumschiff.

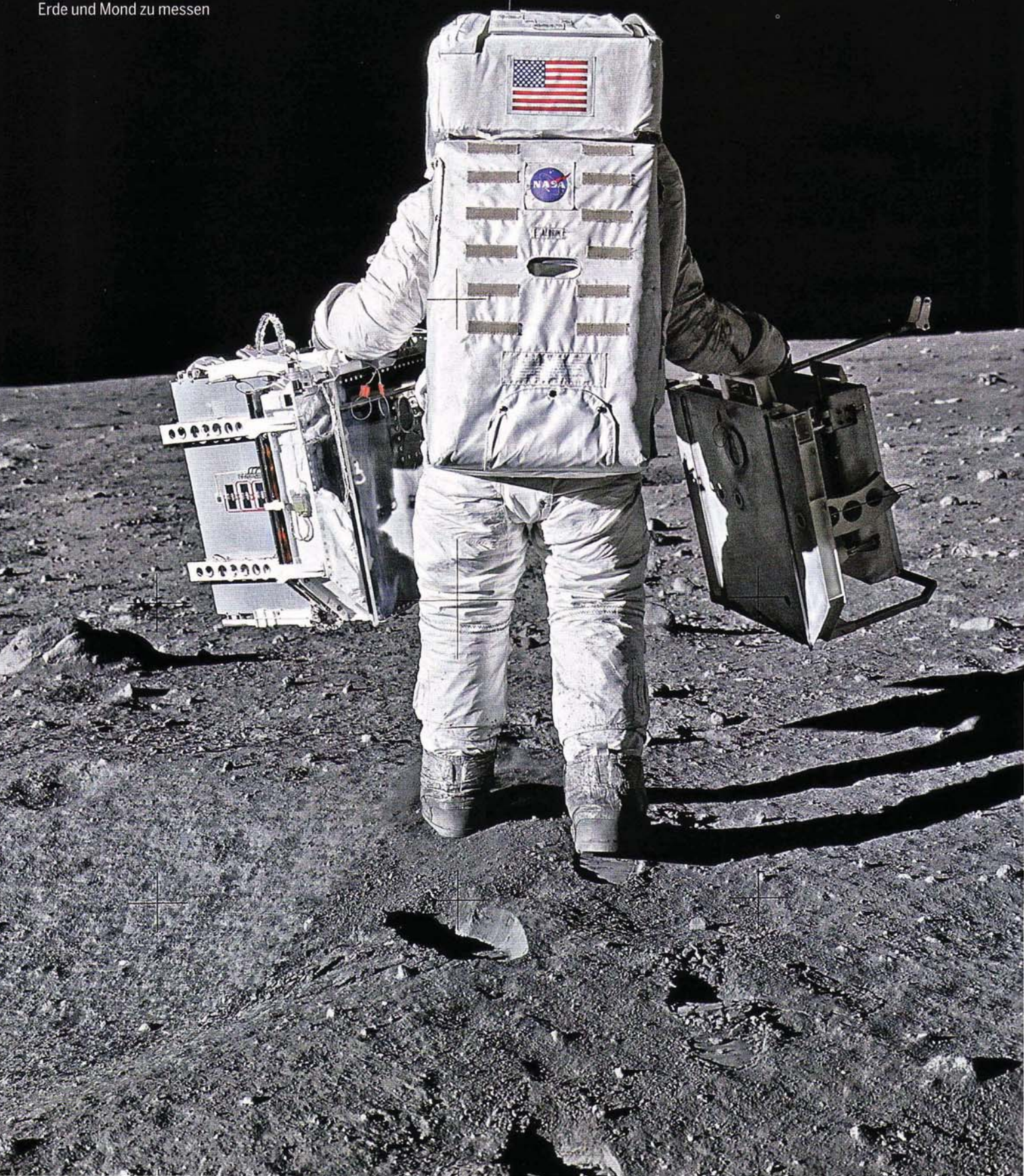
Mehrere mit Teflon beschichtete Stofflagen halten den Sauerstoff im Inneren, eine Unterwäschegarnitur mit



Nach Armstrong verlässt Aldrin die Fähre, deren Stützen bei der sanften Landung nicht wie geplant eingefahren sind. Den letzten Meter muss er per Sprung überwinden

Der **High-tech-Anzug** schützt sie wie ein kleines Raumschiff

Um mögliche Erschütterungen auf dem Mond zu messen, stellt Aldrin einen Seismometer (im Bild links) auf. Mit dem Reflektor (rechts) wird es möglich sein, per Laser die Entfernung zwischen Erde und Mond zu messen



netzartig verknüpften, von Wasser durchspülten Plastikschläuchen kühlt den Körper, ein Goldvisier schützt die Augen vor dem grellen Sonnenlicht, und der Rucksack enthält genügend Sauerstoff für mehrere Stunden.

Auf der Erde hat diese Montur mehr als 137 Kilogramm gewogen. Hier aber, im schwachen Gravitationsfeld des Mondes, konnte Armstrong sie vorhin beim Anziehen in der Fähre mit einem Arm anheben.

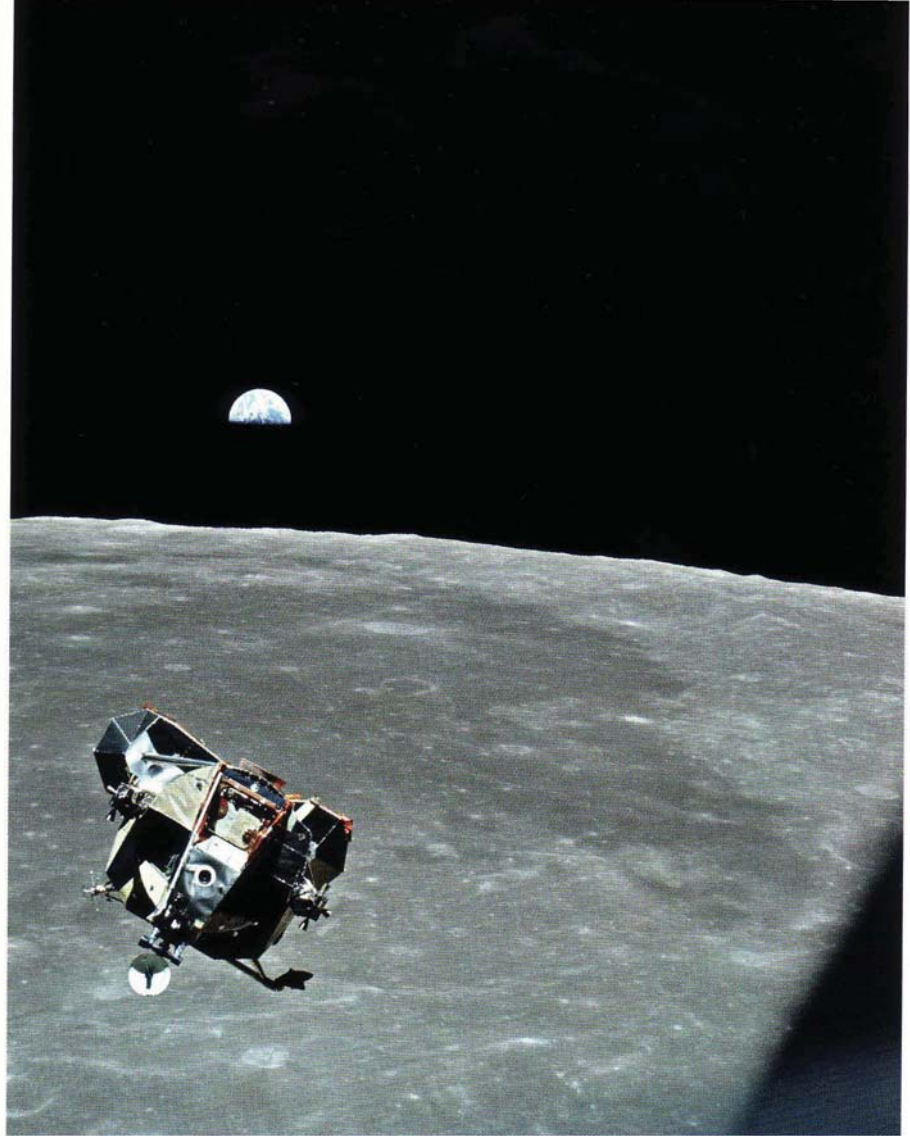
Trotzdem ist der letzte, entscheidende Schritt auf der Leiter gefährlich. Denn da die „Eagle“ viel sanfter als vorausgerechnet aufgekommen ist, sind die teleskopartigen Landebeine nicht wie geplant leicht zusammengedrückt worden, sondern stehen aufrecht da: Die Leiter endet rund einen Meter über der Mondoberfläche – und Armstrong kann die Beschaffenheit des Untergrunds schwer einschätzen. Nach einigem Zögern wagt er den Sprung.

Es ist 21.56 Uhr in Houston, als der erste Mensch den Mond betritt.

„That’s one small step for a man, one giant leap for mankind“, will Armstrong zur Erde melden. Lange hat er über einen Satz nachgesonnen, der dem Ereignis angemessen ist. Bis ihm, dem verschlossenen Piloten und Techniker, eine der poetischsten Formulierungen eingefallen ist, mit denen je eine Entdeckung vom Entdecker selbst gewürdigt wurde: „Das ist ein kleiner Schritt für einen Menschen, ein großer Sprung für die Menschheit.“

Armstrongs einziger, lässlicher Fehler besteht darin, dass er in der Aufregung den unbestimmten Artikel „a“ vergisst.

Um 22.15 Uhr folgt Edwin Aldrin. Mühsam pflanzen die beiden die amerikanische Flagge in den Boden, machen Film- und Fotoaufnahmen, sammeln



Nach zwei Stunden und 31 Minuten Aufenthalt auf dem Mond steigen Armstrong und Aldrin zurück in die Fähre und starten in eine Umlaufbahn, um an die Kommandokapsel (aus der Collins sie fotografiert) anzudocken. Das Landegestell bleibt auf dem Trabanten

rund 22 Kilogramm Gestein und Staub ein. Nach insgesamt zwei Stunden und 31 Minuten steigen sie zurück in die Fähre.

Kennedys Vision ist wahr geworden.

21 Stunden und 36 Minuten nach der Landung kehren Armstrong und Aldrin mit dem Oberteil der Landefähre, das über ein eigenes Raketentriebwerk und eigene Tanks verfügt, auf einer spiralförmigen Bahn in den Orbit zurück.

Dort dockt das Aufstiegsmodul an das Raumschiff an, das die ganze Zeit über den Mond umkreist hat. Aldrin und Armstrong steigen zu Michael Collins ins Cockpit um. Das Modul wird abgesprengt, und die Rückreise zur Erde beginnt.

Auf dem Mond bleiben Messinstrumente, das Landegestell und die Fahne zurück, zudem kiloweise überschüssiger Ballast an Rucksäcken, Überschü-

hen und leeren Behältern – sowie, im Staub, ein paar Hundert Schuhabdrücke, die wahrscheinlich Jahrtausende erhalten bleiben werden.

UND WAS BLEIBT auf der Erde von Apollo 11? Als Armstrong, Aldrin und Collins am 24. Juli 1969 mit der winzigen Landekapsel mitten im Pazifik niedergehen, sind sie globale Helden.

Sie haben während ihres Fluges mehrmals live zur Erde gesendet, ihre ersten Schritte auf dem Mond wurden von einer automatischen Außenkamera am Raumschiff übertragen und in Echtzeit zu den Fernsehapparaten der Erde gesendet. Rund eine halbe Milliarde Menschen haben die Pioniertat auf flirrenden Schwarzweißbildern verfolgt.

In der US-Geschichte aber wird der Triumph der Astronauten schnell von

21 Stunden,
36 Minuten
– dann ist der
Mondbesuch
beendet



Bergung im Pazifik. Taucher des Flugzeugträgers »USS Hornet« haben einen schwimmenden Ring an der Kapsel befestigt, die – von Fallschirmen gebremst – im Meer aufgeschlagen ist

anderen Ereignissen überschattet: vom Watergate-Skandal, dem Vietnam-Desaster, vom Ölpreisschock.

Auch wissenschaftlich bleibt die Bilanz der Apollo-11-Mission umstritten: Die paar Kilogramm Mondgestein hätten von unbemannten Sonden viel billiger zur Erde gebracht werden können.

Und der technische Fortschritt, etwa bei der Entwicklung der Saturn V, ist zwar gewaltig. Nur: Wozu sonst, außer für den Mondflug, soll das turmhohe Raumschiff eingesetzt werden?

So ist die Mondlandung am Ende vor allem die teuerste und, aus Sicht des Westens, wohl erfolgreichste nichtmilitärische Schlacht im Kalten Krieg: die späte Rache für den Sputnik-Schock.

Im Verlauf der folgenden zweieinhalb Jahre landen noch fünf weitere

Raumschiffe auf dem Erdtrabanten – insgesamt betreten zwölf Astronauten den Mond.

Doch im Dezember 1972 stellt die NASA das Apollo-Programm aus Geldmangel ein.

SEITHER HAT KEIN MENSCH mehr den Orbit seines Heimatplaneten verlassen, geschweige einen anderen Himmelskörper betreten. Keines der heutigen Raumfahrzeuge wäre in der Lage, einen Menschen wieder bis zum Erdtrabanten zu bringen. Die Errichtung einer bemannten Mondstation oder gar die Landung auf dem Mars, die 1969 als logischer nächster Schritt schon greifbar nahe erschien, bleiben Utopie.

Erst um 2020, knapp 50 Jahre nach Abschluss des Apollo-Programms, will

die NASA erneut Astronauten Richtung Mond schicken – als Vorbereitung für den ersten bemannten Flug zum Mars (siehe Seite 102).

Und Neil Armstrong, Buzz Aldrin und Michael Collins?

„Neil, wir haben das Ganze verpasst“, flüsterte Aldrin seinem Kommandanten zu, als die drei Astronauten in der Quarantäne die Euphorie zu spüren bekamen, die ihre Reise ausgelöst hat (bereits auf dem Schiff, das sie im Meer in der Nähe des Landepunktes an Bord nahm, begann die 17 Tage andauernde Isolation von der Außenwelt – sie sollte verhindern, das mögliche Mond-Mikroben die Erde kontaminieren).

Für die drei Männer war stets der Weg die eigentliche Herausforderung, das Ziel Mond hingegen nebensächlich.

Wenig später trennten sich ihre Wege: Collins verfasste mehrere autobiografische Werke und verbringt seine Zeit heute hauptsächlich beim Angeln auf seinem Alterssitz.

Aldrin stürzte bald in schwere Depressionen und war zeitweise alkoholkrank. Später stieg er zu einem erfolgreichen Manager der Weltraumbranche auf – und ist der Einzige des Trios, der noch regelmäßig vor größerem Publikum erscheint.

Armstrong, der eine Karriere als Universitätsdozent begann, lebt zurückgezogen in Ohio und äußert sich nur selten öffentlich.


Einige spätere Apollo-Astronauten sind bereits gestorben. Und schon in ein, zwei Jahrzehnten wird es niemanden mehr geben, der mit eigenen Augen die Erde über dem Mond hat aufgehen sehen – es sei denn, der NASA gelingt es, trotz vieler Widerstände wegen des hohen finanziellen Aufwands, ihre Pläne für das Jahr 2020 umzusetzen.

Die Motive für einen Aufbruch zum Mond werden dann andere sein – aber auch sie werden geprägt sein von der Faszination und Strahlkraft eines Aufbruchs ins Ungewisse.

So wie der Flug von Apollo 11. □

Cay Rademacher, 45, ist der Geschäftsführende Redakteur von GEO EPOCHE.

Literaturtippt: Michael Light, „Full Moon – Aufbruch zum Mond“, Frederking und Thaler.

An aerial photograph capturing a massive parade in New York City. The street is completely covered with a thick layer of white and yellow confetti. A large crowd of people, many in blue uniforms, lines the sidewalks and fills the street. Several cars are visible, including a white car in the foreground and a dark car further back. Large American flags are being carried by participants. The scene is festive and celebratory.

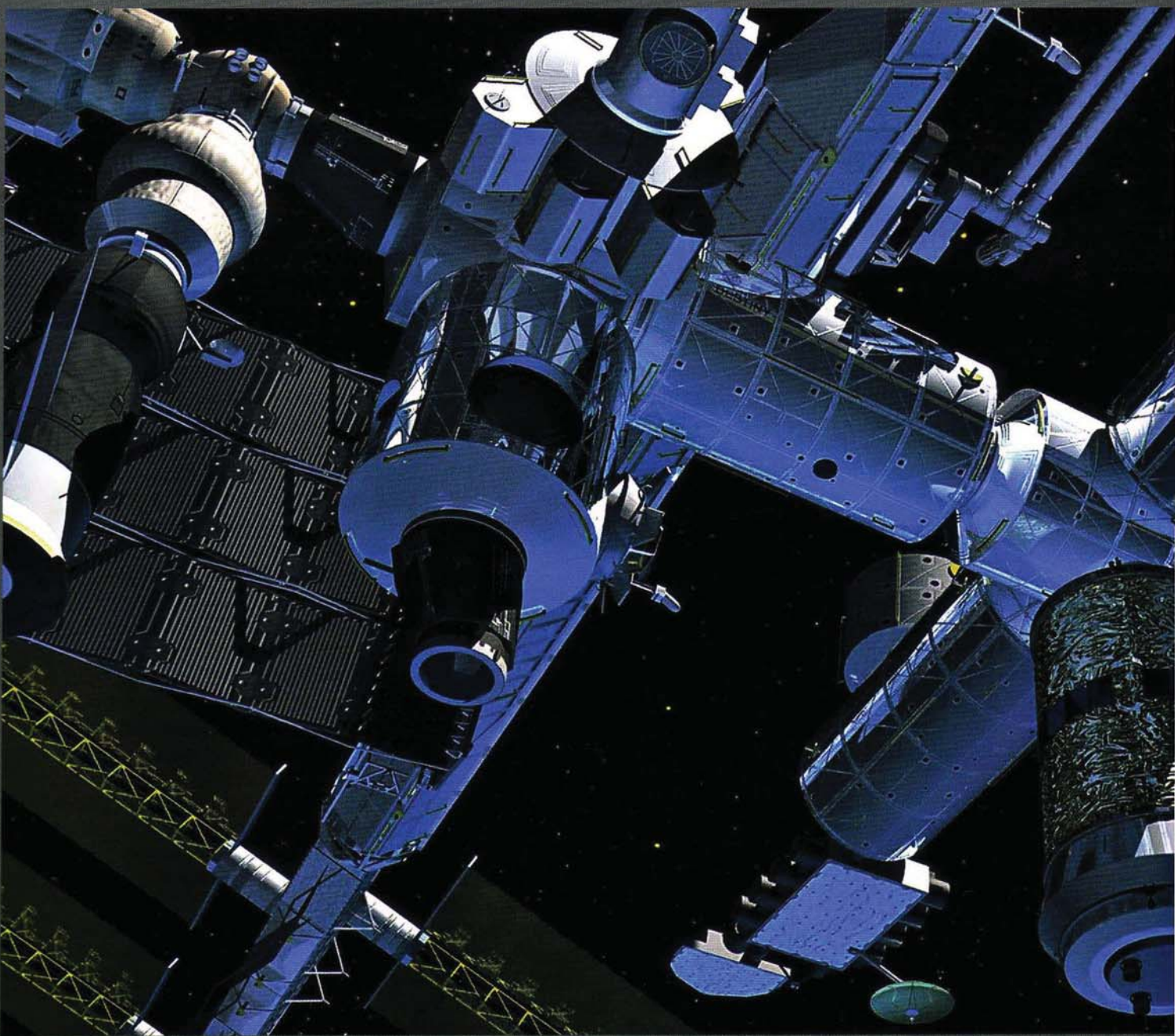
Nach 17 Tagen Quarantäne, die sie auf der »USS Hornet« verbringen, lassen sich Armstrong, Aldrin und Collins (im vorderen Wagen) auf Paraden überall in den USA feiern, wie hier am 13. August 1969 in New York City

Zum Mond, zum Mars, zu neuen Welten

Im Jahr 2020 sollen erstmals wieder Menschen den Mond betreten. Eine neue Serie von Raumfahrzeugen wird die Astronauten auf den Erdtrabanten befördern. Die NASA plant, dort eine dauerhafte Station zu errichten, die als Vorbild für die Besiedlung eines anderen Planeten dienen soll: des Mars



Das Raumschiff »Orion« soll die Spaceshuttles ablösen, die voraussichtlich 2010 ausgemustert werden. Das wiederverwendbare Crew-Modul wiegt 25 Tonnen





Orion ähnelt den Apollo-Kapseln aus den 1960er Jahren. Die Kegelform bietet immer noch den bestmöglichen Schutz beim Wiedereintritt in die Erdatmosphäre



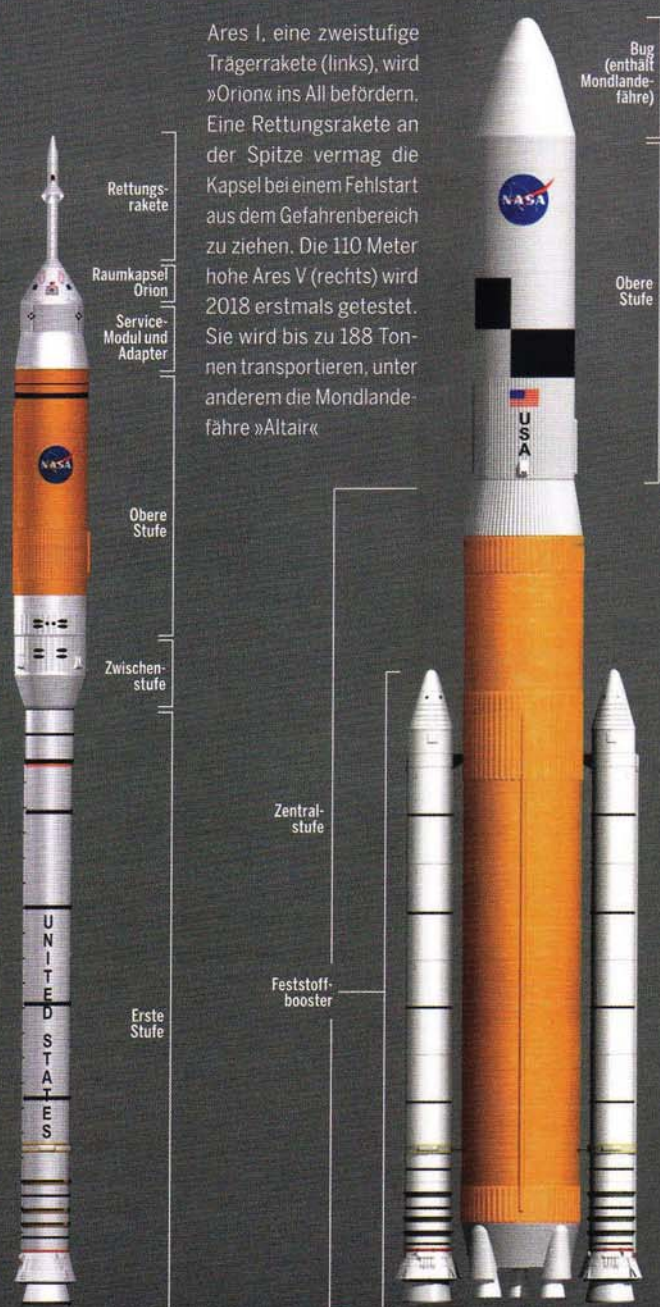
Sechs Astronauten haben in der fünf Meter breiten und drei Meter hohen Kapsel Platz. In Versorgungstanks wird unter anderem Sauerstoff gelagert



Angetrieben und versorgt wird Orion von einem zylinderförmigen Service-Modul. Dessen faltbare Solarzellen wandeln Sonnenlicht in elektrischen Strom um



Die Internationale Raumstation ISS hat eine Spannweite von mehr als 100 Metern und ist das größte von Menschen geschaffene Objekt in der Erdumlaufbahn. Seit neun Jahren dient sie als Forschungslaboratorium. 2014 sollen Astronauten erstmals mit dem neuen NASA-Raumschiff »Orion« (im Bild rechts), an der Station andocken

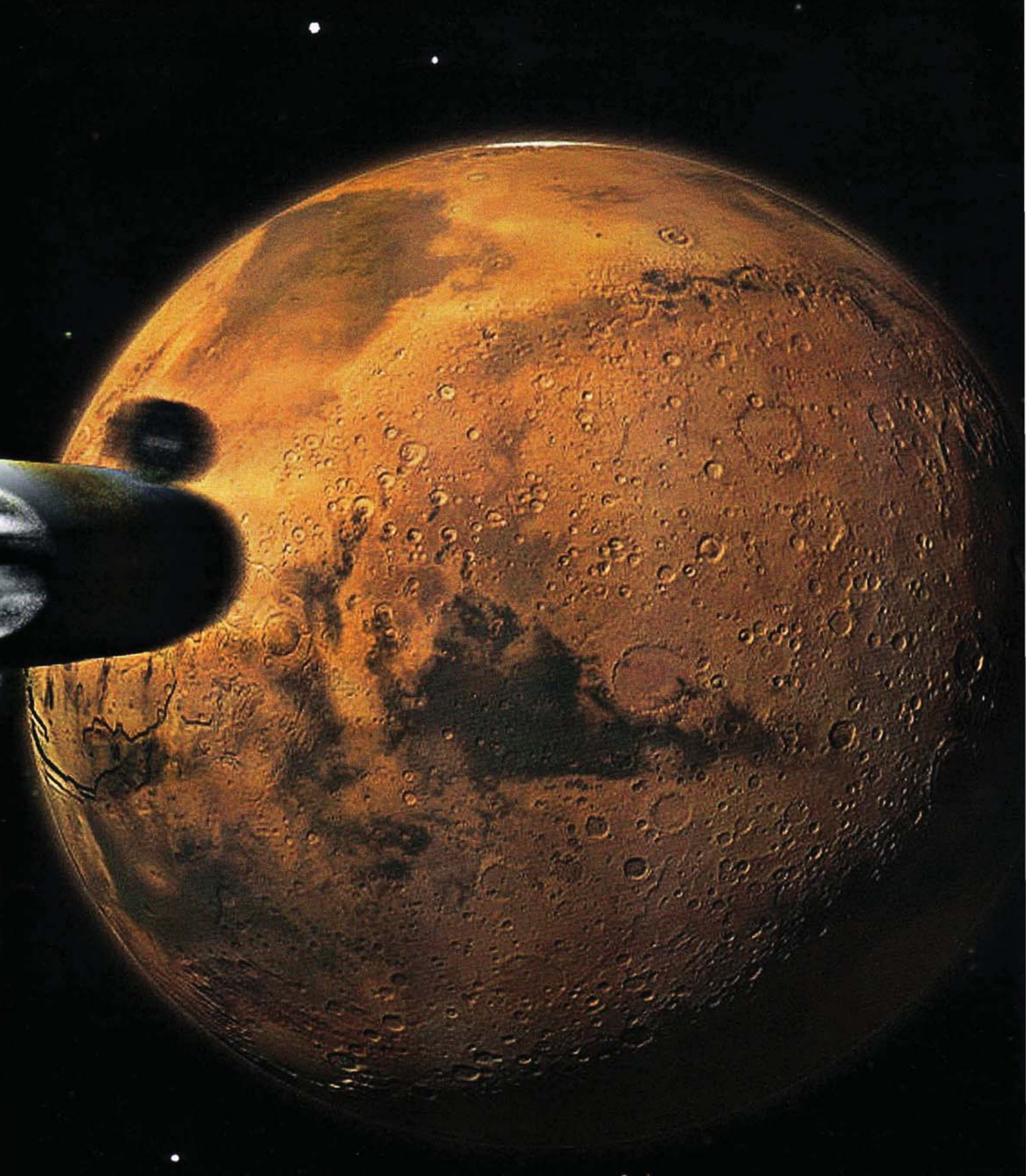


Ares I, eine zweistufige Tragerrakete (links), wird »Orion« ins All befördern. Eine Rettungsrakete an der Spitze vermag die Kapsel bei einem Fehlstart aus dem Gefahrenbereich zu ziehen. Die 110 Meter hohe Ares V (rechts) wird 2018 erstmals getestet. Sie wird bis zu 188 Tonnen transportieren, unter anderem die Mondlande-fähre »Altair«

Mars-Expedition

Die längste Reise aller Zeiten

Sechs Monate wird allein die Hinfahrt dauern, Hunderte Millionen Kilometer weit entfernt liegt das Ziel: In wenigen Jahrzehnten wollen Forscher zum Mars reisen. Sie sollen dort 500 Tage lang die zerklüftete Landschaft erkunden, Bodenproben analysieren und nach Spuren von Leben suchen. Und vielleicht wird diese Mission der Anfang eines noch größeren Vorhabens: der Errichtung einer extraterrestrischen Kolonie



Bevor sich die Astronauten auf den Weg zum Roten Planeten machen, wird ein unbemanntes Raumschiff zum Mars fliegen. Ein Landemodul soll dort ein Kraftwerk errichten, das Treibstoff für den Rückflug herstellt



Mithilfe hochauflösender Stereo-Aufnahmen haben Wissenschaftler die Oberfläche des 800 Meter breiten »Victoria Kraters« rekonstruiert. Die Daten helfen, Gesteinsformationen zu vermessen und so für Mars-Vehikel sichere Wege durch das schroffe Gelände zu finden

d

Text: Hubert Filser

rei Kilogramm hat Oliver Knickel abgenommen, als sich nach 105 Tagen die schwere Eisentür des Containermoduls am Institut für biomedizinische Probleme in Moskau öffnet.

So lange waren der Hamburger Bundeswehrhauptmann und fünf weitere Testpersonen in der 180 Quadratmeter großen, fensterlosen Containeranlage eingeschlossen. Kontakt zur Außenwelt hatten sie nur über Funk und E-Mail – und mit einer 40-minütigen Zeitverzögerung zwischen Frage und Antwort. Denn das Experiment sollte die Bedingungen eines Fluges zum Mars möglichst realistisch nachahmen (ausgenommen die Schwerelosigkeit).

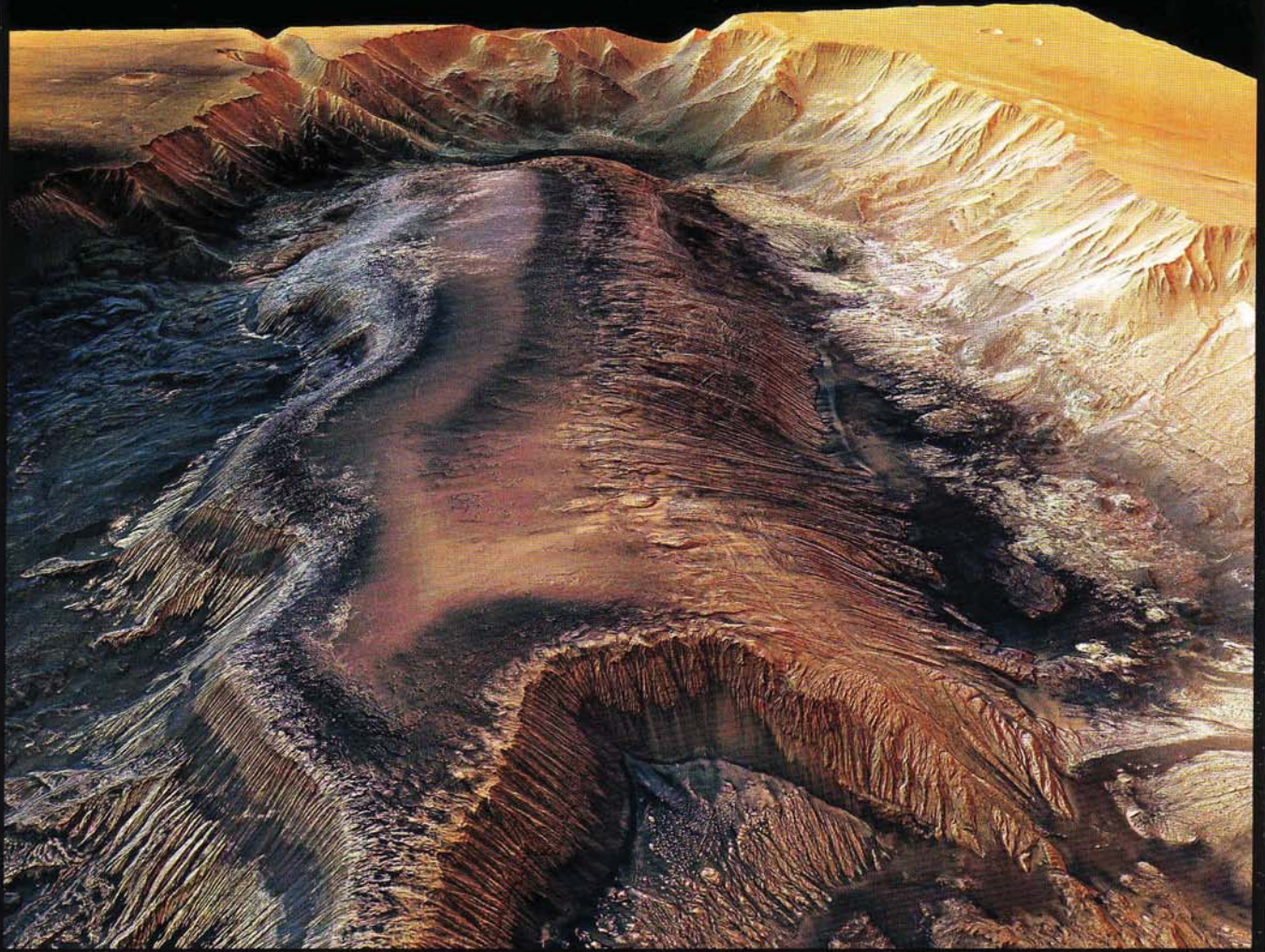
Das Ziel: herauszufinden, wie Menschen mit dem Stress einer monatelangen Isolation fertig werden, die bei einem Flug zum Mars auftreten würde. Der Aufenthalt in dem Raumschiffmodell sollte erweisen, wie sich eine solche

Situation etwa auf Psyche, Immunsystem oder Schlaf auswirkt.

Unter 5600 Bewerbern war der 28-jährige Oliver Knickel von der Europäischen Weltraumorganisation ESA ausgewählt worden – nach ähnlichen Kriterien wie diejenigen Kandidaten, die irgendwann, vermutlich erst nach 2030, in einer Raumkapsel Richtung Mars gleiten könnten.

Die Landung auf dem Roten Planeten wäre nicht nur die mit Abstand weiteste Reise, die der *Homo sapiens* je unternommen hat, sondern auch das gewagteste Abenteuer und die größte technische Herausforderung. Eine solche Mission würde vermutlich eine halbe Million Menschen beschäftigen und bis zu 500 Milliarden Dollar verschlingen.

DER MARS HAT DIE MENSCHEN spätestens in seinen Bann gezogen, seit 1877 der italienische Astronom Gio-



Nirgendwo im Sonnensystem gibt es höhere Berge und tiefere Schluchten als auf dem Mars. Das »Hebes Chasma« etwa (hier eine dreidimensionale Rekonstruktion), ein isoliert liegender Grabenbruch, erstreckt sich über 320 Kilometer und ist bis zu 6000 Meter tief

vanni Schiaparelli auf dessen Oberfläche linienähnliche Strukturen zu entdecken glaubte. Diese „Kanäle“ seien das Bewässerungssystem intelligenter Bewohner, hieß es bald. Der Rote Planet wurde zum Inbegriff der Heimat von Außerirdischen.

Zwar haben sich sowohl die Kanäle als auch deren vermeintliche Erbauer als Illusion erwiesen; Spuren mikrobiellen Lebens aber hoffen Forscher nach wie vor dort zu entdecken.

Und es gibt einen zweiten Grund, weshalb der Mars als Expeditionsziel so reizvoll ist: Er ist – nach der Venus – der Planet, der sich der Erde am meisten nähert. Und im Gegensatz zur Venus mit ihren höllischen Oberflächentemperaturen, kann ein Astronaut auf dem Mars mit einem realistischen technischen Aufwand durchaus überleben.

Während die Erde ihre Bahn in rund 150 Millionen Kilometer Abstand um

die Sonne zieht und dazu ein Jahr braucht, bewegt sich der Mars in durchschnittlich 228 Millionen Kilometer Entfernung und benötigt für eine Runde 687 Tage. Gut alle zwei Jahre überholt unser Heimatplanet den Mars also und nähert sich ihm auf weniger als 100 Millionen Kilometer (sonst beträgt die Distanz bis zu 400 Millionen Kilometer). Nur dann ist der Planet von der Erde aus erreichbar.

Dennoch ist die Entfernung zum Mars im besten Fall 150-mal größer

Der Mars hat kein
Magnetfeld, daher
hilft kein Kompass bei
der **Navigation**

als die zum Mond. Und so ist es kaum möglich, genügend Treibstoff für den Hinflug, für Landung, Start vom Mars und Rückflug mitzunehmen.

Aus diesem Grund müsste bei einer realen Marsmission bereits zwei Jahre vor Ankunft der ersten Menschen ein unbemanntes Raumschiff dort landen, an Bord eine Rückkehrkapsel sowie ein Kraftwerk, das vollautomatisch Treibstoff produzieren könnte. Die Mars-Pioniere würden erst losfliegen, wenn die Kontrollanzeigen im Kraftwerk an die Erde melden: Die Methan- und Sauerstofftanks sind randvoll.

Dafür freilich gibt es gute Voraussetzungen, denn ausgerechnet in dieser lebensfeindlichen Umwelt findet sich ein Rohstoff, der sich in die Raketentreibstoffe Methan und Sauerstoff (der auch als lebenswichtiges Atemgas für die Astronauten benötigt wird) umwandeln lässt: Kohlendioxid.

Mehr als 95 Prozent der Mars-Atmosphäre bestehen aus diesem Gas. Den Rest bilden Stickstoff und Argon sowie geringe Anteile von Sauerstoff, Kohlenmonoxid und Wasserdampf. Zusätzlich schwebt in der Luft reichlich Staub. Mit nur 0,6 Prozent des Drucks, der auf der Erde in Meereshöhe herrscht, ist die Atmosphäre sehr dünn. Der Druck auf der Marsoberfläche ist so hoch wie in 35 Kilometern über der Erde.

Zum Atmen ist diese Luft nicht geeignet. Doch mithilfe eines technischen Prozesses lassen sich aus Wasserstoff und Kohlendioxid Methan und Wasser herstellen und dann in einem zweiten Schritt Sauerstoff. Die elektrische Energie für diesen Prozess kann auf dem Mars ein kleiner Kernreaktor liefern.

Das Kraftwerk, etwa so groß wie ein Einfamilienhaus, muss lediglich reinen Wasserstoff von der Erde mitbringen:

Aus einer Tonne Wasserstoff und dem Kohlendioxid der Atmosphäre kann es dann vier Tonnen Methan und acht Tonnen Sauerstoff produzieren. Schon wenige Tonnen Wasserstoff liefern so ausreichend Treibstoff, um das Rückkehrmodul von der Marsoberfläche in die Umlaufbahn zu befördern. Dort koppelt es an das Basisraumschiff, und der Rückflug zur Erde kann beginnen.

SIND DIESE VORAUSSETZUNGEN erfüllt, können die Astronauten aufbrechen und nach gut sechs Monaten in eine Umlaufbahn um den Planeten einschwenken. Im Mars-Orbit koppelt der Pilot die Landefähre mit allen Astronauten vom Basisraumschiff ab, das als Funkstation in der Mars-Umlaufbahn bleibt – bereit für die Rückkehr zur Erde. Dann werden die Bremsraketen der Landeeinheit gezündet.

Die Landezone könnte zwischen dem Äquator und 20 bis 30 Grad nördlicher Breite liegen – im Norden gibt es weniger gefährliche Krater als auf der südlichen Hemisphäre, und die Stelle sollte nicht zu weit entfernt vom Äquator liegen, weil die Sonneneinstrahlung ausreichen muss, um die Solarmodule für die Energieversorgung der Station zu betreiben.

Das ist vor allem wichtig, wenn die Astronauten nicht nur 30 Tage, sondern 17 Monate bleiben (dazwischen ist eine Rückkehr ausgeschlossen, weil Mars und Erde dann zu weit voneinander entfernt sind).

Per Handsteuerung versucht der Pilot, die Landefähre bis auf wenige Meter ans Kraftwerk heranzuflogen – denn dort lagern lebensnotwendige Sauerstoffvorräte. Und im Notfall ist es wichtig, schnell und sicher das Rückkehrmodul



1 Szenario einer Mars-Mission: Gut zwei Jahre, bevor Forscher zum Roten Planeten fliegen, landet dort ein unbemanntes Frachtschiff



2 Automatisch baut sich ein Kraftwerk auf: Aus Wasserstoff und Kohlendioxid produziert es die Treibstoffe Methan und Sauerstoff



5 Eine Raumkapsel (o. l.) soll die Forscher nach ihrer Mission zu jenem Transporter bringen, den sie 17 Monate zuvor verlassen haben



6 Der auf dem Mars produzierte Kraftstoff bringt den nötigen Schub auf, um die Astronauten aus dem Schwerefeld des Mars zu befördern

auf dem Kraftwerk zu erreichen, um sofort wieder starten zu können.

Doch was geschieht, wenn einer der auf dem Mars besonders heftigen Staubstürme die Landung an der vorgesehenen Stelle verhindert? Da der Planet ähnlich wie die Erde eine geneigte Rotationsachse besitzt, sind die Jahreszeiten dort deutlich ausgeprägt. An warmen Sommertagen können die Temperaturen schon mal über den Gefrierpunkt steigen, nachts kühlt es oft weit unter minus 50 Grad Celsius ab. Diese Schwankungen sorgen für Druckunterschiede in der Atmosphäre und können gewaltige Stürme verursachen.

Und was macht der Pilot, wenn beim Anflug unterhalb der Landefähre plötzlich große Felsen auftauchen oder die Kollegen steiles Gelände melden? Dann bleibt nur, die Kapsel etwas entfernt vom Kraftwerk auf dem Marsboden

Der größte Vulkan des Sonnensystems erhebt sich 27 Kilometer über den Marsboden

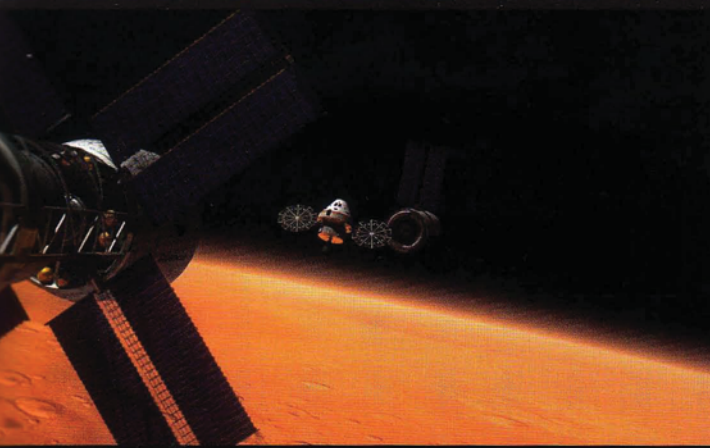
aufzusetzen. In diesem Fall haben die Astronauten ein ernsthaftes Problem: Sie müssen größere Distanzen überwinden, um das Kraftwerk und die Rückkehrkapsel zu erreichen.

Je nachdem, wie das Gelände beschaffen ist, kann das eine gefährliche Mission werden. Für die Fahrt nutzen die Astronauten einen großen Rover. Neben dem Lenkrad leuchtet ein Display mit dreidimensionalen digitalen

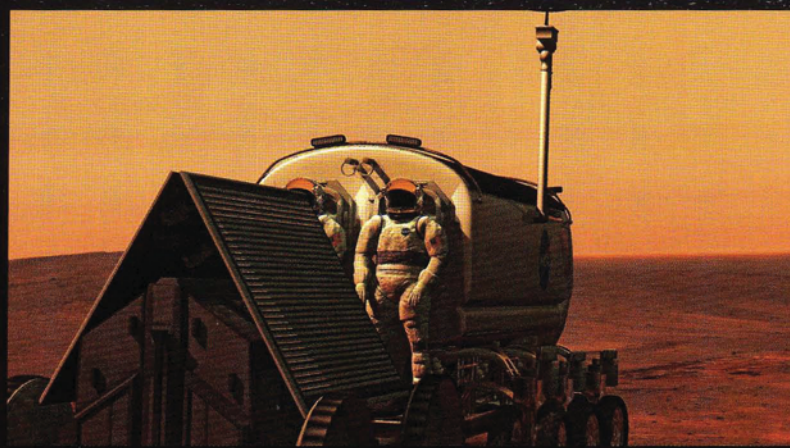
Karten (die Daten stammen von Sonden wie dem „Mars Express“).

Da der Planet kein Magnetfeld hat, kann kein Kompass sie leiten. Orientierung bieten nur die hochpräzisen Marszeituhren der Astronauten – ein Tag dauert hier 24,6 Stunden, ein Umlauf um die Sonne 687 Erddage. Und so müssen die Raumfahrer ihren Weg nach Landmarken und anhand des Sonnenstands suchen.

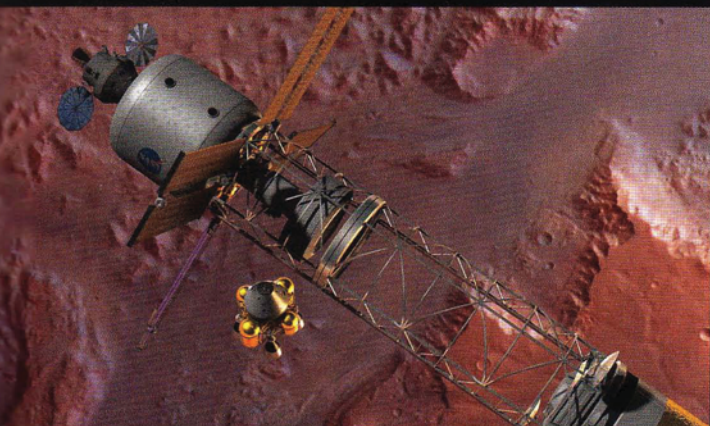
GEOLOGISCH BIETET der Mars beeindruckende Extremlandschaften. Seine Vulkane sind die größten des Sonnensystems – der Olympus Mons ragt 27 Kilometer hoch. Bis zu acht Kilometer tiefe Schluchten und Gräben durchfurchen die Oberfläche. Das Gestein ist drei bis vier Milliarden Jahre alt. Die nördliche Hemisphäre liegt im Schnitt fünf Kilometer tiefer als die südliche



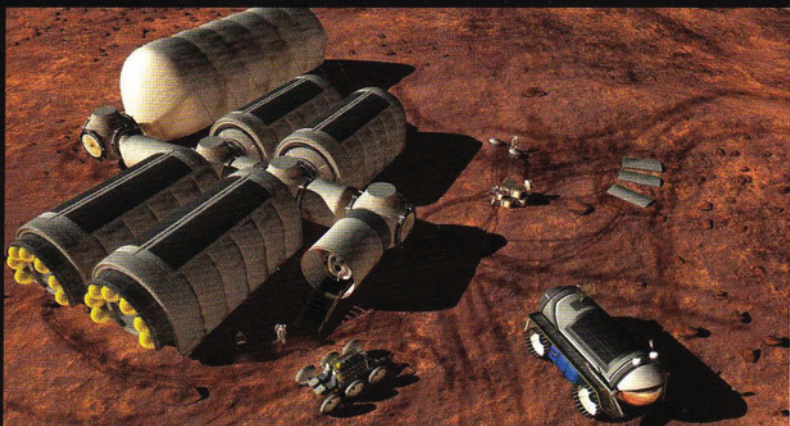
3 Zwei Jahre später: Forscher erreichen den Mars mit einem Frachter. Dieser entlässt ein Landemodul, mit dem die Crew herabfliegt



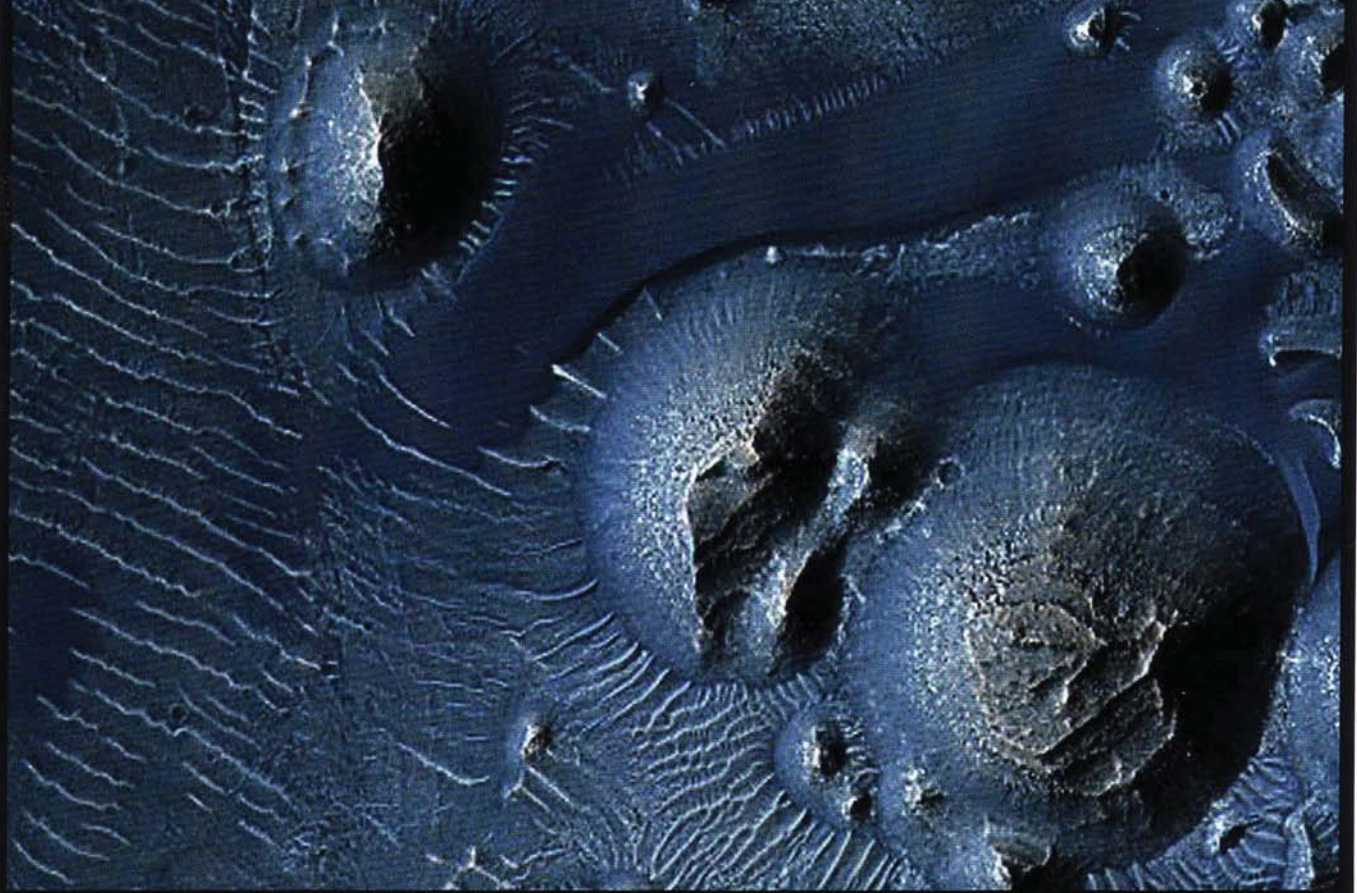
4 Mit Rovern erkunden Astronauten den Roten Planeten, sammeln Gesteinsproben und suchen nach Spuren von Mikroorganismen



7 Die Raumkapsel dockt an. 23 Monate sind die Astronauten schon unterwegs. Der Rückflug zur Erde wird noch einmal 180 Tage dauern



8 Der ersten Mars-Mission sollen weitere folgen. Der Plan: einen Außenposten zu errichten, auf dem Menschen dauerhaft leben können



Manche geologischen Formationen auf dem Mars ähneln denen irdischer Trockenregionen: Dieser Einschlagkrater im Gebiet der »Western Arabia Terra« wird ausgefüllt von Hügeln und parallel verlaufenden Dünen, die an die Sandmeere der Sahara und der Namib erinnern

und ist relativ frei von Kratern. Womöglich schlug dort recht spät in der Planetengeschichte ein gewaltiger Meteorit ein und formte so die Oberfläche neu.

Auf den nördlichen Ebenen gibt es zudem Dutzende Hügel, die an irdische Schlammvulkane erinnern. Auf der Erde stoßen derartige Vulkane, etwa in Aserbaidschan, Methan aus. Es ist jedoch unwahrscheinlich, dass Besucher den Raketentreibstoff direkt aus den Marshügeln fördern können, denn bislang sind keine aktiven Vulkane auf dem Mars entdeckt worden.

Interessant für die Pioniere wären die Polarregionen – wegen ihrer Wasservorkommen. Die Pole des Mars sind von hell glänzenden Eisschilden aus Wasser und Kohlendioxid bedeckt (einst flossen vermutlich gewaltige Ströme über den Roten Planeten, darauf deuten die riesigen Flussdeltas hin, die die Sonde »Mars Global Surveyor« im etwa 65 Kilometer großen Eberswalde-Krater auf der Südhalbkugel entdeckt hat).

Es gibt Hinweise darauf, dass in den Polregionen einige Zentimeter unter der Oberfläche Wassereis existiert, ähn-

lich wie in der irdischen Tundra. Doch wegen der heftigen Stürme und Temperaturen von bis zu minus 140 Grad sind diese Gebiete für die Astronauten zu gefährlich.

Fotos der Robotersonde »Phoenix«, die hier im Mai 2008 gelandet ist, zeigen weite Flächen, über die riesige Staubtornados ziehen; am rosafarbenen Himmel treiben Zirruswolken in bis zu fünf Kilometer Höhe sowie dicke Schäfchenwolken, die denen auf der Erde gleichen.

AUCH WENN DER MARS-ROVER eine Reichweite von einigen Hundert Kilometern hat: Jeder Ausflug hinaus auf die staubigen, steinigen Ebenen ist ein Risiko. Denn im Gegensatz zur Station, die einen gewissen Schutz bietet, sind die Astronauten dort draußen einer enormen Strahlenbelastung ausgesetzt, gegen die auch die unbequemen Druckanzüge kaum helfen.

Da dem Mars ein Magnetfeld fehlt (nur wenige Bereiche im südlichen Hochland sind schwach magnetisiert), bombardieren ständig hochenergeti-

sche Protonen und Helium-Kerne von der Sonne die Marsbesucher. Hinzu kommen die energiereichen Eisen-Ionen aus Supernova-Explosionen ferner Sonnen.

Mit nahezu Lichtgeschwindigkeit prasseln sie auf die Oberfläche, zerschließen alles, zerstören das Erbmolekül DNS in den Zellen. Welche Spätfolgen das etwa in den Gehirnen der Astronauten auslösen würde, ist bislang nicht erforscht.

Die Hoffnung, dass spätere Raumfahrer es leichter haben könnten, gibt es nicht: Ein Magnetfeld wird der Mars in absehbarer Zeit nicht entwickeln. Der Kern aus Eisen und Schwefel ist zwar vermutlich flüssig, aber es gibt dort keinen Dynamo-Effekt wie im Erdinneren – und zudem keine Plattenbewegungen. Denn die Kruste ist einige zehn Kilometer dicker als die der Erde.

DASS DER MARS lebensfeindlich ist, wissen die irdischen Besucher. Auch dass die Strahlung Krebs auslösen kann. Immerhin lassen sich die hochenergetischen Teilchen in der Station gut abschirmen – etwa durch zwei bis

drei Meter dicke Wassertanks. Auch das flüssige Methan könnten die Marsbewohner in die Wände ihrer Behausung pumpen: Wasserstoffkerne streuen die Teilchen perfekt und schützen die Menschen so.

Oder die Pioniere graben sich ein, denn der Marsboden schirmt die Strahlung ebenfalls ab. Doch trotz aller Schutzmaßnahmen droht ihnen durch die Strahlung unter anderem Haut- und Dickdarmkrebs.

Deshalb werden vermutlich eher ältere Astronauten an der Mission teilnehmen: Bei ihnen besteht – wegen der kürzeren noch zu erwartenden Lebenszeit nach einer Marsreise – ein geringeres Risiko, dass sie aufgrund der kosmischen Strahlung an Krebs erkranken.

Bei ihrer täglichen Arbeit können die Pioniere mit Unterstützung aus der Heimat rechnen – etwa bei Wettervorhersagen: Sonden im Marsorbit schicken meteorologische Daten zur Erde, dort wird das Marswetter errechnet, werden alle Informationen zurückgefunkt.

Irdische Kontrollzentren melden auch, wenn Staubstürme aufziehen. Denn das feine Material ist hochgefährlich für die Astronauten, es kriecht in jede Ritze, in die Raumanzüge, Filter und Energieeinrichtungen und klebt überall.

NEBEN STRAHLUNG UND STAUB kommen auf die Crew im Lauf der Zeit weitere Belastungen zu. Wegen der geringeren Schwerkraft auf dem Mars (ein Mensch hat dort nur knapp 40 Prozent seines irdischen Gewichts) kommt es zu Muskel- und Knochenabbau.

Die Erde ist schon während des Raumflugs praktisch aus dem Sichtfeld verschwunden, mit Angehörigen können die Astronauten nicht mehr direkt reden, da zwischen Frage und Antwort fast eine Dreiviertelstunde vergeht. Das

Gefühl der Einsamkeit wird daher von Tag zu Tag größer.

Die Crew ist deshalb auch nach psychologischen Kriterien auszuwählen. Alle Mitglieder müssen gute Problemlöser sein, sowohl individuell wie in der Gruppe. Ein Mediziner, der auch operieren kann, ist dabei, zwei erfahrene Piloten, ein Geologe und wohl ein Astrobiologe. Insgesamt würden vier bis sechs Astronauten auf die Reise gehen.

Zudem würde bei der ersten Landung von Menschen vermutlich fast zeitgleich ein weiteres Kraftwerk mit Rückkehrkapsel zum Mars geschickt. Denn jedes dieser Module erhöht die Sicherheit und vergrößert den Lebensraum der Besucher.

Für die weitere Besiedlung gibt es zwei Konzepte: Sie kann entweder von einer zentralen Station oder von vielen Landepunkten aus erfolgen. Eine zentrale Station verspricht mehr Sicherheit, verteilte Einheiten gestatten es, mehr Regionen zu erforschen.

Die Astronauten sollen möglichst viele Bodenproben sammeln, auch solche aus größerer Tiefe, die sie mit Bohrern fördern und im Labor analysieren.

Zwar müssen die Crew-Mitglieder unter extrem schwierigen Bedingungen arbeiten, aber sie lassen sich bislang nicht durch Roboter ersetzen. Ein Geologe oder Mineraloge kann Gesteinsproben sammeln und dabei leicht wertlose von interessanten unterscheiden. Menschen können zudem besser auf Unvorhergesehenes reagieren und finden kreative Lösungen – Fähigkeiten, die einem Automaten nicht beizubringen sind.

Und vermutlich vermögen nur Menschen jene Kernfrage zu klären, die auf Erden vor allem interessiert: Gibt oder gab es Leben auf dem Mars?

HÖHER ENTWICKELTE PFLANZEN ODER TIERE sind dort extrem unwahrscheinlich, doch könnten auf dem Mars Mikroben existieren. Um die zu finden, müssten die Astronauten den Boden geochemisch untersuchen nach Spuren bestimmter Minerale: Stoffwechselprodukten der Mikroorganismen. Manche Bakterien produzieren zum Beispiel Magnetit-Kristalle (eine Verbindung aus Eisen und Sauerstoff).

GEOkompakt

Gruner+Jahr AG & Co KG, Druck- und Verlagshaus, Am Baumwall 11, 20459 Hamburg, Postanschrift der Redaktion: Brieffach 24, 20444 Hamburg, Telefon 040/37 03 0, Telefax 040/37 03 56 47, Telex 2195 20, Internet: www.GEOkompakt.de

HERAUSGEBER

Peter-Matthias Gade

CHEFREDAKTEUR

Michael Schaper

HEFTKONZEPT

Dr. Henning Engeln

TEXTREDAKTION

Jörn Auf dem Kampe, Rainer Harf

ART DIRECTOR

Torsten Laaker

BILDREDAKTION

Lars Lindemann, Sabine Wuensch

Freie Mitarbeiter: Christian Gogolin, Katrin Kaldenberg, Katrin Trautner

VERIFIKATION

Susanne Gilges, Johannes Kückens, Bettina Süsselmich

Freie Mitarbeiter: Dr. Eva Danulat, Stefan Sedlmair

TEXT-MITARBEIT

Cay Rademacher

Freie Mitarbeit: Dr. Ralf Berhorst, Jürgen Bischoff, Ute Eberle, Hubert Filser, Ute Kehse, Dirk Liesemer, Martin Paetsch, Jonathan Stock, Joachim Telgenbüscher, Bertram Weiß, Sebastian Witte

ILLUSTRATION

Freie Mitarbeit: Jochen Stuhrmann, Tim Wehrmann

CHEFS VOM DIENST

Dirk Krömer

Rainer Droste (Technik)

SCHLUSSREDAKTION

Ralf Schulte

GESCHÄFTSFÜHRENDE REDAKTEURE

Martin Meister, Claus Peter Simon

REDAKTIONSSISTENZ: Ursula Arens, Sabine Stünkel

HONORARE: Angelika Györfy

BILDADMINISTRATION UND -TECHNIK: Stefan Bruhn

Verantwortlich für den redaktionellen Inhalt:

Michael Schaper

VERLAGSLEITUNG: Dr. Gerd Brüne, Thomas Lindner

ANZEIGENLEITUNG: Lars Niemann

VERTRIEBSLEITUNG: Ulrike Klemmer, Deutscher Pressevertrieb

MARKETING: Antje Schlöder (Ltg.), Patricia Korrell

HERSTELLUNG: Oliver Fehling

ANZEIGENABTEILUNG: Anzeigenverkauf: Sabine Plath, Tel. 040/37 03 38 89, Fax: 040/37 03 56 04; Anzeigendisposition: Anja Mordhorst, Tel. 040/37 03 23 38, Fax: 040/37 03 58 87

Es gilt die Anzeigenpreisliste Nr. 5/2009

Der Export der Zeitschrift GEOkompakt und deren Vertrieb im Ausland sind nur mit Genehmigung des Verlages statthaft. GEOkompakt darf nur mit Genehmigung des Verlages in Leserkreisen geführt werden.

Bankverbindung: Deutsche Bank AG Hamburg,

Konto 032800, BLZ 200 700 00

Heft-Preis: 8,50 Euro (mit DVD: 15,90 Euro)

ISBN 978-3-570-19887-2; (978-3-570-19949-7)

© 2009 Gruner+Jahr Hamburg

ISSN 1614-6913

Litho: 4mar Media, Hamburg

Druck: Mohn Media Mohn Druck GmbH, Gütersloh

Printed in Germany

GEO-LESERSERVICE

FRAGEN AN DIE REDAKTION

Telefon: 040/37 0320 73, Telefax: 040/37 03 56 48, E-Mail: brieife@geo.de

ABONNEMENT- UND EINZELHEFTBESTELLUNG

ABONNEMENT DEUTSCHLAND Jahres-Abonnement: 31 €

24-Std.-Online-Kundenservice: www.MeinAbo.de/service

BESTELLUNGEN: DPV Deutscher Pressevertrieb GEO-Kundenservice 20080

Hamburg

Telefon: 01805/861 80 03*

KUNDENSERVICE ALLGEMEIN: (pers. erreichbar.) Mo–Fr 7.30 bis 20.00 Uhr

Sa 9.00 bis 14.00 Uhr Telefon: 01805/86180 03* Telefax: 01805/86180 02*

E-Mail: geo-service@guj.de

ABONNEMENT ÖSTERREICH

GEO-Kundenservice Postfach 5, 6960 Wolfurt Telefon: 0820/00 10 85

Telefax: 0820/00 10 86 E-Mail: geo@abo-service.at

ABONNEMENT SCHWEIZ

GEO-Kundenservice Postfach, 6002 Luzern Telefon: 041/329 22 20

Telefax: 041/32922 04 E-Mail: geo@leserservice.ch

ABONNEMENT ÜBRIGES AUSSLAND

GEO-Kundenservice, Postfach, CH-6002 Luzern; Telefon: 0041-41/329 22 20,

Telefax: 0041-41/329 22 04; E-Mail: geo@leserservice.ch

BESTELLADRESSE FÜR GEO-BÜCHER, GEO-KALENDER, SCHUBER ETC.

DEUTSCHLAND

GEO-Versand-Service, Werner-Haas-Straße 5, 74172 Neckarsulm

Telefon: 01805/06 20 00*, Telefax: 01805/08 20 00*,

E-Mail: service@guj.com

SCHWEIZ

GEO-Versand-Service 50/001, Postfach 1002, CH-1240 Genf 42

ÖSTERREICH

GEO-Versand-Service 50/001, Postfach 5000, A-1150 Wien

BESTELLUNGEN PER TELEFON UND FAX FÜR ALLE LÄNDER

Telefon: 0049-1805/06 20 00, Telefax: 0049-1805/08 20 00,

E-Mail: service.guj.com

*14 Cent/Min. aus dem deutschen Festnetz, Mobilfunkpreise können abweichen

Vermutlich **flossen**

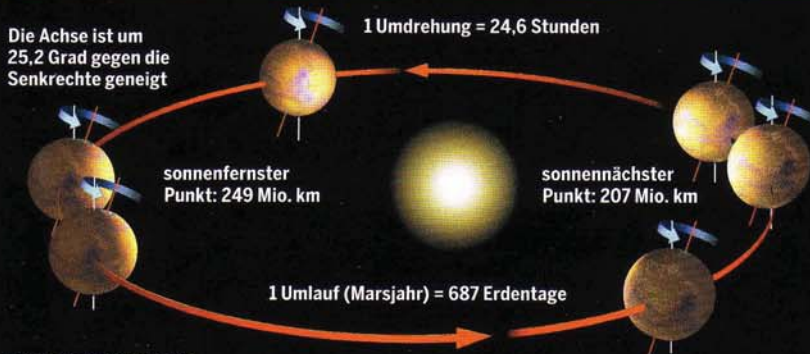
einst gewaltige

Ströme über den

Roten Planeten

PROFIL MARS

Weshalb die Luft auf dem Mars tödlich ist, wie die Achse des Roten Planeten schwankt, und wo sich am meisten Wasser findet



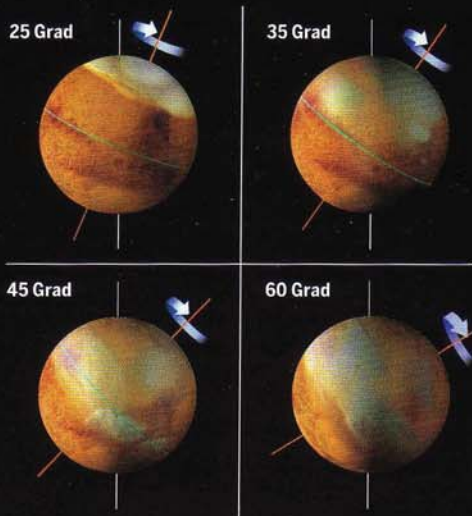
EIN EXZENTRIKER

Während die Erde auf ihrem Orbit in etwa den gleichen Abstand zur Sonne hält, folgt der Rote Planet einer äußerst exzentrischen Bahn: Mal nähert er sich dem Zentralgestirn auf 207 Millionen Kilometer, dann entfernt er sich wieder auf 249 Millionen Kilometer



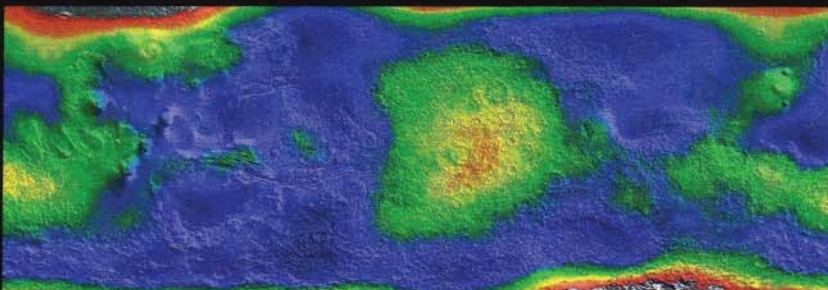
KEINE LUFT ZUM ATMEN

Die dünne Atmosphäre auf dem Mars ist für Menschen tödlich: 95 Prozent macht das Gas Kohlendioxid aus (gelber Balken), 2,7 Prozent Stickstoff (blau), 1,6 Prozent das Edelgas Argon (rot). Der Rest (weiß) besteht größtenteils aus Sauerstoff und Kohlenmonoxid



DER SCHWANKENDE PLANET

Heute rotiert der Mars um eine Drehachse, die um rund 25 Grad gegen die Senkrechte der Sonnenlauf-Ebene geneigt ist (links oben). Doch im Verlauf seiner Geschichte hat der Planet diese Neigung immer wieder verändert (restliche Bilder). Das rief jeweils gravierende Klimaschwankungen hervor, die sich auf die Eisbildung auswirkten (helle Regionen)



WASSER IN DER TROCKENHEIT

Knapp unter der Marsoberfläche befindet sich Wasser. Auf dieser Karte des Planeten sind wasserreiche Regionen (etwa die Pole) rot/gelb gefärbt, wasserarme Gebiete blau/grün

Nach solchen indirekten Hinweisen haben bereits Sonden gesucht, zum Beispiel die Landefähre Phoenix, die im Mai 2008 auf 68,2 Grad nördlicher Breite niedergegangen ist – auf halbem Weg zwischen den mächtigen Tharsis-Vulkanen und der nordpolaren Eiskappe.

Phoenix hat unter der Oberfläche subpolarer Marsregionen Wassereis nachgewiesen und Bilder vom glänzenden Mars-Eis zur Erde geschickt, das, sobald es freigelegt war, zu verdunsten begann. (Wegen des geringen Luftdrucks kann das Wasser an der Oberfläche nicht flüssig existieren; die Wassermoleküle verlassen nach und nach das Eis und steigen in die dünne Atmosphäre auf.)

Da Wasser die wohl wichtigste Voraussetzung für Leben ist, überlegen Astrobiologen, welche Organismen sich an die schwierigen Bedingungen auf dem Mars eventuell haben anpassen können.

In kalten Erdregionen haben Forscher Mikroorganismen entdeckt, die bei extremen Temperaturen existieren können. Theoretisch wäre es denkbar, dass die Zellen von Mars-Mikroben ein Gemisch aus Wasserstoffperoxid und Wasser enthalten, das bis minus 56 Grad flüssig bleibt und sie dort überleben lässt.

DOCH GLEICHGÜLTIG, ob es auf dem Mars vor Milliarden von Jahren Leben gab oder sogar heute noch gibt – mit dem Besuch der Astronauten betritt ein neuer Organismus seinen Boden. Und es beginnt eine neue Ära.

Denn der Mensch wird alles tun, um sich dort festzusetzen.

Allerdings sind alle Pläne, den Mars zu besiedeln, davon abhängig, ob der Planet eine dichte Atmosphäre halten kann, wie wir sie von der Erde kennen.

Um den Mars dauerhaft bewohnbar zu machen, müssten zunächst zahlreiche Fabriken hocheffiziente Treibhausgase produzieren und in die Atmosphäre entlassen. Sie würden die Wärmestrahlung absorbieren, die heute von der Oberfläche des Mars ungehindert ins Weltall entweicht.

In der Folge würde langsam – im Verlauf vieler Hundert Jahre – die Durchschnittstemperatur von minus 53 Grad auf Werte über null Grad steigen.

gen. Dann würden die Polkappen schmelzen, gefrorenes Wasser und Kohlendioxid würden ausgasen und als starke Treibhausgase die Temperaturen noch weiter ansteigen lassen.

Auch der Luftdruck nähme langsam zu, da immer mehr Atome und Moleküle die Atmosphäre verdichteten. Dadurch könnte schließlich Wasser in flüssiger Form auf der Oberfläche existieren, statt sich wie heute bei sehr geringem Druck direkt von Eis in Gas zu verwandeln. Große Seen und Ozeane, wie es sie auf dem Mars vermutlich schon einmal gab, könnten den Boden überfluten.

Im nächsten Schritt würde die Menschheit Pflanzen zum Mars schicken, die dann das CO₂ aus der Atmosphäre in Sauerstoff umwandeln.

So könnten womöglich im Verlauf vieler Jahrtausende irdische Bedingungen erzeugt werden. „Terraforming“ nennen Wissenschaftler diese erstaunliche Verwandlung des roten in einen blau-grünen Planeten.

Wird sich der Rote Planet irgendwann in eine blühende Oase verwandeln?

VON SOLCHEN BLÜHENDEN Landschaften sind die Astronauten bei ihrem ersten Aufenthalt weit entfernt. Vielleicht nehmen aber schon bald Siedler strahlenresistente Pflanzen mit, die sie in einem Treibhaus kultivieren könnten – und bringen so vertrautes Grün in diese fremde Welt.

Möglicherweise wird der Mars auch irgendwann zum Fluchtpunkt für die Menschheit werden, wenn die Probleme auf der Erde überhandnehmen. Oder er bleibt ein fantastisches Abenteuer, an das sich die Menschen mit Bewunderung für die Pioniere

erinnern – wie die Apollo-Flüge zum Erdenmond.

„Das Wichtigste an der Mars-Mission ist, dass sie Geschichten hervorbringt“, sagt Harald Lesch, Astrophysiker an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Ähnlich wie die Mondlandung würde eine Marsmission viele Menschen inspirieren – Milliarden Zuschauer saßen dann vor den Bildschirmen.

„Wie damals die Mondlandung“, sagt Harald Lesch, „würde auch der Flug zum Mars der Menschheit gewaltige Impulse geben.“

Und Ulrich Walter, ein ehemaliger Astronaut und Professor für Raumfahrtstechnik an der Technischen Universität München, fügt hinzu: „Was uns antreibt, ist allein die schiere Neugier – und eine Antwort auf die Frage, ob es dort draußen noch anderes Leben gibt.“ □

Hubert Filser, 43, ist Wissenschaftsjournalist in München. Wissenschaftliche Beratung:

Dr. Walter Goetz, Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Katlenburg-Lindau.

BBC GERMANY

DAS UNIVERSUM

Das große BBCGERMANY.de Special:

× HIGHLIGHT-WEBSEITE

Alle Dokumentationen zum Thema „Das Universum“ im Überblick! Special-Bereich zum Thema Planeten & viele Extras wie Wallpaper etc. im Downloadbereich!

× GEWINNSPIEL

Gewinnen Sie ein Teleskop im Wert von über 200 EURO oder eines von 10 BBC GERMANY DVD Packages!

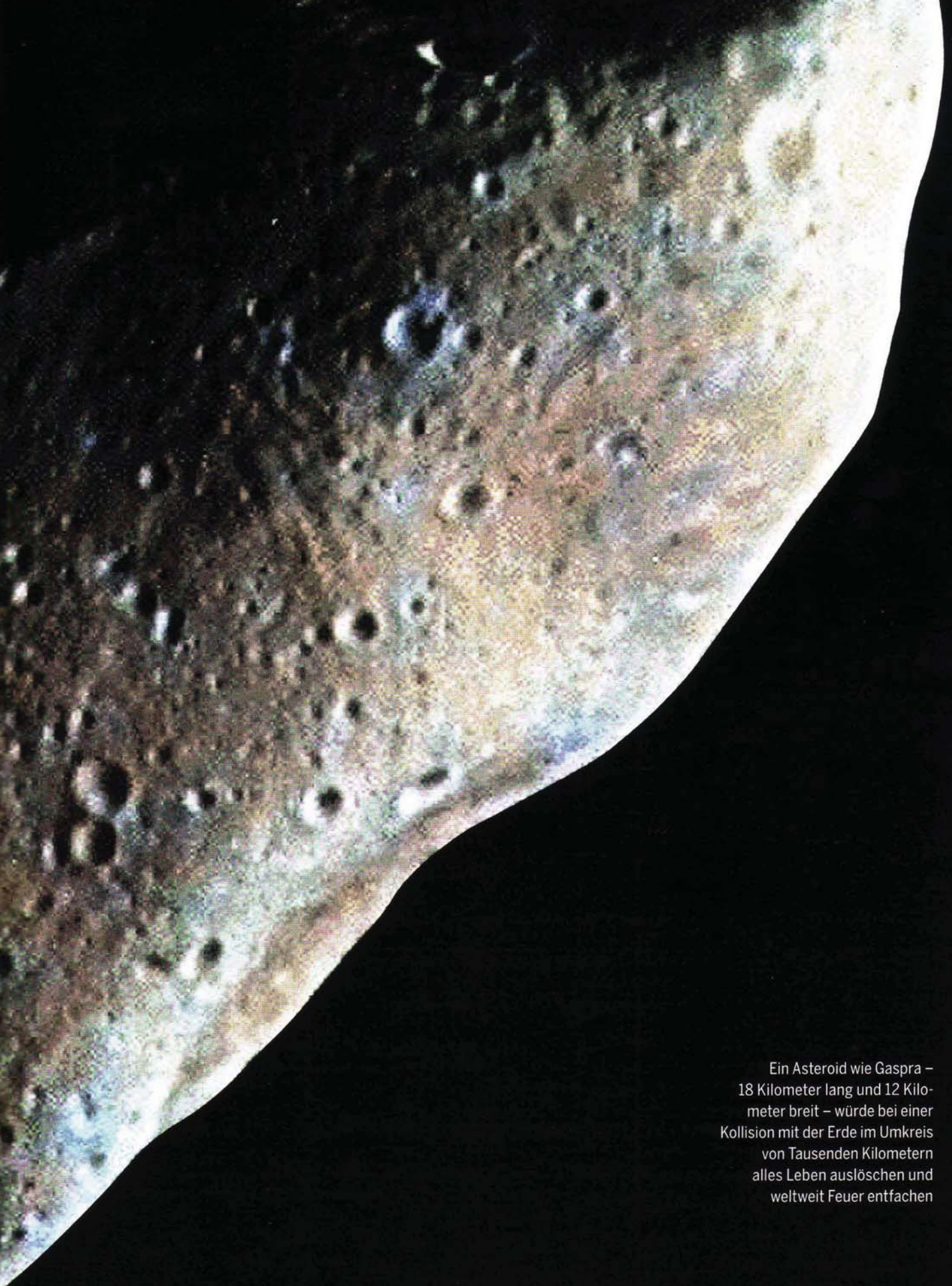
× PRODUKTÜBERSICHT

Entdecken Sie unser vielfältiges Produktangebot: „Space Race“, „Die Sonne / Der Mond“, „Der Weltraum“, u.v.m.

www.BBCGERMANY.de

Gefahr aus dem All

Tausende kleinerer Himmleskörper kommen der Erde bedrohlich nah. Ein Aufprall kann ungeheure Zerstörungen anrichten. Forscher arbeiten deshalb an Plänen, wie sich die Menschheit gegen Kollisionen zu schützen vermag



Ein Asteroid wie Gaspard –
18 Kilometer lang und 12 Kilo-
meter breit – würde bei einer
Kollision mit der Erde im Umkreis
von Tausenden Kilometern
alles Leben auslöschen und
weltweit Feuer entfachen



Am 6. Oktober 2008, gegen Mitternacht, zieht ein weißer Punkt über den Bildschirm von Richard Kowalskis Computer am Mount-Lemmon-Observatorium in Arizona: ein Asteroid. Doch irgendetwas stimmt nicht mit dem Objekt.

Kowalski ist in jener Nacht der diensthabende Astronom eines Projekts der Universität von Arizona. Es soll unbekannte Himmelskörper aufspüren, die sich uns so weit nähern, dass man sie besser unter Beobachtung hält. Drei Teleskope suchen das Firmament in jeder Nacht nach diesen erdnahen Objekten ab, zwei in den USA, eines in Australien. Allein im Jahr 2007 haben Wissenschaftler 460 neue Objekte gefunden.

So wie jenes Pünktchen, das Kowalski in dieser Nacht auffällt. Ein Asteroid, dessen Form und Größe noch ebenso unbekannt sind wie seine Zusammensetzung. Sicher ist nur, dass er ziemlich nahe bei der Erde seine Bahn zieht.

Der Astronom folgt mit dem 1,5-Meter-Spiegel des Observatoriums dem Objekt durch die Nacht und übermittelt die Koordinaten vorschriftsmäßig ans Minor Planet Center in Cambridge, Massachusetts. Alle im Sonnensystem entdeckten Asteroiden werden dort registriert und mit einem aus Jahreszahl, Buchstaben und Ziffern gebildeten Code versehen. Das von Kowalski beobachtete Objekt erhält den Namen 2008 TC3.

Aber etwas irritiert den Astronom: Bei jedem Versuch, über die Website des Minor Planet Center das automatische Registrierungsprogramm mit den Bahn-



Vor etwa 50 000 Jahren schlug ein zehn bis 50 Meter großer Himmelskörper diesen 1200 Meter

daten von 2008 TC3 zu füttern, verweigert das System die Annahme. Das ist ungewöhnlich, und so beschließt Kowalski, am folgenden Tag nach der Ursache zu forschen. Als der Morgen heraufzieht, fährt er das Teleskop herunter, informiert per E-Mail Tim Spahr, den Direktor des Minor Planet Centers, und legt sich schlafen.

Spahr findet am nächsten Morgen die Lösung des Rätsels. Die Software des Centers hat automatisch die Umlaufbahn von 2008 TC3 um die Sonne berechnet und sie mit dem Orbit der Erde verglichen. Als der Astronom den Bahnverlauf mit Kowalskis Daten manuell nachrechnet, wird ihm klar, weshalb der Computer den Dienst verweigert.

Die Maschine scheitert beim Versuch, die Fortsetzung der Asteroidenbahn zu

berechnen, weil ein Fall eintritt, den das Programm nicht vorgesehen hat: 2008 TC3 ist auf Kollisionskurs. Er wird die Erde treffen.

Aber wann? Wo? Und wie groß ist die Gefahr? Spahr hat keine Zeit, lange darüber nachzudenken. Er löst den Alarmplan aus – zum ersten Mal in der Geschichte des Minor Planet Center.

ASTEROIDEN SIND Brocken aus Stein oder Metall, übrig geblieben aus der Frühzeit des Sonnensystems, geformt aus dem scheibenförmig um das Zentralgestirn kreisenden Material, aus dem einst auch die Planeten erwuchsen.

Manche sehen aus wie Hundeknochen, andere wie pockennarbige Eier, wieder andere wie Golfbälle, gezeichnet von Kollisionen, versprödet und verfärbt



weiten und 170 Meter tiefen Krater in den Boden bei Winslow im US-Bundesstaat Arizona

unter dem Milliarden Jahre währenden Beschuss durch den Sonnenwind.

Millionen dieser Körper umkreisen die Sonne – die weitaus meisten im Asteroidengürtel, der sich zwischen den Orbits von Mars und Jupiter erstreckt (siehe Seite 115).

Der größte der dort zirkulierenden Himmelskörper ist ein Zwergplanet namens Ceres mit einem Durchmesser von etwa 950 Kilometern. Im Januar 1801 entdeckte ihn der italienische Astronom Giuseppe Piazzi, nachdem die Sternenkundler zuvor lange nach einem Himmelskörper gesucht hatten, der die Lücke zwischen Mars und Jupiter zu füllen vermochte. Denn dass dort rein gar nichts sein sollte, konnte sich schon

der große Astronom Johannes Kepler nicht vorstellen, der um 1600 als Erster die Umlaufbahnen der Planeten korrekt berechnet hatte.

Die Asteroiden entstanden vor 4,5 Milliarden Jahren als Verklumpungen von Staub

Und genauso war es. Je besser die Teleskope wurden, umso mehr füllte sich die große Leere: Ein Jahr nach Ceres fand man den etwa 550 Kilometer großen Pallas, und bis Ende 1884 wurden 242 weitere Körper entdeckt – darunter der zigarrenstummelförmige Ida, bei dem

später sogar ein kleiner, um ihn kreisender Trabant aufgespürt wurde.

Inzwischen sind mehrere Hunderttausend Asteroiden bekannt, doch nur knapp 200 von ihnen haben einen Durchmesser von 100 Kilometern und mehr. Die meisten Brocken sind deutlich kleiner – vermutlich gibt es Millionen, die im Radius keine 500 Meter messen.

Woher aber stammt das kosmische Geröll? Wie geriet es ausgerechnet in diesen Grenzbereich zwischen die inneren Gesteins- und die äußeren Gasplaneten? Und warum hat sich daraus nicht wie andernorts auch ein Planet geformt?

FRÜHER HIELTEN Astronomen die kreiselnden Klumpen für die Reste eines Planeten, der auf dieser Bahn gekurvt und irgendwann zerstört worden war, durch eine Explosion vielleicht.

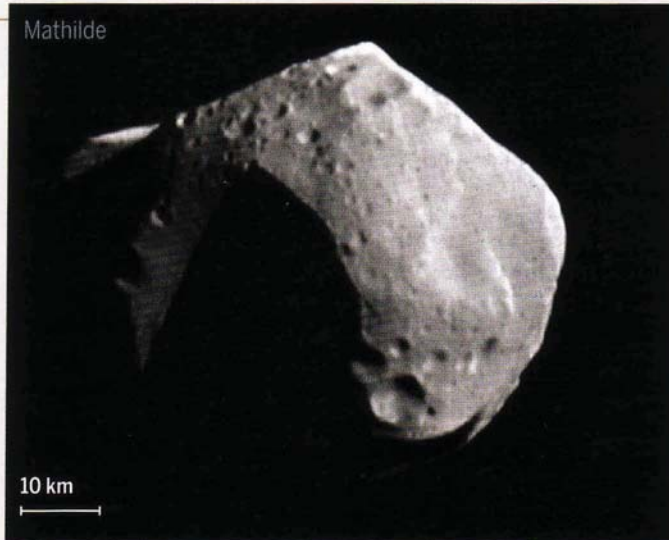
Inzwischen wurde diese These aber verworfen. Zum einen ist im gesamten Sonnensystem kein Vorgang bekannt, der einen Planeten einfach explodieren ließe. Und zum anderen sind die Brocken in ihrer Zusammensetzung viel zu unterschiedlich, als dass sie alle von einem Planeten abstammen könnten.

Einer anderen Theorie zufolge sind die Asteroiden vor rund 4,5 Milliarden Jahren an Ort und Stelle entstanden – als Verklumpungen in jenem scheibenförmigen Staubwirbel, der die junge Sonne zu jener Zeit umgab. Nur habe die gewaltige Gravitationskraft des Jupiters verhindert, dass sich aus dem zirkulierenden Gestein ein weiterer Planet formen konnte.

Ein drittes Modell wurde erst jüngst veröffentlicht. Es geht davon aus, dass nicht alle Planeten auch dort entstanden sind, wo sie sich heute befinden.

Denn der Prozess, an dessen Ende die Sonne mit ihren acht fast auf der gleichen Ebene angeordneten Planeten stand, verlief nicht linear, sondern ziemlich chaotisch (siehe Seite 30). Am Anfang war nur eine diffuse, kosmische Wolke, in der Wasserstoff, Helium und Staubteilchen umherwirbelten. Atome,

Mathilde



Größe: maximal 66 Kilometer Durchmesser; eine Masse von 10^{14} Tonnen; besteht aus kohlenstoffreichem Gestein.

Bahn: Eine Sonnenumrundung dauert 4,31 Jahre, die Entfernung zum Zentralgestirn beträgt im Mittel 396 Millionen Kilometer.

Besonderheiten: viele Krater, darunter ein riesiger von 19 Kilometer Tiefe (vorn im Schatten), sehr dunkle Oberfläche (reflektiert nur vier Prozent des Lichtes).

Ida



Größe: rund 60 Kilometer lang, hat eine Masse von $4,2 \times 10^{13}$ Tonnen.

Bahn: umrundet die Sonne in etwa 428 Millionen Kilometer Abstand und braucht für einen Umlauf 4,84 Jahre.

Besonderheiten: wird von dem rund 1,6 Kilometer großen Mond Dactyl (am rechten Bildrand) in 90 Kilometer Entfernung umrundet. Aufnahme durch den Raumpäher »Galileo« im Jahr 1993.

Moleküle und Partikel kollidierten, zogen sich gegenseitig an, begannen um eine gemeinsame Achse zu rotieren – und ließen aus der Wolke ganz allmählich eine Scheibe werden, die das Urmaterial stellte für das solare System.

In dieser rotierenden Scheibe formten sich nun zuerst die äußeren Planeten: die Gasriesen Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun. Durch ihre großen Gravitationskräfte, so die Theorie, hätten diese Großplaneten – die damals, vor etwa 3,9 Milliarden Jahren, vermutlich sehr viel näher beieinander standen als heute – gegenseitig ihre Umlaufbahnen beeinflusst und zudem Gas und Staub quer durch das Sonnensystem gewirbelt.

Auf diese Weise seien Hunderttausende von Asteroiden aus den Randgebieten des solaren Systems nach innen gelangt. Zwischen Mars und Jupiter entstand ein Geröllgürtel, in dem Eis-, Staub- und Gesteinsbrocken aus den unterschiedlichsten Ecken des Sonnensystems bis heute im Kreis um die Sonne jagen. So weit diese Überlegung.

Welche Theorie über die Entstehung der Asteroiden nun zutrifft: In jedem Fall kommt es vor, dass manche Objekte aus ihrer Bahn geworfen werden – weil sie

mit anderen kollidieren oder dem Riesenplaneten Jupiter zu nahe kommen. Durch die dabei auftretenden Kräfte verlassen sie den Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter und ändern ihre Umlaufbahnen.

Einige geraten dabei ins innere Sonnensystem und kreiseln fortan irgendwo zwischen Venus, Erde und Mars um unser Zentralgestirn. Und gelegentlich kommt es vor, dass sie dabei die Bahnen dieser inneren Planeten kreuzen: Sie werden zu Geisterfahrern, zu einer Bedrohung aus den Tiefen des Alls.

WÄHREND DER ASTEROID 2008 TC3 auf die Erde zurast, greift Tim Spahr zum Telefon und informiert Steve Chesley, einen Astronom des Jet Propulsion Laboratory in Kalifornien. Das JPL unterhält eine Datenbank über die Umlaufbahnen aller bekannten Körper im Sonnensystem.

„Ich war völlig verblüfft“, erinnert sich Chesley später: „100 Prozent Einschlagswahrscheinlichkeit – so etwas hatte ich noch nie gesehen.“

Und: Nach seinen Berechnungen bleiben nur 13 Stunden bis zum Einschlag.

Am 7. Oktober, um 4.46 Uhr mittlereuropäischer Zeit, wird 2008 TC3 ver-

mutlich in die Erdatmosphäre eintauchen. Einschlagort: der Nordsudan.

Womöglich aber wird der Asteroid bereits in der Atmosphäre verglühen: Seine geringe Helligkeit deutet darauf hin, dass er nicht übermäßig groß ist.

Chesley schickt seine Ergebnisse an die NASA und ans Minor Planet Center. Von dort geht sofort eine Mail an ein weltumspannendes Netz von Asteroidenforschern. 26 Observatorien nehmen den Eindringling nun ins Visier.

Denn 2008 TC3 bietet eine einmalige Chance: Nie zuvor haben Astronomen die Kollision eines Asteroiden mit der Erde „live“ verfolgen können, obwohl es mehrmals im Jahr zu einem solchen Ereignis kommt. Gäbe es auf der Erde nicht die Plattentektonik, die in Jahrmillionen immer wieder die Kontinente umpflügt und die Gebirge auftürmt, und wären da nicht Verwitterung und Erosion, dann wäre unser Heimatplanet – wie Mond oder Mars – vernarbt und von dem kosmischen Bombardement gezeichnet.

So aber sind auf der Erde nur 160 Einschlagkrater sicher bekannt; die ältesten sind etwa zwei Milliarden Jahre alt, der jüngste – ein Krater in Arizona – wird auf 50 000 Jahre geschätzt.

Eros



5 km

Größe: etwa 34 Kilometer lang und rund 11 Kilometer breit, besteht aus Gestein, hat eine Masse von 7×10^{12} Tonnen.

Bahn: bewegt sich auf einer Bahn zwischen 170 und 267 Millionen Kilometer Entfernung von der Sonne. Die Umlaufzeit beträgt 1,76 Jahre.

Besonderheiten: 2001 landete die Sonde »NEAR Shoemaker« auf Eros. Das Bild entstand aus deren Laserdaten.

Tempel 1



2 km

Größe: 5 bis 7,5 Kilometer; Silikatgestein, Eis, Kohlenstoffverbindungen. Seine Masse beträgt rund 7×10^{10} Tonnen.

Bahn: stark elliptischer Orbit in 225 bis 709 Millionen Kilometer Abstand zur Sonne. Ein Umlauf dauert 5,5 Jahre.

Besonderheiten: Komet mit einem Schweif, der in Nähe der Sonne Gase und Staub freisetzt. Die Sonde »Deep Impact« erforschte ihn durch Beschuss mit einem 372 Kilogramm schweren Projektil.

Zwar regnen täglich rund 100 Tonnen kosmischen Materials auf die Erde herab, darunter einige Dutzend größere Meteoriten (wie man jene Bruchstücke von Asteroiden nennt, die unseren Planeten tatsächlich erreichen).

Doch die meisten Asteroiden verglühen auf ihrem Weg durch die Atmosphäre. Nur Himmelskörper mit einer Größe von mindestens zehn Metern erreichen *immer* die Erde – gleichgültig, ob sie bei ihrem Weg durch die Luftschichten in viele Teile zerbrechen oder im Ganzen aufschlagen.

Bei mittelgroßen Brocken ist eine Vorhersage dagegen schwierig: „Ob so ein Himmelskörper den Erdboden erreicht, hängt von seiner Zusammensetzung und dem Einfallswinkel ab“, sagt Stefano Mottola, Asteroidenforscher beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Berlin.

„Meteoriten aus Eisen, die dazu noch im flachen Winkel auf die Atmosphäre treffen, haben eine größere Chance als Brocken aus losem Gestein, die womöglich senkrecht durch die irdische Gashülle rasen.“

Doch nur selten erreichen uns Projektile, die so groß sind, dass ihr Einschlag verheerende Wirkungen hat – wie etwa jener geheimnisvolle Himmelskörper, der am 30. Juni 1908 über der Tunguska-Region in Mittelsibirien explodierte.

Damals knickte eine starke Druckwelle auf einer Fläche so groß wie das Saarland mehr als 80 Millionen Bäume um. Noch in weit entfernten Dörfern hörten die Bewohner den Lärm von Explosionen, und Viehhirten berichteten von

Dagegen hat ein Asteroid ganz sicher jene 23 Kilometer durchmessende Senke geschlagen, die heute noch im Grenzgebiet zwischen Fränkischer und Schwäbischer Alb zu finden ist: das Nördlinger Ries.

Etwa 1000 Meter Durchmesser, so ergaben Berechnungen, hatte das steinerne Geschoss, das vor 14,7 Millionen Jahren die Erde traf. Schläge ein ähnlicher Körper auf dem heute dicht besiedelten Planeten ein, würde er im Umkreis von etwa 500 Kilometern alles Leben vernichten – und noch in 1000 Kilometer Entfernung würde hochgeschleudertes Gestein vom Himmel regnen.

Hätte ein Asteroid gar das zehnfache Ausmaß, hinterließe er einen Krater von 150 Kilometer Durchmesser. Der Hitzeblitz der Explosion würde auf Tausende Kilometer alles Leben auslöschen, und die bei der Katastrophe entstandene Druckwelle würde mehrfach die Erde umrunden.

Freilich: Genau solch einer kosmischen Kanonenkugel verdankt die Menschheit vermutlich ihren Aufstieg.

Derzeit verfolgen Astronomen rund 6000 Objekte, die der Erde nahe kommen

einem Feuerball, der über den Himmel geschossen sei.

Doch bis heute ist unklar, was die Verwüstungen ausgelöst hat. War es tatsächlich ein Asteroid? Oder vielleicht ein Komet – einer jener lockeren Bälle aus Eis und Staub, die in den äußeren Regionen des solaren Systems entstanden sind?

Denn ohne jenen Meteoriten, der vor 65 Millionen Jahren über der Halbinsel Yucatán und dem Golf von Mexiko niederging, wären wohl heute noch die Dinosaurier die Herrscher der Welt.

Nach dem Einschlag des Zehn-Kilometer-Objekts wurde die Welt von Feuersbrünsten überzogen, der Rauch und das hochgeschleuderte Material verdunkelten das Sonnenlicht und kühlten den Planeten über Jahre hin aus. Die Dinosaurier, so die gängige Theorie, überstanden das Inferno nicht, und mit ihnen verschwanden bis zu drei Viertel aller Tier- und Pflanzenarten.

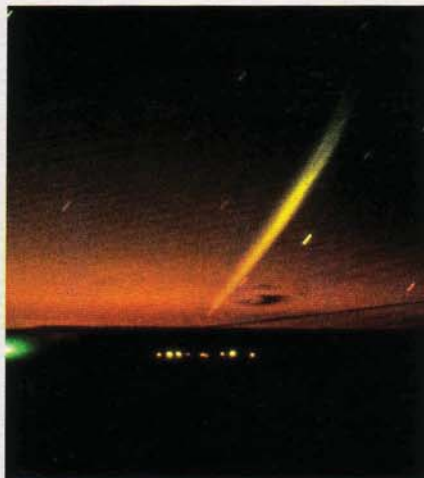
Niemand kann solche Katastrophen sicher vorhersagen, lediglich ihre Wahrscheinlichkeit lässt sich ermitteln. Ein Meteorit von solcher Größe trifft statistisch gesehen nur alle 100 Millionen Jahre die Erde. Dagegen muss man aber alle 500000 Jahre mit einem „zivilisationsgefährdenden“ Koloss vom Typ Nördlinger Ries rechnen.

Es besteht also ein Risiko von etwas weniger als 1:5000, dass noch in diesem Jahrhundert ein Ein-Kilometer-Asteroid mit unserem Planeten kollidiert.

ASTRONOMEN VERFOLGEN derzeit gut 6000 erdnahe Objekte. Etwa 1000 dieser kosmischen Geisterfahrer gelten als gefährlich, weil sie größer als 150 Meter sind und sich der Erde bei ihren Sonnen-Umläufen auf weniger als 7,5 Millionen Kilometer nähern. Das aber sind nur die bekannten Himmelskörper. Die Gesamtzahl der erdnahen Objekte schätzen Experten auf mehr als 100000, ein Fünftel davon ist potenziell gefährlich.

Vor zehn Jahren wurde auf einer Konferenz in Turin eine Skala beschlossen, vergleichbar der Richterskala für Erdbeben. Diese „Turiner Skala“ hilft bei der Abschätzung des Risikos, das bestimmte Asteroiden und vagabundierende Kometen für die Menschheit darstellen.

Sie kombiniert die Wahrscheinlichkeit und die Wirkung eines Einschlags, unterteilt in elf Kategorien: von „Kollisionswahrscheinlichkeit ist null“ (Stufe 0) über die „Gefahr einer Kollision mit regionalen Zerstörungen“ (Stufe 5) bis



Kometen – hier Ikeya-Seki – kommen selten in die Nähe der Erde. Sie bestehen meist aus Eis und Staub, Asteroiden dagegen aus Metallen, Kohlenstoffverbindungen und Gestein

hin zur sicheren „Kollision, die globale Zerstörungen verursacht“ (Stufe 10).

Nur ein einziger Asteroid erhielt bislang eine Einstufung höher als 3: ein 270-Meter-Brocken namens Apophis, benannt nach dem Gegenspieler des ägyptischen Sonnengottes Ra.

Zeitweilig war das Objekt in die Kategorie 4 einsortiert – was bedeutet: Es könnte zu einer Kollision mit schweren, regionalen Zerstörungen kommen. Inzwischen aber glauben die Astronomen, dass sie sich geirrt haben.

Apophis wird die Erde in den kommenden 17 Jahren zweimal passieren. Zuerst am 13. April 2029, einem Freitag. In weniger als 36000 Kilometer Höhe, noch innerhalb der Bahnen der geostationären Wettersatelliten, zieht er dann am Himmel entlang – aber treffen wird er den Blauen Planeten nicht.

Ein wenig unsicher sind sich die Forscher aber über den Ablauf der zweiten Begegnung im Jahr 2036. Denn beim ersten Treffen 2029 wird der Felsbrocken von der Schwerkraft der Erde erfasst, wodurch sich seine Bahn minimal ändert.

Dabei kommt es auf jeden Meter an: Befindet sich Apophis im Jahr 2029 bei seiner größten Annäherung in einem ganz bestimmten Abstand zur Erde, wird seine Bahn so verändert, dass er sich sieben Jahre später exakt wieder an der gleichen Stelle befinden würde.

„Das Problem ist, dass die Erde dann auch genau dort wäre. Trifft der Aste-

roid also 2029 diesen Punkt, kollidiert er am Sonntag, dem 13. April 2036, mit unserem Planeten“, schreibt der US-Forscher Daniel Durda.

Freilich: Dieser Fall gilt inzwischen als wenig wahrscheinlich.

WAS ABER, wenn eine solche Katastrophe tatsächlich bevorstünde? Darüber, wie die sich verhindern ließe, diskutieren Astronomen seit Jahren. Verworfen wurde inzwischen die Idee, interplanetare Querschläger einfach zu sprengen: Denn dann hätte man nicht eine große, sondern viele kleine kosmische Bomben, die unberechenbar durchs All rasten.

Ein Team von US-Forschern schlägt vor, mögliche Killerasteroiden durch die Zündung einer Atombombe in nächster Nähe aus ihrer Bahn zu werfen.

Die europäische Weltraumbehörde ESA hingegen prüft, ob es möglich ist, mit einer zweistufigen Aktion ein solches Projektil abzulenken: Ein Raumschiff müsste den Asteroiden mehrere Monate lang umkreisen und vermessen, ein zweites könnte dann an einer zuvor berechneten Stelle mit hoher Geschwindigkeit auf seine Oberfläche aufschlagen, um seine Bahn zu beeinflussen.

Als dritte Variante könnten sogenannte Gravitationsschlepper zum Einsatz kommen: Ein schweres Raumschiff würde in der Nähe eines Asteroiden geparkt und begleitete ihn für längere Zeit. Kontinuierlich liefen dabei Triebwerke mit minimalem Schub, was zu geringfügigen Bahnänderungen führen könnte, weil die Gravitationskraft zwischen den beiden Körpern wie ein Schleppseil wirkt.

Doch niemand weiß, ob diese Ideen im Ernstfall funktionieren würden.

Einen Test aber gab es schon: Am 4. Juli 2005 schlug ein 372 Kilogramm schweres Projektil der NASA auf dem zu jenem Zeitpunkt über 100 Millionen Kilometer entfernten Kometen Tempel 1 ein. „Deep Impact“, tiefer Einschlag, hieß die Mission, und ihr eigentlicher Zweck war die Analyse der ins All geschleuderten Kometenbestandteile.

Der Durchmesser von Tempel 1 beträgt im Durchschnitt sechs Kilometer,

das Projektil von der Erde war gerade einmal so groß wie ein Kühlschranks. Anschließend maß die NASA die Auswirkungen der künstlich herbeigeführten Kollision: Der Komet war langsamer geworden – um 0,0001 Millimeter pro Sekunde; und sein Abstand zur Sonne hatte sich um zehn Meter verringert.

„Deep Impact“ war für Tempel 1 also nicht mehr als ein Insektenstich. Ein vergleichbarer Einschlag bei einem ähnlich großen erdnahen Objekt auf Kollisionskurs hätte den Blauen Planeten jedenfalls nicht gerettet.

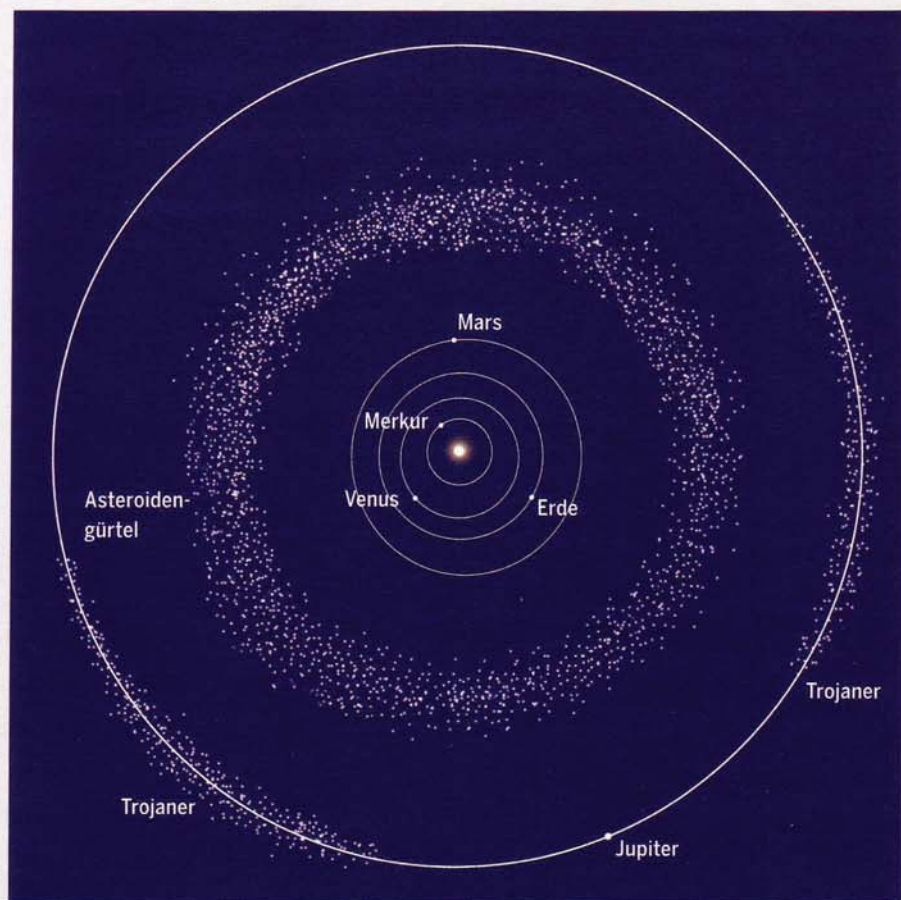
7. OKTOBER 2008, 4.45 UHR. Mit 45 000 km/h taucht 2008 TC₃ über dem Sudan in die Erdatmosphäre ein. US-Militärsatelliten registrieren eine Feuerkugel in 65 Kilometer Höhe.

Gut 20 Sekunden lang leuchtet der glühende Ball bei seinem Sturz zur Erde, dann verlischt er plötzlich. Offensichtlich ist 2008 TC₃ auf dem Weg nach unten auseinandergebrochen. Er hinterlässt eine feine Staubspur, die vom Boden und aus dem All fotografiert wird. Meldungen über Schäden gibt es nicht.

Bei manchen Wissenschaftlern macht sich Enttäuschung breit: Ist 2008 TC₃ womöglich vollständig im Gasmantel der Erde verglüht? Gibt es kein einziges Bruchstück, das Aufschluss geben könnte über die Herkunft und die Zusammensetzung des Asteroiden?

Unter Leitung zweier Wissenschaftler macht sich zwei Monate später eine Expedition in die Nubische Wüste auf: Mit 45 Helfern ziehen die Forscher durch die Einöde auf der Suche nach möglichen Überbleibseln von 2008 TC₃. Denn noch immer ist unbekannt, woraus das Geschoss eigentlich bestanden hat, wie groß und wie schwer es war.

Der Suchtrupp in der Wüste gibt ein seltsames Bild ab: In einer geraden Linie von etwa einem Kilometer Breite geht alle 20 Meter ein Helfer oder ein Wissenschaftler, die Augen fest auf den Boden gerichtet. Der Tross durchkämmt die aus Satelliten- und Beob-



In einem Streifen zwischen 300 und 500 Millionen Kilometer Entfernung von der Sonne – dem Asteroidengürtel – häufen sich die kleinen Himmelskörper. Es sind Überbleibsel aus der Urzeit des Sonnensystems. Weitere Asteroiden, »Trojaner« genannt, kreisen auf der Bahn des Jupiters

achtungsdaten errechnete und von Augenzeugen noch genauer eingegrenzte Aufprallregion.

Schon am Abend des ersten Tages wird das Team fündig: Ein Student entdeckt einen kleinen, tiefschwarzen Bro-

so Löchriges als solides Objekt existieren konnte.“

Insgesamt sammelt der Trupp in wochenlanger Suche fast vier Kilogramm Splitter. Daraus errechnen die Forscher anschließend, dass 2008 TC₃ vor seinem Eintritt in die Erdatmosphäre einen Durchmesser von etwa 4,1 Metern hatte und zwischen 60 und 110 Tonnen wog. Vermutlich war er selber das Bruchstück eines anderen erdnahen Asteroiden, 1998 KU₂, den die Astronomen bereits vor

zehn Jahren registriert haben.

Der allerdings hätte das Zeug, der Erde gewaltig zu schaffen zu machen – wenn er sie denn trafe: Sein Durchmesser beträgt knapp drei Kilometer. □

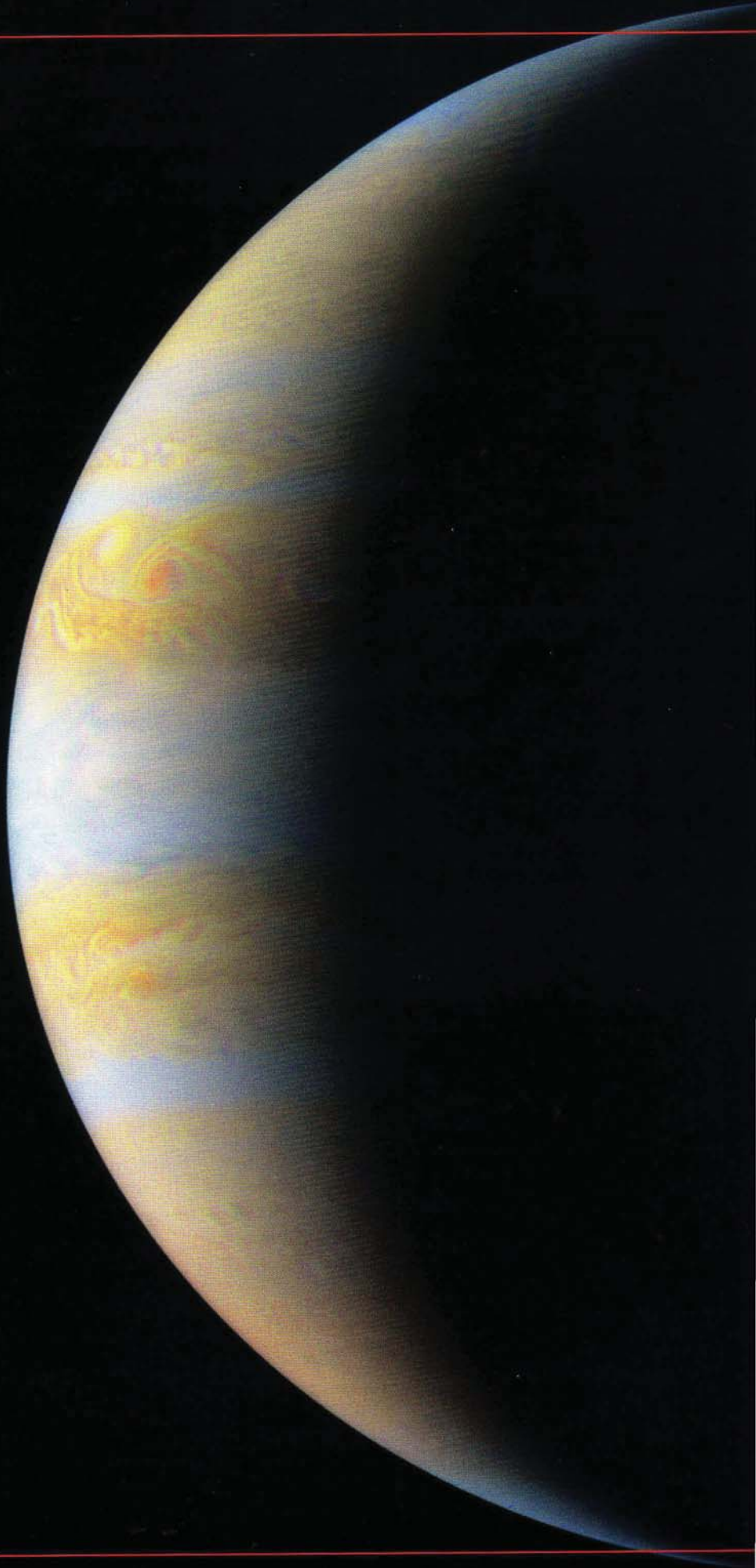
Jürgen Bischoff, 55, schreibt regelmäßig für GEOkompakt. Wissenschaftliche Beratung: **Dr. Stefano Mottola**, Institut für Planetenforschung des DLR, Berlin-Adlershof.

Mit Computern lässt sich exakt berechnen, ob eine Kollision mit der Erde droht

cken aus bröseligem Material, überzogen mit einer glasigen Schmelzschicht. Es ist ein Bruchstück von 2008 TC₃.

Das Fragment verrät, dass der einstige Himmelskörper weder aus festem Gestein noch aus Metall bestand. Er war ein äußerst seltenes Exemplar aus porösem, steinartigem Material. „Kaum zu glauben“, so ein Forscher, „dass etwas

63 Monde umkreisen Jupiter.
Io, der drittgrößte (links im Bild),
umrundet den Planeten in
einem Abstand von durchschnitt-
lich rund 420 000 Kilometern



Jupiter

Im Sog des Gasgiganten

Jupiter ist schwerer als alle anderen Planeten des Sonnensystems zusammen, in seinem Volumen fänden mehr als 1300 Erdenbälle Platz. Er ist ein rätselhafter Riese ohne feste Oberfläche, umgeben von einem tosenden Meer aus Wolken. Abertausende Blitze durchzucken seine Atmosphäre. Um ihn zu erkunden, machte sich eine Sonde auf den gefährlichen Weg in sein Inneres

3,4

Text: Ralf Berhorst

Illustration: Tim Wehrmann

MILLIARDEN KILOMETER hat die amerikanische Raumsonde »Galileo« zurückgelegt, als sie sich am 13. Juli 1995 dem Jupiter nähert. Seit über fünfeinhalb Jahren schon rast sie durchs Weltall, dreht sich unablässig der Aufbau des viereinhalb Meter hohen und rund zwei Tonnen schweren Gefährts

um die eigene Achse. Ein Sonnenschild, aufgespannt wie ein umgedrehter Regenschirm, schützt die Kamera sowie Sensoren und andere Messinstrumente, Antriebsdüsen und Bremsstrahltriebwerk.

Ganz unten ist ein 339 Kilogramm schweres Tochterschiff befestigt, eine kegelförmige Raumkapsel mit glänzendem Hitzeschild.

Jetzt, 83 Millionen Kilometer vom Jupiter entfernt, kappt ein Funksignal der Bodenstation im kalifornischen Jet Propulsion Laboratory das Verbindungskabel zur Sonde und sprengt die Halterungsbolzen ab. Federn drücken die kaum meterhohe Kapsel vom Mutterschiff weg ins Weltall.

Nun ist das Tochtermodul ganz auf sich allein gestellt.

Wie ein Stein soll es auf den Jupiter zustürzen. So enorm ist die Gravitationskraft des Planeten, dass sie schon jetzt wirkt und die Kapsel anzieht.

Das Tochterschiff besitzt keinen eigenen Antrieb, die Ingenieure haben keine Möglichkeit mehr, die vorher berechnete Flugbahn zu korrigieren.

In 148 Tagen soll es in die Jupiter-Atmosphäre eindringen. Sollen seine Sensoren deren Zusammensetzung erkunden, Temperatur, Druck und Dichte messen, Wolkenpartikel und Blitze aufspüren, das Magnetfeld erforschen.

Denn der Gasgigant zählt noch immer zu den rätselhaftesten Gebilden im Sonnensystem.

JUPITER IST DER weitaus größte aller Planeten. In seinem Volumen fänden fast 1320 Erdbälle Platz. Am Äquator misst sein Durchmesser fast 143 000 Ki-

lometer: das Elffache des Erddurchmessers. Jupiter versammelt mehr Masse als alle übrigen Planeten und Asteroiden des Sonnensystems zusammen.

Und doch erreicht er nur wenig mehr als die Dichte von Wasser. Denn der Himmels gigant besteht zu großen Teilen aus Gasen, besitzt keine sichtbare feste Oberfläche.

Weil er rasanter als alle anderen Planeten um die eigene Achse rotiert – ein Tag dauert keine zehn Stunden –, ballt sich viel Masse an seinem Äquator zusammen. Wie bei einem Karussell, dessen Fliehkraft die Fahrgäste umso heftiger nach außen drückt, je weiter entfernt von der Drehachse sie sich befinden, driften die Gase am Äquator des Planeten am stärksten nach außen. Daher ist er an beiden Polen abgeplattet.

Da der Jupiter 44 Prozent des Sonnenlichtes zurückwirft, erstrahlt er besonders hell am Nachthimmel und ist den Erdbewohnern schon seit Jahrtausenden aufgefallen; nur Mond und Venus leuchten intensiver am Firmament.

Und so majestätisch langsam bewegt er sich auf seiner Bahn um die Sonne (fast zwölf Erdenjahre benötigt er für die Umkreisung des Zentralgestirns), dass ihn die Menschen des Altertums als oberste Gottheit und einen Herrscher unter den Gestirnen verehrten und etwa für Hagelschauer, Donner und Regen verantwortlich machten.

Seefahrern diente der weiß strahlende Planet zur Navigation auf den Weltmeeren. Himmelsforscher richteten nachts ihre Fernrohre auf ihn.

Sie entdeckten dunkle Wolkenbänder, die in rasender Geschwindigkeit über

den Jupiter fliehen, sowie einen großen roten Fleck – wie man heute weiß, ein gigantischer Wirbelsturm, der offenbar schon seit Jahrhunderten tobt.

Im Januar 1610 machte der italienische Astronom Galileo Galilei mit dem soeben erfundenen Teleskop vier Lichtpunkten beim Jupiter aus: Monde, die ihn auf regelmäßigen Bahnen umkreisen – so wie die Planeten die Sonne.

Galilei sah es als weiteren Beweis für die kopernikanische, heliozentrische Theorie, nach der die Erde nicht im Mittelpunkt des Universums steht.

Der Jupiter bildet mit seinen Trabanten gleichsam ein Planetensystem im Kleinen. Forscher späterer Jahrhunderte entdeckten eine weitere Ähnlichkeit zur Sonne: Sie errechneten Masse und Dichte des Gasriesen und schlossen, dass er ebenfalls weitgehend aus Wasserstoff und Helium zusammengesetzt sein muss. Manche Wissenschaftler bezweifelten sogar, dass der Jupiter im Inneren einen festen Kern besitzt. Doch das blieben Spekulationen.

Erst in den 1970er Jahren flogen vier US-Sonden am Jupiter vorbei, eine von ihnen in nur 43 000 Kilometer Entfernung. Die Bilder ihrer Infrarotkameras zeigten, dass der Planet mehr Wärme abgibt, als er von der Sonne empfängt, er muss also in seinem Inneren eine eigene Hitzequelle besitzen. Doch die Aufnahmen ließen die Forscher nicht weit unter die Wolkendecke blicken.

Damals fasste die NASA den Plan, den Jupiter noch genauer zu erforschen.

Erstmals in der Geschichte der Weltraumforschung sollte eine Raumsonde in eine Umlaufbahn um einen der

Gasriesen geschossen werden und eine Tochterkapsel mit Messinstrumenten in dessen Atmosphäre absetzen.

Am 18. Oktober 1989 startete die US-Sonde, für die deutsche Forscher und Ingenieure Antriebsdüsen und einige Messinstrumente konstruiert hatten, an Bord eines Spaceshuttles ins All. Die Wissenschaftler benannten sie nach Galileo Galilei, dem Pionier der Jupiter-Forschung.

Um Treibstoff und damit Gewicht zu sparen und um den Jupiter mit einer eigentlich zu schwachen Rakete erreichen zu können, hatten sie eine besondere Flugroute erdacht: „Galileo“ sollte zunächst dicht an der Venus und zwei Mal an der Erde vorbeifliegen, dabei einen winzigen Teil von deren Bahnenergie aufnehmen und so die

Seine Magneto- sphäre ist die größte zusammen- hängende **Struktur** im Sonnensystem

eigene Geschwindigkeit um das Sechsfache steigern. Kein Feuerrückstoß der Antriebsdüsen hätte eine ähnliche Beschleunigung erwirken können.

Das Schwungholen vervielfachte allerdings die Strecke zum Jupiter, dessen kürzeste Entfernung zur Erde 630 Millionen Kilometer beträgt. Galileo brauchte mehr als sechs Jahre.

Entschädigt für die lange Wartezeit wurden die Forscher durch atemberaubende Bilder von unterwegs. So lieferte die Sonde Nahaufnahmen jener vier Monde, die Galileo Galilei fast 400 Jahre zuvor mit seinem Teleskop erspäht hatte. Die Fotos zeigten:

- Ganymed, einen riesigen Ball mit dicker Eiskruste, durchfurcht von Tälern und mit 5268 Kilometer Durchmesser der größte aller Planetenmonde;

- Europa, bedeckt von einer kilometerdicken Eiskruste, unter der Wissenschaftler einen Ozean vermuten, der mehr Wasser als sämtliche Weltmeere enthalten könnte;

- Io, übersät von Vulkanen, die ihre Fontänen bis zu 280 Kilometer in die Höhe schleudern – der geologisch aktivste Himmelskörper im Sonnensystem;

Dicke Wolken (rötlich) umhüllen den Jupiter, darunter dehnen sich Wasserstoff- und Heliumgase aus. Mit zunehmendem Druck werden diese flüssig, dann metallisch (dunkelblau). Im Zentrum ballt sich ein Kern aus Gestein und Metall. In einem flachen Winkel trifft die »Galileo«-Kapsel auf die Atmosphäre (1: durchgezogene Linie), dann fällt sie senkrecht in die Tiefe. Nach rund 150 Kilometern bricht der Kontakt zur Muttersonde ab. Der in diesem Beitrag geschilderte fiktive Flug (gestrichelt) führt die Kapsel bis zum Kern des Planeten

1

• Kallisto, eine Eiswüste mit Riesenkратern, seit etwa vier Milliarden Jahren wenig verändert und damit eine der ältesten Landschaftsformationen in unserer kosmischen Heimat.

Und dann endlich, im Juli 1995, näherte sich die Sonde ihrem eigentlichen Ziel und klinkte ihr Tochtermodul aus.

FÜNF MONATE SPÄTER. 7. Dezember 1995, 17.04 Uhr mitteleuropäischer Zeit. Die kleine Tochterkapsel Galileos, die seit Juli ohne Antrieb auf den Jupiter zujagt – die Muttersonde fliegt auf eine Umlaufbahn um den Planeten zu –, ist nur noch sechs Stunden von dessen Atmosphäre entfernt. Jetzt aktiviert eine Zeituhr an Bord die Kapsel.

Drei Stunden später muss der erste Sensor einen Belastungstest bestehen: Denn die Kapsel befindet sich nun im riesigen Magnetfeld des Jupiters, das

stärker ist als das jedes anderen Planeten. Weil aber in dem gigantischen Gebilde die Partikeldichte eher gering ist, kann die kleine Sonde den Teilchenschauer unbeschädigt passieren.

Im Inneren der Magnetosphäre spürt sie einen Strahlungsgürtel aus positiv geladenen Helium-Teilchen auf: eine wissenschaftliche Neuentdeckung. Und sie passiert mehrere dünne Ringe, die von der Erde aus nicht sichtbar sind und deren Staubteilchen von Jupitermonden stammen.

Um 23.04 Uhr ist die Kapsel endlich am Ziel: Mit 170 700 km/h rast sie, beschleunigt von der Schwerkraft des Jupiters, auf den Rand der Atmosphäre zu.

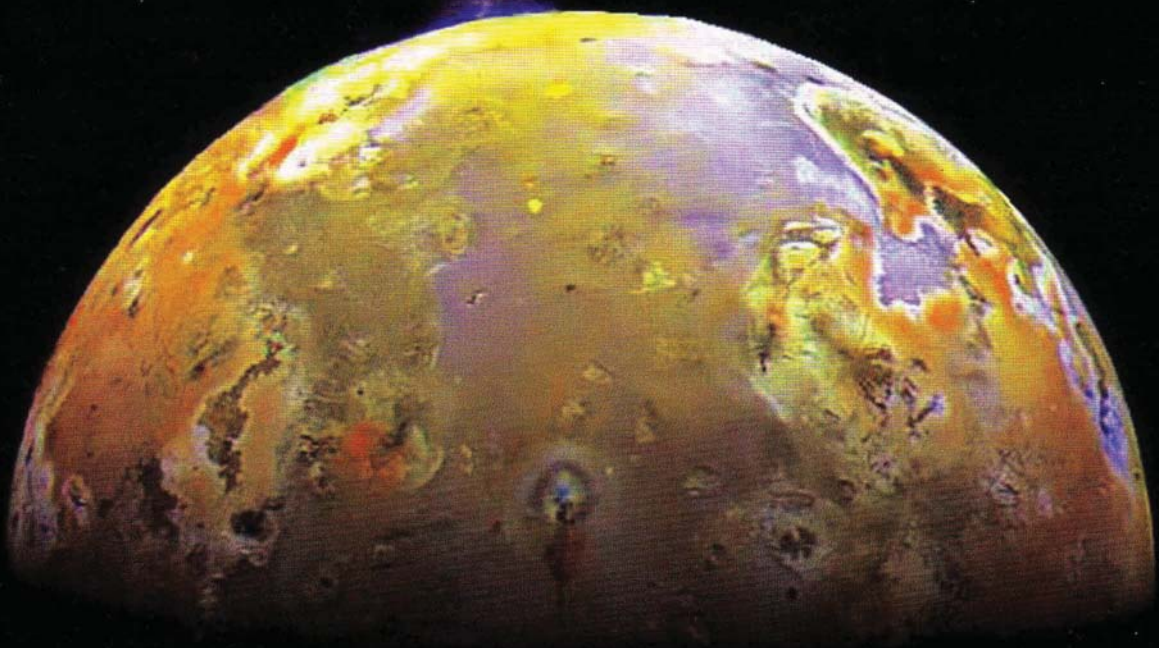
Die Ingenieure haben den Winkel auf 8,6 Grad berechnet. Bei einem steileren Anflug würde die Kapsel sofort verglühen, bei einem zu flachen Winkel würde sie zurückprallen.

Zwei Minuten lang muss der weißglühende Hitzeschild eine Temperatur von etwa 15 000 Grad aushalten. Die Reibung, die diese Hitze erzeugt, bremst die Kapsel ab.

Dann öffnet sich ein kleiner Schirm und verlangsamt den Sturz. Der ursprünglich 152 Kilogramm schwere Hitzeschild, von dem nun mehr als die Hälfte weggeschmolzen ist, fällt ab. Der Hauptschirm entfaltet sich. Alle sechs Instrumente des Moduls arbeiten jetzt.

182 Sekunden nach Eintritt in die Atmosphäre messen die Sensoren eine Temperatur von minus 145 Grad Celsius. 46 Sekunden später sendet die Kapsel erstmals Daten zur Muttersonde.

Das Tochtermodul durchquert einen weißen Dunstschleier aus gefrorenen Ammoniakkristallen und erreicht schließlich die „Oberfläche“ des Jupiters (weil Gasplaneten keine scharfe Grenze



Der Jupitermond Io ist etwas größer als der Erdenmond – und der geologisch aktivste Himmelskörper im gesamten Sonnensystem. Der Trabant ist übersät von brodelnden Vulkanen, die ihre Fontänen bis zu 280 Kilometer in die Höhe blasen (bläuliche Struktur oben im Bild)

zwischen festem Planetenkörper und gasförmiger Atmosphäre besitzen, haben manche Forscher jenen Bereich als „Oberfläche“ definiert, in dem ein Druck von 1 Bar herrscht – das entspricht dem Druck auf der Erde in Meereshöhe).

Nun sinkt es etwa 18 Kilometer tief durch eine rotbraune Wolkendecke aus Ammoniumhydrogensulfid. Die Temperatur steigt auf minus 80 Grad.

Etwa 40 Kilometer tiefer erwarten die Wissenschaftler eine dritte Wolkenschicht aus Wasserdampf. Hier liegt die Temperatur bei null bis plus 40 Grad: ein Bereich also, in dem Wassermoleküle zu Tröpfchen kondensieren und Nebel bilden könnten. Doch der Detektor findet keine Wassertröpfchen in den Wolken. Enthält die Jupiteratmosphäre weniger Wasserdampf als gedacht?

Die Forscher werden Monate und Jahre für die Interpretation der Daten brauchen. Später kommen sie zu dem Schluss, dass die Kapsel offenbar in ein Wolkenloch eingetaucht ist. Sie erreichte den Jupiter über einem sogenannten Hotspot, einem überdurchschnittlich warmen und trockenen Bereich.

Diese Wolkenlöcher finden sich zumeist in Äquatornähe und machen nur etwa ein Prozent der Jupiter-Atmosphäre aus, sind also sehr untypisch für den Planeten. Infrarotmessungen des Mutterschiffs Galileo bestätigen, dass überall sonst drei Wolkenschichten aus Ammoniak, Ammoniumhydrogensulfid und Wasserdampf übereinanderliegen.

Nur in dem Heißgebiet, durch das die Kapsel jetzt sinkt, fehlt die Schicht aus Wassermolekülen. So kann auch der Blitzdetektor im Umkreis von 100 Kilometern keine elektrischen Entladungen aufspüren. Lediglich in größerer Entfernung registriert er Zehntausende Blitze – elektrische Entladungen, die viel stärker als auf der Erde sind.

Ein heftiger Sturm zerrt nun an der Kapsel, der Wind braust bis zu 700 km/h schnell. Zugleich steigen Temperatur und Druck mit jedem Meter an.

Wahrscheinlich ist eine Wärmequelle im Inneren des Planeten die Ursache der Hitze und des Sturms: Sie lässt heiße Luft in der Äquatorialzone Jupiters

Seit Jahrhunderten tobt auf Jupiter ein Sturm

aufsteigen, wo sie zusätzlich von der Sonne erwärmt wird. Von dort strömt sie zu den Polen, kühlt ab und zirkuliert in größerer Tiefe wieder zum Äquator.

Weil der Jupiter aber sehr schnell rotiert, gelangen die Gase nicht direkt dorthin – die Nord-Süd-Strömung wird in Ost-West-Richtung abgelenkt.

Dadurch bilden sich mehrere „Zirkulationszellen“: dunkle Bänder mit fallender sowie hellere Zonen mit aufsteigender Luft, die sich um den Planeten winden und ihm sein charakteristisches Äußeres geben.

An den Rändern dieser Strömungszonen entstehen immer wieder starke Wirbelwinde – etwa der spektakuläre Große Rote Fleck, ein mehr als 30 000 Kilometer langes Oval, das von der Erde aus zu sehen ist.

Astronomen haben diesen größten Sturm des Sonnensystems schon im 17. Jahrhundert ausgemacht; mindestens seither tobt er über den Jupiter – wahrscheinlich aber schon viel länger.

Ein Rätsel umgibt noch immer die Quelle der heftigen Winde, die Hitze im Inneren des Jupiters. Vermutlich entsteht sie durch eine Kontraktion des Planeten: Er schrumpft ganz langsam unter der Einwirkung seiner eigenen Schwerkraft und setzt dabei Energie frei.

DAS TOCHTERMÓDUL von Galileo trudelt weiter an seinem Schirm hinab. Dann, nach 40 Minuten Messzeit, fällt der Heliummesser aus. Acht Minuten später, als es 110 Kilometer tief in der Atmosphäre schwebt, beträgt die Temperatur 100 Grad.

Auch Blitzdetektor und Massenspektrometer versagen nun den Dienst.

Um 00.05 Uhr – 58 Minuten nach Beginn der Aufzeichnungen in der At-

mosphäre – bricht plötzlich der Funkkontakt zur Muttersonde Galileo ab.

Zuletzt misst die Kapsel 142 Kilometer unter der Jupiter-„Oberfläche“ eine Hitze von 152 Grad Celsius und einen Druck von 24 Bar. Die Messgeräte haben einen Bereich von rund 160 Kilometern erfasst – nur den schmalen Rand der gesamten Atmosphäre.

Die Daten bestätigen, dass sich der Jupiter einst wie die Sonne aus dem Urnebel gebildet hat. Ähnlich dem Zentralgestirn besteht der Planet zu fast einem Viertel aus Helium und zu knapp drei Vierteln aus Wasserstoff.

Andere Elemente wie Sauerstoff, Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel, Phosphor oder Verbindungen wie Methan, Ammoniak und Wasser kommen dagegen nur in geringen Mengen vor.

Die chemische Zusammensetzung zeigt: Der Jupiter ähnelt der Sonne. Auch seine Masse – sie beträgt das 2,5-Fache aller übrigen Planeten und Asteroiden zusammen – erscheint gewaltig. Ist er womöglich ein verheimerter Stern?

Dazu aber reicht es bei all seiner Größe dann doch nicht: Der Jupiter besitzt nur ein Tausendstel der Masse unseres Zentralgestirns und müsste mindestens 70-mal schwerer sein, um ein nukleares Feuer in seinem Inneren zu entfachen.

Für die Erde indes ist es besser so. Denn gäbe es einen zweiten Stern in unserem Sonnensystem, hätte sich vielleicht niemals höheres Leben auf ihr entwickelt.

DIE KAPSEL sinkt weiter in die Tiefe. Eine halbe Stunde nach Ende der Datenübertragung schmilzt der Fallschirm, kurz darauf verglühen wohl auch sämtliche Aluminiumteile – die Außentemperatur beträgt nun 660 Grad.

Erst siebeneinhalb Stunden später geben die Komponenten aus Titan bei einer Temperatur von 1680 Grad nach. Und dann löst sich der Rest der Kapsel in einzelne Atome und Moleküle auf.

Gäbe es indes ein Material, das den extremen Bedingungen hier unten gewachsen wäre, so würde die Kapsel mit ihrem bisherigen Tempo von 160 km/h noch fast zwei Tage lang durch Gase

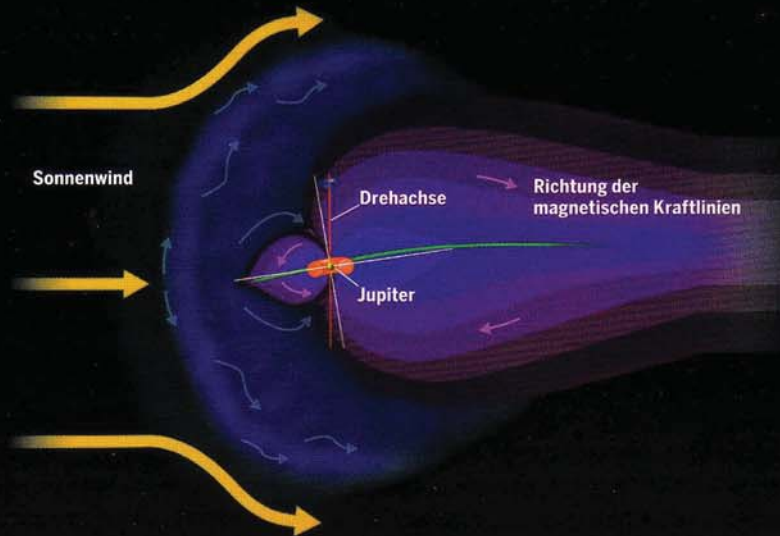
PROFIL JUPITER

Weshalb der Jupiter keine perfekte Kugel ist, wie weit sein gewaltiges Magnetfeld reicht, und wie sich die Wolkenbänder auf seiner Oberfläche bilden



DER ABGEFLACHTE RIESE

In weniger als zehn Stunden dreht sich der riesige Jupiter einmal um seine Achse. Durch die hohe Geschwindigkeit entstehen gewaltige Fliehkräfte, welche die Gasmassen am Äquator nach außen treiben. Dadurch ist der Planet an den Polen leicht abgeflacht

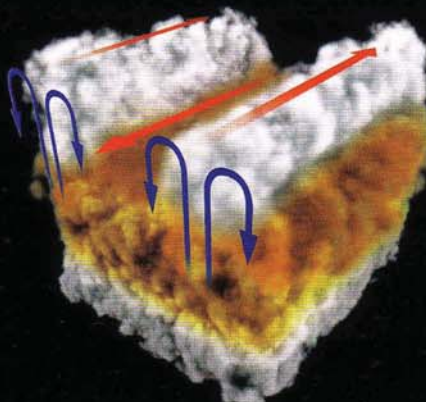


EIN RIESIGES MAGNETFELD

Im Inneren des Gasplaneten fließt in einer dicken Schicht metallischen Wasserstoffs elektrischer Strom. Dadurch wird ein enormes Magnetfeld (blau-violett) erzeugt. Am Äquator ist es 14-mal stärker als am Erdäquator. Der Sonnenwind (gelbe Pfeile) verformt die Magnetosphäre: Eine Art Bugwelle (oben links) und ein mehr als eine Milliarde Kilometer langer Schweif (oben rechts) bilden sich

DER PLANET DER WINDE

Wärmeströme (blaue Pfeile) aus dem Inneren lassen die Gase zirkulieren. Je nach Höhe bilden sich unterschiedliche Wolken: aus Wasser (unten), darüber braune Ammoniumsulfid-, außen Ammoniak-Wolken. Der Jupiter rotiert so schnell, dass die atmosphärischen Gase auf Bahnen (rote Pfeile) parallel zur Drehbewegung gelenkt werden. Der Planet erscheint daher gestreift



schweben, bis auf 7000 Kilometer Tiefe. Hier ist es 2000 Grad heiß. Dann würde sie eintauchen in flüssigen Wasserstoff (siehe auch Illustration Seite 119).

Knapp 44 Wegstunden später, bei 14000 Kilometern unter der Oberfläche und 5000 Grad Celsius, nimmt der Wasserstoff die Eigenschaften eines Metalls an. Elektrische Ströme fließen in dieser Schicht, sie wirken wie ein Dynamo und erzeugen das gewaltige Magnetfeld des Jupiters.

Zwölf Tage brauchte die Kapsel bei angenommen gleichbleibender Geschwindigkeit, um auch diesen metallischen Ring zu durchdringen.

Dann erreichte sie einen soliden Kern aus Fels, Metall und Wasserstoff, der wahrscheinlich 60000 Kilometer unterhalb der Oberfläche beginnt. Er ist im Verhältnis zum Rest des Jupiters eher klein proportioniert, hat aber etwa die achtfache Masse der Erde. 11 000 Kilometer müsste sich die Kapsel durch diese letzte und härteste Schicht bohren.

Dann erst wäre sie nach einer Reise von 71492 Kilometern im Mittelpunkt des Jupiters angelangt.

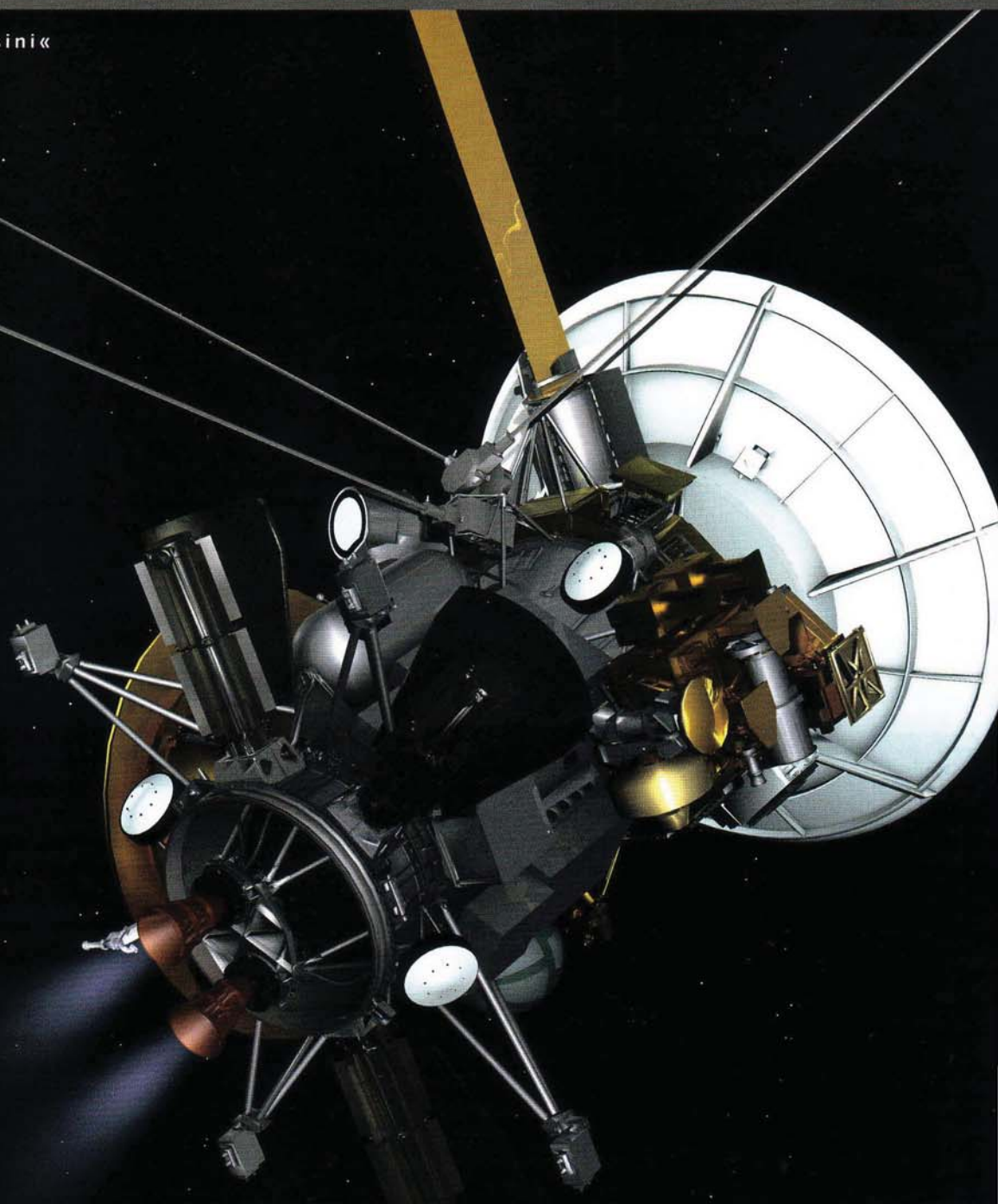
Doch eine solche Route ist nur im Gedankenexperiment möglich.

DAS MUTTERSCHIFF, die Raumsonde Galileo, kreist noch fast acht Jahre um den Jupiter – viel länger als ursprünglich geplant. In elliptischen Bahnen nähert sie sich immer wieder einigen der insgesamt 63 Monde an. Doch schließlich ist der Treibstoff fast aufgebraucht, hat die Weltraumstrahlung der Elektronik zu stark zugesetzt.

Damit Galileo nicht steuerungslos auf einen der Monde zustürzt und ihn womöglich mit irdischen Bakterien verseucht, lenkt das Bodenkontrollzentrum in Pasadena die Sonde gezielt in die Jupiter-Atmosphäre.

Dort verglüht sie am 21. September 2003 und wird – wie schon die kleine Messkapsel – ein Teil des Gasriesen. □

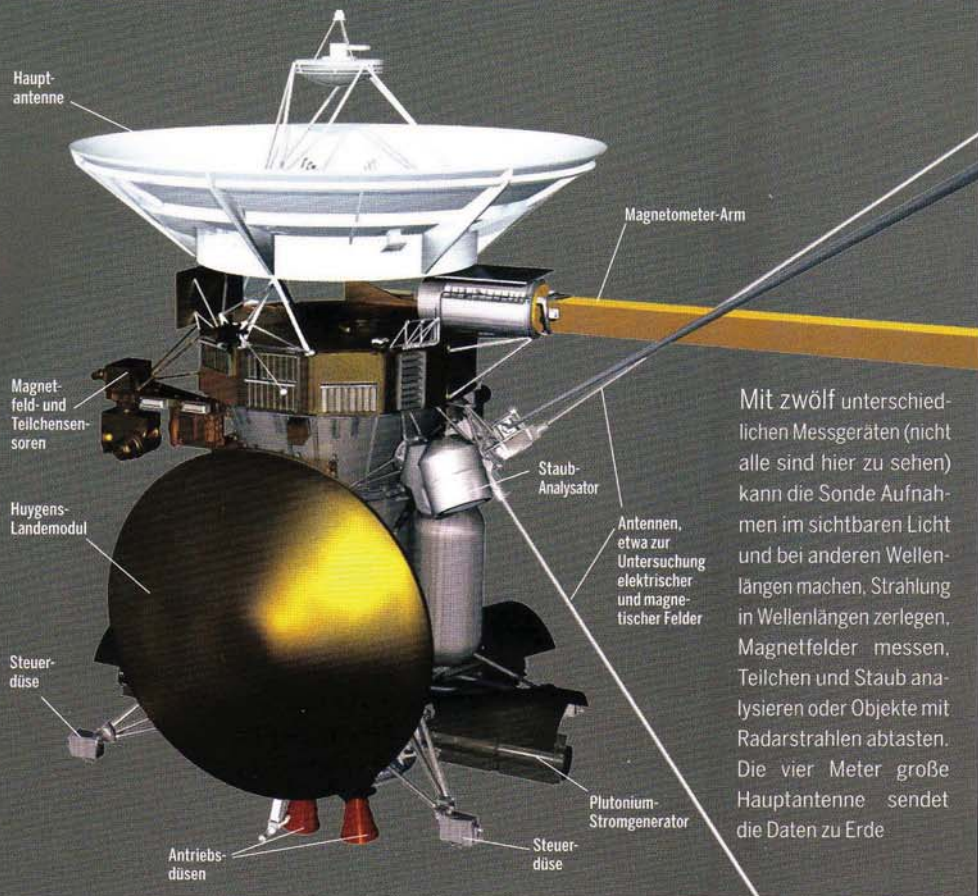
Dr. Ralf Berhorst, 42, ist Autor in Berlin und schreibt regelmäßig für GEOkompakt. Wissenschaftliche Beratung: **Prof. Dr. Gerhard Neukum**, Institut für Geologische Wissenschaften der Freien Universität Berlin.



Der **Späher** im Reich des Ringplaneten

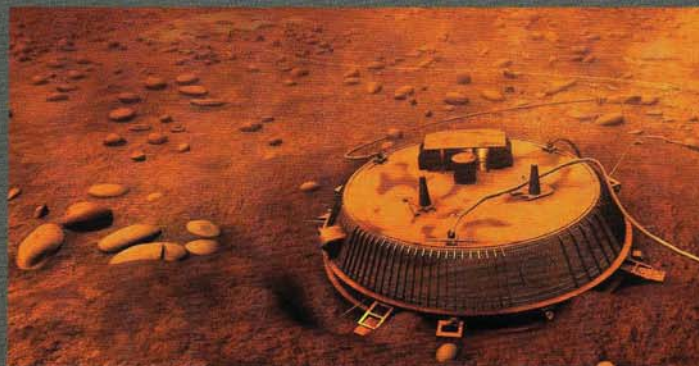
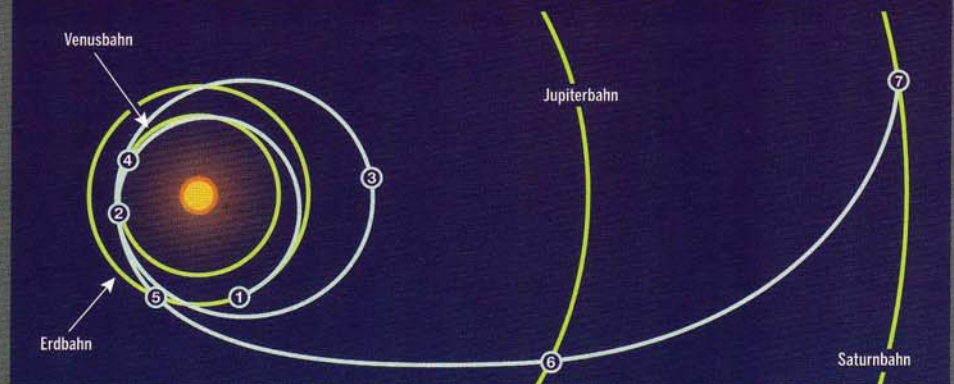
Hightech-Module wie die zum Saturn geschickte Sonde »Cassini« fliegen Milliarden Kilometer weit durch das All, um fremde Welten zu erforschen. Mit ihren hochspeziellen Sensoren vermögen sie weitaus mehr Informationen über einen Planeten zu sammeln, als es ein menschlicher Beobachter vor Ort je könnte

6,8 Meter lang, vier Meter breit und (mit Treibstoff) fast sechs Tonnen schwer: »Cassini« ist die größte Sonde, die jemals zu anderen Planeten geflogen ist. Sie wird von der Erde aus über mehrere Triebwerke gesteuert. Die Funksignale für Kurskorrekturen sind dabei rund anderthalb Stunden unterwegs, bis sie den Raumpäher erreichen.



Mit zwölf unterschiedlichen Messgeräten (nicht alle sind hier zu sehen) kann die Sonde Aufnahmen im sichtbaren Licht und bei anderen Wellenlängen machen, Strahlung in Wellenlängen zerlegen, Magnetfelder messen, Teilchen und Staub analysieren oder Objekte mit Radarstrahlen abtasten. Die vier Meter große Hauptantenne sendet die Daten zu Erde.


Um Treibstoff zu sparen, nutzte Cassini die Beschleunigungswirkung mehrerer Planeten, die die Sonde anzogen und ihre Geschwindigkeit erhöhten. So erklärt sich ihre komplizierte Flugbahn: Am 15. 10. 1997 von der Erde (1) gestartet, flog sie zunächst bis April 1998 in Richtung Venus (2). Im Dezember geriet die Sonde durch diesen Schwung weit in den Raum hinaus (3). Von dort stürzte sie bis Juni 1999 zurück zur Venus (4), passierte im August die Erde (5), erreichte im Dezember 2000 Jupiter (6) und schließlich am 1. 7. 2004 den Saturn (7).



Am Fallschirm sank das abgekoppelte Landemodul »Huygens« am 14. 1. 05 zum Saturnmond Titan herab (s. S. 126). Es entdeckte eine faszinierende Welt mit Wolken, Regen, Flüssen und Eis – die jedoch aus Methan und Ethan bestehen. Eisige minus 180 Grad herrschen dort an der Oberfläche.



Vor den Kameras der Sonde »Cassini«
löst sich der Reif um den Saturn in
100 000 Einzelringe auf – bestehend aus
unzähligen, teils zentimeterkleinen
Gesteins- und Eisbröckchen



Saturn

Reif aus Eis und Gestein

Kein anderer Planet hat ein derart auffälliges Ringsystem, keiner einen Mond, der so sehr der Ur-Erde ähnelt. Seine Stürme sind tausendfach energiereicher als auf der Erde, und im Inneren enthält er metallischen Wasserstoff. Der Saturn ist sicher der schönste aller Planeten – und voller Rätsel

Text: Dirk Liesemer



Als die Raumsonde „Cassini“ im Juni 2004 nach siebenjähriger Reise auf den Saturn zusteuert, kreisen die Eisringe gerade in einer schrägen Stellung zur Richtung des Sonnenlichts um den Planeten und teilen ihn deshalb in zwei Welten: Sie verschatten die Nordhalbkugel nahezu gänzlich. Nur durch eine schmale Lücke in den Ringen glänzt von unten noch die

Sonne und lässt eine ozeanblaue Lichtspur am Winterhimmel aufschimmern.

Auf der Südhalbkugel, wo Sommer herrscht, rotieren gewaltige Wolkenmassen. Zwei Stürme wühlen bereits seit Wochen die Atmosphäre auf, jeder misst 1000 Kilometer von Ost nach West. Aus Cassinis ferner Position

wirken sie wie dunkle Löcher in einer sandfarbenen marmorierten Marmor.

Nach und nach sichtet die Sonde die ersten Monde des Saturns: den geheimnisvoll verhüllten Titan, die kleineren Trabanten Dione und Mimas, den blendend weiß strahlenden Enceladus.

Die Kundschafterin erfasst die fernen Objekte mit ihren Sensoren, Antennen und Kameras. Die Messfühler solcher Sonden sind gleichsam in den Weltraum verlängerte Sinnesorgane des Menschen: künstliche Augen, Ohren und Nasen des *Homo sapiens*, die Botschaften aus Milliarden von Kilometern Entfernung auf die heimische Erde holen und eine Erkundung in den Abgründen des Alls zulassen, ohne dass ein Astronaut den Blauen Planeten verlassen muss.

Cassini ist eine der modernsten und größten dieser Sonden (siehe Seite 124). Sie soll als bisher erdfernster Satellit auf einer festen Umlaufbahn um den Saturn installiert werden, als einsamer Außenposten der Wissenschaft. An einem Ort, der knapp zehnmal so weit von der Sonne entfernt ist wie die Erde.

Am Abend des 30. Juni 2004 nähert sich die Sonde dem Giganten aus Gas. Mit 21000 km/h rast sie auf ihn zu, stetig von dessen Schwerkraft beschleunigt. Dann beginnt das problematische Manöver der Mission: Die Sonde muss sich vom Schwerfeld des Saturns einfangen lassen, um ihn fortan als Satellit umrunden zu können.

Cassini dreht sich, ihr Haupttriebwerk weist in Flugrichtung; dann beginnt es zu feuern. 96 Minuten lang wird so der Flug abgebremst – auf einem Kurs, der sie so nah wie nie wieder am Saturn vorbeiführt. Das Manöver ist heikel: Die Sonde könnte mit unbekannten Mini-Monden kollidieren oder in den Planeten stürzen und verglühen.

Gelingt das Vorhaben, dann wird Cassini die fantastische Gaswelt des Saturns aus allen Winkeln und Abständen erkunden, die komplexen Ringe studieren, die bizarren Eismonde erforschen.

Und sie wird ein kleines Landegerät namens „Huygens“ zu einem der faszinierendsten Trabanten des Sonnensystems schicken: dem Titan. Die Atmosphäre des von einem undurchsichtigen Schleier verhüllten Saturnmonds scheint der unseres Heimatplaneten ver-

blüffend zu ähneln – einer Atmosphäre, wie sie vor mehreren Jahrmilliarden auf der Erde existiert hat. Vielleicht lässt sich dort erahnen, unter welchen Bedingungen das Leben einst entstanden ist.

DIE ANKUNFT CASSINIS ist der vorläufige Höhepunkt einer Geschichte, die rund 400 Jahre zuvor in Florenz beginnt. 1610 beobachtet der berühmte Hofmathematiker Galileo Galilei den Saturn durch ein selbstgebautes Fernrohr und erkundet ihn damit erstmals wissenschaftlich.

Er erkennt ein scheibenförmiges Objekt mit merkwürdigen Anhängen. In einem Jahr sind sie zu sehen, im nächsten verschwunden. Vielleicht zwei „Henkel“? Oder Monde, einer links, einer rechts?

Es ist der Niederländer Christiaan Huygens, der das Phänomen als Erster richtig deutet. Er beobachtet den Saturn über eine längere Zeit, fertigt etliche Zeichnungen an und kommt 1656 zu einem revolutionären Schluss: Den Saturn umgibt ein „dünner, flacher Ring, der den Planeten nirgends berührt“.

Die Partikel in den Staubringen sind so klein wie die im Qualm einer Zigarette

Da sich dieser Ring in der Äquatorebene befindet, die gegenüber der Bahnebene, in der der Saturn um die Sonne kreist, geneigt ist, sieht ein Beobachter auf der Erde den Ring im Lauf eines Saturnjahres von verschiedenen Seiten.

Mal zeigt er sich schräg von oben, mal schräg von unten, mal von der Kante, was ihn fast unsichtbar macht. Und Huygens sichtet den ersten Saturnmond: Titan – größer als Merkur und kaum kleiner als der Mars.

Wenig später, 1675, erkennt der Pariser Sternenforscher Giovanni Domenico Cassini im Ring eine riesige Lücke – heute auf 4800 Kilometer Breite bestimmt. Und er sichtet vier weitere Monde. Immer bessere Teleskope erlauben mit

der Zeit ein immer genaueres Bild der Saturnwelt. So meinen die Astronomen nun drei einzelne Ringe zu erkennen.

Und seit Langem ahnen die Forscher, dass diese Ringe aus vielen kleinen Teilchen bestehen, doch beweisen kann dies 1895 erst der Pittsburgher Astronom James Keeler, der das von den Ringen reflektierte Sonnenlicht analysiert.

Schließlich eröffnen im 20. Jahrhundert die Raumspäher ganz neue Möglichkeiten, das All zu erkunden. Mitte der 1970er Jahre starten „Pioneer 11“ und zwei „Voyager“-Sonden zum äußeren Sonnensystem – dorthin, wo das Licht unseres Zentralgestirns langsam verdimmt.

Die übersendeten Bilder sind eine Sensation: Erstmals können die Menschen detaillierte Ansichten der fernen Gas- und Eisriesen bestaunen – so, als würden sie an ihnen vorbeifliegen.

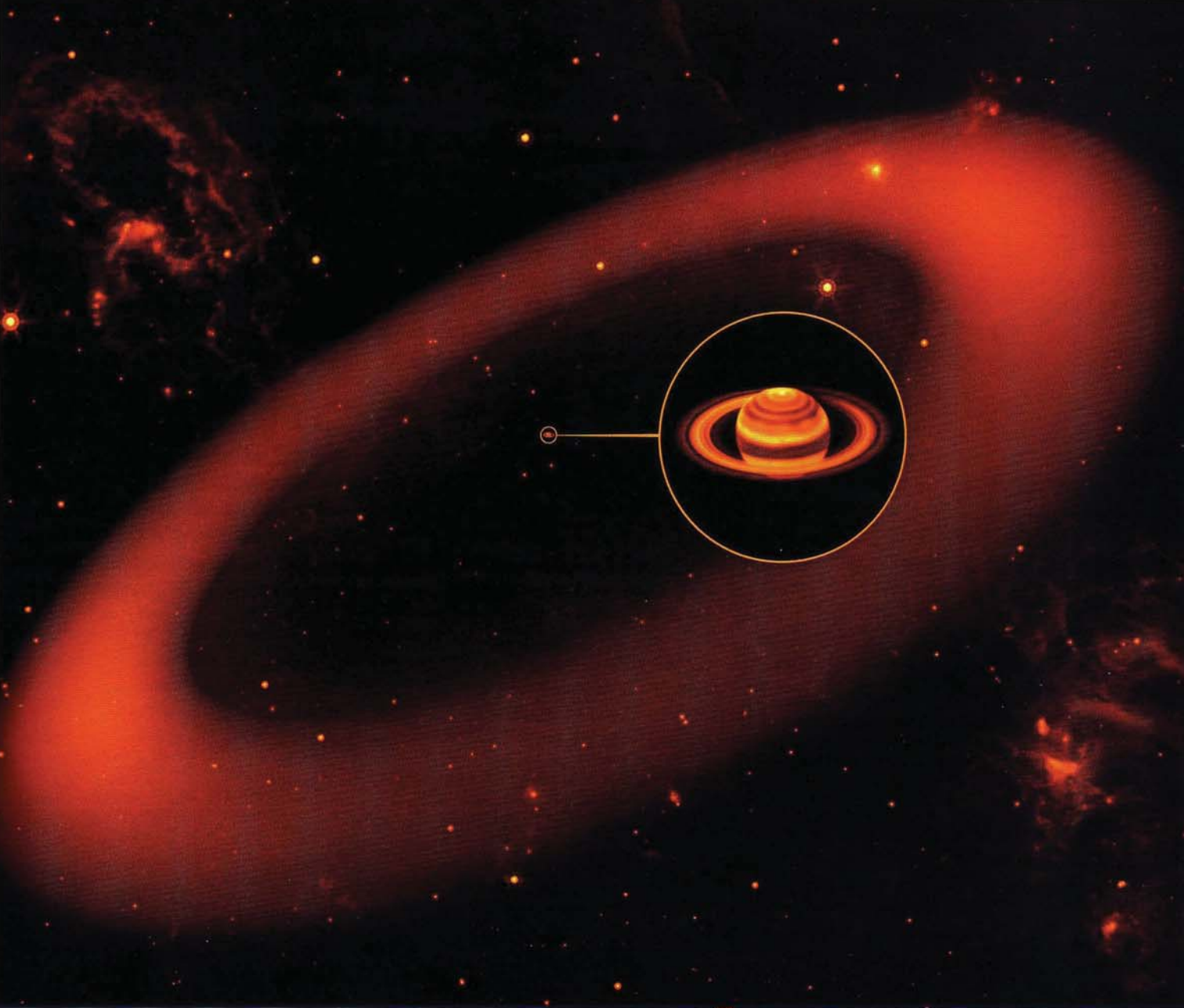
Am Saturn fotografieren die Sonden eisbedeckte und mit Kratern gespickte Monde. Manche der Trabanten treiben im Ringsystem mit: Pandora und Prometheus etwa begrenzen dort einen schmalen Reif.

Kein Trabant aber fasziniert mehr als der Titan. Als die Sonde „Voyager 1“ ihn im November 1980 passiert, registriert sie eine dichte Stickstoff-Atmosphäre, so dynamisch wie die irdische. Sie misst Temperaturen von minus 178 Grad Celsius und entdeckt Methan: ein Molekül aus Kohlenstoff und Wasserstoff, das dort fest, flüssig und gasförmig sein kann – wie Wasser auf der Erde.

Fortan spekulieren Forscher darüber, ob sich auf dem Titan möglicherweise Flüsse aus Methan schlängeln, Seen ausbreiten, vielleicht sogar Ozeane: Urzeitlabore des Lebens.

Einfachste Bausteine sind vorhanden; Voyager kann organische Moleküle nachweisen. Zudem dürfte das Sonnenlicht zur Erzeugung photochemischer Reaktionen ausreichen (entsprechend dem Photosyntheseprozess auf der Erde, mit dem Pflanzen Energie gewinnen). Wohl nur die Eiskälte könnte Leben verhindern, indem sie alle Prozesse erstarren lässt.

Auch über die mythenumwobenen Saturnringe liefern die Sonden unerwartete Daten: Die drei der Wissenschaft schon bekannten Ringe zerfallen vor



ihren Kameras in 100 000 Einzelringe, bestehend aus unzähligen Eis- und Gesteinsbrocken – manche so fein wie Körner, andere groß wie Felsen, die meisten wie Kieselsteine.

Die Ringe erstrecken sich über einen Durchmesser von rund 300 000 Kilometern; der Saturn samt seiner Ringe würde etwa drei Viertel des Abstands zwischen Erde und Mond ausfüllen.

Und die Kameras sichten drei Staubreine jenseits der klassischen Ringe; die meisten Partikel hier sind so winzig wie die im Qualm einer Zigarette.

Seit 1982 planen Weltraumforscher, eine Sonde ins Saturnsystem zu schicken, benannt nach Giovanni Domenico Cassini. Insgesamt 17 Staaten betei-

Einen gigantischen, im Infraroten leuchtenden Staubring um den Saturn registrierte das Weltraumteleskop »Spitzer« im Februar 2009. Mit 15 bis 25 Millionen Kilometer Durchmesser ist er der größte je entdeckte Ring um einen Planeten. Die Partikel stammen wahrscheinlich von dem Mond Phoebe, der in Ringdistanz den Saturn umkreist

gen sich an dem drei Milliarden Dollar teuren Projekt. 260 Wissenschaftler nehmen daran teil, 15 Jahre dauert die Vorbereitung. Die US-Raumfahrtbehörde NASA, die europäische ESA und die italienische ASI finanzieren das Vorhaben.

Doch Missionen zu anderen Planeten konkurrieren mit dem Saturn-Projekt: „Ulysses“ soll zur Sonne fliegen, „Giotto“

zum Halleyschen Kometen, der „Mars Pathfinder“ zum Roten Planeten.

Mehrfach steht Cassini vor dem Aus. Doch dann, im Herbst 1997, beginnt tatsächlich die siebenjährige Reise der Sonde: ein Jules-Verne-Abenteuer ins äußere Planetensystem, ein astronomisches Jahrhundertprojekt.

15. OKTOBER 1997. Cape Canaveral, Florida. Flutlicht erhellt die Startrampe. Noch vor Sonnenaufgang schießt eine Flamme aus den Triebwerken einer Träger Rakete und schwillt rasch an. Ein feuriger Schweif steigt auf und taucht jetzt in eine Kumuluswolke ein.

Ingenieure und Techniker sind erleichtert; denn einige Sonden explodier-



ten schon während des Starts, Dutzende verglühten in der Erdatmosphäre.

Cassini ist das größte interplanetarische Raumschiff aller Zeiten: groß wie ein Schulbus, mit seinem Treibstoff Hydrazin, einer Stickstoffverbindung, rund 5,7 Tonnen schwer. Zwölf Kilometer Kabel winden sich im Inneren.

Bestückt ist sie mit zwölf Instrumenten. Darunter sind Spektrometer (zum Messen von Radiowellen und zur Analyse von Gasen) sowie Kameras für sichtbares, Infrarot- und UV-Licht.

Der wie ein Schwamm durchlöchernte, unregelmäßig geformte Saturnmond Hyperion besteht wohl teilweise aus Eis – und ist im Inneren vermutlich porös

Die Sonde soll Staubströme messen, das Magnetfeld des Saturns ausloten und Partikel analysieren, die möglicherweise in Fontänen aus den Eismonden empor-sprühen. Sie besitzt ferner eine vier Meter große Parabolantenne, die sie für die Datenübertragung und als Radarsensor einsetzt: Sie strahlt damit Radioimpulse

ab, um dann Echos aufzuzeichnen, die von festen Körpern reflektiert werden.

Das seitlich angekoppelte Landemodul Huygens verfügt über sechs weitere Analysegeräte, eines davon mit Mikrofon, um die Geräusche von Blitzen, Regen und Winden aufzuzeichnen, sowie Instrumente zur Bestimmung der Temperatur, des Drucks und der Zusammensetzung der Titan-Atmosphäre.

Die Sonde muss 1,5 Milliarden Kilometer bis zum Saturn reisen. Deshalb ist sie mit einem aufwendigen Kommuni-

kationssystem ausgerüstet, mit großen Mengen an chemischen Antriebsstoffen für die Triebwerke sowie Spezialbatterien, die die Zerfallswärme von Plutonium in elektrische Energie umwandeln.

Die Trägerrakete, die Cassini ins All befördert, beschleunigt auf mehr als 40 320 km/h – jene „Fluchtgeschwindigkeit“, die nötig ist, um der Erdanziehung zu entkommen. Noch im Aufstieg wendet sich die Sonde gen Osten und entschwindet in den Weltraum, wo sie sich bald von der Trägerrakete löst.

Dann schlägt sie einen langen, spiralförmigen Weg ein, denn mit ihren 5,7 Tonnen Masse würde sie zu viel Treibstoff verbrauchen, wollte sie ihr Missionsziel auf direktem Weg erreichen.

Um den notwendigen Schub zu erhalten, begibt sie sich zunächst auf einen spiralförmigen Pfad in das innere Sonnensystem (siehe Seite 125). Denn sobald sich Cassini dem Gravitationsfeld eines Planeten nähert, wird ihre Flugbahn abgelenkt. Dabei überträgt der Planet einen winzigen Bruchteil seiner Bewegungsenergie auf die Sonde, deren Geschwindigkeit so zunimmt – Cassini verbraucht dabei nicht einen Tropfen Treibstoff. Sie passiert auf ihrem Pfad zweimal die sonnennahe Venus.

Als sie im Sommer 1999 an der Erde vorbeifliegt, katapultiert sie deren Kraft auf fast 70 000 km/h. Sie schießt durch den Asteroidengürtel zum Jupiter, den sie sechs Monate lang beobachtet – und der ihr ebenfalls neuen Schwung für den weiteren Weg verleiht.

Als die Sonde im Herbst 2000 Jupiter erreicht, wird der Gasplanet bereits seit einigen Jahren vom Satelliten Galileo umkreist. Seine Daten deuten auf einen Ozean unter der Eisoberfläche eines Mondes, auf unterirdische Salzwasserseen bei anderen. Möglich, dass es dort mikrobielles Leben gibt.

Nun erkunden zum ersten Mal zwei Sonden zugleich den Planeten. Sie beobachten, wie der Sonnenwind leuchtend blaue Polarlichter entfacht und messen präzise Jupiters ungewöhnlich unsymmetrisches Magnetfeld aus, das vom Sonnenwind mitgeformt wird.

Mit einer 20-Watt-Antenne funkt Cassini ihre Daten zur Erde. Dort fangen sie die riesigen Parabolantennen des Deep Space Network der NASA auf.

Damit der Kontakt zu den Sonden nicht abreißt, sind die Antennen über den Globus verteilt: in der kalifornischen Mojave-Wüste, nahe Madrid sowie bei Canberra, Australien.

Vom Jupiter aus reist Cassini weitere drei Jahre durchs All zum Saturn. Galileo hingegen schließt seine Mission ab und stürzt in den Jupiter (siehe Seite 116).

11. JUNI 2004. Ankunft im Saturnsystem. Drei Wochen bevor die Sonde in den Orbit des Planeten einschwenkt, passiert sie einen der äußeren Monde, der auf merkwürdiger Bahn um den Saturn kreist.

Der Trabant Phoebe, kaum mehr als ein eisiger Brocken, hat einen Durchmesser von 220 Kilometern. Krater zerfurchen seine Oberfläche. Geformt ist er aus Eis und uraltem Gestein. In der Frühzeit des Sonnensystems hat der Saturn ihn vermutlich auf seine neue Bahn gezwungen; er rotiert genau entgegen der Richtung der meisten anderen Saturnmonde um den Planeten.

Einige Tage vor dem Orbitmanöver, mit dem Cassini in eine Umlaufbahn um den Saturn eintauchen soll, richtet die Sonde die große Antenne zur Erde aus. Die Aktivitäten ihrer Instrumente sind auf ein Minimum reduziert. Nichts soll das folgende Manöver gefährden.

Am Äquator dreht sich der Saturn **schneller** als an den **Polen**

30. JUNI. Cassini zündet die Triebwerke: Die Sonde bremst nun 96,4 Minuten lang ab und reduziert ihre Geschwindigkeit um 2245 km/h auf knapp 19 000 km/h. Die Sonde funkt die ersten Manöverdaten zur Erde – von einer Position nördlich der Ringebene.

Es dauert 84 Minuten, ehe ihre Daten die Erde erreichen. Die Antennenstation in Canberra fängt sie auf und leitet sie nach Pasadena, Kalifornien. Aufmerksam blicken die Flugüberwacher dort auf ih-

re Bildschirme, als an diesem Abend um 19.36 Uhr kalifornischer Zeit die ersten Daten vom Bremsmanöver eintreffen.

Plötzlich: merkwürdige Geräusche. So, als prasselten Hagelkörner auf ein Blechdach. Staub kollidiert mit der Sonde, 700 Eis- und Schmutzpartikel in der Sekunde. Dann taucht Cassini, nur 19 980 Kilometer von den Wolkenspitzen des Saturns entfernt, in eine stark elliptische Umlaufbahn ein.

21.12 Uhr, Jubel in Pasadena: Cassini kreist als erster künstlicher Satellit um den Saturn. Die Sonde richtet sich zur Erde aus, aktiviert die Kommunikation. Ein Systemcheck folgt. Ein paarmal zünden die Triebwerke, um die Sonde auf immer engere Flugbahnen um den Planeten zu zwingen.

Aus einmaliger Position nimmt sie die ersten detaillierten Bilder der Ringe auf, 61 Fotos von Dichtewellen innerhalb der Ringe, geschwungenen Ringkanten, wärmeren und kälteren Regionen und Partikeln, die sich mancherorts stauen.

Jenseits der Ringe registriert ihr spezielles Messinstrument für kleinste Teilchen erstmals eine riesige, blasenähnliche Gaswolke, die sich bis zum fernen Mond Titan erstreckt: hervorgehoben und geformt durch das Magnetfeld des Saturns.

Nun beginnen 76 Umrundungen. Jede ist genau geplant. Cassini soll mindestens bis Sommer 2008 das Saturnsystem erkunden – eine Verlängerung nicht ausgeschlossen. Die Sonde richtet ihre Sensoren mal mehr auf die Monde aus, mal mehr auf die Ringe, dann wieder vor allem auf den Saturn.

Ständig wechselt sie ihre Bahn und ihren Flugwinkel, um das gesamte Saturnsystem aus möglichst vielen Perspektiven zu erfassen – macht Zehntausende Fotos und sammelt mit all ihren Instrumenten Abermillionen Informationen. Ein planetares Puzzle entsteht.

MITTE SEPTEMBER 2004, Saturn. Ein Orkan aus Gaswolken flammt auf, rast auf der „Sturmstraße“ genannten Bahn im Süden des Planeten, die Unwetter auf dem Planeten häufig nehmen. Ein Ungeheuer, das über dem Planeten wütet, von den Forschern „Drachenturm“ getauft.

Schon „Voyager“ hat solche Stürme fotografiert und andere seltsame Phä-



nomene erfasst, etwa gigantische Ausbrüche von Radiowellen. Sie ähneln jenen, die irdische Gewitter hervorbringen – nur sind sie auf dem Saturn viele tausendmal energiereicher (im Jahr 2009 wird solch ein Monstrum mehr als acht Monate lang toben).

Cassini entdeckt, dass es zu diesen Eruptionen kommt, sobald sich der Drachensturm auf die Nachtseite des Saturns begibt. Im Sonnenlicht aber stoppen sie plötzlich. Ein Schauspiel so regelmäßig wie rätselhaft.

Vermutlich besteht der Saturn aus einem Gesteinskern, der umgeben ist von einem Mantel metallischen Wasserstoffs. Ein extrem hoher Druck, hervorgerufen durch die eigene Schwerkraft, lastet auf dem Gas und bewirkt, dass der Wasserstoff dort einen metallartigen Zustand annimmt und so elektrisch leitfähig wird.

Auf dieser Schicht liegt eine Schale aus flüssigem, molekularem Wasserstoff (vermischt mit einem geringen Anteil Helium), der nach außen hin langsam gasförmig wird – also ohne eine eindeutige Grenzschicht in die Atmosphäre übergeht. Deshalb fehlt dem Saturn eine feste Oberfläche, weshalb die Um-

Saturn, hier mit den Monden Tethys und Dione, zeigt weniger Kontrast als Jupiter – vielleicht, weil die Wolkenobergrenze kälter ist und die Wolken dicker sind

laufzeit einer vollständigen Rotation so schwierig zu bestimmen ist.

Und: Am Äquator dreht sich die Gashülseschneller als an den Polen.

Der Saturn ist ein seltsamer Planet: Er strahlt doppelt so viel Energie ab, wie er von der Sonne erhält. Wie und wo aber entsteht diese Energie?

Mit 20000 Grad Celsius glüht es im Inneren drei- bis viermal heißer als auf der Oberfläche der Sonne. Und ein unvorstellbarer Druck herrscht im Saturn: Die enorme Schwerkraft des Planeten, hervorgerufen durch seine große Masse, presst die Materie gewaltig zusammen – im Zentrum vermutlich 70 Millionen Mal so massiv, wie die irdische Atmosphäre auf der Erdoberfläche lastet. Es ist eine Welt aus Gas und Hitze und Druck.

Das Rätsel um die unbekannte Energiequelle des Saturns wird erst 2009 gelöst. Ein Team der Universität Rostock schließt zahlreiche Rechner zusammen, um aufwendige molekular-dynamische Simulationen durchzuspielen.

Ergebnis: Offenbar ändern sich unter den besonderen Verhältnissen im Saturn die Eigenschaften der Materie dramatisch. Ab einem gewissen Druck mischen sich bei den im Inneren herrschenden Temperaturen Helium und Wasserstoff nicht mehr. Die Stoffe trennen sich, und die Helium-Tröpfchen sinken in tiefere Schichten – ein Vorgang, bei dem sehr viel Energie frei wird.

WINTER 2004. Als Cassini den Saturn das dritte Mal umrundet, beginnt eines der einzigartigsten Abenteuer in der Geschichte der Raumfahrt: die Landung der Sonde Huygens auf dem Titan.

Forschungsgeräte sind zwar schon auf unserem Mond, der Venus und dem Mars gelandet. Nun aber soll ein Trabant erkundet werden, der knapp zehnmal weiter von der Sonne entfernt ist als die Erde.

Am 25. Dezember wird Huygens entkoppelt. Das von der ESA gebaute Modul schießt vier Millionen Kilometer weit ohne Antrieb und Steuerung zum Titan, wie ein Pfeil auf den Punkt einer Zielscheibe. Cassini richtet seine Hauptantenne zum Modul hin aus, um dessen Daten zu empfangen – und sie später weiter zur Erde zu funken.

Nach drei Wochen erreicht Huygens den Mond. Hunderte Forscher beobachten den Titan durch ihre Teleskope. Sie wollen wissen, welche Bedingungen dort herrschen, wenn das Landemodul in die Atmosphäre eintritt.

Huygens soll durch einen dichten, undurchsichtigen Schleier aus Stickstoff, Methan und Argon gleiten. Kein Forscher weiß, was sich darunter verbirgt. Das Abenteuer könnte in einem

Am Boden des
Titans herrscht
ein **Geruch**
wie aus **irdischen**
Ölraffinerien

Ozean aus Kohlenwasserstoffen enden, etwa aus Ethan, oder auf harschem, schneebedecktem Gelände.

14. JANUAR 2005. Abstieg zum Titan. Während am frühen Morgen die ESA-Wissenschaftler in Darmstadt auf erste Funksignale warten, beginnt das Manöver von Huygens nach präzisiertem Plan.

5 Uhr 41' 18" mitteleuropäischer Zeit: Die Zeitschaltuhr an der Sonde weckt knapp viereinhalb Stunden vor ihrem Eintritt in die Atmosphäre die Batterien, Sensoren und anderen Bordinstrumente. Sie müssen vorgewärmt werden.

10 Uhr 05' 53". Einige Sekunden früher als erwartet erreicht Huygens die in einem stumpfen Orange schimmernde Atmosphäre des Titans. In 1270 Kilometer Höhe schießt das Modul mit 22-facher Schallgeschwindigkeit in die Dunsthülle. Der Hitzeschild beginnt zu glühen.

10 Uhr 10' 23". Der Hauptfallschirm wird pyrotechnisch ausgelöst, was den Sturzflug jäh bremst. Als kurz darauf die 0,6-fache Schallgeschwindigkeit erreicht ist, löst sich der Hitzeschild.

Die Instrumente beginnen zu arbeiten: Sie registrieren feinste Schwebeteilchen, einen Geruch wie aus irdischen

linien, tiefe Canyons, ausgewaschene und verästelte Flusstäler, Hunderte Meter hohe Berge, Kanäle, durch die anscheinend flüssiges Methan geronnen ist.

Dann, in 700 Meter Höhe, schaltet sich ihre Weißlichtlampe an, die bis hinunter zur Oberfläche leuchtet. Huygens nähert sich mit knapp 20 km/h einem flachen, dunklen Gelände – wohl ein früheres, sehr breites Flussbett oder der Grund eines ausgetrockneten Sees. Nicht weit entfernt breitet sich ein helles, eisiges, zerfurchtes Terrain aus.

12 Uhr 38' 11". Huygens landet auf weichem Untergrund. Methan zischt dampfend auf, denn die Hitze der Maschine erwärmt den Boden. Gäbe es Sauerstoff in der Luft des Titans, würde jetzt ein einziger Funke genügen, um den gesamten Mond mit seinen Methanflüssen und methangetränkten Böden in Flammen aufgehen zu lassen.

Im Zwielficht, das einem Tausendstel der irdischen Tageshelligkeit entspricht, sichten die Kameras eingesunkene Steinchen, vermutlich aus steinhartem Wassereis.

Temperatur: minus 179 Grad Celsius. Von Methan- und Ethandampf erzeugte Luftfeuchtigkeit: 45 Prozent. Mit einem Druck wie auf dem Grund eines

13 Uhr 50' 24". Cassini zeichnet bis zu dieser Sekunde alle Daten von Huygens auf. Darunter die Analysen des aufsteigenden Dampfes, in dem Benzol, Kohlendioxid, Dicyan entdeckt werden.

Die Stoffe deuten auf chemische Prozesse in oder auf der Oberfläche hin, denn in der Atmosphäre kamen sie nicht vor. Jetzt aber driftet Cassini jenseits des Titan-Horizonts. Huygens sendet weiter, bis die Batterien zur Neige gehen.

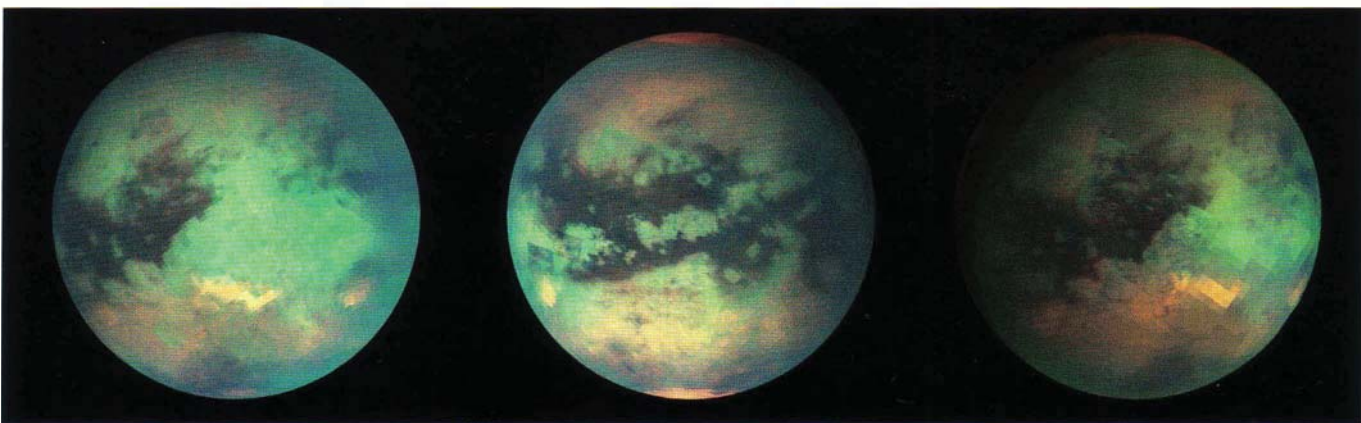
15.53 Uhr. Ungefähr zu dieser Zeit schickt Huygens das letzte Signal. Rund eine Stunde später wird es von Radioteleskopen auf der Erde aufgezeichnet; es klingt wie das Freizeichen im Telefon, eine Information enthält es nicht mehr.

Kurz darauf versiegen die letzten Batteriekraft des Moduls – Huygens verstummt für immer.

Und nicht ein Bit der zur Erde gefunkten Daten enthält einen Hinweis auf von den Forschern erhoffte Ozeane.

Aber wo befindet sich das Landemodul überhaupt? Stürme könnten es Hunderte Kilometer mitgerissen haben. Zwei Jahre lang rekonstruiert ein Forscherteam, wie sich die Starkwinde auf die Flugbahn ausgewirkt haben.

Dann ist man sich sicher: Huygens liegt auf Position 10,33 Grad Süd,



Erdähnlich wirkt der Mond Titan auf diesen Infrarotbildern. Tatsächlich gibt es dort Wolken, Regen und Flüsse – allerdings aus Methan. Und es ist bitterkalt

Ölraffinerien sowie Radiowellen, die von Seen unter der Oberfläche des Mondes stammen könnten.

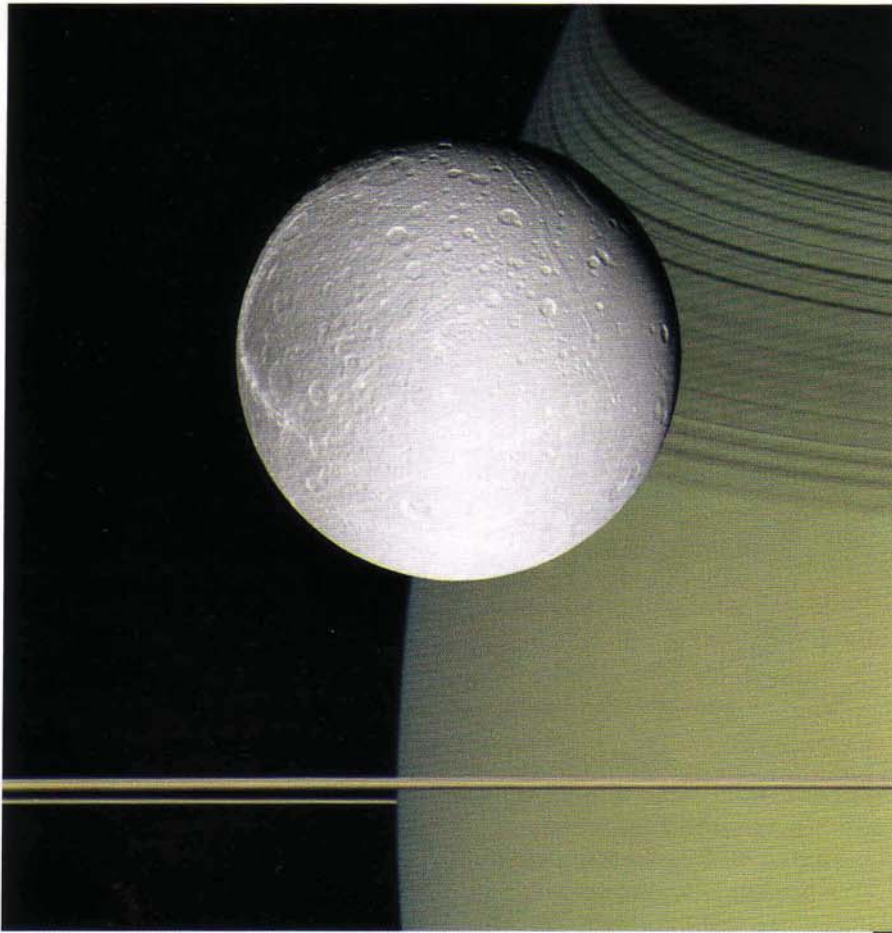
10 Uhr 42' 17". Der Radarhöhenmesser springt an. 60 Kilometer über dem Boden herrscht plötzlich Windstille. In 40 Kilometer Höhe leuchtet sich der smogartige Schleier. Die Sonde fotografiert eine spektakuläre Landschaft: Küsten-

Schwimmbads lastet die Atmosphäre auf dem Titan. Sie ist so dicht und die Gravitationskraft so gering, dass Menschen hier allein mit ihrer Muskelkraft fliegen könnten.

167,68 Grad Ost – also in einer Region knapp südlich des Titan-Äquators.

Es ist jetzt an Cassini: Sie wird noch viele Male den Titan passieren und könnte dabei Meere sichten.

27. NOVEMBER 2005. Die Sonde schickt Schwarzweißfotos vom kleinen Eismond Enceladus, der zu fast 100 Prozent



Über der schmalen Kante der Saturnringe (rechts oben deren Schatten) ist die von Kratern zernarbte Oberfläche des Eismondes Dione zu erkennen

das Sonnenlicht reflektiert – so stark wie kein anderes Objekt unseres Planetensystems. Seit Jahren wird gerätselt, ob es auf ihm möglicherweise Geysire gibt, die Eispartikel aus dem Inneren des Mondes kilometerweit ausstoßen – Voyager-Fotos lassen darauf schließen.

Doch von Pol zu Pol misst der Himmelskörper nur 500 Kilometer (Titan hat einen zehnfach größeren Durchmesser); eigentlich ist er zu klein, um geologisch aktiv zu sein.

Am Südpol sieht die Sonde eine unvergleichliche Landschaft: von einem Bergring begrenzt, kraterlos, aber von tiefen parallelen Gräben durchzogen, die jäh abknicken. Diese „Tigerstreifen“ erstrecken sich über ein Gebiet mit 130 Kilometer Durchmesser.

Sie sind ungewöhnlich warm und strahlen Energie mit einer Leistung von 60 Watt pro Quadratmeter ab (im Erdwärmegebiet des Yellowstone-Nationalparks werden nur 2,5 Watt je Quadratmeter gemessen). Plötzlich registriert der Staubanalysator im Flug winzige

Partikel; andere Instrumente „riechen“ Wasserdampf, Spuren von Methan, Stickstoff, Kohlendioxid – die Sonde ist soeben durch eine dünne Wolke gerast.

Dann die Sensation: Aus mehr als einem Dutzend Fontänen schießen feine Eispartikel empor und vereinigen sich über dem Südpol zu einer flammenförmigen Wolke. Die meisten schneiden auf den Mond zurück, nur wenige rasen so schnell, dass sie auf eine Bahn um den Saturn schwenken und einen äußeren Ring formen.

Dieser Eisvulkanismus macht Enceladus zum vierten heute noch geologisch aktiven Ort des Sonnensystems – nach der Erde, dem Saturnmond Io und dem Neptunmond Triton.

Vermutlich besteht der Mond aus einem Gesteinskern, den ein dicker Eismantel umhüllt. Während Enceladus den Saturn auf einer elliptischen Bahn

umrundet, wirkt die Schwerkraft des Planeten mal stärker, mal schwächer. Dabei entstehen Gezeiten Spannungen, die die Eiskruste aufreißen lassen und das Innere des Mondes erwärmen: Eisbrocken verschieben sich unter der Oberfläche und an den Rissen, sie reiben aneinander und erzeugen so Wärme. Der Saturn knetet mit seiner Gravitationskraft den kleinen Mond also regelrecht durch.

Allerdings reichen diese Himmelskräfte nicht aus, um die Eisfontänen zu erzeugen. Woher kommt diese Energie?

Um das zu klären, müsste Cassini direkt durch die Fontänen fliegen. Doch eine solche Passage steht erst im Frühjahr 2008 an. Zu kompliziert sind die Flugbahnen, zu lange schon im Voraus bestimmt, als dass sie kurzfristig geändert werden könnten.

4. DEZEMBER 2007. Knapp drei Jahre nach der Huygens-Mission gibt es neue Erkenntnisse über den Titan: Cassinis Infrarot-Spektrometer bildet einen dunklen Fleck am Südpol des Mondes endlich präzise ab. Nun kann ein Team um den Berliner Ralf Jaumann belegen: Der riesige Fleck ist ein See, gefüllt mit flüssigem Ethan und vermutlich weiteren Kohlenwasserstoffen; gewissermaßen ein See aus flüssigem Erdgas.

Weitere 75 dunkle Areale, jeweils zwischen drei und 70 Kilometer breit, entdeckt Cassini auch in der nördlichen Hemisphäre. Eine Seenplatte? Einige dieser Gebiete scheinen teilweise trocken, andere mit Flüssigkeit gefüllt zu sein. Oder sind die Areale nur glatte, dunkel schimmernde Eisflächen?

Manchen Forschern erscheint der Titan immer erdähnlicher – nur dass auf dem viel kälteren Saturnmond die Elemente Ethan und Methan die Rolle des Wassers einnehmen. Die Wissenschaftler erkennen ein früheres Gewässernetz und leere Flusstäler.

In der leuchtend hellen Region Xanadu, groß wie Australien, haben Wind, Regen und Flüsse die Täler, Hügel und Berge geformt.

Mancherorts wirkten anscheinend ähnliche Prozesse wie in der namibischen Wüste, deren Dünen in einem besonderen Abstand zueinander stehen. Und wie die Erde ist der Titan nur von wenigen Meteoritenkratern zernarbt.

Aber welche Unterschiede! Der „Sand“ auf dem Titan entsteht vermutlich, wenn winzige organische Partikel aus dem smogähnlichen Nebel rieseln – Schwebeteilchen aus Kohlenwasserstoffen, zehnmillionenmal kleiner als ein gewöhnliches Sandkorn. Erst am Boden verklumpen sie langsam zu sandgroßen, dunkelbraunen Körnern.

12. MÄRZ 2008. Eisfontänen sprühen aus den Tigerstreifen am Südpol des Saturn-Mondes Enceladus, schießen mit etwa 400 Metern in der Sekunde empor. Feinste Eispartikel, nicht dicker als menschliches Haar, zerstäuben in der Höhe.

Über den Tigerstreifen misst Cassini erstaunliche Temperaturen: minus 93 Grad Celsius. Das ist 115 Grad wärmer als anderswo auf dem Mond.

Und als die Sonde durch die Fontänen fliegt, registriert sie organische Substanzen, wie es sie auch auf Kometen gibt – und einige davon in 20-mal höherer Konzentration als erwartet.

Das Rätsel der Eisfontänen erklären Forscher mit einem Untergrundsee aus flüssigem Wasser.

Wenn dieser in Teilen gefriert, dehnt er sich aus, presst so Wasser durch die Eiskruste nach oben und nimmt dabei Wärme aus dem Inneren mit.

Am **Südpol** des Mondes entdeckt die Sonde **einen** **See** aus Ethan

Wo immer eine Spalte an der Oberfläche aufbricht, zischt das Wasser (das auf dem Weg dorthin abkühlt) in Form von Dampf und Eispartikeln heraus.

Sollte es den See tatsächlich geben, dann birgt der Mond alles, was das Leben braucht: überschüssige Energie, flüssiges Wasser und organische Substanzen.

Derart unzugängliche Ökosysteme wie auf Enceladus finden sich auch auf der Erde: etwa in einer südafrikanischen Mine, wo radioaktiver Zerfall die Ener-

gie liefert; in vulkanischen Bergen am Columbia River; und an den Idaho Falls in den USA, wo unterschiedliches Gestein chemisch miteinander reagiert.

Und überall dort existiert Leben, in Form von speziellen Mikroorganismen, den Archaeen. In solch tiefen Schichten ernähren sie sich etwa von Wasserstoff und Kohlendioxid und produzieren mit ihrem Stoffwechsel Methan.

Mögliches Leben auf Enceladus könnte also eines Tages aus einer Uruppe organischen Materials hervorgehen. Gespeist von einer unterirdischen Energiequelle, würden sich aus diesen Stoffen zunächst Aminosäuren und weitere organische Substanzen bilden, bis daraus schließlich komplexe Molekülverbände entstünden, die sich selbst vervielfältigen könnten.

30. JUNI 2008. Der erste Teil der Cassini-Mission endet. Seit vier Jahren schickt die Sonde täglich Daten, bis dahin 140 000 Aufnahmen. Nur drei Instrumente haben kleinere Defekte.

Nun beginnt der zweite Teil der Mission, „Equinox“, zu Deutsch „Tagundnachtgleiche“. Bis September 2010 soll die Sonde 60 Mal den Saturn umrunden, mehr als zwei Dutzend Mal Titan passieren, sieben Mal Enceladus.

Welch eine Science-Fiction-Welt hat die Sonde bis dahin schon enthüllt! Sie ist durch Eisfontänen gefolgt, hat gar einen See gesichtet. Sie fand erstmals einen Ring, der einen Mond umgibt: Brocken aus Eis und Gestein umkreisen Rhea. Und entdeckte, dass Trabanten auf ihren Bahnen neue Ringe hervorbringen, wenn murmelgroße Himmelskörper auf ihnen einschlagen und Material aufstaubt.

Langsam setzt sich das planetarische Puzzle des Saturns zusammen. Als Cassini 1997 startete, waren 18 Monde bekannt, bei ihrer Ankunft gab es schon 31, heute sind es 61.

Aber viele Rätsel bleiben: Weshalb verliert der Titan nicht seine Atmosphäre? Denn wie dem Mars fehlt dem Mond ein Magnetfeld, das seine Atmosphäre davor schützen würde, vom Sonnenwind fortgeweht zu werden.

Woher kommen die Gase, welche die Titan-Atmosphäre speisen? Wie erklärt sich der merkwürdige, 13 Kilometer

BILDNACHWEIS/COPYRIGHT-VERMERKE

Anordnung im Layout: l. = links, r. = rechts, o. = oben, m. = Mitte, u. = unten

Titel: Jochen Stuhmann für GEO kompakt

Editorial: Werner Bartsch für GEOkompakt: 3 o.; Katrin Trautner: 3 u.

Inhalt: Jochen Stuhmann für GEOkompakt: 4 o.; NASA: 4 m.l. + m.r., 5 o. + m.; G. Neukum/FU Berlin/DLR/ESA: 4 u.l.; Sean McNaughton/National Geographic Image Collection: 4 u.r.; MP/Leemage/picture-alliance: 5 u.l.; Costa/Leemage/picture-alliance: 5 u.m.; North Wind Picture Archives/akg: 5 u.r.

Sonnensystem: Tim Wehrmann für GEOkompakt: 5–8

Im Bann des Feuers: Göran Scharmer + Kai Langhans, ISP/Königlich Schwedische Akademie der Wissenschaften: 10/11; SOHO/NASA: 12/13; Tim Brown/Pikaia Imaging: 13 o.–25 o., 26 u. + 27 u.; JPL/NASA: 14–17; Astrofoto: 18/19; IUSGS/NASA: 20/21; Cassini Imaging Team/Cassini Project/NASA: 22/23; J. Clarke + G. Bacon/ESA/NASA: 24/25; JPL-Caltech/NASA: 26/27; NASA: 28; Space Science Institute/JPL/NASA: 29

Geboren aus Gas und Staub: Jochen Stuhmann für GEOkompakt: 30–37; NASA: 43 o.; National Solar Observatory: 43 m.l.; Dorling Kindersley: 43 m.r.; SPL/Ag. Focus: 43 u.

Der Sonne ganz nah: NASA: 44/45; Dorling Kindersley: 46 o.; A. E. Potter/R.M. Killen/K.H. Morgan: 46 u.

Die andere Erde: NASA: 48–51; JPL-Caltech/NASA: 52; Dorling Kindersley: 53 o., m.l. + u.; Ames Research Center/NASA: 53 m.r.

Das blaue Wunder: Corbis: 54/55; NASA: 56–59; Dorling Kindersley: 61

Der graue Gefährte: NASA: 64/65 + 70; Tom Dahl/NASA: 66/67; Baerbel K. Lucchitta; USGS: 68; Rainer Droste/GEO- Grafik: 69; Dorling Kindersley: 72

Die Kundschafter der Menschheit: Sean McNaughton/National Geographic Image Collection: 74/75

Der Triumph des Adlers: NASA: 76/77 + 81 o., 82–84, 86/87, 88 u., 89–90, 91 u. 94; Ralph Morse: 78; Bob Gomel/Time+Life/Gettyimages: 80; Hulton Archive: 81 u., Neil Leifer: 85 + 95; Ralph Crane/Gettyimages: 88 o.; GEO- Grafik: 91 o.

Zum Mond, zum Mars, zu neuen Welten: NASA: 96/97

Die längste Reise aller Zeiten: John Frassanito + Associates: 98/99, 102/103; University of Arizona/JPL/NASA: 100 + 104; G. Neukum/FU Berlin/DLR/ESA: 101; Dorling Kindersley: 106 o. + m.; LANL: 106 u.

Gefahr aus dem All: NASA: 108/109, 112 l. + 115; David Parker/SPL/Ag. Focus: 110/111; Corbis: 112 r. + 114; Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio/NASA: 113 l.; Univ. Maryland/JPL/NASA: 113 r.

Im Sog des Gasgiganten: NASA: 116/117 + 120; Tim Wehrmann für GEOkompakt: 119; Dorling Kindersley: 122

Der Späher im Reich des Ringplaneten: Tim Wehrmann für GEOkompakt: 124 + 125 o. + m.; NASA: 125 u.

Reif aus Eis und Gestein: JPL/NASA: 126/127; NASA: 129; Space Science Institute/JPL/NASA: 130 + 134; NASA/ Astrofoto: 132; University of Arizona/JPL/NASA: 133; Dorling Kindersley: 136 o. (2 x) + u.; J. Clarke/ESA/NASA: m.

Das Rätsel jenseits des Uranus: MP/Leemage/picture-alliance: 139; NMSI/Science Museum/Ullstein-Bild: 140 + 145 r.; Costa/Leemage/dpa: 141; North Wind Picture Archives/akg: 142; JPL/NASA: 143; Sammlung Rauch/Interfoto: 145 l.; Dorling Kindersley: 146 o. + u.; GEO- Grafik: 146 m.

Planet Nr. 9: Julian Baum/Dorling Kindersley: 148; HST/A. Stern/H.Weaver/ESA/NASA: 149; Dorling Kindersley: 150 + 152 o.; Tim Brown/Pikaia Imaging: 152 u.l.; NASA: 152 u.r.

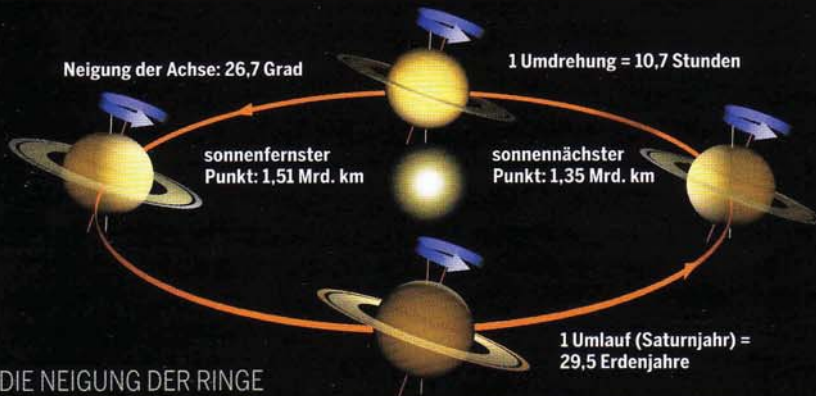
Vorschau: Bettman/Corbis: 154 + 155 u.; Mary Evans Picture Library/Interfoto: 155 o.l.; akg-images: 155 o.r.; The Kon-Tiki Museum/Gamma/Eyedea/laif: 155 m.; Christopher Black/WHO: 155 u.r.

Für unverlangt eingesandte Manuskripte und Fotos übernehmen Verlag und Redaktion keine Haftung.

© GEO 2009, Verlag Gruner + Jahr, Hamburg, für sämtliche Beiträge

PROFIL SATURN

Wie der Ring des Gasgiganten aufgebaut ist, weshalb seine Atmosphäre leuchtet, und warum sein größter Mond der Ur-Erde verblüffend ähnelt



DIE NEIGUNG DER RINGE

Weil die Achse des Planeten um rund 27 Grad geneigt ist, sind auch die Ringe von der Erde aus unterschiedlich zu sehen – je nachdem, wo der Saturn steht. Die einzelnen Partikel in ihnen umrunden den Planeten unabhängig voneinander – innen schneller als außen

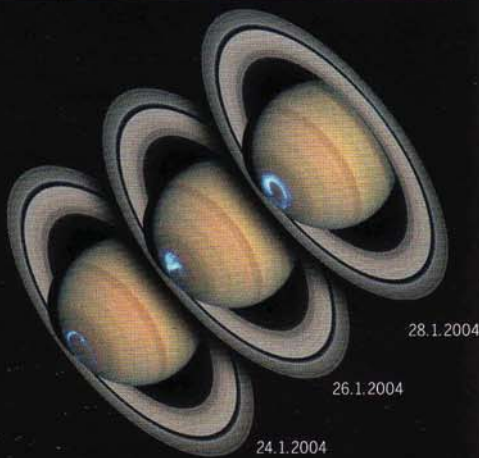


DIADEME AUS EIS UND GESTEIN

Die Hauptringe des Saturns bestehen überwiegend aus Eiskpartikeln. Dieses Ultraviolett-Bild zeigt einen Teil der Ringe, der reine Eisteilchen (türkisfarben) und mit Gesteinspartikeln verschmutzte Brocken (rot) enthält

SATURNLEUCHTEN

Wie auf der Erde gibt es auch auf dem Ringplaneten Polarlichter, die auf riesigen Arealen innerhalb weniger Tage durch die Atmosphäre wirbeln. Sie entstehen, wenn die elektrisch geladenen Teilchen des Sonnenwinds in der Nähe der magnetischen Pole auf die Gashölle treffen. Dabei regen sie die Gasatome zum Leuchten an



BEGLEITER MIT ATMOSPHÄRE

Der Saturnmond Titan ist der einzige Trabant im Sonnensystem mit einer dichten Atmosphäre; sie ähnelt stark jener der frühen Erde und besteht zu 98 Prozent aus Stickstoff sowie Methan und anderen Gasen. Die unteren Schichten (rot und gelb) enthalten Methanwolken, darüber liegen bis zu zwölf dünnere Atmosphärenschichten (Ultraviolett-Aufnahme)



hohe Bergrücken auf dem Mond Iapetus, der sich wie ein Gürtel just entlang des Äquators spannt? Und was bedeutet das bizarre Gebilde am Nordpol des Saturns, das wie ein Hexagon geformt ist?

11. AUGUST 2009. Tagundnachtgleiche auf dem Saturn: Die Sonne bewegt sich von der südlichen zur nördlichen Hemisphäre. Im Norden beginnt der Frühling, im Süden der Herbst.

In diesen Stunden bescheint die Sonne den äußersten Ring perfekt von der Seite. Nur 30 Meter hoch erstreckt sich die rund 300 000 Kilometer breite Welt der Hauptringe. Topographische Details, die sich an diesem Tag aus der Ringebene erheben, werfen jetzt Schatten oder werden besonders beleuchtet.

Manche Monde ragen ohnehin weit aus der Ebene heraus; sie graben sich Bahnen frei und werfen an deren Kanten die Eisteilchen zu Bugwellen auf.

Winzige Mündlein, klein wie Wolk kratzer, schaffen sich mit ihrer Gravitationskraft immerhin noch Löcher in den Ringen. Einen Gürtel aus weit über 100 solcher „Moonlets“ hat Cassini bereits in einem Eisring gesichtet. Millionen von ihnen könnten in den Ringen mitschwirren. Sind sie Überbleibsel eines größeren Mondes?

So jedenfalls lautet eine Theorie, die der Amerikaner Larry Esposito von der University of Colorado 1987 aufstellte. Damals versuchte Esposito, die Bildung der Saturnringe zu erklären und schloss aus Voyager-Bildern, dass einst eine gewaltsame Geburt die Ringe hervorgebracht habe: Ein kosmisches Projektil, ein Komet oder Asteroid, zerstörte einen Eismond so mächtig wie Enceladus. Dessen Trümmer legten sich, so Esposito, als ein erster Ring um den Saturn.

Nach und nach wurden diese Trümmer aber von Kaskaden neuer Himmelsprojekte immer weiter zerbröckelt. So bildeten sich immer neue Ringe; und jeden einzelnen prägen andere Strukturen und Dichteverhältnisse.

Durch ständige Kollisionen der Teilchen in den Ringen untereinander, so die These, sinkt kontinuierlich ihre Bahn-Energie: Sie kreisen langsamer und rücken dadurch immer enger an den Planeten – bis ihre Partikel schließlich auf den Himmelskörper niederprasseln.

Dieser Prozess läuft so schnell ab, dass die Ringe erst vor etwa 100 Millionen Jahren entstanden sein können.

Heute leitet Larry Esposito eines der Cassini-Teams. Und ausgerechnet er selbst korrigiert jetzt seine seit Jahrzehnten allgemein akzeptierte Theorie.

Denn in einem der äußeren Ringe hat er nun mithilfe von Cassini bisher unbekannte Prozesse beobachtet: Einzelne Teilchen klumpen sich ständig neu zusammen, formen mal rund 30 Meter kleine Brocken, mal Gebilde von zehn Kilometer Größe.

Und dies ist seine neue These: Die Ringe zerbröseln nicht einfach nach und nach und sind bald verschwunden – sie recyceln sich vielmehr ununterbrochen. Vergehen und entstehen wieder neu.

Die Ringe sind damit wesentlich älter als lange Zeit angenommen. Sie sind nicht erst aus einer kosmischen Kollision vor 100 Millionen Jahren entstanden, sondern bildeten sich schon weit früher, womöglich vor drei bis vier Milliarden Jahren: zu jener Zeit also, als die Planeten und ihre Monde besonders

heftigen Bombardements von Kometen und Asteroiden ausgesetzt waren.

Dass sich Ringe nur um den Saturn und – in geringerem Maß – um die anderen Gasplaneten ausgeprägt haben, erklärt sich wohl aus der Entstehungsgeschichte des Sonnensystems.

Denn anfangs blies die frühe Sonne mit ihrem Strahlungsdruck die leichteren Gas- und Staubteilchen weit in den Raum hinaus. So blieb innen, im Bereich der erdähnlichen Planeten Merkur, Venus, Erde und Mars nicht genügend Materie, um Ringe und größere Monde zu bilden (der Erdenmond ist aufgrund seiner speziellen Entstehungsgeschichte eine Ausnahme).

VERMUTLICH REICHT Cassinis Treibstoff noch bis 2017. Bereits 2010 wird wohl die dritte Phase ihrer Saturnerkundung eingeleitet. Die Sonde wird dann beobachten, wie sich der Sommer im Norden des Saturnsystems auswirkt: Denn erst seit Kurzem beleuchtet die Sonne die Nordhalbkugel des Ringplaneten und vieler seiner Trabanten.

Nun endlich kann Cassini Spektralaufnahmen von den dunklen Flecken nahe dem Nordpol auf dem Titan machen. Sind es tatsächlich Seen, so groß wie die Great Lakes in Nordamerika?

Wird es gelingen, auf dem Eismond Enceladus weitere Indizien für eine lebensfreundliche Region zu entdecken?

Schließlich die Ringe: Aus wie viel Masse bestehen sie? Wird die Sonde endlich deren wahres Alter ermitteln können?

Auf ihren letzten Dutzend Orbits wird Cassini immer näher um den Ringplaneten schwirren. Und dann erst naht nach 294 Umrundungen das Ende der erfolgreichsten Mission aller Himmelssonden: Sie wird durch das Saturnsystem irren und vermutlich am 15. September 2017 in die Atmosphäre des Gasgiganten stürzen.

Und wie ein Meteorit verglühen. □

Dirk Liesemer, 32, ist Wissenschaftsjournalist in Münster. Fachliche Beratung:

Prof. Dr. Ralf Jaumann, Institut für Planetenforschung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt in der Helmholtz-Gesellschaft, Berlin.

ANZEIGE

Konzentrierter. Belastbarer. Ausgeglichener.*

Die täglichen Aufgaben im Beruf und privat stellen mit den Jahren wachsende Anforderungen an die Konzentration und Gehirnleistung. Bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit kommt es darauf an, die Kraftwerke der Gehirnzellen zu aktivieren. **Tebonin®** aktiviert die Energieproduktion in den Gehirnzellen. Für mehr Gehirnleistung und mehr Konzentration bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit.



*** Bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit**
infolge zunehmender Funktionseinbußen der Nervenzellen im Gehirn.

Tebonin® konzent 240 mg 240 mg/Filmtablette. Für Erwachsene ab 18 Jahren. **Wirkstoff:** Ginkgo-biloba-Blätter-Trockenextrakt. **Anwendungsgebiete:** Zur Behandlung von Beschwerden bei hirnorganisch bedingten mentalen Leistungsstörungen im Rahmen eines therapeutischen Gesamtkonzeptes bei Abnahme der geistigen Leistungsfähigkeit (demenzielles Syndrom) mit den Hauptbeschwerden: Rückgang der Gedächtnisleistung, Merkfähigkeit, Konzentration und emotionalen Ausgeglichenheit, Schwindelgefühle, Ohrensausen. Bevor die Behandlung mit Ginkgo-Extrakt begonnen wird, sollte geklärt werden, ob die Krankheitsbeschwerden nicht auf einer spezifisch zu behandelnden Grunderkrankung beruhen. Zu Risiken und Nebenwirkungen lesen Sie die Packungsbeilage und fragen Sie Ihren Arzt oder Apotheker. **Dr. Willmar Schwabe GmbH & Co. KG, Karlsruhe**

Stand: September 2009 T/09/09/1

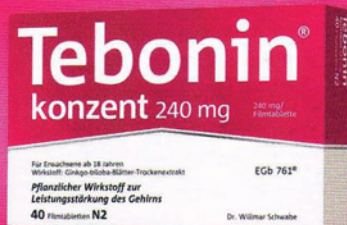


Tebonin®

stärkt
Gedächtnisleistung
und Konzentration.*

Ginkgo-Spezialextrakt
EGb 761®

- Pflanzlicher Wirkstoff
- Gut verträglich



Mit der Natur.
Für die Menschen.

Dr. Willmar Schwabe GmbH & Co. KG

www.tebonin.de

Neptun

Das Rätsel jenseits des Uranus

Seltsam unregelmäßig bewegt sich der 1781 entdeckte Planet Uranus am Firmament. Um 1840 ahnen manche Astronomen, dass ihn ein unbekanntes Objekt beeinflusst. In einem dramatischen Konkurrenzkampf versuchen zwei Mathematiker, den Himmelskörper aufzuspüren

Text: Henning Engeln

der junge Mathematiker klopft gegen 16 Uhr an die Haustür des Königlichen Hofastronomen in Greenwich bei London – bereits zum zweiten Mal.

Schon am frühen Nachmittag dieses 21. Oktober 1845 hat der Besucher unangemeldet versucht, George Biddell Airy zu sprechen. Doch der, erklärte Airys Butler, sei auf einer Sitzung in London und werde erst später zurückerwartet.

Der 26-jährige John Couch Adams aus Cambridge hat daraufhin seine Visitenkarte sowie ein kurzes Schreiben mit Ergebnissen seiner Berechnungen überreicht und angekündigt, später wiederzukommen.

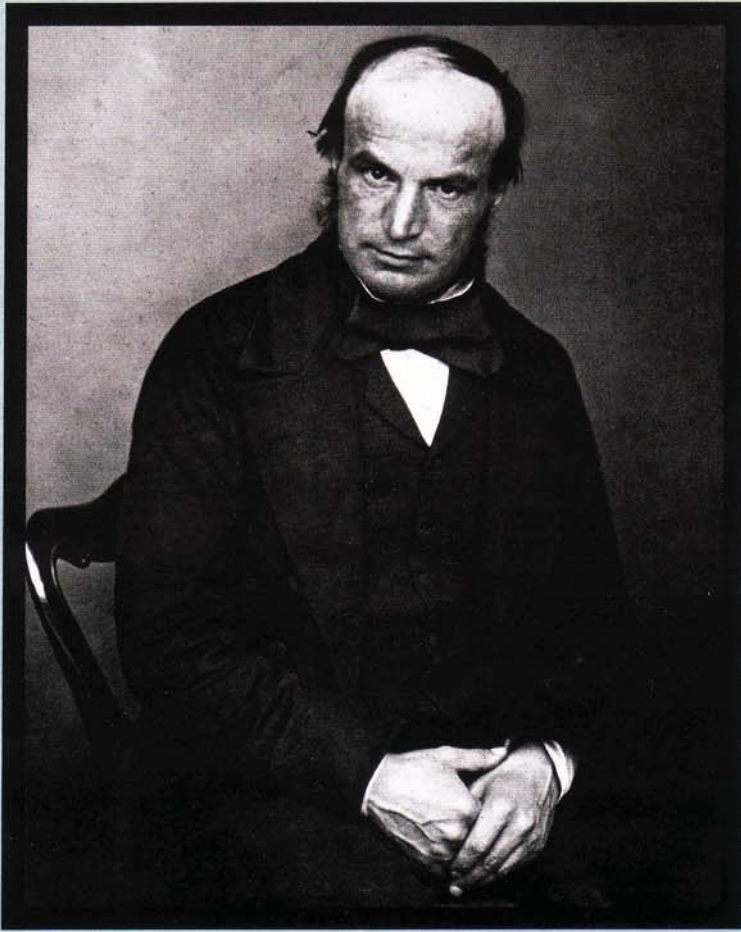
Jetzt also steht er erneut vor dem resoluten Butler. Doch der wimmelt ihn ab: Der Königliche Hofastronom sei nun zwar daheim, aber er sitze mit seiner

Frau zu Tisch und dürfe nicht gestört werden. Und: Nein, Dr. Airy habe keine Nachricht für Mr. Adams hinterlassen.

Der junge Mathematiker ist ratlos. Er ist ein unbekannter Wissenschaftler, der aus einfachen, provinziellen Verhältnissen stammt. Bescheiden und schüchtern. Und so besteht er nicht darauf, vorgelassen zu werden.

Stattdessen kehrt er tief enttäuscht nach Cambridge zurück. Warum nur will Airy ihn nicht empfangen? Weshalb lässt ihm der Hofastronom nicht einmal eine Notiz zukommen?

Dabei ist Adams, wie er glaubt, etwas gelungen, was noch kein Mensch zuvor geschafft hat: die Existenz eines unbekannten Planeten rein mathematisch zu beweisen. Er hat sogar berechnet, wo am Firmament er zu finden sei.



Der britische Mathematiker **JOHN COUCH ADAMS** (1819–1892, hier um 1870) ahnt nicht, dass ein renommierter französischer Kollege ebenfalls die Existenz des unbekannten Planeten beweisen will

Nun wäre nur noch ein großes Teleskop auf den entsprechenden Himmelsabschnitt zu richten, um das Objekt auch tatsächlich zu entdecken. John Couch Adams hofft, dass der Königliche Hofastronom dies alsbald veranlassen wird.

Er ahnt nicht, dass sich ein renommierter französischer Kollege inzwischen mit dem gleichen Thema befasst. Und kurz vor der Lösung steht.

ALS JOHN COUCH ADAMS am 5. Juni 1819 auf einem Bauernhof bei Laneast in Cornwall geboren wird, sind seine Aussichten auf eine akademische Karriere gering. Die Eltern sind Pächter eines Farmbetriebs, in ihren Möglichkeiten begrenzt. Immerhin, es reicht zum Leben – trotz der sechs

Geschwister, die dem Erstgeborenen noch folgen.

Den ersten Schulunterricht bekommt John in einem Farmhaus in Laneast, dann wird seine Ausbildung einem gewissen R. C. Sleep übertragen – „Professor für Kalligraphie, Stenographie, Mathematik, Französisch, Hebräisch etc.“, wie der sich selbst später anpreisen wird.

Sleep arbeitet mit dem Zehnjährigen ein altes Algebra-Buch durch, und zum Erstaunen des Lehrers ist ihm der Schüler im Verständnis mathematischer Probleme schon bald weit voraus. Mit elf Jahren gilt John als Wunderkind.

1831 schicken ihn die Eltern auf eine Schule in Devonport. Jede freie Minute verbringt der Junge nun in einer Bibliothek, um mathematische und astronomische Bücher zu studieren.

Mit 14 Jahren zeichnet er Sternkarten, erlebt 1835 tief beeindruckt das Erscheinen des Halleyschen Kometen und veröffentlicht zwei Jahre später in einer Lokalzeitung seinen ersten wissenschaftlichen Aufsatz, über eine Mondfinsternis.

Er berechnet Kometenbahnen, Sonnen- und Mondfinsternisse – mit mathematischem Wissen, das er sich fast komplett selbst beigebracht hat.

Wohl auf Anraten eines Pfarrers, der John zuletzt unterrichtet hat, macht sich der 20-Jährige im Oktober 1839 auf nach Cambridge. Er besteht die Aufnahmeprüfung am St. John's College und erhält ein Stipendium, das es ihm – auch dank einer kleinen Erbschaft – ermöglicht, Mathematik zu studieren.

In den folgenden Jahren konzentriert sich Adams ganz auf die Vorlesungen, selbst in seiner Freizeit kann es jederzeit vorkommen, dass seine Gedanken zu einem mathematischen Problem abschweifen und er alles um sich herum vergisst. Die Sonntagsabende verbringt er häufig bei dem Professor eines anderen Colleges – in jenen Räumen, in denen der berühmte Isaac Newton sein Hauptwerk geschrieben hat, die „Principia Mathematica“.

Daneben aber interessiert er sich vor allem für Astronomie. Und so kommt es, dass Adams (wie er sich später präzise erinnert) am 26. Juni 1841 die Buchhandlung „Johnson's“ betritt, dort in den Regalen stöbert und auf die 1832 erschienene Abhandlung „Bericht über die Fortschritte der Astronomie“ des späteren Königlichen Hofastronomen George Biddell Airy stößt.

Eine Passage des Buches weckt die Neugier des Mathematikers. Sie betrifft den Uranus: Irgendetwas stimmt mit ihm nicht.

Dieser siebte Planet ist erst 60 Jahre zuvor von William Herschel entdeckt worden. Der gebürtige Deutsche, von Beruf eigentlich Musiker, war 1757 als 18-Jähriger von Hannover nach England emigriert. Hatte sich zunächst als Notenschreiber, Leiter einer Militärkapelle und Musiklehrer durchgeschlagen, sich auch als Komponist und Dirigent einen



GEORGE BIDDELL AIRY (1801–1892), Königlicher Hof-astronom in Großbritannien, glaubt John Adams zunächst nicht – und verpasst so eine Jahrhundertentdeckung

Namen gemacht und war schließlich 1766 Kirchenorganist geworden in Bath, einem exklusiven Erholungsort im Südwesten Englands.

Dort hatte er seine Liebe zur Astronomie entdeckt und begonnen, wie besessenen Teleskope zu konstruieren. Er hatte nicht nur sein Amt als Organist versehen sowie täglich sechs bis acht Schüler unterrichtet, sondern in seiner Freizeit alle Zimmer seines Hauses zu Werkräumen umfunktioniert und dort Spiegel gegossen, geschliffen und poliert, Rohre und Rahmen hergestellt, Okulare gefertigt.

Mit seinen immer weiter verbesserten, bald hervorragenden Teleskopen erkundete Herschel das Firmament und verglich es mit den ihm vorliegenden Sternkarten.

Dabei fiel ihm am Abend des 13. März 1781 ein Himmelskörper auf, dessen Ab-

bild im Teleskopsichtlich größer war als das der anderen.

Vier Nächte später konnte Herschel feststellen, dass sich das Objekt bewegt hatte, und beschloss, die Fachwelt zu informieren: Er habe einen neuen Kometen gefunden.

Doch nach etlichen Monaten der Prüfung wurde den Berufsastronomen allmählich klar, was Herschel tatsächlich entdeckt hatte: einen Planeten. Den ersten Wandelstern, der nicht mit dem bloßen Auge zu erspähen und deshalb auch nicht schon seit Menschengedenken bekannt war.

Mehrere Astronomen hatten in den Jahrzehnten darauf versucht, aus den beobachteten Positionen des neuen Planeten – für den sich nach und nach der Name „Uranus“ einbürgerte, nach dem griechischen Himmels-gott – dessen

Umlaufbahn um die Sonne möglichst genau zu berechnen.

Doch der Orbit des Uranus entsprach einfach nicht den Vorhersagen der Wissenschaftler. Jahrzehntlang war er stets schneller als erwartet; dann, in den 1820er Jahren, kehrte sich das Ganze um: Nun war er zu langsam.

So unerklärlich war die Planetenbahn, dass manche Forscher sogar zweifelten, ob das Newton'sche Gravitationsgesetz in solch großer Entfernung von der Sonne überhaupt noch gültig ist.

Als nun John Couch Adams an jenem 26. Juni 1841 in Airys Auslassungen über das Rätsel des Uranus blättert, beschließt er spontan – und ziemlich selbstbewusst – dieses Rätsel zu lösen.

EIN PAAR TAGE später notiert er: „Ich habe Anfang dieser Woche einen Plan entworfen, um die noch unerklärlichen Unregelmäßigkeiten in der Bewegung des Uranus zu untersuchen; mit dem Ziel, herauszufinden, ob sie dem Einfluss eines noch unentdeckten Planeten zuzuschreiben sind.“

Dass ein unbekannter Himmelskörper jenseits des Uranus kreist, mit seiner Schwerkraft an ihm zerrt und so für die Unregelmäßigkeiten in dessen Bahn sorgt, haben schon andere vermutet.

Doch Adams' Vorhaben, den Unbekannten allein mithilfe mathematischer Berechnungen aufzuspüren, scheint vermessen. Die meisten Forscher halten dies für unmöglich.

Für Adams wäre dies ein Triumph: Erstmals würde ein Himmelskörper nicht mit dem Auge, sondern durch komplexe Gleichungen entdeckt werden.

**Kann es Adams
gelingen, einen
Planeten erstmals
nur mithilfe
mathematischer
Gleichungen zu
entdecken?**

Erst zwei Jahre später, nach seinem Examen, kann der junge Mathematiker ernsthaft mit seinen Berechnungen beginnen. Im Oktober 1843 hat er schließlich einen ersten Lösungsansatz für das Problem – und ist sich nun sicher: Die Bahnstörungen des Uranus lassen sich tatsächlich durch einen großen Himmelskörper erklären, der weiter draußen im All um die Sonne kreist.

Doch er benötigt genauere Angaben zum Orbit des Uranus. Und so wendet sich Adams an James Challis, den Direktor des Observatoriums von Cambridge, und bittet ihn, einen Brief an George Biddell Airy zu schicken – an den Verfasser ebenjener Schrift über die „Fort-schritte der Astronomie“, die Adams zwei Jahre zuvor zu seinem Unternehmen inspiriert hat.

George Biddell Airy, seit 1835 Königlich-er Hofastronom, verfügt am Royal Observatory in Greenwich über die umfangreichsten Daten zum Uranus.

Und tatsächlich: Challis setzt den erwünschten Brief auf. „Ein junger Freund von mir, Mr. Adams vom St. John's College, arbeitet an einer Theorie des Uranus“, schreibt er im Februar 1844 an Airy und bittet um Informationen. Umgehend liefert der Hofastronom, für seine Sorgfalt und Genauigkeit bekannt, das benötigte Material.

Doch Adams lässt sich Zeit mit seinen Berechnungen. Viel Zeit.

Seine Lehrverpflichtungen am College in Cambridge lassen ihm nur wenig freien Raum. Zudem ist er im Herbst 1844 damit beschäftigt, die Umlaufbahn eines neu entdeckten Kometen zu errechnen.

Er kann ja nicht wissen, dass ein anderer Forscher gerade dabei ist, ihm zuvorzukommen.

DIE BERECHNUNG des Kometen-Orbits durch Adams hat James Challis angeregt, der den Schweifstern beobachtet und seine Daten an den Mathematiker weitergegeben hat.

Adams veröffentlicht seine Ergebnisse im Oktober 1844 in der Londoner „Times“. Doch zu seiner Verärgerung muss er feststellen, dass ein Franzose

schneller gewesen ist und annähernd gleiche Ergebnisse kurz zuvor in Frankreich publiziert hat.

Sein Name: Urbain-Jean-Joseph Le Verrier.

Le Verrier, acht Jahre älter als Adams, ist ebenfalls ein außergewöhnlich begabter Mathematiker und zudem ein äußerst vielseitiger Wissenschaftler.

Der frühere Stipendiat der angesehenen École Polytechnique in Paris hat seine Karriere als Chemiker begonnen, dann eine Dozentenstelle für Astronomie an der École Polytechnique erhalten.

In diesem Fach hat er sich bereits durch hervorragende Studien über die Langzeitstabilität des Sonnensystems sowie über die Berechnung von Kometenbahnen hervorgetan.

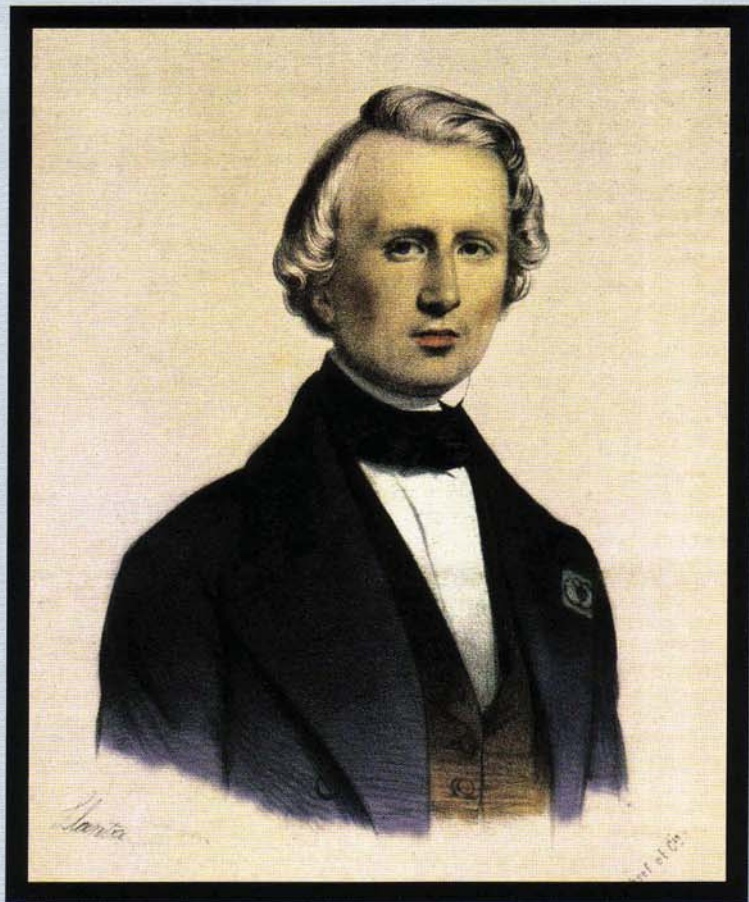
Le Verrier ist ehrgeizig und platzt schier vor Selbstvertrauen. Der auf-

strebende Forscher aus der Normandie sei charakterlich „schwierig“, heißt es. Spätere Mitarbeiter werden ihn als hochmütig, egoistisch, autoritär, ja despotisch bezeichnen.

Im Sommer 1845 schlägt ihm der Direktor des Pariser Observatoriums vor, sich mit dem Uranus-Problem zu beschäftigen. Sofort stürzt sich Le Verrier mit aller Vehemenz in die Rätsel-frage um das unerklärliche Verhalten des siebten Planeten.

Von dieser Konkurrenz ahnt John Couch Adams nichts, der mit seiner Berechnung der Bahndaten für den unbekannten Himmelskörper schon sehr weit gekommen ist.

Und so beginnt im Sommer 1845 ein Rennen zwischen zwei Kontrahenten, die das gleiche ganz und gar unerhörte Ziel verfolgen, aber nichts von ihrer



Auch der französische Mathematiker
URBAIN-JEAN-JOSEPH LE VERRIER (1811–1877) ist
dem unbekannten Planeten auf der Spur



Der Musiker, Teleskopbauer und Hobby-Astronom
WILLIAM HERSCHEL (1738–1822), ein gebürtiger
 Deutscher, entdeckt 1781 den Uranus

Konkurrenz zueinander wissen – ein in der Geschichte der Astronomie einmaliger Wettlauf.

ADAMS GEHT inzwischen davon aus, dass der unbekannte Planet sich nicht auf einer Kreisbahn, sondern einer Ellipse bewegt, und dass sein mittlerer Abstand zur Sonne etwa doppelt so groß ist wie der des Uranus.

Die Grundidee seiner These: Die Entfernung zwischen den zwei Planeten verändert sich ständig, denn beide bewegen sich auf ihren jeweiligen Umlaufbahnen um die Sonne – doch Uranus braucht dafür deutlich weniger Zeit als der unbekannte Himmelskörper.

Dieser Rätselplanet beschleunigt den Uranus mit seiner Schwerkraft oder bremst ihn ein wenig ab – je nachdem, ob er sich in seiner Umlaufbahn vor

oder hinter dem von Herschel entdeckten Planeten befindet.

Adams bestimmt daher die Diskrepanz zwischen 21 Positionen des Uranus, die in den vorangegangenen Jahrzehnten am Firmament beobachtet worden sind, und der jeweiligen theoretisch (also ohne die Störung durch den unbekannten Planeten) zu erwartenden Stellung. Daraus lassen sich dann Rückschlüsse auf den Verursacher dieser Störungen ziehen.

Eine extrem aufwendige und komplexe Rechnerei mit vielen Unbekannten beginnt. Mächtige Papierstapel türmen sich um den Mathematiker.

Mitte September 1845 gelangt der Brite zu einem Zwischenergebnis. Diese Berechnung ermöglicht ihm, einen relativ engen Abschnitt am Firmament einzugrenzen, in dem der unbekannte

Himmelskörper nach seinen Überlegungen zu finden sein müsste.

Adams braucht jetzt die Hilfe eines Astronomen, der in dem errechneten Areal mit einem Teleskop systematisch Ausschau hält nach dem Rätselplaneten. Er präsentiert seine Ergebnisse James Challis.

Doch der Direktor des Observatoriums von Cambridge schreckt zurück. Zu abenteuerlich erscheint ihm der Versuch, einen Himmelskörper mit rein mathematischen Mitteln aufzuspüren.

Doch immerhin schlägt er Adams vor, sich an den Königlichen Hofastronom zu wenden, und setzt ein Empfehlungsschreiben an George Biddell Airy auf.

Ende September klopft Adams zum ersten Mal an Airys Haustür in Greenwich. Er ist auf dem Weg zu seiner Familie in Cornwall und zu bescheiden, um den Besuch bei dem berühmten Mann vorher anzukündigen. Und so hat Adams Pech: Der Hofastronom weilt gerade auf einer Konferenz in Paris; der Mathematiker kann nur sein Empfehlungsschreiben hinterlassen.

Am 21. Oktober dann der zweite Versuch, der ebenfalls ohne Ergebnis bleibt und Adams so enttäuscht.

WAS DER UNGLÜCKLICHE Mathematiker jedoch nicht weiß: George Biddell Airy hatte ihm keine Nachricht hinterlassen, weil er von seinem Besuch überhaupt nichts wusste. Vermutlich hatte die hochschwangere Frau des Hofastronomen schlicht vergessen, ihren Gatten über den Besucher zu informieren – und auch dessen Visitenkarte nicht weitergegeben.

Kein **Astronom**
 ist bereit, den
 Berechnungen des
 jungen Mathematikers
 zu folgen und nach
 dem **Planeten** zu
 suchen

15 Tage später: Inzwischen hat Airy doch noch ein von Adams hinterlassenes Blatt Papier mit dem Zwischenergebnis seiner Berechnungen erhalten und antwortet dem Mathematiker am 5. November 1845 in einem Brief.

Der Astronom ist skeptisch. Er hat ja nur die knappen Ergebnisse auf einem Zettel gesehen und traut dem jungen Mathematiker eine solch komplizierte, in seinen Augen völlig unmögliche Berechnung kaum zu: Was ihm Adams als Resultate aufwendiger Kalkulationen vorgelegt hat, hält Airy für hypothetische Annahmen. Deshalb richtet er schriftlich einige Fragen an Adams und möchte weitere Einzelheiten erfahren.

10. November 1845. In der Zwischenzeit hat auch Le Verrier enorme Fortschritte gemacht. Jetzt präsentiert er der Pariser Akademie der Wissenschaften erste Ergebnisse. Ihnen zufolge kann er ausschließen, dass die Planeten Jupiter oder Saturn die Bahnstörungen des Uranus verursachen.

Im Dezember erfährt Airy von diesen Berechnungen und ist beeindruckt – wohl auch, weil der Franzose bereits ein renommierter Mathematiker ist. Dabei hält er die von Adams errechnete, viel weiter gehende Lösung ja bereits in den Händen. Doch das entgeht dem Hofastronom, weil er die Resultate des jungen Briten nicht ernst nimmt.

Zudem hat Airy auch noch keine Antwort auf seinen Brief erhalten – offenbar ist sich dieser Adams seiner Sache doch nicht sicher. In Wahrheit hat der Mathematiker wohl einfach nicht verstanden, wie der Hofastronom Fragen stellen kann, die sich doch aus der Existenz des unbekannten Planeten wie von selbst erklären.

Es ist nur eine weitere Komplikation in einer Verkettung unglücklicher Umstände, die es dem jungen Mann aus Cambridge so ungemein schwer machen, seine bahnbrechende Erkenntnis der Welt zu verkünden.

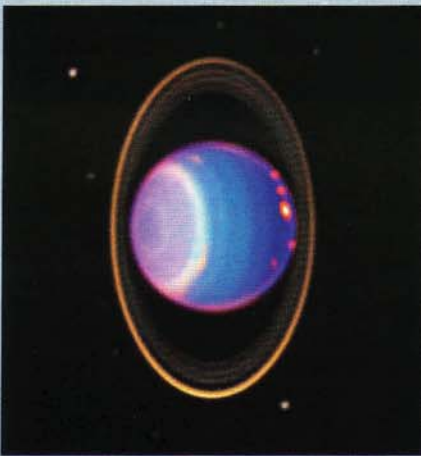
In den folgenden Monaten arbeiten beide Mathematiker fieberhaft an verbesserten Versionen ihrer Berechnungen. Und noch immer wissen sie nicht voneinander.

1. Juni 1846. Le Verrier veröffentlicht den zweiten Teil seiner Untersuchung des Uranus-Problems: Auch er ist zu dem Ergebnis gekommen, einzig ein bislang unbekannter Planet könne dessen seltsame Bewegung erklären. Die zu erwartende Position dieses neuen Himmelskörpers liefert er gleich mit.

Airy erfährt davon; er ist der Einzige, der weiß, dass Le Verriers Voraussage der von Adams sehr nahe kommt.

Nun hat er keine Zweifel mehr an den Resultaten des jungen Briten. Er schreibt Le Verrier – ohne Adams zu erwähnen – und stellt dem Franzosen die gleichen Fragen wie sieben Monate zuvor seinem Landsmann.

Doch im Gegensatz zu Adams antwortet Le Verrier prompt und weist den Hofastronom auf die Belanglosigkeit seiner Fragen hin. Immerhin: Jetzt hält



DIE LICHTSCHWACHEN RINGE um den Uranus sowie Wolkenstrukturen zeigt diese Nahinfrarotaufnahme (Falschfarbenbild)

auch Airy die Zeit für reif, nach dem Planeten zu suchen.

29. Juni 1846. Auf einer Sitzung des Königlichen Observatoriums verkündet Airy, man werde „mit höchster Wahrscheinlichkeit“ bald einen Planeten entdecken, falls sich eine Sternwarte dieser Aufgabe annähme. Und neben den schon allseits bekannten Berechnungen Le Verriers erwähnt er zum ersten Mal öffentlich das fast gleichlautende Ergebnis von Adams, das ihm mittlerweile schon seit acht Monaten vorliegt.

Der anwesende John Herschel, der Sohn des Uranus-Entdeckers und selbst ein namhafter Astronom, formuliert einige Wochen später über den noch unbekannten Himmelskörper: „Wir sehen ihn, wie Kolumbus Amerika von der spanischen Küste aus sah. Seine Bahn wurde mit den weitreichenden Mitteln der Mathematik aufgespürt, und zwar mit einer Gewissheit, die dem Beweis durch die tatsächliche Beobachtung kaum unterlegen ist.“

Doch noch fehlt dieser Beweis.

Anfang Juli 1846. Airy drängt den Direktor des Observatoriums in Cambridge



WEIL DIE ATMOSPHÄRE des Neptuns neben Wasserstoff und Helium auch etwas Methan enthält, erscheint sie dem Auge blau

James Challis, mit der Suche zu beginnen. Da Airy zwar mittlerweile überzeugt ist, dass es den Planeten gibt, aber der Exaktheit der Prognosen nicht traut, schlägt er ein riesiges Areal vor. 300 Beobachtungsstunden sind erforderlich, um es zu prüfen. Am 29. Juli legt Challis los.

John Couch Adams ist begeistert; fünf Jahre nach seinen ersten Überlegungen zu dem unbekannten Planeten führen seine Berechnungen endlich zu praktischen Konsequenzen. Aufgeregt teilt er Challis noch mit, dass der Planet vermutlich groß genug ist, um ihn im Teleskop als Scheibe zu erkennen.

Damit ist er leichter zu identifizieren: Man muss eine Region nicht mehrfach beobachten, um den Wandelstern anhand seiner Bewegung zu entlarven.

Doch den Astronom interessiert Adams' Hinweis nicht; er hält stur an seinem Programm fest.

31. August 1846. Le Verrier präsentiert der französischen Akademie der Wissenschaften einen dritten Bericht, in dem er die Position des vermuteten Himmelskörpers nochmals eingrenzt – und die Astronomen eindringlich auffordert, sich auf die Suche nach ihm zu machen: Mit guten Teleskopen müsse er problemlos zu finden sein.

Dass Challis in Cambridge bereits nach dem Planeten Ausschau hält, weiß er nicht.

2. September 1846. Auch John Couch Adams hat noch genauere Berechnungen vorgenommen, die er Airy per Brief zuschickt. Doch erneut hat Adams Pech: Der Hofastronom ist für mehrere Wochen in Deutschland auf Reisen.

Unterdessen versucht Le Verrier unermüdlich, Astronomen für die Suche zu gewinnen, verschickt seine Studie, schreibt Briefe. Schließlich wendet er sich an den Deutschen Johann Gottfried Galle, der ihm einst seine Dissertation geschickt hat. Galle arbeitet an der Berliner Sternwarte, die mit einem ausreichend leistungsfähigen Teleskop ausgestattet ist.

23. September 1846. Galle erhält das Schreiben und beginnt noch am selben Abend mit der Suche. Es ist eine klare Sternennacht. Stundenlang richten Galle und der Assistent Heinrich d'Arrest (später selbst ein bedeutender Astronom) das Teleskop auf das von Le Verrier angegebene Areal – vergebens: Die Planetenscheibe ist nicht zu finden.

Sie sind schon fast entmutigt, als sie einen neuen Plan fassen: Galle wird für jeden Stern, den er durch das Teleskop beobachtet, die Position nennen, die d'Arrest dann mit einer besonders guten Karte dieser Himmelsregion vergleicht.

Kurz nach Mitternacht ruft der Assistent plötzlich begeistert aus: „Dieser Stern ist nicht auf der Karte!“

Endlich ist der achte Planet des Sonnensystems gefunden.

DIE NACHRICHT verbreitet sich innerhalb weniger Tage, und ganz Europa feiert Le Verrier als den eigentlichen Entdecker. Da wendet sich am 3. Oktober John Herschel an die Öffentlichkeit:

Auch ein junger Mathematiker aus Cambridge sei gänzlich unabhängig von Le Verrier zur gleichen Vorhersage gelangt.

Daraufhin entbrennt ein monatelanger, erbittert geführter Streit darum, wem denn nun die Ehre der Entdeckung gebühre.

Le Verrier ist außer sich vor Wut, als er von den Berechnungen Adams erfährt, die Airy ihm gegenüber verschwiegen hat. Zumal er nun in einer Zeitung lesen muss, dass die Wissenschaftler jenseits des Kanals einen Teil des Ruhms für sich beanspruchen.

John Couch Adams aber schweigt. Sicherlich ist er tief enttäuscht. Doch bescheiden, wie er ist, mischt er sich nicht ein in die Kontroverse; vielmehr gesteht er Le Verrier und Galle die Entdeckung

Nachdem **Neptun**
endlich gefunden ist,
entbrennt prompt
ein **Streit** darüber,
wem der Ruhm
der **Entdeckung**
gebührt

neidlos zu und macht sich lieber daran, die Bahn des neuen Planeten anhand der nun vorliegenden Beobachtungen noch genauer zu berechnen.

Am 13. November 1846 schildern Airy, Challis und Adams auf einer Sitzung der Royal Astronomical Society ihre Sicht der Planetenjagd. Im Gegensatz zu dem jungen Mathematiker geben die beiden etablierten Astronomen dabei kein gutes Bild ab.

Weshalb hat sich die britische Wissenschaft diesen Preis entgehen lassen, werden sie gefragt? Warum wurde nicht früher mit der Suche begonnen?

Die Antworten bleiben unbefriedigend, und James Challis muss sogar bekennen, dass er den Planeten zweimal – am 30. Juli und am 12. August – in seinem Teleskop vor Augen gehabt hat, ohne ihn zu identifizieren.

Auch um den Namen gibt es Kontroversen. Vorgeschlagen werden Janus, Oceanus, Minerva und andere Namen. Anfang 1847 aber setzt sich zumindest außerhalb Frankreichs die Bezeichnung „Neptun“ durch – nach dem römischen Meeresherrn, mit dessen Namen die Reihe der mythologischen Planetenbezeichnungen fortgesetzt wird.

Le Verrier selbst hatte ihn zunächst vorgeschlagen, später dann aber längere Zeit vergebens versucht, der Bezeichnung „Le Verriers Planet“ Akzeptanz zu verschaffen.

Erst nach Monaten der Debatte, des Streits und der Verleumdung gelingt es den Besonnenen unter den Wissenschaftlern, allen voran John Herschel, die konkurrierenden Nationen zu versöhnen. So kommt es, dass sich Adams und Le Verrier während einer Tagung der Britischen Gesellschaft zur Beförderung der Wissenschaften im Juni 1847 erstmals persönlich begegnen.

Die Anwesenden sind gespannt: Wie werden die beiden Konkurrenten um die wissenschaftliche Ehre einander gegenüber treten? Wird es erneut zum Streit kommen?

Die Sorge ist grundlos. Die zwei Forscher begrüßen einander herzlich, schütteln sich die Hände und plaudern bald wie alte Freunde. Es entsteht eine Verbindung, die ein Leben lang halten wird.

LANGE ZEIT ABER bleiben die beiden äußeren Wandelsterne rätselhaft. Ihre Umlaufbahnen und Geschwindigkeiten lassen sich zwar relativ leicht aus den Beobachtungsdaten ermitteln. Doch erst mit immer größeren Teleskopen und schließlich mit Raumspähern gewinnen die nachfolgenden Generationen ein umfassendes Bild der beiden Riesenplaneten.

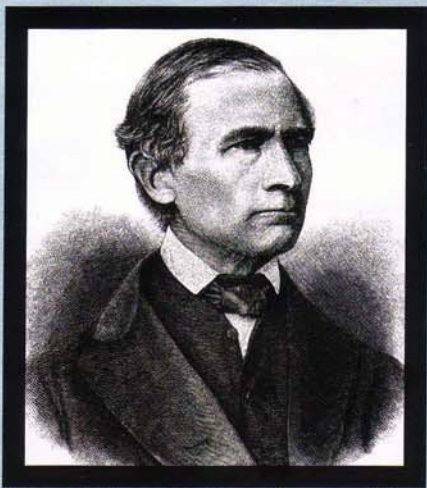
Heute weiß man: Beide sind bläuliche Gasriesen von jeweils rund 50 000 Kilometer Durchmesser und dem etwa 60-fachen Volumen der Erde. Beide haben eine Atmosphäre, die zu gut 80 Prozent aus Wasserstoff und zu 15 bis 19 Prozent aus Helium besteht; daneben kommen etwas Methan (auf das die

blaue Farbe der Planeten zurückzuführen ist) sowie ein paar Spurengase vor.

Auf dem Neptun kommt es häufiger zu Stürmen – vermutlich, weil aus dem Inneren Hitze aufsteigt und Turbulenzen verursacht.

Dennoch sind die Temperaturen der Wolkenoberseite bei beiden mit rund minus 220 Grad Celsius eisig. Weil der Druck mit zunehmender Tiefe steigt, fallen mehr und mehr der gasförmigen Bestandteile als feste Eispartikel aus. So geht die Gashölle der Planeten allmählich in einen Mantel aus Wassereis, Methan und Ammoniak über – ohne dass es eine eindeutige, feste Oberfläche gibt. Der Kern in seinem Inneren besteht vermutlich aus Eis und Gestein.

Uranus hat 27 bekannte Monde, Neptun 13. Beide Planeten sind zudem von dünnen Ringsystemen umgeben. Uranus ist rund 19-mal weiter von der Sonne entfernt als die Erde und benötigt 84 Jahre für einen Umlauf. Neptun



Erst der Deutsche **JOHANN GOTTFRIED GALLE** (1812–1910) richtet ein Teleskop auf die errechnete Position – und findet Neptun

kreist in etwa 30-facher Erdentfernung und reist in 165 Jahren einmal um das Zentralgestirn. Rund 17 Stunden benötigt Uranus für eine Drehung um sich selbst, Neptun 16.

Kurios ist die Rotationsachse des Uranus. Bei den meisten Planeten steht sie senkrecht zur Ebene der Umlaufbahn – so wie die Drehachse eines auf einem Tisch rotierenden Kreisels

zur Tischoberfläche. Bei Uranus dagegen liegt sie etwa in der gleichen Ebene wie die Bahn – so wie bei einem Ei, das auf dem Tisch umherrollt.

Die Folge sind seltsame Jahresverläufe: Da gibt es eine Jahreszeit, in der das Licht der hier nur fahl leuchtenden Sonne fast genau über dem Nordpol steht (während der Südpol komplett im Dunkeln liegt). Von dort bewegen sich ihre Strahlen zum Äquator und darüber hinaus, bis sie ein halbes Uranusjahr später über dem Südpol glimmt.



JOHN HERSCHEL (1792–1871), der Sohn des Uranus-Entdeckers, vermittelt im Streit um die Entdeckung des Neptuns

Beide äußeren Planeten haben ein Magnetfeld, das erstaunlicherweise bei Neptun um 47 Grad, bei Uranus um 59 Grad gegen die Rotationsachse verdreht ist (siehe Seite 146). Dementsprechend liegen die magnetischen und geographischen Pole bei diesen Planeten viel weiter auseinander als auf der Erde.

Die Magnetfelder müssen anders zustande kommen als auf unserem Heimatplaneten, denn Uranus und Neptun enthalten keinen äußeren Kern aus flüssigem Eisen, das elektrische Ströme erzeugen könnte.

Ihre Massen (15- und 17-mal mehr als die der Erde) sind auch nicht groß genug, um im Inneren jenen Druck zu erzeugen, der Wasserstoff in eine metallische und damit in eine elektrisch leitfähige Form umwandelt (wie es bei Jupiter,

318 Erdenmassen, und Saturn, 95 Erdenmassen, der Fall ist; deren Magnetfelder entstehen vermutlich durch elektrische Ströme im metallischen Wasserstoff).

Bei Uranus und Neptun muss also ein anderer Mechanismus wirken. Forscher vermuten, dass der Druck im Inneren dieser Planeten Moleküle wie Ammoniak dazu bringt, in elektrisch geladene Bestandteile zu zerfallen. Diese Ionen sind in Wasser gelöst, können sich im Inneren der Himmelskörper bewegen und so einen Stromfluss erzeugen, der das Magnetfeld aufbaut.

Die Ringe des Uranus wurden 1977, die des Neptuns 1984 entdeckt. Die meisten Informationen aber lieferte die amerikanische Sonde „Voyager 2“, die 1986 am Uranus und 1989 am Neptun vorbeiflog – der bislang einzige Besuch bei den äußeren Planeten (derzeit sind keine weiteren Visiten geplant).

All dies war vor gut 160 Jahren, als der Neptun erstmals im Teleskop auftauchte, natürlich nicht bekannt. Niemand konnte ahnen, welche Art von Welt da aufgespürt worden war.

ADAMS UND LE VERRIER, die beiden Entdecker des achten Planeten, werden durch ihre mathematische Meisterleistung zu anerkannten Größen in der Astronomie. Und der Ehre folgen schon bald auch die Ämter.

Die Universität Cambridge ernannte John Couch Adams 1859 zum Professor für Astronomie und Geometrie und 1861 zum Nachfolger von Challis als Direktor der Sternwarte.

Zwei Jahre später entdeckt der inzwischen 43-jährige erneut unbekannte Sphären: „Ich fühle mich schon ganz in einer neuen Welt und schaue voller Bedauern auf die Eiszeit meines früheren Daseins zurück, die mir bereits Jahrmillionen zurückzuliegen scheint“ – er hat Elizabeth Bruce aus Dublin einen Heiratsantrag gemacht und ihr Jawort erhalten.

Bis zu seinem Tod im Januar 1892 führt Adams auf dem Gelände der Sternwarte von Cambridge das ruhige Leben eines Gelehrten, beschäftigt sich neben der Astronomie mit Botanik, Geologie,

Geschichte, spielt gern Krocket, Boccia und Whist. Und zur Zerstreuung berechnet er mathematische Konstanten auf mehr als 200 Stellen hinter dem Komma genau.

Urbain-Jean-Joseph Le Verrier ist weiterhin von den Bahnen der Himmelskörper fasziniert und plant, das Planetensystem in einem einzigen Werk darzustellen. Im Januar 1854 wird er Direktor des Pariser Observatoriums.

Mit harter Hand modernisiert er diese Institution, an der er neben der Astronomie auch die Meteorologie zu einem Kompetenzbereich macht. Seine Amtsführung gilt als ruppig und hochmütig. Den Angestellten gegenüber gibt er sich autoritär. 1870 wird er entlassen – wegen seines despotischen Verhaltens und weil er zu wenig Geld des Observatoriums in die Beobachtung der Sterne investiert. Doch als sein Nachfolger bei einem Unfall ertrinkt, übernimmt er 1873 erneut das Amt.

Vier Jahre später stirbt Le Verrier an einem Leberleiden. Wenige Wochen zuvor hat er noch die Drucklegung seiner Planetentafeln erlebt, für die er in jahrzehntelanger Arbeit das gesamte bekannte Wissen über die Bahnen der Wandelsterne zusammengetragen und revidiert hat. Schon im Vorjahr ist er für dieses Mammutwerk von der britischen Royal Astronomical Society mit der Goldmedaille ausgezeichnet worden.

Die Lobrede hielt der Präsident der Gesellschaft: John Couch Adams.

Bis zum Ende seines Lebens hat Le Verrier nur selten persönlich durch ein Fernrohr geblickt. Es ging ihm mehr um Mathematik und Theorie als um den Blick in die Tiefen des Alls.

Ein Zeitgenosse geht sogar so weit zu behaupten, Le Verrier habe selbst am Neptun nur theoretisches Interesse gehabt: „Ich glaube fast, er hat ihn nie gesehen.“ □

Dr. Henning Engel, 55, ist GEOkompakt-Redakteur. Er hat das Konzept dieser Ausgabe erarbeitet.

Literaturtip: Tom Standage, „Die Akte Neptun“, Campus. Mark Littmann, „Planets Beyond“, John Wiley & Sons.

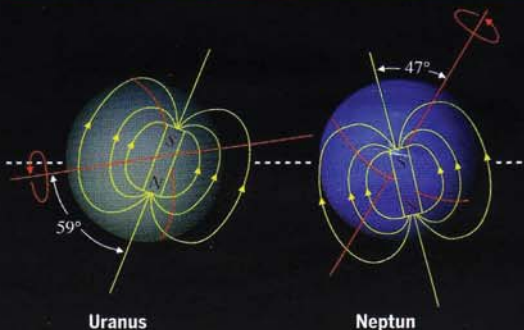
PROFIL URANUS UND NEPTUN

Weshalb die Magnetfelder der beiden kühlen Gaskiganten ungewöhnlich sind, wie Uranus durch das All »rollt« – und warum es auf dem Neptun stürmt



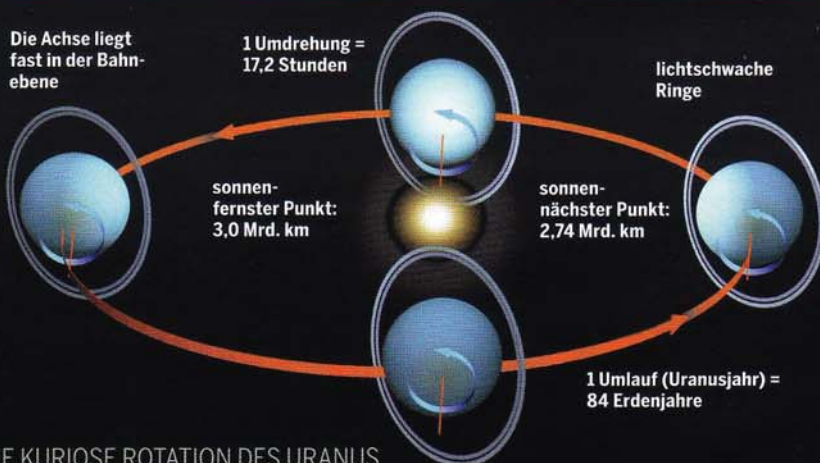
DER STÜRMISCHE, KALTE RIESE

Neptun, der äußerste große Planet, benötigt etwa 165 Erdenjahre, um die Sonne auf einer fast kreisförmigen Bahn zu umrunden. Er besitzt ein System aus mehreren lichtschwachen Ringen, die in den 1980er Jahren entdeckt wurden. Ihre Zusammensetzung ist noch unbekannt; vermutlich haben sie sich aus dem Material seiner Monde gebildet. Neptuns Atmosphäre ist in höheren Schichten sehr kalt, doch wegen einer starken Hitzequelle im Inneren extrem stürmisch



RÄTSELHAFTE MAGNETFELDER

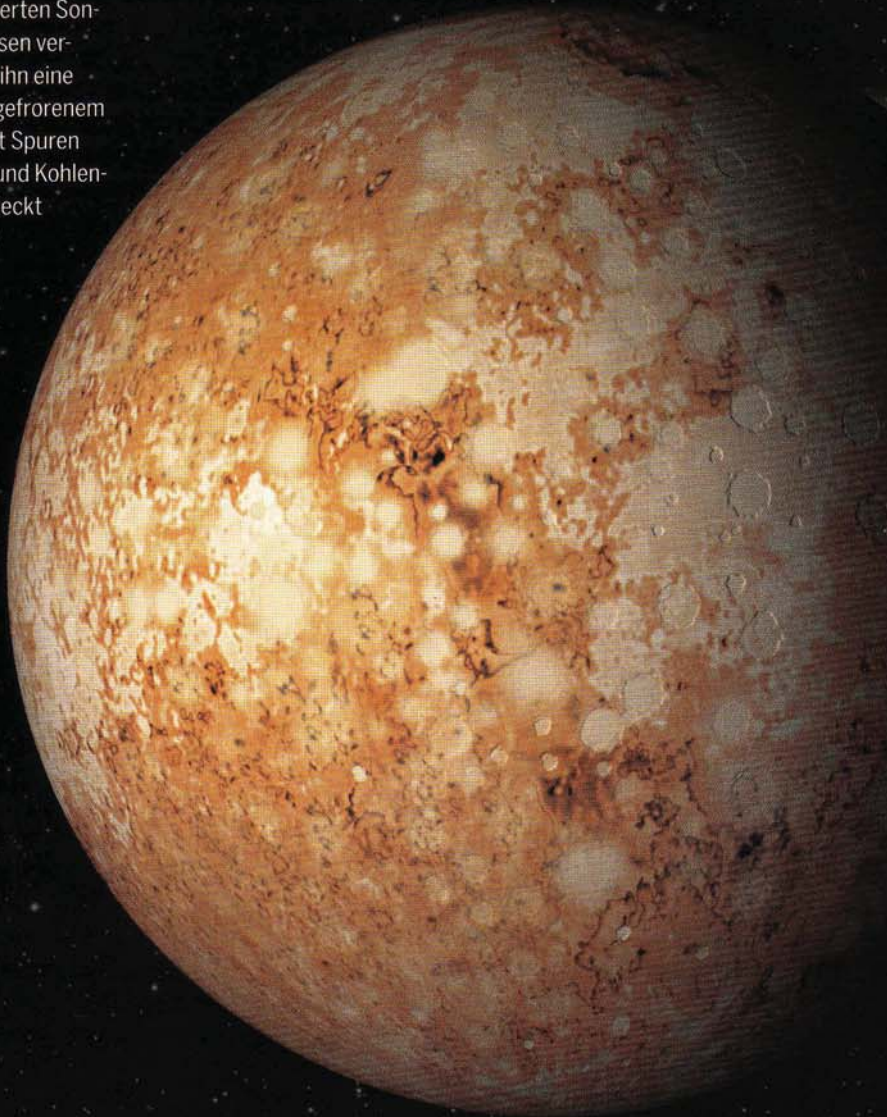
Die magnetischen Felder von Uranus und Neptun (gelb) sind stark gegen die Rotationsachsen verdreht und zudem aus den Zentren der Planeten verschoben. Beides ist rätselhaft – ebenso die Entstehung der Magnetfelder. Vermutlich werden sie von elektrisch geladenen Molekülen im Inneren erzeugt



DIE KURIOSEROTATION DES URANUS

Einmalig unter den Planeten unseres Sonnensystems ist die Drehung des Uranus: Die Rotationsachse steht nicht senkrecht zur Ebene der Umlaufbahn, sondern liegt in ihr – wie bei einem Ei, das über einen Tisch rollt. Deshalb steht die Sonne manchmal direkt über einem der Pole (oben Mitte). Die dunklen Ringe wurden 1977 entdeckt und bestehen überwiegend aus Partikeln von 20 Zentimeter bis 20 Meter Größe, die Licht ähnlich schlecht reflektieren wie Kohle

Analysen des von
Pluto reflektierten Son-
nenlichts lassen ver-
muten, dass ihn eine
Schicht aus gefrorenem
Stickstoff mit Spuren
von Methan und Kohlen-
monoxid bedeckt
(Illustration)



Pluto

Planet Nr. 9

Es dauert Jahrzehnte, bis die Astronomen Pluto überhaupt entdecken. Dann feiern sie ihn als den äußersten aller Wandelsterne. Doch als vergleichbare Himmelskörper nahe seiner Bahn auftauchen, bricht erbitterter Streit aus

U

Um 15.03 Uhr ist es so weit: Im dämmrigen Licht eines großen Konferenzsaals in Prag heben alle Befürworter der Resolution 5A gelbe Karten in die Höhe. Es folgen einige wenige Gegenstimmen und Enthaltungen.

In der tschechischen Hauptstadt wird an diesem 24. August 2006 per Abstimmung entschieden, wie viele Planeten um die Sonne kreisen.

Mehr als 2500 Astronomen sind zu der 26. Generalversammlung der Internationalen Astronomischen Union angereist. Nun, am letzten Tag der Konferenz, sitzen noch 424 Wissenschaftler im Saal, die ein eindeutiges Votum abgeben: Fortan soll es nicht mehr als acht Planeten geben – der bislang neunte, Pluto, gehört nicht mehr dazu.

Er wird einfach abgeschafft, getilgt, zum Zwerg herabgewürdigt.

Damit ist er als Planet nur 76 Jahre alt geworden. Und er endet auf ebenso spektakuläre Art und Weise, wie er einst in Licht der Öffentlichkeit rückte.

Denn seine Entdeckung im Jahr 1930 war das triumphale Ende einer systematischen Großfahndung, die mehr als 30 Jahre zuvor begonnen hatte.

SEIT ENDE des 19. Jahrhunderts verfolgen einige Forscher hartnäckig die Idee, dass es neben den bis dahin registrierten acht Planeten noch einen weiteren geben könnte. Denn die Bahnen von Uranus und Neptun, so argumentieren sie, weisen merkwürdige Abweichungen auf – gerade so, als störe ein anderer kosmischer Wanderer ihre Bewegung (siehe Seite 138).

Auch der schwerreiche Hobby-Astronom Percival Lowell ist von der Vorstellung begeistert. Zehn Jahre lang, bis zu seinem Tod 1916, lässt er am eigenen Observatorium im US-Bundesstaat Arizona nach dem mysteriösen „Planet X“ fahnden.

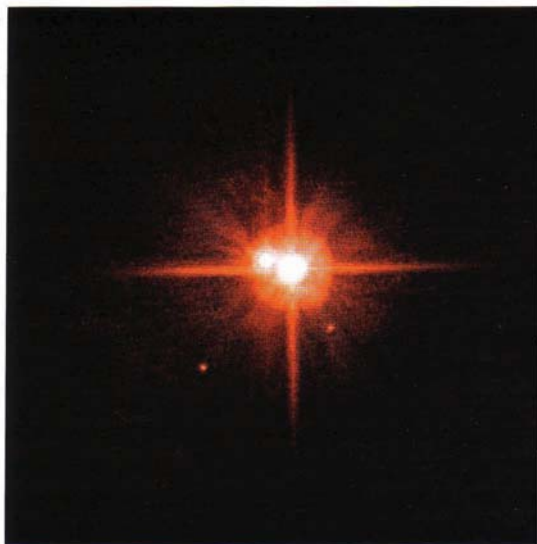
Vergebens. Doch Lowells Angehörige investieren Ende der 1920er Jahre erneut Geld in das Observatorium, um die Suche fortzusetzen. Die knochenharte Arbeit überlässt der Leiter der Sternwarte aber lieber einem jungen Amateur-Astronom.

Und so beginnt der 22-jährige Farmersohn Clyde Tombaugh im Frühjahr des Jahres 1929 damit, das Firmament abzusuchen, Region für Region entlang der Tierkreiszeichen, in denen die acht bekannten Planeten zu sehen sind.

Nachts fotografiert er mit dem Teleskop des Observatoriums kleine Ausschnitte des Himmelsgewölbes; jeden zweimal im Abstand einer Woche.

Anschließend vergleicht Tombaugh mithilfe einer optischen Apparatur paarweise die Abbildungen, um herauszufinden, ob irgendein Himmelskörper seine Position verändert hat – also wie ein Planet am Firmament wandert.

Jede der Fotoplatten ist mit durchschnittlich 160 000 Lichtflecken betupft:



Auf dieser Aufnahme des Weltraumteleskops Hubble ist zu erkennen, dass drei Monde Pluto umkreisen: der etwa 1200 Kilometer mächtige Charon sowie die weitaus kleineren Nix und Hydra

eine Herkulesarbeit. Immerhin gelingt es Tombaugh schon bald, sich zumindest nicht von Asteroiden oder anderen kleineren Objekten verwirren zu lassen: Denn auch die bewegen sich – allerdings so schnell, dass sie nach der einstündi-

gen Belichtungszeit auf den Bildern als Strich erscheinen.

Monatelang inspiziert der junge Mann die 35 mal 42 Zentimeter großen Fotoplatten – vergebens. Nirgendwo zeigt sich ein „Planet X“, der im Laufe einer Woche, zwischen der Aufnahme zweier Fotos einer Himmelsregion, seine Position verändert hat. Alle weißen Pünktchen bleiben an ihrem Platz.

Doch dann, nach zehn Monaten Arbeit, bemerkt Tombaugh auf zwei Abbildungen tatsächlich einen winzigen Punkt, der sich um ein paar Millimeter verschoben hat.

Ein historischer Moment. Hastig blickt er auf die Uhr: Es ist der 18. Februar 1930, nachmittags um 16 Uhr.

Fast vier Wochen lang setzen die Wissenschaftler des Lowell-Observatoriums ihre Beobachtungen fort, versuchen, die Umlaufbahn zu berechnen. Erst am 13. März, dem 75. Geburtstag des verstorbenen Percival Lowell, geben sie bekannt: Ein neuer Planet ist entdeckt!

Doch wie soll er genannt werden?

solaren Planeten. Dabei ist er weitaus kleiner als jeder andere Wandelstern: Nur knapp 2400 Kilometer beträgt sein Durchmesser – allein sieben Monde im Sonnensystem sind voluminöser als der Winzling, auch der Erdenmond ist dreimal so groß.

Und selbst mit den besten Instrumenten lässt sich der Zwergplanet nur schemenhaft erahnen, so klein ist er. Er gehört vermutlich, so die These mancher Forscher, zu jenen Klumpen, aus denen sich vor rund 4,5 Milliarden Jahren die Planeten zusammengefügt haben.

DIE BAHN, auf der Pluto um die Sonne kurvt, sieht zudem nicht annähernd so aus wie die der anderen Planeten: In 248 Erdenjahren beschreibt er eine einzige, gewaltige Ellipse, die erheblich von einem perfekten Kreis abweicht.

Am fernsten Punkt liegen zwischen ihm und der Sonne mehr als sieben Milliarden Kilometer, am nächsten Punkt (den er zuletzt im September 1989 er-

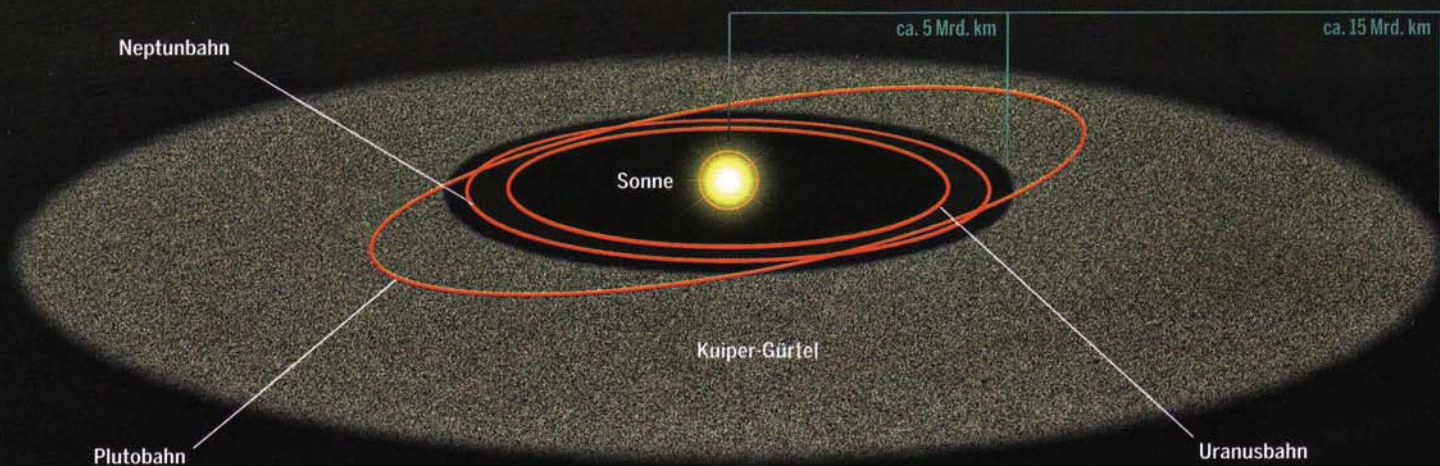
Mal steigt er über sie hinaus, mal sinkt er unter sie herab. Sein Lauf um das Zentralgestirn ist um 17 Grad gegenüber dem Orbit der anderen Planeten geneigt.

Nicht einmal in seiner Struktur gleicht Pluto den anderen Sonnentrajanen. Weder besteht seine Oberfläche aus schwerem Gestein (wie bei Merkur, Venus, Erde und Mars) noch aus verdichteten Gasen (wie bei Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun). Stattdessen bedecken ihn dicke Eisschilde.

Denn auf dem Zwergplaneten herrschen Temperaturen von minus 230 Grad Celsius.

Das ist so kalt, dass selbst flüchtige Substanzen wie Stickstoff, Kohlenmonoxid oder Methan gefrieren. Die gefrorenen Gase sowie ein mehrere Hundert Kilometer dicker Mantel aus Wassereis umhüllen einen felsigen Kern.

Nur wenn sich Pluto auf seiner Umlaufbahn der Sonne nähert, wärmt ihn deren Strahlung ein wenig auf, sodass ein kleiner Teil der gefrorenen Mate-



Zahlreiche Vorschläge erreichen die Forscher in Arizona. Die überzeugendste Idee hat ein elfjähriges Mädchen aus Großbritannien: Alle Planeten tragen Namen aus der klassischen Mythologie, weiß die Schülerin. Und der neue Himmelskörper bewegt sich fernab der Sonne in einer finsternen, völlig unbekannten Region – so wie der Gott der Unterwelt: Pluto.

Mit diesem Namen erhält der Neuankömmling seinen Platz in der Liste der

Zehntausende kleinere Himmelskörper, darunter Pluto, bilden den Kuiper-Gürtel. Sie sind vermutlich Überbleibsel aus der Entstehungszeit des Sonnensystems

reicht hat) keine viereinhalb. Dann ist er der Sonne sogar näher als Neptun, aber immer noch fast 30-mal so weit von ihr entfernt wie die Erde.

Außerdem bricht Pluto aus der Ebene aus, in der alle übrigen Planeten die Sonne umzirkeln.

rie wieder zu Gas wird und als zarter Dunstschleier über der dämmrigen Eiswaelt liegt.

Entfernt sich der kosmische Einzelgänger dagegen von unserem Tagesgestirn, sinken die Substanzen – vermutlich in frostigen Flocken – wieder zur Oberfläche zurück.

Seine seltsamen Eigenschaften machen ihn von Beginn an zum Sonderling. Und doch akzeptiert ihn die Welt als Planeten.

Einige Forscher aber beschleichen Zweifel. Schon bald nach Plutos Entdeckung fragen sich die ersten Wissenschaftler, ob er wirklich ganz allein seine Bahn jenseits des Neptuns zieht.

Ausgelöst werden die Überlegungen von jenen periodischen Kometen, die in relativ kurzen Abständen von weniger als 200 Jahren immer wieder auf stark elliptischen Bahnen durch das Sonnensystem vagabundieren.

Woher stammen sie? Im Jahr 1980 stellt der Astronom Julio Fernández die These auf, dass die Kometen aus einem Bereich außerhalb der Neptun-Bahn kommen, etwa 35- bis 50-mal so weit von der Sonne entfernt wie die Erde.

Die Existenz einer solchen Zone erscheint vielen Forschern plausibel. Sogar ein Name ist bald gefunden: „Kuiper-Gürtel“ – nach dem niederländischen Astronom Gerard Kuiper, der sich zu Beginn der 1950er Jahre mit der Trans-Neptun-Region beschäftigt hat.

Doch der Beweis, dass es den Gürtel wirklich gibt, bleibt lange aus.

Erst im Sommer 1992 taucht auf Himmelsaufnahmen des Mauna-Kea-Observatoriums auf Hawaii ein unbekannter Punkt auf. Das Objekt ist noch weiter von der Sonne entfernt als Pluto.

Bald folgen weitere: 1994 kennen Astronomen schon 13 neue Himmelskörper jenseits des Neptun-Orbits. Nach vier Jahren 35, nach acht Jahren mehr als 300 – und derzeit sind es über 1000.

Der Pluto zieht also nicht allein durchs All.

Diese neue Erkenntnis verbreitet in der Fachwelt Unruhe. Was soll geschehen, wenn immer mehr Himmelskörper entdeckt werden, die sich vom Pluto kaum unterscheiden? Muss die Zahl der Sonnenplaneten erneut nach oben korrigiert werden? Gar ins Unermessliche?

Und was genau unterscheidet einen Planeten überhaupt von einem großen Kometen oder Asteroiden?

Im Jahr 2005 lässt sich das Problem nicht mehr ignorieren: Eine Arbeitsgruppe des California Institute of Technology sichtet ein rundliches Kuiper-Gürtel-Objekt, das dem Pluto in mancher Hinsicht ähnlich ist – und dessen Durchmesser sogar um rund 100 Kilometer übertrifft.

Ist der neu entdeckte Himmelskörper nun ein weiterer Planet, wie die NASA stolz verkündet – oder ist der Pluto nur eine Art Asteroid?

Der Neuling trägt heute den Namen „Eris“, wie die griechische Göttin der Zwietracht und des Streits. Denn seine Entdeckung spaltet die Gemeinschaft der Sternenforscher in zwei Lager.

Auf der einen Seite verteidigen „Plutophile“ den Planetenstatus des neunten Wanderers; auf der anderen versuchen Pragmatiker, eindeutige

Die Entscheidung,
Pluto aus dem
Kreis der Planeten
auszuschließen, löst
Empörung aus

Kategorien für die Objekte des Sonnensystems zu erschaffen.

Nun muss die Internationale Astronomische Union handeln. Seit 1919 bestimmt die Gesellschaft, zu der heute rund 10 000 professionelle Astronomen gehören, nach welchen Kriterien Forscher Himmelskörper unterscheiden, benennen und klassifizieren sollen.

Wie eine Weltbehörde sorgt die Organisation dafür, dass nicht jede Nation den Kosmos auf eigene Faust und nach eigenen Regeln erforscht.

Bis zu ihrer Tagung in Prag ist die Forschungsgemeinschaft der entscheidenden Frage ausgewichen: Welche Himmelskörper dürfen als Planet bezeichnet werden – und welche nicht?

Eine Kleinigkeit, könnte man meinen. Doch die Antwort auf diese Frage formt unser Bild des Sonnensystems. Legt fest, wie Astronomen das Universum ordnen, um es selbst zu begreifen und anderen zu vermitteln. Bestimmt auch, ob Kinder in der Schule von acht, neun oder mehr Planeten hören.

JAHRHUNDERTLANG vertrauten Gelehrte und Laien eher auf ihre Intuition als auf exakte Merkmale, wenn sie einen Himmelskörper „Planet“ nannten.

Der Begriff leitet sich vom altgriechischen Wort für „umherschweifen“ ab. Denn die Menschen der Antike bezeichneten so all jene kosmischen Lichter, die – anders als die Sterne – ihre Position am Himmelsgewölbe verändern.

Erst im Verlauf des 17. Jahrhunderts schlossen Forscher Sonne und Mond aus dem Reigen der Wandelsterne aus. Sterngucker zählten fortan alle Himmelskörper zu den Planeten, die die Sonne auf annähernd kreisförmigen Bahnen umlaufen – also auch die Erde.

Diese eher vage Definition bot reichlich Spielraum für Streitereien. So feierten 1801 und in den folgenden Jahren viele Astronomen gleich mehrere frisch aufgespürte Himmelskörper mit Umlaufbahnen zwischen Mars und Jupiter als neue Planeten.

Erst nach der Entdeckung des Neptuns 1846 zogen wieder klare Verhältnisse ein: Die deutlich kleineren Objekte galten fortan nur noch als Asteroiden.

Nun aber, im August 2006, entbrennt erneut die Debatte darüber, ob auch der Pluto den Status eines Planeten verdient.

DIE RESOLUTION 5A der Internationalen Astronomischen Union vom 24. August 2006 soll dieses Problem endgültig lösen. Sie definiert, dass ein Himmelskörper in unserem Sonnensystem nur dann „Planet“ genannt werden darf, wenn er:

- genügend Masse hat, um eine nahezu kugelförmige Gestalt anzunehmen,
- in einer kreisähnlichen Bahn die Sonne umrundet,
- seinen Orbit von allen Objekten in seiner Umgebung „bereinigt“ hat (also quasi von anderen Himmelskörpern „leer gefegt“ hat).

Wie die anderen Planeten erfüllt auch der Pluto die ersten beiden Kriterien. Doch von einer bereinigten Umlaufbahn kann bei ihm keine Rede sein.

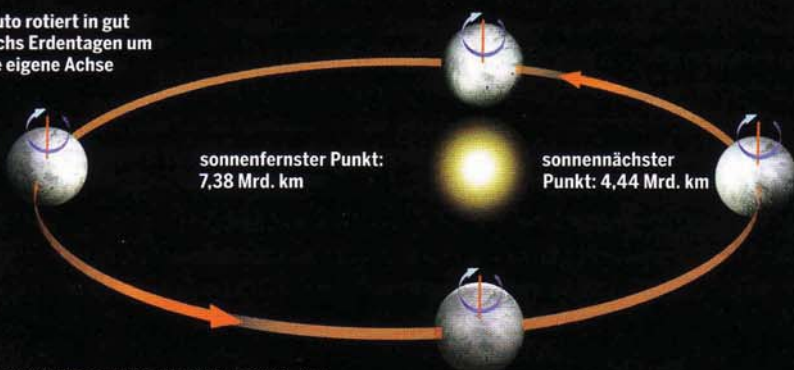
Denn er zieht seine Ellipse um die Sonne inmitten der zahllosen Objekte des Kuiper-Gürtels – und allein hier gibt es, so vermuten Forscher, mehr als 70 000 Himmelskörper mit einem Durchmesser von mindestens 100 Kilometern.

Die größeren Planeten hingegen haben dank ihrer Schwerkraft alle anderen

PROFIL PLUTO

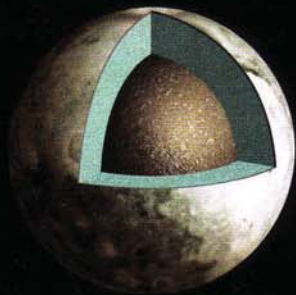
Auf welch sonderbarem Kurs sich das Eisgestirn bewegt, wie seine Atmosphäre gefriert, und aus welchen Stoffen sein Innerstes aufgebaut ist

Pluto rotiert in gut sechs Erdentagen um die eigene Achse



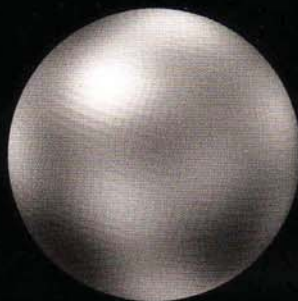
DIE WEITE REISE DURCH DAS ALL

Auf einer mehr als 36 Milliarden Kilometer langen elliptischen Bahn umkreist Pluto die Sonne; für einen Umlauf benötigt er 248 Erdenjahre. Zuweilen entfernt er sich sehr weit vom Zentralgestirn – dann gefrieren vermutlich die Gase in seiner Atmosphäre zu Eis



AUSSEN EIS, INNEN STEIN

Im Kern besteht Pluto (hier eine Illustration) aus Gestein, umschlossen von einem Mantel aus Wassereis (blau) und einer Kruste aus gefrorenen Gasen, vor allem Stickstoff. Insgesamt besitzt das Gestirn nur 0,2 Prozent der Erdmasse



KONTUREN IM EIS

Pluto ist auf Fotos bislang nur undeutlich zu erkennen (oben ein Bild des Weltraumteleskops Hubble). Die hellen und dunklen Zonen gehen womöglich auf unterschiedliche Konzentrationen von Stoffen wie Methaneis zurück

Körper ihrer Umgebung angezogen: Sie sind mit ihnen verschmolzen, haben sie als Monde eingefangen oder beherrschen deren Bahnen.

Die Entscheidung der Astronomenversammlung, Pluto aus dem Kreis der Planeten zu verstoßen, weil er das dritte Kriterium nicht erfüllt, löst Empörung aus – vor allem in den USA. Denn den Amerikanern gilt Pluto als „ihr“ Planet: Schließlich ist er der einzige, den einer ihrer Landsleute entdeckt hat.

Astronomen und Bürger verfassen Petitionen und Protestbriefe, kritisieren das Abstimmungsverfahren der IAU und verhöhnen sie als „Irrelevante As-

tronomische Union“. Schüler beklagen sich bitterlich, ihr Lieblingsplanet dürfe nicht ausgelöscht werden.

Doch nicht alle Reaktionen auf die Entscheidung der IAU sind ernst gemeint: Das Nationale Luft- und Raumfahrtmuseum in Washington D.C. dekoriert die Ausstellungstafel des Plutos mit einer schwarzen Trauerschleife.

In Pasadena nehmen Wissenschaftler des California Institute of Technology, als personifizierte Planeten verkleidet, an einer Parade teil und tragen den Ex-Kollegen symbolisch zu Grabe.

Das Parlament des US-Staates New Mexico, der lange die Heimat des Plu-

to-Entdeckers Tombaugh war (der dort auch 1997 starb), erklärt in einer Resolution Pluto wieder zum Planeten: zumindest für den Zeitraum, an dem er an New Mexicos „vortrefflichem Nachthimmel“ zu sehen ist.

Und die American Dialect Society kürt gar das Kunstverb „to pluto“ zum Wort des Jahres 2006. Es bedeutet so viel wie „herabsetzen“ oder „entwürdigen“.

DOCH AUCH als Ex-Planet wird Pluto nicht in Vergessenheit geraten: Rund sieben Monate vor der Prager Entscheidung der Astronomischen Union ist die NASA-Sonde „New Horizons“ zu ihm aufgebrochen. Mit rund 60000 km/h jagt sie derzeit durchs Planetensystem.

Im Jahr 2015 wird
eine **Sonde Pluto**
erreichen – und
die **ersten Nahauf-**
nahmen machen

Ein kleiner Plutoniumgenerator treibt sie an. Dennoch wird New Horizons ihr Ziel wegen der immensen Entfernung erst 2015 erreichen. Bevor die Sonde dann noch jahrelang weiter in die Tiefen des Kuiper-Gürtels vordringt, wird sie im Vorbeiflug Plutos Oberfläche und Atmosphäre untersuchen, die Dichte interplanetaren Staubs ermitteln – und mit einer Kamera Bilder aufnehmen.

Erst dann dürfte die Menschheit erfahren, wie es in Plutos eisigem Reich tatsächlich aussieht.

Kein Aufwand war den Konstrukteuren zu groß, um das Gewicht der Sonde so gering wie möglich zu halten. Dennoch blieb Platz für die sentimental Gefühle der Amerikaner zu „ihrem“ Pluto:

An Bord ist auch ein wenig Asche seines Entdeckers Clyde Tombaugh. □

Bertram Weiß, 26, ist Journalist in Hamburg.

Literaturtippt: Neil deGrasse Tyson, „The Pluto Files“, W. W. Norton.



GEBURT DER ERDE
Als sich der Blaue Planet formte



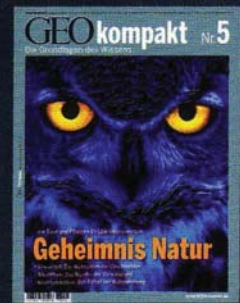
DER KÖRPER
Wie er sich entwickelt, wie er funktioniert



TECHNIK
Nanoroboter, Megajets, denkende Häuser



EVOLUTION DES MENSCHEN
Woher Homo sapiens kam



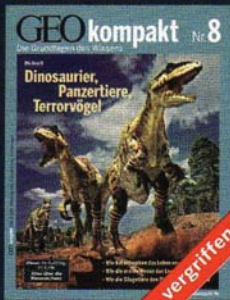
GEHEIMNIS NATUR
Das Leben der Tiere und Pflanzen



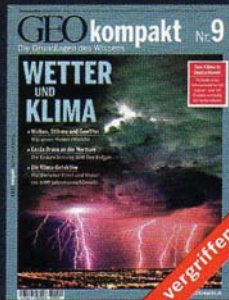
DAS UNIVERSUM
Urknall, Galaxien, Leben im All



GENE
Wie das Erbgut Körper und Verhalten steuert



DIE URZEIT
Panzertiere, Dinosaurier, Terrorvögel



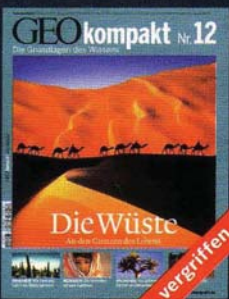
KLIMA
Wie es entsteht, weshalb es sich ändert



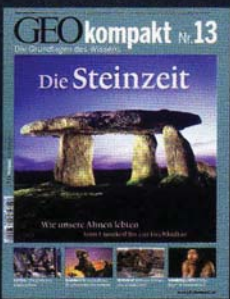
DAS MEER
Eine Welt voller erstaunlicher Lebewesen



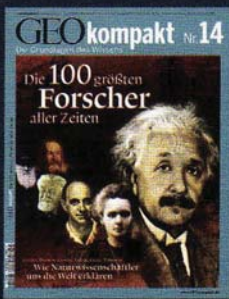
INSEKTEN
Das geheimnisvolle Reich der Sechsheimer



DIE WÜSTE
Wo das Leben an seine Grenzen stößt



STEINZEIT
Wie unsere Vorfahren überlebten



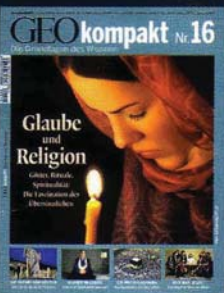
100 FORSCHER
Wie Wissenschaftler die Welt erklären



DAS GEHIRN
Denken, Intelligenz und Bewusstsein

Lieferbare Hefte sind im ausgewählten Buch- und Zeitschriftenhandel erhältlich. Oder bestellen Sie telefonisch unter 01805/861 80 03 oder im Internet unter www.geoshop.de

GEO kompakt



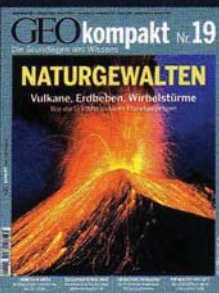
GLAUBE UND RELIGION
Götter, Rituale, Spiritualität



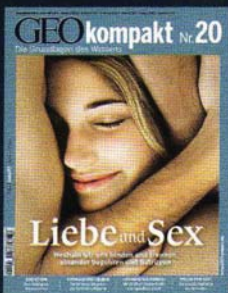
KINDHEIT
Die wichtigsten Jahre im Leben



100 ERFINDUNGEN
Die Geschichte der Innovationen



NATURGEWALTEN
Vulkane, Erdbeben und Wirbelstürme



LIEBE UND SEX
Das Gefühl, das uns zu Menschen macht

GEOkompakt Nr. 22 erscheint am 10. März 2010

Das Abenteuer Wissenschaft

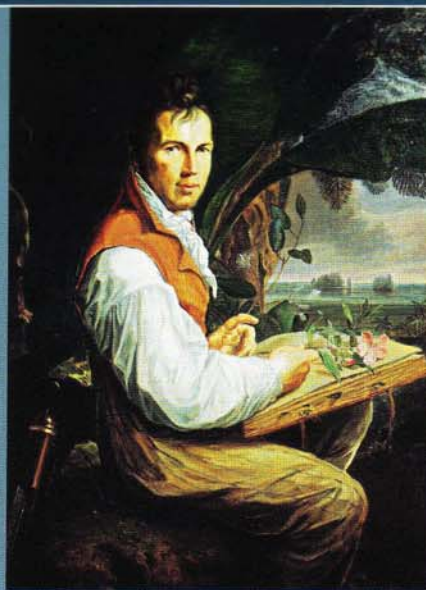
Die großen Expeditionen der Geschichte:
Wie bedeutende Forscher auf ihren Reisen
ins Ungewisse vorstießen – und mit
welchen Erkenntnissen sie nach und nach
ein neues Bild der Erde erschufen



Die »Terra Nova« von Robert F. Scott liegt Ende 1910 in der Antarktis vor Anker. Monate später brechen der Polarforscher und seine Mannschaft mit Schlitten zum Pol auf – und erleben eines der größten Dramen der Expeditionsgeschichte



Der Brite James Cook (oben rechts 1770 bei einem Landgang in Australien) etabliert auf seinen Expeditionen die mathematisch exakte Kartographie



Der letzte Universalgelehrte – und erste Ökologe: Alexander von Humboldt erforscht bei seinen Reisen ab 1799 die großen Zusammenhänge in der Natur



Mit einem zerbrechlichen, 14 Meter langen Floß wagt Thor Heyerdahl 1947 eine Tausende Kilometer lange Überfahrt von Peru in Richtung Hawaii. Der Norweger will eines der großen Rätsel der Völkerwanderungen lösen: Woher stammen die Polynesier?



Ihre völkerkundlichen Studien machen Margaret Mead (hier in Papua-Neuguinea) weltberühmt. Doch eine Reise nach Samoa 1925 endet im Skandal



Bei einer Höhlenexpedition in Uganda fangen Forscher im Jahr 2007 Fledermäuse – um in deren Blut nach dem extrem gefährlichen Marburg-Virus zu suchen

Seit Anbeginn erforscht der Mensch seine Welt. Schon unsere Urahnen wagten sich auf unbesiedelte Kontinente vor. Völker und Scharen von Entdeckern zogen später aus, fremdes Land zu erobern. Doch erst im 18. Jahrhundert kommt ein neues Motiv hinzu: 1768 bricht der Brite James Cook auf, um auf einer Reise wissenschaftliche Erkenntnisse zu gewinnen. Zwar soll er für die Krone auch neue Territorien finden, doch zugleich hat er den Befehl, Inseln und Landmassen auf seiner Route so exakt wie nie zuvor zu kartieren – was er mit einer derartigen Präzision vollbringt, dass manche seiner Karten jahrhundertlang nicht verbessert werden müssen.

Cooks erste Reise in die Südsee ist eine der frühesten wissenschaftlichen Expeditionen, und mit ihr beginnt ein neues Zeitalter. Den Forschungsreisenden geht es nun weniger um Gold oder Pfefferschoten, sondern um Erkenntnisgewinn. Wetterbeobachter, Fossilien Sammler, Völkerkundler und Ausgräber vervollständigen nach und nach unser Bild der Erde.

GEOkompakt erzählt von ihren Triumphen und Katastrophen: von Alexander von Humboldt, der Andenvulkane besteigt und dabei erkennt, dass sich mit der Höhe die Klimazonen verändern. Von Robert Falcon Scott und seinem tragischen Ende am Südpol. Von Thor Heyerdahl, der die Besiedlung Polynesiens bei einem lebensgefährlichen Experiment untersucht. Von einem Forscher, der ein tödliches Virus bis in eine Höhle in Uganda verfolgt.

Mehr als 200 Jahre Expeditionsgeschichte – in der neuen Ausgabe von GEOkompakt. □

WEITERE THEMEN

- »CHALLENGER«: Der erste Vorstoß zu den grotesken Wesen der Tiefsee
- LUCY: Die Vormenschendame aus dem Staub Äthiopiens
- MISSION URMETER: Auf der Suche nach einem Maß für alle Dinge
- HOMO EXPEDITIONENSIS: Warum Menschen die Welt erkunden

