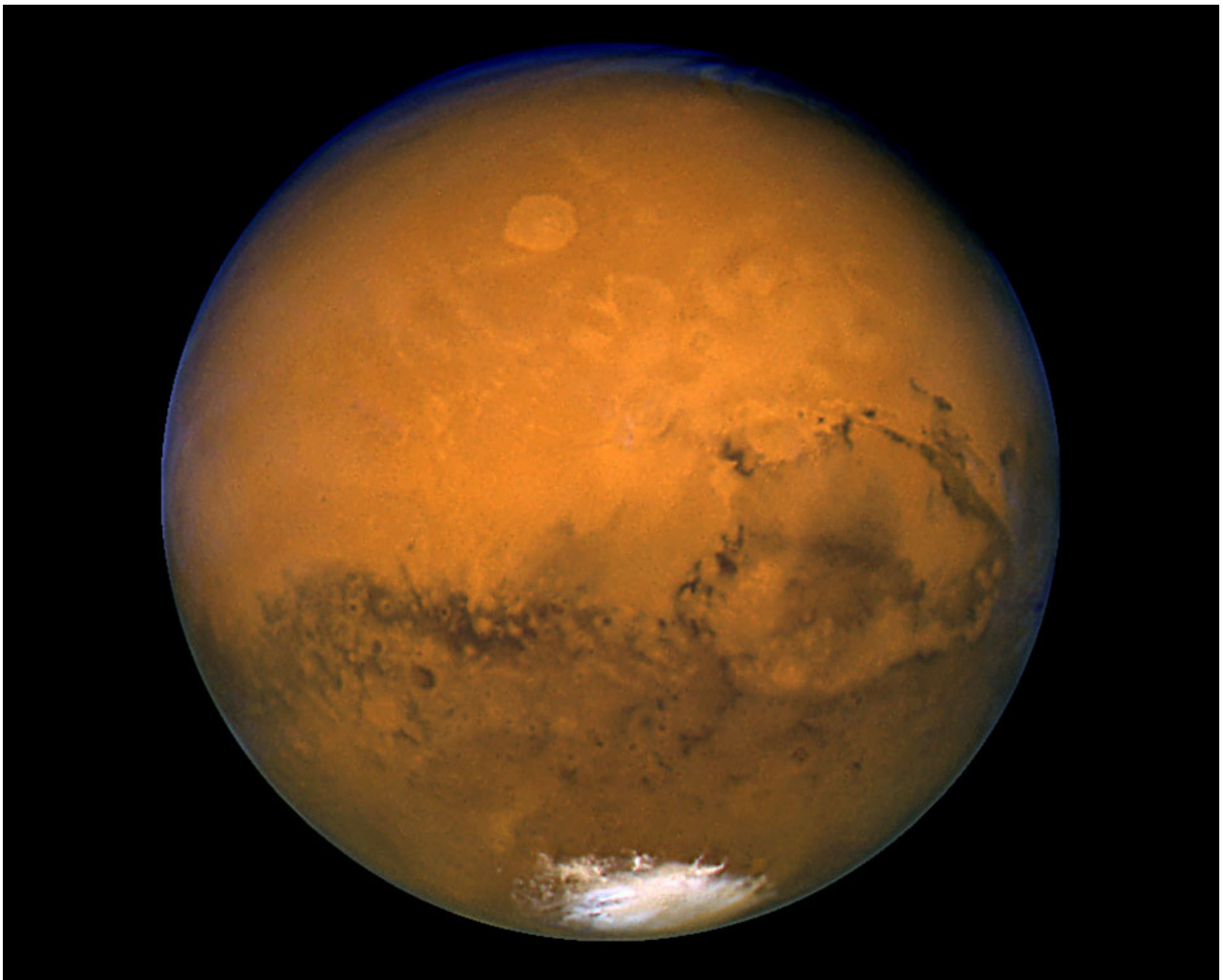


# **Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik**

**M. Scholz**

## **Band 4: Planeten des Sonnensystems I**



**Sonnensystem, Merkur, Venus, Erde, Mars**



M.Scholz

## **Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik**

Band 4: Planeten des Sonnensystems I

Sonnensystem, Merkur, Venus, Erde, Mars

E-Book-Ausgabe 2009

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Autors unzulässig.

Bildnachweis: Wikipedia Commons, NASA, ESA, Autor

Kontakt: [mathias.scholz@t-online.de](mailto:mathias.scholz@t-online.de)

**M.Scholz**

# **Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik**

**Band 4**

## **Planeten des Sonnensystems I**

Sonnensystem, Merkur, Venus, Erde, Mars

**Ausgabe 2009**

**mathias.scholz@t-online.de**



## INHALTSVERZEICHNIS

<b>DAS SONNENSYSTEM.....</b>	<b>2</b>
<b>PLANETEN .....</b>	<b>5</b>
<b>ERDARTIGE PLANETEN .....</b>	<b>6</b>
<b>MERKUR .....</b>	<b>7</b>
ALLGEMEINES.....	8
INNERER AUFBAU.....	8
OBERFLÄCHE .....	9
ATMOSPÄRE.....	13
MAGNETFELD.....	13
DATEN .....	14
<b>VENUS.....</b>	<b>15</b>
ALLGEMEINES.....	18
INNERER AUFBAU.....	18
OBERFLÄCHE .....	20
ATMOSPÄRE.....	35
<i>Tiefe und mittlere Atmosphäre – Troposphäre / Mesosphäre.....</i>	<i>37</i>
<i>Thermosphäre.....</i>	<i>37</i>
<i>Untere Wolkenschicht.....</i>	<i>41</i>
<i>Mittlere Wolkenschicht.....</i>	<i>41</i>
<i>Obere Wolkenschicht .....</i>	<i>42</i>
MAGNETFELD.....	42
DATEN .....	44
<b>ERDE.....</b>	<b>45</b>
ALLGEMEINES.....	46
INNERER AUFBAU.....	47
<i>A-Schicht, Erdkruste (obere Lithosphäre).....</i>	<i>51</i>
<i>B-Schicht, Oberer Mantel.....</i>	<i>51</i>
<i>C-Schicht, Übergangszone zwischen oberen und unteren Mantel.....</i>	<i>52</i>
<i>D-Schicht, Unterer Mantel .....</i>	<i>52</i>
<i>E- und F-Schicht, Äußerer Erdkern.....</i>	<i>53</i>
<i>G-Schicht, Innerer Erdkern .....</i>	<i>53</i>
OBERFLÄCHE .....	55
HYDROSPÄRE.....	64
ATMOSPÄRE.....	69
BIOSPÄRE .....	74
DATEN .....	80

<b>MARS .....</b>	<b>81</b>
ALLGEMEINES .....	84
INNERER AUFBAU .....	85
OBERFLÄCHE .....	87
ATMOSPHERE .....	113
BIOSPHERE .....	120
MAGNETFELD .....	123
DATEN .....	125

Literatur

Index

## **Vorwort**

Das Ziel dieser mehrbändigen Lehrbuchreihe ist es, grundlegende Erkenntnisse über die Welt außerhalb unserer Erde in systematischer Weise auf einem Niveau, den man im amerikanischen als „undergraduate“ bezeichnen würde, dem Leser näher zu bringen. Dabei wurde sowohl eine gewisse Ausführlichkeit als auch Aktualität (hier etwa 2007) – soweit das bei den einzelnen Themenkomplexen überhaupt möglich ist – angestrebt. Gerade in der Astronomie und Astrophysik beobachtet man gegenwärtig innerhalb kürzester Zeiträume einen enormen Wissenszuwachs, wie man es bei anderen Wissenschaften in diesem Umfang her nur begrenzt kennt. Allein während der Arbeit an dieser Buchreihe erforschte die Raumsonde „Galilei“ das Jupitersystem, erreichte „Cassini“ den Saturn mit seinem komplexen Ringsystem und „Huygens“ die Oberfläche des Saturnmondes Titan; eine ganze Anzahl von „Transplutos“ mit „Eris“ an der Spitze wurden entdeckt, was u.a. dazu führte, daß der neue Begriff „Zwergplanet“ in die astronomische Terminologie eingeführt wurde und die bekannten Merksätze für die Planeten unseres Sonnensystems nur noch bedingt gültig waren und umformuliert werden mußten ...

Während es vor 30 Jahren nicht sonderlich schwierig war, die Anzahl und die Namen der Satelliten der Planeten unseres Sonnensystems aufzusagen, ist das heute längst nicht mehr möglich. Man hat sogar den Eindruck, daß es zunehmend schwieriger wird, für die neuentdeckten Objekte überhaupt Namen zu finden, wie die vielen noch vorläufigen Bezeichnungen der neuentdeckten Jupiter- und Saturnmonde zeigen. Und schließlich soll in diesem Zusammenhang nur noch auf den inflationären Zuwachs an Entdeckungen von Exoplaneten allein im letzten Jahrzehnt hingewiesen werden, die uns viele neue Einsichten in die Struktur und Entstehung von Planeten und Planetensystemen gewährt haben. Gerade an Planeten um weit entfernte Sterne entzündet sich unsere Phantasie, wie die vielen künstlerischen Darstellungen beweisen, die man bei der Recherche im Internet leicht auffinden kann.

Ziel dieser „Einführung“ in die Astronomie und Astrophysik ist es Leser anzusprechen, die einen nicht zu kompakten Einstieg in diese Wissenschaft in deutscher Sprache wünschen und auch daran interessiert sind, an die im Internet oder über Zeitschriften zugängliche Fachliteratur herangeführt zu werden. Angesprochen sind in erster Linie Schüler der Abiturstufe unserer Gymnasien, ihre Lehrer, Studenten der ersten Studienjahre sowie selbstverständlich auch die wachsende Zahl an Liebhaberastronomen (so wie der Autor), die mehr wissen wollen über die Objekte, die sie in ihren „Backyard“- Observatorien oder an Volks- und Schulsternwarten beobachten.

Auf Zitierungen wurde im Text – dem Charakter eines Lehrbuches entsprechend – weitgehend verzichtet. Fachaufsätze lassen sich mittlerweile leicht über Google Scholar oder über das Astrophysics Data System (ADS) recherchieren.

Zum Schluß möchte ich mich noch bei meinem Freunden, Bekannten und Kollegen bedanken, die mich mittelbar und unmittelbar während der Zeit der Erarbeitung dieser Buchreihe unterstützt haben.

M.Scholz

Herbst 2007



# Das Sonnensystem

Unsere Sonne ist ein ganz gewöhnlicher Stern in einer ganz gewöhnlichen Galaxie, die sich in einer gewöhnlichen Gruppe weiterer Galaxien am Rand eines bedeutend größeren Galaxienhaufens – des Virgo-Superhaufens - befindet. Auch dieser unterscheidet sich im Prinzip kaum von anderen Galaxienhaufen im Kosmos.

Das einzige Besondere, was unsere Sonne von den vielen anderen der 200 Milliarden Sonnen in unserem Milchstraßensystem unterscheidet ist, das sie einen Planeten besitzt, auf dem intelligentes (?) Leben existiert. Nach neueren Forschungen sieht es sogar so aus, daß sie in dieser Hinsicht in der gegenwärtigen Zeit in unserer Galaxie ziemlich einmalig ist.

Die Sonne dominiert mit ihrer Masse (99.85% der Gesamtmasse des Sonnensystems) einen sphärischen Raumbereich bis in eine Entfernung von ungefähr 2.5 Lichtjahren. Dort ungefähr befindet sich die Heliopause, die angibt, wo der Einfluß des solaren Magnetfeldes auf das interstellare Gas endet. Eine genauere Außengrenze kann nicht angegeben werden. Man ist sich aber ziemlich sicher, daß der Außenbereich des Sonnensystems von einer riesigen Wolke von Kometenkernen gebildet wird, die – z.B. von benachbarten Sternen gestört – ab und zu in ihrer Bahn abgelenkt werden und so in das innere Sonnensystem gelangen.

Im inneren Bereich – bis in eine Entfernung von ca. 50 AE – befinden sich die 8 großen Planeten und bilden zusammen mit einigen Zwergplaneten und ca. 338000 bekannte Planetoiden (nach neueren Untersuchungen schätzt man, daß es allein im Planetoidengürtel zwischen Mars und Jupiter um die 1.5 Millionen Körper größer als 1 km gibt) und einer noch größeren Anzahl kometarischer Objekte das eigentliche Planetensystem. Dazu kommen noch unzählige kleinere Partikel bis hin zu Staubwolken, die jenseits der Saturnbahn einen Staubring bilden.

Der interplanetare Raum wird von dem interplanetaren Medium ausgefüllt, welches neben der Strahlungsenergie der Sonne aus dem interplanetaren Staub und dem interplanetaren Gas besteht. Während der Staub aus mikroskopisch kleinen Teilchen fester Materie aufgebaut ist (z.B. Silikaten), stellt das interplanetare Gas einen ständigen Fluß aus Gas und geladenen Teilchen dar, das von der Sonne wegströmt und deshalb als Sonnenwind bezeichnet wird.

Bezüglich ihrer Größe und ihrer mittleren Dichte lassen sich die großen Planeten in zwei Gruppen einteilen. Einmal in die Gruppe der erdähnlichen Planeten. Dazu gehören alle Planeten, deren mittlere Dichte deutlich über  $3000 \text{ kg/m}^3$  liegt. Das sind Merkur, Venus, Erde und Mars. Alle anderen Planeten haben geringere mittlere Dichten, im Durchschnitt etwas über  $1300 \text{ kg/m}^3$ . Diese Planeten unterscheiden sich auch deutlich in ihrer Größe von den erdartigen Planeten und werden deshalb als Riesenplaneten bezeichnet. Jupiter und Saturn bilden dabei die eigentlichen Riesenplaneten während Uranus und Neptun zu den Großplaneten gerechnet werden.

Der ehemalige Planet Pluto - seit 2006 zum Zwergplaneten degradiert - bildet in diesem Zusammenhang gewissermaßen eine Ausnahme. Seine vergleichsweise geringe Dichte von  $1700 \text{ kg/m}^3$  läßt darauf schließen, daß er zu einem nicht unerheblichen Teil aus Wassereis besteht. Daneben besitzt er einen Mond (Charon) der etwa halb so groß ist wie Pluto selbst. Unter den Fachleuten herrscht

mittlerweile Einigkeit darüber, daß Pluto den KBO's (Kuiper Belt Objects) zuzuordnen ist (zum Vergleich, das größte Objekt im Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter, der Zwergplanet Ceres, hat einen Durchmesser von 980 km und ist damit nur wenig kleiner als Charon (1172 km)). Besonders seit man im Bereich außerhalb der Neptun-Bahn eine größere Anzahl von KBO's aufgefunden hat, ist es folgerichtig, Pluto als „King of the KBO's“ in diese Gruppe mit einzuordnen. Das es in diesem Raumbereich Planetoiden gibt, deren Durchmesser eine ähnliche Größenordnung erreichen wie Pluto, hat die Entdeckung von 20000 Varuna (Durchmesser rund 900 km), von Ixion (Durchmesser ca. 1200 km) von Quaoar (Durchmesser ca. 1300 km), von Sedna (Durchmesser ca. 1600 km) und natürlich von (136199) Eris (Durchmesser ca. 2400 km) gezeigt.

Besonders die Riesenplaneten besitzen z.T. sehr ausgedehnte Satelliten- und Ringsysteme, die der Forschung in den letzten Jahrzehnten durch eine Anzahl spektakulärer Missionen unbemannter Sonden zugänglich wurden (Galileo, Cassini-Huygens, Mars Observer, Mars Express, Mars Reconnaissance Orbiter).

Es ist nicht nur historisch interessant, daß die Abstände der großen Planeten von der Sonne einem einfachen Gesetz gehorchen. Dieses Gesetz wurde 1766 von JOHANN DANIEL TITIUS (1729-1796) empirisch gefunden und ist heute als „Titius-Bode'sche Reihe“ bekannt. Ist  $r$  der mittlere Abstand des Planeten mit dem Index „ $n$ “ von der Sonne, dann gilt (wenn  $r$  in AE gemessen wird):

$$r = 0.4 + 0.3 \cdot 2^n \quad n = \{\infty, 0, 1, 2, \dots\} \quad [1.1]$$

(Man beachte, Merkur entspricht  $n=\infty$ , Venus  $n=0$ , Erde  $n=1$  usw.).

Diese Beziehung stimmt mit der Wirklichkeit nur dann annähernd überein, wenn man nach Mars ( $n=2$ ) sofort  $n=4$  (Jupiter) folgen läßt. Da die Beziehung auch für den 1781 von WILHELM HERSCHEL (1738-1822) entdeckten Planeten Uranus gilt, hatte man die Hoffnung, daß es auch zwischen der Mars- und Jupiterbahn noch einen Planeten geben muß. Eine Vermutung, die in der Neujahrnacht 1800 / 1801 mit der Entdeckung der Ceres durch GUISEPPE PIAZZI (1746-1826) in Palermo bestätigt wurde.

Die Titius-Bode'sche Reihe ist eine rein empirische mathematische Beziehung, für die es keine physikalische Begründung gibt. Wenn man bedenkt, daß ihre „Vorhersagegenauigkeit“ bei den äußeren Planeten rasch schwindet ( $n=7$ , Neptun: Abweichung  $> 28\%$ ,  $n=8$ , Zwergplanet Pluto: Abweichung  $> 90\%$ ), ist ihre Bedeutung eher mit einer Polynomapproximation einer halbwegs komplexen Funktion vergleichbar. Trotzdem hat sie als heuristisches Werkzeug bei der Vorhersage der Planetoiden in der Mars-Jupiter-Lücke eine gewisse historische Bedeutung erlangt.

Heute weiß man, daß der Zwergplanet Ceres nur ein besonders großer Vertreter einer damals neuen Gruppe von Himmelskörpern ist, von denen in der Mars-Jupiter-Lücke mittlerweile einige 10000 bekannt und benannt sind. Diese Himmelskörper werden als Planetoiden bezeichnet und bilden den inneren Planetoidengürtel des Sonnensystems. Ein weiterer Planetoidengürtel befindet sich außerhalb der Neptunbahn. Es ist der bereits erwähnte Kuiper-Gürtel mit Pluto / Charon als größten Vertreter. Er enthält wahrscheinlich bei weitem mehr Objekte als der innere Planetoidengürtel (einige 100 Millionen, bis jetzt rund 800 bekannt), die aber aufgrund der großen Entfernung und ihrer geringen Größe nur schwer zu beobachten sind. Einige von ihnen ( $> 50$ , Stand 2006) bewegen sich auf ähnlichen Bahnen wie Pluto, weswegen sie neuerdings „Plutinos“ genannt werden.

Jenseits von Saturn haben die Raumsonden Pioneer 10 und 11 unerwartet viele Staubpartikel registriert, bei denen lange Zeit nie recht klar war, ob sie aus dem interstellaren Raum stammen oder zum Sonnensystem selbst gehören. In den letzten Jahren – nach der Entdeckung der ersten Kuiper-Objekte – hat man Modellrechnungen durchgeführt die zeigen, daß die beobachtete Staubkonzentration (ca. 1 Staubteilchen pro  $50 \text{ km}^3$ ) aus Zusammenstößen von einzelnen Kuiper-Planetoiden stammen könnte. Würde man das Sonnensystem aus einigen 10 Lichtjahren – also quasi von außen – betrachten, dann könnte man um die Sonne einen hellen Staubring wahrnehmen. Innen durch die Staubmassen des Zodiakallichts und außen durch die Staubmassen im Kuiper-Oortschen Gürtel verursacht (das Zodiakallicht ist an interplanetaren Staubpartikeln gestreutes Sonnenlicht, wobei sich die Staubpartikel besonders in der Ekliptikalebene des inneren Sonnensystems aufhalten).

Eine weitere wichtige Objektgruppe bilden die Kometen in unserem Sonnensystem. Man unterscheidet dabei kurzperiodische Kometen (die sich auf elliptischen Bahnen im inneren Sonnensystem aufhalten) und langperiodische Kometen. Bei den langperiodischen Kometen ist die Lage ihrer Perihelien außergewöhnlich gleichmäßig über die Himmelskugel verteilt woraus man schlußfolgern kann, daß sie aus einem sehr weit entfernten, um die Sonne sphärisch symmetrischen Reservoir stammen. Dieses Reservoir muß noch weit außerhalb des Kuiper-Gürtels (Entfernung ca. 40000 bis 150000 AE) liegen und wird als Oortsche Kometenwolke bezeichnet. Diese „Wolke“ läßt sich mit den heutigen technischen Möglichkeiten weder optisch noch gravitativ nachweisen. Ihre Existenz folgert man aus theoretischen Erwägungen (Relikt aus der Zeit der Entstehung des Sonnensystems) und – wie bereits erwähnt – aus der Statistik der langperiodischen Kometen. Die Masse der gesamten Wolke wird grob auf ca. 50 Erdmassen geschätzt. Zwei Objekte (Kometenkerne) in der Oortschen Wolke sind im Mittel 1 AE voneinander entfernt, d.h. die Objektdichte ist sehr gering.

Seit den 60ziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurden alle Planeten des Sonnensystems von interplanetaren Raumsonden – viele sogar mehrfach – besucht. Der Erkenntnisgewinn, der dabei erzielt wurde, ist gewaltig. Völlig neue, unerwartet fremde Welten gerieten vor die automatischen Kameras und Meßgeräte. Die großen, bereits von Galilei entdeckten Jupitermonde, können von der Erde aus nur unter besonderen Bedingungen als kleine, relativ detaillose Scheibchen von weniger als 2 Bogensekunden Durchmesser beobachtet werden. Seit der Voyager- und der noch viel erfolgreicheren Galileo-Mission haben sich neue Fachgebiete entwickelt, die sich nur mit der „Geologie“ und Topographie dieser Monde beschäftigen. Auf Io wurden Vulkane entdeckt, die sich grundlegend von denen auf der Erde unterscheiden. Man spekuliert mittlerweile, ob es unter der Eisfläche des Mondes Europa vielleicht sogar primitives Leben gibt und Ingenieure entwickeln Ideen, wie man später einmal den Eispanzer durchbrechen kann, um in seinem flüssigen Inneren nach Mikroben zu suchen.

Eine weitere wichtige Entdeckung ist, daß alle Riesenplaneten – nicht nur Saturn – mehr oder weniger stark ausgeprägte Ringsysteme besitzen. Ein weitere Höhepunkt ist die detaillierte Inspektion des Saturn, seines Rings und der Monde seines ausgedehnten Satellitensystems, durch die Sonde Cassini / Huygens. Besonders die Landung der kleinen Eintauchsonde Huygens auf dem (seitdem immer rätselhafter gewordenen) Mond Titan muß als technische Meisterleistung klassifiziert werden.

Erinnert sei auch an die spektakulären Marslandungen von Viking 1 und 2 im Jahre 1976 oder an Pathfinder und das „Marsauto“ Sojourner, dessen Fahrt Millionen von Menschen 1997 im Internet und im Fernsehen verfolgen konnten. Auch der Schleier der Venus ist gelüftet und man weiß, wie es auf

ihrer glühendheißen Oberfläche aussieht. Mit Venus Expresß der ESA, die im Frühjahr 2006 die heiße Schwester unserer Erde erreichte, hofft man mehr über den ausufernden Treibhauseffekt und seine Auswirkungen auf die atmosphärische Zirkulation dieses Planeten zu erfahren.

Eine sehr gute Nachricht für alle Planetologen war der Beschluß des US-Kongresses trotz Intervention der amerikanischen Regierung die Mittel für eine Pluto-Mission („New Horizons“) bereitzustellen. Damit scheinen alle Hindernisse aus dem Weg geräumt zu sein, damit die Sonde im Januar 2006 gestartet werden kann. Nach einem „Schwungholen“ am Jupiter im März 2007 wird sie 2015 Pluto erreichen. Außerdem soll sie nach Beendigung der Primärmission noch einige Kuiper-Belt-Objekte anfliegen bevor sie für immer im interstellaren Raum verschwindet.

Die größten Abenteuer alle Zeiten im Gedächtnis der Menschen waren aber wohl die Mondlandungen, die beginnend mit dem denkwürdigen 20. Juli 1969, als NEIL ARMSTRONG und EDWIN ALDRIN als erste Menschen den Mond betraten, und endend mit Apollo 17 am 11. Dezember 1972 die Erforschung des Mondes zu einem vorläufigen Abschluß brachten.

## Planeten

Gewöhnlich werden nur die 8 Planeten Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, und Neptun als „Planeten“ bezeichnet, wobei die ersten 6 bereits seit dem Altertum bekannt sind. Daß diese Abgrenzung mehr historische und linguistische Gründe hat, wurde bereits im Kapitel 5.2. erläutert. Demnach sind „Planeten“ Himmelskörper in unserem Sonnensystem, die „groß“ und „rund“ sind und sich um die Sonne (und nicht um einen anderen Planeten) bewegen und die neuerdings auch noch den Bereich ihrer Einflußsphäre von „Müll“ geräumt haben müssen. Haben sie das nicht getan, dann sind es eben Zwergplaneten. Diese Definition ist in der Planetologie nicht sonderlich brauchbar, wenn man neben den kinematischen Aspekten Hauptaugenmerk auf die physikalische, morphologische, chemische und geologische Beschaffenheit Wert legt (es gibt im Sonnensystem einige „Monde“, die in ihrer Größe die Planeten Merkur und die Zwergplaneten Pluto und Eris übertreffen). Trotzdem soll in den folgenden Abschnitten die klassische Lesart beibehalten werden. Die Monde werden in einem Extrakapitel behandelt.

Für alle „Großen“ Planeten des Sonnensystems gilt z.B.:

- Ihre Umlaufbahnen sind nahezu Kreisbahnen
- Ihre Umlaufbahnen liegen alle näherungsweise in einer Ebene
- Die Planeten bewegen sich prograde um die Sonne
- Fast alle Planeten rotieren in der gleichen Richtung
- Ihre Eigengravitation ist groß genug, um ihnen Kugelform zu verleihen
- Sie haben den Bereich ihrer Bahn weitgehend von Kleinkörpern gesäubert

Die ersten vier kinematischen Eigenschaften haben etwas mit der Entstehung des Sonnensystems zu tun. Deshalb muß jede kosmogonische Theorie der Planetenentstehung diese Eigenschaften vorhersagen bzw. erklären können, wenn sie ihre Brauchbarkeit beweisen will.

Von ihrem Aufbau her, ihrer Größe und dem Bereich, den sie im Sonnensystem bevölkern, lassen sich die Planeten in folgende drei Gruppen einordnen:

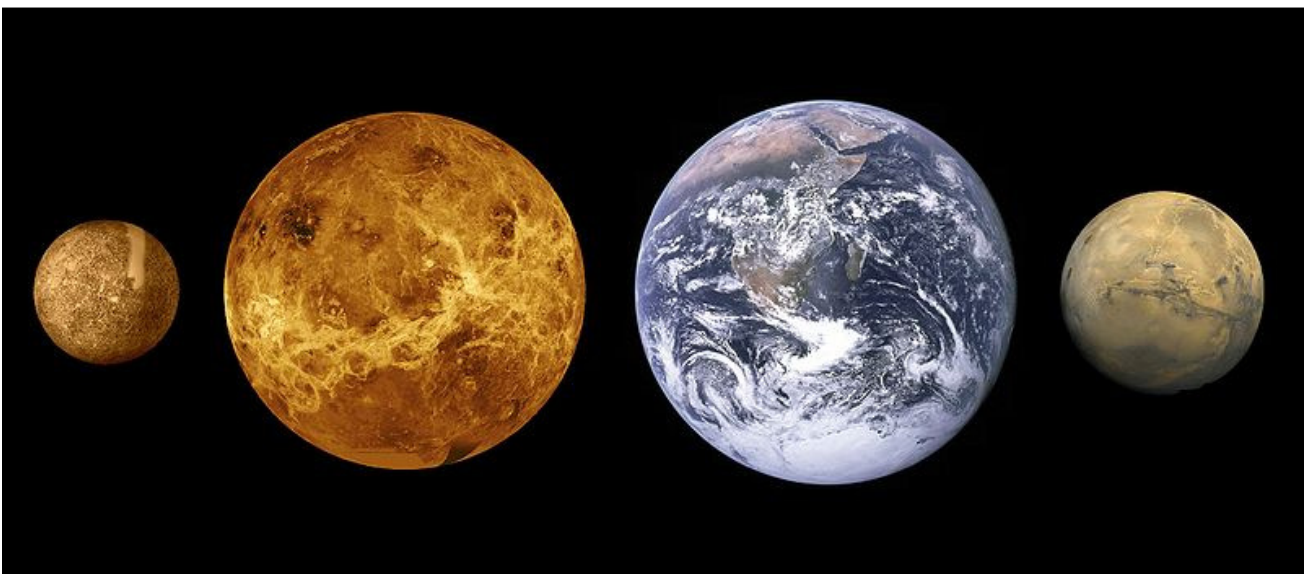
- Erdartigen Planeten = innere Planeten (von Merkur bis Mars)
- Riesenplaneten (Jupiter und Saturn) bzw. Großplaneten (Uranus und Neptun)
- Größere Kuiper-Objekte (Pluto, Eris, Sedna, Quaoar ..., beinhalten nach der neuen Definition auch Zwergplaneten)

Diese Gruppenbildung ist auch kosmogonisch interessant, da sie eine stoffliche Differenzierung im „Urnebel“ anzeigen, aus dem sich die Planeten gebildet haben.

### Erdartige Planeten

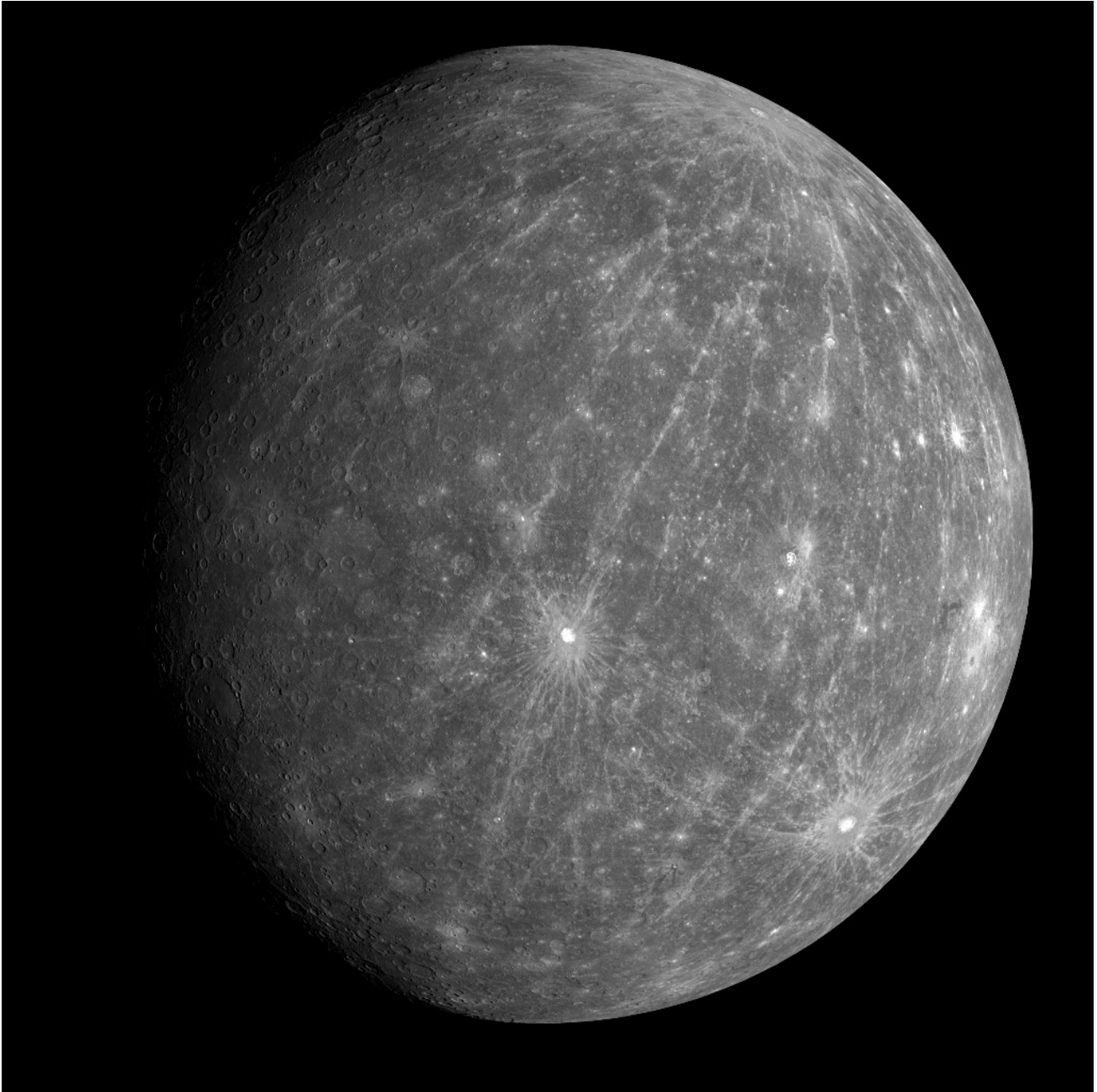
Die „erdartigen“ Planeten nennt man „erdartig“, da sie in ihrer Größe (zwischen 4879 km (Merkur) und 12740 km Durchmesser (Erde)) und in ihrem inneren Aufbau (Metallkern, silikatischer Mantel und Kruste) der Erde ähneln. Man bezeichnet sie oft auch als die „Inneren Planeten“, da sie sich innerhalb des Planetoidengürtels, der sich zwischen Mars und Jupiter erstreckt, um die Sonne bewegen. Soweit sie eine Atmosphäre besitzen, besteht sie überwiegend aus Stickstoff (Erde) oder Kohlendioxid (Venus und Mars). Durch diese Eigenschaften kann man sie klar von den Groß- und Riesenplaneten sowie den Eismonden und den größeren Kuiper-Belt-Objekten abgrenzen.

Vergleicht man die Oberflächenmorphologie und die klimatischen Verhältnisse, dann zeigen die erdartigen Planeten eine erstaunliche Variationsbreite. Besonders die Unterschiede zwischen Erde und Venus, die ja in ihrer Größe durchaus vergleichbar sind, ist bemerkenswert. Beide Planeten haben trotz ähnlicher Ausgangsbedingungen offensichtlich einen völlig unterschiedlichen Entwicklungsweg eingeschlagen. Dem im Vergleich zur Erde recht kleinen Mars (0.53 Erddurchmesser) kann man in bezug auf seine Oberfläche noch am ehesten „Erdähnlichkeit“ bescheinigen – auch deshalb, weil in den letzten Jahren doch beträchtliche Mengen von Wasser in seinen Permafrostboden gefunden wurden.



Die erdartigen Planeten im einheitlichen Größenmaßstab

## Merkur



Der Planet Merkur – benannt nach dem römischen Pedant des griechischen Götterboten Hermes – ist der Planet, der sich nur sehr schwer beobachten lässt. Durch seine Sonnennähe kann er lediglich eine kurze Zeit unter günstigen Bedingungen in der Abend- oder Morgendämmerung gesehen werden. Deshalb war über seine physische Beschaffenheit bis zu den drei Vorbeiflügen von Mariner 10 in den Jahren 1974 und 1975 so gut wie nichts bekannt. Zwar berichteten Beobachter immer wieder von schwachen Albedostrukturen. Sie konnten aber konkreten Objekten auf der Merkur Oberfläche nicht zugeordnet werden. Erst ab 1998 gelangen mit Methoden der digitalen Fotografie Merkurphotos, die Oberflächendetails zeigen, die man auch auf den Merkur-Aufnahmen von Mariner 10 ausmachen kann. Mit Hilfe von Radar lässt sich dagegen die Merkur Oberfläche bis zu einer Auflösung von 1 Kilometer

recht gut beobachten, wie die beeindruckenden Ergebnisse zeigen, die mit dem Radioteleskop von Arecibo gewonnen wurden.

Die Erklärung einer systematischen Veränderung seiner Bahnlage – relativistische Periheldrehung genannt – durch ALBERT EINSTEIN (1879-1955) verhalf der Allgemeinen Relativitätstheorie im ersten Drittel des zwanzigsten Jahrhunderts zu ihrer wohlverdienten Anerkennung. Zuvor wurde vermutet, daß diese Bahnabweichungen von einem noch unbekanntem Planeten innerhalb der Merkurbahn verursacht werden. Man hatte bereits einen Namen für ihn – Vulkan. Aber es gibt ihn nicht. Heute ist die Merkurbahn wieder in das Interesse der Himmelsmechaniker gerückt, da man an ihrem Langzeitverhalten Aspekte des deterministischen Chaos in Mehrkörpersystemen studieren kann, was zur Beantwortung der Frage wichtig ist, ob unser Sonnensystem langfristig stabil bleibt.

### Allgemeines

Merkur ist der innerste Planet des Sonnensystems. Er bewegt sich auf einer für Planeten stark exzentrischen Bahn ( $e=0.2056$ ) einmal in 87.97 Tagen um die Sonne, die er sich im Perihel bis auf 0.3075 AE nähern kann. Seine geringe Masse von nur 0.0553 Erdmassen macht ihn zum masseärmsten Planeten des Sonnensystems. Sein Durchmesser von 4880 km liegt in der Größenordnung der Jupitermonde Ganymed und Kallisto während seine mittlere Dichte von  $5430 \text{ kg/m}^3$  nur unwesentlich kleiner ist als die mittlere Dichte der Erde ( $5520 \text{ kg/m}^3$ ). Wenn man bedenkt, daß der Druck in seinem Inneren aufgrund seiner kleinen Masse im Vergleich zur Erde relativ gering ist und deshalb die Gesteine und Minerale auch nicht so stark zusammen -gedrückt werden (was einer Dichteerhöhung gleichkommt), ist seine mittlere Dichte sogar größer als die „entspannte“ mittlere Dichte der Erde. Das deutet darauf hin, daß Merkur einen relativ großen Eisen-Nickel-Kern besitzt.

Interessant ist auch seine Eigenrotation. Bis Anfang der sechziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts war es Lehrbuchwissen, daß der Merkur eine gebundene Rotation ausführt. Erst mit Einsatz des Radars konnte mit Hilfe des Dopplereffekts nachgewiesen werden, daß diese Ansicht falsch ist. Merkur rotiert genau dreimal in zwei Merkurjahren um seine eigene Achse. Die Rotationsperiode beträgt demnach 58.646 Tage. Himmelsmechanisch spricht man von einer 2:3-Resonanz. Das ist dahingehend ungewöhnlich, da man im Sonnensystem – Beispiel Erdmond – nur 1:1-Resonanzen dieses Typs kennt. Als Ursache kommt eine kleine asymmetrische Massenverteilung im Innern Merkurs in Betracht, die aufgrund der großen Bahnexzentrizität nur in Perihelnähe den Gezeitenkräften der Sonne Angriffspunkte liefert.

### Innerer Aufbau

Die mit der Erde vergleichbare Dichte impliziert – wie bereits erwähnt -, daß Merkur einen sehr großen Eisen- bzw. Eisen-Nickel-Kern (Radius  $\sim 1800 \text{ km}$  oder  $0.75 R_{\text{Merkur}}$ ) besitzt, der mit einem aus Silikatgesteinen aufgebauten Mantel und einer Krustenschicht umgeben ist. Genauere Angaben sind z.Z. nicht möglich, da es weder seismische Informationen von diesem Planeten gibt noch man aus einer eventuell vorhandenen Abplattung über das polare Trägheitsmoment auf eine innere Dichteverteilung

schließen kann. Man ist also auf Modellrechnungen angewiesen, die natürlicherweise von den Bedingungen der Erde ausgehen.

Strukturen auf der Oberfläche seiner Kruste deuten darauf hin, daß Merkur nach seiner Entstehung und Differentiationsphase ziemlich schnell ausgekühlt ist und heute wahrscheinlich nur noch einen kleinen aufgeschmolzenen Kern besitzt. Daß der Kernbereich flüssig ist, kann auch ohne seismische Messungen mit relativer Sicherheit behauptet werden. Die Bewegung des Planeten auf seiner Bahn wird durch eine Art „Ruckelbewegung“ überlagert, die sich nur erklären läßt, wenn das Planeteninnere im flüssigen Zustand ist. Merkur ähnelt in diesem Zusammenhang einem geworfenen rohen Ei.

Die Abkühlung des Planeten führte im Laufe der Zeit zu einer Schrumpfung von 1 bis 2 Kilometern im Radius, was auf der Merkuroberfläche zur Ausbildung von Verwerfungsstrukturen (sogenannte „*scarps*“) geführt hat.

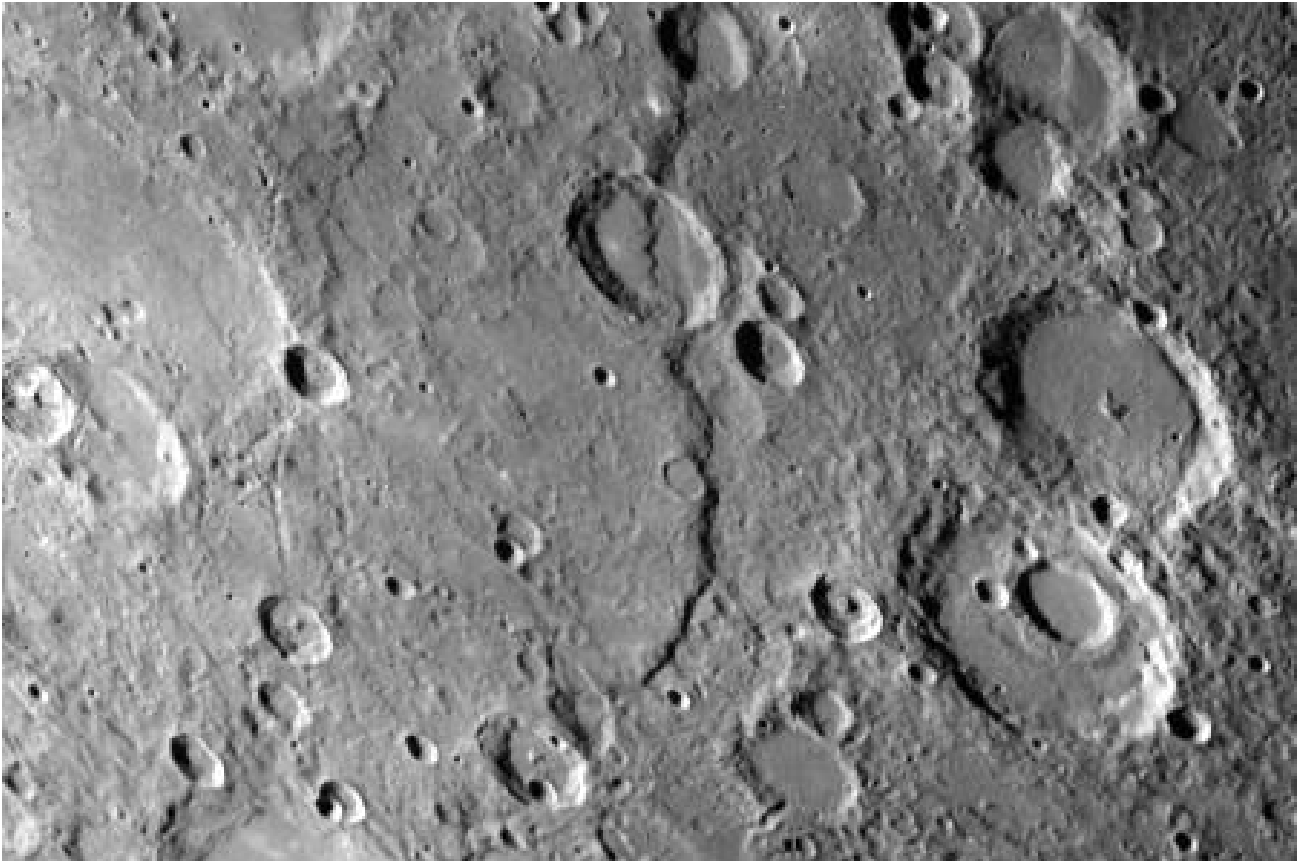
Das von Mariner 10 gemessene Magnetfeld (ca. 300 nT) bildet ein Dipolfeld, dessen Achse annähernd mit der Rotationsachse zusammenfällt. Es wird entweder durch einen rudimentären Dynamoeffekt aufrechterhalten oder es handelt sich um die Auswirkung eines remanenten Magnetismus der Oberflächengesteine. Man hofft, daß die nächste, z.Z. noch in der Planungsphase befindlichen Merkurmissionen der ESA (Bepi-Colombo, geplant 2013) und die bereits gestartete NASA-Sonde Messenger (gestartet 2004) eine Antwort auf diese Frage gibt.

## Oberfläche

Während der Mariner 10 –Mission konnten bei drei Vorbeiflügen über 10000 Fotografien der Merkuroberfläche aufgenommen werden, die etwas mehr als die Hälfte der Planetenoberfläche abdecken. Schon eine flüchtige Betrachtung der Bilder offenbart Strukturen, die sehr stark an die Oberfläche des Erdmondes erinnern. Ausgedehnte Kraterlandschaften, durchsetzt von klippenartigen Strukturen und Steilhängen, prägen das Bild. Was jedoch fehlt, sind ausgedehnte Mare-Strukturen, wie man sie von der Vorderseite des Erdmondes her kennt. Bei den Kratern handelt es sich bis auf relativ wenige Ausnahmen fast ausschließlich um Einschlagskrater. Um einige der Größeren findet man helle Strahlen – ähnlich wie bei Tycho auf der Mondoberfläche – und ausgedehnte Bereiche mit einer Vielzahl von Sekundärkratern.

Erosionsspuren sind allenthalben auszumachen. So gibt es Merkurkrater, bei denen kaum noch die Ränder zu erkennen sind. Andere wiederum sehen sehr jung aus und zeigen kaum Anzeichen von Erosion. Im Vergleich zum Mond sind die größeren Merkurkrater (Durchmesser 40 bis 70 km) deutlich flacher, die zahlreichen Sekundärkrater dagegen tiefer. Der Grund dafür dürfte in der größeren Gravitationsbeschleunigung liegen. Wie detaillierte Untersuchungen zeigen, erfolgt die Auffüllung der bei einem Meteoriteneinschlag entstehenden Kratergrube effektiver als auf dem Mond. Das zurückfallende Material überdeckt wegen der größeren Masseanziehung einen kleineren Bereich als auf dem Mond. Das erklärt auch, warum Sekundärkrater nur relativ nahe an einem primären Einschlagkrater liegen und warum sie im Mittel tiefer sind als die Sekundärkrater, die man auf dem Mond beobachtet. Die Krater des Merkurs sind übrigens nach Künstlern, Komponisten, Schriftstellern und Dichtern benannt.

Charakteristisch für Merkur sind Hangstrukturen, die sich mehr oder weniger gewellt z.T. über Hunderte von Kilometern über die Oberfläche erstrecken. Man bezeichnet sie als „*lobate scarps*“, was soviel wie „gewundene Böschungen“ bedeutet. Sie sind die sichtbaren Überbleibsel einer Krustenschrumpfung aufgrund der Abkühlung des sehr großen Eisenkerns. Die Hanghöhe der „*scarps*“ beträgt einige hundert Meter und kann in Extremfällen bis drei Kilometer betragen. Da es sich dabei vor allem um Aufwölbungen und Überschiebungen handelt, kann man sehr schön an älteren Kratern studieren, die durch solch eine Böschung geteilt werden.

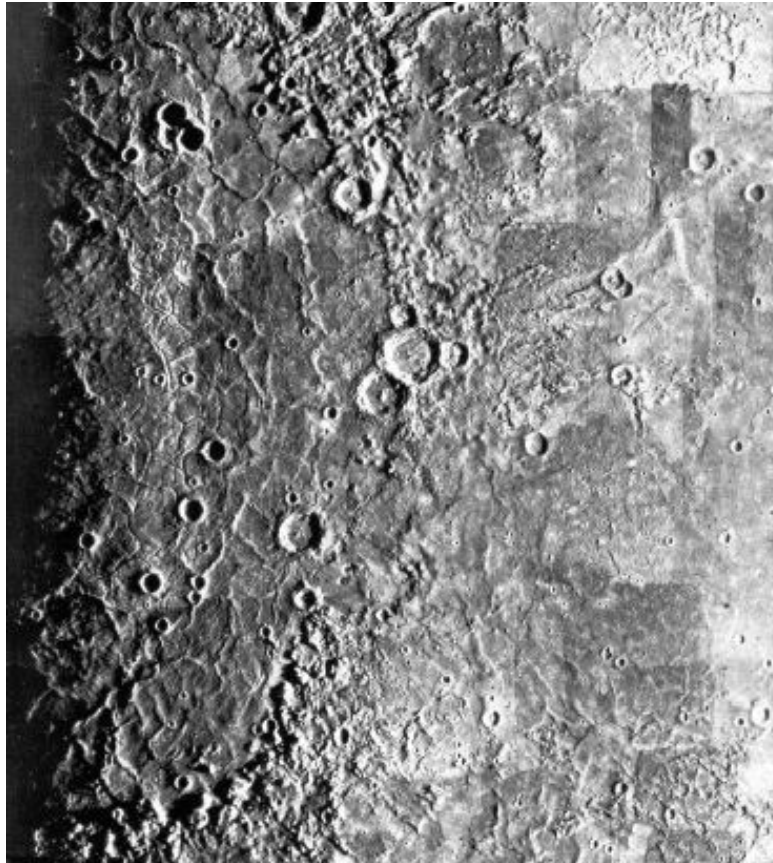


Discovery Rupes ist eine Verwerfung von ungefähr 640 km Länge und ca. 2 km Höhe. Sie zerteilt den Krater Rameau genau in der Mitte. Bei den Scarps handelt es sich um „Runzelstrukturen“, die bei der Kontraktion des Planeten nach Herausbildung seiner Kruste entstanden sind.

Die Untersuchung der Daten von Mariner 10 hat weiterhin ergeben, daß es auf Merkur zwei unterschiedliche Regionen gibt, die sich mehr oder weniger auffällig durch ihre Kraterdichte unterscheiden. 70% der erfaßten Oberfläche weisen eine sehr hohe Kraterdichte auf, 20% eine geringere. Das Alter der kraterreichen Region schätzt man auf 4 bis 4.5 Milliarden Jahre, der Rest ist rund eine halbe Milliarde Jahre jünger und entstand nach einer Phase vulkanischer Aktivität, bei der relativ flache Ebenen entstanden sind. Diese Phase fällt auch in etwa mit dem Ende des „kosmischen Bombardements“ vor rund 3.8 Milliarden Jahren zusammen. Seitdem ist die Oberfläche quasi konserviert und hat sich – bis auf einige Einschläge – so gut wie nicht mehr verändert.

Ein besonders interessantes Objekt auf der Merkur Oberfläche ist das Caloris-Becken (Caloris Plantania). Das riesige Becken, welches nach dem griechischen Wort für Wärme benannt wurde, hat einen Durchmesser von etwa 1300 Kilometer und dürfte das Ergebnis einer gewaltigen Kollision mit

einem ungefähr 100 Kilometer großen Planetoiden gewesen sein. Sein Alter schätzt man auf 3.8 bis 3.9 Milliarden Jahre. Es hat eine gewisse Ähnlichkeit mit dem Mare Orientale auf der Mondrückseite und besteht aus mehreren z.T. rudimentären kreisförmigen Bergrücken, die eine Höhe von 2000 m erreichen. Nach dem Impact hat sich der entstandene Krater teilweise mit Lava gefüllt.



Fotomosaik des Teils des Caloris Planitia, welches von Mariner 10 aufgenommen werden konnte. Deutlich sind die ringförmigen Strukturen des Kraterbodens zu erkennen.

Die beim Einschlag entstandene Stoßwelle ist durch den ganzen Planeten gelaufen, wurde dabei fokussiert und hat genau auf der Gegenseite ein geologisch interessantes, mehr oder weniger chaotisches Terrain erzeugt („weird terrain“). Es besteht aus Aufwerfungen (Hügeln, Gesteinsblöcken) und tektonischen Rissen sowie aus mit Magma überfluteten Ringkratern.

Genauso wie der Mond ist auch der Merkur mit einem feinkörnigen Material – dem Regolith – bedeckt. Es zeigt die gleichen photometrischen und polarimetrischen Merkmale, wie man sie auch von der Mondoberfläche kennt.

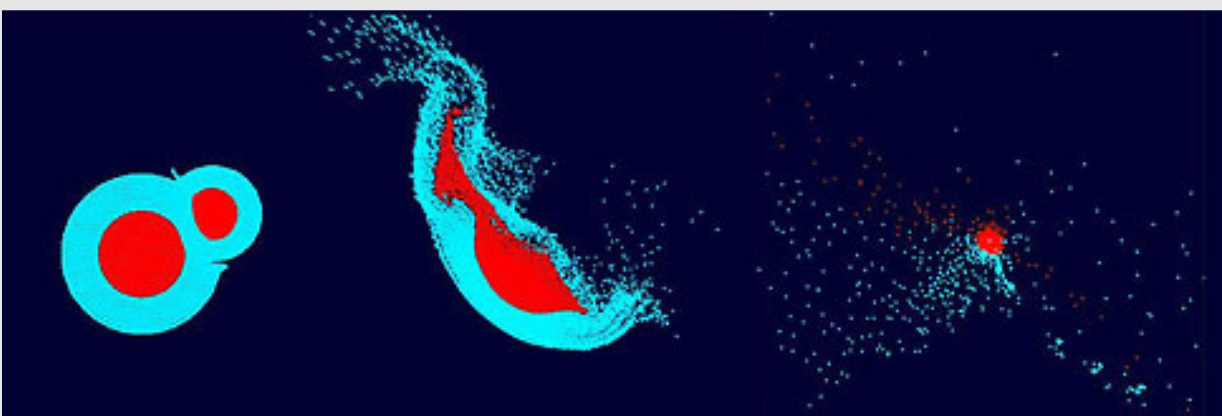
Daß man mit erdgebundenen Methoden auf dem Merkur noch Entdeckungen machen kann, zeigt der Nachweis eines jungen, ca. 85 Kilometer großen Kraters im Jahre 2002 mit Hilfe des 305-Meter-Radioteleskops in Arecibo. Durch Radar wurde immerhin noch eine Auflösung im Kilometer-Bereich erreicht. Der neu entdeckte Krater liegt in der Nähe des Äquators und ist – ähnlich wie der Krater Tycho auf der südlichen Mondvorderseite – von einem hellen Strahlensystem umgeben. Sein Alter dürfte nur einige 100 Millionen Jahre betragen.

### Entstehung des Merkurs

Merkur besitzt mit  $\sim 5300 \text{ kg/m}^3$  die größte unkomprimierte Dichte eines Planeten im Sonnensystem (Erde  $\sim 4000 \text{ kg/m}^3$ ; Mars  $\sim 3750 \text{ kg/m}^3$ ). Nach dem Zweischalenmodell bedeutet das, daß Merkur einen außergewöhnlich großen Metallkern mit einem Radius von ungefähr  $0.75 R_M$  besitzen muß wenn man davon ausgeht, daß die Dichte der Mantelgesteine mit denen der Erde vergleichbar ist. Diese Beobachtung ist mit den herkömmlichen Modellen der Planetenentstehung im inneren Sonnensystem nur schwer zu vereinbaren weshalb man in den letzten Jahren nach alternativen Hypothesen gesucht hat:

- Verdampfung von Teilen des Silikatmantels durch Einwirkung hoher Temperaturen im Anschluß an die Akkretionsphase der Planetenentstehung („*postaccretion vaporization*“ aufgrund starker elektromagnetischer Strahlung während des T-Tauri-Stadiums der Ursonne)
- Kollisionszenario - „Urmerkur“ stößt mit einem großen Planetoiden zusammen, wodurch das bereits in Kern und Mantel ausdifferenzierte Gestein verdampft und herausgeschleudert wird um anschließend im Laufe von einigen Millionen Jahren wieder akkretiert zu werden.

Nach neueren Untersuchungen, die auf Computersimulationen einer Arbeitsgruppe unter Leitung von JONATHAN HORNER von der Universität Bern beruhen, ist das Szenarium (b) am besten geeignet, um die überproportionale Verarmung des Merkurs an Silikaten zu erklären. Danach traf vor 4.5 Milliarden Jahren ein Himmelskörper mit einer Masse von ungefähr 20% der heutigen Merkurmasse mit einer Geschwindigkeit von ca. 25 km/s den noch nicht vollständig ausdifferenzierten Urmerkur, der damals ungefähr doppelt so schwer war wie heute. Dabei wurde das Material des äußeren Mantels aufgeschmolzen, teilweise verdampft und durch die beim Zusammenstoß entstehenden Stoßwellen in den Weltraum abgesprengt. Daraus bildete sich nach Abkühlung eine Wolke aus bis zu zentimetergroßen Gesteinspartikeln, die sich rasch vom Planeten entfernten. Nur etwa 50 % davon sind nach den sehr detaillierten Computersimulationen in den folgenden 4 Millionen Jahren wieder auf den Merkur zurückgefallen. Der andere Teil - und insbesondere der mit einer im Vergleich zu Eisen geringeren Dichte - hat sich im Sonnensystem langsam zerstreut. Einiges davon wurde sicherlich von der Erde und der Venus aufgenommen (man schätzt im Fall der Erde ca.  $1.6 \cdot 10^{19} \text{ kg}$ ). Im Ergebnis dieser Simulation entstand schließlich ein Planet, dessen innerer Aufbau ziemlich genau dem des heutigen Planeten Merkur entspricht.



Die Abbildung zeigt drei Phasen dieses Impakts. Der metallische Kern der beiden Himmelskörper ist in rot, der silikatreiche Mantel in hellblau dargestellt. Links erkennt man, wie weit der Planetoid ca. 2 Minuten seit Impaktbeginn in den Planeten eingedrungen ist. Die Darstellung in der Mitte zeigt den Zustand der beiden Körper nach ca. 8 Minuten und im letzten Bild erkennt man, daß sich bereits nach 3 Stunden der größte Teil des leichten Materials im Weltraum verteilt hat und im Wesentlichen nur ein Eisenkern übrig bleibt.

## Atmosphäre

Merkur besitzt heute keine nennenswerte Atmosphäre mehr. Die geringen Gasmengen, die in seiner Umgebung nachgewiesen wurden, bilden gewissermaßen eine Exosphäre, die bis zur Planetenoberfläche reicht. Die darin enthaltenen Gase entweichen kontinuierlich in den kosmischen Raum, so daß sie immer wieder nachgeliefert werden müssen. Das geschieht durch eine Restentgasung des Planeten, durch das Freisetzen von Heliumatomen aus dem Zerfall radioaktiver Elemente, aus der Wechselwirkung der intensiven Sonnenstrahlung mit dem Oberflächengestein und nicht zuletzt durch einen Eintrag über den Sonnenwind.

Nachgewiesen werden konnten folgende Gase (geordnet nach Häufigkeit):

Sauerstoff  $O_2$ , Natrium Na, Wasserstoff  $H_2$ , Helium He, Kalium K sowie folgende Spurengase:

Argon Ar, Kohlendioxid  $CO_2$ , Wasser  $H_2O$ , Stickstoff  $N_2$ , Xenon Xe, Krypton Kr und Neon Ne.

Es ist nicht unwahrscheinlich – und Radarbeobachtungen lassen den Schluß zu – daß es im Bereich der Polkalotten im Schatten mancher Krater merkliche Mengen von Wassereis gibt. Dort liegen die Oberflächentemperaturen permanent bei ca. 112 K, wodurch größere Eismassen über lange Zeiten stabil bleiben könnten. Quelle für diese Eisvorkommen könnten Einschläge von wasserreichen Kometen und Planetoiden sein.

## Magnetfeld

Die einzigen Messungen des Merkurmagnetfeldes stammen von den drei Vorbeiflügen von Mariner 10 in den Jahren 1974 und 1975, wobei nur die erste und die dritte Begegnung brauchbare Werte lieferten.

Da der Merkur praktisch keine Atmosphäre besitzt, verfügt er auch nur über eine vernachlässig-bare Ionosphäre. Die maximale Feldstärke, die gemessen wurde, lag bei rund 400 nT als die Sonde bei ihrer dritten Annäherung (16.März 1975) die Stoßfront durchquerte. Der Abstand der Magnetopause zur Merkuroberfläche dürfte geringer als ein Merkurradius (2439 km) sein.

Man nimmt an, daß die Magnetosphäre in ihrer Struktur einer verkleinerten Ausgabe der Irdischen ähnelt. Eine detaillierte Analyse erwartet man von der Sonde Bepi-Colombo, welche die ESA nach den vorliegenden Planungen im Jahre 2013 mit einer Ariane 5 auf die Reise zum Merkur schicken möchte. Sie soll nach zweieinhalbjähriger Flugzeit am Merkur eine spezielle Sonde (MMO, „*Mercury Magnetospheric Orbiter*“) zur Erforschung des Magnetfeldes aussetzen.

Vielleicht kann man mit ihrer Hilfe klären, was die Ursache für das Merkur-Magnetfeld ist. Z.B. vermutet man, daß der relativ große Eisenkern des Planeten doch noch nicht vollständig erstarrt ist und dadurch zumindest noch einen rudimentären Dynamoeffekt am Laufen hält. Eine neuere Erklärung (CHRISTENSEN, 2006) geht auch davon aus, daß der Merkur einen flüssigen Eisenkern besitzt, wobei der äußere Bereich statisch ist (d.h. die Konvektion ist unterbunden) und nur der innere Bereich eine durch Konzentrationsunterschiede (und zwar aufgrund des Schwefelgehalts) hervorgerufene stabile Strömung aufweist. Auf diese Weise kann nur ein Bruchteil des vom Dynamo erzeugten Feldes durch den ruhenden Teil des Eisenkerns nach außen diffundieren was bedeuten würde, daß Merkurs Dynamo gegenwärtig nur noch tief in dessen flüssigen Kern arbeitet.

## Daten

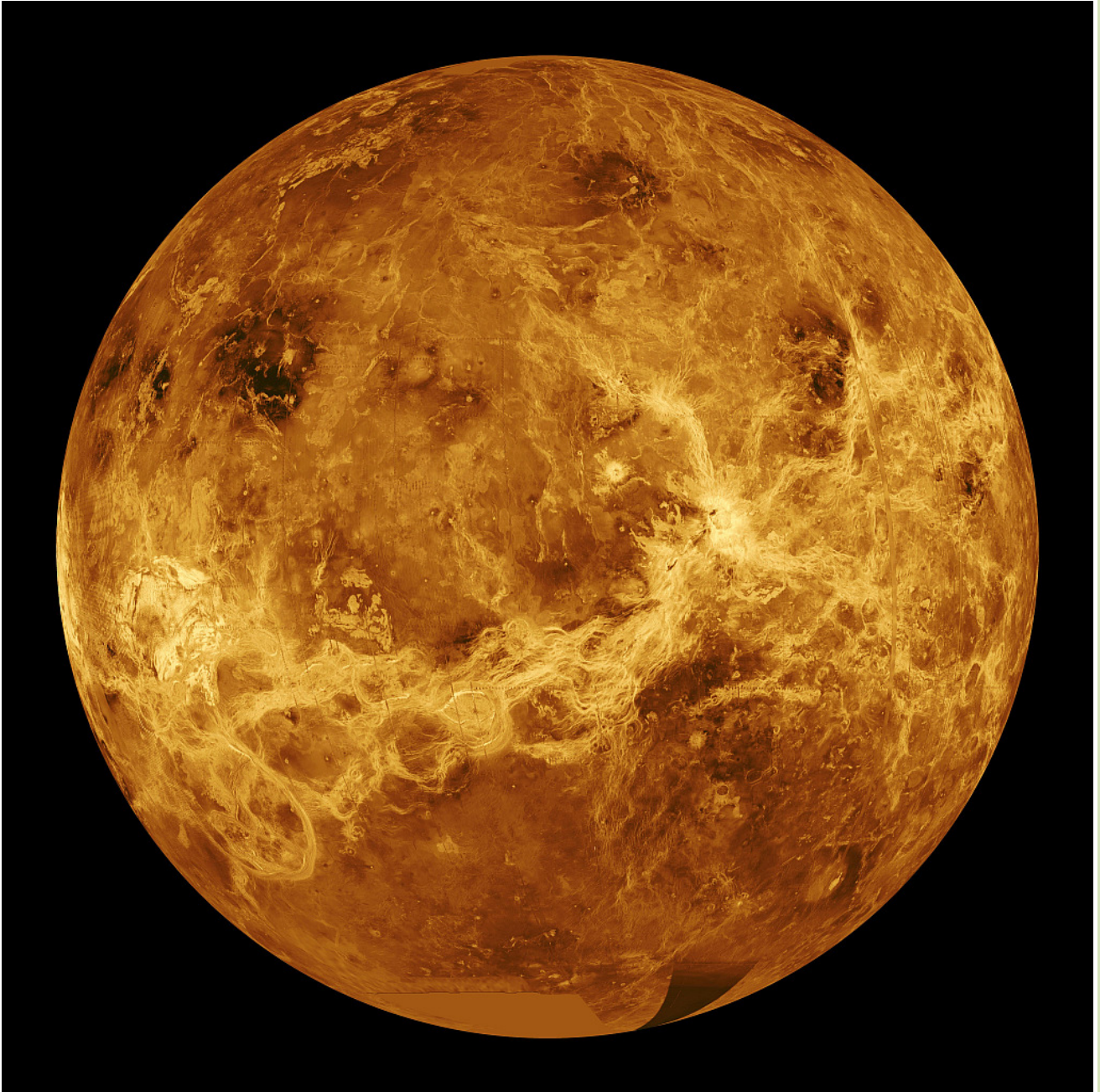
### BAHNPARAMETER

Große Halbachse ( $10^6$ km)	57.91
Umlaufzeit (siderisch) in Tagen	87.969
Umlaufzeit (tropisch) in Tagen	87.968
Perihelabstand ( $10^6$ km)	46.00
Aphelabstand ( $10^6$ km)	69.82
Umlaufzeit (synodisch) in Tagen	115.88
Mittlere Bahngeschwindigkeit (km/s)	47.87
Max. Bahngeschwindigkeit (km/s)	58.98
Min. Bahngeschwindigkeit (km/s)	38.86
Bahnneigung (Grad)	7.00
Numerische Exzentrizität	0.2056
Sidereale Rotationsperiode (Stunden)	1407.6
Länge eines Tages (Stunden)	4222.6

### PLANETENPARAMETER

Masse ( $10^{24}$ kg)	0.3302
Volumen ( $10^{10}$ km <sup>3</sup> )	6.083
Äquatorradius (km)	2439.7
Polradius (km)	2439.7
Abplattung	0.0000
Mittlere Dichte (kg/m <sup>3</sup> )	5427
Schwerebeschleunigung (m/s <sup>2</sup> )	3.70
Entweichgeschwindigkeit (km/s)	4.3
Albedo	0.119
Geometrisches Albedo	0.106
Solarkonstante (W/m <sup>2</sup> )	9126.6
Strahlungstemperatur (K)	442.5

## Venus



Venus hat als heller Abend- und Morgenstern die Menschen schon immer beeindruckt. Sie ist nach Sonne und Mond das hellste Objekt, welches man am Himmel sehen kann. Im Jahre 1610 entdeckte GALILEO GALILEI (1564-1642), der an der Universität Pisa und Padua lehrte und forschte, mit Hilfe eines selbstgebauten Fernrohrs die Venusphasen. Diese Entdeckung lies sich auf einfache Weise nur dann erklären, wenn man das kopernikanische (heliozentrische) Weltsystem zugrunde legt. Denn die Ausbildung von ausgeprägten Phasenzyklen ist typisch für die inneren Planeten und wird deshalb in der gleichen Form auch bei Merkur beobachtet.

Für den Beobachter am Fernrohr erscheint die Venus in einem gleichmäßigen, gelblichweißen Licht ohne sonderliche Details. Nur manchmal oder unter Anwendung von speziellen Filtern sind leichte Schattierungen zu erkennen.

1761 entdeckte der berühmte russische Gelehrte MICHAEL LOMONOSSOW (1711-1765) bei der Beobachtung des Durchgangs der Venus vor der Sonnenscheibe die Venusatmosphäre. Seitdem ist klar, daß man mit dem Fernrohr keine Einzelheiten der Venusoberfläche sehen kann, da der gesamte Planet von Wolken eingehüllt ist. Das nährte bis in die sechziger Jahre des 20. Jahrhunderts die Hoffnung, daß es auf der Venusoberfläche vielleicht doch Leben geben könnte. Unzählige Bücher über „Venusianer“ wurden geschrieben und auch viele utopische Filme (wie der sowjetische Klassiker „Planet der Stürme“, 1961) hatten Bewohner oder Expeditionen zur Venus zum Inhalt. Leider sind Temperaturen um die 500 °C nach dem heutigen Erkenntnisstand der biologischen Wissenschaften für die Entstehung und für das Bestehen von Leben eher hinderlich...

Durch die Bahnlage der Venus kommt es im Durchschnitt alle 120 Jahre vor, daß die Venus für einen Beobachter auf der Erde über die Sonnenscheibe wandert. Derartige Venusdurchgänge treten immer paarweise im Abstand von 8 Jahren im Dezember und im Juni ein. Sie hatten in der Vergangenheit eine große Bedeutung (schon JOHANNES KEPLER hat sich mit ihnen beschäftigt), da man aus ihrer genauen Beobachtung die Entfernung von der Erde zur Sonne – die Astronomische Einheit – bestimmen kann. Besonders die Durchgänge von 1761 und 1769 wurden genutzt, um diese seltenen Ereignisse weltweit so genau wie möglich zu verfolgen. Selbst der berühmte Seefahrer JAMES COOK (1728-1779) war in das weltumspannende Beobachtungsprogramm eingebunden. Nach der aufwendigen Auswertung aller Beobachtungen erhielt man zum ersten Mal einen einigermaßen verlässlichen Wert der Astronomischen Einheit, der später nur noch marginal verbessert wurde.

Die letzte Venusdurchgang fand übrigens am 8.6.2004 statt und der nächste ist am 6.6.2012 zu beobachten, wobei der Erste vollständig und der Zweite teilweise von Deutschland aus gesehen werden kann bzw. konnte.

Die eigentliche Erforschung der Venus begann 1962 mit dem Vorbeiflug der amerikanischen Raumsonde Mariner 2 in 34000 Kilometer Entfernung. Seitdem haben weitere Sonden die Venus erreicht, sind auf ihrer Oberfläche gelandet, haben ihre Atmosphäre erkundet und ihre gesamte Oberfläche mittels Radartechnik kartiert. Gegenwärtig (Herbst 2006) befindet sich die ESA-Sonde Venus-Expreß auf einer Umlaufbahn um Venus und führt in erster Linie Forschungsarbeiten aus, die zu einem besseren Verständnis der Venusatmosphäre führen sollen.

### **Erforschung der Venus mit Raumsonden**

Die Venus war eine der ersten Ziele autonom arbeitender Planetensonden und in den sechziger- und siebziger Jahre bevorzugtes Ziel sowjetischer Raumsonden. Bemerkenswert sind hier insbesondere die ersten Landungen, die unser Bild von der Venus völlig revidiert haben. Von den 21 als geglückt geltenden Venusbesuchen entfallen 15 auf die damalige Sowjetunion, 5 auf die Vereinigten Staaten (darunter die vollständige Radar-Kartographie durch die Magellan-Sonde) und eine auf die ESA (Stand 2006). Dazu kommen noch drei Vorbeiflüge, die alle den Swing-By-Effekt ausnutzten um entweder Merkur (Mariner 10) oder die äußeren Planeten (Galileo, Cassini) zu erreichen.

Während manche Science Fiktion -Autoren vor 60 Jahren noch (mehr oder weniger) ernsthaft darüber spekulierten, ob es auf der wolkenverhangenen Venus dichte Regenwälder mit exotischen Tieren und

## Venus

Pflanzen gibt, haben die Planetenmissionen ein völlig neues und so nicht vermutetes Bild diese Planeten ermöglicht, daß mehr Rätsel aufwirft als Antworten gegeben werden können.

Die folgende Tabelle listet alle erfolgreichen Venusexpeditionen seit den Anfängen der Raumfahrt auf:

MARINER 2	USA 1962	Passage in 34000km Distanz
MARINER 5	USA 1964	Passage in 3950km Distanz
VENERA 4	UdSSR 1967	Atmosphärensonde, stellte Kohlendioxidgas als Hauptbestandteil fest
VENERA 5	UdSSR 1969	Atmosphärensonde
VENERA 6	UdSSR 1969	Atmosphärensonde
VENERA 7	UdSSR 1970	Erste sanfte Landung auf Venus, 23 min. lang Funksignale von der Oberfläche
VENERA 8	UdSSR 1972	Zweite sanfte Landung, 50 min. lang Datenübertragung
MARINER 10	USA 1974	Passage in 5870km Distanz
VENERA 9	UdSSR 1975	sanfte Landung, 53 min. lang Funkkontakt
VENERA 10	UdSSR 1975	Funkkontakt 65 min.
PIONEER-VENUS 1	USA 1978	Venus-Satellit ("Orbiter")
PIONEER-VENUS 2	USA 1978	vier Meßsonden in Venusatmosphäre eingetaucht, harter Aufschlag
VENERA 11	UdSSR 1978	sanfte Landung, 110 min. lang Datenübertragung
VENERA 12	UdSSR 1978	sanfte Landung, 95 min. lang Datenübertragung
VENERA 13	UdSSR 1982	sanfte Landung, 127 min. farbige Panoramaaufnahmen
VENERA 14	UdSSR 1982	sanfte Landung, 57 min. farbige Panoramaaufnahmen
VENERA 15	UdSSR Okt. 1983	Radarabtastung der Planetenoberfläche
VENERA 16	UdSSR Okt. 1983	
VEGA 1	UdSSR Juni 1985	Sonden um HALLEY'schen Kometen (März 86 Passage), Venusvorbeiflug, Ballonsonde abgesetzt
VEGA 2	UdSSR Juni 1985	Ballonsonden in Venusatmosphäre abgesetzt, Lander
MAGELLAN	USA Aug. 1990	Venus-Radar-Mapper, vollständige Kartierung der Venusoberfläche mit 120m Auflösung
GALILEO	USA, Febr. 1990	Jupitersonde, Venusvorbeiflug
CASSINI	USA, 1998/99	Saturnsonde, 2 Venusvorbeiflüge (April 1998, Juli.1999)
VENUS EXPRESS	ESA, 2006	Untersuchung der Venusatmosphäre

### Allgemeines

Venus bewegt sich in einer Entfernung von 108.2 Millionen Kilometer auf einer fast kreisförmigen Bahn (Exzentrizität = 0.0068) in 224,7 Tagen einmal um die Sonne. Ihre Bahnebene ist um  $3.4^\circ$  gegenüber der Ekliptik geneigt. Sie kann sich bis auf 41 Millionen Kilometer der Erde nähern (Mars: 55.8 Millionen Kilometer) und ist damit der erdnächste Planet. Auch sonst ähnelt sie auf dem ersten Blick der Erde: fast gleiche Größe ( $0.95 R_E$ ) und Masse ( $0.8 M_E$ ), dichte, mit Wolken bedeckte Atmosphäre, ähnlicher innerer Aufbau. Damit enden aber auch schon die Gemeinsamkeiten. Bereits 1932 wurde spektroskopisch in der Venusatmosphäre Kohlendioxid, später dann auch Kohlenmonoxid, Fluorwasserstoff und Salzsäure – wenn auch in verschwindend geringen Mengen im Vergleich zu  $CO_2$  - nachgewiesen. Heute weiß man, daß das Kohlendioxidgas für den enormen Treibhauseffekt verantwortlich ist, der die untere Venusatmosphäre gleichmäßig auf eine Temperatur von rund 750 K aufheizt. Erste Oberflächendetails konnten mit Hilfe des Radioteleskops in Arecibo (Radar-Echo-Methode) noch vor der erfolgreichen Erkundung des Planeten durch sowjetische und amerikanische Sonden unter der optisch undurchdringbaren Wolkenschicht aufgelöst werden.

Da sich die Venus innerhalb der Erdbahn um die Sonne bewegt, kann sie sich nur maximal  $47^\circ$  von der Sonne entfernen (Elongation). Das ist auch der Grund, weshalb man sie – genauso wie Merkur – nur in der Abend- bzw. Morgendämmerung mit dem freien Auge auffinden kann. Dann ist sie aber auch selten zu übersehen, da sie eine scheinbare Helligkeit von  $-3$  bis  $-4$  Größenklassen erreicht. Im frühen antiken Griechenland nannte man die Venus als Morgenstern Phosphoros (was soviel wie „Lichtbringer“ bedeutet) und als Abendstern Hesperos. Später erkannte man, daß es sich um ein und demselben Planeten handelt und brachte ihn mit der Göttin Aphrodite in Verbindung.

Venus rotiert in 243 Tagen einmal um ihre Achse (retrograd), d.h. sie benötigt für eine Umdrehung ein wenig mehr Zeit als für einen kompletten Umlauf um die Sonne. Wäre die Rotationsperiode (243.01 Tage) nur geringfügig größer (243.16 Tage), dann hätte man es mit einer 5:2-Resonanz in bezug auf die synodische Umlaufszeit zu tun. Wenn in ferner Zukunft diese Resonanz erreicht ist, wird Venus bei den Konjunktionen der Erde immer dieselbe Seite zuwenden.

### Innerer Aufbau

Dadurch, daß die Venus nur geringfügig kleiner als die Erde ist und auch ihre mittlere Dichte sich kaum von der des Planeten Erde unterscheidet, ist es eine gute Arbeitshypothese anzunehmen, daß auch ihr innerer Aufbau weitgehend dem der Erde gleicht. Sie besteht demnach aus einem metallischen inneren Kern (flüssig), einem mächtigen Gesteinsmantel und einer Kruste, wobei die Kruste im Gegensatz zur Erde keine verschiebbaren Großplatten aufweist und dementsprechend auch keine tektonischen Strukturen in Form von Faltengebirgen und Subduktionszonen besitzt. Ein Grund dafür könnte sein, daß die gegenwärtige Mantelkonvektion dazu einfach nicht in der Lage ist. Ob es in der fernen Vergangenheit einmal Plattentektonik gegeben hat, ist noch Gegenstand der Forschung und nicht unwahrscheinlich. Das aus den Messungen der Magellan-Sonde gefolgerte Fehlen eines festen zentralen Kerns könnte nach Meinung der Planetenphysiker auch das fehlende Eigenmagnetfeld

erklären. Außerdem erscheint die Rotationsperiode von 243 Tagen als viel zu klein, um mittels des Dynamoeffekts im Inneren der Venus ein nennenswertes Magnetfeld zu erzeugen.

Aus der Analyse der Oberflächenstrukturen der Venus, die ja seit der (fast) vollständigen Radarkartierung durch Magellan (1990-1994) im Detail bekannt sind, kann man einige Informationen über den Mantelbereich gewinnen. Die wichtigste Beobachtung in diesem Zusammenhang ist dabei, daß die Venusoberfläche vor ca. 500 (bis 1000) Millionen Jahren - und zwar innerhalb von weniger als 100 Millionen Jahren - einen globalen Oberflächenenerneuerungsprozeß (Resurfacing) durchgemacht haben muß, der (fast) alle geologischen Strukturen, die davor bestanden haben, ausgelöscht hat. Die Lösung des Rätsels, wie so etwas geschehen konnte, ist im stofflichen Aufbau, der Struktur und der Konvektionsmuster des Venusmantels zu suchen (siehe Infobox „Resurfacing“).

### IAU-Nomenklatur der Oberflächentopographie der Venus

Bezeichnung	Beschreibung	Benennung nach
Chasma (Chasmata)	steilwandig begrenztes Tal	Jagdgöttinnen
Collis (Colles)	Hügel	Meeresgöttinnen
Corona (Coronae)	Einbruchkrater	Göttinnen der Fruchtbarkeit
Dorsum (Dorsa)	Höhenrücken	Himmels- und Lichtgöttinnen
Farrum (Farra)	vulkanische Quellkuppen	Wassergöttinnen und Nymphen
Fluctus (Fluctus)	Lavastromfeld	Erdgöttinnen
Fossa (Fossae)	langes, schmales und flaches Tal	Kriegsgöttinnen und Walküren
Linea (Lineae)	lineare Oberflächenform	Kriegsgöttinnen und Amazonen
Mons (Montes)	Berg (Gebirge)	Göttinnen
Patera (Paterae)	unregelmäßiger flacher Vulkankrater	Berühmte Frauen der Geschichte
Planitia (Planitiae)	Tiefebene mit Mareprägung	Mythologische Heldinnen
Planum (Plana)	Hochebene	Liebes- und Kriegsgöttinnen
Regio (Regiones)	Hochlage mit Kontinentalcharakter	Titaninnen
Rupes (Rupes)	Böschung, Steilwand	Heim- und Herdgöttinnen
Terra (Terra)	große Hochlandmasse	Venus in verschiedenen Sprachen
Tessera (Tesserae)	Hochlage mit Parkettstruktur	Schicksalsgöttinnen
Tholus (Tholi)	vulkanische Kuppel	Göttinnen
Unda (Undae)	wellige Oberflächenform	Wüstengöttinnen
Vallis (Valles)	Tal	Flußgöttinnen

Um eine topographische Oberflächenstruktur auf der Venus zu benennen, werden i.d.R. zwei einzelne Bezeichner verwendet. Dabei identifiziert der zweite Bezeichner die Art der Oberflächenstruktur entsprechend der obigen Tabelle. Der erste Name ist ein Eigenname (oft der Name einer Göttin oder einer berühmten Frau) und bezeichnet die individuelle Struktur (z.B. Guinevere Planitia - Guinevere war die Frau König Arthurs und Geliebte des Ritters Lancelot). Im Zuge der Gleichberechtigung der Geschlechter hat die IAU die Benennung von Venuslandschaften mit durchgängig weiblichen Namen nicht ganz durchgehalten. So gibt es neben dem riesigen Maxwell Montes z.B. auch den kleinen Krater „Billie Holiday“ ...

### Oberfläche

Die ersten Informationen über die Struktur der Venusoberfläche erhielt man in den fünfziger und sechziger Jahren mit Hilfe der Radar-Echo-Methode von der Erde aus. Zum Einsatz kam dafür das 305-m Radioteleskop in Arecibo und die Parabolantennen von Goldstone in Kalifornien. Untersucht wurden die großräumigen Reflexionseigenschaften der Oberflächengesteine im Zentimeterwellenbereich. Außerdem wurde versucht, mit Hilfe von interferometrischen Messungen Informationen über die Höhe der Strukturen zu erhalten. Elektromagnetische Wellen zwischen 3 und 30 Zentimeter haben die Eigenschaft, daß sie die dichte Venusatmosphäre ungehindert durchdringen können. Aus der in Richtung Erde reflektierten und von den Radioteleskopen wieder aufgefangenen Strahlung läßt sich nach einer aufwendigen Bearbeitung ein Bild von den unter den dichten Wolken verborgenen Oberflächendetails erhalten.

Es zeigte sich, daß es einige Gebiete auf der Venus gibt, welche die Radarstrahlung besonders gut reflektieren. Sie erscheinen auf den Radarkarten hell und konnten mit Hochebenen oder Gebirgen identifiziert werden. Man hatte damals schon die auffälligsten Gebiete mit den ersten Buchstaben des griechischen Alphabets bezeichnet: Alpha-Regio und Beta-Regio. Dazu kommt noch ein ausgedehntes Gebirgsmassiv, das den Namen „Maxwell-Montes“ erhalten hat und sich um über 10 Kilometer über das mittlere Niveau erhebt. Seit der vollständigen Kartierung des Planeten durch Magellan (USA) hat sich eine einheitliche Nomenklatur für die einzelnen „geologischen“ Landschaftsformen durchgesetzt. Erwähnenswert ist, daß (fast, denn JAMES CLERK MAXWELL war – ein Mann) alle Bezeichnungen mit weiblichen Götternamen oder Namen berühmter oder bekannter Frauen aller ethnischer Gruppen und Völker verbunden sind. Eine Konvention, die der Venus wahrlich gut zu Gesicht steht.

Das erste vollständige Bild der Venusoberfläche wurde bei der Vor-Ort-Erkundung mit Radarmethoden erarbeitet. Begonnen hatten die Arbeiten mit den sowjetischen Sonden Venera 15 und Venera 16, die in den Jahren 1983 und 1984 die Venus erreichten. Eine anfängliche Überraschung war die Entdeckung von vulkanischen aber auch einer Vielzahl von eindeutig meteoritischen Kratern. Letztere hatte man wegen der dichten Atmosphäre eigentlich in der vorgefundenen Häufigkeit nicht erwartet. Besonders auch deshalb, weil auf der Erde Meteorokrater sehr selten sind, da sie in geologisch kurzer Zeit durch Erosionsprozesse wieder verschwinden. Auf der glühendheißen Venus scheint das nicht der Fall zu sein.

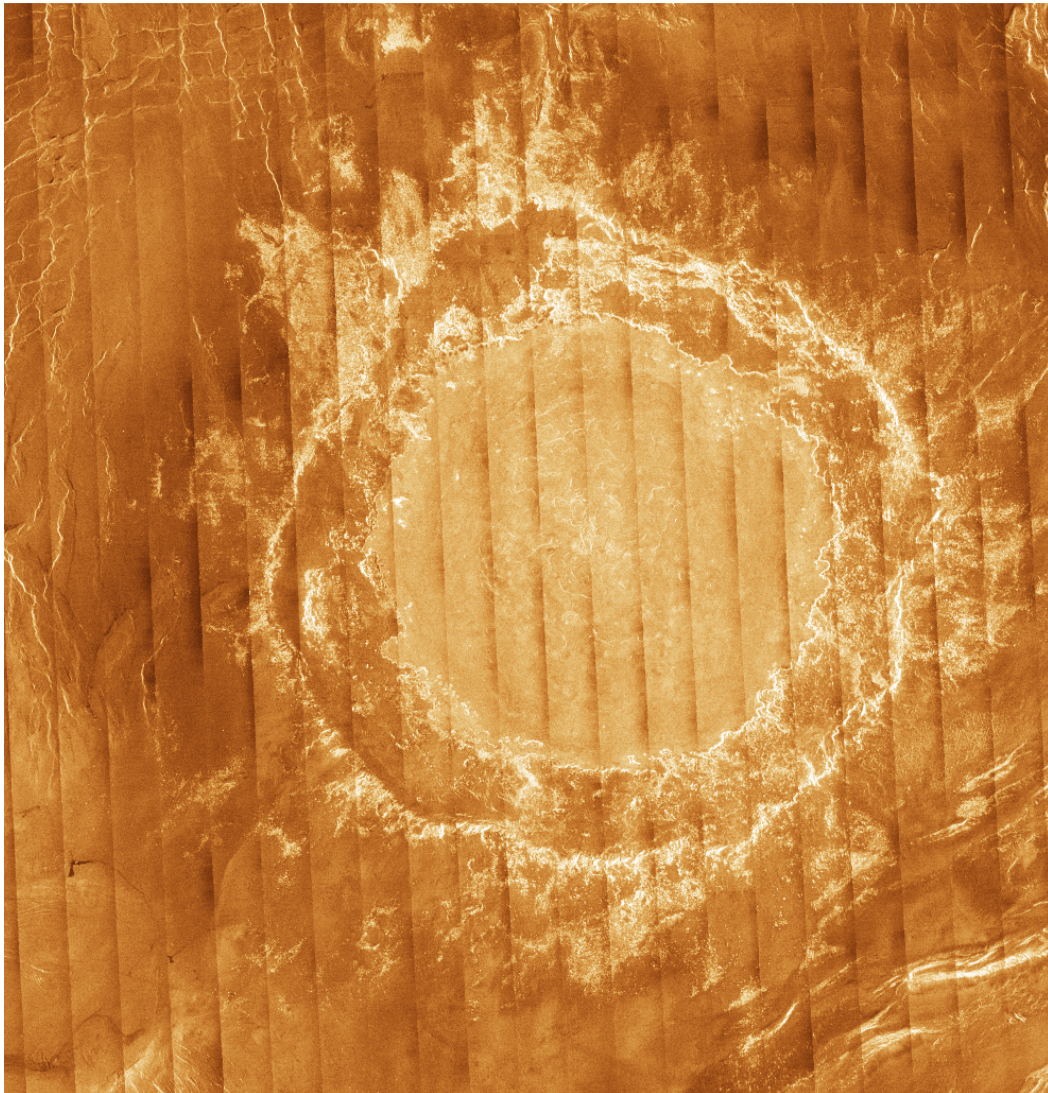
Der nächste Höhepunkt in der Fernerkundung der Venus war die nach einem berühmten portugiesischen Seefahrer benannte Planetensonde Magellan, die am 10. August 1990 die Venus erreichte und an diesem Tag ihre vierjährige Mission begann. Sie war mit einem sogenannten Seitensicht radar (SAR- Synthetic Aperture Radar) ausgestattet, welches bei einer Frequenz von 2.385 GHz arbeitete. Mit Hilfe dieses Instrumentes konnte innerhalb von zwei Meßkampagnen 98% der Planetenoberfläche mit einer Auflösung von ungefähr 100 Meter pro Bildpunkt kartiert werden. Das Ergebnis sind Bilder von der Oberfläche, die kaum mehr von normalen Fotos zu unterscheiden sind. Außerdem ließen sich über Laufzeitmessungen Höhenprofile erstellen, aus denen später mit Hilfe von Computern realistische 3D-Darstellungen der Venuslandschaft berechnet werden konnten.

Der größte Teil der Venusoberfläche besteht aus ausgedehnten Ebenen (70%), aus denen mehrere große Plateaus (10%) herausragen sowie aus bis zu 2 Kilometer tiefen Einsenkungen (20%). Die beiden größten Plateaus sind Ishtar Terra (nördliche Halbkugel) und Aphrodite Terra (Äquatorregion).

Ishtar Terra hat ungefähr die Größe Australiens. An ihrer östlichen Seite befinden sich die ca. 9 Kilometer (gemessen vom mittleren Niveau aus) hohen Maxwell-Montes. Aphrodite Terra ist um einiges größer, vielleicht mit Afrika vergleichbar. Es besteht aus der Ovidia Regio und der Thetis Regio. In diesem Kontinentalblock befindet sich auch eine riesige Talstruktur, die den Namen Diana Chasma erhalten hat. Mit einer Tiefe von ca. 2000 Metern und einer Länge von 300 Kilometern ist sie durchaus mit dem Valles Marineris auf dem Mars vergleichbar.

Ein weiteres, schon auf den irdischen Radaraufnahmen klar erkennbares Gebiet ist Beta-Regio, die eine Höhe von 4 Kilometern erreicht und vulkanischen Ursprungs ist. Es kennzeichnet auch ein Gebiet, welches eine außergewöhnliche Schwereanomalie aufweist, dessen Ursache aber noch nicht restlos geklärt werden konnte.

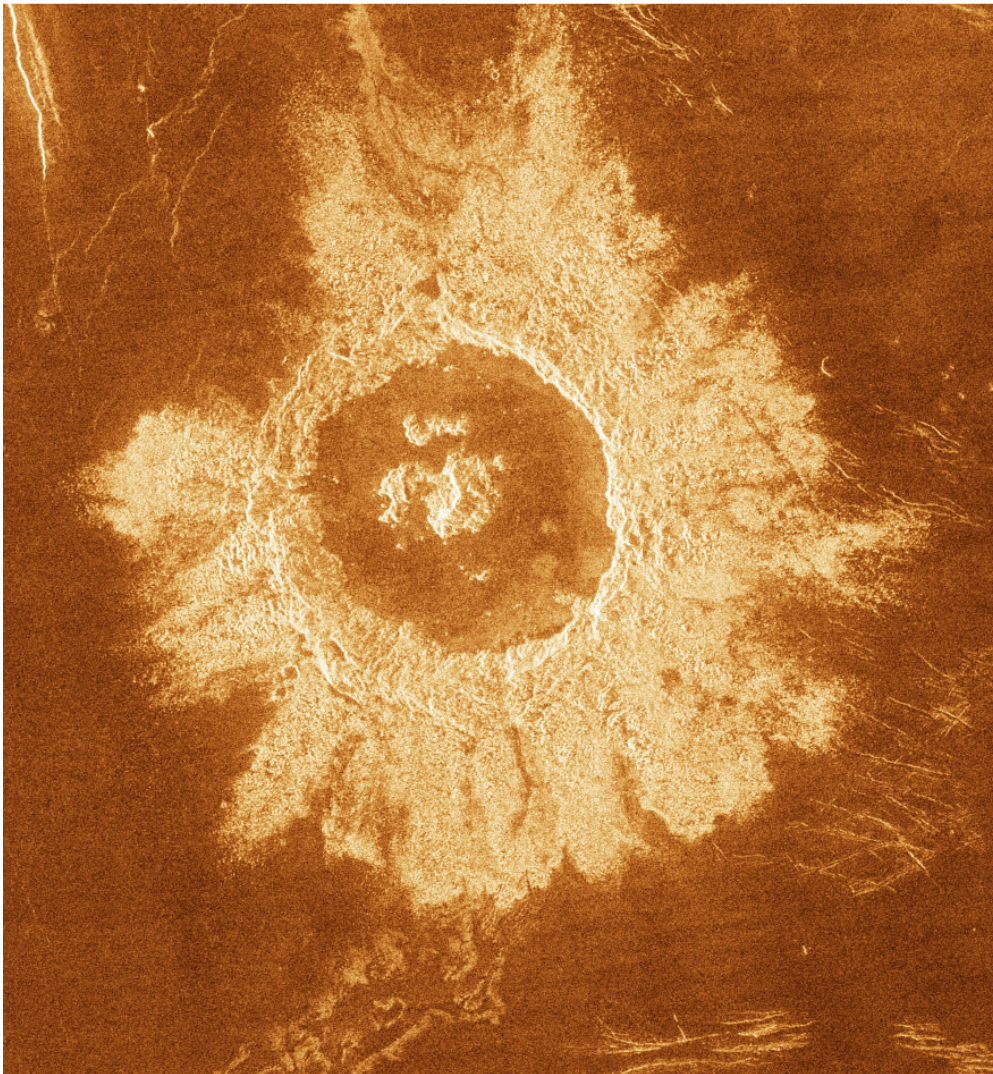
Von den verschiedenen tief gelegenen, muldenartigen Gebieten sind Atalanta Planitia, Lavinia Planitia und Guinevere Planitia zu erwähnen.



Der nach der Anthropologin und Ethnologin Margaret Mead (1901-1978) benannte Impaktkrater hat einen Durchmesser von 280 km und die für komplexe Krater oftmals typische Doppelringstruktur.

Bereits von den sowjetischen Venussonden konnten Einschlagkrater festgestellt werden. Der größte von Ihnen ist der Mead-Krater, ein Multiringkrater von 280 Kilometer Durchmesser. Er erscheint im Gegensatz zu Kratern ähnlicher Größe auf dem Mond als sehr flach. Die Höhendifferenz zwischen Kratermitte und Kraterflanke dürfte kaum 1000 Meter betragen.

Auffällig ist, daß es kaum kleinere Meteoritenkrater auf der Venus gibt und wenn ja, sie traubenförmige Strukturen mit vielen Überlappungen bilden. Die Ursache dürfte in einem Auswahleffekt zu suchen sein, der durch die dichte Atmosphäre bedingt ist. Kleinere Projektile verdampfen entweder oder brechen in mehrere Teile auseinander, welche die Oberfläche nicht mehr erreichen oder Streuellipsen bilden. Bei größeren Einschlägen kann sich das Auswurfmaterial (Ejekta) nur in der Nähe des Kraters ablagern, was zu diffusen Flecken (die im Radarbild i.d.R. hell erscheinen) um ihre Peripherie führt. Verursacht wird das durch den Atmosphärendruck, der rund 90-mal größer ist als auf der Erdoberfläche. Durch die Reibung wird das Auswurfmaterial ziemlich schnell abgebremst und kann sich deshalb nicht über eine größere Fläche ausbreiten.



Danilova-Krater, wie er von Magellans Seitensicht radar aufgenommen wurde. Er zeigt alle typischen Merkmale eines Impaktkraters: Zentralberg, einen Kraterwall, einen Kraterboden und darum einen ausgedehnten Ejekta-Bereich

Auch Krater mit Zentralberg werden auf der Venus gefunden. Ein Beispiel ist der 48 Kilometer große Danilova-Krater, der neben dem Zentralberg auch ein sehr schönes Ejekta-Halo sowie diverse Ausflüsse zeigt.

Ungefähr 60% der Einschlagkrater zeigen keine Spuren von irgendwelchen Veränderungen seit ihrer Entstehung. Nur in wenigen Fällen (<10%) wurden Krater durch vulkanische Prozesse – z.B. durch Magmaüberflutungen oder tektonischen Verschiebungen – verändert oder angegriffen. Außerdem sind sie hochgradig zufällig über die gesamte Venusoberfläche verteilt. Diese Beobachtung hat große Bedeutung für das Verständnis der geologischen Vergangenheit der Venus. Während die Krater auf dem Merkur im Durchschnitt sehr alt sind (nämlich mehrere Milliarden Jahre), können die Einschlagkrater auf der Venus kaum älter als 500 -800 Millionen Jahre sein, eher noch um einiges jünger. Die Venusoberfläche ist, geologisch gesehen, außergewöhnlich jung. Sie hat sich im Zeitraum zwischen 800 und 500 Millionen Jahren völlig erneuert, d.h. riesige Gebiete wurden von Magma überflutet oder waren den Auswirkungen eines starken Vulkanismus ausgesetzt. Dadurch wurden fast alle vorangegangenen geologischen Strukturen zerstört oder überdeckt. Nur so ist die erstaunliche Gleichverteilung der Impaktstrukturen auf der Venus zu erklären. Was die Ursache für dieses einschneidende Ereignis der globalen Oberflächenenerneuerung in der Entwicklungsgeschichte der Venus war und wie es im Einzelnen abgelaufen ist, wird z.Z. noch kontrovers diskutiert.

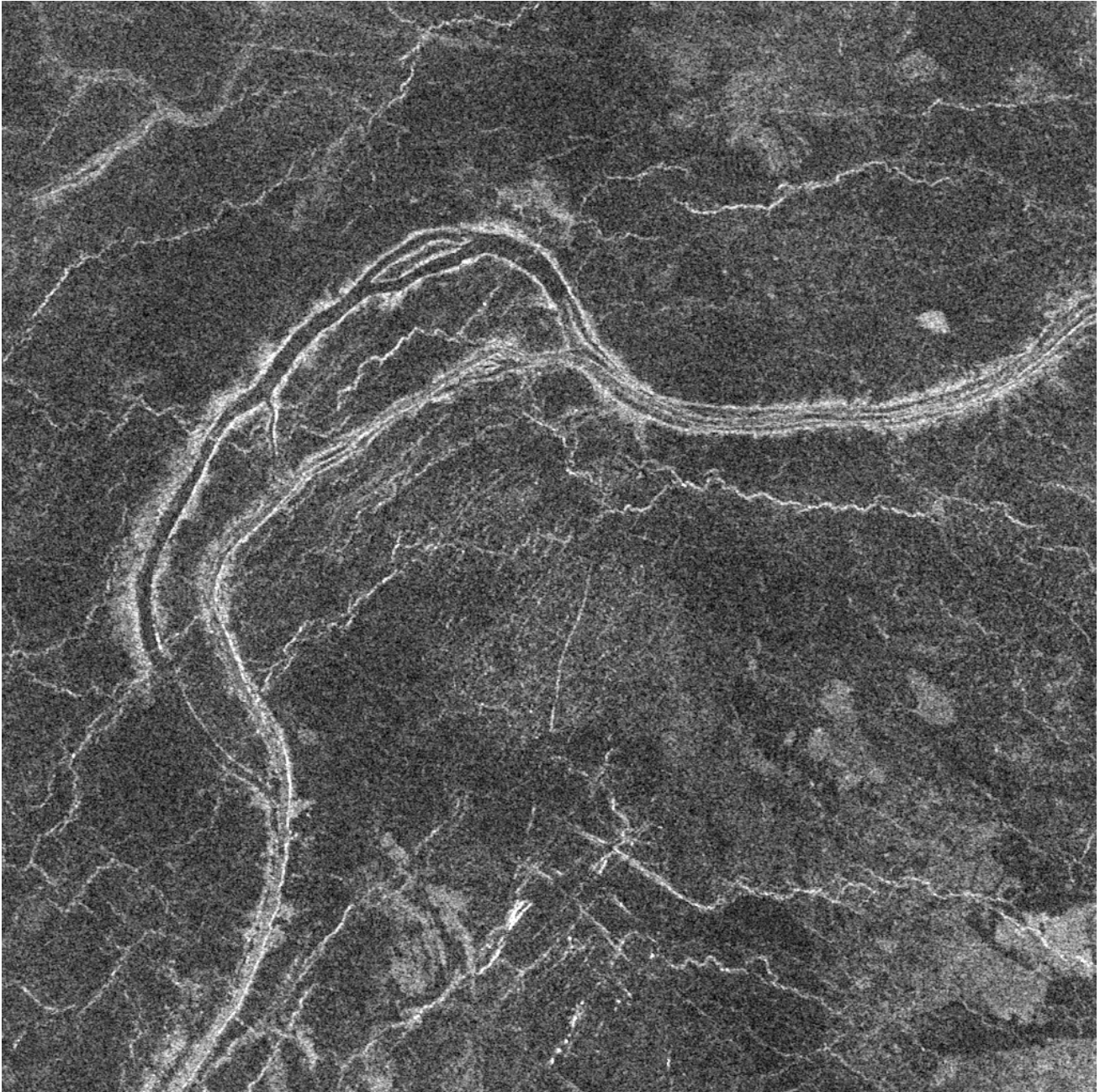
Die wahrscheinlich ältesten Gebiete der Venusoberfläche stellen die sogenannten Tesserae dar, die ungefähr 8,5% der Oberfläche einnehmen. Das Wort bedeutet ursprünglich „Viereck“ und beschreibt ganz gut die Textur dieser Landschaftsform, wie sie auf den Radarbildern von Magellan erscheint. Das Terrain erscheint tektonisch äußerst komplex. Das wichtigste Merkmal ist ein fast chaotisches System von linearen Rücken und Tälern, die mindestens in zwei Richtungen ausstreichen und die auf das Wirken sowohl von Kompressions- als auch von Zugkräften zurückzuführen sind.

Spuren von Vulkanismus sind auf den Radaraufnahmen der Venusoberfläche überall zu sehen. Man findet von Magma überflutete Ebenen mit flußähnlichen Lavakanälen, man findet erstarrte Lavaflüsse sowie Vulkankrater aller Größen bis hin zu riesigen Calderen von mehreren Hundert Kilometer Durchmesser.

Vulkanische Ebenen bedecken über 80% der Venusoberfläche. Es handelt sich dabei oftmals um erstarrte, übereinanderliegende Schichten basaltischer Lava, die eine Fläche von einigen 50000 bis zu einigen 100000 Quadratkilometer überdecken. Auf diesen Ebenen befinden sich an vielen Stellen Lavaflüsse, die entweder aus Spalten oder aus Vulkanschloten entspringen. Bei manchen ist nicht einmal zu erkennen, woher sie eigentlich stammen. Auf den Radarbildern von Magellan sind die Lavaflüsse gut auszumachen. Aus ihrer Struktur läßt sich sogar die ehemalige Fließrichtung ableiten. Auf der Erde sind derartige Lavadecken als Flut- oder Plateaubasalte bekannt (z.B. Dekkan-Trap in Indien, Alter ca. 60-65 Mio. Jahre).

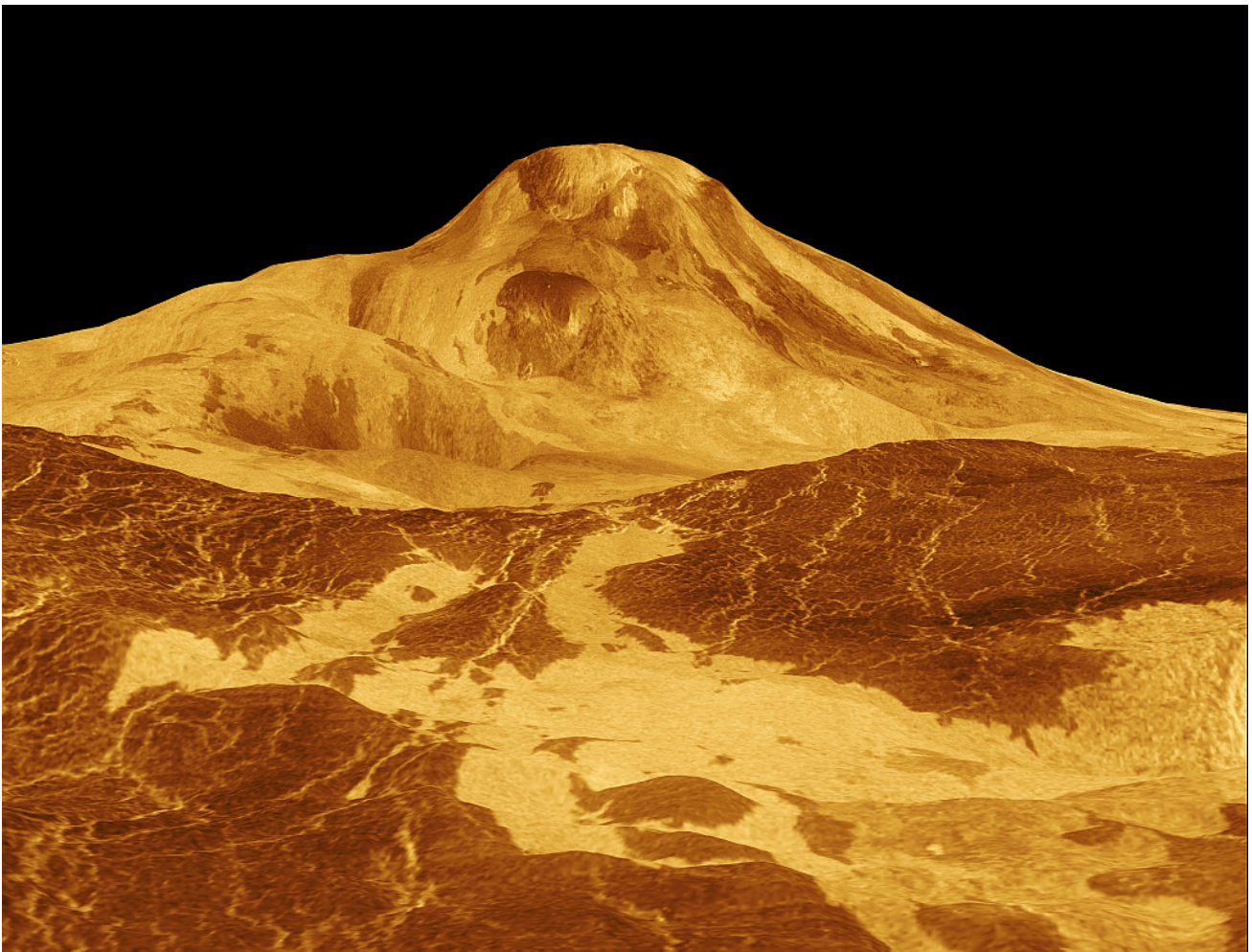
Dort wo Lava entlang fließt, entstehen flußbettartige Strukturen, die man als Lavakanäle bezeichnet und die auch von der Erde bekannt sind. Sie fallen besonders in den vulkanischen Ebenen auf und können in Einzelfällen einige tausend (!) Kilometer lang werden. Die größten von ihnen haben eine Breite von bis zu zwei Kilometern und sind maximal 50 Meter tief. Im Großen und Ganzen ähneln sie frappierend irdischen Flußsystemen mit ihren Mäandern und Seitenästen, so daß man prinzipiell auf

ähnliche Entstehungsmechanismen schließen kann. Geflossen sind wahrscheinlich Lavamassen vom Typ der sogenannten Alkali-Karbonatiten. Diese Laven sind dünnflüssig und reich an Karbonatmineralien, an Natrium und Kalium sowie an Chlor und Fluor. Auf der Erde findet man sie nur sehr selten, während sie unter der heißen Kohlendioxid-Atmosphäre der Venus fast ideale Bedingungen vorfinden. Durch den hohen Bodendruck und die hohen Bodentemperaturen bleiben Lavaflüsse länger dünnflüssig und haben dadurch Gelegenheit, sehr lange Kanäle auszubilden. Die längsten Lavakanäle auf der Erde sind dagegen winzig klein. Sie erreichen maximal eine Länge von 10 Kilometern.



Gewundene Lavakanäle zeigen die Präsenz äußerst dünnflüssiger Magmen an, die hier einst entlang geflossen sind

Ein weiteres typisches Merkmal für Vulkanismus sind Vulkane. Auf der Venus sind sie in allen Größen vertreten und manche Typen von ihnen sind nicht leicht von Impaktstrukturen zu unterscheiden. Flache Schildvulkane (Hangneigung unter  $30^\circ$ ) kommen in allen Größen vor. Ein typisches Beispiel ist Ozza Mons, der sich in der Atla Regio im östlichen Teil von Aphrodite Terra befindet. Er hat einen Durchmesser von rund 200 Kilometern und überragt seine Umgebung um ca. 2 Kilometer. Zusammen mit Maat Mons (Durchmesser 300 km, Höhe ca. 5.5 km) und Sappas Mons (Durchmesser 400 km, Höhe 1.5 km) bildet er eine Vulkanregion über einem sogenannten „Hot Spot“. Derartige „heiße Flecken“ entstehen, wenn heißes Material aus dem Planetenmantel säulenförmig bis in die Krustenregionen aufsteigt und sich dort entspannt (Mantel-Diapire, „Plume“). Da das Material aufgrund von Konvektionströmungen umgewälzt wird und deshalb die Temperaturdifferenz von einigen hundert Grad gegenüber der Umgebung aufrechterhalten kann, „brennt“ sich solch ein Magmaplume immer weiter nach oben durch. Durchstößt er die obere Kruste, dann kann es entweder zur Freisetzung von Flutbasalten kommen oder es entstehen einzelne oder Gruppen von Schildvulkanen. Auf der Erde kennt man Hot-Spot-Vulkanismus von Hawaii oder aus Afrika weitab von tektonischen Bruchstrukturen wie z.B. der Tibesti-Komplex im Tschad. Auch der Marsvulkanismus ist von diesem Typ.

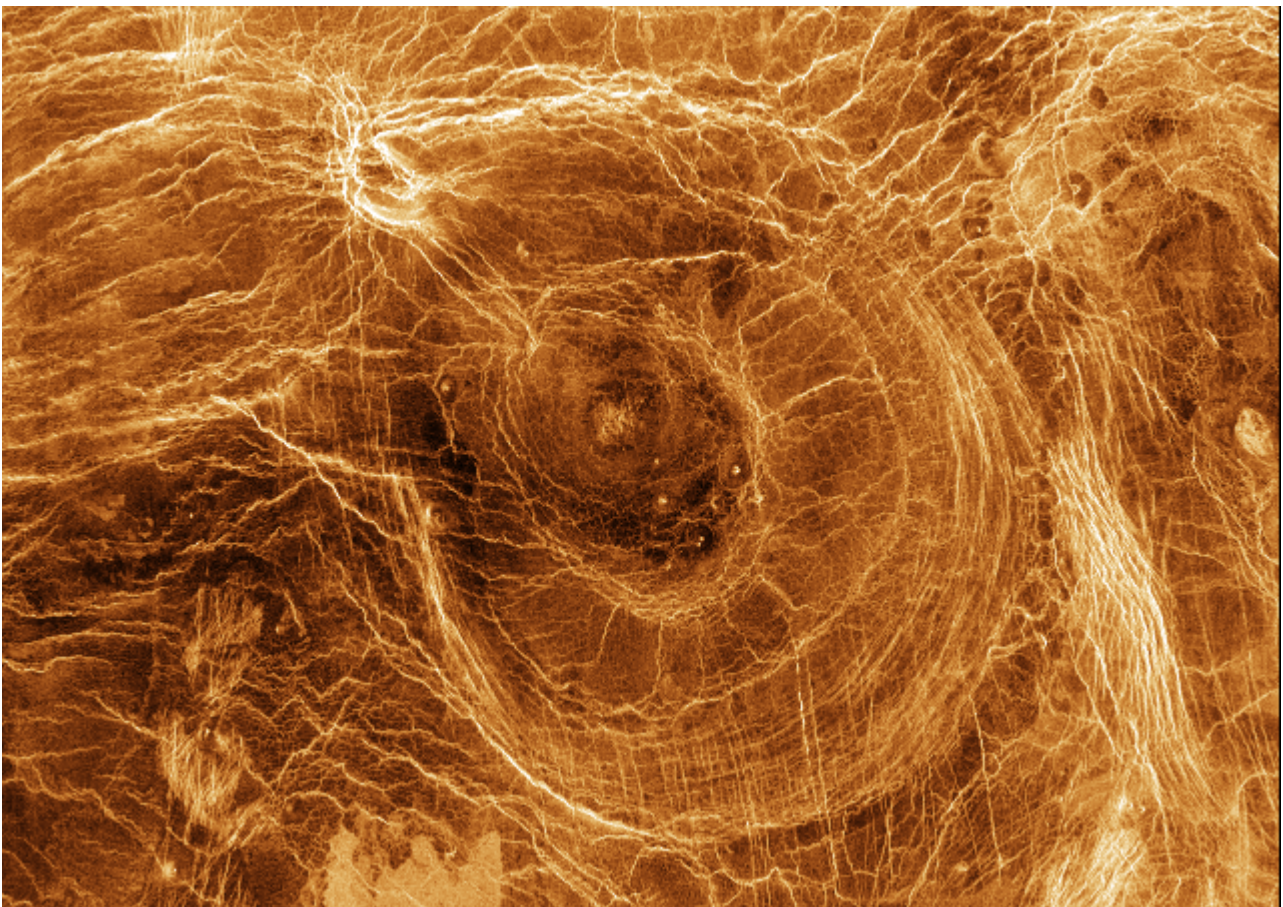


Maat Mons, überhöhte perspektivische Darstellung, abgeleitet aus Magellan-Höhenmessungen

Provinzen, die auf der Venus durch große Schildvulkankomplexe ausgezeichnet sind, sind der westliche Teil der Eistla Regio mit den Vulkanen Gula-Montes und Sif-Montes sowie die Alta-Regio mit den bereits erwähnten Sapas-Montes, Maat-Montes und Ozza-Montes. Insgesamt konnten auf den Aufnahmen der Magellan-Sonde über 150 größere Schildvulkane (d.h. mit einem Durchmesser < 100 km) identifiziert werden, die sich im Mittel besonders auf höheren geographischen Breiten konzentrieren. Die Zahl kleinerer Vulkanschilder ist fast 5-mal so groß.

Kleinere Mantelplume bilden an der Oberfläche sogenannte Coronae. Das sind zumeist kreisrunde, seltener ellipsenförmige Objekte mit einem bis 2000 m hohen Ringwall und einer leichten Aufwölbung von wenigen hundert Metern im Inneren. Sie sind auf den Magellan-Bildern oftmals von radialen Linien und Rillen sowie konzentrischen Brüchen umgeben. Ihr Durchmesser liegt zwischen 60 und 2000 km (im Mittel 250 km) und sie treten oft in Gruppen oder Ketten auf. Auf den Venus-Aufnahmen konnten rund 330 Coronae identifiziert werden.

Die Arachnoiden, die diesen Namen aufgrund ihres spinnennetzähnlichen Aussehens bekommen haben, ähneln in ihrer Form den Coronae, sind aber im Durchschnitt wesentlich kleiner (115 km). Es handelt sich dabei um kreis- oder ellipsenförmige Strukturen mit einem zentralen Dome oder einer zentralen Depression, die von einem verwirrenden Netzwerk von radialen und konzentrischen Brüchen umgeben sind. Ungefähr 70 derartige Objekte, die eng mit den Coronae verwandt sind, wurden auf der Venus gefunden.

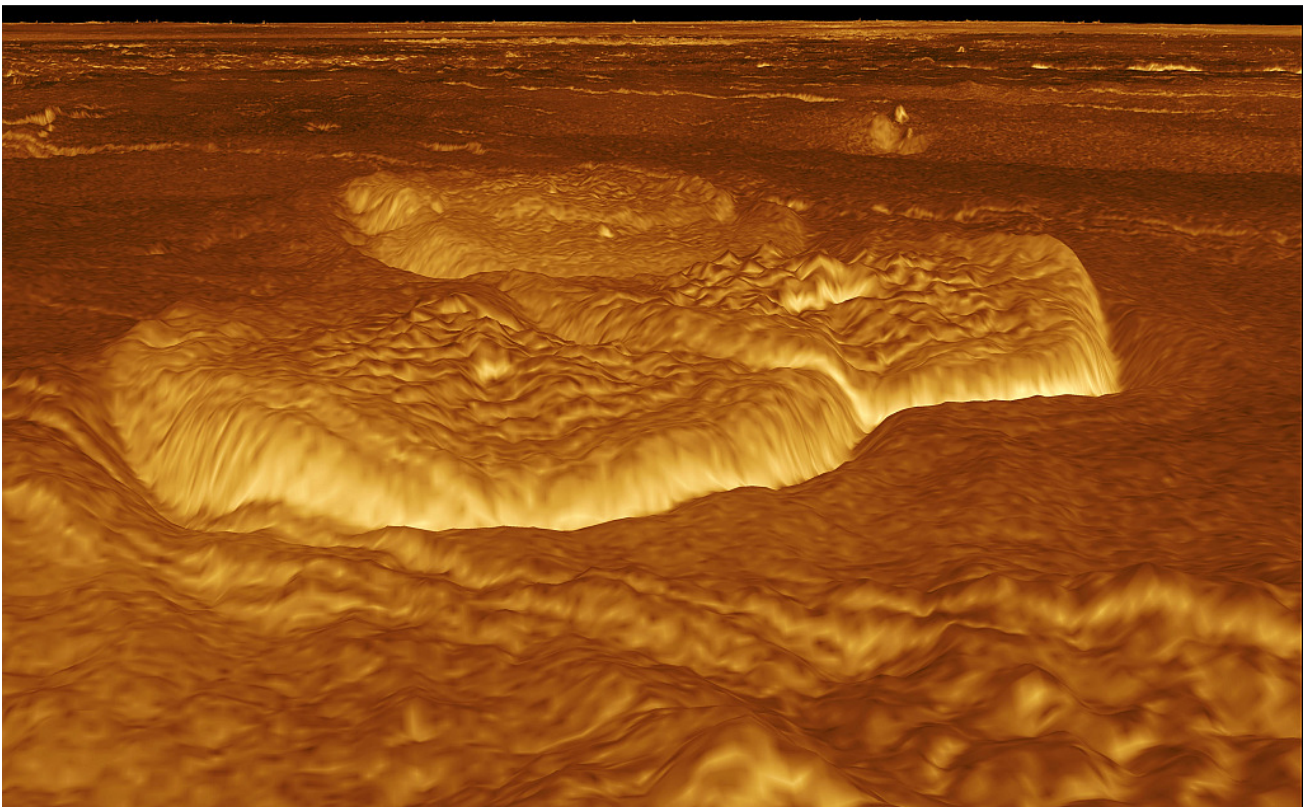


Arachnoide Struktur am Rande der Fortuna Tesserae im Bereich Ishtar Terra. Sie hat einen Durchmesser von ungefähr 200 km.

Unter Novae versteht man in der Venus-Geologie kompakte sternförmige Strukturen (mittl. Durchmesser ca. 190 km), die nichts anderes sind als flache Aufwölbungen, die von einem dominanten radialen Bruchsystem durchsetzt sind. Morphologisch ähneln sie mehr den Arachnoiden als den Coronae. Man kennt heute etwas über 50 von ihnen.

Die eben genannten Formationen entstehen, wenn die sphärische Oberfläche einer Magmaplume die obersten Lithosphärenschichten erreicht (Nova-Stadium), durchbricht (es entsteht ein Vulkan) und – wenn der Nachschub von frischem Material aus der Tiefe versiegt – der Innenteil einsinkt und eine Corona entsteht.

Eine weitere, für die Venus typische morphologische Gruppe von vulkanischen Objekten sind die Dome. Sie sind kreisrund, im Mittel 25 Kilometer groß und überragen ihre Umgebung im Schnitt um etwa 700 Meter. Typisch sind radiale Brüche nahe dem steilen Umkreis und sowohl radiale als auch konzentrische Brüche im relativ flachen Inneren. Man vermutet, daß sie aus zähflüssigem Magma entstanden sind, die gleichmäßig aus einem Schlot ausgeflossen ist, denn in ihren Zentren findet man oft calderaartige Strukturen. Dome mit steilen Flanken bezeichnet man manchmal auch als „Pfannkuchenvulkane“.



Schrägsicht einer Gruppe von „Pfannkuchenvulkanen“ am östlichen Rand von Alpha Regio. Diese domartigen Strukturen haben einen Durchmesser von ungefähr 25 km und erreichen eine Höhe von rund 800 m.

Auf der Venus findet man regional häufig Einsturzkrater oder Calderen, die sich bilden, wenn Hohlräume (z.B. eine bei einem Ausbruch geleerte Magmakammer) unter einem Krater einbrechen. Als Beispiel sei nur die elliptische Caldera Sacajawea Patera genannt, die sich beim Einsturz zweier

benachbart liegender Magmakammern gebildet hat. Mit einer Ausdehnung von 215 x 120 Kilometer gehört sie zu den größeren ihrer Art. Man findet sie im westlichen Teil von Isthara Terra. Sie ist wie viele Calderen von Brüchen und Lavaströmen umgeben. Etwas über 80 Calderen wurden bis jetzt auf der Venusoberfläche entdeckt.

Im Bereich der Beta-Atla-Themis-Region findet man im Durchschnitt zwei bis viermal mehr Vulkane als im Planetendurchschnitt. Insbesondere gibt es im Bereich der Tiefebenen ein auffälliges Defizit. Warum das so ist, ist noch nicht völlig klar. Man vermutet, daß hier ein ähnlicher Prozeß stattgefunden hat, wie er zur Bildung der mächtigen Vulkanregion Tharsis auf dem Mars führte.

Vulkanische Aktivität ist die wichtigste Ursache für die Gestaltung der Venusoberfläche. Die Frage ist, ob es sich dabei um einen heute erloschenen Vulkanismus wie auf dem Mars handelt oder ob es noch Gebiete mit aktivem Vulkanismus gibt. Z.Z. kann diese Frage noch nicht eindeutig beantwortet werden. Gas- und Partikelaustritte, wie sie für einen Vulkanausbruch charakteristisch sind, können mit Radarmethoden leider nicht erfaßt werden. Trotzdem gibt es zumindest indirekte Hinweise darauf, daß es auch gegenwärtig noch aktiven Vulkanismus auf der Venus gibt. Dazu gehört einmal die elektrische Aktivität, die im Bereich der Altea Regio und der Beta Regio – alles vermutliche Hot-Spot-Gebiete – von den Eintauchkapseln der sowjetischen Sonden Venera 11 und Venera 12 registriert wurden. Auch Pioneer-Venus konnte eine elektromagnetische Strahlungskomponente nachweisen, die genauso wie die Venera-Ergebnisse als intensive Blitzentladungen gedeutet wurden. Nun weiß man, daß Vulkanausbrüche auch mit starken Blitzentladungen einhergehen. Man vermutete deshalb ziemlich schnell, einem Begleiteffekt rezenter Vulkanismus auf die Spur gekommen zu sein. 1990 wurde diese Vermutung nochmals bestätigt, als die Raumsonde Galileo auf ihrem Weg zum Jupiter Venus umflog und gleichfalls entsprechende Radiostrahlung fand. Um diesen Effekt ein für alle mal zu klären, kam 1999 ein speziell zur Suche von Blitzentladungen entwickeltes Gerät zum Einsatz, welches auf der Raumsonde Cassini installiert war und primär der Untersuchung von Saturn und seiner Monde dienen soll. Da auch diese Sonde einen Umweg über die Venus nahm, ergab sich im April 1998 und im Juli 1999 die Gelegenheit, mit dem „*Radio and Plasma Wave Science Instrument*“ nach entsprechenden Entladungen zu suchen. Das Ergebnis war ernüchternd. Cassini fand keinerlei Hinweise auf Blitze in der Venusatmosphäre. Die Frage, ob es auf der Venus Blitzentladungen im Zuge von Vulkanausbrüchen gibt, kann demnach noch nicht definitiv beantwortet werden.

Als ein weiterer Hinweis auf aktiven Vulkanismus wird von einigen Fachleuten ein 1978 von Pioneer-Venus gemessener erhöhter Schwefeldioxidgehalt in der Atmosphäre gewertet, der im Laufe der folgenden Jahre langsam abnahm. Ein Beweis ist das natürlich nicht.

Wie sieht es auf der glühendheißen Oberfläche der Venus aus? Sowjetische Wissenschaftler waren die Ersten, die es wagten, Landekapseln auf der Venusoberfläche abzusetzen. Das dies ein wahrhaft schwieriges Unterfangen ist, zeigt sich an den für jede Art von Elektronik widrigen Umgebungsbedingungen, welche der Lander erwartet: ein Oberflächendruck von ca. 90 bar und eine Umgebungstemperatur von 480 °C.

Die Landekapsel von Venera 9 erreichte am 22. Oktober 1975 die Venusoberfläche und übermittelte das erste Foto – wenn auch mit recht grober Auflösung – von der Oberfläche eines fremden Planeten. Wenn auch die wissenschaftliche Ausbeute noch nicht allzu groß war, ist es doch eine Pioniertat gewesen, die wissenschaftlichen Instrumente fast eine Stunde lang funktionsfähig zu erhalten.

Auf den Farbaufnahmen, die Venera 13 zur Erde gesendet hat, erkennt man bis zum Horizont flache Gesteinsplatten, zwischen denen offenbar loses Material in Form von kleinen Steinen angeordnet ist.

Die Fotos am Landeplatz von Venera 14 zeigen dagegen eine weitgehend ebene Oberfläche, die aus offensichtlich übereinanderliegenden dünnen Platten gebildet wird. Im Gegensatz zu Venera 13 fehlt jedoch fast völlig feinkörnigeres Füllmaterial. Nur in den Spalten auf und zwischen den Platten kann man Staubaablagerungen erkennen. Die Farbe der Gesteine ist sehr dunkel, was man auch von basisches Ergußgesteinen und Tuffen erwartet.

Die folgenden Bilder zeigen Panoramaaufnahmen der Landeplätze der sowjetischen Venussonden Venera 13 und 14. Sie legen im Bereich der Beta-Regio im Gebiet Phoebe, wo die Magellan-Aufnahmen eine relativ glatte Niederung mit einzelnen kleinen Erhebungen zeigen.



Auffällig sind die plattenförmigen Oberflächenstrukturen, die auf beiden Panoramaaufnahmen auszumachen sind. Am Landeplatz von Venus 13 findet man darüber hinaus noch Lockermaterial, die

auf der Farbaufnahme dunkler erscheinen und wahrscheinlich Verwitterungsschutt darstellen, wobei die Art der Verwitterung noch unklar ist. Auf jeden Fall handelt es sich bei den anliegenden Gesteinen um Ergußgesteine, welche chemisch bestimmten Typen irdischer Basalte ähneln und die beim Abkühlen aufgerissen sind.

Venera 13, Venera 14 und der Lander von Vega 2 untersuchten z.B. mittels Röntgenfluoreszenzanalyse die Zusammensetzung von Gesteinsproben und erhielten folgende Häufigkeiten der gesteinsbildenden Minerale (in %):

	<b>Ven.13</b>	<b>Ven.14</b>	<b>Vega 2</b>	<b>Tholeiite Erde</b>	<b>Alkaline Erde</b>
$SiO_2$	45.1	48.7	45.6	49.7	45.1
$Al_2O_3$	15.8	17.9	16.0	16.5	13.4
MgO	11.4	8.1	11.5	9.0	11.5
CaO	7.1	10.3	7.5	13.8	10.4
FeO	9.3	8.8	7.7	8.3	12.7
$K_2O$	4.0	0.2	0.1	0.1	0.7
MnO	0.2	0.16	0.1	-	-
$TiO_2$	1.6	1.2	0.2	0.7	2.0
$SO_3$	1.6	0.9	4.7	-	-
Cl	0.3	0.4	<0.3	-	-

Die Zusammensetzung der Gesteinsprobe am Landeort von Venera 14 ähnelt den auf der Erde selten vorkommenden tholeiitischen Basalten (Beispiel: Hualalai-Vulkan auf Hawaii), die von Venera 13 dagegen mehr phonolitisch- tephritischen Basalten, wie man sie auf den Hochebenen der Venus vermutet. Auf der Erde kennt man sie als leucitische Basalte, wie sie z.B. in der Eifel oder am Vesuv vorkommen.

Obwohl Venus in seinen wesentlichen Größen- und Masseparametern der Erde fast gleicht, konnten keine eindeutigen Anzeichen einer Plattentektonik gefunden werden. Die Frage ist, auf welche Art und Weise die ursprünglichen Krustenstrukturen (die man heute z.B. noch auf dem Merkur sehen kann) ausgelöscht worden sind. Auf der Erde erfolgt eine Art Lithosphären-Recycling, wenn im Bereich der mittelozeanischen Rücken neuer Meeresboden gebildet wird und im gleichen Maße die Ränder der Kontinentalplatten in den Subduktionszonen verschwinden. Bei der Venus scheint es aber so, als ob die gesamte Oberfläche in einem globalen Ereignis vor etwa 500-800 Millionen Jahren in einem Akt globalen Vulkanismus vollständig umgestaltet wurde und ihr Aussehen seitdem im Wesentlichen erhalten geblieben ist. Die Impaktkrater, die man heute quasi gleichverteilt auf der Venusoberfläche findet, sind demnach hauptsächlich in den letzten 400 bis 500 Millionen Jahren entstanden, während alle älteren Impakte durch Lavaflüsse und andren Auswurfmaterial eines intensiven Vulkanismus abgedeckt sind. Eine Erklärung für dieses Phänomen, das auch alternative Modelle mit einschließt,

hängt entscheidend vom Krustenaufbau (Dicke der Lithosphäre, Isostasie) und von der Manteldynamik (Konvektion, Plumbildung) ab.

In der folgenden Tabelle sind alle Venuslandungen aufgelistet:

Sonde	Landedatum	Sendedauer, Ergebnisse
VENERA 7	15.12.1970	23 min, 90 bar, 475 °C
VENERA 8	22.07.1972	50 min, 90 bar, 470 °C
VENERA 9	22.10.1975	53 min, 1. Panoramaaufnahme
VENERA 10	25.10.1975	65 min, Panoramaaufnahme zeigt glatte basaltische Landschaft
VENERA 11	25.12.1978	95 min, keine Aufnahme von der Oberfläche
VENERA 12	21.12.1978	110 min, keine Aufnahmen von der Oberfläche
VENERA 13	1.03.1983	107 min, 1.Farbpanoramaaufnahme, Untersuchung einer Bodenprobe
VENERA 14	5.03.1983	57 min, Farbpanoramaaufnahme eines Lavafeldes
VEGA 1	11.06.1985	Experimente fehlgeschlagen
VEGA 2	21.12.1985	Entdeckte Anorthosit-Troctolite (bekannt vom Mond)

### Globales Resurfacing

Nach der ersten Auswertung der Magellan-Kartierung der Venusoberfläche viel auf, daß alle Einzelobjekte, die man sicher als Impakte identifiziert hat, über die gesamte Oberfläche völlig zufällig (gleichverteilt) angeordnet sind und daß die beobachtete Kraterdichte (unter Berücksichtigung der Auswahl effekte aufgrund der dichten Atmosphäre) nur mit einem Krustenalter von 500 - 800 Millionen Jahren verträglich ist. Außerdem sind von diesen Impakten nur relativ wenige (ca. 10%) nachträglich durch vulkanische oder tektonische Prozesse in irgendeiner Form verändert worden. Dieses Ergebnis ist auf dem ersten Blick etwas verwirrend, da es entweder impliziert, daß in den letzten 4 Milliarden Jahren zu wenige Impakte stattgefunden haben (was mit den Kraterstatistiken von Mond und Merkur unvereinbar ist) oder daß die gesamte (Zufallsverteilung!) Venusoberfläche vor rund einer halben Milliarden Jahre in relativ kurzer Zeit (aufgrund der lediglich 10% ganz oder teilweise umgeformten Impaktkratern) seine Oberfläche völlig verändert hat. Daß letztere Hypothese eine durchaus ernstzunehmende Erklärung ist, zeigen auch andere Untersuchungen der Venus-Topographie. Als erstes ist das völlige Fehlen von Strukturmerkmalen, die man mit Plattentektonik in Beziehung setzen kann, zu bemerken. Es gibt auf der Venus gegenwärtig keine Hinweise auf Spreizungszonen, in denen wie auf der Erde immer wieder neue Kruste gebildet wird, noch auf Subduktionszonen, wo vorhandene Kruste in den Mantel entsorgt wird. In dieser Hinsicht ist die Geologie der Venuskruste von der Geologie der Erdkruste grundverschieden. Dafür überwiegen auf der Venus „ebene“ Gebiete (80% der Oberfläche liegen innerhalb eines Bereichs von  $\pm 1$  km um den mittleren Planetenradius), die offensichtlich zu einem großen Teil aus Flutbasalten sowie aus anderen vulkanischen Ablagerungen (z.B. Laven, die aus Vulkanschilden ausgeflossen sind) bestehen. Die

Zweiteilung in „ozeanische“ Kruste und kontinentale Kruste, wie man sie von der Erde kennt, ist hier nicht zu beobachten. Lediglich die Tesserae (wie z.B. Adrasthea) könnten als alte, durch tektonische Vorgänge weitgehend zerstörte Krustenteile, den globalen Überformungsprozeß zumindest teilweise überstanden haben.

Die Frage, die sich stellt, ist, welche geologischen Prozesse innerhalb von gerade einmal 100 Millionen Jahren eine völlige Umgestaltung einer Planetenoberfläche bewirken können und zwar unter der Rahmenbedingung, daß sich der innere Aufbau des Planeten Venus nicht marginal vom inneren Aufbau der fast gleich großen Erde unterscheidet. Das betrifft sowohl den Schalenbau (Differenzierung in Kern, Mantel und Kruste) als auch die chemische Zusammensetzung der Mantelgesteine. Oder, ob auch zeitlich nacheinander gestaffelte lokale Oberflächenerneuerungsprozesse und keine relativ kurze globale katastrophale Ereignisse (wie es das Standardmodell des Resurfacing voraussetzt) zu der beobachteten Impaktkraterverteilung führen kann, wie neuere Computersimulationen nahelegen (STOFAN, TAYLOR, 2006).

Endogene Oberflächenveränderungen benötigen eine ausreichende Energiequelle, die bei erdartigen Planeten nur aus dem Wärmeverrat des Planeteninneren gespeist werden kann. Diese Wärmequelle läßt sich im Wesentlichen in zwei Anteile aufspalten: a) in die primordiale Restwärme, die noch aus der Zeit der Planetenentstehung stammt und b) in die Wärmemenge, die permanent aufgrund des Zerfalls radioaktiver Elemente im Inneren eines Gesteinsplaneten entsteht. Da sich Venus und Erde sowohl in ihrer Größe als auch in ihrer stofflichen Zusammensetzung kaum voneinander unterscheiden, dürften die Energieerzeugungsraten durch radioaktiven Zerfall bei beiden Planeten ungefähr gleich sein. Den permanenten Wärmeverlust, den ein Planet pro Quadratmeter und Zeiteinheit erleidet, bezeichnet man als Wärmefluß an der Oberfläche. Er läßt sich z.Z. nur bei der Erde messen und muß bei anderen Himmelskörpern unter Verwendung von Analogie- und Modellbetrachtungen abgeschätzt werden. Dieser Wärmefluß setzt sich aus mehreren Anteilen zusammen von denen Wärmeleitung, Plattentektonik und Advektion die Wesentlichsten sind. Beim Planeten Erde beträgt der Wärmefluß an der Oberfläche ca.  $82 \text{ mW/m}^2$ , wobei ungefähr jeweils eine Hälfte auf plattentektonische Prozesse (inkl. Advektion) und die andere Hälfte (ca.  $40 \text{ mW/m}^2$ ) auf die Wärmeenergie, die durch den Zerfall radioaktiver Elemente im Erdmantel erzeugt wird, entfällt (Wärmeleitung). Beide Prozesse regulieren die Temperatur des Mantels und entsprechen somit einer effektiven Mantelkühlung. Da bei der Venus keine Plattentektonik existiert und z. Z offensichtlich, nur Wärmeleitung durch die basaltische Kruste eine Rolle spielt, schätzt man den Wärmefluß aus dem Mantel auf  $18 \text{ .. } 25 \text{ mW/m}^2$ , was nur einem Viertel bis zu einem Drittel des irdischen Wertes entspricht. Das bedeutet, daß gegenwärtig mehr Energie im Inneren der Venus durch radioaktiven Zerfall erzeugt wird als durch Wärmeleitung durch die Lithosphäre über die Planetenoberfläche wieder verloren geht. Das hat natürlich Auswirkungen auf die im Venusmantel stattfindenden Prozesse, die letztendlich der Schlüssel für das beobachtete Resurfacing sind.

Wie bei der Erde existieren im Venusmantel Konvektionsströme, die aufgrund der höheren Manteltemperatur und dem Fehlen von Wasser in den Mantelgesteinen ein etwas anderes dynamisches Verhalten zeigen. So ist die Viskosität der Mantelgesteine mit ca.  $3 \cdot 10^{20} \text{ Pa s}$  ungefähr eine Größenordnung höher als bei der Erde, was wahrscheinlich eine kontinuierliche Subduktion erschwert. Dafür treten im Bereich der Ränder der Konvektionszellen häufiger „hot spots“ auf, die mit Mantelplumes in Verbindung stehen. Sie sind maßgeblich für die ausgedehnten vulkanischen Provinzen der Venusoberfläche verantwortlich.

Der „hot spot“ - Vulkanismus, der vor ca. 800- 500 Millionen Jahren besonders intensiv war und dann immer mehr abgenommen hat (aus den Satellitenbeobachtungen lassen sich nur sehr schwache Anzeichen für einen rezenten Vulkanismus ableiten), führte in einer geologisch kurzen Zeit zu einer völligen Neugestaltung des überwiegenden Teils der Venusoberfläche. Riesige Ebenen (Planitia) entstanden durch Überdeckung mit Flutbasalten und eine Vielzahl von effusiven Vulkanen förderten

dünnflüssige Laven, die über Lavakanäle abfließen oder riesige „Überschwemmungsgebiete“ in der unmittelbaren Nähe der diese Laven fördernden Schildvulkanen ausbildeten. Die Magmaproduktionsrate dürfte während der Zeit des Maximums der vulkanischen Tätigkeit ungefähr 25x größer gewesen sein als in den letzten 100-300 Millionen Jahren. Ob es sich bei diesem Oberflächenerneuerungsprozeß um ein planetenumspannendes katastrophales Ereignis gehandelt hat (das sich vielleicht sogar alle 500 - 1000 Millionen Jahre wiederholt) oder ob die vulkanischen Tätigkeit über einen längeren Zeitraum hinweg degressiv abnahm (wobei die einzelnen Aktivitätsepisoden mehr lokaler Natur waren), ist noch nicht völlig klar. Beide Szenarien lassen sich mit dem Befund einer zufälligen Impaktkraterverteilung in Übereinstimmung bringen.

Beim Standardmodell des Resurfacing-Prozesses wird von einem katastrophalen Ereignis ausgegangen, welches den gesamten Planeten umfaßte. Es zeichnet sich durch eine rapide Zunahme von Mantelplumes aus, welche die Oberfläche erreichten und dort einen intensiven Vulkanismus auslösten. Als Ursache erscheint eine kontinuierliche Erhöhung der potentiellen Manteltemperatur als wahrscheinlich (TURCOTTE et. al. 1999). Dabei versteht man unter der potentiellen Manteltemperatur die Temperatur, welche die Mantelgesteine hätten, würde man den Druck vom aktuellen Wert auf Null reduzieren, ohne daß diese Gesteine schmelzen würden. Die Ursache für diese Temperaturerhöhung liegt darin begründet, daß über die Wärmeleitung durch die Lithosphäre weniger Energie abgeführt wird, als im Planeteninneren durch radioaktive Zerfälle erzeugt wird. Erreicht die potentielle Manteltemperatur einen kritischen Wert (er liegt ca. 100-200 K über den Standardwert von 1300 °C), dann beginnt von Innen heraus die starre Lithosphäre aufzuschmelzen (globale Subduktion) und es entstehen an der Phasengrenze Blasen verflüssigten Gesteins, die aufgrund ihrer geringeren Dichte nach oben steigen und irgendwann die Oberfläche erreichen. Dort kommt es dann zu Aufwölbungen mit den typischen Rißbildungen, wie man sie bei den Coronae, Arachnoiden und verwandten Objekten beobachtet, oder zu Spalteneruptionen, die mit einer Förderung riesiger Mengen von Flutbasalten verbunden sind. Diese Flutbasalte können ganze niedrig gelegene Gebiete mit kilometerdicken Gesteinsschichten überdecken und so riesige ebene Areale bilden (Planitia).

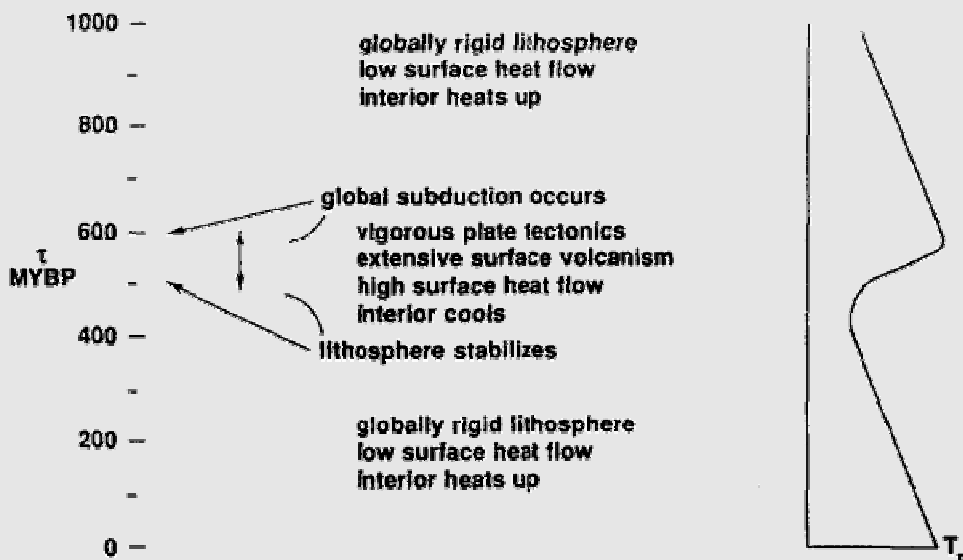
Über bestimmten „hot spots“ entstanden größere und kleinere Schildvulkane, wie man sie (wenn auch nicht ganz so mächtig) von der Erde her kennt (Hawaii). Auch sie sind in der Lage, über einen gewissen Zeitraum hinweg große Mengen dünnflüssiger Laven zu fördern, deren eingestürzte Abflußkanäle man heute teilweise über viele 100 km weit auf den Radaraufnahmen der Magellansonde verfolgen kann. Magmablasen können sich aber auch plötzlich entleeren, sobald ihre Decken instabil werden und zusammenbrechen. Solche einstürzende Magmablasen bezeichnet man auf der Erde als „Supervulkane“ (z.B. Yellowstone). Sie hinterlassen nach ihrem Ausbruch riesige Einsturzkrater, die man als Calderen bezeichnet. Stürzen leere Magmakammern im Gipfelbereich von Vulkanen ein, dann spricht man von Gipfelcalderen. Auch sie sind in großer Zahl auf der Venus zu finden.

Alle diese vulkanischen Ereignisse werden von einer Vielzahl tektonischer Vorgänge begleitet, die zu Rissen, Brüchen, Verformungen und Verwerfungen in der Venuskruste führen. Sie lassen i.d.R. sich sehr gut auf den Venusaufnahmen der Magellan-Kartierung identifizieren.

Die Gesamtheit dieser eben beschriebenen Prozesse führen zu einer Erhöhung des Wärmeflusses an der Venusoberfläche, was effektiv einer Mantelkühlung gleichkommt. Die potentielle Manteltemperatur sinkt daraufhin langsam auf ihren Standardwert und der „hot spot“-Vulkanismus beginnt allmählich zu erlöschen. Die Kruste verdickt sich wieder und umschließt den konvektiven Mantel wie eine Thermoskanne und der Prozeß der Mantelaufheizung kann von neuem beginnen. Dieses Szenario erklärt den Vorgang des Resurfacing als periodisches Phänomen, von denen wir jedoch nur die Ergebnisse der letzten Episode beobachten können.

Neben dem Standardmodell werden in letzter Zeit auch modifizierte und z.T. auch völlig andere Theorienansätze diskutiert, um die Oberflächenerneuerungsprozesse auf der Venus zu erklären. Zur ersten Gruppe gehören Theorien zur Mantelkonvektion, die entweder von einer konvektiven Schicht

(TURCOTTE et. al.) oder von zwei übereinander liegenden konvektiven Schichten („*two layer convection*“ nach HERRICK und PARMETIER (1994)) im Venusmantel ausgehen. Im letzteren Modell wird davon ausgegangen, daß es zwei chemisch (und damit auch in der Dichte) unterschiedliche Schichten gibt, deren Konvektion unabhängig voneinander ist. Heizt sich die untere Schicht soweit auf, daß ihre Dichte die Dichte der darüber liegenden Schicht erreicht bzw. übersteigt, dann entsteht Auftrieb und es kommt an der internen endothermen Phasengrenze zu einer verstärkten Superplumbenbildung, welche eine episodische Mantelumwälzung (*mantle overturn*) auslöst. Die Auswirkungen, die dieses „mantle overturn“ auf die Topographie der Venusoberfläche haben, sind von denen des Standardmodells nicht zu unterscheiden.



Entwicklung der Manteltemperatur und zeitliche Einordnung des letzten Oberflächenenerneuerungsprozesses (nach D.L.Turcotte, 1993)

Zum Schluß soll noch das „*stagnant lid convection*“-Modell von C.C.REESE et.al. (1998) erwähnt werden, welches auch eine katastrophale Aufschmelzung der Lithosphäre vor 500 - 800 Millionen Jahren vorherzusagen vermag.

Eine weitere Frage, die gegenwärtig kontrovers diskutiert wird ist die, ob die beobachtete Kraterstatistik auch mit nicht-katastrophalen Szenarien in Einklang zu bringen ist. Das bedeutet in diesem Fall, daß die Gesteinsformationen auf der Venusoberfläche bedeutend älter als 500 Millionen Jahre sind und sich die oberflächengestaltenden Prozesse über einen längeren Zeitraum, aber mit fallender Tendenz abgespielt haben müssen. Hinweise auf ein solches Szenario glauben VICKY HANSEN et.al. bei einer Neuinterpretation der Magellan-Ergebnisse gefunden zu haben. Eine genaue Inspektion des Verlaufs von Gebirgszügen, die sich aus den flachen, von Lava überfluteten Ebenen erheben, hat ergeben, daß diese Lavaschichten nicht mächtiger als maximal einem Kilometer sein können. Das ist aber nicht ausreichend, um darin die Wälle von alten Kraterstrukturen vollständig verschwinden zu lassen. Die Daten passen nach Meinung von HANSEN nicht zu einer singulären vulkanischen Katastrophe, wie es das Standardmodell voraussetzt, sondern eher zu einem langsamen Ausklingen der vulkanischen Aktivität über einen Zeitraum von rund zwei Milliarden Jahren. Inwieweit diese These wirklich zutrifft, wird z.Z. eingehend analysiert.

## Atmosphäre

Daß Venus eine mächtige Atmosphäre besitzt und man im Fernrohr nur die Wolkenhülle beobachten kann, entdeckte 1761 während des damals sehr beachteten Venusdurchgangs der russische Gelehrte MICHAEL WASSILJEWITSCH LOMONOSSOW (1711-1765). Aber erst mit dem Einsatz von Raumsonden ca. 200 Jahre später konnten ihre wichtigsten Parameter bestimmt werden, so daß wir über ihre Zusammensetzung und ihren Aufbau recht gut Bescheid wissen. Ihre Dynamik, die sich insbesondere in einer im Planetensystem einmaligen „Superrotation“, äußert) ist jedoch weiterhin rätselhaft und Gegenstand intensiver Forschung. Die Planetensonde „Venus Expresß“ ist extra dafür konzipiert worden, die physikalischen und meteorologischen Bedingungen der Venusatmosphäre aufzuklären.

Venus hat die mächtigste Gashülle aller erdartigen Planeten. Ihre Masse beträgt etwa das 90-fache der Masse der Erdatmosphäre (absolut sind das  $4.8 \cdot 10^{20}$  kg), wobei rund 90% in einer Schicht unterhalb von 28 km anzutreffen ist.

Die Venusatmosphäre besteht zu 96.5% aus Kohlendioxid und zu knapp 3.5% aus Stickstoff. Bei der Erde, die etwa die gleiche Größe hat, überwiegt dagegen Stickstoff (ca. 78%) und Kohlendioxid ist mit einem Anteil von 0.033% nur ein (wenn auch wichtiges) Spurengas. Das es in der Erdatmosphäre nur so geringfügig vorkommt und der äußerst reaktive Sauerstoff fast 21% der Atmosphäregase ausmacht, ist eine Konsequenz der Biosphäre und damit des Lebens.

Die Zusammensetzung der Venusatmosphäre hängt stark von der Höhe über dem Planeten ab. Während in großen Höhen  $\text{CO}_2$ , CO und  $\text{N}_2$  vorkommen, findet man an der Oberfläche fast nur noch  $\text{CO}_2$  und etwas  $\text{N}_2$ .

Auf der Erdoberfläche beträgt der Luftdruck 1 bar. Die sowjetischen Venuslander haben auf der Venusoberfläche einen neunzigmal größeren Druck gemessen – 92 bar. Das entspricht auf der Erde dem Wasserdruck in einer Meerestiefe von ca. 910 Meter! Dazu kommt noch eine Oberflächentemperatur von ungefähr 460 °C, die überaus gleichmäßig auf dem gesamten Planeten – unabhängig ob Tag- oder Nachtseite – zu finden ist. Der Unterschied zwischen Tag- und Nachttemperaturen dürfte gerade mal in der Größenordnung von einem Grad liegen.

Die Ursache für diese ungesunde Temperatur liegt im Treibhauseffekt, der auf der Venus besonders extrem ausgeprägt ist.

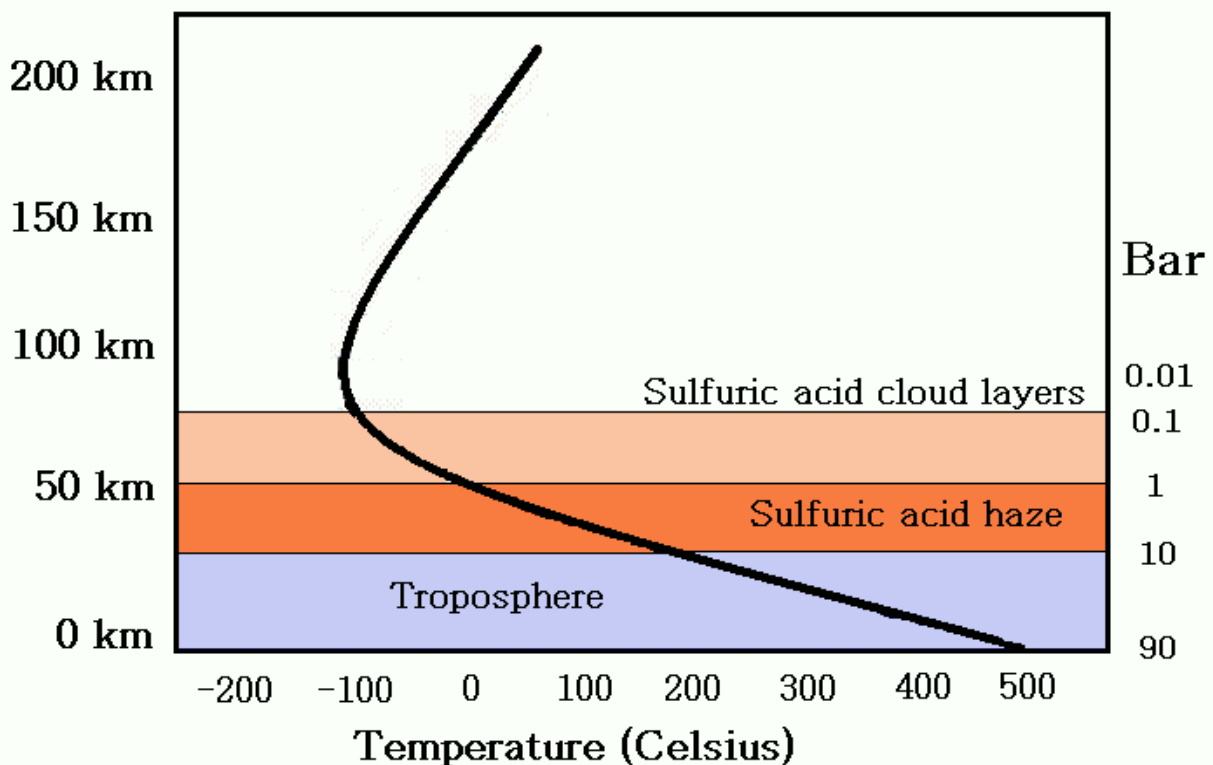
Wenn man bedenkt, daß die Gesamtmasse der Venusatmosphäre ungefähr einem Drittel der Masse der irdischen Ozeane entspricht, kann man durchaus von einem „Luftozean“ sprechen.

Der große Gasdruck bewirkt, daß es auf der Venusoberfläche (im Gegensatz zu ihrer oberen Atmosphäre) so gut wie keine größeren permanenten Windströmungen gibt. Der Lander von Venera 13 hat lediglich eine leichte Strömung zwischen 0.5 und 0.6 m/s gemessen. Anders ist es, wenn ein größerer Meteorit die Atmosphäre durchschlägt. Dabei entstehen Druckwellen, die bis zu einige Gigapascal (GPa) stark werden können und – an der Oberfläche reflektiert – dann äußerst kräftige und weiträumige Stürme ausbilden. Auf diese Weise entstehen die gerade um Einschlagkrater so auffälligen geröllarmen bzw. geröllfreien Flächen sowie die selten anzutreffenden Dünenstrukturen.

Aufgrund der hohen Dichte wirkt die Rayleigh-Streuung des einfallenden Lichtes auf der Venus bedeutend stärker als auf der Erde. Deshalb erscheint der Himmel nicht blau (wie bei der Erde bei wolkenlosem Himmel), sondern in einem dämmerartigen, orangefarbenen Licht (nur etwa 2% des sichtbaren Sonnenlichts können die dichte Wolkendecke durchdringen). Auch treten an der Oberfläche anomale Refraktionserscheinungen auf die dazu führen, daß es für einen fiktiven Beobachter auf einer der Venusebenen immer so erscheinen würde, als ob er in der Mitte einer flachen Grube steht, d.h. der Horizont erscheint bedeutend näher als er in Wirklichkeit ist. Dieser Effekt ist auch auf den Panoramaaufnahmen der Venuslander zu bemerken. Unter günstigen Beleuchtungsverhältnissen dürfte die Sichtweite auf der Oberfläche gerade einmal 3 Kilometer erreichen.

Über den vertikalen Aufbau der Venusatmosphäre weiß man aufgrund der zahlreichen automatischen Sonden, die in die Atmosphäre eingetreten sind, mittlerweile schon recht gut Bescheid. Dazu hat neben den sowjetischen Venussonden auch Pioneer Venus 2 beigetragen, der eine große und drei kleinere Atmosphärensonden absetzen konnte. Außerdem gelang es 1985 den sowjetischen Sonden Vega 1 und Vega 2 jeweils einen Ballon in die Venusatmosphäre zu bringen, die über einige Tage verfolgt werden konnten und Aufschluß über das Strömungsverhalten der oberen Atmosphärenschichten gaben.

Ein relativ genaues Temperatur- und Druckprofil konnte auch anhand der Vermessung eines Funksignals der Magellan-Sonde am 5. Oktober 1991 erhalten werden, als sie von der Erde aus gesehen bei 67° nördlicher Breite von der Venus bedeckt wurde.



Temperaturverlauf und Lage der Wolkenschichten in der Venusatmosphäre

Die Atmosphäre der Venus läßt sich - ähnlich wie bei der Erde - in einzelne Bereiche aufteilen. Bei der Venus ist dieser Aufbau naturgemäß noch nicht ganz so detailliert bekannt wie bei der Erde. Man kann aber auf jeden Fall zwei größere Bereiche sehr gut unterscheiden:

## **Tiefe und mittlere Atmosphäre – Troposphäre / Mesosphäre**

Auf der Venus reicht diese Atmosphärenschicht bis in etwa 100 km Höhe. Oberhalb von 40 km befindet sich die durchgehende Wolkenschicht, die den Blick auf die Planetenoberfläche vollständig versperrt.

Am Boden, bei einem Luftdruck von ca. 90 Bar, herrscht eine Temperatur von ca. 460° C. Nach oben nimmt sie bis in eine Höhe von 80 km kontinuierlich ab und bleibt bis zum Ende der Troposphäre auf einem relativ konstanten Wert.

Durch die im Vergleich zur Erde fehlenden Ozonschicht kommt es zu keiner lokalen Erwärmung oberhalb der Troposphäre. Zwar hat die Eintauchsonde Vega 2 in einer Höhe von ca. 62 km eine leichte Temperaturinversion vorgefunden (9 K). Wie man sie einzuordnen hat, ist jedoch noch unklar.

## **Thermosphäre**

Oberhalb von 110 km Höhe beginnt auf der Tagseite die Thermosphäre und auf der Nachtseite die sogenannte Kryosphäre. Letztere wurde nach dem griechischen Wort für „Frost“ benannt, da sie sich sehr stark (auf ca. – 173° C) abkühlt. Aber auch die Temperaturen der Thermosphäre auf der Tagseite bleiben noch weit unter (bis 600 K) der Temperatur der Thermosphäre der Erde zurück. Die Ursache für diesen Effekt liegt in der im Vergleich zur Venus schnellen Rotation der Erde, welche die Ausbildung einer Temperaturdifferenz zwischen Tag- und Nachtseite verhindert.

Vergleicht man die Temperaturprofile von Erde und Venus, dann fällt folgender Sachverhalt auf: Die Venus ist „unten“ heiß und „oben“ kalt. Bei der Erde ist es genau umgekehrt.

Da sich die Venus näher an der Sonne befindet, erhält sie (bezogen auf die gesamte Oberfläche des Planeten) knapp die doppelte Strahlungsenergie als die Erde (ca. 655 W/m<sup>2</sup> an der Obergrenze der Wolken). Aufgrund ihres großen Albedowertes von 0.76 bleiben jedoch effektiv nur noch ca. 157 W/m<sup>2</sup> übrig, von denen ca. 15 W/m<sup>2</sup> von der Planetenoberfläche und 142 W/m<sup>2</sup> von der Atmosphäre absorbiert werden.

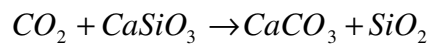
Auf der Erde beträgt die Einstrahlung bei einem mittleren Albedo von 0.305 immerhin noch 238 W/m<sup>2</sup>, von denen 76 W/m<sup>2</sup> beim Durchgang durch die Atmosphäre und 162 W/m<sup>2</sup> von der Oberfläche absorbiert werden. Deshalb sollte man eigentlich erwarten, daß die mittlere Oberflächentemperatur der Venus geringer ist als auf der Erde. Das ist aber offensichtlich nicht der Fall. Die Ursache für diese Erscheinung liegt in einem Phänomen, den man als Treibhauseffekt bezeichnet. Er ist auf der Venus besonders stark ausgeprägt, weil das Kohlendioxid als Hauptbestandteil der Atmosphäre einen Teil des Sonnenlichts bis zur Planetenoberfläche hindurch läßt, wo es absorbiert und anschließend als Infrarotstrahlung wieder reemittiert wird. Diese Infrarotstrahlung kann aber nicht in den Kosmos

abstrahlen, da sie durch die Kohlendioxidatmosphäre und durch die dichte Wolkendecke daran gehindert wird. Das Ergebnis ist eine Aufheizung der unteren Atmosphärenschichten.

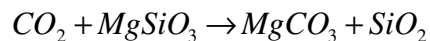
$CaCO_3$ ) als Teilprozeß eines globalen Kohlenstoffkreislaufs in erster Linie durch marine Lebewesen (z.B. Kieselalgen, Korallen). Würden alle Kalziumkarbonatlagerstätten auf der Erde schlagartig in Form von  $CO_2$  freigesetzt werden, dann würde die Atmosphäre um ca. 70-mal dichter sein als jetzt und Kohlendioxid wäre wie auf der Venus das häufigste Atmosphären gas.

Karbonatgesteine können auf der Erde aber auch ohne Anwesenheit von Lebewesen gebildet werden, wenn nur genügend flüssiges Wasser vorhanden ist. Bekanntermaßen löst sich  $CO_2$  in Wasser und bildet eine schwache Säure (Kohlensäure), die wiederum in Wechselwirkung mit Silikatgesteinen in der Lage ist, Karbonate zu bilden. Zwei wichtige Reaktionen in diesem Zusammenhang sind:

Kalziumkarbonat (Kalkstein)



Magnesiumkarbonat (Dolomit)



Diese beiden gesteinsbildenden Minerale werden in Form von Sedimenten auf dem Meeresboden abgelagert, wodurch die  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre sinkt. Nachgeliefert wird das Kohlendioxid dagegen durch vulkanische Aktivität, in dem es aus Vulkanen und aus aktiven Plattenrändern austritt sowie durch die Verbrennung von Kohlenstoff (dazu gehört auch der Stoffwechsel der Lebewesen). Die Kohlendioxidkonzentration in der Erdatmosphäre ergibt sich demnach aus der Differenz zwischen dem aus der Erdkruste und aus biotischen bzw. anthropogenen Prozessen nachgelieferten  $CO_2$  und dem  $CO_2$ -Verbrauch durch Lebewesen (Photosynthese ist eine der wichtigsten  $CO_2$ -Senken der Erde) und der organischen und anorganischen Karbonatbildung. In den Subduktionszonen an den tektonischen Plattenrändern werden schließlich die Karbonatgesteine im Laufe von Jahrtausenden zurück in den Erdmantel transportiert und damit dem Zyklus wieder zugeführt.

Auf der Erde wird ein ausufernder Treibhauseffekt lediglich durch ein diffiziles Gleichgewicht zwischen den Ozeanen, dem Leben, der Plattentektonik und der Atmosphäre verhindert.

In der Geschichte der Venus muß es einmal einen Zeitpunkt gegeben haben, wo es zu einem „Aufschaukeln“ des Treibhauseffekts, einem sich selbst verstärkenden Treibhauseffekt (engl. „*Runaway Greenhouse Effect*“, Treibhausinstabilität), gekommen ist, deren Auswirkungen sich heute beobachten lassen. Er führte dazu, daß die ehemals wie auf der Erde reichlich vorhandenen Wassermassen verdampften (man schätzt, daß der Wasseranteil der frühen Venus ungefähr 30% von dem der Erde betrug). Die Wassermoleküle, die sich in der Atmosphäre anreicherten, wurden durch die UV-Strahlung der Sonne in Sauerstoff- und Wasserstoffatome aufgespalten. Während der hoch reaktive Sauerstoff leicht gebunden wird (Oxidation), konnten die leichten Wasserstoffatome über die Exosphäre den Planeten verlassen. Ein kleinerer Teil des Wasserdampfes reagierte mit Schwefeldioxid und bildet heute smogartige Wolken aus mikroskopisch kleinen Schwefelsäuretröpfchen. Diese

Überlegung über die Frage, was mit dem Wasser auf der Venus geschehen ist, wurde überraschend durch die Entdeckung einer großen Menge von Deuterium in der Venusatmosphäre verifiziert. Deuterium kann aufgrund seiner gegenüber dem Wasserstoff doppelt so hohen Masse dem Schwerefeld der Venus nicht so leicht entkommen. Das Deuterium/Wasserstoff-Verhältnis sollte also im Laufe der Zeit zunehmen, und tatsächlich ist es auf der Venus  $120 \pm 40$  mal so groß, wie auf der Erde. Diese Beobachtung wurde inzwischen mehrfach überprüft und bestätigt, so daß man als Ursache für die „unten“ heiße Venus einen „*Runaway Greenhouse Effect*“ mit Bestimmtheit annehmen kann.

Da das Problem der globalen Erwärmung für die Weiterexistenz des Lebens auf der Erde eine nicht zu unterschätzende Bedeutung hat, kann das Studium der Verhältnisse auf der Venus wertvolle Hinweise für das Verständnis des Treibhauseffekts liefern.



Nur im UV-Bereich erkennt man Details der Venuswolken, die eigentlich nur Dunstschichten aus Schwefelsäureaerosolen sind.

Eine weitere Überraschung waren die Venuswolken. Von der Erde aus erscheint die Wolkendecke im Fernrohr in einem gleichmäßigen, strukturlosen Glanz. Nur wenn man spezielle Filter anwendet, die nur den Blau- und Violettanteil des Lichts hindurch lassen, kann man unter günstigen Bedingungen leichte Schattierungen erkennen. Erst im ultravioletten Licht sieht man ausgedehnte dunkle Strukturen,

die sich auf den ersten Blick nur sehr schwer einordnen lassen. Umfangreiche Aufnahmeserien wurden 1979 von Pioneer Venus Orbiter aufgenommen, die eine sehr bewegte Wolkendecke zeigen. In den oberen Wolkenschichten treten Windgeschwindigkeiten bis zu 300 km/h und mehr auf. Sie ähneln in manchen Aspekten den bekannten Jetstreams der Erde, nur daß sie weitaus größere Ausmaße annehmen. Venus besitzt im Gegensatz zur Erde ein sogenanntes zonales Windsystem, d.h. die Luftströmungen bewegen sich retrograd von Ost nach West. Durch die sehr großen Windgeschwindigkeiten benötigen die Atmosphärenschichten im Bereich der Wolkenobergrenze jedoch nur 4 bis 5 Tage, um einmal den Planeten zu umrunden. Wie diese „Superrotation“ entsteht und aufrechterhalten wird – man bedenke, Venus selbst benötigt für eine volle Rotation immerhin 243 Tage was im Zusammenspiel mit der Umlaufzeit von 225 Tagen zu einer effektiven Tageslänge von 117 Tagen führt – ist Gegenstand intensiver Forschung. Modellrechnungen zeigen, daß bei Atmosphären, die sich in der Äquatorregion stark aufheizen und in den gemäßigten und polnahen Bereichen abkühlen, derartige zonale Strömungen auftreten können vorausgesetzt, der Planet selbst rotiert nicht zu schnell (verschwindend geringe Corioliskraft) und es existieren großräumige hemisphärische Hadley-Zellen. Darunter versteht man thermisch induzierte Konvektionsströmungen, bei denen in tieferen Atmosphärenschichten (man schätzt in ca. 30 bis 40 km Höhe) kühlere Gasmassen von den Polargebieten in Richtung Äquator transportiert und dort wieder erwärmt werden. Die erwärmten Atmosphärenpakete steigen auf und werden im oberen Bereich der Gashülle (genauer gesagt, im Bereich der Wolken in ca. 60 km Höhe) wieder in Richtung Pole verfrachtet. Auf diese Weise entstehen Konvektionszellen die – wie im Fall der Venus - eine ganze Hemisphäre einnehmen können. Die vertikale Windgeschwindigkeit in der Konvektionsströmung beträgt dabei wenige Meter pro Sekunde, während die horizontale Strömung in Ost-West-Richtung von unten nach oben zunimmt um in einer Höhe von ca. 70 km ein Maximum (100 m/s) zu erreichen. Unterhalb der hemisphärischen Hadley-Zellen vermutet man weitere Konvektionszellen, die einen Wärmetransport in den tieferen Atmosphärenschichten bis zur Oberfläche vermitteln.

Auf der Erde bilden sich derartige Hadley-Zellen direkt über der Oberfläche in der Troposphäre aus. Sie reichen aber nicht bis in die gemäßigten Breiten, da sie dort durch komplexe Wirbelsysteme verdrängt werden. Die Ursache dafür ist in der vergleichsweise schnellen Eigenrotation der Erde (und der dabei auftretenden Corioliskraft) zu suchen.

Der untere, oberflächennahe Teil der Venusatmosphäre ist dagegen rheologisch fest mit dem Planetenkörper verbunden und rotiert genauso schnell wie der Planet selbst. Die äolischen Ablagerungen im Bereich kleinerer Impaktkrater und vereinzelte Dünenbildungen weisen darauf hin, daß die oberflächennahen Winde sowohl von der Südhalbkugel als auch von der Nordhalbkugel aus hauptsächlich in Richtung Äquator wehen. Die dabei normalerweise erreichten Windgeschwindigkeiten sind sehr gering.

1989 hat der russische Atmosphärenphysiker SILITINKJEWITSCH Modellrechnungen vorgelegt, die qualitativ genau die bei der Venus beobachteten Strömungserscheinungen ergaben und zwar auch die rätselhaften zonalen Strömungen innerhalb der Hadley-Zellen in Richtung der Eigenrotation des Planeten.

Die atmosphärischen Strömungsverhältnisse der Venus unterscheiden sich stark von denen der Erde, wo die durch die Rotation bedingte Corioliskraft eine bestimmende Rolle spielt. Sie ist u. a. die

Ursache dafür, daß sich auf der Nordhalbkugel Zyklone von West nach Ost bewegen und auf der Südhalbkugel genau andersherum. Sie hält der Druckgradientenkraft, die für die Ausbildung von Strömungen zwischen Orten unterschiedlichen Luftdrucks verantwortlich ist, das Gleichgewicht (Meteorologen sprechen genauer von einem geostrophischen Gleichgewicht). Bei der Venus wird dieser Part von der Tangentialkomponente der Zentrifugalkraft übernommen. Es bildet sich ein sogenanntes zyklostrophisches Gleichgewicht aus und die Strömungen verlaufen hochgradig parallel zum Äquator. Wichtige Details der Entstehung der Superrotation der oberen Atmosphärenschichten sind aber weiterhin ungeklärt. Man erhofft sich, daß die Messungen der ESA-Planetensonde „Venus Expreß“ mit ihren empfindlichen Meßgeräten Licht in dieses heute nur z.T. verstandene Phänomen bringt.

Die Venuswolken befinden sich in mehreren, gut zu unterscheidenden Schichten in einem Höhenbereich zwischen 48 und 70 km. Dabei handelt es sich nicht um Wasserdampfwolken wie auf der Erde, sondern vielmehr um einen Dunst aus mikroskopisch kleinen Tröpfchen konzentrierter Schwefelsäure. Interessant ist, daß man zu dieser Erkenntnis bereits 1974 gekommen ist, bevor automatische Sonden die Wolken selbst erkunden konnten. Aus genauen polarimetrischen Messungen im Vergleich mit theoretischen Erwägungen haben J.E.HANSEN und J.W.HOVENIER damals die Vermutung geäußert, daß kleine kugelförmige Tröpfchen (Durchmesser in der Größenordnung von einem Mikrometer) mit den Brechungseigenschaften von 75 bis 90%-iger Schwefelsäure ( $H_2SO_4$ ) die Beobachtungsergebnisse am besten erklären. Diese Vermutung konnte später „vor Ort“ bestätigt werden.

Man kann in der vertikalen Richtung sehr gut drei Wolkenschichten, die durch gut definierte Übergangszonen mit einer Mächtigkeit von ungefähr einem halben Kilometer getrennt sind, unterscheiden.

### **Untere Wolkenschicht**

Diese Schicht besteht aus Aerosolen aus Phosphorsäuren und elementarem Schwefel. Sie beginnt in einer Höhe von 47 km und erstreckt sich bis in eine Höhe von ca. 51 km. Die meisten „Tröpfchen“ sind nur ungefähr 0.2  $\mu\text{m}$  groß. In einem Kubikzentimeter befinden sich im Durchschnitt 1300 Teilchen unterschiedlicher Größe.

### **Mittlere Wolkenschicht**

Höhenbereich zwischen 51 km und 57 km. Die mittlere Teilchendichte ist mit rund  $300\text{ cm}^{-3}$  geringer als in der darunter liegenden Zone, obwohl sie die Hauptmasse der Venuswolken enthält. Nach den Messungen von Venera 12 kommen die Teilchen in drei verschiedenen und gut unterscheidbaren Größen vor wobei man annimmt, daß es sich bei den größten Partikeln nicht um Flüssigkeitstropfen, sondern um kristalline Festkörper (Schwefel?) handelt. Chemisch gesehen bestehen die wolkenbildenden Aerosole aus konzentrierter Schwefelsäure sowie aus chlorhaltigen Verbindungen, wobei der Anteil von Schwefel den Anteil von Chlor um fast eine Größenordnung übersteigt (Venera 13 und 14).

### Obere Wolkenschicht

Diese Schicht beginnt in 57 km Höhe und hat eine unscharfe obere Grenze in ungefähr 70 km Höhe bei einer Temperatur, die in der Nähe des erwarteten Phasenübergangs flüssig-fest von 75-90%-iger Schwefelsäure liegt, aus dem der smogartigen Dunst hauptsächlich besteht.

Ober- und unterhalb dieser Wolkenschichten gibt es noch Zonen von leichtem, d.h. optisch dünnen Dunst. Unterhalb von 30 km Höhe ist die Venusatmosphäre praktisch durchsichtig.

Insbesondere die Dunstschicht zwischen 70 und 90 km Höhe wird für die Strukturen verantwortlich gemacht, die man auf UV-Aufnahmen der Venus deutlich erkennen kann.

Interessant ist auch die Erkenntnis, daß es in der Venusatmosphäre offenbar keinen Staub gibt und zwar nicht einmal in den dichten und heißen Oberflächenschichten, wie die Messungen der sowjetischen Venuslander zeigen.

Im Vergleich zur Erde kann man die Venuswolken eigentlich gar nicht als „Wolken“ im herkömmlichen Sinn bezeichnen. Venuswolken ähneln eher dem Smog über Großstädten an einem warmen windstillen Sommertag. Das sie von der Erde aus als völlig undurchsichtig erscheinen liegt an ihrer vertikalen Mächtigkeit von ungefähr 20 km. Die Sichtweite innerhalb der Wolkenschicht dürfte ungefähr einem Kilometer betragen. Ihre Gesamtmasse beträgt weniger als ein Zehntel der Wolkenmasse der Erde.

Die Chemie der Venuswolken scheint sehr komplex zu sein. Wie bereits erwähnt, wird sie durch Schwefel-, Chlor und Phosphorverbindungen bestimmt. Alles Elemente, die verdächtig an Vulkanismus erinnern. Womit man wieder bei der Frage ist, ob es auf der Venus rezenten Vulkanismus gibt. Andererseits haben Atmosphärenchemiker Reaktionskreisläufe entwickelt, welche die chemische Stabilität der Aerosolwolken auch ohne rezenten Vulkanismus erklären können, wenn es nur in ferner Vergangenheit einmal vulkanische Aktivitäten gegeben hat, was ja zweifellos der Fall war.

### Magnetfeld

Venus besitzt kein eigenes Magnetfeld (Oberflächenfeldstärke  $< 10$  nT). Dieser Fakt ist insofern verwunderlich, da sie in Größe und inneren Aufbau stark der Erde ähnelt. Ein wesentlicher Unterschied zur Erde ist jedoch die geringe Rotationsdauer von 243 Tagen. Man vermutet, daß die Venus aufgrund der geringen Rotationsgeschwindigkeit über den Dynamoeffekt kein intrinsisches Magnetfeld ausbilden kann. Das bedeutet jedoch nicht, daß sie in der Vergangenheit keinen aktiven Dynamo besessen hat. Die überaus mächtige Atmosphäre läßt das eher vermuten. Eine Untersuchung der Oberflächengesteine nach Spuren eines ehemaligen Magnetfeldes (wie auf der Erde üblich) ist leider auch nicht möglich, da deren Temperatur (ca. 750 K) weit oberhalb der Curie-Temperatur liegt.

Trotzdem entsteht bei der Venus unter dem Einfluß des Sonnenwindes eine sogenannte induzierte Magnetosphäre, da Venus eine Ionosphäre besitzt. Eine genaue Analyse der Daten von Pioneer-Venus-Orbiter hat in etwa folgendes Bild ergeben: Der anströmende Sonnenwind wird von der Ionosphäre abgelenkt und bildet wie bei der Erde eine Stoßfront aus. Auf der Sonnenseite befindet sie sich in ca.

2100 km Höhe über der Planetenoberfläche, senkrecht dazu in ca. 14800 km Höhe. Die sich daran anschließende Ionopause (ca. 350 km über der Planetenoberfläche) ist für den Sonnenwind relativ undurchlässig, da sich an dieser Grenzschicht ein Gleichgewicht zwischen dem Plasmadruck des Ionosphärenplasmas und dem Staudruck des vorbeiströmenden Sonnenwindplasmas ausbildet. Auf diese Weise kann der aggressive Sonnenwind weitgehend von der Venusatmosphäre ferngehalten werden.

Die Struktur und Ausdehnung der Ionosphäre wird im großen Maße durch die sehr intensive UV-Strahlung der Sonne bestimmt, die für die freien Ladungen sorgt. Dabei entstehen elektrische Ströme, die wiederum zum Aufbau eines induzierten Magnetfeldes führen.

Auch bei der Venus bildet sich auf der Nachtseite ein Schweif aus, der bis in eine Entfernung von ca. 42000 km vom Planeten nachgewiesen wurde. Zwischen dem nördlichen und südlichen Schlauch beobachtet man analog zur Erde eine Neutralschicht. Interessant in diesem Zusammenhang ist die Beobachtung, daß  $O^+$ -Ionen in großer Zahl in diesen Plasmaschweif transportiert werden. Mit Hilfe der Sonnensonde SOHO konnte 1996 die Ausbreitung dieser Ionen bis in eine Entfernung von 12 Venusradien verfolgt werden. Es scheint eine gewisse Verwandtschaft zwischen der induzierten Magnetosphäre der Venus und der ausgedehnten Plasmaschweife von Kometen zu geben.

## Daten

### BAHNPARAMETER

Große Halbachse ( $10^6$ km)	108.208930
Umlaufszeit (siderisch) in Tagen	224.70069
Umlaufszeit (tropisch) in Tagen	
Perihelabstand ( $10^6$ km)	107.476259
Aphelabstand ( $10^6$ km)	108.942109
Umlaufszeit (synodisch) in Tagen	583.92
Mittlere Bahngeschwindigkeit (km/s)	35.02
Max. Bahngeschwindigkeit (km/s)	
Min. Bahngeschwindigkeit (km/s)	
Bahnneigung (Grad)	3.39471
Numerische Exzentrizität	0.0068
Sidereale Rotationsperiode (Stunden)	-243.0185
Länge eines Tages (Tage)	117

### PLANETENPARAMETER

Masse ( $10^{24}$ kg)	4.8685
Volumen ( $10^{10}$ km <sup>3</sup> )	92.843
Äquatorradius (km)	6051.8
Polradius (km)	6051.8
Abplattung	0.000
Mittlere Dichte (kg/m <sup>3</sup> )	5243
Schwerebeschleunigung (m/s <sup>2</sup> )	8.87
Entweichgeschwindigkeit (km/s)	10.36
Albedo	0.750
Geometrisches Albedo	0.65
Solarkonstante (W/m <sup>2</sup> )	2613.9
Strahlungstemperatur (K)	231.7
Max. Höhendifferenz Oberfläche (km)	15

### ATMOSPHERE

Oberflächendruck (bar)	92
Oberflächendichte (kg/m <sup>3</sup> )	65
Skalenhöhe (km)	15.9
Mittlere Oberflächentemperatur (K)	737
Tägliche Temperaturschwankungen Oberfläche (K)	0
Windgeschwindigkeit Oberfläche (m/s)	0.3 – 1.0
Mittleres Molekulargewicht (g/mol)	43.45
Zusammensetzung Oberfläche (Vol-%)	96.5 CO <sub>2</sub>

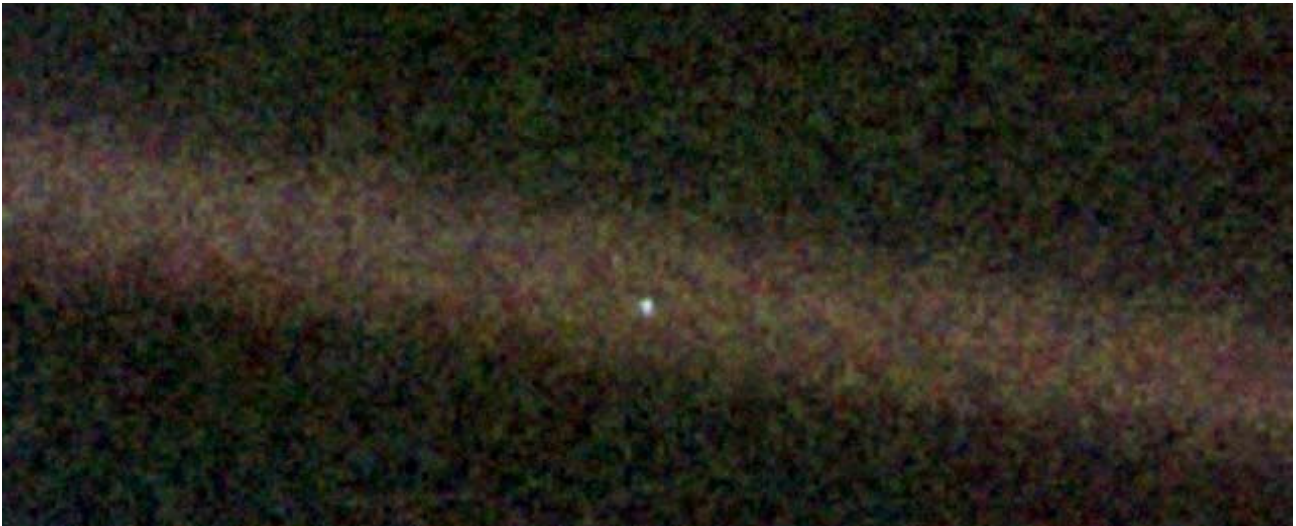
## Erde



Die Erde ist der dritte Planet im System der Sonne und weist einige bemerkenswerte Eigenschaften auf. Die bereits erwähnte bläuliche Färbung beruht auf dem Vorhandensein ausgedehnter Wasserflächen – den Ozeanen – und der Lichtstreuung in seiner von Stickstoff, Sauerstoff und Wasserdampf dominierten Atmosphäre. Ungefähr 1/3 der Planetenoberfläche ragt aus den Ozeanen heraus und bildet sechs größere Landblöcke, die als Kontinente bezeichnet werden. Am Ungewöhnlichsten ist jedoch der hohe Sauerstoffgehalt seiner Atmosphäre. 21% dieses äußerst reaktiven Gases machen es zum zweithäufigsten Bestandteil neben Stickstoff (78%). Dieser Anteil ist mit normalen geologischen Prozessen nicht zu erklären. Es weist auf ein anderes Phänomen hin, dem Leben. Einer Organisationsform der Materie, die in ihrer „primitiven“ Form im Kosmos zwar selten

aber wohl weit verbreitet sein dürfte, die aber in ihrer hochentwickelten Form eine eher rare Ausnahmerecheinung ist. Es ist nicht unwahrscheinlich, daß die Erde der einzige „blaue Punkt“ in unserem Milchstraßensystem mit seinen 200 Milliarden Sternen und noch viel mehr Planeten ist, wo es Wesen gibt, die Astronomie betreiben ...

Am 14. Februar 1990 drehte sich die interplanetare Sonde Voyager 1 noch einmal in Richtung Sonne, um aus einer Entfernung von 6,4 Milliarden Kilometern einen letzten Blick auf die Planeten unseres Sonnensystems zu werfen. Dabei gelang folgende Aufnahme:



Sie zeigt nur einen unscheinbaren blassen bläulichen Punkt. Es ist der Planet Erde.

### Allgemeines

Die Erde ist der am besten erforschte Planet des Sonnensystems. Ihr Äquatordurchmesser beträgt 12756 km und ihre Masse  $5.974 \cdot 10^{24}$  kg. Sie umläuft die Sonne auf einer elliptischen Bahn mit der Exzentrizität 0.0162 in 365.25636 Sonnentagen. Ihr mittlerer Abstand zum Sonnenzentrum beträgt nach neuesten Messungen 149597870 km. Diese Entfernung gilt in der Astronomie als Referenzgröße und wird als Astronomische Einheit bezeichnet.

Im Gegensatz zur Venus rotiert die Erde relativ schnell um ihre Achse (23h 56min 4s), die gegenüber der Bahnebene (Ekliptikalebene) um etwas über  $23^\circ$  geneigt ist. Diese Bahnneigung führt zur Ausbildung von ausgeprägten Jahreszeiten, die sich besonders in den gemäßigten Breiten der Nord- und Südhalbkugel bemerkbar machen.

Die Erde bildet mit einem weiteren planetarischen Körper, dem Erdmond, einen sogenannten Doppelplaneten. Diese Bezeichnung ist gerechtfertigt, da die Bewegung beider Himmelskörper von der Sonne dominiert wird. Betrachtet man die Erd- und Mondbahn in bezug auf die Sonne, dann erkennt man, daß beide Bahnen in Richtung der Sonne stets konkav gekrümmt sind. Der Erdmond bewegt sich also mehr um die Sonne und nur nebenbei, einfach weil er nicht weit genug von ihr entfernt ist, um die Erde. Das erkennt man, wenn man die Erde als Bezugspunkt wählt. In diesem Fall führt der Mond innerhalb von 27.32 Tagen einen kompletten Umlauf um den Masseschwerpunkt Erde-Mond aus.

Dabei schwankt seine Entfernung zwischen 356410 km (Perigäum) und 406740 km (Apogäum). Auch gravitativ ist der Mond mehr an die Sonne gebunden als an die Erde, da die Gravitationskraft zwischen Erde und Mond noch nicht einmal halb so groß ist wie die zwischen der Sonne und dem Mond.

Der Mond hat zwar nur einen Radius von 0.2725 Erdradien und eine Masse von ungefähr 1/81 Erdmassen. Trotzdem ist er für einige auffällige Erscheinungen wie z.B. die Meeresgezeiten, aber auch für die Form der Erde (Geoid), mitverantwortlich.

Neuere Forschungen – insbesondere Computersimulationen – bestätigen die schon seit langem geäußerte Vermutung, daß sich der Mond in fernster Vergangenheit bei einer Kollision mit einem marsgroßen Himmelskörper von der Erde abgespalten hat, beide also einen gemeinsamen Ursprung haben.

## Innerer Aufbau

Informationen über den inneren Aufbau der Erde kann man durch eine ganze Reihe indirekter Methoden erhalten. Die Wichtigste davon ist ohne Zweifel die seismische Methode, d.h. die Registrierung und Verfolgung von Erdbebenwellen, die durch den Erdkörper laufen. Erkenntnisse darüber, wie sich Erdbebenwellen ausbreiten und mit welcher Geschwindigkeit sie Gesteinsschichten unterschiedlicher Zusammensetzung und Dichte durchqueren, werden in der Seismologie gewissermaßen zur „Durchleuchtung“ der Erde ausgenutzt. Seit langem ist bekannt, daß es zwei verschiedene Arten von seismischen Wellen gibt, die Raumwellen und die Oberflächenwellen. Wie ihr Name schon sagt, breiten sich Raumwellen durch das Innere der Erde und Oberflächenwellen entlang der Erdoberfläche aus. Für die Erforschung des Erdinnern sind besonders die Raumwellen von Bedeutung. Sie gehen vom Epizentrum eines Erdbebens aus und können den gesamten Planeten in allen Richtungen durchlaufen.

Vom physikalischen Standpunkt lassen sich die Raumwellen in zwei Kategorien einteilen, in

- § P- oder Longitudinalwellen
- § S- oder Transversalwellen.

P-Wellen werden nach einem Beben zuerst von einem Seismographen registriert, deshalb auch das Präfix „P“ für lat. Primus, der Erste. Diese Wellen entsprechen Schallwellen, d.h. sie schwingen in Ausbreitungsrichtung (longitudinal) und können sich deshalb sowohl in Festkörpern, Flüssigkeiten als auch in Gasen ausbreiten.

Die Wellen, die zeitlich nach dem P-Wellen eintreffen, nennt man dagegen S-Wellen (von lat. „Sekundus“, der Zweite). Bei ihnen werden die Teilchen im rechten Winkel zur Ausbreitungsrichtung ausgelenkt, weshalb man diese Transversalwellen manchmal auch als Scherwellen bezeichnet. Sie treten nur in Festkörpern auf.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von P- und S-Wellen hängt von den elastischen Eigenschaften und von der Dichte des Mediums ab, durch das sie laufen. Bezeichnet man mit  $\kappa$  den adiabatischen

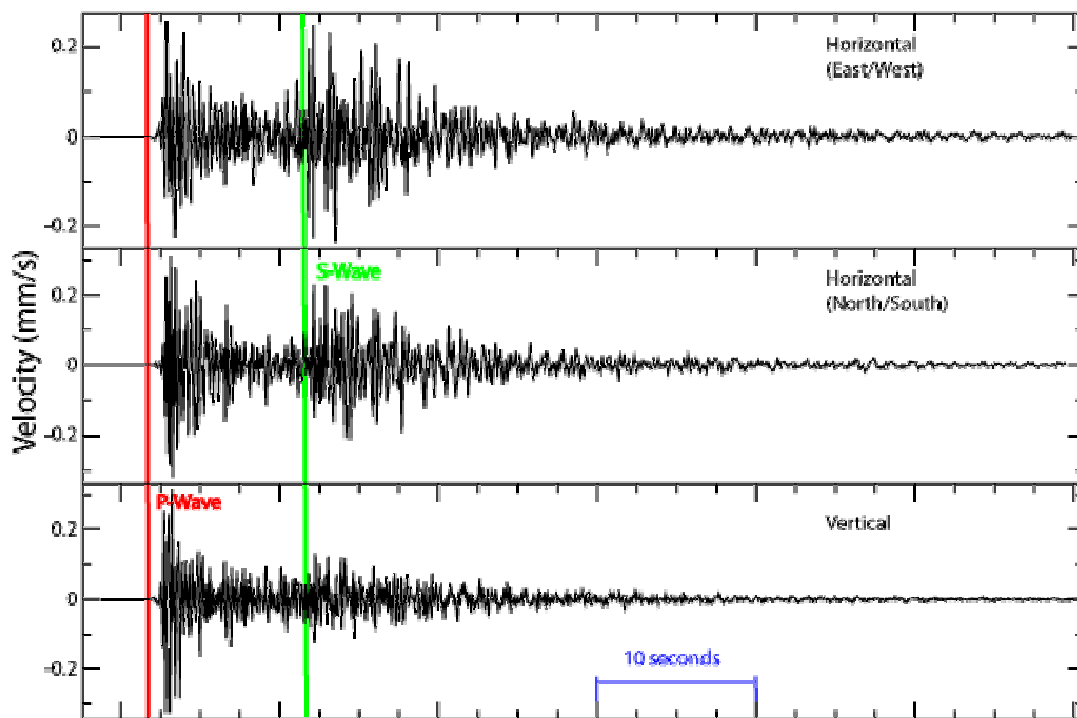
Kompressionsmodul, mit  $\mu$  den Starrheitsmodul und mit  $\rho$  die Dichte, dann gilt für die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c_P$  von P-Wellen:

$$c_P = \sqrt{\frac{\kappa + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad [1.2]$$

Für Transversalwellen gilt dagegen

$$c_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad [1.3]$$

Da in Flüssigkeiten  $\mu = 0$  ist, folgt aus (1.3), dass S-Wellen flüssige Bereiche nicht durchlaufen können.

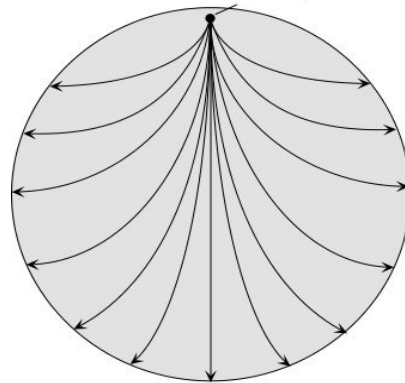


P- und S-Wellen, wie sie sich in einem Seismogramm darstellen

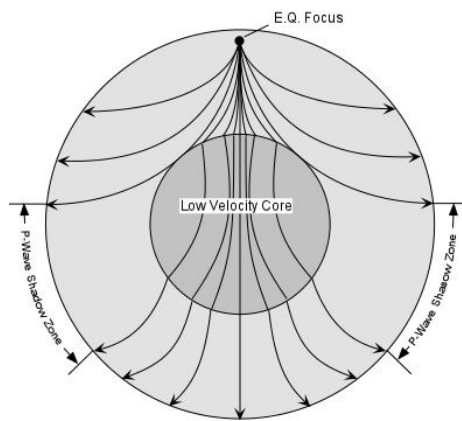
Es ist offensichtlich, daß die Zeitdauer zwischen einem seismischen Ereignis und dem Eintreffen von P- und S-Wellen an verschiedenen Orten Informationen über die von den Erdbebenwellen durchlaufenden Gesteinsschichten enthält. Deshalb sind sogenannte Laufzeitkurven, die man aus einzelnen Erdbeben ableitet, die wichtigste Informationsquelle zur Erforschung des inneren Aufbaus der Erde. Darunter versteht man den funktionalen Zusammenhang zwischen dem Zeitpunkt des Eintreffens einer Erdbebenwelle in Abhängigkeit von der Entfernung zum Epizentrum.

Angenommen, das Erdinnere ist homogen aufgebaut:  $\kappa$ ,  $\mu$  und  $\rho$  sind konstant und ändern sich nicht mit der Tiefe. In diesem Fall sagt (1.2) und (1.3) aus, daß sich die Erdbebenwellen geradlinig mit

konstanter Geschwindigkeit durch das Erdinnere bewegen. Etwas realistischer erscheint aber die Annahme, daß die Dichte  $\rho$  zum Zentrum hin zunimmt. In diesem Fall ergibt sich folgendes Bild:

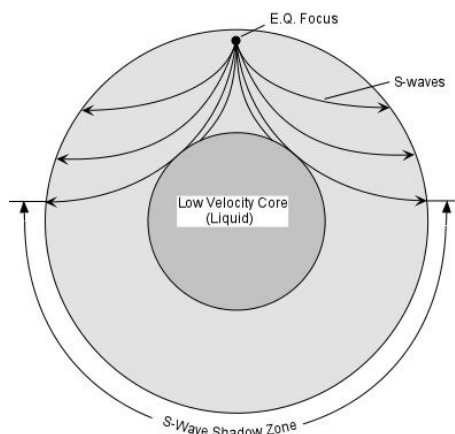


Gibt es im Erdinneren dagegen Bereiche, wo sich der Kompressionsmodul und die Dichte sprunghaft ändern (z.B. beim Übergang eines silikatischen Mantelbereichs zu einem Eisen-Nickel-Kern), dann werden an der Grenzfläche sowohl die P- als auch die S-Wellen gebrochen:



Insbesondere gibt es Orte auf der Erde, wo gar keine P-Wellen eintreffen.

Gibt es im Inneren auch noch eine Schale aus flüssigen Material (wie der äußere Erdkern), dann entsteht auf der dem Epizentrum entgegengesetzten Erdhälfte ein Bereich, wo keine S-Wellen registriert werden, da diese Flüssigkeiten nicht durchlaufen können:



Die Aufgabe der Seismologie ist es demnach, aus den Laufzeitkurven, die von den verschiedensten seismologischen Stationen auf der Erde erhalten werden, die Funktionen  $p(r)$ ,  $g(r)$  und  $\rho(r)$  derart zu bestimmen, das eine Dichte- und Druckverteilung heraus kommt, die mit der Erdmasse und ihrem mittleren Trägheitsmoment verträglich ist. Da die seismischen Geschwindigkeiten von zwei elastischen Konstanten abhängen, erscheint die Bestimmung der Dichteverteilung aus Laufzeitkurven auf dem ersten Blick ein nicht zu lösendes Problem zu sein. Nun gilt aber im Fall des hydrostatischen Gleichgewichts für die Druckverteilung im Erdinnern

$$\frac{dp}{dr} = -\rho g \quad [1.4]$$

(g Schwerebeschleunigung)

und für die Dichteänderung

$$\frac{d\rho}{dr} = \frac{\partial\rho}{\partial p} \frac{dp}{dr} \quad [1.5]$$

Erinnert man sich noch, daß der Kompressionsmodul  $\kappa$  der Quotient aus der auf einen Körper wirkenden Druckänderung  $dp$  und der daraus resultierenden Dichteänderung  $d\rho$ , multipliziert mit der Dichte  $\rho$  ist, dann kann man mit (1.2) und (1.4) schreiben

$$c_p^2 - \frac{4}{3}c_s^2 = \frac{\kappa}{\rho} = \Phi = \frac{\partial p}{\partial \rho} \quad [1.6]$$

wobei man  $\Phi$  als „seismischen Parameter“ bezeichnet. Kombiniert man (1.6) mit (1.4), dann erhält man die Adams-Williamson-Gleichung:

$$\frac{d\rho(r)}{dr} = -\frac{\rho(r)g(r)}{\Phi(r)} = -\frac{\rho(r)GM(r)}{\Phi(r)r^2} \quad [1.7]$$

mit

$$\frac{dM(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r)$$

Diese Gleichung kann für den Fall, daß die Dichte eine stetige Funktion ist, integriert werden. Für die Erde trifft das in etwa für den oberen Mantel unterhalb der Lithosphäre, den unteren Mantel sowie den äußeren und inneren Erdkern zu. Auf der Grundlage dieser Gleichung wurden seit den 50ziger Jahre des vorigen Jahrhunderts aus den immer genauer bestimmten Geschwindigkeiten seismischer Wellen Dichteprofile des Erdinneren berechnet. Seit etwa einem Jahrzehnt liegen auch sehr detaillierte Eigenschwingungsmodelle der Erde vor, aus denen sich unabhängig von (1.7) die Funktion  $\rho(r)$  bestimmen läßt. Außerdem lassen sich gerade aus den meßbaren Eigenschwingungsmoden die Bereiche im Erdinneren nachweisen, in denen Konvektion stattfindet. Bemerkenswert ist, daß beide Verfahren ungefähr die gleichen Dichtefunktionen (letztere mit besserer dreidimensionaler räumlicher Auflösung) liefern.

Aus der Auswertung seismischer Daten hat man bereits zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts auf einen Schalenbau der Erde geschlossen. Diese Schalen unterscheiden sich u.a. dadurch, daß sich an ihrer Grenzfläche die Geschwindigkeit von Erdbebenwellen abrupt ändert. Heute wird in etwa folgendes Modell allgemein akzeptiert, wobei die Bezeichnung der Schalen mittels Großbuchstaben auf den australischen Seismologen KEITH EDWARD BULLEN (1949) zurückgeht. Diese Einteilung wird zwar in der Geophysik nur noch selten verwendet. Sie unterteilt das Erdinnere jedoch schön nach seismischen Gesichtspunkten, so daß sie im Folgenden als Leitlinie dienen soll.

## **A-Schicht, Erdkruste (obere Lithosphäre)**

Die Erdkruste bildet die oberste Schale, die an Land an die Atmosphäre und im Bereich der Ozeane an die Hydrosphäre grenzt. Sie reicht von der Erdoberfläche bis zur sogenannten Mohorovicic-Diskontinuität (sie wurde von dem kroatischen Wissenschaftler ANDRIJA MOHOROVICIC (1857-1936) bei der Auswertung des Balkanbebens vom 8. Oktober 1909 entdeckt), die den Übergang zum oberen Erdmantel anzeigt. An einer Diskontinuität ändern sich die Geschwindigkeiten von Erdbebenwellen abrupt. Die Mohorovicic-Grenzfläche liegt im Mittel in 30 bis 40 km Tiefe. Unter den Tiefseegebieten der Ozeane steigt sie bis auf weniger als 10 km an und unter Faltengebirgstöcken der kontinentalen Kruste kann sie bis auf eine Tiefe von 80 km absinken. Diese Grenzfläche ist quasi ein umgekehrtes Spiegelbild des Erdreliefs und widerspiegelt das Prinzip der Isostasie, nach der die kontinentalen Gesteinsblöcke wie Eisberge auf dem zähen Erdmantel schwimmen.

Der geologische Aufbau der oberen Lithosphäre ist sehr kompliziert und wird durch die Plattentektonik, die im Abschnitt über die Erdoberfläche noch detailliert beschrieben wird, bestimmt. Ganz grob kann man sagen, daß die ozeanische Kruste hauptsächlich aus Basalten mit einer Dichte von etwa  $2850 \text{ kg/m}^3$  besteht, die von einer sehr dünnen Sedimentationsschicht überlagert wird. Die kontinentalen Krustenbereiche (sogenannte Schilde) werden durch granitische Gesteine und verfestigte Sedimente mit einer etwas geringeren Dichte (ungefähr  $2750 \text{ kg/m}^3$ ) dominiert.

Die Lithosphäre der Erde ist in 7 große und 14 kleinere Platten geteilt, an deren Ränder die meisten Erdbebenherde und Vulkangebiete liegen.

## **B-Schicht, Oberer Mantel**

Der obere Mantel beginnt bei der Mohorovicic-Diskontinuität und setzt sich bis in eine Tiefe von 400 bis 410 km fort. In ihrem oberen Teil gibt es einen Bereich mit verminderter Ausbreitungsgeschwindigkeit von Erdbebenwellen. Dieser Bereich wird als Gutenberg-Zone (manchmal auch Asthenosphäre) bezeichnet und zeigt ein Gebiet an, wo sich die Gesteinsschichten in einem hoch plastischen Zustand befinden (Viskosität  $> 10^{21}$  Poise). Hier liegen die Temperaturen nahe am Schmelzpunkt bestimmter Silikate, die unter diesen Umständen entlang der Korngrenzen im Gestein partiell aufschmelzen. Gerade deshalb kommt es in diesem Bereich zu zähen Fließvorgängen in Form von thermalen Konvektionströmungen, die als Motor für die Plattentektonik von Bedeutung sind.

Von der mineralogischen Zusammensetzung her dürfte es sich bei einer Dichte von ungefähr 3300 kg/m<sup>3</sup> bei den Gesteinen, die diese Schicht bilden, um Peridotite und Eklogite handeln. Unter einem Peridotit versteht man Pyroxen mit einem hohen Olivin-Anteil [(Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>]. Eklogite sind dagegen Pyroxene mit einem hohen Granat-Anteil. Ihre elastischen Eigenschaften können die beobachteten seismischen Geschwindigkeiten gut erklären. Werden diese Gesteine aufgeschmolzen, dann entstehen basaltische Magmen wie man sie von den Riftzonen (Mittelozeanische Rücken) her kennt.

In der Asthenosphäre befinden sich in lokal aufgeschmolzenen Magmakammern auch die Vulkanherde. Sie können seismologisch durch eine genaue Analyse der Scherwellenausbreitung nachgewiesen werden. Die B-Schicht wird durch die Byerly-Diskontinuität abgeschlossen.

### **C-Schicht, Übergangszone zwischen oberem und unterem Mantel**

Diese Schicht liegt zwischen 400 und 1000 km Tiefe und der Druck erreicht Werte von 160 bis 450 kbar. Sie ist durch ein starkes Anwachsen der Geschwindigkeit seismischer Wellen gekennzeichnet. In ihr können nur Hochdruckmodifikationen von Silikaten wie z.B. Stishovit existieren. Ihre Entstehung geht mit einer Volumenverkleinerung und damit einer Dichteerhöhung einher. Sie scheint im Unterschied zum unteren Mantel sehr inhomogen zu sein, da sich in ihr chemische Veränderungen abspielen, insbesondere der druckbedingte Zerfall von Silikaten in Oxide. In einer Tiefe von 660 km findet man eine weitere Diskontinuität, die den oberen Erdmantel vom unteren Erdmantel trennt.

Außerdem befinden sich in der C-Schicht die tiefsten bekannten Erdbebenherde. Diese Tiefenbeben entstehen wahrscheinlich durch das Aufbrechen subduzierter Platten, was auch ihre spezifische räumliche Verteilung im Erdinneren erklärt.

Die C-Schicht wird manchmal auch als Mesosphäre bezeichnet, da sie die Übergangszone zwischen dem oberen und unteren Mantel darstellt.

### **D-Schicht, Unterer Mantel**

Der untere Mantel erstreckt sich von 1000 km Tiefe bis zur Gutenberg-Wiechert-Diskontinuität in 2890 km Tiefe, welche die Kern-Mantel-Grenze zwischen 2700 und 2890 km Tiefe anzeigt. Diese Grenzschrift wird auch als D'' bezeichnet. Sie ist, wie neuere Untersuchungen zeigen, nach unten nicht scharf begrenzt, d.h. Stücke fester Materie reichen in den geschmolzenen Teil des äußeren Erdkerns hinein. In diesem Bereich, die auch als „core-rigidity-Zone“ bezeichnet wird, vermutet man die Wurzeln sogenannter Mantelplume (Diapire), über die sich auf der Erdoberfläche Schildvulkane wie z.B. auf Hawaii türmen. Die Entstehung dieser Übergangsschicht ist noch nicht völlig verstanden. Sie hängt wahrscheinlich mit dem allmählichen Wachsen des festen inneren Erdkerns zusammen. Im oberen Bereich der flüssigen Fe-Ni-Schmelze kondensieren leichtere Minerale aus, die nach oben steigen und sich unter der festen Mantelgrenze ansammeln. Der Druck überschreitet im unteren Mantel die 1 Mbar-Grenze und die Temperaturen liegen zwischen 1800 K und 2800 K.

## **E- und F-Schicht, Äußerer Erdkern**

Der Übergang vom unteren Mantel zum äußeren Erdkern ist durch eine abrupte Verringerung der Geschwindigkeit der P-Wellen gekennzeichnet. S-Wellen können diesen Bereich nicht durchdringen, was darauf hindeutet, daß sich die Materie der E- und F-Schicht im flüssigen Aggregatzustand befindet. Die Dichte der Eisen-Nickel-Schmelze liegt im Bereich zwischen  $9900 \text{ kg/m}^3$  und  $12200 \text{ kg/m}^3$  und die Temperatur ungefähr bei  $3200 \text{ K}$ . Da die mittlere Dichte nicht ganz dem einer reinen Fe-Ni-Schmelze entspricht, vermutet man die Präsenz weiterer Elemente (Anteil ca. 10%), insbesondere von Schwefel und Sauerstoff. Diese Elemente sind zudem relativ häufig und lösen sich in einer Metallschmelze sehr gut auf.

Durch die Konvektionsströmungen innerhalb dieser Schicht und durch die sehr gute elektrische Leitfähigkeit der Eisen-Nickel-Legierung wird der Geodynamo angetrieben, der für das ausgedehnte Erdmagnetfeld verantwortlich ist. Sie ist auch für die feinen Schwankungen in der Geschwindigkeit der Erdrotation verantwortlich.

Der äußere Erdkern geht in einer Tiefe von  $5154 \text{ km}$  in den festen inneren Erdkern über.

## **G-Schicht, Innerer Erdkern**

Der innere Erdkern ist fest und mit einem Radius von  $1224 \text{ km}$  etwas kleiner als der Erdmond (Radius= $1738 \text{ km}$ ). Er wurde 1936 entdeckt. Die Dichte liegt in der Größenordnung von  $13000 \text{ kg/m}^3$  und die Temperatur dürfte  $4700 \text{ K}$  übersteigen. Unter diesen Bedingungen liegt die Materie in einem dichten, kristallinen Zustand vor. Man vermutet sogar, daß das Eisen einen einzigen gigantischen Kristall bilden kann, wie STIXRUDE und COHEN 1995 in einem aufwendigen Computerexperiment zeigen konnte. Daß der Erdkern noch einige Überraschungen bereithält, zeigen zwei weitere Entdeckungen neueren Datums:

- der untere Bereich des inneren Erdkerns verhält sich in bezug auf die Ausbreitung von Erdbebenwellen anisotrop, d.h. die Geschwindigkeit der Erdbebenwellen hängt von der Richtung ab, mit der sie den Erdkern durchlaufen.
- Der innere Erdkern rotiert ein klein wenig schneller als die Erde („Superrotation“), wobei der Überschuß dazu führt, daß der Erdkern innerhalb von 900 Jahren eine zusätzliche Umdrehung macht. Das ist für geologische Verhältnisse unwahrscheinlich schnell.

Der Grund, daß der Kernbereich trotz der hohen Temperaturen nicht aufgeschmolzen ist, liegt in dem enormen Druck von  $3.5 \text{ Mbar}$ .

Schicht	Bezeichnung	Tiefe [km]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$c_p$ [km/s]	$c_s$ [km/s]
A	Lithosphäre	0-35	2.84-3.32	bis 7.8	bis 4.4
B	Oberer Mantel	35-410	3.64	7.8-9.0	4.4-5.0
C	Übergangszone	410-660	4.68	9.0-11.4	5.0-6.4
D	Unterer Mantel	660-2750	5.22	11.4-13.6	6.4-7.3
D''	Kern-Mantel-Grenze	2750-2889	5.69	13.6	7.3
E,F	Äußerer Erdkern	2889-5154	12.5	8.1-10.4	-
G	Innerer Erdkern	5154-6371	17.3	11.2-11.3	-

Das eben in seinen Grundzügen beschriebene Modell des inneren Aufbaus der Erde wird von den Geophysikern allgemein akzeptiert. Gegenstand der Forschung sind heute Feinstrukturen in den einzelnen Schalen, ihr chemischer bzw. mineralogischer Aufbau und die Natur der mehr oder weniger auffälligen Diskontinuitäten. Besonders Letzteren wird besondere Aufmerksamkeit zu teil, da sie erlauben, die bei Hochdruckexperimenten gewonnen Erkenntnisse über die druckbedingten Veränderungen silikatischer Mineralien (genauer Phasenübergänge) im Erdinnern zu überprüfen.

Schicht	T [K]	Chemische Zusammensetzung
A	bis 1000 ... 1100 (kont.) bis 500 ... 600 (ozean.)	Bildung einer Vielzahl von Mineralien und Gesteinssorten (z. B. durch Kristallisation)
B, C, D		Olivin, Pyroxene, Granat (Olivin ist ein Eisen-Magnesium-Silicat, welches sich nur bei Drücken über 200.000 bar bildet)
D''	3100 ... 4800	Die Stoffe des Mantels reagieren chemisch mit der flüssigen Eisenlegierung des Kerns.
E,F		geschmolzene Eisenlegierung
G	3800 ... 5800	feste Eisenlegierung (vermutlich auch Nickel, Schwefel und Sauerstoff)

## Oberfläche

Bis vor weniger als einem halben Jahrhundert war ein großer Teil der Oberfläche der Erde noch völlig unbekannt und zwar der Teil, der von den Ozeanen bedeckt wird. Seitdem man mit flächendeckenden Echolotabtastungen das Relief der Ozeanböden kartiert hat, ergeben sich z.T. völlig neue und überraschende Einblicke in die Dynamik der Erdkruste, die in der allgemeinen Anerkennung der Theorie der Plattentektonik gipfelten. Die Idee, daß die uns allbekannten Kontinente wie Afrika, Amerika oder Eurasien keine starren Gebilde sind, sondern sich im Laufe von Jahrmillionen relativ zueinander bewegen, geht auf den deutschen Meteorologen und Grönlandforscher ALFRED WEGENER (1880-1930) zurück. Er griff eine Idee von ANTONIO SNIDER-PELLIGRINI auf, der bereits 1858 die Vermutung äußerte, daß in fernster Vergangenheit die Kontinente eine Einheit gebildet haben, die dann zerbrochen ist und deren Teile während der Sintflut durch aufsteigendes Magma in ihre heutige Lage gedrückt wurden. Zur damaligen Zeit waren solche Katastrophentheorien sehr beliebt, wurden aber von den meisten Geologen bereits wieder verworfen. WEGENER wies 1912 genauso wie SNIDER ein halbes Jahrhundert zuvor darauf hin, daß man die Kontinente Südamerika und Afrika so anordnen kann, als ob sie einmal zusammengehörten und einen eigenen Kontinent – Gondwana genannt – gebildet haben. Diese Idee führte zur Theorie der Kontinentaldrift. Bis in die sechziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts war diese Theorie unter den Geologen noch sehr umstritten, weil man sich einfach keinen Mechanismus vorstellen konnte, der die Kräfte lieferte, um so riesige Kontinentalblöcke wie Afrika oder Australien gegeneinander zu verschieben. Erst mit der Entdeckung der mittelozeanischen Rücken – riesigen langgestreckten Gebirgszügen unter der Wasseroberfläche, welche die Ozeane quasi teilen - und der oft an den Plattenrändern (die nicht mit den Kontinentalrändern zusammenfallen müssen) angeordneten Subduktionszonen mit den damit verbundenen Grabenstrukturen, führte über die Theorie des „*sea floor spreading*“ zu der modernen Plattentektonik, die im Folgenden in ihren Grundzügen erläutert werden soll. Doch zuvor eine kleine Bestandsaufnahme.

Es gibt auf der Erde 6 große Kontinentalblöcke und 4 Ozeane. Sie verteilen sich auf der ca. 510 Millionen Quadratkilometer großen Erdoberfläche auf zwei Hemisphären, wobei bei der einen kontinentale Landmassen (Landhemisphäre) und bei der anderen Ozeane (Wasserhemisphäre) den größten Teil der Fläche einnehmen. Es handelt sich bei dieser Aufteilung um den gegenwärtigen Zustand, da sich aufgrund der Plattenbewegungen die Anordnung von Land und Wasser ständig ändert. Die Tabelle gibt die genauen Anteile der einzelnen Kontinente und Ozeane an der Gesamtfläche der Erde an.

Kontinent	Größe in [km <sup>2</sup> ]	Anteil in %
Eurasien	54.457.000	37
Afrika	30.302.000	20
Nordamerika	24.241.000	16
Südamerika	17.793.000	12
Antarktis	14.100.000	9
Australien inkl. Ozeanien	8.557.000	6

Ozean	Größe in [km <sup>2</sup> ]	Anteil in %
Pazifischer	179.679.000	50
Atlantischer	92.373.000	26
Indischer	73.917.000	21
Arktischer	14.090.000	4
Erde gesamt	509.450.000	100
Landmasse	149.450.000	29
Wasserfläche	360.000.000	71

Europa und Asien werden im Folgenden – wie auch in der Realität – als ein geschlossener Landblock angesehen, der Eurasia genannt wird.

Kontinentalblöcke sind die ältesten und stabilsten Teile der Erdkruste. Es handelt sich dabei im Allgemeinen um recht flache Gebiete, die lediglich an ihren Randbereichen tektonische Auffälligkeiten wie erhöhte Erdbebenaktivität, Vulkanismus und Gebirgsbildung zeigen. Die eigentlichen Festlandkerne sind bis auf das Auftreten von sogenannten epirogenetischen Bewegungen, die zu Aufwölbungen oder sanften Senkungen führen, weitgehend unveränderlich. Bei den Kontinenten unterscheidet man zwei Erscheinungsformen, die als Kontinentalschilde und als Kontinentaltafeln bezeichnet werden. Erstere bestehen aus sehr alten kristallinen Gesteinen, die oftmals umgeschmolzen worden sind und die Erdoberfläche erreichen. Die Kontinentaltafeln bestehen dagegen aus überwiegend sedimentativen (klastischen) Gesteinen, die z.T. im Paläozoikum (vor 544 bis 245 Millionen Jahre) bis hin zum Känozoikum (also bis heute) abgelagert wurden und an manchen Stellen ein bis zwei Tausend Meter Mächtigkeit erreichen. Sie decken die darunter liegenden Schilde weitgehend ab.

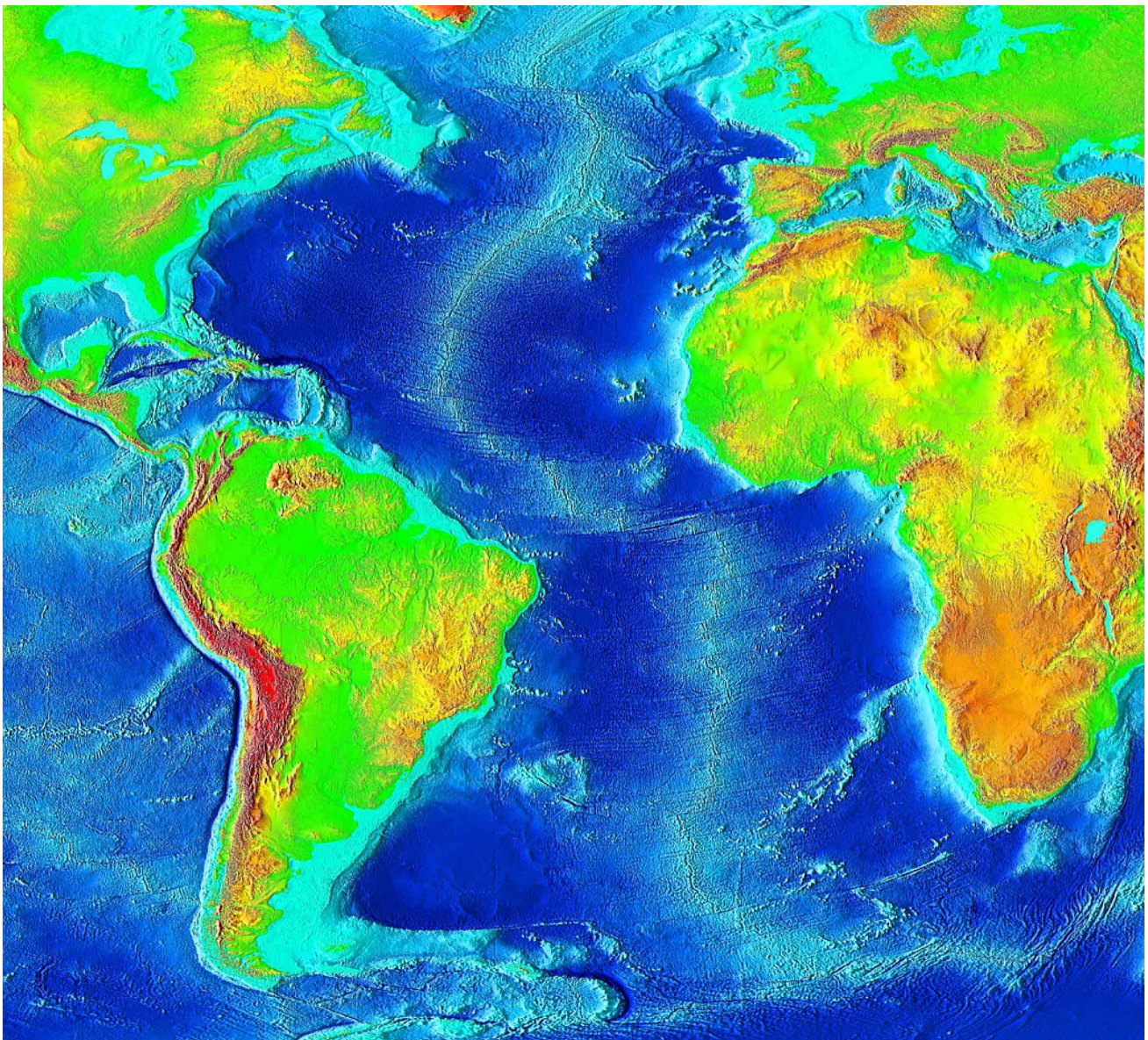
Beispiele für sehr gut erforschte Kontinentalschilde sind der Laurentinische Schild (manchmal auch Kanadischer Schild genannt) und der Baltische Schild.

An den Rändern von Kontinentaltafeln findet man Bereiche, wo Sedimente gefaltet und zu Hochgebirgen aufgetürmt sind. Derartige Faltengebirge sind z.B. die Kordillere Südamerikas, die europäischen Alpen und der Himalaja im Norden des indischen Subkontinents. Faltengebirge sind übrigens ein typisches Merkmal der Erde und ansonsten im Sonnensystem unbekannt.

Da die Kontinente aus „leichten“ Gesteinen bestehen (Granite), schwimmen sie ähnlich wie Eisberge auf dem Wasser auf dem zähflüssigen Erdmantel, wobei ihre „Wurzeln“ bis in 80 km Tiefe reichen können. Diese Erscheinung wird in der Geologie als Isostasie bezeichnet.

Das Relief der Ozeanböden unterscheidet sich dagegen nicht nur morphologisch vom Relief der kontinentalen Kruste. Auffällig ist, daß die Böden der Ozeanbecken eine vergleichsweise geringe Sedimentdecke aufweisen. Das zeigt, daß der ozeanische Boden geologisch gesehen sehr jung sein

muß. Die interessantesten morphologischen Strukturen der Ozeanböden sind die mittelozeanischen Rücken und die sogenannten Tiefseegräben. Unter den mittelozeanischen Rücken versteht man ein rund 70000 km langes und 1250 bis 4000 km breites Gebirgssystem, daß sich rund 2000 bis 4000 m über dem Meeresboden erhebt. Nur an wenigen Stellen ragen Teile davon über den Meeresspiegel (z.B. Island, Kanarische Inseln). Im Durchschnitt liegen ihre höchsten Gipfel in rund 1000 m Wassertiefe. Bemerkenswert ist jedoch ihre Symmetrie. In der Mitte befindet sich ein auffälliger, den gesamten Rücken in Längsrichtung durchziehender Zentralgraben, der von einer Reihe von parallelen Furchen begleitet wird. Dieses Gebiet (auch Riftzone genannt) zeichnet sich durch einen hohen Wärmefluß, durch häufige tektonische Ereignisse geringer Herdtiefe und durch einen ausgedehnten untermeerischen Vulkanismus aus. In unregelmäßigen Abständen findet man senkrecht zur Riftzone Versetzungen, die als Transformstörungen bezeichnet werden. Diese Versetzungen können an manchen Stellen einige Hundert Kilometer betragen.



Topografische Struktur des Atlantiks mit mittelozeanischen Rücken und Transformstörungen

Tiefseegräben sind langgestreckte und seismisch aktive, an einer Seite mehr und an der anderen Seite weniger steil abfallende langgestreckte Rinnen, die oftmals in der Nähe von Kontinentalrändern auftreten oder mit Inselbögen assoziiert sind. Beispiele dafür sind der Peru-Chile-Graben unmittelbar vor der südamerikanischen Westküste (größte Tiefe 6262 m) und der Kurilengraben (größte Tiefe 10542 m) östlich von Kamtschatka und der Inselgruppe der Kurilen. Die tiefste Stelle des Planeten befindet sich übrigens im Marianengraben in 11022 m Tiefe (Witjas-Tiefe).

Betrachtet man das System der Tiefseegräben und der Riftgebiete, dann erkennt man, daß die Erdkruste offensichtlich in mehrere individuelle Platten zerfällt, deren Ränder durch erhöhte Erdbebenaktivität, Vulkanismus und den eben genannten morphologischen Merkmalen ausgezeichnet sind.

Alle heute bekannten Platten sind:

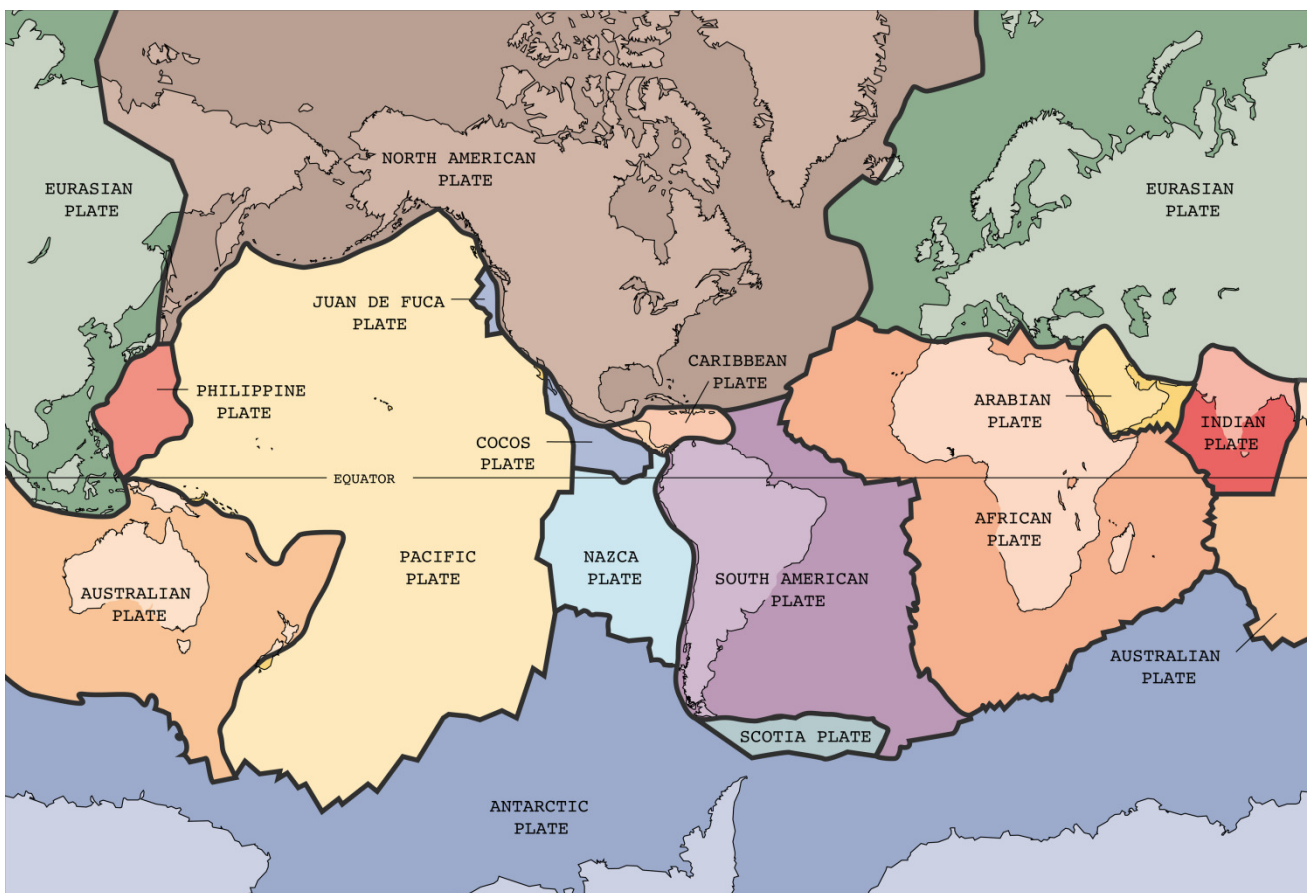
Nordamerikanische Platte	Schwarzmeerplatte
Pazifische Platte	Ägäische Platte
Indisch-Australische Platte	Anatolische Platte
Eurasische Platte	Arabische Platte
Südamerikanische Platte	Somalische Platte
Afrikanische Platte	Iranische Platte
Antarktische Platte	Ochotskische Platte
Karibische Platte	Indochinesische Platte
Nazcaplatte	Philippinen-Platte
Cocosplatte	Amur-Platte

Es gibt drei Arten von Plattengrenzen, die sich in ihrer Bedeutung für die tektonischen Prozesse unterscheiden, die letztendlich zur Kontinentalverschiebung führen. In den Riftzonen der Mittelozeanischen Rücken steigt basaltisches Magma auf und kühlt sich dort sehr schnell ab, wodurch neuer Meeresboden entsteht: Die Plattenränder rechts und links davon werden auseinander getrieben. Man bezeichnet sie deshalb auch als „konstruktiv“.

An den „destruktiven“ Plattenrändern, die oft mit Tiefseegräben zusammenfallen, wird im Unterschied dazu die Erdkruste nach „unten“ – d.h. in den Erdmantel – gedrückt und dort wieder aufgeschmolzen. In diesen Subduktionszonen wird also der Zuwachs an Erdkruste, wie er in den Riftzonen entsteht, wieder ausgeglichen.

Den dritten Typ bilden die bereits genannten Transformstörungen. Sie zeigen Gebiete an, wo sich Platten seitwärts gegeneinander verschieben, ohne daß eine Stauchung oder Streckung des Ozeanbodens auftritt. Sie werden deshalb auch als konservative Plattenränder bezeichnet. Bei ihnen wird weder neue Lithosphäre gebildet noch abgeführt, sondern sie gleiten lediglich aneinander vorbei. Derartige Transformstörungen ergeben sich zwingend, da die Erdoberfläche sphärisch ist und die Platten weitgehend starr sind.

Dadurch, daß ozeanische Kruste dauernd neu erzeugt und wieder vernichtet wird, können sich in den ozeanischen Becken nur geringe Sedimentschichten ausbilden (es gibt keine ozeanische Kruste die älter als 300 Millionen Jahre ist) . Die massiven Festlandblöcke selbst sind nicht von der Subduktion betroffen. Vielmehr bilden sich dort, wo Kontinentalblöcke auf ozeanische Platten stoßen, Gebirgsbildungszonen aus, an deren Flanken ozeanische Kruste abtaucht. Ein typisches Beispiel dafür sind die Anden Südamerikas, wo man innerhalb weniger hundert Kilometer den Übergang von einem Tiefseegraben (-6000 m) zum Hochgebirge (+6000 m) beobachten kann. Das leichte granitische Material der südamerikanischen Kontinentaltafel sorgt dafür, daß beim Zusammenstoß mit der Nazca-Platte die mächtige Kontinentalplatte über die ozeanische geschoben wird und diese zum Abtauchen zwingt.

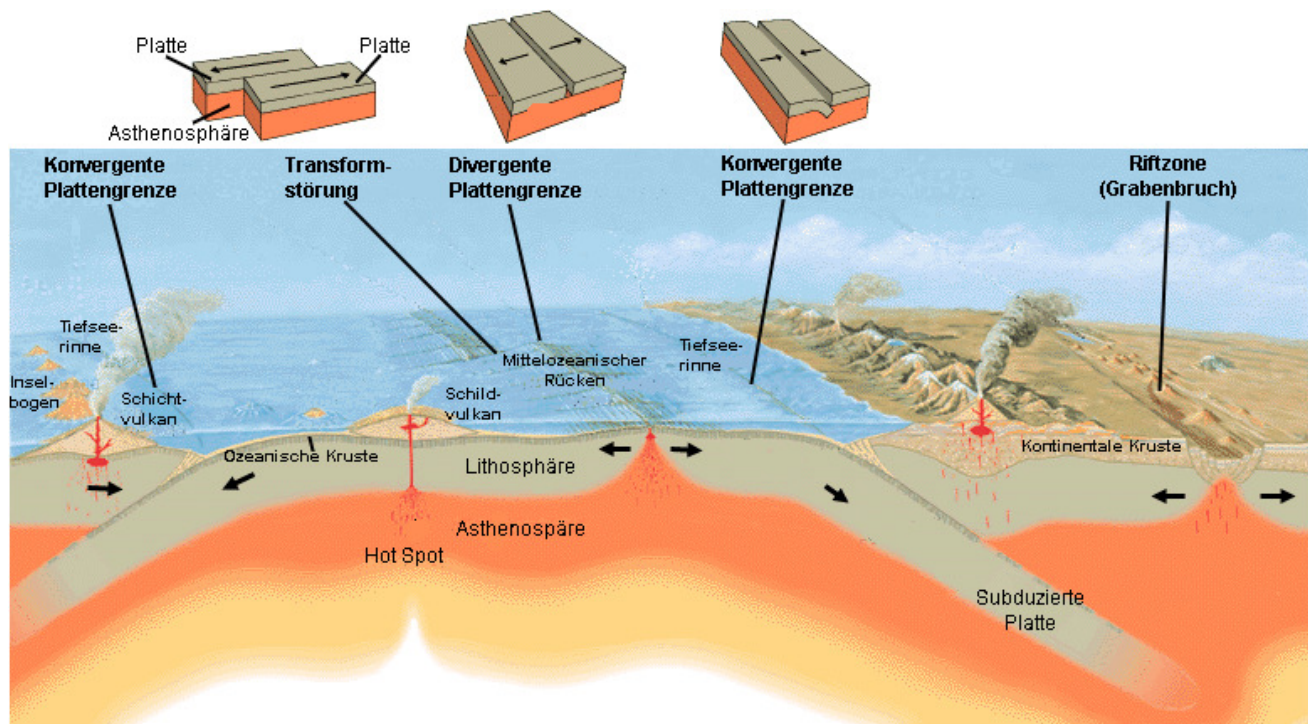


### Tektonische Platten

Der Himalaja wurde dagegen aufgefaltet (und dieser Auffaltungsprozeß setzt sich gegenwärtig noch fort), als der indische Subkontinent, der sich auf der indio-australischen Platte befindet, gegen die eurasische Platte gedrückt wurde.

Die Ursache für die Bewegung der tektonischen Platten sind die Konvektionsströmungen im Innern des Erdmantels. Ob sie allein für die Bewegung der Platten verantwortlich sind, ist dagegen noch nicht in allen Einzelheiten geklärt. Wahrscheinlich spielt die Schwerkraft eine nicht zu unterschätzende Rolle. Da die mittelozeanischen Rücken hoch aufragen, bewirkt die Schwerkraft eine Tendenz der Abflachung, wodurch in horizontaler Richtung eine „Ridge-Push“-Kraft entsteht, welche die Platten von der Riftzone wegdrückt. Im Bereich der Subduktionszonen taucht der nun verdichtete und erkaltete

Meeresboden in die Asthenosphäre ab (er ist schwerer als das Mantelmaterial, weswegen er gewissermaßen „absackt“), bis er in deren unteren Bereich (in ca. 500-700 km Tiefe) aufgeschmolzen wird. Dadurch entsteht eine Zugkraft („*Slab-pull*“), welche an der noch an der Oberfläche befindlichen Platte zieht. Auf diese Weise wird auf dem Planeten ein Mechanismus am Leben erhalten, der in der Lage ist, ganze Kontinente zu verschieben. Man kann also davon ausgehen, daß es in der langen geologischen Geschichte der Erde schon viele Ozeane gegeben hat, die entstanden und wieder vergangen sind. Das Mittelmeer, welches Europa von Afrika trennt, ist zum Beispiel der kümmerliche Rest des Urozeans Tethys, der einmal (in der Jura- und Kreidezeit) fast den ganzen Planeten umspannte.



### Plattengrenzen

Relativ gut erforscht ist z.B. die Öffnung des Atlantiks, welche vor über 300 Millionen Jahren ihren Anfang nahm, als alle Kontinentalblöcke wieder zusammenlagen und den Urkontinent Pangäa bildeten. Damals entstand zwischen dem heutigen Skandinavien und Grönland eine mit Dehnungsrissen verbundene Aufwölbung, die sich schnell zu einem Grabenbruch entwickelte. Vor ca. 220 Millionen Jahren hatte sich dieser Bruch schon soweit geöffnet, daß er von einem flachen Meer überflutet wurde. WILSON nannte diese Phase das „Rote Meer-Stadium“ nach dem gleichnamigen Meer zwischen der arabischen Halbinsel und Nordost-Afrika, wo der gleiche Vorgang gegenwärtig stattfindet.

Vor rund 160 Millionen Jahren wurde das ausgedehnte Riftsystem zwischen Grönland und Skandinavien temporär inaktiv. Dafür entstand ein neues aktives Rift zwischen dem Mittelmeer und dem zukünftigen Golf von Mexiko sowie ein Rift zwischen Afrika und dem damals noch zusammenhängenden Landblock Antarktika, Indien und Australien. Das führte dazu, daß sich der Atlantik langsam zu öffnen begann während der Tethys-Ozean immer mehr schrumpfte. Als Reaktion darauf entwickelten sich im Bereich der Westküste Amerikas Subduktionszonen und es kam zu ersten

Faltengebirgsbildungen (z.B. Sierra Nevada), welche die weltweite alpidische Orogenese einleiteten. In der frühen Kreidezeit (vor 125 Millionen Jahre) trennte sich Afrika endgültig von Südamerika und auch das Riftsystem zwischen Grönland und Skandinavien wurde wieder aktiv. Im Bereich des kleiner werdenden Tethys-Ozeans brach von Gondwana die indische Platte ab und begann mit einer Geschwindigkeit von ca. 16 cm/Jahr in nördlicher Richtung zu verdriften. Als sie im unteren Eozän (vor 50 Millionen Jahre) schließlich gegen den eurasischen Kontinent prallte, wurde als Reaktion darauf das mächtige Himalaya-Gebirge aufgefaltet.

Bereits vor etwa 80 Millionen Jahren stieß der Atlantik bei seiner Nordausbreitung zunächst in den Bereich zwischen Grönland und dem Nordosten Kanadas vor, wobei die Labradorsee entstand. Ungefähr Zeitgleich begannen sich die südlichen Kordilleren (Anden) aufzufalten und Australien trennte sich vom antarktischen Kontinent. Später bildeten sich weitere Bruchsysteme. So z.B. eine 3000 Kilometer lange Spaltenzone, die sich von Südengland bis nach Nordnorwegen erstreckte. Unsere europäischen Alpen entstanden erst vor etwa 30-35 Millionen Jahren, als die afrikanische Platte nach Norden driftete und mit der eurasischen Platte kollidierte. Da der Druck noch heute anhält, ist die Auffaltung der Alpen noch nicht abgeschlossen. In der Zukunft wird sich das Mittelmeer bei Gibraltar schließen und sich dafür im östlichen Teil über die Aufweitung des Golfs von Suez und dem Roten Meer zum indischen Ozean öffnen. Die Ursache ist eine Drehung des afrikanischen Kontinents im Uhrzeigersinn, welche mit einem ausgedehnten Grabenbruchsystem in Ostafrika im Zusammenhang steht.

Die Dynamik der Erdkruste läßt zwar die großen Kontinentalblöcke weitgehend unverändert. Ihre Lage auf dem Planeten und die Größe und Verteilung der Ozeane sind dagegen zeitlich variabel. Heute mißt man an manchen Plattenrändern in extremen Fällen Driftgeschwindigkeiten bis zu 10 cm pro Jahr. Normal sind zwei bis 5 Zentimeter im Jahrhundert.

Die Entstehung von Ozeanen infolge der Plattentektonik zeigt Regelmäßigkeiten, die im Modell des Wilson-Zyklus zusammengefaßt werden. Entwickelt wurde dieses Modell 1970 von dem kanadischen Geologen JOHN TUZO WILSON (1908-1993).

### **Der Wilson-Zyklus**

Wie JOHN TUZO WILSON 1970 zeigen konnte, führt die Großplattentektonik der Erdkruste zu einem zyklischen Geschehen, das man kurz als Öffnen und Schließen eines Ozeans bezeichnen kann. Das Wirken dieses Zyklus (eine typische Zeitskala liegt bei 200 bis 300 Millionen Jahre) ist an vielen Stellen auf der Erde geologisch nachweisbar, so daß seine Existenz gesichert ist.

Ein kompletter Wilson-Zyklus besteht im Wesentlichen aus 7 Phasen oder Stadien:

#### **a) Ruhe- oder Hot Spot -Phase**

Unter der Lithosphäre bildet sich ein „Hot Spot“, verursacht durch einem den Erdmantel durchdringenden und aufsteigenden Mantelplume. Es entsteht aktiver Vulkanismus in Form eines kontinentalen Innenplatten-Vulkanismus (wie z.B. in der Eifel) oder - wenn sich der „Hot Spot“ unter ozeanischer Kruste bildet - in Form eines ozeanischen Intraplatten-Vulkanismus, wie er sich besonders eindrucksvoll am Hawaii-Archipel studieren läßt.

Im Folgenden wird angenommen, daß sich der aufsteigende Mantelplume (Diapir) unter kontinentaler Kruste befindet.

## b) Entstehung eines Grabenbruchs (Gaben- oder Drift-Stadium)

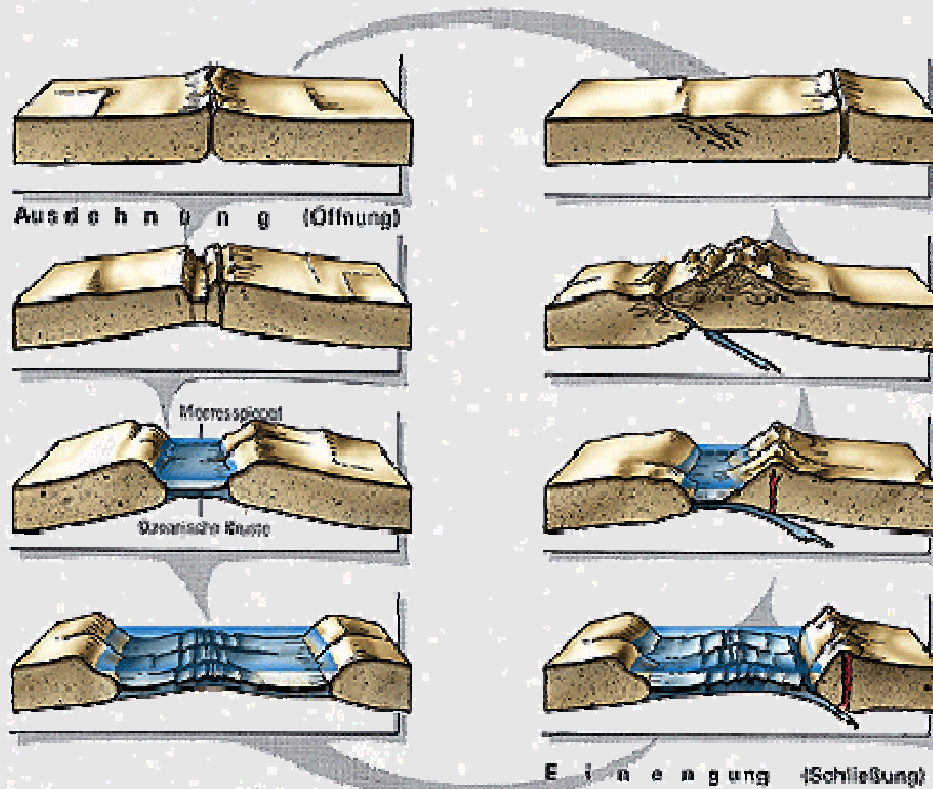
Im Scheitelbereich der in Phase a) entstandenen Aufwölbung bildet sich eine Grabenstruktur aus, den man als kontinentalen Rift bezeichnet. Dieser ist oft mit Vulkanen besetzt und mehr (Ostafrikanisches Grabensystem) oder weniger stark (Oberrheingraben in Deutschland) tektonisch aktiv.

## c) Rotes-Meer-Stadium

Der kontinentale Graben bricht ein bzw. senkt sich ab, wobei sich durch einströmende Lava zwischen den beiden Grabenkanten eine basaltische, also ozeanische Kruste bildet. Der dabei entstehende Raum wird vom Meer überflutet. Der Keim eines neuen Ozeans ist entstanden.

## d) Atlantik-Stadium

Aus dem mittleren Bereich des Grabens tritt weiterhin Lava aus, d.h. es wird kontinuierlich Ozeanboden gebildet. An den Austrittsstellen entsteht ein mittelozeanisches Riftsystem, deren höchste Teile sogar aus dem Meer herausragen können (z.B. Island). Die Fläche des Ozeans vergrößert sich immer mehr.



## e) Pazifik-Stadium

Die Ausdehnung kommt zum Stillstand. Da aber weiterhin neuer Ozeanboden gebildet wird, muß der ältere Teil beim Auftreffen auf leichtere kontinentale Kruste in Richtung Erdmantel abtauchen, wo er schließlich wieder aufgeschmolzen wird. Am Plattenrand entstehen Subduktionszonen (gekennzeichnet durch Tiefseegräben, Faltegebirgszüge und Inselbögen). Die Tendenz zur Ausweitung des Ozeans kehrt sich in Richtung Verkleinerung um.

## f) Mittelmeer-Stadium

Die Fläche des Ozeans nimmt immer mehr ab. An den Seitenrändern der zusammenrückenden Kontinentalplatten setzt verstärkt Gebirgsbildung ein. Am Ende dieser Phase berühren sich die beiden Kontinentalplatten.

### **g) Himalaja-Stadium**

Es kommt zur Kollision der sich auf sich zu bewegenden Kontinentalplatten, was zur Auffaltung der dazwischen eingeklemmten und zusammengepreßten Meeressedimente führt. Auf diese Weise entstehen schnell wachsende Faltengebirgsgürtel. Anschließend kann es zusätzlich zu Lavaflüssen und damit verbunden zu regionaler vulkanischer Aktivität kommen.

### **h) Ruhephase**

Die beiden Kontinentaltafeln sind wieder vereint und die Gebirge werden im Laufe der Zeit durch Erosion abgetragen. Es entsteht ein einheitlicher Kontinentalblock, der irgendwann – siehe Punkt a) – wieder brechen kann und der Zyklus beginnt von neuem.

Der Wilson-Zyklus ist sowohl ein stark vereinfachtes als auch ein stark idealisiertes Modell der globalen Auswirkungen der Plattentektonik. Die wahren Verhältnisse auf der Erde sind weitaus komplexer. Es ist mühevoll, aus dem immer noch nicht gut genug erforschten gegenwärtigen Verhältnissen auf die zeitliche Dynamik zu schließen um daraus z.B. auf die Lage der Kontinente und Ozeane in ferner Vergangenheit zu schließen. In unserem Sonnensystem ist jedenfalls die Erde in dieser Hinsicht einmalig. Es scheint sogar so zu sein, daß die Plattentektonik ein äußerst wichtiger Faktor für die Entwicklung des Lebens darstellt und zwar nicht nur in Hinblick auf die Herausbildung der Biodiversität (viele unterschiedliche und geographisch getrennte Lebensräume fördern die Artenbildung), sondern auch in bezug auf die langfristige Stabilisierung des Klimas. Wie bereits am Beispiel der Venus erläutert wurde, ist der Karbonatzyklus, der auf der Erde eng an die Plattentektonik gekoppelt ist, ein sehr wichtiger Faktor bei der Aufrechterhaltung eines lebensfreundlichen Klimas auf der Erde. Das es bis heute nicht zu einer Treibhausinstabilität wie bei der Venus gekommen ist, ist im Wesentlichen dem Umstand zu verdanken, daß kontinuierlich karbonathaltige Sedimente im Bereich der Subduktionszonen in den Erdmantel entsorgt werden. Dort wird in einigen 100 Kilometern Tiefe aufgrund der einsetzenden Aufschmelzungsprozessen das in diesen Gesteinen gebundene  $CO_2$  wieder freigesetzt, um anschließend bei vulkanischen Aktivitäten - quasi kontrolliert - an die Atmosphäre zurückgegeben zu werden. Resultat ist ein genau austariertes Rückkopplungssystem, welches in der Wechselwirkung zwischen biotischen und chemischen Vorgängen, der Verwitterung, der Subduktion und dem Vulkanismus den Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre langfristig in einem engen Bereich stabil hält. Der dadurch verursachte Treibhauseffekt bewirkte, daß die mittleren Temperaturen über Jahrmilliarden hinweg in einem für Tier und Pflanzen angenehmen Bereich lagen. Über den Teil des Karbonatzyklus, der mit den Weltmeeren zusammenhängt, wird am Ende des folgenden Kapitels berichtet.

Die Energie, aus der sich die dynamischen Prozesse der Plattentektonik speisen, entstammt dem kontinuierlichen Wärmefluß aus dem Erdinneren. Im Erdmantel stellt dabei der radioaktive Zerfall relativ häufig vorkommender langlebiger Isotope wie  $^{238}U$  ( $\tau = 4.51 \cdot 10^9$  a),  $^{232}Th$  ( $\tau = 1.41 \cdot 10^{10}$  a) und  $^{40}K$  ( $\tau = 1.28 \cdot 10^9$  a) (in Klammern stehen jeweils die Halbwertszeiten) die wichtigste Wärmequelle dar. Im Kern dagegen wird Energie z.B. bei der fortschreitenden Verfestigung des äußeren flüssigen Erdkerns freigesetzt. Zusammen mit dem primordialen Wärmeinhalt und weiteren Beiträgen, die z.B. durch die Gezeitenwechselwirkung zwischen Erde und Mond bzw. Erde und Sonne aufgebracht wird, entsteht im Erdinnern ein weitgehend statischer Temperaturverlauf, der sich durch

den radialen Temperaturgradienten  $dT/dr$  beschreiben läßt. In diesem Gleichgewichtsfall muß die im Erdinneren immer wieder neu erzeugte Wärmeenergie kontinuierlich über die Planetenoberfläche abgegeben werden (wobei der Wärmetransport sowohl durch Konvektion als auch durch Wärmeleitung realisiert wird), damit im Inneren kein Wärmestau entsteht (Mantelkühlung). Im Fall der Erde beträgt der Wärmefluß an der Oberfläche ungefähr  $82 \text{ mW/m}^2$ , wobei eine Hälfte für die Aufrechterhaltung plattentektonischer Prozesse benötigt und die andere Hälfte letztendlich in den Kosmos abgestrahlt wird. Beide Prozesse regulieren die Temperatur des Mantels und entsprechen somit einer effektiven Mantelkühlung.

### Hydrosphäre

Zwei-Drittel der Erdoberfläche (genau 71% oder 362 Millionen  $\text{km}^2$ ) sind von Wasser – und zwar in seiner flüssigen Form – bedeckt. Das ist vom planetologischen Standpunkt nicht selbstverständlich, da flüssiges Wasser nur in einem eng begrenzten Temperatur- und Druckbereich existiert. Der Bereich um einen Stern, in denen ein Planet von der Größe und Masse der Erde über geologische Zeiträume hinweg eine stabile Hydrosphäre halten kann, ist sehr, wenn nicht sogar extrem schmal. Detaillierte Berechnungen von MICHAEL HART von der NASA sind in dieser Beziehung ernüchternd. Wäre die Erde nur 0.05 AE näher an der Sonne entstanden, dann wären ihre Ozeane durch die Erwärmung der Atmosphäre längst verdunstet. Venus hat dieses Schicksal erfahren. Die Ursache dafür ist die bereits besprochene Treibhausinstabilität („*Runaway Greenhouse Effect*“). Umgekehrt hätte den Planeten das Schicksal der sogenannten Totalvereisung („*Runaway Glaciation*“) ereilt, falls er nur um 1% weiter entfernt von der Sonne entstanden wäre. Da wir wissen, wie wichtig flüssiges Wasser für hochentwickeltes Leben ist, drückt allein diese eine Bedingung die Wahrscheinlichkeit für die Existenz einer zweiten (bewohnten) Erde in unseren Milchstraßensystem auf einen sehr kleinen Wert.

Alle Weltmeere zusammen enthalten ungefähr 1345.1 Millionen  $\text{km}^3$  Wasser, die sich auf die einzelnen Ozeane folgendermaßen verteilen:

	Fläche in $10^6 \text{ km}^2$	Mittlere Tiefe in m	Volumen in $10^6 \text{ km}^3$
Pazifischer Ozean	178.6	3923	700.6
Atlantischer Ozean	91.2	3761	343.3
Indischer Ozean	76.8	3696	293.8
Arktischer Ozean	15.2	1149	17.4

Dazu kommt noch das im gefrorenen Zustand im Inlandeis der beiden Pole und im Gletschereis der Hochgebirge vorhandene Wasser. Ihre Menge wird auf 28.5 Millionen  $\text{km}^3$  geschätzt. Dagegen sind die irdischen Süßwasservorkommen verschwindend gering (ca. 0.124 Millionen  $\text{km}^3$ ).

Ein weiteres riesiges Wasserreservoir stellen die Gesteine des unteren Erdmantels dar. Sie können nach neuesten experimentellen Untersuchungen bis zu 0.2 % ihres eigenen Gewichts an Wasser enthalten. Wenn das stimmt, dann kann die im Erdmantel eingeschlossene Wassermasse ein Vielfaches der

Wassermasse aller Ozeane betragen. Wasser im Erdmantel ist übrigens notwendig, um dem Mantelmaterial die Viskosität zu verleihen, damit es konvektiv strömen kann. Es gelangt z.B. mit abtauchenden Platten an den Subduktionszonen in den Erdmantel und wird durch Vulkanismus wieder in Form von Wasserdampf an die Atmosphäre abgegeben.

Die Einteilung der irdischen Wasserfläche in Ozeane ergibt sich natürlicherweise durch die Lage der über die Meere herausragenden Kontinentaltafeln. Wie ein Blick auf einen Globus zeigt, sind das Festland und die Meere sehr ungleichmäßig über die Erdkugel verteilt. Im pazifischen Raum überwiegen Wasserflächen (90%), im afrikanisch-amerikanischen Bereich ist die Verteilung in etwa ausgeglichen. Der Flächenschwerpunkt aller Landmassen liegt irgendwo in Frankreich, der Flächenschwerpunkt der Wasserflächen südöstlich von Neuseeland.

Das Meerwasser löst eine große Menge von mineralischen Stoffen, insbesondere Salze. Der Salzgehalt liegt im Mittel bei 3.5% und variiert leicht zwischen 3.3% und 3.8%. Die Hauptbestandteile von Meerwasser sind

Chlorid	19.353 g/kg
Natrium	10.760 g/kg
Sulfat	2.712 g/kg
Magnesium	1.294 g/kg
Calcium	0.413 g/kg
Kalium	0.387 g/kg
Hydrogenkarbonat	0.142 g/kg
Bromid	0.067 g/kg
Strontium	0.008 g/kg
Bor	0.004 g/kg
Fluorid	0.001 g/kg

Den größten Anteil bildet das gewöhnliche Natriumchlorid. Könnte man alles Salz aus dem Meerwasser entfernen, dann ließe sich damit das gesamte Festland der Erde mit einer 150 Meter mächtigen Schicht abdecken.

Alle diese im Meerwasser gelösten Stoffe stammen zum größten Teil aus den Laven, die im Bereich der mittelozeanischen Rücken fortwährend austreten. Ein geringerer Anteil ist durch den Eintrag bedingt, den die Flüsse liefern. Deshalb nimmt der Salzgehalt der Meere im Laufe der Erdgeschichte immer mehr zu. Die höchsten Salzgehalte haben Meere ohne Abflußmöglichkeit und mit starker Verdunstung, wie zum Beispiel das Tote Meer, das bis 41 Gramm Salz pro Liter enthält.

Wasser hat die Eigenschaft, daß es eine große Wärmemenge aufnehmen und langsam und gleichmäßig wieder abgeben kann. Das wirkt sich stabilisierend auf das Klima aus. Der größte Teil der Energie, welche die Erde täglich von der Sonne erhält, wird vom Meerwasser absorbiert. Es erwärmt sich dabei

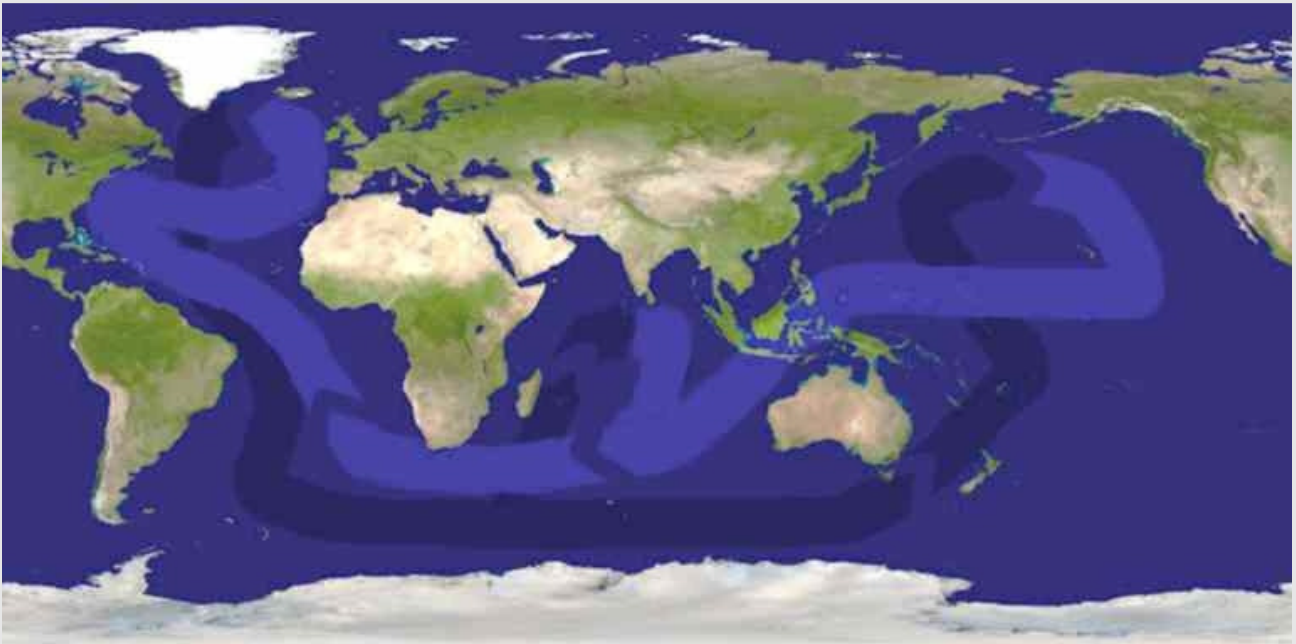
in den äquatorialen Bereichen an der Oberfläche (< 100 m) bis auf über 20° C. Diese nur weniger Meter mächtige Schicht kann dabei in etwa genauso viel Wärme speichern wie die gesamte Troposphäre der Erde zusammen. Da die Abkühlung in der Nacht nur mäßig ist, wirken die Ozeane als sehr effektive Klimapuffer. Außerdem wird dieses erwärmte Wasser durch die Meeresströmungen über riesige Entfernungen bis in gemäßigte und subpolare Breiten transportiert. Der Golfstrom ist z.B. im großen Maße für das gemäßigte Klima im westlichen Europa verantwortlich. Allgemein gilt, daß die Temperaturdifferenz zwischen Sommer und Winter in den Küstenregionen geringer ist als in innerkontinentalen Gebieten. Während im mittleren Westen der USA oder in Zentralasien Kontinentalklima mit eisigen Wintern und sehr heißen Sommern herrscht, sind milde Winter und kühlere Sommer in den Küstengebieten die Regel.

Doch darin erschöpft sich die Bedeutung der Ozeane für das globale Erdklima nicht. Das Klima der Erde wird durch einen moderaten, hauptsächlich durch  $CO_2$  verursachten Treibhauseffekt stabilisiert. Das Meerwasser ist in der Lage, Kohlendioxid in hohem Maße zu binden, und zwar in Form von gelöstem Kohlendioxid-Gas (Kohlensäure), als Hydrogenkarbonat ( $HCO_3$ ) und als Karbonat ( $CO_3$ ). Bei gleicher Kohlendioxidkonzentration im Oberflächenwasser und in der darüber liegenden Luftschicht wird genauso viel  $CO_2$  im Meerwasser gelöst wie das Meerwasser an die Atmosphäre abgibt. Es besteht ein Gleichgewicht. Im Meer wird aber ein guter Teil des Kohlendioxids in Karbonate umgewandelt, so daß es bedeutend mehr  $CO_2$  zu speichern in der Lage ist, als die Atmosphäre. Das führt dazu, daß das Oberflächenwasser karbonatgesättigt ist, was von vielen Kleinlebewesen (z.B. Kieselalgen) ausgenutzt wird, um Kalkskelette aufzubauen. Da sie nicht alle von tierischen Lebewesen gefressen werden, fallen nach ihrem Tod die Kalkschalen aus und bilden in geringeren Tiefen karbonathaltige Sedimente bzw. werden in größeren Tiefen (unterhalb 4000 m) im kalten Tiefenwasser wieder aufgelöst. Die Schicht zwischen übersättigtem Oberflächenwasser und untersättigtem Tiefenwasser wird übrigens Lysokline genannt. Liegt der Meeresboden über der Lysokline, lagern sich die Kalkskelette am Meeresboden ab, bei tiefer liegenden Böden können sich nur noch kieselhaltige Skelette ablagern, da die Kalkkomponenten aufgelöst werden. Auf jeden Fall wird jedoch der Kohlenstoff dem atmosphärischen Kreislauf entzogen. Alles im allen stellen die irdischen Ozeane riesige Kohlenstoffsinken dar, die mit bewirken, daß der Kohlendioxidanteil der Atmosphäre langfristig konstant bleibt. Ob das auch in der Zukunft so sein wird, ist schwer abzuschätzen. Durch die Verbrennung fossiler Kohlenstoffe (die in Form von Kohle und Öl bis dato auch weitgehend dem globalen Kohlenstoffkreislauf entzogen waren), steigt der  $CO_2$ -Anteil in der Atmosphäre kontinuierlich an, was – wenn die vorhandenen Puffermechanismen versagen – zu einer globalen Klimaverschiebung führen kann.

## Globale Meeresströmungen

Für das Klimasystem der Erde stellen die Ozeane ein wichtiges Teilsystem dar. Es ist zugleich das trägste Teilsystem, da es im Gegensatz zur Atmosphäre nur sehr langsam Energie aufnehmen, transportieren und wieder abgeben kann. Deshalb beeinflusst die Verteilung von Ozeane und Landmassen, die Meeresströmungen und die Oberflächenvereisung im Wesentlichen das Klima in mittleren (d.h. einigen 10000 bis 100000 Jahren) und großen Zeitskalen (einigen 10 bis 100 Millionen Jahren, Kontinentaldrift).

Die vertikale Verteilung der Wassermassen in den Ozeanen läßt sich grob in zwei Schichten teilen: in das Oberflächenwasser, welches leicht erwärmt werden kann und in die (kalte) Tiefsee. Zwischen beiden Schichten findet ein Energieaustausch statt, der zu den globalen Meeresströmungen führt.



Thermohalines Zirkulationssystem der Ozeane. Die hellen Streifen stellen die Strömung von warmem Oberflächenwasser und die dunkleren von kaltem Tiefenwasser dar.

Der Austausch zwischen Oberflächenwasser und Tiefsee findet jedoch nur lokal (z.B. im Nordatlantik vor Grönland oder im Nordpazifik südlich des Aleutenbogens) statt, wo Oberflächenwasser in die Tiefsee abtaucht. Auf diese Weise entsteht ein Strömungsband, welche alle Ozeane durchzieht.

Die Kontinuität dieses Strömungsbandes wird im Wesentlichen auch durch die Eigenschaften des Meerwassers bestimmt. Flüssiges Wasser besitzt (mit Ausnahme von Ammoniak) die höchste Wärmekapazität unter allen flüssigen und festen Stoffen. Die Ursache ist mikrophysikalisch in dem asymmetrischen Aufbau des Wassermoleküls zu suchen, der zu einer dipolartigen Ladungsverteilung führt. Darin liegt auch die Ursache, daß sehr viele Stoffe gerade in Wasser löslich sind. Im Zusammenhang mit den Ozeanen betrifft das insbesondere halogenide Salze, die Natrium-, Kalium – und Kalziumionen liefern, sowie eine Vielzahl von Sulfiden. Der prozentuale Anteil dieser und weiterer gelöster Stoffe im Meerwasser wird landläufig als Salzgehalt bezeichnet und beträgt in den Ozeanen durchschnittlich 3,47%. Er legt wichtige thermodynamische Eigenschaften des Meerwassers (z.B. den Gefrier- und Siedepunkt, der bei reinem Wasser bei 0° C bzw. 100° C liegt) fest. In diesem Zusammenhang ist insbesondere ein Effekt zu erwähnen, den man als Anomalie des Wassers bezeichnet. Im Gegensatz zu allen anderen bekannten flüssigen Stoffen besitzt reines Wasser ein Dichtemaximum bei einer Temperatur von 4°C, also oberhalb des Gefrierpunktes. Deshalb schwimmt Wassereis auch auf dem Wasser. Gelöste Salze verändern sowohl die Lage dieses Dichtemaximums als auch die Gefrier- und Siedetemperaturen. Ozeanwasser gefriert z.B. erst bei einer Temperatur von -

1.9° C. Zugleich verschiebt sich die Temperatur des Dichtemaximums auf -3.8° C, d.h. unter den Gefrierpunkt. In den Bereichen, wo das Oberflächenwasser bis zum Einsetzen der Eisbildung abkühlt, kommt es deshalb zu konvektiven Masseströmen, bei denen abgekühltes Oberflächenwasser absinkt und wärmeres Tiefenwasser aufsteigt.

Der Salzgehalt des Oberflächenwassers ist Schwankungen unterworfen. Wie man sich leicht vorstellen kann, führt der Eintrag von Süßwasser durch Niederschläge, starke Verdunstungsraten in den tropischen und subtropischen Gebieten sowie die Eisbildung in den polaren Bereichen zu unterschiedlichen Salzkonzentrationen und damit auch zu unterschiedlichen Wasserdichten. In der Tendenz besitzt die dünne und warme Oberflächenschicht ( $T > 10^\circ \text{C}$ ) der tropischen Meere eine geringere Dichte als das Tiefenwasser. Der starke Temperaturgradient über eine relativ geringe Tiefe (100 – 500 m) verhindert in diesem Fall die Durchmischung dieser beiden Wasserschichten. Im Bereich der polaren Gebiete sieht es dagegen etwas anders aus. Die durch die Oberflächenströmungen dahin transportierten oberflächennahen Wasserschichten kühlen ab, was zusammen mit dem durch das Ausfrieren (Packerisbildung) verursachten Anstieg der Salzkonzentration zu einer Wasserdichteerhöhung und damit zu einer verstärkten Konvektion führt. Die Schichtung wird stark gestört und es kommt zu einem Austausch zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser. Dieser Vorgang treibt letztendlich das Strömungsband, welches sich durch alle Ozeane zieht, an. Dabei werden die äquatorwärts gerichteten kalten Tiefenströmungen durch den Transport oberflächennaher warmer Strömungen in Richtung der Pole kompensiert. Der Motor, der dieses globale Strömungsband antreibt, sind die polnahen Konvektionsprozesse, die aus den thermischen und salinen Dichteänderungen des Meerwassers in diesen Gebieten gespeist werden. Deshalb spricht man auch von einer globalen thermohalinen Zirkulation. Die Zeitskala für diese Zirkulation liegt nach neueren Messungen bei einigen hundert bis tausend Jahren, innerhalb der das Tiefenwasser vollständig durch Oberflächenwasser ausgetauscht wird. Man hat verschiedentlich vermutet, daß der Süßwassereintrag durch Abschmelzen des grönländischen Inlandeisschildes aufgrund der z.Z. stattfindenden tendenziellen Klimaerwärmung zu einem Abreißen des Golfstroms führen könnte mit den Folgen, wie sie im Film „*The Day After Tomorrow*“ des Regisseurs ROLAND EMMERICH recht eindrucksvoll dargestellt werden. Neuere Untersuchungen lassen dieses Szenario jedoch immer fragwürdiger erscheinen obwohl die Überlegungen, die ihm zugrunde liegen, nicht völlig von der Hand zu weisen sind.

## Atmosphäre

Der gegenwärtige chemische Zustand der Erdatmosphäre ist das Resultat einer über Jahrmillionen anhaltenden Entwicklung, bei der insbesondere das Leben eine wichtige Rolle gespielt hat und auch noch spielt. Im Vergleich zur Venus und zum Mars fallen bei der Erde der hohe Stickstoffanteil (ca. 75%) und der außergewöhnlich hohe Sauerstoffanteil (ca. 23%) auf, wogegen das Kohlendioxid – der Hauptbestandteil sowohl der Venus- als auch der Marsatmosphäre – nur in äußerst geringer Menge (ca. 0.05%) vorkommt. Diese sehr spezielle Zusammensetzung war nicht von Anfang an vorhanden, sondern hat sich im Laufe von Jahrmillionen ausgebildet. Die folgende Tabelle dokumentiert die Entwicklung der Erdatmosphäre in den letzten 3.5 Milliarden Jahren (nach Modellrechnungen, HART 1978):

Zeit vor [10 <sup>9</sup> Jahren]	Oberflächen-Temp. [°K]	Oberflächen-Druck [atm]	Stickstoff in 10 <sup>18</sup> kg	Sauerstoff in 10 <sup>18</sup> kg	Kohlendioxid in 10 <sup>17</sup> kg	Methan in 10 <sup>18</sup> kg	Ammoniak in 10 <sup>14</sup> kg	Wasser in 10 <sup>16</sup> kg
4.00	314	1.37	0.56	0.00	13.4	5.13	1.79	7.68
3.50	315	1.32	0.31	0.00	5.27	5.93	2.29	8.27
3.00	304	1.10	0.87	0.00	2.48	4.56	1.90	3.77
2.50	297	0.73	1.57	0.00	1.37	2.22	1.46	2.30
2.00	281	0.75	3.76	0.06	0.65	0.00	0.00	0.77
1.50	279	0.77	3.84	0.08	0.21	0.00	0.00	0.69
1.00	280	0.78	3.89	0.09	0.05	0.00	0.00	0.72
0.50	283	0.79	3.91	0.10	0.02	0.00	0.00	0.90
0.20	287	0.94	3.92	0.86	0.02	0.00	0.00	1.16
0.00	288	1.00	3.92	1.21	0.02	0.00	0.00	1.27

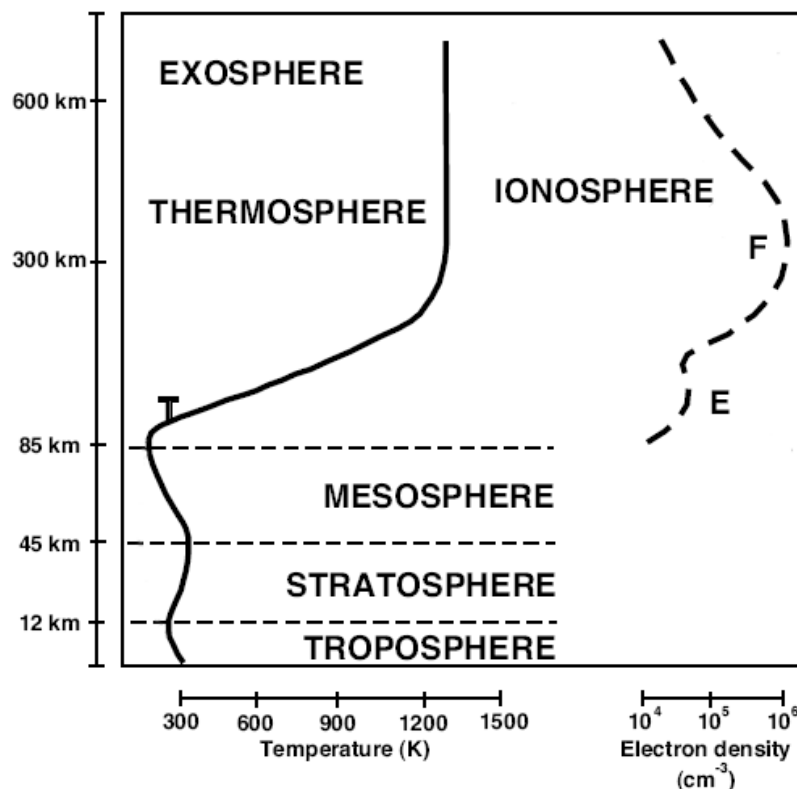
Man kann sehr schön erkennen, wie sich seit etwa zwei Milliarden Jahren die ehemals reduzierende Atmosphäre in eine oxidierende umgewandelt hat. Die Ursache dafür ist hauptsächlich biotischer Natur. Die damals auf der Erde lebenden einzelligen Lebewesen (Cyanobakterien) mit anaerobem Stoffwechsel fanden eine neue Methode, wie man aus dem reichlich vorhandenen Sonnenlicht Energie für die Aufrechterhaltung der Lebensprozesse gewinnen kann. Diese Methode nennt man Photosynthese. Dadurch, daß bei diesem Prozeß Sauerstoff freigesetzt wird, begann ein immer schneller werdender Umbau der irdischen Gashülle. Das Kohlendioxid wurde verbraucht, Methan und Ammoniak verschwanden weitgehend und der Sauerstoffanteil der Luft nahm immer schneller zu. Ab einem Sauerstoffanteil von etwa 3%, der vor rund 1.9 Milliarden Jahren erreicht wurde, entstanden die ersten Lebewesen mit Zellkern, die Eukaryonten, die aktiv den vorhandenen freien Sauerstoff für ihren Stoffwechsel nutzten. Das war eine enorme Anpassungsleistung, denn Sauerstoff ist ein starkes Zellgift und war für die meisten der zu diesem Zeitpunkt existierenden anaeroben Lebewesen tödlich.

Vor rund 350 Millionen Jahren erreichte der Sauerstoffanteil 21% und ist bis heute ungefähr gleich geblieben. Diese 21% sind in Wirklichkeit nur rund 5% des im Laufe der Erdgeschichte produzierten Sauerstoffs. Die restlichen 95% wurden überwiegend in Form von Eisenoxid und in Form von Sulfaten gebunden.

Neben der biotischen gibt es noch eine weitere Sauerstoffquelle. Das ist die Photolyse von Wassermolekülen in leichtes Wasserstoffgas, das von der Erde entweichen kann, und in Sauerstoff, der sich in der Erdatmosphäre anreichert und z.B. die für höheres Leben notwendige Ozonschicht in der Stratosphäre bildet.

Der vertikale Aufbau der Erdatmosphäre ist kompliziert. Man beschreibt ihn mit Hilfe eines physikalischen Atmosphärenmodells, welches die Veränderung der Temperatur  $T$ , der Gasdichte  $\rho$  und des Drucks  $p$  mit der Höhe über der Erdoberfläche angibt.

Die Temperaturverteilung nutzt man in der Regel, um die Erdatmosphäre in einzelne Schichten einzuteilen, wobei man die Übergangsbereiche, wo die Temperaturfunktion Wendepunkte aufweist, als „Pausen“ bezeichnet.



Vertikale Temperaturverlauf innerhalb der Erdatmosphäre. Die gestrichelten Linien markieren „Pausen“, wo sich der Temperaturverlauf umkehrt.

Die unterste Schicht, wo das gesamte Wettergeschehen stattfindet, ist die Troposphäre. Sie reicht ungefähr bis in eine Höhe von 10 bis 12 km, wo sie durch die Tropopause von der Stratosphäre getrennt wird. In ihr nimmt die mittlere Temperatur stetig mit der Höhe ab. Sie stellt den dichtesten Teil der Erdatmosphäre dar, da in ihr ca. 80% der Masse der gesamten Gashölle enthalten ist.

Die unterste Schicht – die planetare Grenzschicht – reicht bis in ca. 2.5 km Höhe. In ihr treten Prozesse auf, die maßgeblich von der unter ihr angrenzenden Erdoberfläche beeinflusst werden. Das sind Verdunstung und Kondensation von Wasser (Wolkenbildung), das Auftreten von vertikalen und horizontalen Wärmetransportprozessen sowie topographisch bedingte Strömungsänderungen. Besonders ausgeprägt ist in diesem Bereich der Tagesgang der Temperatur zwischen Erwärmung (nicht direkt, sondern über die von der Sonne erwärmte Erdoberfläche) und der nächtlichen Abkühlung. Über der planetaren Grenzschicht (getrennt durch die Tropopause) befindet sich die sogenannte freie Atmosphäre, die nur noch unwesentlich von der Erdoberfläche beeinflusst wird und deshalb nur einen geringen tageszeitlichen Temperaturgang aufweist.

Die Troposphäre wird von der Stratosphäre durch die Tropopause getrennt. In diesem Bereich beobachtet man eine Temperaturumkehr, d.h. die Temperatur steigt von ca.  $-60^{\circ}\text{C}$  wieder stetig an, um in etwa 50 km Höhe die  $0^{\circ}\text{C}$  –Grenze zu überschreiten. Im unteren Teil der Tropopause treten die sogenannten Jet-Streams auf. Das sind einige tausend Kilometer lange und einige hundert Kilometer breite Gebiete mit extrem hohen Strömungsgeschwindigkeiten (bis 500 km/h), die deshalb für die Luftfahrt eine große Bedeutung besitzen. Im Bereich dieser Strahlströme laufen ständig komplexe atmosphärische Prozesse ab, die zu einer vertikalen Aufspaltung, Auflösung oder Neubildung der Tropopause führen.

Oberhalb der Tropopause befindet sich bis in ca. 50 km Höhe die Stratosphäre. In ihr befindet sich die für das Leben auf der Erde wichtige Ozonschicht, wobei die maximale Ozonkonzentration in ca. 30 km Höhe erreicht wird. Die Erwärmung innerhalb der Stratosphäre geht hauptsächlich auf das Konto des Ozons, welches kurzweilige UV-Strahlung absorbiert und die dabei gewonnene Energie zur Aufheizung der umgebenden Luftschichten ausnutzt.

Da es in der Stratosphäre so gut wie keinen Wasserdampf mehr gibt, findet hier auch keine Wolkenbildung mehr statt.

Die „mittlere Atmosphäre“, auch Mesosphäre genannt, erstreckt sich von der Stratopause (50 km) bis zur Mesopause in 80 km Höhe. Sie ist wieder durch eine stetige Temperaturabnahme gekennzeichnet, die ihr Minimum mit fast  $-100^{\circ}\text{C}$  in ca. 80 km Höhe erreicht. Dies ist gleichzeitig die obere Grenze der Mesosphäre.

In der Thermosphäre (85 - 500 km) lassen sich wegen der geringen Teilchendichte praktisch keine Temperaturen mehr durch landläufige Messungen bestimmen. Deshalb muß man auf die sogenannte Strahlungstemperatur ausweichen, die sich aus der mittleren kinetischen Energie der sich weitgehend frei bewegenden Gasmoleküle ergibt. Danach steigt die Temperatur in der Thermosphäre von  $-90^{\circ}\text{C}$  bis auf etwa  $1000^{\circ}\text{C}$  an deren nicht sicher bestimmbarer Obergrenze an. Die Anzahl der Luftmoleküle pro Volumeneinheit nimmt zwar stetig ab, ab welcher Höhe jedoch keine Luftmoleküle mehr vorhanden sind, läßt sich nicht mehr sicher bestimmen.

Die Mächtigkeit der Thermosphäre unterliegt auffallend dem Sonnenzyklus. Bei erhöhter Sonnenaktivität heizt sie sich quasi auf (bis  $1350^{\circ}\text{C}$ ) und reicht entsprechend weiter in den interplanetaren Raum hinaus.

Die Exosphäre (> 500 km) schließt sich je nach Definition in 500 - 1000 km Höhe an. Hier ist der Druck bereits so niedrig, daß von einem Vakuum gesprochen werden kann. Gasteilchen, die bis in eine derartige Höhe transportiert werden, haben die Chance, den Einflußbereich der Erde zu verlassen.

Was auf der Erde gemeinhin als Klima und Wetter bezeichnet wird, spielt sich in der unteren Troposphäre ab. Die Sonne erwärmt am stärksten die Äquatorregion, während die Polargebiete wegen des tieferen Sonnenstands weniger Energie abbekommen. Es entsteht demnach ein Temperaturgradient von den Polen zum Äquator. Nun ist allgemein bekannt, daß sich bei Erwärmung die Luft ausdehnt (ihre Dichte wird geringer) und sich bei Abkühlung zusammenzieht (sie wird „schwerer“). Die „schwere“ polare Luft sollte demnach am Erdboden in Richtung Äquator fließen, während die am Äquator erwärmte Luft aufsteigt und sich in Richtung der Erdpole bewegt. Oder anders ausgedrückt, man erwartet eine meridionale Zirkulation, bei welcher in Erdbodennähe der höchste Luftdruck an den Polen und der niedrigste am Äquator zu finden ist. In den höheren Schichten der unteren Troposphäre sollte es genau umgekehrt sein. Die Zirkulation versucht diesen Druckunterschied auszugleichen.

Der Druckunterschied zwischen zwei Gebieten führt zur Druckgradientenkraft  $F_p$ , die bewirkt, daß Luft immer von Hoch- zu Tiefdruckgebieten fließt, was man gemeinhin als Wind bezeichnet. Ihre Größe läßt sich mit folgender Beziehung berechnen:

$$F_p = -\frac{m}{\rho} \text{grad}(P) \quad [1.8]$$

$m$  ist die Masse des Luftpakets und  $\rho$  dessen Dichte. Der Luftdruckunterschied (gemessen in Pa/m) ist durch den Druckgradienten gegeben.

Dieses einfache Modell beschreibt die Wirklichkeit nur sehr schlecht. Die Strömungsverhältnisse in der Erdatmosphäre sind bedeutend komplizierter. Ein Grund dafür ist die relativ schnelle Rotation der Erde, die zu Trägheitskräften führt, welche die Luft- als auch die Meeresströmungen stark beeinflussen. Interessant in diesem Zusammenhang ist nur die Corioliskraft

$$F_c = 2m \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v} \quad [1.9]$$

wobei  $\boldsymbol{\omega}$  die Winkelgeschwindigkeit der Erde ist ( $|\boldsymbol{\omega}| = \frac{2\pi}{T} = 7.27 \cdot 10^{-5}$ ) und  $\mathbf{v}$  die Geschwindigkeit eines Luftpakets ist.

Die Horizontalkomponente von (1.9) berechnet sich zu (mit  $\varphi$ =geographische Breite):

$$F_{c_H} = 2m \omega \sin \varphi v \quad [1.10]$$

Sie wirkt immer unter einem rechten Winkel zur Bewegungsrichtung, also nach rechts auf der Nordhalbkugel der Erde und nach links auf der Südhalbkugel. Obwohl die Größe der Coriolisbeschleunigung nur sehr gering ist, hat sie doch einen entscheidenden Einfluß auf die Meridionalzirkulation: Die in Richtung Äquator verlaufenden Strömungen führen demnach zu Ostwinden, die warmen Strömungen in den oberen Schichten dagegen zu Westwinden. Aber auch dieses Bild ist noch viel zu einfach, um die wahren Verhältnisse zu widerspiegeln. Durch unterschiedliche Wolkenbedeckung und unterschiedlichen Untergrund kommt es natürlich zu keiner in

diesem Modell vorausgesetzten gleichmäßigen Erwärmung und Abkühlung. Die sich ständig ändernden großräumigen Temperatur- und Druckverteilungen machen das Wetter quasi mittelfristig unvorhersehbar. Im Mittel zeichnen sich aber trotzdem einige sehr stabile Verhältnisse ab:

#### **a) Äquatorbereich**

In Äquatornähe befindet sich das Gebiet der innertropischen Konvergenzen, die Zone der „äquatorialen Windstille“ (Kalten- oder Mollungszone). Hier handelt es sich um einen erdumspannenden Tiefdruckgürtel, der sich ungefähr zwischen dem zehnten nördlichen Breitengrad und dem zehnten südlichen Breitengrad erstreckt. Durch die starke Sonneneinstrahlung entsteht eine starke Konvektion (Hadley-Zelle), welche die Tropopause über dem Äquator anhebt. In Bodennähe ist es gewöhnlich sehr heiß und schwül und auf den Ozeanen herrscht oft Windstille.

Die Lage der Kalmenzone verschiebt sich mit den Jahreszeiten nach Norden bzw. nach Süden.

#### **b) Rossbreiten**

Ungefähr bei 30° nördlicher und südlicher Breite befindet sich auf beiden Hemisphären der subtropische Hochdruckgürtel. Hier ist es i.d.R. windstill oder es wehen nur leicht veränderliche Winde. Die bodennahen Luftströmungen, die von den Rossbreiten in Richtung Äquator wehen, bezeichnet man als Passate. Sie wehen auf der Nordhalbkugel relativ beständig in Richtung Nordost und auf der Südhalbkugel nach Südost. Ursache dafür ist die Corioliskraft. Da sich die Zone der Passatwinde jahreszeitlich mit der Kalmenzone verschiebt, ändert sich mit dem Passieren des Äquators gemäß (1.10) auch die Windrichtung. Ein typisches Beispiel dafür ist der indische Monsun.

#### **c) Gemäßigte Breiten**

In Richtung zu niederen Breiten nimmt der Luftdruck im Mittel wieder ab, um ungefähr bei 65° nördlicher und südlicher Breite ein Minimum zu erreichen. Die sich in diese Richtung bewegenden Luftströmungen werden durch die Erdrotation nach Osten abgelenkt und es entsteht eine Westwindzirkulation. In diese sind oftmals zyklonale („Tiefdruckgebiete“) und antizyklonale („Hochdruckgebiete“) Störungen eingelagert, die im Wesentlichen das Wettergeschehen in den gemäßigten Breiten beherrschen.

#### **d) Polarregion**

In diesem Bereich tritt die sogenannte Polarzirkulation auf. Die Erdpole sind in der Regel Gebiete hohen Luftdrucks. Die von dort abströmende Luft führt aufgrund der Coriolisablenkung zu den sogenannten polaren Westwinden.

Die in den Punkten a) bis d) beschriebenen Zirkulationsmuster treten besonders in Bodennähe, also innerhalb der planetaren Grenzschicht, in Erscheinung. Mit zunehmender Entfernung von der Erdoberfläche beobachtet man eine allgemeine Zunahme der Westwinde, bis sie schließlich in einigen Kilometern Höhe dominieren. Besonders starke Westströmungen sind die Jetstreams im Bereich der unteren Tropopause. Es existieren jeweils zwei Jetstreams pro Hemisphäre, die als Polarfrontjet und Subtropenjet bezeichnet werden. Während der Subtropenjet der Nordhalbkugel im Sommer konstant bei ungefähr 40° nördlicher Breite liegt (im Winter bei ca. 30° nördl. Breite), schwankt der Polarfrontjet von Tag zu Tag im Bereich zwischen 50° und 75° nördlicher Breite.

Neben den globalen Windsystemen gibt es noch die lokalen Windsysteme, die stark von der Topographie des Untergrundes bestimmt werden.

### Biosphäre

Die Erde beherbergt unter dem Schutz seiner dichten Atmosphäre eine Daseinsform der Materie, die sie nach allem, was wir heute wissen oder zu wissen glauben, zu etwas Besonderem macht: Leben. Es ist nicht einfach zu definieren, was man unter „Leben“ verstehen soll. Aber soviel ist sicher, daß es das Antlitz der Erde in den letzten drei Milliarden Jahren auf eine diffizile Art und Weise geformt und beeinflußt hat, das man meinen könnte, beide zusammen bilden eine Einheit, eine Art Überorganismus. Das ist natürlich nur metaphorisch gemeint, obwohl man dafür einen hübschen Namen erfunden hat – Gaja-Hypothese (JAMES LOVELOCK, 1979).

Über die Frage, ob im Kosmos Leben häufig oder eher selten oder gar nur eine Ausnahme ist, kann man nur Mutmaßungen anstellen. Ein Beispiel ist zwar ein Existenzbeweis, aber für eine statistische Analyse weitgehend ungeeignet. Also muß man versuchen näher zu ergründen, wie und warum Leben auf der Erde entstanden ist, nach welchen Prinzipien es sich entwickelt und wie hoch die Wahrscheinlichkeiten sind, auf anderen Welten ähnliche Bedingungen vorzufinden.

Wir kennen nur eine Art von Leben. Es beruht auf der Kohlenstoffchemie und verwendet für seinen körperlichen Aufbau im wesentlichen Eiweiße (Proteine) und zum Speichern seines eigenen Bauplans DNS (Desoxiribonukleinsäure) bzw. RNS (Ribonukleinsäure). Solange es „lebt“, befindet es sich mit seiner Umgebung in einer Art von Fließgleichgewicht, der sich in einem intakten Stoffwechsel (Metabolismus) äußert. Dieser erfordert eine stabile äußere Energiequelle, die auf der Erde primär von der Sonne in Form der Sonneneinstrahlung geliefert wird. Es gibt aber auch Lebensgemeinschaften, die in erster Linie auf der chemischen Energie von Schwefelverbindungen beruhen, die in der Tiefsee, genauer im Bereich der mittel-ozeanischen Rücken, durch vulkanische Tätigkeit aus dem Erdinneren freigesetzt werden. Und Leben muß nicht zuletzt in der Lage sein, sich selbst zu reproduzieren (Vermehrung).

Über die Elementarvorgänge, die schließlich zur Bildung „lebender“ Moleküle bzw. Molekül-aggregationen führten, kann auch heute noch trotz intensiver Forschung nur – wenn auch auf hohem Niveau – spekuliert werden.

Eine durchaus überraschende Tatsache ist, daß das Leben offensichtlich relativ schnell auf die Bühne der Erdgeschichte trat, nachdem sich unser Planet nach seiner Entstehung auf erträgliche Temperaturen abgekühlt hatte und die ersten offenen Ozeane entstanden sind. Es ist ziemlich sicher, daß es bereits vor ca. 3 ½ Milliarden Jahren erste Mikroorganismen in großer Zahl gegeben hat. Davon zeugen besondere Schichtgesteine, die man als Stromatholithe bezeichnet und deren älteste Formationen aus diesen Zeiten stammen. Stromatholithe sind nichts anderes als versteinerte Kolonien von Bakterien. Bakterien wiederum sind - um gleich ein Vorurteil auszuräumen - keineswegs primitive Organismen. Sie bestehen aus einer Zelle mit einer Membran, die es vor der Außenwelt schützt und in deren Schutz hochkomplexe chemische Prozesse ablaufen. Man muß deshalb noch einmal ca. 300 bis 500 Millionen Jahre zurückgehen, um den Zeitraum zu spezifizieren, wo aus abiotischer Materie eine der Selbstreplikation fähige Materieform entstanden ist, aus der sich schließlich vor 3 ½ Milliarden Jahren die ersten einzelligen Mikroorganismen entwickelt haben.

Dreh- und Angelpunkt für eine Theorie, welche den Anspruch hat, die Entstehung des „Leben“ auf der Erde zu erklären, ist die Darstellung der Schritte, wie aus den auf der Urerde vorhandenen Stoffen zwangsläufig (eine Zwangsläufigkeit vorausgesetzt) durch autokatalytische Prozesse ein Informationsmolekül entsteht, das in der Lage ist, sich selbst zu reproduzieren. Dieses Informationsmolekül (mit hoher Wahrscheinlichkeit eine RNA) ist das Objekt, an dem das darwin'sche Prinzip von Selektion und Auswahl ansetzen kann, auf dem wiederum der Motor der Evolution beruht (DAWKINS, DE DUVE).

Wie das Leben genau entstanden ist, wird sich nach allen Erfahrungen mit hoher Wahrscheinlichkeit der experimentellen Wissenschaft verschließen. Die Frage jedoch „Könnte es so gewesen sein“, ist sowohl der theoretischen und in Teilaspekten der experimentellen Forschung durchaus zugänglich. Am plausibelsten erscheint heute die Theorie (G.WÄCHTERHÄUSER et.al.), daß das Leben auf der Erde im Bereich untermeerischer heißer Quellen seinen Ursprung nahm. Dort könnten in den mit heißen (c. 90 ° C) und mit chemischen Stoffen aus dem Erdinneren angereicherten Wasser durchströmten Mineralhügeln („*Black Smokers*“ bzw. Karbonat-Türme aufbauende „*White Smoker*“) die chemischen Reaktionen stattfanden, die letztendlich zu den ersten lebenden Organismen geführt haben.

4.5 – 4.6 Mrd. Jahre	Entstehung der Erde durch Akkretion im protosolaren Urnebel
3.8 Mrd. Jahre	Beendigung der Epoche des „Großen Bombardements“
3.8 – 3.7 Mrd. Jahre	Beginn der chemischen Evolution, an deren Ende selbstreproduzierende Molekülaggregationen standen (Entstehung des genetischen Codes)
3.6 – 3.5 Mrd. Jahre	Entstehung der ersten einzelligen Organismen (Bakterien, Archaea)
700 Mill. Jahre ->	Entstehung und Entwicklung mehrzelliger Organismen

Nach den Erfahrungen mit dem irdischen Leben scheint also Leben relativ schnell zu entstehen, soweit die Umweltbedingungen es erlauben. Das impliziert, das Leben im Kosmos ein durchaus häufiges Phänomen ist und nährt auch die Hoffnung, das man Lebensspuren sowohl auf dem Mars als auch in den eisigen Fluten der Jupitermonde Europa, Ganymed und Kallisto finden wird.

Mehr als zwei Milliarden Jahre beherrschten Bakterien (sogenannte Prokaryonten) das Leben auf der Erde (genaugenommen tun sie das heute noch). Der nächste entscheidende Schritt bestand in der Entwicklung der sogenannten eukariotischen Zelle die u.a. dadurch ausgezeichnet ist, daß sie einen differenzierten Zellkern (als Behausung des Erbmaterials) und andere komplexe Organellen in ihrem Zytoplasma beherbergt. Er wurde irgendwann vor 1.4 Milliarden Jahren irgendwo im Urozean der Erde getan und stellte die Weichen für die Entstehung der sexuellen Fortpflanzung die (neben den ständig vorkommenden Mutationen des genetischen Materials) wiederum für Variationen und damit für genetisch leicht unterschiedliche Individuen sorgte, an denen die natürliche Auslese als Motor für den Aufbau an Diversität und Komplexität verstärkt ansetzen konnte.

Noch interessanter und weitreichender in den Folgen ist die Entstehung mehrzelliger Lebewesen (sog. Metazoa), also alles das was – salopp gesagt - komplexer als ein Pantoffeltierchen ist. Sie entstanden erst vor ca. 700 Millionen Jahren auf der Erde in einem beispielelosen Akt der Formen- und

Artenbildung, wo – auf Heute bezogen – das Leben bereits 82% seiner Zeit auf der Erde hinter sich gebracht hatte. Sie mündete in eine nur knapp 100 Millionen Jahre andauernde Diversifikationsphase, wo eine Vielzahl neuer und z.T. grotesk aussehender Arten entstanden, von denen viele jedoch schnell wieder ausstarben. Interessant ist, daß zu jener Zeit die Natur eine sehr große Zahl von „Bauplänen“, die sich taxonomisch in „Stämme“ einteilen lassen, ausprobiert hat. Aus nicht mehr nachvollziehbaren Gründen waren am Ende dieser „kambrischen Explosion“ (vor ca. 540 Millionen Jahren) die meisten dieser biologischen Baupläne wieder verschwunden und es sind auch seitdem (bis auf sehr wenige Ausnahmen) keine Neuen hinzugekommen (wären damals zufällig die Chordata ausgestorben, gäbe es heute weder Hering noch Mensch...).

Wenn man bedenkt, was in den rund 3 Milliarden Jahren von der Entstehung des Lebens bis zur Herausbildung mehrzelliger Organismen hätte alles passieren können, was für das Leben auf der Erde absolut tödlich gewesen wäre, dann kann man die Schlußfolgerung wagen, das „höheres“, d.h. mehrzelliges Leben im Kosmos eher sehr selten bis extrem selten ist.

Und es hat in der Geschichte des Lebens auf der Erde eine ganze Anzahl von einschneidenden Ereignissen (Katastrophen) gegeben, die zu einem sogenannten Faunen- oder auch Floren-schnitt, einem Massenaussterben (Extinktion) von Tier- und Pflanzenarten, geführt haben.

Tabelle: Ereignisse, die zu Massenaussterben führten (nach P.D.WARD et.al.)

Mehrfache vollständige Sterilisierungen der Erde vor ca. 4.6 bis 3.8 Mrd. Jahre, insbesondere in der Epoche des „Großen Bombardements“

Auftauchen von freiem Sauerstoff in der Erdatmosphäre mit katastrophalen Folgen für anaerobe Bakterienarten, erste vollständige Vereisung der Erde (2.5 – 2.2 Mrd. Jahre)

Wahrscheinlich wiederholte vollständige Vereisungen der Erde, verbunden mit den Aussterben stromatolithbildender Blaualgen und anderer Organismen (750-600 Mio. Jahre)

Mehrere Phasen des Aussterbens ganzer Organismengruppen während des Kambriums vor 560 – 500 Mio. Jahre. Über die Ursachen gibt es nur Vermutungen

Zwei Perioden des Massenaussterbens im Ordovizium und im Devon vor ca. 440 – 370 Mio. Jahren. Die Ursache liegt wahrscheinlich in einer globalen Klimaverschiebung..

Perm-Trias-Übergang. Bei diesem gut dokumentierten Massenaussterben vor 250 Mio. Jahren verschwanden 80 – 90% (manche Autoren nennen sogar 95%) aller maritimen Arten. Damit verschwand der größte Teil des tierischen und pflanzlichen Lebens von der Erde. Als eine mögliche und wahrscheinliche Ursache wird die plötzliche Entgasung von Methanhydrat aus zuvor abgeschlossenen ozeanischer Sedimentschichten angesehen, was die maritimen Lebewesen vergiftete und indirekt über eine Klimaerwärmung um 5 – 10°C (Treibhauseffekt) auch den terrestrischen Lebewesen den Garaus machte. Zuvor ist es aufgrund des zu jener Zeit aktiven sibirischen Trappvulkanismus bereits zu einer globalen Erwärmung gekommen, welche die Methanfreisetzung weiter anregte und beschleunigte. Es ist aber auch möglich, daß die plötzliche Methanfreisetzung durch einen Impakt verursacht wurde bzw. durch eine

Kombination von verschiedenen Ereignissen eingetreten ist, von denen jedes Einzelne für sich allein genommen nicht katastrophal war. Deshalb zog sich das Massenaussterben auch über 80000 Jahre hin, was Fossilfunde auf Grönland sehr gut belegen. Neuerdings wird auch eine starke Versalzung der Meere als eine Ursache diskutiert.

Faunenschnitte am Ende der Trias vor 250 Mio. Jahren. Ungefähr 50% aller Arten starben aus. Ursache ist mit hoher Wahrscheinlichkeit der Impakt eines kleinen Planetoiden oder Kometen. Die Entstehung des Manicouagan-Kraters in Kanada (Durchmesser ca. 100 km) fällt in diese Epoche. Ein Zusammenhang konnte aber noch nicht bewiesen werden.

K/T-Ereignis – Massenaussterben am Übergang von der Kreidezeit zum Tertiär vor 65 Mio. Jahren. Ursache ist ein Impakt, der den 200 km großen Chicxulub-Krater im Bereich des Golfs von Mexiko und der Halbinsel Yucatan bildete. Er rottete u.a. die Dinosaurier aus und machte damit den Weg frei für das gegenwärtige Massenaussterben.

Gegenwart: Nicht nur „kosmische“ Ereignisse führen zu einem massenhaften Aussterben von Tier- und Pflanzenarten. Das, welches gegenwärtig mit rasanten Tempo unaufhaltsam fortschreitet, ist vom Menschen verursacht und schon jetzt eine der größten Katastrophen in der Geschichte des irdischen Lebens.

Derartige Katastrophen bieten für die Entwicklung des Lebens aber auch Chancen, da auf diese Weise ehemals besetzte ökologische Nischen wieder frei werden. Das Aussterben der großen landlebenden Reptilien vor 65 Millionen Jahren war z.B. die Voraussetzung dafür, daß die Säugetiere, die zur Zeit der Dinosaurier winzig klein waren und nur ein Schattendasein geführt haben, auf einmal erfolgreich die Erde besiedeln konnten.

Evolution im darwin'schen Sinne setzt immer an einer Population von Individuum an, die eine Fortpflanzungsgemeinschaft bilden. Dabei bestimmt deren Genausstattung den jeweiligen Phänotyp. Der Phänotyp bestimmt wiederum in Wechselwirkung mit der Umwelt den Fortpflanzungserfolg und damit die Fitneß des Genträgers. Zufällige Änderungen im Genotyp – sogenannte Mutationen – müssen über Generationen hinweg ihre Fitneß beweisen, was dazu führt, daß sich auf Dauer nur die Individuen einer Population erfolgreich fortpflanzen, deren Eigenschaften einen, wenn auch kleinen Vorteil im „Kampf ums Dasein“ bieten. Da im Laufe des Lebens einmal erworbene Erfahrungen und Eigenschaften nicht auf den Genotyp rückwirken können, kann Evolution auch nicht zielgerichtet bzw. zielbestimmt sein (teleologisch). Sie ist aber auch nicht völlig undeterministisch, da unter ähnlichen Umweltbedingungen ansonsten völlig verschiedene Lebewesen eine ähnliche Phänomenologie ausbilden können, eine Erscheinung, die man in der Evolutionsbiologie als Konvergenz bezeichnet.

Man ist geneigt durch eigene Erfahrung und durch das, was man in der Schule gelernt hat, anzunehmen, daß die Entwicklung des höheren Lebens auf der Erde einen genau vorbestimmten Pfad folgt, an dessen (vorläufigen) Ende der Mensch steht. Aber genau das ist falsch. Der Mensch ist zweifellos ein Zufallsprodukt und kein – Evolution ist blind – vorbestimmtes Endprodukt einer Milliarden von Jahren andauernden Entwicklung. Wie Evolutionsbiologen zwingend zeigen können, ist der Weg zum Menschen ein durch und durch von glücklichen Zufällen gepflasterter Pfad der uns nur

deshalb als folgerichtig erscheint, weil wir zufällig an dessen Ende stehen und ihn deshalb rückverfolgen können. Wäre z.B. vor 65 Millionen Jahren nicht ein Planetoid den Sauriern auf den Kopf gefallen, gäbe es sie vielleicht noch heute. Uns Menschen aber mit Gewißheit nicht. (Die Entstehung zweibeiniger Primaten mit dem Effekt, daß die Vordergliedmaßen nicht mehr ausschließlich zur Fortbewegung benötigt werden, beinhaltet in sich schon einen gewissen Grad an Potentialität, der einen „Fortschritt“ in Richtung höherer Intelligenz mit einem damit verbundenen Überlebensvorteil wahrscheinlicher macht. Der „Zufall“ in der Evolution ist also nicht vollkommen.)

Da die Entwicklung zu einer selbstbewußten Lebensform offensichtlich nicht zwangsläufig ist, aber auch nicht ausgeschlossen werden kann, muß man daraus schlußfolgern, daß Selbstbewußtsein und Intelligenz äußerst seltene Phänomene im Kosmos sind. Interessanterweise sind bei der Abschätzung, wie viele Zivilisationen es noch in unserem Milchstraßensystem gibt, die Astronomen am optimistischsten. Sie sind so optimistisch, daß sie sehr viel Zeit, Mühe und Forschungsgelder aufbieten, um im Projekt SETI systematisch nach Radiosignalen von „Außerirdischen“ – mittlerweile auch unter der Nutzung der Rechenressourcen des Internet – zu suchen. Übertroffen in ihrem Optimismus werden sie übrigens nur noch von den UFO-Gläubigen, die überall (interessanterweise in den letzten Jahren zunehmend weniger) Aliens in umgebauten Untertassen über die Erde sausen sehen. Biologen dagegen, die sich mit der Funktionsweise und dem Wirken der Evolution des Lebens wissenschaftlich auseinandersetzen, können diesen Optimismus bei weitem nicht teilen (z.B. S.J.GOULD, E.MAYR). Selbst dann, wenn genügend Zeit für die Entstehung einer intelligenten Lebensform (es muß ja nicht unbedingt wie Herr Meier aussehen) zur Verfügung steht, bedeutet das noch lange nicht, daß diese Lebensform auch eine kulturelle Entwicklung aufnimmt. Eine kulturelle Entwicklung, die eine technologische mit einschließt, ist aber eine Grundvoraussetzung dafür, um im Kosmos überhaupt wahrgenommen zu werden. Aus all dem folgt die nüchterne Erkenntnis, daß die Erde mit ihrer menschlichen Zivilisation doch eher allein in unserem Milchstraßensystem mit seinen 200 Milliarden Sternen ist. Von Planeten mit Leben – insbesondere in seiner primitivsten „bakteriellen“ Form – sollte es dagegen im Vergleich dazu nur so wimmeln... Und nur das ist gemeint mit dem Satz, daß die Erde ein außergewöhnlicher und einzigartiger Platz im Kosmos ist.

Auch der Begriff „Häufigkeit“ bedarf einer kleinen Erläuterung. Man schätzt, daß es im überschaubaren Universum etwa 500 Milliarden bis zu 1 Billion Galaxien gibt, wobei den größten Anteil die sogenannte Zwerggalaxien ausmachen (die für die Entstehung von Leben so gut wie keine Voraussetzungen bieten). Der Anteil an Spiralgalaxien liegt bei ca. 30%, wobei eine Spiralgalaxie wiederum aus etwa  $10^{11}$  bis  $10^{12}$  Sternen besteht. Nur in den Außenbereichen derartiger Spiralsysteme gibt es Zonen, in denen es Sonnen mit für Leben geeigneten Planeten geben kann. Wenn man nun von der Häufigkeit bewohnter Welten spricht, meint man meist „in unserer Milchstraße“. Und dort sind wir wahrscheinlich ziemlich einsam und allein...

Aber es gibt im überschaubaren Kosmos viele 100 Milliarden derartige „Milchstraßen“! Bezieht man sich darauf, dann muß es im Universum überall intelligentes Leben geben. Nur die Natur hat es eigentümlicherweise so eingerichtet, daß es wahrscheinlich räumlich und zeitlich nie miteinander in Kontakt treten kann.

Gegenwärtig gibt es auf der Erde zwischen 10 und 100 Millionen verschiedene Organismen-arten, von denen ungefähr 1.4 Millionen beschrieben, klassifiziert und mit einem wissenschaftlichen Namen versehen sind (E.O.WILSON, 1997). Letztere verteilen sich in etwa auf folgende Gruppen:

Insekten	751000	53.1 %	Protozoen	30800	2.2 %
Sonstige Tiere	281000	19.9 %	Algen	26900	1.9 %
Höhere Pflanzen	248400	17.6 %	Monieren (Bakterien u.ä.)	4800	0.3 %
Pilze	69000	4.9 %	Viren (*)	1000	0.1 %

(\*) Viren gelten nicht als eigenständige Lebewesen

Den weitaus größten Teil der Biomasse binden dabei auf der Erde erstaunlicherweise die Bakterien! Ihre Gesamtmasse (man schätzt sie auf  $2 \cdot 10^{17}$  kg) übersteigt nach einer vorsichtigen Schätzung von T.GOLD die Masse der gesamten restlichen Flora und Fauna. Auch wenn es kaum jemandem bewußt ist, aber bakterielles Leben dominiert das Leben auf der Erde seit Anbeginn. Von den höheren Tierarten sind sowohl von der Arten- als auch von der Individuenzahl die Arthropoden (Gliederfüßler) und dort insbesondere die Insekten der dominierende Faktor. Mit knapp 4000 Arten (mit abnehmender Tendenz) gehören die Mammalia (Säugetiere) zu den artenärmsten Tiergruppen.

Lebewesen prägen das Antlitz der Erde auf vielfältige Weise. Es gibt kaum Orte, die nicht von irgendwelchen Organismen besiedelt sind. Extremophile Mikroorganismen findet man sogar in Salzseen, in kochend heißen vulkanischen Quellen, ja selbst in Gesteinsschichten in 4 bis 5 km Tiefe hat man Bakterien gefunden. Das zeugt von der großen Anpassungsfähigkeit des Lebens wenn es erst einmal entstanden ist und es Zeit zur Anpassung hat. Unabhängig davon, ob die Menschheit die nächsten 100 oder Tausend Jahre überlebt, hat das Leben auf der Erde noch mindestens 500 Millionen Jahre vor sich bis Veränderungen im Strahlungshaushalt der Sonne in einer letzten schleichenden Katastrophe den Planeten Erde endgültig unbewohnbar macht.

## Daten

### BAHNPARAMETER

Große Halbachse ( $10^6$ km)	149.6
Umlaufszeit (siderisch) in Tagen	365.256
Umlaufszeit (tropisch) in Tagen	365.242
Perihelabstand ( $10^6$ km)	147.09
Aphelabstand ( $10^6$ km)	152.10
Mittlere Bahngeschwindigkeit (km/s)	29.78
Max. Bahngeschwindigkeit (km/s)	30.29
Min. Bahngeschwindigkeit (km/s)	29.29
Bahnneigung (Grad)	0.0000
Numerische Exzentrizität	0.0167
Sidereale Rotationsperiode (Stunden)	23.9345
Länge eines Tages (Stunden)	24.0000
Schiefe der Ekliptik	23.45

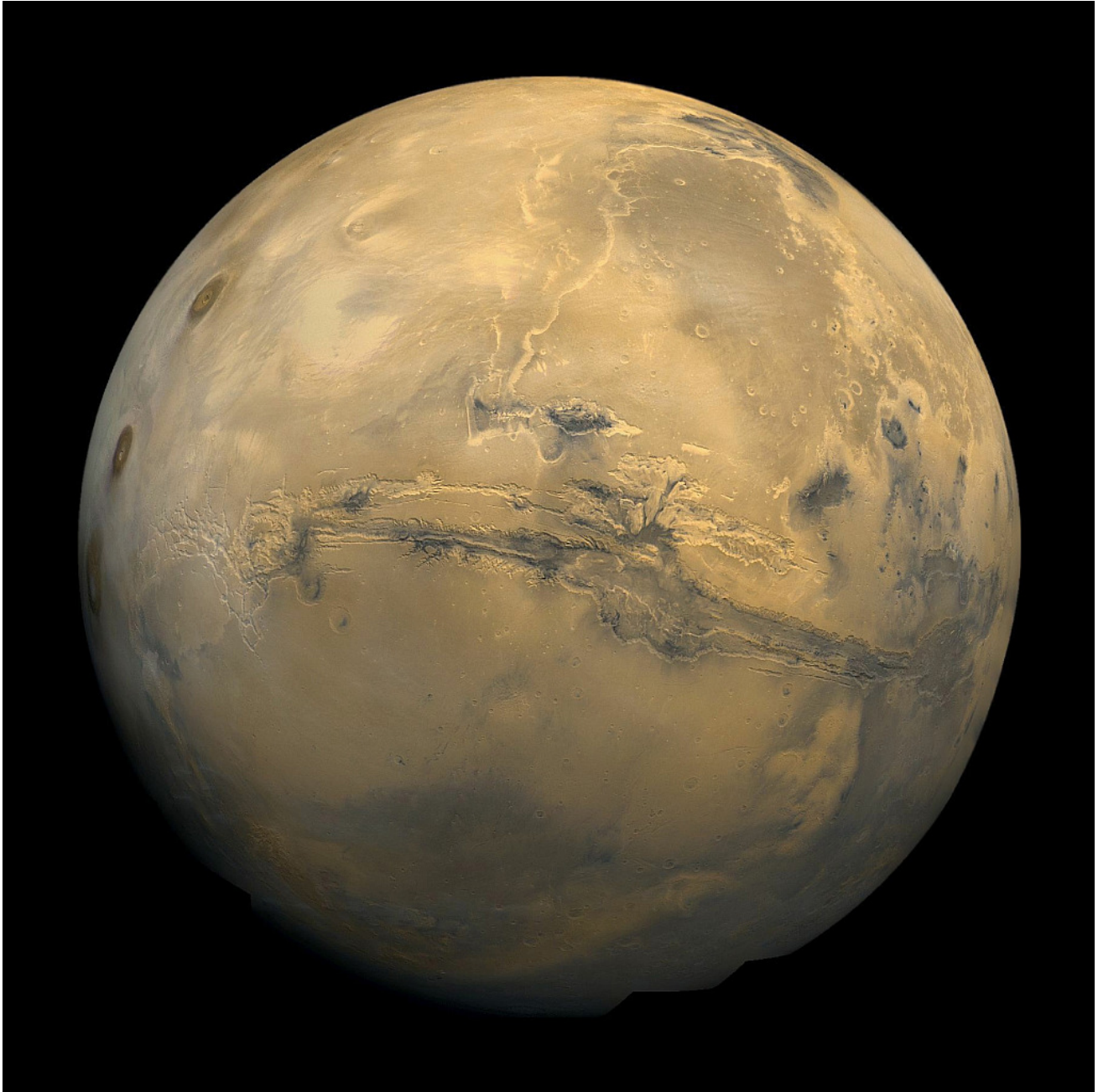
### PLANETENPARAMETER

Masse ( $10^{24}$ kg)	5.9736
Volumen ( $10^{10}$ km <sup>3</sup> )	108.321
Äquatorradius (km)	6378.1
Polradius (km)	6356.8
Abplattung	0.00335
Mittlere Dichte (kg/m <sup>3</sup> )	5515
Schwerebeschleunigung (m/s <sup>2</sup> )	9.78
Entweichgeschwindigkeit (km/s)	11.186
Albedo	0.306
Geometrisches Albedo	0.367
Solarkonstante (W/m <sup>2</sup> )	1367.6
Strahlungstemperatur (K)	254.3
Max. Höhendifferenz Oberfläche (km)	20

### ATMOSPÄRE

Oberflächendruck (bar)	1014
Oberflächendichte (kg/m <sup>3</sup> )	1.217
Skalenhöhe (km)	8.5
Mittlere Oberflächentemperatur (K)	288
Tägliche Temperaturschwankungen Oberfläche (K)	283-293
Windgeschwindigkeit Oberfläche (m/s)	0 .. 100
Mittleres Molekulargewicht (g/mol)	28.97

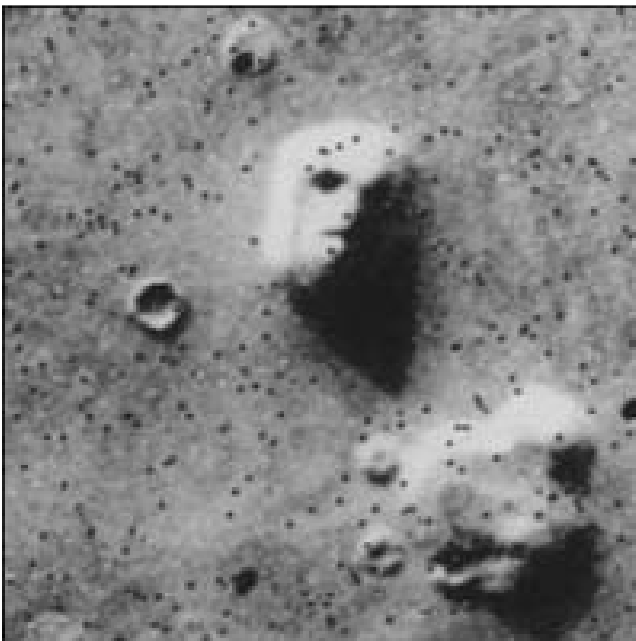
## Mars



Zu Beginn des zwanzigsten Jahrhundert war sich ein Großteil des Bildungsbürgertums sicher, daß es auf dem Planeten Mars „Marsmenschen“ gibt. Man überlegte sich, wie man mit ihnen Verbindung aufnehmen und mit ihnen kommunizieren könnte. Die entsprechenden Vorschläge – oftmals von durchaus seriösen Wissenschaftlern vorgetragen – erscheinen uns heute nur noch als kurios, so z.B., daß man in Sibirien große Kahlschläge in Form von Buchstaben und Wörtern anlegen sollte, die von den „Marsastronomen“ mit ihren Fernrohren zu erkennen wären. Ein in die Geschichte (der Medienkultur, weniger der Astronomie) eingegangenes Ereignis war das Hörspiel „Invasion vom Mars“ nach HERBERT GEORGE WELLS (1866-1946) Roman „Krieg der Welten“, welches am Halloween-Tag des Jahres 1938 über den amerikanischen Rundfunksender CBS ausgestrahlt wurde.

Es wurde von dem berühmten Schauspieler und Regisseur ORSON WELLES (1915-1985, „Citizen Kane“) so realistisch arrangiert, das in den Oststaaten der USA eine wahre Massenpanik unter den Zuhörern ausbrach. Heute, zu Beginn des 21. Jahrhunderts wissen wir, daß es keine Marsmenschen gibt - auch wenn es sich immer noch nicht überall herumgesprochen hat, wie jeder weiß, der mit der Popularisierung von Wissenschaft zu tun hat. Den Menschen, die zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts gelebt haben, kann man ihre Überzeugung nicht übel nehmen, denn immerhin wurden zu jener Zeit von so bekannten Astronomen wie GIOVANNI SCHIAPARELLI (1835-1910) in Italien und später PERCIVAL LOWELL (1855-1916) in Amerika riesige Bewässerungssysteme (wie zumindest Letzterer glaubte) – die bekannten Marskanäle – entdeckt. Daß es sich dabei lediglich um optische Täuschungen handelte, vermuteten manche Fachleute bereits damals. Die Gewißheit über diese Vermutung wurde aber letztendlich erst in den sechziger Jahren erbracht, als die ersten künstlichen Raumflugkörper den roten Planeten erreichten und Bilder zur Erde funkten.

Aber gerade diese „Marsmenschen“, die nach allgemeiner Überzeugung die Prädikate „Klein“ und „Grün“ besitzen, haben zumindest lange Zeit das allgemeine Interesse an diesen Planeten wachgehalten. Man denke nur an das „Marsgesicht“, welches 1976 von Viking 1 fotografiert wurde. Die Bücher, die darüber von sogenannten „Astrophysikern“ geschrieben wurden, erreichten ähnliche Auflagen wie die pseudowissenschaftlichen Werke von ERICH VON DÄNIKEN oder IMMANUEL VELIKOWSKY („die Zerstörung Trojas wurde vom umherirrenden Mars verursacht“). Selbst als sich 1998 das „Marsgesicht“ als gewöhnlicher Tafelberg entpuppte (und nicht als Artefakt einer längst untergegangenen Zivilisation von wahrscheinlich kleinen grünen Marsmännlein), waren die Marsgläubigen nicht zu überzeugen. Das Ungewöhnliche und Geheimnisvolle zieht eben doch mehr in den Bann als nüchterne Wissenschaft, obwohl letztere genaugenommen viel, viel spannender und interessanter sein kann als mancher zu glauben bereit ist.



Viking-Aufnahme und Mars Global Surveyor-Aufnahme des „Marsgesichts“

## Mars

Der Planet Mars fällt am Himmel durch sein intensives rötliches Licht auf. Er ist in den Oppositionszeiten ein lohnendes Objekt für Amateurastronomen, da man schon mit verhältnismäßig kleinen Fernrohren viele Details – helle und dunkle Flecken sowie die mit den Jahreszeiten ihre Größe ändernden Polkappen – auf der kleinen Planetenscheibe erkennen kann. Im Gegensatz zur Venus behindern hier keine Wolken die Sicht. Nur manchmal verdunkeln riesige Staubschwaden – das Resultat globaler Staubstürme – das Antlitz dieses Himmelskörpers.

Der Mars ist ohne Frage das bevorzugte Ziel von Raumflugmissionen. Über 30 Satelliten wurden bis jetzt zum roten Planeten geschickt. Etwas über die Hälfte sind zwar aus den verschiedensten Gründen gescheitert. Die Ergebnisse der erfolgreich verlaufenden Missionen sind jedoch beachtlich. Der Mars ist ohne Zweifel (natürlich neben der Erde) der am besten erforschte Planet unseres Sonnensystems. Das nächste große Ziel, welches in den nächsten zwei Jahrzehnten angegangen werden soll, ist ein bemannter Flug dorthin. Wir können gespannt sein, wann und wie und ob er gelingt. Die Astronauten, die dieses Wagnis auf sich nehmen werden, sind bereits geboren. Nur ahnen sie noch nichts von ihrem großen Abenteuer...

Raumflugmissionen zum Mars (nur erfolgreiche bzw. teilweise erfolgreiche Missionen)

<b>Mission</b>	<b>Startdatum</b>	
Mariner 4	28.Nov. 1964	Vorbeiflug in 9920 km Entfernung, erste Fotos
Mariner 6	25.Feb. 1969	Vorbeiflug in 3437 km Entfernung
Mariner 7	27.März 1969	Vorbeiflug in 3551 km Entfernung
Mars 2	19.Mai 1971	Orbiter, Landeeinheit abgestürzt
Mars 3	28.Mai 1971	Orbiter, Lander sendete 20 s Daten
Mariner 9	30.Mai 1971	Orbiter
Mars 5	25.Juli 1973	Orbiter, Lander ausgefallen
Mars 6	5.Aug. 1973	Orbiter, Lander abgestürzt
Mars 7	9.Aug. 1973	Orbiter, Lander verfehlt Planeten
Viking 1	20.Aug.1975	Orbiter und Lander
Viking 2	9.Sep. 1975	Orbiter und Lander
Phobos 1	7.Juli 1988	Orbiter und Lander, Kontaktverlust
Phobos 2	12.Juli 1988	Orbiter und Lander, Kontaktverlust
Mars Pathfinder	4.Dez. 1996	Lander und Rover
Mars Global Surveyor	7.Nov. 1996	Orbiter, 2006 verloren
Mars Odyssey	7.April 2001	Orbiter
Mars Express	2.Juni 2003	Orbiter
MER-A „Spirit“	10.Juni 2003	Lander + Rover
MER-B „Opportunity“	7.Juli 2003	Lander + Rover
Mars Reconnaissance Orbiter	10.August 2005	Orbiter

### Allgemeines

Der Mars ist der erdnächste der äußeren Planeten. Er ist bedeutend kleiner als die Erde. Sein Poldurchmesser beträgt 6754,6 km und sein Äquatordurchmesser 6794,4 km. Er ist also im Vergleich zur Erde etwas stärker abgeplattet. Seine siderische Rotationsperiode ist dagegen mit der Erde vergleichbar: 24h 37min 22.7s. Dadurch, daß die Rotationsachse des Planeten um 25° gegenüber seiner Bahnebene geneigt ist, treten ausgeprägte Jahreszeiten auf. Sie sind auf beiden Marshälften unterschiedlich lang, da die Marsbahn eine 5-mal so große Exzentrizität als die Erdbahn aufweist.

Für einen Umlauf um die Sonne benötigt Mars 1.881 Jahre (= 686.93 Tage). Die Entfernung schwankt dabei zwischen 1.38 AU (Perihel) und 1.67 AU (Aphel). Aus diesem Grund erscheint der Durchmesser der Sonnenscheibe am Marshimmel auch nur etwa Halb- bis ein Drittel mal so groß als von der Erde aus. Entsprechend verhält sich auch die Energieeinstrahlung im Laufe eines Marsjahres.

Da sich Mars und Erde unterschiedlich schnell auf ihrer Bahn bewegen, beträgt der zeitliche Abstand zwischen zwei Marsoppositionen – die sogenannte synodische Umlaufszeit - unter der Annahme von kreisförmigen Planetenbahnen rund 780 Tage (in Wirklichkeit schwankt die Oppositionswiederkehr aufgrund der beträchtlichen Bahnexzentrizität - insbesondere des Mars ( $e=0.0934$ ) - im Bereich zwischen 764 und 811 Tagen).

In der Oppositionszeit läßt sich der Mars von der Erde aus am günstigsten beobachten, da zu dieser Zeit die Entfernungen minimal werden. Nur sind aufgrund der Bahnexzentrizitäten diese Oppositionen nicht alle gleich günstig. In früheren Jahrzehnten waren deshalb die sogenannten Perihelopositionen, wo die Entfernung Erde - Mars bis auf 55.8 Millionen Kilometer schrumpfen kann, für die teleskopische Marsforschung besonders interessant. Sie wurden z.B. zur Erstellung von Albedokarten und zur spektroskopischen Untersuchung ausgewählter Gebiete auf dem Mars genutzt. Auch unter den Amateurastronomen sind sie sehr beliebt, da man dann schon mit verhältnismäßig kleinen Fernrohren Oberflächendetails auf der sonst sehr kleinen orangefarbenen Marsscheibe wahrnehmen kann. Während der besonders günstigen Marsopposition von 2003 gelangen z.B. Amateurastronomen mit relativ bescheidenen Teleskopen unter Ausnutzung von sogenannten Webcams und CCD-Kameras Marsaufnahmen, die sich mit den Fotos des Hubble-Teleskopes durchaus messen können...

Die Masse des Planeten beträgt 0.1074 Erdmassen oder  $6.417 \cdot 10^{23}$  kg, woraus mit seiner Größe eine mittlere Dichte von  $3.94 \text{ g/cm}^3$  folgt. Das sind lediglich 72% der mittleren Dichte der Erde.

Trotzdem die gesamte Marsoberfläche kaum mehr als die Fläche aller irdischen Kontinente zusammengenommen einnimmt, wartet sie mit einigen Superlativen auf. Sie besitzt

- § die größten Einschlagsbecken im Sonnensystem (Hellas und Agyre)
- § die mächtigsten Schildvulkane im Sonnensystem (Tharsis-Aufwölbung mit Olympus Mons, Arsia Mons, Pavonis Mons und Ascraeus Mons, alle über 15 km hoch)
- § die eindrucksvollsten Canyon-Landschaften die man sich vorstellen kann (Valles Marineris, rund 4000 km lang, 240 km breit und 7 km tief, man vergleiche mit dem „Grand“ Canyon!)

Interessanterweise haben sie mit Ausnahme von Olympus Mons (den man mit einer Höhe von über 24 km wahrlich nicht übersehen konnte!) noch keinen Eingang in das „Guinness Buch der Rekorde“ gefunden.

Mars hat 2 kleine Monde: Phobos und Deimos. Beide zwar nicht rekordverdächtig, aber durchaus interessant.

## Innerer Aufbau

Es ist allgemein anerkannt, daß auch der Mars eine innere Differentiation aufweist, also eine ähnliche Schalenstruktur zeigt wie die Erde: Kern, Mantel und Kruste. Die Dicke und der chemische Aufbau dieser Schichten kann aufgrund des Fehlens aussagekräftiger seismischer Daten z.Z. jedoch nur indirekt über die Messung der Gravitationsfeld- und Rotationsparameter sowie mit Hilfe von Modellrechnungen (z.B. im Vergleich mit den gut bekannten Daten der Erde), die u.a. auf der Analyse des auf der Erde aufgefundenen Marsgesteins beruhen, erschlossen werden. Der Viking-2 Lander hatte zwar ein Seismometer an Bord, mit dem lange Zeit nach seismischen Aktivitäten gesucht wurde. Leider konnten dabei keine aussagekräftigen Signale erhalten werden, was darauf hindeutet, daß der Planet gegenwärtig seismisch nicht sonderlich aktiv ist. Außerdem machte sich während der Meßkampagne ein unerwartet großes „Untergrundrauschen“ bemerkbar. Die Ursache dafür war die hohe Empfindlichkeit des eingesetzten Seismometers gegenüber den vom Marswind hervorgerufenen Erschütterungen. Es wäre also besser gewesen, bei diesem Gerät von einem Anemometer anstatt von einem Seismometer zu sprechen.

Daß der Mars eine kernartige Massenkonzentration im Zentrum besitzen muß, zeigt schon sein Trägheitsfaktor von 0.3662, der aus den Bahndaten der zahlreichen künstlichen Marssonden abgeleitet wurde. Dieser Wert steht im Einklang mit der Annahme, daß Mars einen Kern mit einem Radius zwischen 1500 und 1600 km und einer Dichte zwischen 7000 und 7500 kg/m<sup>3</sup> besitzt, der hauptsächlich aus Eisen mit einer Beimengung von ca. 15 - 20 Gewichtsprozenten Schwefel (in Form von Eisensulfid FeS) besteht. Aus Messungen des Mars Global Surveyor (MGS) sowie aus dem Fehlen eines globalen magnetischen Dipolfeldes hat man geschlossen, daß der ca. 5000 K heiße Kern entweder vollständig aufgeschmolzen ist oder sich in einen festen inneren und einen flüssigen äußeren Kern aufteilt.

Über dem Marskern schließt sich der Mantelbereich mit einer Mächtigkeit von rund 1700 km und eine regional unterschiedlich dicke Kruste (zwischen 40 und 80 km) an. Dabei liegt die Dichte der Krustengesteine bei ungefähr 2800 kg/m<sup>3</sup>. Ähnlich wie bei der Erde werden im tieferen Mantel Phasengrenzen erwartet, wo sich die Struktur bestimmter Minerale relativ abrupt ändert. Das betrifft z.B. Olivin, welches in einer bestimmten Tiefe in  $\beta$ -Spinell und dieses wiederum bei weiterer Druckzunahme in  $\gamma$ -Spinell übergeht. In Abhängigkeit des Temperaturverlaufs kann knapp oberhalb der Kern-Mantel-Grenze u.U. noch ein weiterer Phasenübergang stattfinden, und zwar der Übergang von Spinell in Perowskit ( $(Mg, Fe)SiO_3$ ). In diesem Fall erwartet man über dem Kern eine ca. 100 bis 200 km mächtige Perowskitschicht.

Was den inneren Aufbau des Mars betrifft, ergeben sich einige interessante Fragen. Sie betreffen z.B. den physikalischen Zustand und die Entstehung und zeitliche Entwicklung des innersten Kernbereichs. Die Entdeckung von remanentem Magnetismus scheint jedenfalls darauf hinzudeuten, daß es in fernster Vergangenheit zumindest einmal kurzzeitig ein durch interne Strömungen verursachtes Magnetfeld gegeben hat, welches heute weitgehend verschwunden ist. Mantelkonvektion hat auf jeden Fall in der Vergangenheit stattgefunden, wie noch heute einige eindrucksvolle Oberflächenformationen beweisen. Zu erwähnen ist insbesondere die Tharsis-Aufwölbung (Durchmesser rund 8000 km), auf der sich mächtige Schildvulkane (z.B. Olympus Mons) befinden oder das Gebiet um das Valles Marineris, einem riesigen Grabenbruchsystem. Computersimulationen zeigen, daß z.B. die Tharsis-Region durch einen riesigen Mantelplume vor mehr als 3.5 Milliarden Jahren entstanden sein könnte. Zu dieser Zeit haben sich in mehreren Schüben riesige Lavamassen über Teile des Planeten ergossen. Diese Lava war sehr heiß und dementsprechend recht dünnflüssig. Man vermutet, daß sie entweder vom basaltischen oder komatiitischen Typ war (Komatiite sind ultramafische, d.h. magnesiumreiche Silikatschmelzen, die auf der Erde nur vor rund 1.7 Milliarden Jahren in Erscheinung traten).

Gegenwärtig ist der Abkühlungsprozeß des Planeten wahrscheinlich bereits soweit fortgeschritten, daß Konvektionsströmungen im Mantelbereich nur noch eingeschränkt möglich sind. Nur im Bereich des Tharsis-Plumes scheint der Vulkanismus erst in den letzten 150 Millionen Jahren endgültig abgeklungen zu sein wie Kraterzählungen im Bereich der Gipfelcalderen nahe legen (GERHARD NEUKUM, 2005). Eine Vermutung, die durch die ersten Ergebnisse von Mars-Expreß gestützt wird.

Neuere Untersuchungen lassen für die Entstehung der Tharsis-Aufwölbung aber auch einen anderen Mechanismus denkbar erscheinen. Danach hat ein starker Impakt in der Frühzeit des Mars die Energie geliefert, um einen wesentlichen Teil des Marsmantels im Bereich des Einschlags zumindest teilweise aufschmelzen zu lassen. Die aufgeschmolzenen Regionen sind bei einem derartigen katastrophalen Ereignis recht heterogen in der Marskruste und im Marsmantel verteilt. Die oberen Bereiche erfahren aufgrund ihrer fluiden Eigenschaften und ihrer höheren Temperatur gegenüber der Umgebung einen Auftrieb, der letztendlich den isostatischen Ausgleich (der durch den Impakt empfindlich gestört wurde) fördert. Auf diese Weise entsteht – ähnlich wie bei einem Mantelplume – eine Aufwölbung, an deren Oberfläche eine zeitlang permanent geschmolzenes Material austritt und den Impaktkrater vollständig überformt. Eine genaue Analyse dieser im Detail sehr komplexen Vorgänge zeigt, daß man zur Erklärung der Tharsis-Aufwölbung nicht unbedingt einen klassischen Mantelplume, der seinen Ausgang an der Kern-Mantel-Grenze nimmt, benötigt. Auch ein impaktinduzierter Mantelplume kann zu der beobachteten Geomorphologie führen und sogar einige geologische Besonderheiten besser erklären. Welche der beiden Modelle der Wahrheit am nächsten kommt, können jedoch erst weitere Untersuchungen klären.

Bei der Ausdifferenzierung des Mantels in der Frühgeschichte des Mars wanderten die schweren Elemente in Richtung Kern, wohingegen die leichteren Elemente (hauptsächlich in Form von Si-Al-Verbindungen) unter Volumenvergrößerung nach oben wanderten. Das führte in der verhältnismäßig starken Kruste (>40 km, Erde 5-30 km) zu Spannungen, die sich unter der Bildung von verhältnismäßig flachen Dehnungsrissen lösten. Die dabei entstandenen morphologischen Strukturen kann man sehr gut auf den Aufnahmen des Mars Global Surveyor und noch besser – da in 3D – auf den Aufnahmen von Mars-Expreß beobachten. Zurzeit wird auch die Theorie der sog. „Ein-Platten-Tektonik“ diskutiert. Darunter versteht man eine äußerst langsame Bewegung der Marskruste als

Ganzes auf den zähflüssigen Mantelgesteinen („langsam“ bedeutet hier, daß es zu keinen Faltungen und auch zu keinen merklichen „Hot-Spot“-Wanderungen gekommen ist, wie man sie auf der Erde z.B. von Hawaii her kennt). Das soll wegen der Elliptizität des Planeten zu regionalen Stauchungen der vom Äquator in Richtung Pol wandernden Gebiete bzw. zu Dehnungen bei der Bewegung von den Polen zum Äquator geführt haben. Durch die dabei entstandenen enormen Spannungen ist nach dieser Hypothese z.B. das riesige Bruchsystem des Valles Marineris vor mindestens 3.5 Milliarden Jahren entstanden. Sie erklärt auch, warum es auf dem Mars nahe beieinander liegende Strukturen gibt, deren Entstehung in Pol- bzw. Äquatornähe erfolgt sein muß.

Ein weiterer Indiz für plattentektonische Prozesse sind die streifenartigen Magnetisierungsmuster, welche Mars Global Surveyor vor einigen Jahren im Bereich der geologisch ältesten Gebiete des Mars entdeckt hat. Sie dokumentieren Umpolungen des ehemals vorhandenen dipolartigen Magnetfeldes des Mars, währenddessen gesteinsbildendes Material aus Rissen ausgetreten ist und regional Marskruste ausgebildet hat (also ähnlich dem Prozeß, den man auf der Erde unter dem Begriff „ocean floor spreading“ zusammenfaßt). Diese „magnetic stripes“ findet man ausschließlich in den sehr alten südlichen Gefilden des Mars, im Bereich des Terra Sirenum und des Terra Cimmeria. Sie sind ungefähr 160 km breit und knapp 1000 km lang. Im Vergleich zu den analogen Strukturen der basaltischen Gesteine der irdischen ozeanischen Kruste sind sie breiter, was auf eine größere Ausbreitungsrate der neu entstandenen Kruste hindeutet wenn man davon ausgeht, daß die Umpolungsfrequenz des Marsmagnetfeldes mit dem der Erde vergleichbar ist. Diese Art der frühen Krustenbildung kann jedoch nicht lange angehalten haben, da Mars aufgrund seiner geringen Masse relativ schnell ausgekühlt ist. Deshalb kann auch der magnetfelderzeugende Dynamoeffekt nur relativ kurzzeitig in der frühesten Geschichte des Planeten funktioniert haben. Auf jedem Fall ähneln die von Mars Global Surveyor beobachteten „stripes“ frappierend den magnetischen Mustern in der ozeanischen Kruste der Erde. Mars hat offensichtlich eine bewegte, d.h. dynamische Frühgeschichte hinter sich, die ungefähr eine halbe Milliarde Jahre andauerte und bereits vor 3.5 Milliarden Jahren aufgrund der erwähnten Abkühlungsprozesse in seinem Inneren endete. Heute dürften tektonische Prozesse weitgehend erloschen sein. Man erwartet lediglich noch „Marsbeben“ infolge von Impaktereignissen bzw. beim Ausgleich mechanischer Spannungen in der sehr mächtigen Marskruste.

## Oberfläche

Der Planet Mars ist mittlerweile durch den Einsatz interplanetarer Raumsonden vollständig kartographiert. Die Aufnahmen sind in speziellen Archiven erfaßt und für jedermann über das Internet zugänglich.

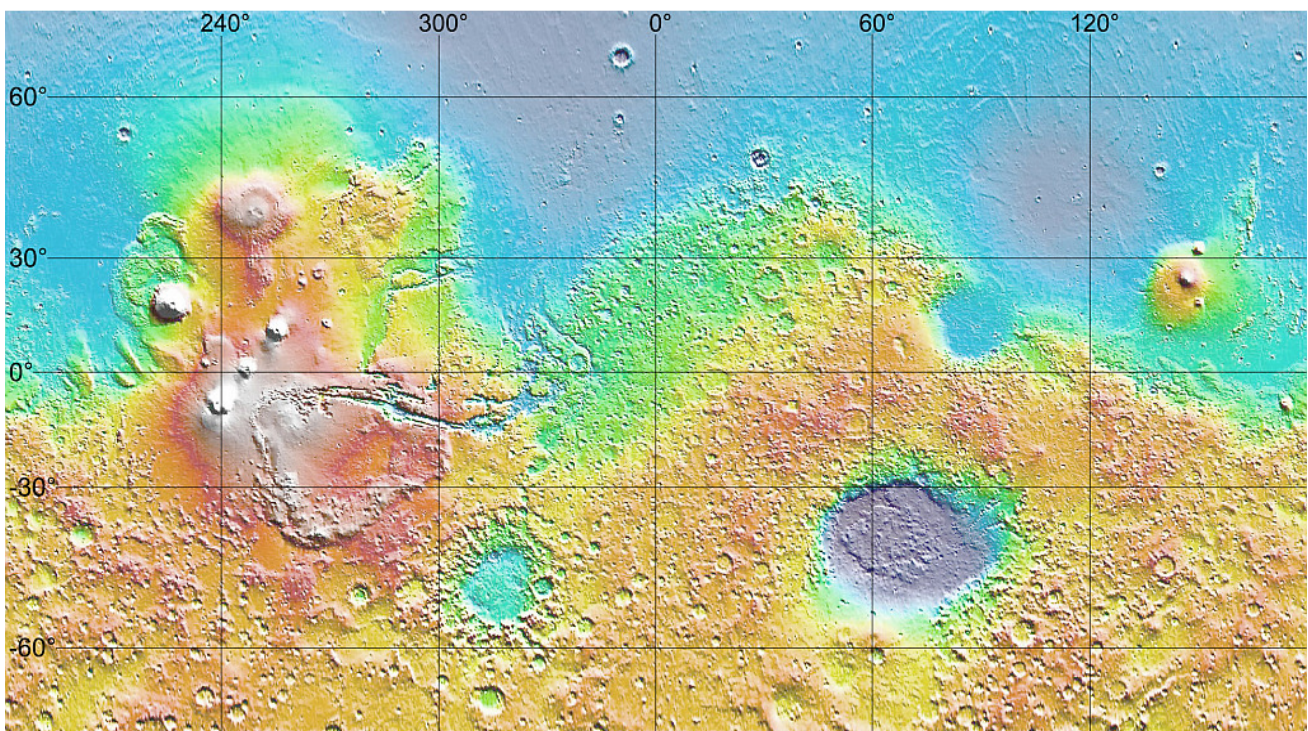
(ein kompletter fotografischer Marsatlas auf der Grundlage der Mars-Global-Surveyor-Aufnahmen z.B. unter [http://www.msss.com/mars\\_images/moc/moc\\_atlas](http://www.msss.com/mars_images/moc/moc_atlas) oder [www.google.com/mars](http://www.google.com/mars) ).

Besonders eindrucksvoll sind die dreidimensionalen Aufnahmen durch die HRSC-Kamera („*High Resolution Stereo Camera*“) der ESA-Sonde Mars-Expreß.

Die Bilder beweisen: Es ist nicht so, daß Mars – ähnlich wie Dune – nur ein kalter, eintöniger Wüstenplanet ist. Die Vielfalt der Landschaftsformen, die sich den Kameras von „Mariner“, „Viking

Orbiter“, „Mars Global Surveyor“, „Mars Odyssey“ und insbesondere „Mars-Expreß“ sowie des „Mars Reconnaissance Orbiters“ offenbarten, hat viele Fachleute überrascht.

Das Erste, was bei einer globalen Bestandsaufnahme auffällt, ist die morphologische Zweiteilung der Marsoberfläche. Der größte Teil seiner südlichen Hemisphäre sowie Teile der Nordhalbkugel bestehen aus Hochlandgebieten (1000 bis 4000 m oberhalb der „Nullhöhe“, welche auf der Erde der Meereshöhe entspricht), die eine auffallend große Dichte von Impaktkratern aufweisen, was bedeutet, das sie offensichtlich sehr alt sind. Der größte Teil der Nordhalbkugel liegt dagegen in Nullhöhe oder darunter mit Ausnahme der eindeutig vulkanischen Gebieten wie die bereits erwähnte Tharsis-Aufwölbung (Olympus Mons, Höhe ca. 24 km) mit seinen riesigen Schildvulkanen und das Elysium-Gebiet bei ca. 210° westlicher Länge und 25° nördlicher Breite. Dieser Teil der Marsoberfläche weist im Gegensatz zu den Hochlandgebieten nur eine geringe Dichte von Einschlagkratern auf. Im Unterschied zu den „Highlands“ handelt es sich hier um jüngeres Material, welches das Ursprüngliche überdeckt oder verdrängt hat. Mars Expreß konnte jedoch 2006 in diesem Gebiet mittels seines MARSIS-Radars eine ganze Anzahl auf der Oberfläche unsichtbarer Einschlagskrater feststellen, die ein ähnliches Alter aufweisen wie die Hochlandgebiete der südlichen Marshalbkugel.

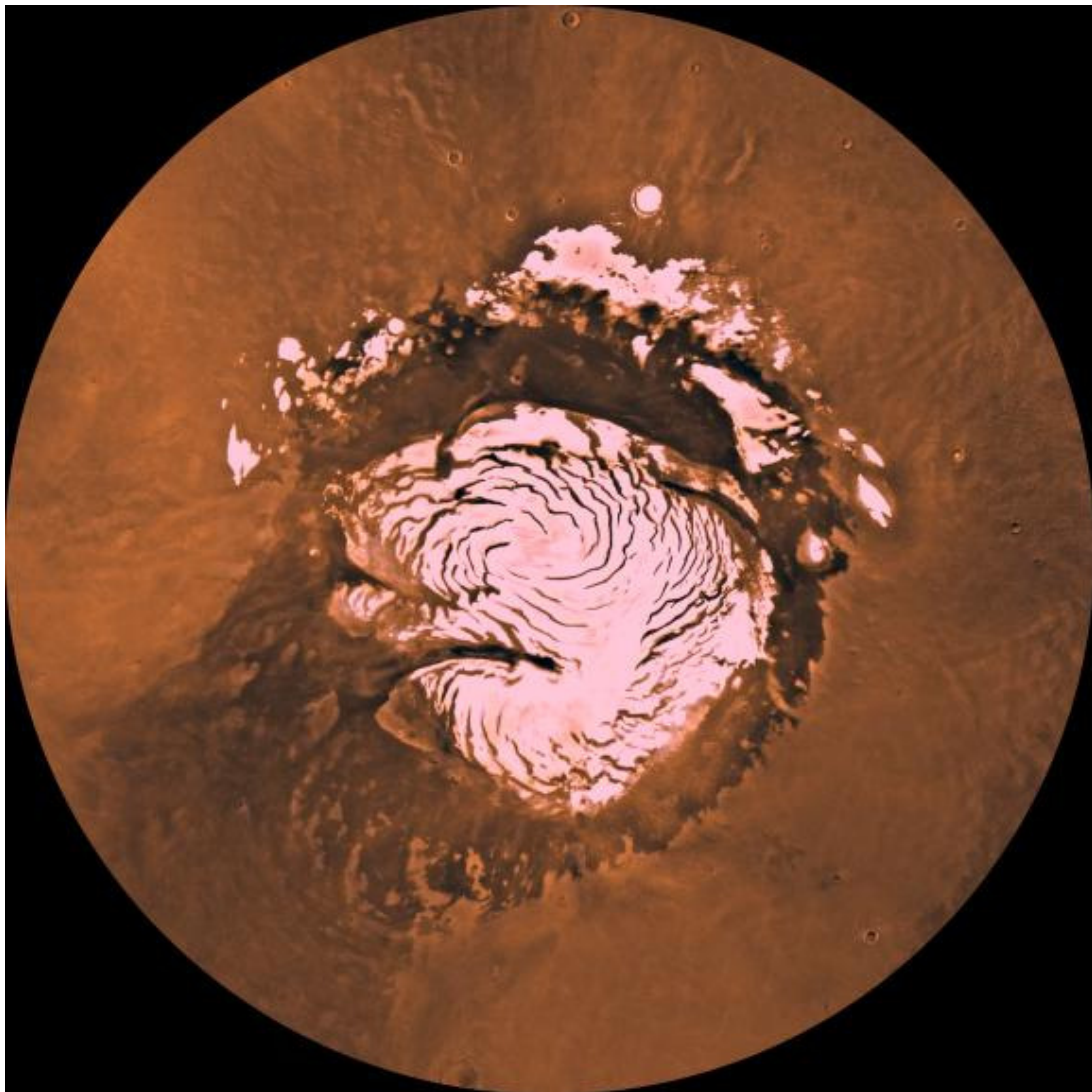


Farbcodierte Höhenkarte des Mars. Die Höhe nimmt von Blau über Orange nach Weiß zu. Links ist die Tharsis-Aufwölbung mit ihren großen Vulkankegel und dem Valles Marineris zu erkennen.

Südlich des Marsäquators findet man zwei riesige Impaktbecken: Hellas und Argyre. Der Durchmesser des nahezu kreisförmigen Hellas-Beckens beträgt ca. 1800 Kilometer. Mit einer Tiefe von fast 4000 Metern gegenüber der Nullhöhe ist der innere Teil von Hellas - Hellas Planitia - eine der tiefsten Impaktstrukturen die man im Sonnensystem kennt. Übertroffen wird sie lediglich durch den Krater Aitken nahe des Südpols des Erdmondes (Durchmesser 2250 Kilometer, Tiefe ca. 13000 Meter).

Argyre ist dagegen nur etwa halb so groß, aber mit einem Durchmesser von ca. 900 Kilometern immer noch eine äußerst imposante Impaktstruktur, die ähnlich wie das Mare Orientale auf dem Mond in einige konzentrische Ringstrukturen zerfällt.

Die Polgebiete des Mars sind von Eiskappen bedeckt, deren Größe jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen ist. Bei günstigen Oppositionen kann man sie bereits in kleinen Fernrohren als auffälliges Oberflächendetail wahrnehmen. Die Nordkappe (Planum Boreum) hat die Gestalt eines breiten Doms, ist ungefähr 1 Kilometer dick und hat einen Durchmesser von rund 650 Kilometern. Ihr höchster Punkt fällt ziemlich genau mit dem Durchstoßungspunkt der Rotationsachse zusammen und überragt das umgebende Land um ca. 3000 Meter. Wie die Aufnahmen der Marssonden zeigen, ist sie in verschiedene Bereiche zerschnitten, die durch dunkle, canyonartige Täler abgetrennt sind. Die auffällig weiße Farbe der Polkappen wird übrigens durch Ablagerungen und Überzügen aus gefrorenem Kohlendioxid – dem sogenannten Trockeneis – verursacht, während der Kern aus Wassereis bzw. aus einer Mischung von Wasser- und Trockeneis besteht. Der permanente Eiskern der Nordkappe enthält nach neuesten Berechnungen ca. 1200000 Kubikkilometer Wassereis.



Nordpolkappe des Mars

Die Südkappe (Planum Australe) ist weniger auffällig, da sie kleiner ist (ca. 450 Kilometer Durchmesser, aber rund 3000 Meter dick). Ihr Zentrum fällt interessanterweise nicht mit dem wahren Südpol zusammen. Ihr höchster Punkt ist ca. 250 Kilometer vom Rotationspol entfernt. Den Wassergehalt der Südpolkappe schätzt man auf ungefähr 200000 Kubikkilometer.

Warum die beiden Polkappen - was ihren Wassergehalt betrifft - nicht symmetrisch sind, war lange ein Rätsel. Erst anhand von Computersimulationen konnte man zeigen, daß der nicht unerhebliche Höhenunterschied (der Bereich um den Südpol liegt im Mittel 6 Kilometer höher als der Nordpol) dafür verantwortlich ist. Er führt zu großräumigen Differenzen in der atmosphärischen Zirkulation, die sich im Endeffekt in einer Verstärkung der Wasserdampfkonzentration im Nordpolbereich äußern. Deshalb ist dort auch mehr Wassereis anzutreffen.

Der auffällige jahreszeitliche Wechsel der Größe der weißen Polarflächen wird durch den Niederschlag von Trockeneis verursacht, was sich auch – da Kohlendioxid auskondensiert – in einer globalen Absenkung des atmosphärischen Drucks an der Marsoberfläche bemerkbar macht. Dieser Effekt konnte z.B. während der Pathfinder-Mission von 1997 bestätigt werden. Immerhin werden in einem Marswinter auf der Nordhalbkugel (er fällt mit dem Aphel der Marsbahn zusammen und ist damit besonders kalt) zwischen 20% und 30% des gesamten Kohlendioxidgehalts der Atmosphäre um den Nordpol herum abgelagert, so daß ein Gebiet mit einem Durchmesser von weit über 1000 Kilometer davon bedeckt wird.

Die Hochlandgebiete des Mars zeichnen sich besonders durch eine morphologische Vielfalt von Einschlagkrater unterschiedlicher Größe und Erosionszustandes aus. Diese Krater beweisen, daß der Mars – genauso wie die anderen inneren Planeten einschließlich des Erdmondes – in fernster Vergangenheit einem starken Bombardement durch Meteorite ausgesetzt war. Aus Kraterzählungen und dem Vergleich der Kraterdichten auf anderen Himmelskörpern lassen sich Informationen über das (zumindest relative) Alter der entsprechenden Oberflächenformationen abschätzen. Die diesem Verfahren zugrunde liegende Idee ist folgende: Aus kosmogonischen Betrachtungen folgt, daß sich die Planeten vor über 4,5 Milliarden Jahren durch Akkretionsprozesse aus Planetesimals in einer flachen Gas- und Staubscheibe um die Ursonne herum gebildet haben. Der Urmars – genauso wie die Uerde und die anderen inneren Planeten waren in ihrer frühesten Jugend aufgeschmolzene Kugeln, die abkühlten und dadurch eine feste Kruste ausbildeten. Diese Urkruste war eine gewisse Zeit lang einem starken Meteoritenbombardement ausgesetzt und zwar solange, bis der größte Teil dieser Körper aus dem inneren Sonnensystem verschwunden war. Man nimmt nun an, daß sich zuerst sowohl große als auch kleine Krater gebildet haben (Phase 1), dann nur noch hauptsächlich kleinere Krater (Phase 2) und später nur noch sehr wenige (Phase 3). Als Resultat sollte sich im Mittel eine gleichmäßige Verteilung von Impakten auf einem Planeten herausbilden. Betrachtet man jedoch den Mars, dann fällt auf, daß die Kraterdichte sowohl in Anzahl als auch in der Größe alles andere als gleichmäßig ist. In der nördlichen Hemisphäre und in den vulkanischen Regionen findet man nur sehr wenige Krater, In den Highlands kann man dagegen grob zwei Gebiete mit unterschiedlicher Kraterdichte in bezug auf Impakte größer 300 Kilometer Durchmesser ausmachen. Nach den auf alten Marskarten zu findenden Bezeichnungen werden diese Gebiete als Noachis (z.B. nordwestlich von Hellas mit einigen alten Ringstrukturen > 300 Kilometer im Durchmesser) und Hesperia bezeichnet. Die kraterarmen nördlichen Gebiete nennt man Amazonis. Diese Gebiete zeigen offensichtlich planetare Krustenbereiche unterschiedlichen Alters an. Da man beispielsweise, aus Untersuchungen des

Erdmondes und des Planeten Merkur weiß, daß das Zeitalter des „schweren Bombardements“ vor ca. 3.9 Milliarden Jahren seinen Höhepunkt erreichte und danach rapide abgenommen hat, kann man grob für den Mars folgende geologische Zeitalter ableiten:

**Noachian:** (endete vor 3.8 bis 3.5 Milliarden Jahren)

Dieses Zeitalter beginnt mit der Entstehung des Mars aus dem solaren Urnebel und endet je nach verwendetem Modell irgendwann vor 3.8 und 3.5 Milliarden Jahren. Die Krustenregionen, die diese Zeit konserviert haben, zeichnen sich durch eine Anzahl besonders großer Impaktstrukturen aus, die selbst sehr viele Einschläge aufweisen. Die auffälligsten und größten Impakte aus jener Zeit sind die Beckenstrukturen Hellas, Argyre und Isidis, deren innere ebenen Bereiche ihre heutige Form erst in der Amazonian-Epoche erhalten haben, wo sie teilweise sedimentativ durch Wasser- und Windeinwirkungen aufgefüllt wurden.

**Hesperian:** (endete vor 3.4 bis 1.8 Milliarden Jahre - sehr unsicher)

Eine besonders starke geologische Aktivität begann nach dem Ende des Noachian und setzte sich bis vor ca. 1.8 Milliarden Jahre fort. In diesem Zeitraum bildeten sich riesige Magmaebenen aus, was mit Vulkanismus und anderen tektonischen Prozessen verbunden war. Am Anfang dieser Epoche begann u.a. auch die Tharsis-Aufwölbung, was zu extensiven Krustenspannungen führte in deren Ergebnis sich z.B. das Valles Marineris öffnete. Außerdem erkennt man auf den Aufnahmen dieser Gebiete riesige Ausflußkanäle, durch die in jener Zeit riesige Mengen von Wasser abgeflossen sein müssen.

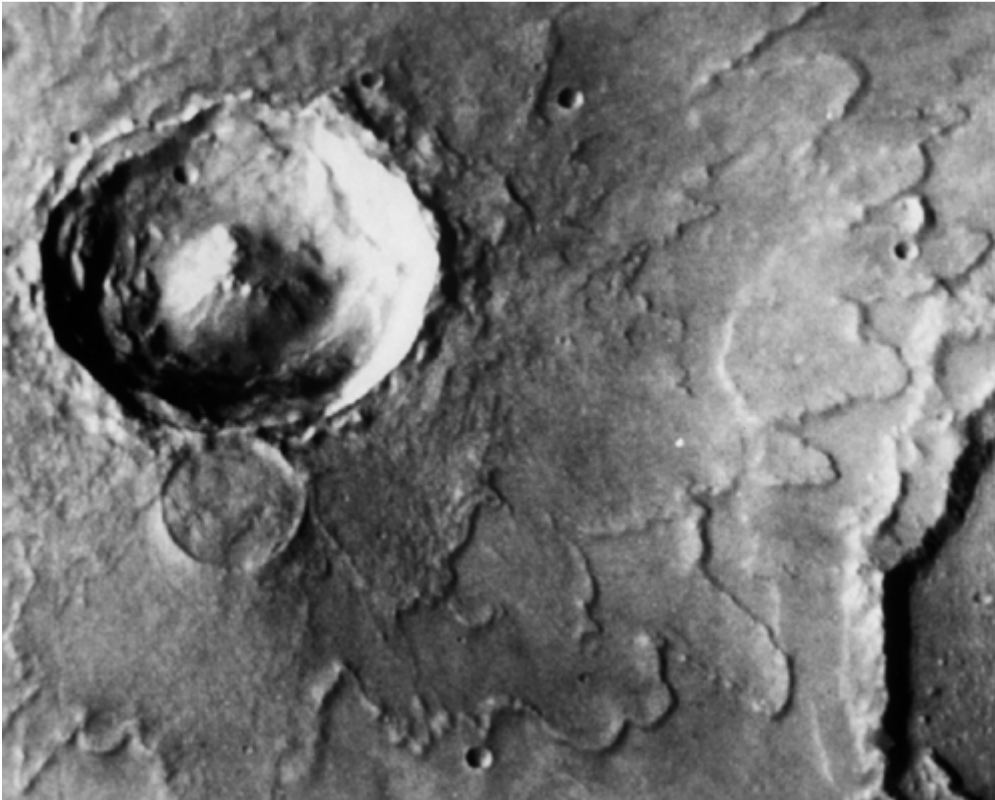
**Amazonian:**

Regionen, die diesem Zeitalter – welches sich bis heute fortsetzt – zugeordnet werden, haben nur eine geringe Kraterdichte, sind aber trotzdem strukturell reich gegliedert. Auch der jüngere Vulkanismus, der z.B. mit der Tharsis-Aufwölbung zusammenhängt, wird dieser Epoche zugeordnet. Im letzten Drittel dieser Periode war der riesige Schildvulkan Olympus Mons auf dem Mars aktiv.

Diese Einteilung richtet sich nach großräumigen Ereignissen, die man als „resurfacing“ bezeichnen kann. Offensichtlich haben im Laufe der frühen Marsgeschichte riesige Lavamassen großräumig ganze Landstriche überflutet und damit alte Krustenteile mit ihren Impakten ausgelöscht. Passend dazu konnten bereits mit der ersten Meßkampagne des MARSIS-Radars („*Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionospheric Sounding*“) der ESA-Sonde „Mars Express“ im Gebiet der Tiefebene Chryse Planitia alte, durch vulkanische Oberflächenablagerungen abgedeckte Einschlagkrater nachgewiesen werden, die zeitlich dem Noachien zuzuordnen sind.

Gegenwärtig spielen jedoch weder vulkanische noch irgendwelche tektonische Prozesse bei der Oberflächengenerierung eine Rolle. Lediglich der Transport von Sand und Staub durch Wind führen zu einer langsamen Erosion. Dazu kommen noch bestimmte glaziale Prozesse, die damit zusammenhängen, daß es auf dem Mars eine Art von Permafrostboden gibt, in denen nach den letzten Messungen von „Mars Odyssey“ sehr viel Wassereis gebunden bzw. eingelagert ist (bis zu 50 Volumenprozent). Das erklärt auch, warum besonders in den Polarregionen Oberflächenstrukturen vorhanden sind, die stark denen ähneln, wie man sie z.B. auch in Alaska vorfindet (z.B. Bruchmuster, die auf der Erde durch Spaltenfrost verursacht werden).

Auf die Existenz von Grundeis ist man gestoßen, als man Impaktkrater gefunden hat, die – im Gegensatz zu typischen Mondkratern – von einem ausgelappten Bereich von sogenannten Ejekta umgeben sind, deren äußere Ränder deutlich aufgerichtet waren (sogenannte Rampartkrater). Diese Gestalt kann nur durch nachträgliche Fließprozesse nach einem Einschlag hervorgerufen worden sein, wenn das Eis des Permafrostbodens plötzlich aufschmilzt und mit den darin eingelagerten Erdmassen radial wegfließt um sich in einer gewissen Entfernung wieder aufzustauen.



Sogenannter Rampart-Krater mit Fließstrukturen an der Flanke

Zu diesem Bild paßt, daß derartige Fließ-Ejekta bei immer kleineren Kratern auftreten je mehr man sich vom Äquator zu hohen geographischen Breiten hin bewegt. Die überzeugendste Erklärung für dieses Phänomen ist, daß die Tiefe, ab dem der Permafrostboden stabil ist, zum Äquator hin zunimmt. Im Äquatorbereich ist auf jeden Fall eine entsprechend starke wärme-dämmende Regolithschicht erforderlich, um das Ausgasen in die Atmosphäre zu verhindern.

Weitere morphologische Merkmale, die auf die (ehemalige) Existenz von flüssigem Wasser hinweisen, sind die Ablaufrinnen, die ungefähr den irdischen Flußalsystemen ähneln und die sogenannten Ausflußrinnen, die weitaus größer sind und sich wahrscheinlich bei katastrophenartigen Überflutungen ausgebildet haben. Letztere entstehen, wenn in den Permafrostboden eingelagertes Eis aufgrund vulkanischer Prozesse (oder bei Impakten) plötzlich schmilzt und sich als Schlammstrom in Bewegung setzt. In Gebieten, wo derartige Ausflußrinnen beobachtet werden, findet man z.B. um Krater stromlinienartige Strukturen, für deren Entstehung sich sonst kaum eine plausible Erklärung finden läßt. Ausflußtäler können aber durchaus auch glazialen Ursprungs sein. Dafür spricht, daß manche der Größeren (z.B. Dao Vallis und Niger Vallis) Tiefenprofile zeigen, welche eher auf die erodierende Wirkung von Eisströmen hindeuten als auf die von fließendem Wasser (die Höhe des Bodens nimmt in

Fließrichtung zu). Vergleichende Untersuchungen über die Wirkung von Eisströmen in der Antarktis (z.B. des Rutford-Strom, der in den Ronne-Eisschelf fließt) und auf dem Mars (z.B. im Bereich der Ares-Vallis) haben viele ernstzunehmende Hinweise für die Richtigkeit dieser Hypothese geliefert. Denn nur Eis kann auch „bergan“ fließen. Wahrscheinlich haben jedoch beide Phänomene - Eisflüsse und Wassermassen - die Topographie der großen Ausflusstäler gestaltet.

Damit kommt man zu der spannenden Frage, ob es in der Vergangenheit des Mars einmal offene Wasserflächen gegeben hat oder nicht. Die in den Hochlandgebieten häufig auftretenden Abflaurinnen wurden verschiedentlich als Flußsysteme gedeutet, bei denen - ähnlich wie auf der Erde - über längere Zeiträume hinweg permanent Wasser, welches z.B. aus Niederschlägen stammte, abgeflossen ist. Das impliziert, daß es in der Marsgeschichte einmal Zeiten gegeben hat, wo die Atmosphäre dichter und die Temperaturen moderater gewesen sind. Wenn das der Fall ist, dann ist auch die prähistorische Existenz eines „Marsozeans“, wie er von einigen Geologen anhand bestimmter morphologischer Strukturen der Marsoberfläche postuliert wurde, durchaus möglich wenn nicht sogar wahrscheinlich. Besonders, da man jetzt im Groben weiß, wo ein großer Teil des Wassers abgeblieben ist: Es ist offenbar im gefrorenem Zustand im Boden des Roten Planeten gespeichert. Dieses aufsehenerregende Ergebnis der Messungen der Sonde „Mars Odyssey“ aus dem Jahr 2002 hat nicht nur bei den Exobiologen zur Begeisterung geführt. Alle die, welche bereits früher anhand geologischer Strukturen die Vermutung geäußert hatten, daß der Mars einmal sehr viel Wasser besessen hat, fühlten sich bestätigt. Die wasserreichen Gebiete konzentrieren sich in den kältesten Regionen des Mars, d.h. sie bilden ringförmige Zonen um die Pole. Auf der Südhalbkugel bildet ungefähr der 60. Breitengrad die nördliche Grenze. Dort befindet sich das Eis in nur rund einem halben Meter Tiefe unterhalb der Oberfläche. Je mehr man sich z.B. den Südpol nähert, um so mehr Eis findet man und um so dünner wird die darüberliegende Deckschicht. Wie tief die eisführenden Schichten reichen, konnte aus den Meßergebnissen der Raumsonde jedoch nicht abgeleitet werden. Die von „Mars Odyssey“ eingesetzten Detektoren lassen diese Frage prinzipiell unbeantwortet. Es ist deshalb durchaus möglich, daß es in tieferen Schichten auch flüssiges Grundwasser gibt, was das seltene Phänomen der an manchen Kraterrändern auftretenden „Gullies“ erklären könnte.

Ob sich Wasser in flüssiger Form auf der Marsoberfläche halten kann, hängt entscheidend von den Umgebungsbedingungen – der Temperatur und dem Luftdruck – ab. Die heute auf dem Mars herrschenden Temperatur- und Druckverhältnisse lassen das jedenfalls nicht zu, wie ein Blick auf das Phasendiagramm von Wasser lehrt. Freiliegendes Eis würde sofort sublimieren, flüssiges sofort verdampfen. Eis, welches unter einer Deckschicht aus Staub und Gestein verborgen ist, bleibt dagegen weitgehend stabil. Wenn der Druck der Deckschichten genügend groß ist, und zusätzlich noch sehr viele Salze im Eis enthalten sind, dann kann sich in einigen Hundert Metern Tiefe sogar flüssiges Wasser als Grundwasser manifestieren.

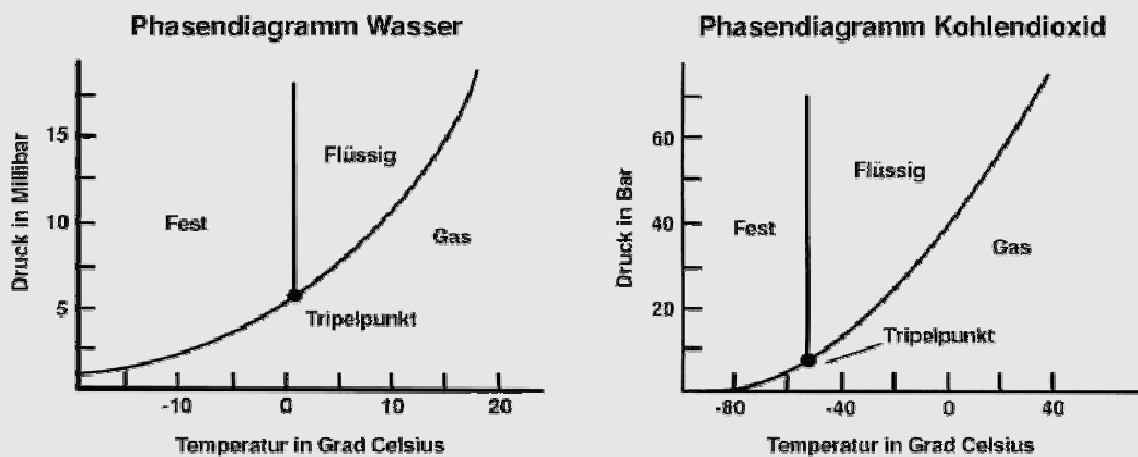
### **Phasendiagramme**

Ein Zustandsdiagramm von Stoffen, die in drei unterschiedlichen Aggregatzuständen auftreten können, wird gewöhnlich als Phasendiagramm bezeichnet. Es ist durch drei Kurven und zwei spezielle Punkte ausgezeichnet. Die Sublimationskurve ist die Kurve zwischen dem festen und gasförmigen Zustand. Sie beschreibt die Druck- und Temperaturwerte, bei denen z.B. Wassereis ohne verflüssigt zu werden sofort in den gasförmigen Zustand übergeht - einen Vorgang, der unter dem Namen Sublimation bekannt ist. Die zweite Kurve, die Schmelzkurve, liefert den Parameterbereich, wo der Übergang vom festen in den flüssigen Zustand erfolgt. Schließlich wird der Kurvenbereich, an dem der Übergang

flüssig zu gasförmig realisiert wird, als Dampfdruckkurve bezeichnet. Alle diese drei Kurven besitzen jeweils einen Freiheitsgrad, d.h. man kann entweder den Druck  $P$  oder die Temperatur  $T$  anpassen und bleibt trotzdem auf der Kurve. Innerhalb der Phasenräume (das sind die Gebiete, welche durch die Phasenkurven abgetrennt werden) existieren dagegen zwei Freiheitsgrade ( $P$  und  $T$ ).

Der Tripelpunkt ist der Punkt  $(T_T; P_T)$ , an dem sich alle drei Kurven treffen. Hier können alle drei Aggregatzustände gemeinsam auftreten, d.h. an dieser Stelle existiert kein Freiheitsgrad mehr. Ein weiterer Punkt ohne Freiheitsgrad ist der kritische Punkt am Ende der Dampfdruckkurve. Ab diesem Punkt gibt es nur noch eine gasförmige Phase. Auch eine Erhöhung des Drucks bei gleichbleibender Temperatur vermag dann das Gas nicht mehr zu verflüssigen.

Phasendiagramme sind wichtig, um z.B. festzustellen, ob auf einem Planeten (oder Mond, siehe Titan) Flüssigkeiten vorkommen können oder um festzustellen, in welchen Atmosphärenschichten es zu Wolkenbildungen kommt. Beim Mars spielt in dieser Hinsicht Wasser und Kohlendioxid (letzteres als Atmosphärgas) eine wichtige Rolle.

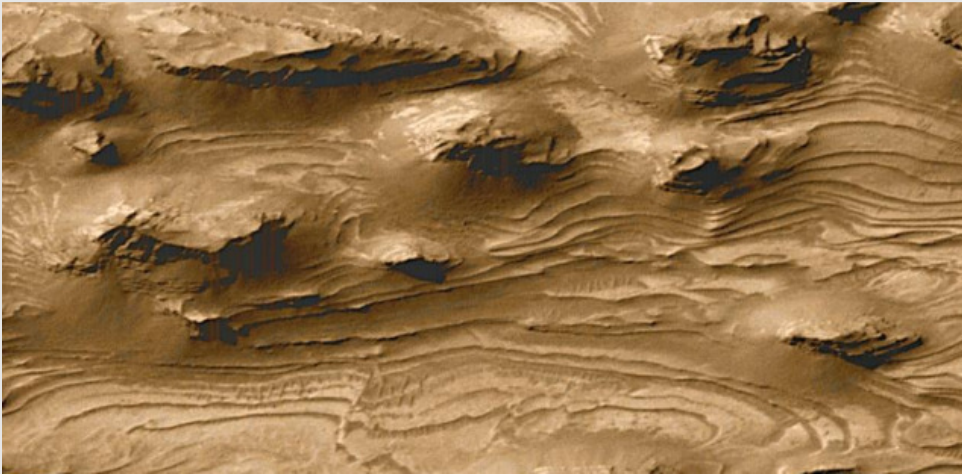


Phasendiagramme von Wasser und Kohlendioxid

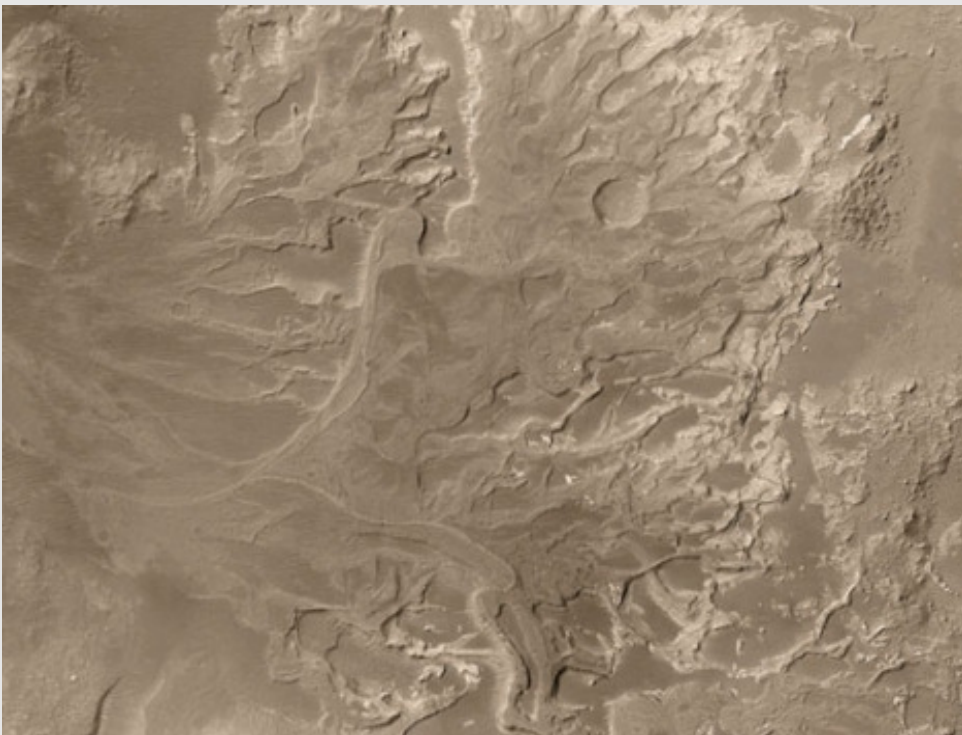
Um Wasserstoff und andere Elemente aus der Umlaufbahn im Marsuntergrund nachzuweisen, hat Mars Odyssey ein Gammastrahlenspektrometer (GRS - *Gamma Ray Spectrometer*) an Bord. Damit wurde die sekundäre Gammastrahlung gemessen, die als Reaktion auf die aus dem Kosmos einfallende primäre Gammastrahlung entsteht und woraus man aus den erhaltenen Spektren die Häufigkeit einzelner chemischer Elemente im Marsboden bestimmen kann. Im Zusammenspiel mit dem THEMIS („*THERmal EMISSION Imaging System*“) -Gerät können damit Aussagen über die mineralogische Zusammensetzung der auf der Marsoberfläche anliegenden Gesteinsformationen getroffen werden. Der eigentliche Clou ist jedoch der integrierte Neutronendetektor mit dessen Hilfe sogenannte epithermische Neutronen nachweisbar sind, die das Vorhandensein von Wasserstoffatomen im Untergrund anzeigen. Da dieser Wasserstoff hauptsächlich gebunden in Form von Wasser vorliegt, lässt sich mit diesem Verfahren primär das Vorhandensein von Wasser (z.B. in Form von Eis) im Marsboden nachweisen.

### Wasser auf dem Mars

Seit dem man auf den Aufnahmen der Viking-Orbiter flußähnliche Strukturen gefunden hat, rätselt man über die Frage, ob es irgendwann einmal in der Geschichte des Mars in größeren Mengen Oberflächenwasser gegeben hat und ob es eventuell sogar noch heute nennenswerte Wasservorkommen – z.B. in Form von Eis – auf dem Mars gibt. Die damit im Zusammenhang stehenden Fragestellungen sind in mehrfacher Hinsicht bedeutsam. Fließendes Wasser kann z.B. auf einem Schlag viele morphologische Strukturen auf der heute staubtrockenen Marsoberfläche erklären, für die es sonst kaum eine vernünftige Deutung geben würde. Insbesondere die vom Mars Global Surveyor gefundenen Sedimentstrukturen können in der Form, wie sie sich dem Betrachter darstellen, nur in einer wäßrigen Umgebung entstanden sein.

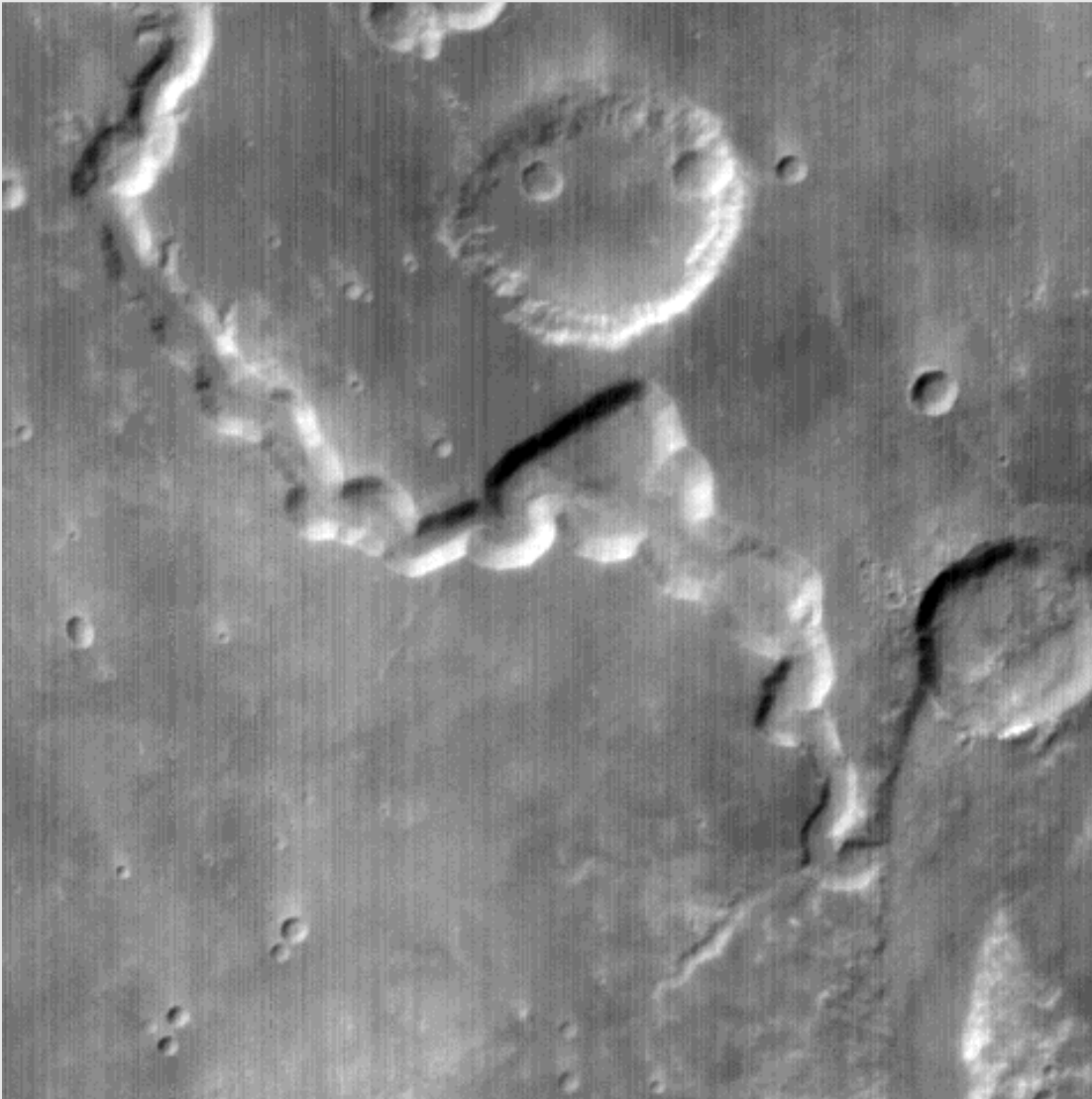


Manche Strukturen ähneln wiederum frappierend ausgetrockneten irdischen Flußtälern oder zeigen Formen, die irgendwie an ein Mündungsdelta erinnern.



Andere, insbesondere großräumige Strukturen sehen so aus, als ob ganze Bereiche von Eis plötzlich aufgeschmolzen sind und das Wasser katastrophenartig abgeflossen ist. Aber auch hier gibt es mehr Fragen als Antworten. Die Volumina der dabei entstandenen Einsturzbecken reichen – auch wenn sie

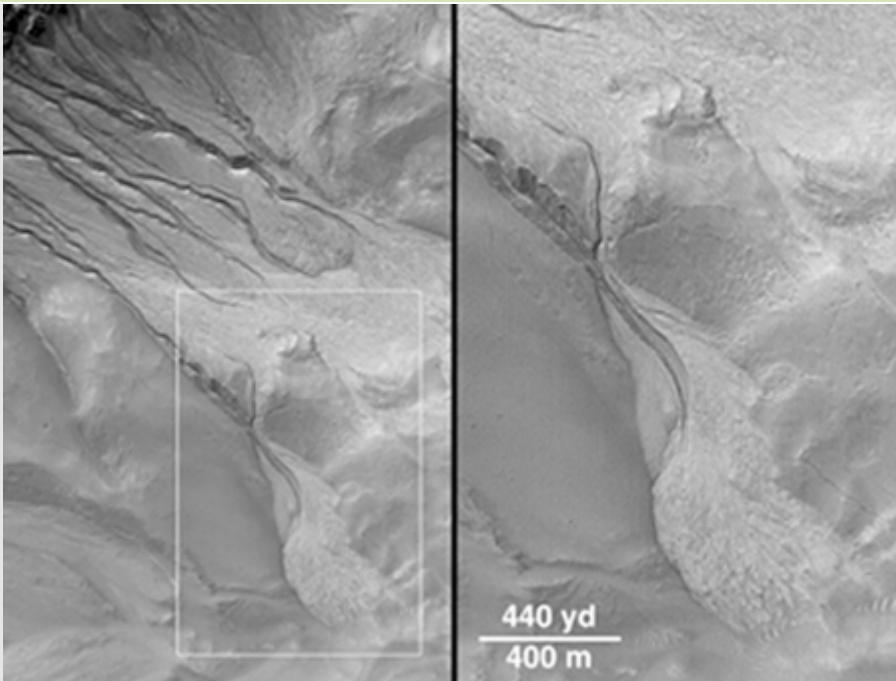
ursprünglich ganz mit Wassereis ausgefüllt waren – wahrscheinlich nicht aus, um die Wassermenge zu liefern, die für das Ausräumen der anschließenden Abflusstäler (Chasmen) notwendig war. Man diskutiert als alternative Erklärungsmöglichkeit, daß hier vielleicht sogenannte „kryoklastische Ströme“ (bestehend aus Trockeneis-Klathrat-Gemischen) eine Rolle gespielt haben.



Nirgal Vallis (Viking)

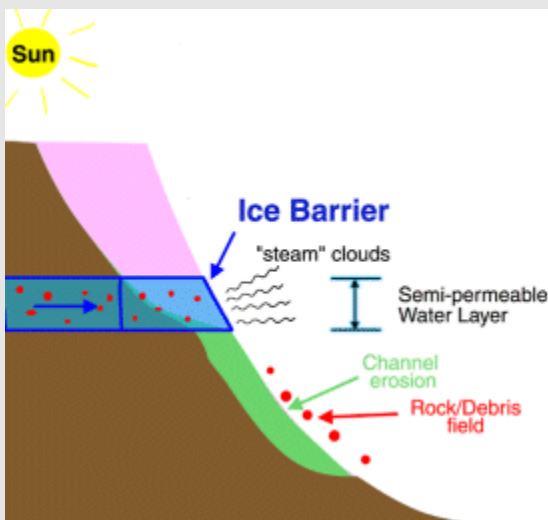
Rätselhaft erscheinen auch die sogenannten Gullies, wie man sie an manchen Kraterrändern findet. Auf der Erde sind derartige Strukturen wohlbekannt. Ohne den Abfluß von Wasser sind sie auf dem Mars jedoch kaum zu erklären. Im Gorgonum-Krater (Durchmesser ca. 12 km) auf der Südhälfte des Mars (Gorgonum Chaos Region) sind solche Ausflußrinnen deutlich zu erkennen. Da sie kaum Anzeichen von Erosion zeigen, muß man wohl annehmen, daß sie unter bestimmten Umständen sogar noch heute aus dem Sickerwasser, welches an den Kraterränder austritt, entstehen können.

Für das Vorkommen von flüssigem Wasser sind die Bedingungen auf dem Mars ausgesprochen widrig wie ein Blick auf das Phasendiagramm beweist. Bei den dort herrschenden Temperaturen und bei dem im Vergleich zur Erde äußerst geringen Luftdruck muß flüssiges Wasser an der Oberfläche sofort gefrieren oder, wenn die Temperaturen am Äquator kurzzeitig über den Gefrierpunkt steigen, sofort verdampfen. Vielleicht ist das Wasser aber so stark mit Salzen angereichert, daß sich der Gefrierpunkt soweit erniedrigt, daß in etwas wärmeren Zeiten (periodische Schwankungen der Rotationsachse?) doch punktuell Grundwasser möglich wird.



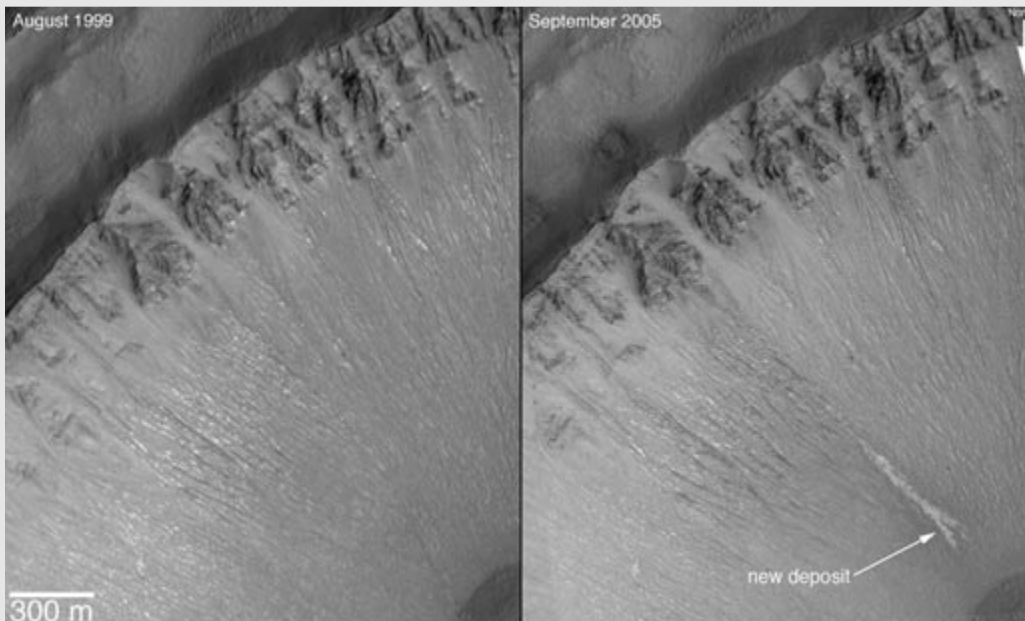
“Gullies“ im Bereich des Gorgonum Chaos. Die scharfen Ränder der Abflußrinnen in dem vergrößerten Ausschnitt weisen auf ein relativ junges Alter dieser durch fließendes Wasser hervorgerufenen Struktur hin.

Auffällig in diesem Zusammenhang ist die Verteilung der gulliartigen Strukturen auf dem Mars. Man findet sie fast ausschließlich an den Rändern von Einschlagkratern, die sich zwischen 30° nördlicher und 60° südlicher Breite befinden. Das ist gerade die Region, wo in warmen Sommern Temperaturen oberhalb des Gefrierpunktes erreicht werden.



Trotz dieser offensichtlichen Hinweise bleibt es trotzdem rätselhaft, unter welchen Bedingungen sich wenige Meter unter der Oberfläche flüssiges Wasser ansammeln kann, um an den Kraterrändern auszutreten. Ein mögliches Szenario könnte etwa folgendermaßen aussehen: Angenommen, es existiert in einigen Metern Tiefe eine dünne Schicht, die mit flüssigen Wasser gesättigt ist. Wenn dieses Wasser an einem Kraterrand durchbricht, dann wird es in der dünnen Marsluft explosionsartig verdampfen. Die dabei verbrauchte Energie wird dem dahinter nachströmenden Wasser entnommen, welches natürlich sofort gefriert und dabei quasi einen Eispfropfen bildet. Das nachfließende Wasser wird gestaut und

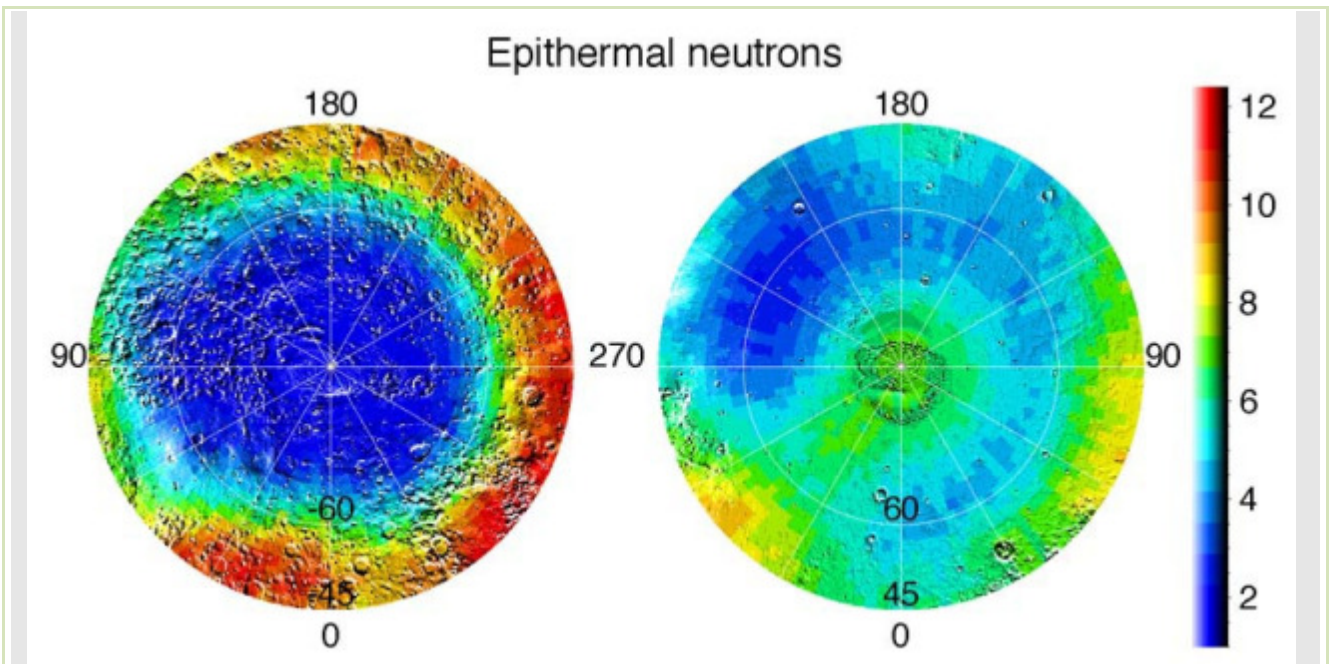
baut dabei einen Druck auf, der irgendwann den Eispfropfen brechen und das Wasser ausfließen läßt. Dabei wird sehr viel Geröll mitgerissen und ein Abflußkanal entsteht.



Diese beiden Aufnahmen eines Kraterrandes (Terra Sirenum-Krater) durch MGS haben einen zeitlichen Abstand von 6 Jahren, wobei die zweite Aufnahme eine Veränderung in Form einer hellen Ablagerung auf der Kraterböschung zeigt. Hier handelt es sich um das bisher deutlichste Anzeichen dafür, daß Gullies durch fließendes und explosionsartig verdampfendes Wasser entstehen und ein rezentes Phänomen sind.

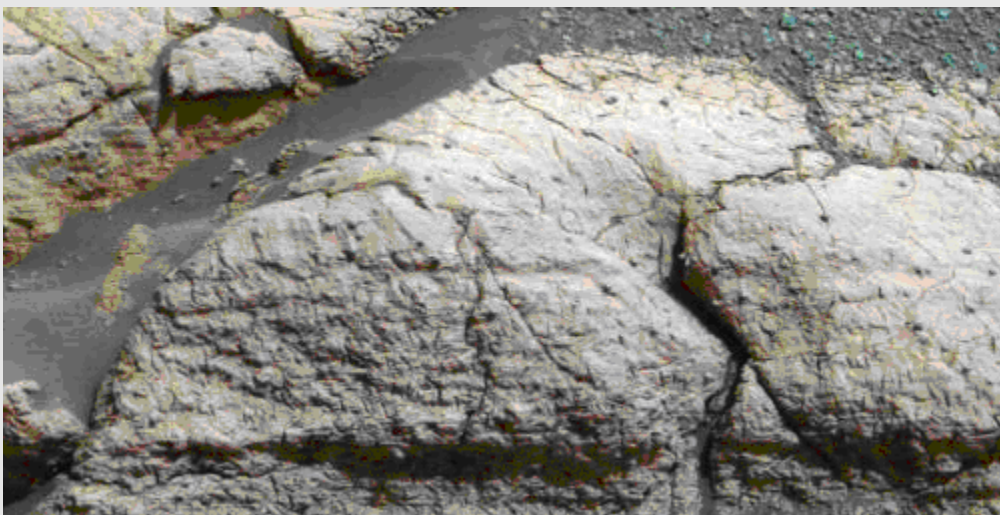
Hinweise auf gefrorenes Wasser in Form von Permafrostboden findet man besonders in den gemäßigten Regionen und Polargebieten des Mars. Die von den Satelliten fotografierten Strukturen ähneln dabei frappierend den Strukturen, die man auch auf der Erde in Sibirien oder im nördlichen Kanada und Alaska findet. Es ist dabei nicht immer leicht zu unterscheiden, welche davon durch Wassereis und welche durch gefrorenes Kohlendioxid (Trockeneis) entstanden sind.

Der erste direkte Hinweis auf die Existenz von sehr großen Wassermengen im Permafrostboden der gemäßigten und polaren Breiten stammt vom Gammastrahlen- und Neutronen-Spektrometer der Mars-Sonde „Mars-Odyssey“. Genaugenommen wurde mit diesem Gerät nicht Wasser, sondern Wasserstoff (der ja in Wasser enthalten ist) nachgewiesen. Durch die dünne Marsatmosphäre kann die kosmische Strahlung permanent die Planetenoberfläche erreichen und sogar einige Meter in sie eindringen. Auf diese Weise werden Atome angeregt worauf sie ihrerseits Gamma- und Neutronenstrahlung aussenden, deren Intensitäts- und Energiespektrum man von einer Umlaufbahn aus messen kann. Daraus lassen sich Informationen über die Verteilung der chemischen Elemente im Marsboden gewinnen. Eine geringe Intensität an sogenannten "epithermischen" Neutronen zeigen dabei Wasserstoff in Tiefen ab etwa einem halben Meter an. Die Messungen ergaben, daß der Mars großflächig mit einem wassereishaltigen Permafrostboden bedeckt ist. Man kann dabei drei Schichten unterscheiden. Die oberste Schicht ist vollkommen ausgetrocknet. Darunter findet man Partikel, die teilweise mit einem leichten Wasserfilm bedeckt sind. Und erst darunter - in z.T. weniger als einem Meter Tiefe - findet man eine Schicht, die zu 60 bis 100% aus Wassereis besteht. Wie mächtig diese Schicht ist, kann aus den Messungen leider nicht abgeleitet werden. Neuere Untersuchungen von Mars Odyssey deuten übrigens darauf hin, daß sich der Mars z.Z. in einem Klimawandel hin zu einer wärmeren Periode befindet.



Verteilung der epithermischen Neutronen um den Südpol (links) und dem Nordpol (rechts). Die rote Farbe kennzeichnet Trockeneis, die blaue Wassereis.

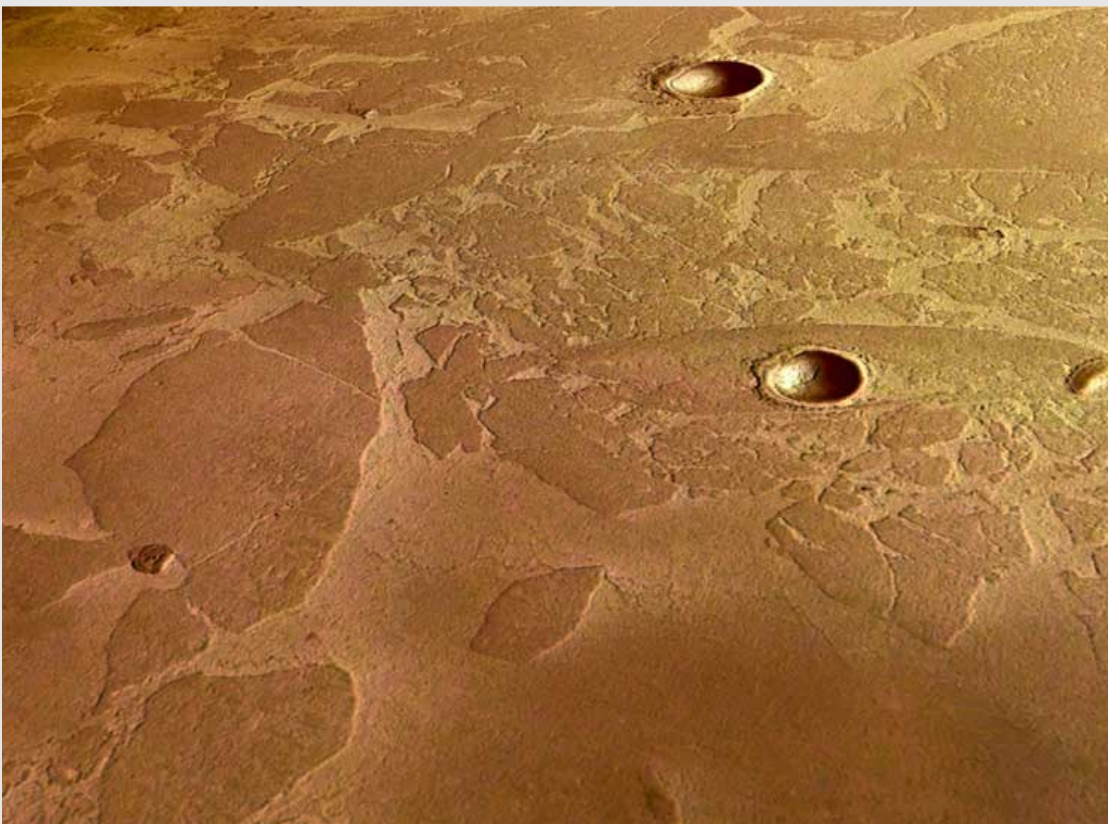
Diese Befunde nährten die Hoffnung, daß man mit Hilfe der Marsrover-Missionen 2004 auch direkte Hinweise auf die Existenz von Wasser vor Ort finden wird. Und man wurde nicht enttäuscht. An den Landstellen von „Spirit“ und „Opportunity“ muß es in der Frühzeit des Mars Wasser in Hülle und Fülle gegeben haben. Das belegen die chemischen Untersuchungen an mehr als einem Dutzend Felsbrocken im Endurance-Krater (Opportunity) und in der Gusev-Ebene (Spirit). Die Entdeckung der Minerale Hämatit und insbesondere Goethit (Nadeleisenerz) mit Hilfe des Mösbauerspektrometers von Spirit gilt es letztes und sicherstes Indiz, daß es auf dem Mars einmal „feuchte“ Zeiten gegeben hat. Auf welche Art und Weise jedoch das Wasser auf den Prozeß der Mineralisation eingewirkt hat, läßt sich mit letzter Bestimmtheit noch nicht sagen. Goethit entsteht z.B. auch an feuchter Luft (Rost) oder bei Berührung mit Wassereis.



Dieser Stein, den man „El Captain“ genannt hat und der von Opportunity untersucht wurde, zeigt Merkmale, die darauf hindeuten, daß er längere Zeit in Wasser gelegen hat. Das betrifft z.B. den Gehalt an Schwefelsalzen, die in der hier gefundenen Form nur in einer „nassen“ Umgebung mineralisiert werden konnten. Einen noch eindrucksvolleren Beweis, daß im Landegebiet des Opportunity-Rovers einmal flüssiges Wasser gegeben hat, lieferten die Messungen an den hellen Gesteinsformationen im

Eagle-Krater. Mit Hilfe des „*Alpha Particle X-Ray Spectrometers*“ (APXS) konnten dabei neben Schwefel noch Chlor und Brom in Konzentrationen nachgewiesen werden, wie man sie auf der Erde nur in den Ablagerungen von ausgetrockneten Salzseen findet.

Daß es auf dem Mars einmal große offene Wasserflächen gegeben hat, beweisen mittlerweile auch eine große Anzahl weiterer Befunde. So gelang der Sonde Mars-Expreß ein wahrhaft aufregendes Foto aus einem flachen Gebiet im Bereich des Elysium Planitia, welches die Geologen in wahre Aufregung versetzte. Sie trauten ihren Augen kaum, als sie darauf große flache, von rötlichem Marsstaub bedeckte Schollen ausmachten, die täuschend irdischen Packeis-schollen ähnelten. Daß diese Interpretation richtig ist, ergibt sich aus einer Vielzahl von morphologischen Details. Einmal ist die Oberfläche außergewöhnlich glatt (wäre das Eis bereits verschwunden, müßten sich der „Untergrund“ abzeichnen und es müßten sich auch komplexere Erosionsspuren abzeichnen) und zum anderen haben die Platten genau die Größe und Form, wie man sie auch aus den Polargebieten der Erde her kennt. Außerdem kann man einige von ihnen paßgenau zusammenschieben was eindeutig darauf hinweist, daß sie irgendwann einmal auseinandergetriftet sind.

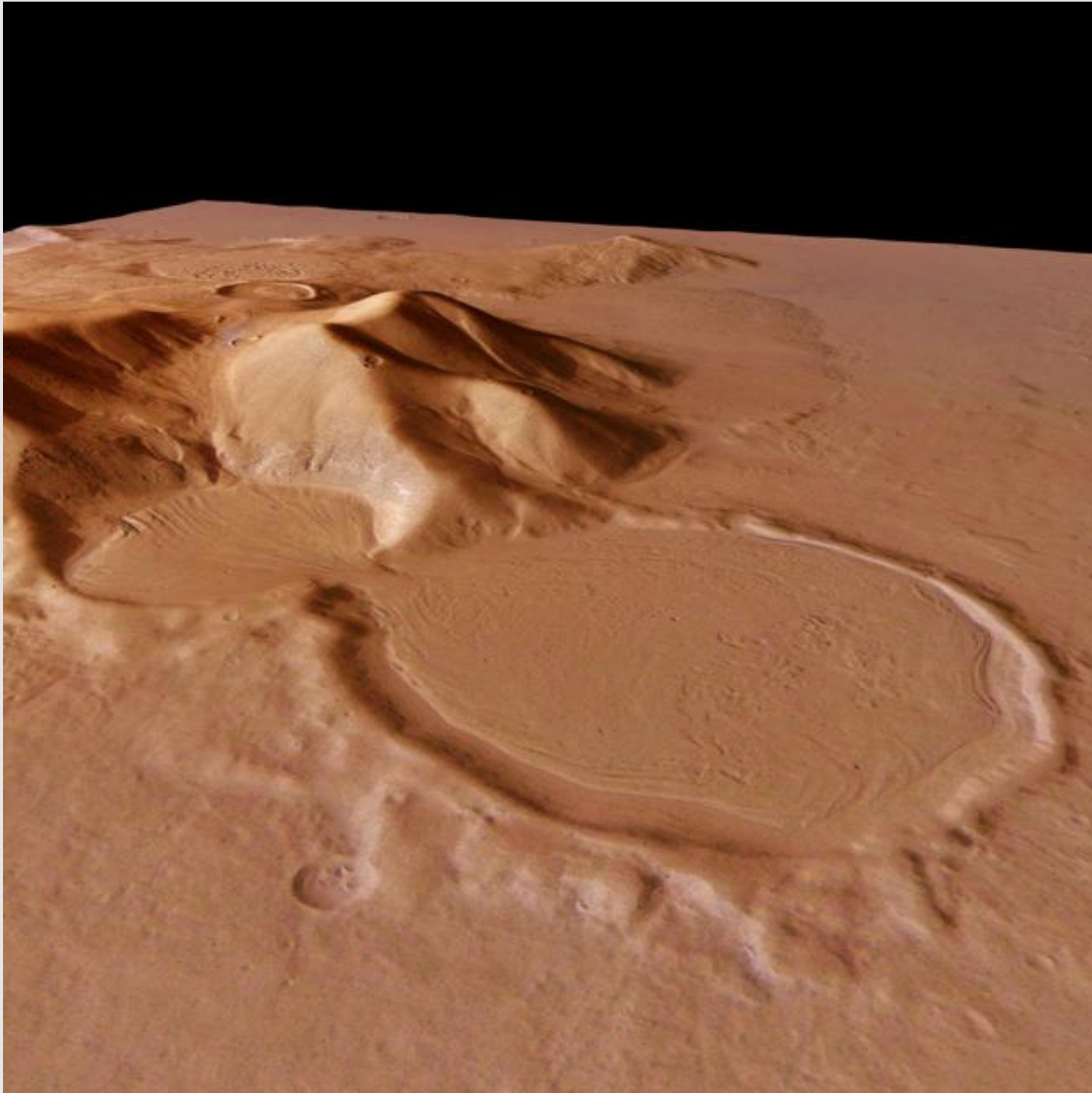


Das ganze kritische Areal hat ungefähr einen Durchmesser von ca. 800 bis 900 Kilometern was ungefähr der Größe der Nordsee entspricht. Als wahrscheinlichste „Tiefe“ (oder Dicke der Eisschollen) wurde ein Wert von ca. 40 m ermittelt. © G.Neukum

Die unmittelbare Nähe der Elysium-Vulkanregion kann einmal für die Aufschmelzung des Permafrostbodens (und damit der Ausbildung von stehendem Oberflächenwasser) und zum anderen für die Abdeckung mit vulkanischen Aschen verantwortlich gemacht werden wobei Letztere die Sublimation des Eises effektiv verhinderten. Eine weitere Überraschung ist das weitgehende Fehlen von Impakten auf den Packeisflächen. Daraus folgt, daß sich dieser See erst vor ungefähr 5 - 6 Millionen (!) Jahren gebildet haben kann.. Die Elysium-Vulkane waren also - wenn diese Abschätzungen stimmen - noch vor geologisch extrem kurzer Zeit aktiv.

Sehr eindrucksvoll sind auch die Anzeichen von relativ jungen Vergletscherungen auf dem Mars, wie folgende perspektivisch gerechnete Aufnahme eines ehemaligen Blockgletschers am östlichen Rand

der Hellas-Ebene zeigt. Sie wurde mit der „*High Resolution Stereo Camera*“ (HRSC) der ESA-Sonde Mars Express erhalten.



„Stundenglaskrater“ © ESA, G.Neukum

Aus einem 3.500 Meter hohen Bergmassiv bewegte sich ein Eisstrom mit einem hohen Anteil an Felsschutt, zunächst in einen neun Kilometer großen schüsselförmigen Einschlagkrater (links), der dadurch fast bis zum Rand aufgefüllt wurde. Einen derartigen Eisstrom nennt man einen Blockgletscher. Wie ein zäher, schliriger Brei schob er sich - begünstigt durch das Gefälle - weiter in einen 500 Meter tiefer gelegenen, 17 Kilometer durchmessenden Krater. Auf diese Weise entstand schließlich diese eieruhrartige Struktur, welche der Formation ihren Namen gegeben hat. Eine genaue Analyse der morphologischen Eigenschaften dieser und anderer glazialen Strukturen auf dem Mars hat ein Alter von nur einigen Millionen Jahren ergeben (W.HEAD et. al., 2005). Die Gletscher müssen sich also in einer damals wärmeren und vielleicht auch dichteren Atmosphäre gebildet haben. Sie wurden schließlich, als sich das Klima änderte, inaktiv oder bildeten sich mangels Eisnachschiebs zurück. Das noch vorhandene Resteis wird seitdem durch eine Staubschicht vor Sublimation geschützt.

Daß es auch noch freie Eisflächen auf der Marsoberfläche gibt, zeigt ein Photo von Mars Express vom 2. Februar 2005. In einem Krater von etwa 35 Kilometer Durchmesser befindet sich eine flache Eislinse von maximal einigen Dezimetern Mächtigkeit, die einem zentralen Dünenfeld mit einer Höhe von rund 200 m aufliegt. Im Bereich der Marspole sind innerhalb von Kratern die Druck- und Temperatur-

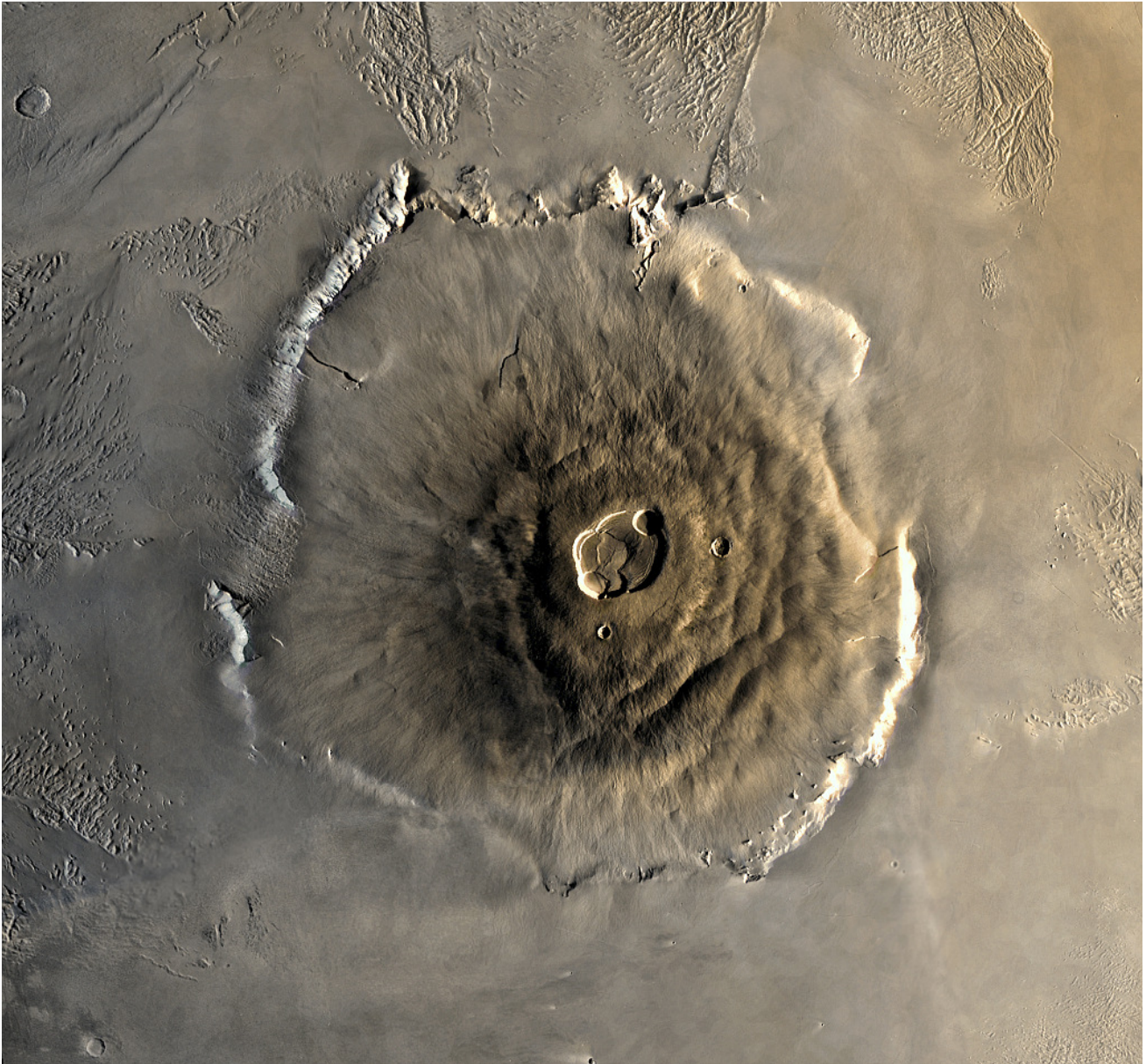
verhältnisse so, daß zumindest Sublimation von Wassereis erschwert ist und es sich deshalb über einen längeren Zeitraum auch ohne Staubabdeckung halten kann.



Bei all diesen Entdeckungen darf man nicht darüber hinweg sehen, daß der Mars schon seit einigen Milliarden Jahren ein kalter, staubtrockener Planet ist. Alle größeren, von flüssigen Wasser oder glazial entstandenen Landschaften stammen mit hoher Wahrscheinlichkeit aus der Frühzeit des Mars. Das es einst einen Ozean wie auf der Erde gegeben haben könnte, ist nach neueren Untersuchungen eher unwahrscheinlich. Dazu sind die mit dem „*Thermal Emission Spectrometer*“ von MGS gefundenen Karbonatgesteine zu ungleichmäßig verteilt und auch zu geringmächtig. Es ist eher denkbar, daß sie in Reaktion mit dem in der Marsatmosphäre einst in größerer Menge vorhandenen Wasserdampf mit dem allgegenwärtigen Staub entstanden sind. Außerdem gibt es keine großflächig verteilten Tone, die sich als Verwitterungsprodukte in einer aus genügend Kohlendioxid und Wasserdampf bestehenden Atmosphäre hätten bilden müssen. Wenn man fragt, wo das viele Wasser geblieben ist, welches ohne Zweifel nach der Entstehung des Mars vorhanden war, da muß man sagen: Ein Teil ist in den Kosmos entwichen, ein anderer Teil in den Polkappen gebunden und der Rest ist in den gemäßigten Zonen im Permafrostboden enthalten wo es unter günstigen Bedingungen noch heute in Erscheinung treten kann.

Eine der wohl eindrucksvollsten Landschaften auf dem Mars ist die Tharsis-Region mit ihren imposanten Schildvulkanen, die alles in den Schatten stellen, was man von der Erde her in dieser Beziehung kennt. Sie hat einen Durchmesser von ungefähr 5000 Kilometer und erhebt sich rund 10 Kilometer über die nördlichen Ebenen. Tharsis stellt eine dramatische Ausbeulung des Mars dar, auf der noch zusätzlich 13 und z.T. überaus gewaltige Schildvulkane aufgesetzt sind. Auf seiner Nordwestflanke findet man z.B. die drei mächtigen Schilde Ascreaus Mons, Pavonis Mons und Arsia Mons. Nordwestlich davon erhebt sich mit Olympus Mons der mächtigste Vulkan des Sonnensystems:

Höhe ca. 24 Kilometer in bezug auf die nördliche Ebene (oder genau 21200 Meter über der Referenzhöhe, wie die Messungen des „Orbiter Laser Altimeters“ des „Mars Global Surveyor“ zeigen), 550 Kilometer Basisdurchmesser, wobei dessen Rand überraschenderweise ein z.T. 6000 Meter hoher Steilhang abschließt. Auf dem Gipfel findet man ausgedehnte Calderastrukturen mit einer Ausdehnung von ca. 66 x 83 Kilometer, die aus sieben sich überlappenden kreisförmigen und unterschiedlich großen Einbrüchen bestehen.



Olympus Mons, der größte Vulkan des Sonnensystems

Ein extrem flacher und deshalb auf dem ersten Blick unscheinbarer Schildvulkan ist Alba Patera nordöstlich von Olympus Mons. Er überragt die Umgebung zwar nur um knapp 4 Kilometer und ist auch bei einem Basisdurchmesser zwischen 450 und 1000 Kilometern (je nachdem, in welcher Höhe man die Basis ansetzt) extrem flach (Böschungswinkel zwischen  $0.1^\circ$  bis maximal  $2^\circ$ ). Volumenmäßig ist er jedoch der größte Vulkan des Sonnensystems. An seinen Flanken findet man ein kompliziertes System von ringförmigen Brüchen die darauf hinweisen, daß die Tharsis-Aufwölbung auch nach dem

Abklingen der vulkanischen Tätigkeit noch nicht abgeschlossen war. Der Ausfluß der Laven erfolgte während seiner Aktivitätsperioden oft innerhalb von Lavaröhren, die sich radial von der Gipfelcaldera ausgehend über die Flanken des Vulkans erstrecken. Sie sind sehr lang (manche lassen sich bis über eine Länge von 100 km verfolgen) und sie verhinderten ein schnelles Auskühlen und damit Erstarren der Laven.

Der wichtigste Unterschied zwischen den Schildvulkanen auf dem Mars und denen auf der Erde ist zweifellos ihre Größe und ihre geringe Hangneigung. Nur die bedeutend geringere Masse des Mars und die offensichtlich größere Krustendicke (man schätzt sie unter Olympus Mons auf ca. 250 km) verhindert, daß derartige Vulkanbauten unter ihrem eigenen Gewicht kollabieren. Dadurch, daß es auf dem Mars im Gegensatz zur Erde keine beweglichen Platten gibt, hatten die Vulkane auch mehr Zeit für ihren Aufbau, bis sie ihre heutige Größe erreichten. Auf der Erde – und man kann das sehr schön am Beispiel des Hawaii-Archipels beobachten – ist so etwas nicht möglich, da durch die Plattenbewegungen der Kraterschlott nur geologisch kurze Zeit über dem „Hot Spot“ mit der Magmakammer verbleibt. Die mögliche Aktivitätsdauer wird auf diese Weise durch die Plattendrift effektiv begrenzt. Außerdem waren die Eruptionsraten, d.h. die Menge des bei einem Ausbruch geförderten Materials auf dem Mars bedeutend größer, was sich wahrscheinlich auch durch die geringe Oberflächenschwerkraft erklärt.

Neben dem mehr effusiven Vulkanismus der Tharsis- und der Elysium-Region findet man auf dem Mars an wenigen Stellen auch Hinweise auf einen Vulkanismus mehr explosiver Art. Ein Beispiel ist der sehr alte Vulkan Tyrrhena Patera in der Hesperia Planum-Region.

Die Magmareservoirs der Schildvulkane des Mars scheinen nach Meinung der Vulkanologen tiefer zu liegen als auf der Erde. Sie lieferten Laven vom basaltischen Typ mit geringer Viskosität und die deshalb über viele Hundert Kilometer fließfähig waren. Inwiefern es in der Vergangenheit Ausbrüche gegeben hat, die in erster Linie Lockerprodukte wie z.B. Tuffe und Schlacken gefördert haben, ist noch nicht abschließend geklärt. Derartige Eruptionen werden auf der Erde gewöhnlich als „plinianisch“ bezeichnet, da deren Prototyp der von PLINIUS DEM JÜNGEREN (62-113) beschriebene Ausbruch des Vesuvus im Jahre 79 ist. Auf dem Mars könnten aufgrund der geringeren Schwerkraft die dabei auftretenden Eruptionswolken in größere Höhen aufsteigen als auf der Erde und dabei das Material großflächiger verteilen. Außerdem diskutieren einige Geologen, ob es in der aktiven Phase des Marsvulkanismus verstärkt zu sogenannte pyroklastische Strömen gekommen ist, die man auf der Erde als „Glutwolken“ bezeichnet und die eine verheerende Wirkung entfalten können (z.B. 1902 Mont Pele´e auf Martinique, 1968 Mayon, Philippinen). Derartige „Glutwolken“ führen zur Entstehung von Ignimbriten, die dann in der Nähe von Vulkanen größere Flächen bedecken sollten. Leider lassen sie sich mit den Methoden der Fernerkundung von morphologisch ähnlichen Formationen schlecht abgrenzen, so daß ihre Existenz auf dem Mars als nicht gesichert gilt.

Viele ebene Bereiche in den Vulkanregionen sind das Ergebnis von ausgedehnten Lavaflüssen aus benachbarten Vulkanen oder stammen aus Spalteneruptionen. Dabei wurden z.T. riesige Depressionen in mehreren Episoden mit flüssigem Gestein aufgefüllt. Beispiele dafür sind Hesperia Planum und Lunae Planum. Auch manche Schichtstrukturen an den steilen Flanken des Valles Marineris ähneln morphologisch denen, die man von irdischen Flutbasalten her kennt. Die Mächtigkeit dieser Gesteinsschichten übersteigt dabei an manchen Stellen die 5000-Meter-Marke.

Eine detaillierte Untersuchung der Tharsis-Region hat ergeben, daß dieses Gebiet bereits sehr früh in der Marsgeschichte entstanden ist. Während der vulkanisch aktiven Phase wurden dabei mehr als 300 Millionen Kubikkilometer Gestein gefördert und abgelagert. Dieser Vorgang war mit einer starken Entgasung verbunden, bei der sehr viel Kohlendioxid in die Atmosphäre gelangte. Der Wassergehalt des Magmas wird auf 1.8 bis 2 Volumenprozent geschätzt. Dieses Wasser könnte während der Ausbrüche aufgrund der Druckentlastung freigesetzt und in Form von Wasserdampf in die Atmosphäre entlassen worden sein. Der daraufhin in der Atmosphäre einsetzende Treibhauseffekt – so eine Hypothese – führte letztendlich zu den Umweltbedingungen, unter denen flüssiges Wasser zumindest eine Zeit lang in der Frühgeschichte des Mars eine wichtige geomorphologische Rolle gespielt hat.

Eine Gesteinsprobe vom Mars stellt ohne Zweifel der Shergotty-Meteorit dar, einem ca. 5 kg schweren feinkörnigen Basaltbrocken, der 1865 in Indien gefunden wurde und wahrscheinlich aus der Tharsis-Region stammt. Eine genaue Bestimmung des „Bestrahlungsalters“ (das ist die Zeit, in der er der kosmischen Strahlung ausgesetzt war) ergab, daß dieser Meteorit vor ungefähr 175 Millionen Jahren den Planeten verlassen haben muß. Die Analyse seiner mineralogischen Zusammensetzung erbrachte außerdem das Ergebnis, daß die Gesteins-schmelze, aus dem er erstarrte, ursprünglich bis zu 2% Wasser enthalten hat. Andernfalls wären die Menge und die Struktur der reichlich in ihm enthaltenen Pyroxen-Körner nicht erklärbar. Dieses im Magma gelöste Wasser wurde, nachdem die Schmelze an die Marsoberfläche gelangt war, in Form von Dampf an die Marsatmosphäre abgegeben. Heute enthält der Meteorit deshalb so gut wie kein  $H_2O$  mehr (nur noch ca. 130-350 ppm). Dieser indirekte Befund bestätigt demnach die Annahme, daß ein beträchtlicher Teil des Wassers auf dem Mars letztendlich dem Marsvulkanismus zu verdanken ist.

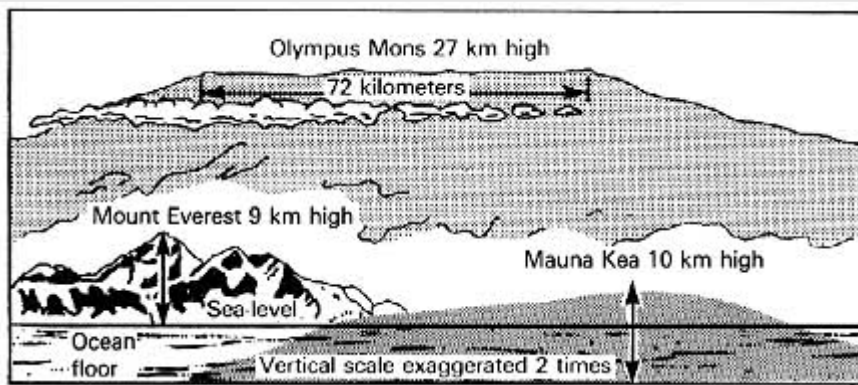
Bestimmte geologische Strukturen, die auf den Aufnahmen von Mars Express und Mars Global Surveyor zu sehen sind, weisen darauf hin, daß es wahrscheinlich noch vor weniger als 100 Millionen Jahren aktiven Marsvulkanismus gegeben hat. Insbesondere phreatische Prozesse im Bereich der Tharsis Montes, die zum Hervorbrechen von regelrechten Schlammströmen im unteren Teil der Vulkanschilde führten, haben diesbezüglich typische morphologische Merkmale hinterlassen (z.B. ein Netzwerk von auffälligen „Flußtälern“). An einigen Stellen sind sogar Strukturen auszumachen die darauf hindeuten, daß lokal vulkanische Prozesse noch vor 2 Millionen Jahren stattgefunden haben.

Bei der Auswertung von Bildern der Mars Orbiter Camera des „Mars Global Surveyor“ wurde ein weiteres und offensichtlich recht junges vulkanisches Gebiet im Bereich von Elysium Planitia und Amazonis Planitia entdeckt. Es liegt etwas südöstlich von Elysium Mons, dem mit 12 Kilometern höchsten Schildvulkan dieser Region. Die durch Spalten bzw. Verwerfungen ausgetretene Lava mit Temperaturen von über 1000°C hat vor geologisch kurzer Zeit (zwischen 10 und 100 Millionen Jahren) große Mengen Eis, welches im Permafrostboden des Mars eingelagert war, plötzlich aufgeschmolzen. Dabei entstanden in Flußrichtung ausgedehnte, als fluvatile bezeichnete erodierte Landschaftsformen. Die großen Schildvulkane der Elysium-Aufwölbung (Elysium Mons, Albor Tholus und Hecates Tholus) selbst sind dagegen rund 2 Milliarden Jahre alt.

Aus all diesen Befunden kann man die Schlußfolgerung ziehen, daß der Mars auch heute noch nicht völlig tektonisch inaktiv ist. Für rezenten Vulkanismus gibt es bis jetzt (2006) jedoch keine Anzeichen.

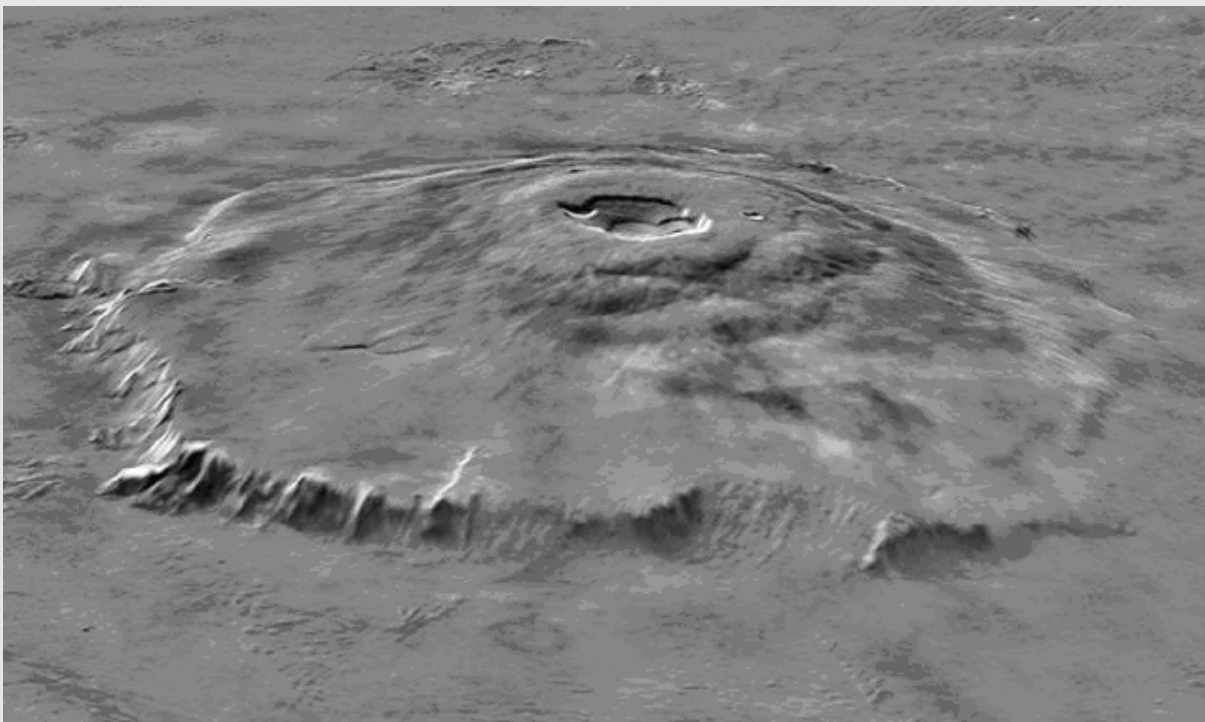
### Olympus Mons

Den manchmal unter extrem guten Bedingungen in einem Fernrohr sichtbaren Fleck in der Tharsis-Region - von GIOVANNI SCHIAPARELLI (1835-1910) als Nix Olympica („Schnee des Olymp“) benannt - ist, wie man seit Mariner 9 weiß, der größte Schildvulkan des Sonnensystems. Deshalb wurde er auch in „Berg des Olymp“ - Olympus Mons - umbenannt. Um seine Größe zu veranschaulichen reicht es aus, ihn mit dem größten Schildvulkankomplex der Erde, die aus dem Pazifik herausragende Insel Hawaii, zu vergleichen:



Die Ausmaße sind wirklich gigantisch: Basisdurchmesser ~ 600 km, Höhe 22 km (vom mittleren Radius aus gemessen), Gipfelcaldera 80 km Durchmesser und 3 km tief.

Dank der beeindruckenden Aufnahmen durch MGS und Mars Express gibt es einiges über diesen Vulkan der Superlative zu berichten.



Auffällig sind die steilen, bis 7 km hohen und fast senkrechten Abbrüche am Fuß des Vulkans sowie die komplexe, aus insgesamt 7 Einzelkratern bestehende Gipfelcaldera. Der Vulkan selbst ist über viele Hunderte von Millionen Jahren ganz allmählich über einem ortsfesten „hot spot“ entstanden, in dem aus dem Gipfelbereich und auch über Sekundärkrater an den Flanken episodisch in sehr großen Mengen dünnflüssige basaltische Lava ausgeflossen ist. Auf der Erde ist eine so lange Aktivitätsphase nicht möglich, da aufgrund der Kontinentaldrift die Platte mit dem Vulkan langsam über den ortsfesten

Mantelplume hinweg geschoben wird, was im Fall von Hawaii zu einer langen Kette von einzelnen Inselvulkanen geführt hat. Nur die Inseln, die sich noch über dem „hot spot“ befinden, zeigen vulkanische Aktivitäten.

Olympus Mons krönt mit einer Anzahl weiterer riesiger Schildvulkane die sogenannte Tharsis-Ausbuchtung. Sie entstand wahrscheinlich bereits vor 3.5 Milliarden Jahren, als ein riesiger Mantelplume die Marskruste erreichte und in Form eines Hitzedomes nach außen drückte. Die dabei entstandenen Vulkanbauten förderten über eine sehr lange Aktivitätsdauer (die sich bis in die geologische Gegenwart fortsetzte) riesige Mengen dünnflüssiger basaltischer Laven, die Schicht um Schicht erstarrten und die Schilde immer weiter wachsen ließen. Das ist in diesem Ausmaß nur aufgrund der geringen Oberflächengravitation möglich. Auf der Erde wäre ein Schildvulkan wie Olympus Mons längst unter seinem eigenen Gewicht kollabiert.

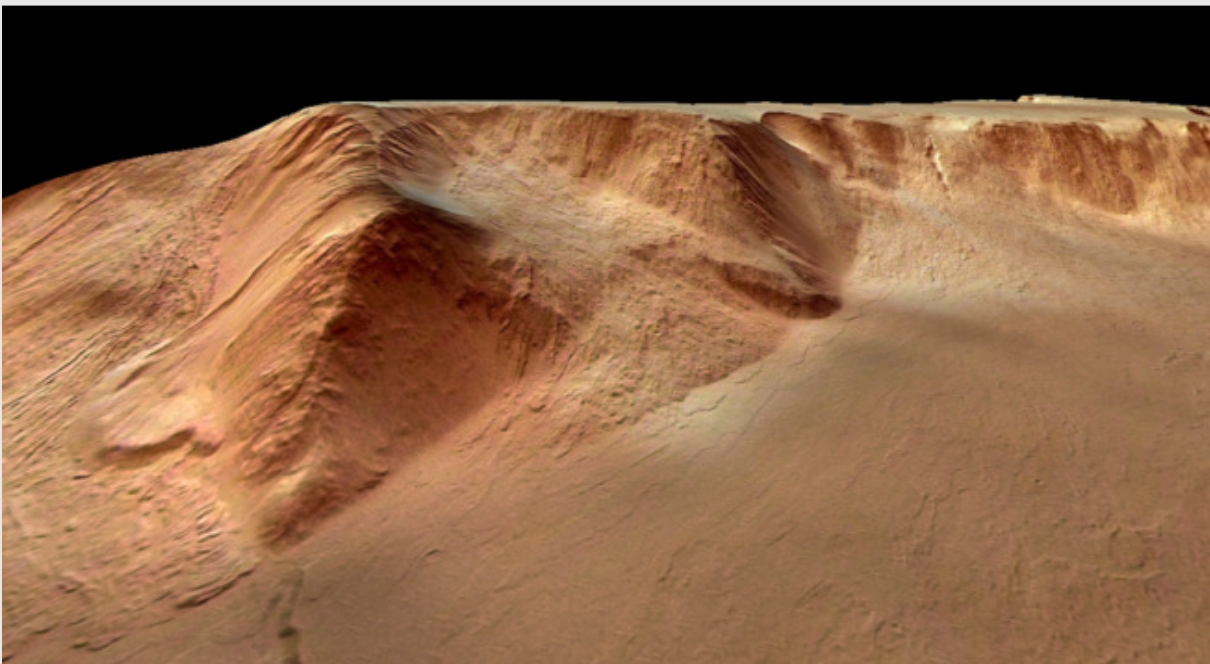
Außerdem entstand im südlichen Teil der Tharsis-Region ungefähr zeitgleich ein riesiges Grabensystem mit einer Länge von 5000 km und einer Breite von bis zu 100 km. Es handelt sich dabei um das Valles Marineris, welches nach der Marssonde Mariner 9 benannt ist, die diesen Grabenbruch zum ersten Mal fotografieren konnte. Man vermutet, daß dieser „Riß“ als Reaktion auf eine Ausdünnung der Marskruste entstanden ist, als während der hesperianischen Periode das Tharsisgebiet kontinuierlich aufgewölbt wurde.



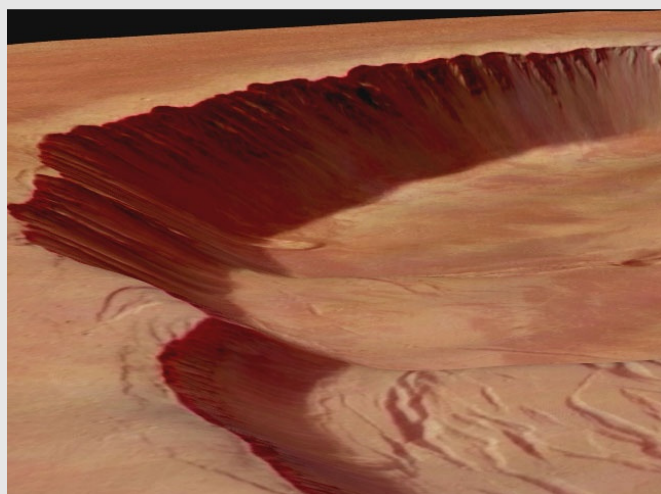
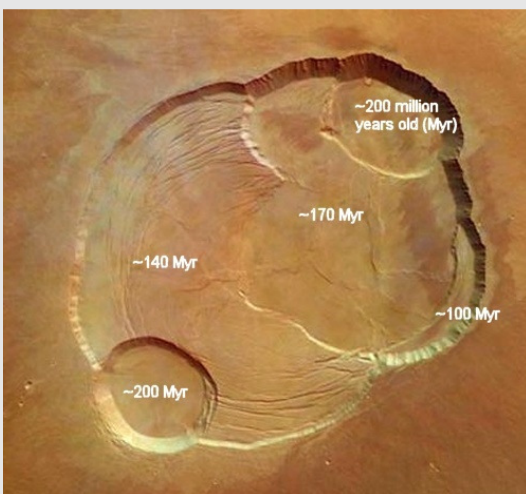
Auf den Flanken des Vulkans konnten eine Vielzahl von Strukturen gefunden werden, die Lavaflüsse, offene und geschlossene Lavaröhren (z.T. mit ringförmigen Einbrüchen) aber auch glaziale Geländeformen (insbesondere an den steilen Abbrüchen und im Bereich der Gipfelcalderen) darstellen. Die perspektivische Aufnahme des westlichen Teils der Gipfelcaldera mit der hochauflösenden Stereokamera HRSC (Mars Expreß) zeigt z.B. Schuttfächer und Fließstrukturen die darauf hindeuten, das Lava, vor etwa 200 bis 20 Millionen Jahren ausgeflossen ist und dabei eine Eisschicht geschmolzen hat (NEUKUM, 2005). Das Vorkommen von Eis und Schnee auf den Riesenvulkanen der Tharsis-Aufwölbung läßt sich verstehen, wenn man von einem periodischen Klimawechsel in der Geschichte des Mars ausgeht. Schon lange ist bekannt, daß sich die Neigung der Rotationsachse des Planeten gegenüber seiner Bahnebene (heute 23°) mit der Zeit unvorhersehbar ändern kann, da die stabilisierende Wirkung eines größeren Mondes fehlt. FORGET et.al. haben nun mittels eines Klimamodells untersucht was passiert, wenn sich die Neigung der Rotationsachse auf 45° erhöht. In

diesem Fall verstärkt sich die Sonneneinstrahlung in den Polargebieten und es konnte durch Sublimation immer mehr Wasserdampf in die Marsatmosphäre gelangen. Aufgrund vorherrschender Westwinde schlug sich dieser Wasserdampf ausschließlich an den Westflanken der vier großen Tharsis-Vulkane - und zwar als Schnee - nieder. Die Menge pro Jahr, die das Modell vorhersagt, lag zwischen 30 und 70 Millimeter. Dieser Schnee hat sich dann ähnlich wie auf der Erde über längere Zeiträume hinweg in Gletschereis von mehreren Hundert Meter Mächtigkeit verwandelt. Tatsächlich sind auf den Bildern der Sonden Mars Express, Mars Global Surveyor und Mars Odyssey genau am westlichen Fuß der vier Vulkane riesige Schuttfächer zu sehen, die Geologen zufolge von Gletschern stammen.

Eine andere Theorie geht davon aus, daß das Wasser direkt aus dem Magma stammt und unter der Wirkung von hydrothermalen Prozessen im Gipfelbereich ausgetreten ist. Daraus sollen sich dann die Gletscher gebildet haben, deren Auswirkungen auf die Morphologie der Calderaabbrüche heute auf den 3D-Aufnahmen zu beobachten sind.



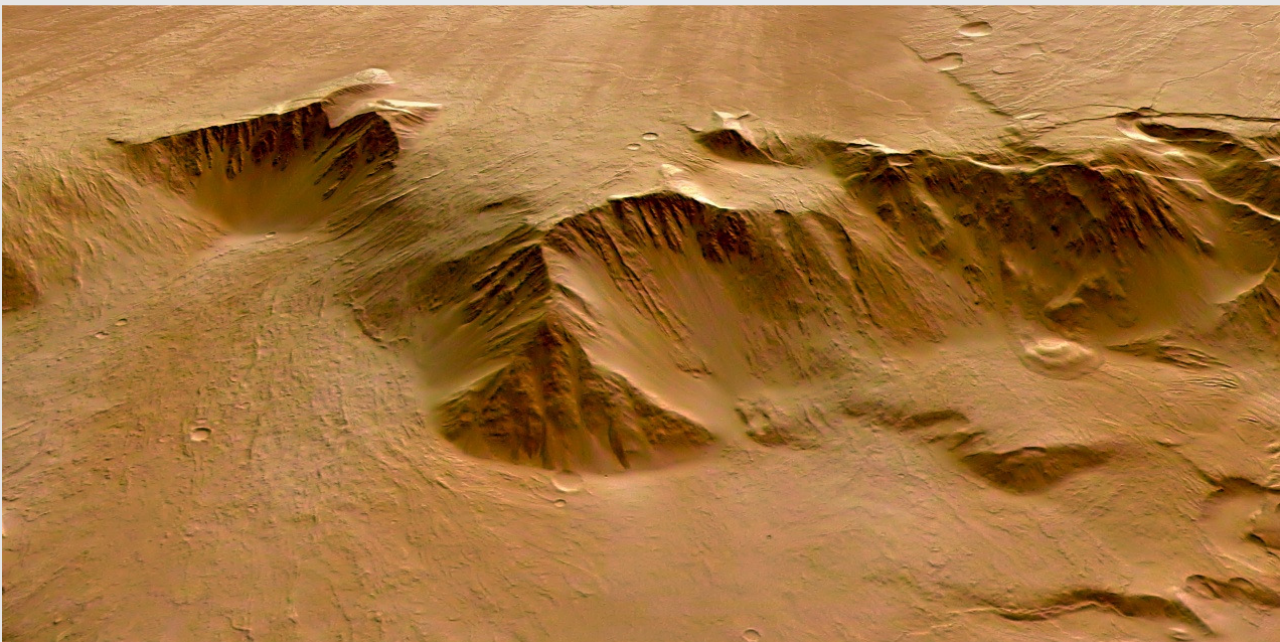
Fließstrukturen im Bereich der westlichen Gipfelcaldera von Olympus Mons, die durch das Schmelzen von Eis aufgrund austretender Lava entstanden sind.



Die Gipfelcaldera von Olympus Mons besteht aus 7 überlappenden und weitgehend kreisförmigen Einbrüchen mit scheinbar unterschiedlichen Alters. Die Datierung erfolgte - wie bei Marslandschaften üblich, über das Zählen von Einschlagkratern in Abhängigkeit von ihrer Größe. Flächen mit geringer Impaktdichte sind demnach jünger als Flächen höherer Kraterdichte.

Das Paradoxon, das ältere Calderen offenbar tiefer liegen als jüngere, erklärt sich durch die Fehlerbreite der zur Datierung eingesetzten Methode. Aus dem Mittelwert läßt sich vielmehr ableiten, daß die einzelnen Gipfelcalderen innerhalb von wenigen Millionen Jahren vor ungefähr 150 Millionen Jahren entstanden sind. Deshalb ist die Wahrscheinlichkeit hoch, daß Olympus Mons (und die anderen großen Schildvulkane der Tharsis-Region) gegenwärtig nur in einer Ruhephase verharren und jederzeit wieder ausbrechen können. Die jüngsten Lavaflüsse, deren Alter nach der gleichen, von G.NEUKUM und W.K.HARTMANN entwickelten Methode bestimmt wurde, werden sogar auf lediglich 2 bis 4 Millionen Jahre datiert. Unter den Planetologen ist diese Entdeckung eine der bisher überraschendsten Ergebnisse der Mars Expreß-Mission der ESA.

Sehr eindrucksvoll und ohne Beispiel im Sonnensystem sind auch die Abbruchkanten im unteren Teil des Vulkanschildes, die nach Messungen der Sonde Mars Expreß eine Höhe von bis zu 7 km aufweisen. Man erkennt riesige erstarre Lavaströme, die einst über die Kanten hinweg-flossen und sich nach einer Richtungsänderung in die Ebenen am Fuß des Vulkans ergossen. Aus Kraterstatistiken läßt sich ableiten, daß ihr Alter ungefähr 200 Millionen Jahre beträgt. Die Abbruchkante, die sich über 550 km um den Vulkan herum verfolgen läßt, entstand nach einer kontrovers diskutierten Hypothese, als entlang einer Schwächezone der untere Teil des Vulkanschildes instabil wurde und wegbrach.



Das von den Hängen nachgerutschte und weiter in die Ebene transportierte Material sammelt sich in Form einer riesigen Aureole um die Vulkanbasis. Es gibt ernsthafte Hinweise darauf, daß zumindest ein Teil des Materialtransportes glazial, d.h. durch Gletscher, erfolgte.

Die direkte Marsoberfläche konnte im Jahre 1976 durch die Lander der beiden Viking-Sonden und 1997 – und zwar unter außergewöhnlich großer öffentlicher Anteilnahme - durch den Mars-Pathfinder mit seinem Marsmobil Sojourner genauer in Augenschein genommen werden. Gerade die Fahrt des Letzteren über die Marsoberfläche ist zum ersten gewaltigen Medienereignis des Internetzeitalters geworden. So wurde z.B. die Web-Site der NASA innerhalb kürzester Zeit weit über 600 Millionen Mal nachgefragt. Diese Medienpräsenz konnten die beiden 2004 gelandeten Rovers „Spirit“ und „Opportunity“ nicht mehr erreichen, obwohl ihre wissenschaftlichen Ausbeute die von Sojourner weit übertreffen.

Mars Pathfinder erreichte am 4. Juli 1997 nach genau 7 Monaten Flugzeit sein Zielgebiet im nördlichen Teil des Ares Valley – einem riesigen Mündungsgebiet prähistorischer Flußsysteme. Der vorausberechnete Landeplatz wurde dabei um lediglich 20 Kilometer verfehlt. Einen Tag später konnte der Rover bereits den Lander verlassen und erreichte über eine Rampe die Marsoberfläche.

Sojourner war mit einer Stereokamera und diversen Farbfiltern ausgestattet. Damit konnten Gesteinsbrocken quasi in verschiedenen Spektralbereichen aufgenommen werden. Außerdem war der Rover, der eher einem Spielzeugauto glich als einem ausgeklügelten wissenschaftlichen Gerät, mit einem Alpha-Proton-Röntgenspektrometer (APXS) ausgestattet, mit dessen Hilfe sich die chemische Zusammensetzung der Marsgesteine bestimmen ließ.

Mars-Pathfinder ging in einem mit vielen kleinen und mittleren Steinen bedeckten weitgehend ebenen Gebiet nieder. In einiger Entfernung lassen sich einige kleine Hügel und Erhebungen ausmachen, die teilweise zu Kraterrändern gehören. Auf Detailaufnahmen des Landegebietes aus der Marsumlaufbahn erkennt man stromlinienförmige Strukturen um Einschlagkrater, die darauf hindeuten, daß das Gebiet vor mehreren Milliarden Jahren einmal durch ein wahrscheinlich katastrophales Flutereignis überformt worden ist. Die von Pathfinder fotografierten und von Sojourner untersuchten Gesteine bestätigten diesen Befund. Auf den Photos erkennt man z.B. einige gerundeten, kieselartigen Steine sowie Konglomerate, wie sie in fluviatilen Umgebungen entstehen können. Im Windschatten der Steine findet man kleine Sand- bzw. Staubfahnen. Sie sind ein Indiz dafür, daß heute eigentlich nur noch durch Wind (also äolisch) verursachte Sedimentationsprozesse großräumig von Bedeutung sind. Teilchen mit einem Durchmesser von einigen Mikrometern können – wie die globalen Staubstürme sehr schön zeigen - in der Marsatmosphäre durch den Wind weit verbreitet werden. Die chemische Zusammensetzung dieses Staubes impliziert außerdem, daß er nicht vollständig aus den am Landeort vorhandenen Gesteinen gebildet, sondern vielmehr in diese Region verweht worden ist. Für diese These spricht auch die chemische Ähnlichkeit mit den Ergebnissen der Staubanalysen der Viking 1 und Viking 2-Landestellen.

Einige der Felsbrocken, die von Sojourner mit dem APXS untersucht wurden, sind nach Meinung der Geochemiker den irdischen Andesiten verwandt. Darunter versteht man siliziumreiche Eruptivgesteine, die auf der Erde vorwiegend im Bereich von Subduktionszonen auftreten. Nur das sie auf dem Mars wesentlich mehr FeO enthalten.

Alles im allen kann man aus den Ergebnissen der Pathfinder-Mission auf eine sehr bewegte geologische Frühgeschichte des Mars schließen.

Bereits 1976 konnten die Planetologen einen ersten Blick auf die unmittelbare Marsoberfläche werfen. Am 20 Juli erreichte das Landegerät von Viking 1 im westlichen Bereich des Chryse Planitia die

Oberfläche des roten Planeten und begann seine 1 ½ (Mars) -jährige Arbeit. Auch die Landung von Viking 2 am 3. September in Utopia Planitia war ein voller Erfolg. Von ihm wurden die letzten Daten am 11. April 1980 auf der Erde empfangen.

Neben den eindrucksvollen Panoramaaufnahmen der Umgebung der Landstellen hatten beide Sonden ein umfangreiches wissenschaftliches Programm zu absolvieren. Dazu gehörte die chemische Analyse des Marsbodens mit Hilfe eines Röntgen-Fluoreszenz-Spektrometers, meteorologische Messungen (Luftdruck, Temperatur, Wasserdampfgehalt etc.) und – von der breiten Öffentlichkeit am meisten wahrgenommen – drei biologische Experimente. Nur seismische Messungen konnten nicht ausgeführt werden, weil das Seismometer von Viking 1 ausgefallen und das Seismometer von Viking 2 so empfindlich eingestellt war, daß es sich lediglich als Windmesser verwenden ließ.

Alle biologischen Experimente verliefen übrigens indifferent, d.h. aus ihren Ergebnissen konnten die Wissenschaftler keine Hinweise auf die Existenz organischer Moleküle auf der Marsoberfläche innerhalb der Meßgenauigkeit (einige ppm) ableiten. Die Marsoberfläche ist – wie aufgrund der ungehindert einfallenden UV-Strahlung der Sonne zu vermuten war – hochgradig steril.

Auf den Farbbildern erscheinen die Gesteinsbrocken dunkler als der Boden, auf denen sie liegen, wobei der Boden von einer Art rötlichen Staub bedeckt ist, der sich besonders auffällig am Landeplatz von Viking 1 zu kleinen Dünen formt. Dieser Staub enthält eisenoxidhaltige Minerale wie Magnetit und Maghemit und ist für die gelbrötliche Färbung des Mars verantwortlich. Der für irdische Wüsten typische Sand aus Quarz und Feldspaten fehlt an beiden Landeplätzen völlig.

Die überall im Gesichtsfeld der Kamera herumliegenden Gesteinsbrocken sind ihrem Aussehen und ihrem Reflexionsvermögen nach offensichtlich vulkanischen Ursprungs. Es handelt sich um mafische Gesteine, die mit hoher Wahrscheinlichkeit der Gruppe der Basalte angehören. Darunter versteht man basische Eruptionsgesteine, die hauptsächlich aus einem Gemenge aus Olivin, Pyroxen und Plagioklas bestehen. Diese Gesteine können unter dem Einfluß solarer UV-Strahlung chemisch verwittern und in Verbindung mit Wasser Tonminerale formen. Insbesondere der Landeplatz von Viking 2 in Utopia Planitia ist von Felsbrocken mit einer auffällig genarbtten Oberfläche übersät, die wie entgaste Lava aussieht.

Ein Quantensprung in der Erkundung der Marsoberfläche stellen ohne Zweifel die beiden identischen Marserkundungsrover „Spirit“ und „Opportunity“ dar, die seit Januar 2004 ununterbrochen unseren Nachbarplaneten erkunden. Die Landeorte für beide Rover wurden so ausgewählt, daß das primäre Missionsziel - der Nachweis, daß es einmal fließendes Wasser auf dem Mars gegeben hat - möglichst erfolversprechend angegangen werden konnte. Außerdem spielten bei der Zielauswahl noch einige Risikoabschätzungen eine Rolle. Spirit ging am 4. Januar 2004 im Gusev-Krater nieder, in einer Landschaft, die nach den Orbiter-Aufnahmen vorangegangener Missionen mitten in einem System von Flußtälern liegt (Maadim Vallis) und wo man morphologische Hinweise auf fließendes Wasser ausgemacht hat. Das Ziel der zweiten Landeeinheit mit dem Rover „Opportunity“ war die Meridiani-Ebene an einer Stelle, wo die Wissenschaftler in der Vergangenheit des Mars ein stehendes Gewässer vermutet haben.

Der Vorteil der beiden Rover gegenüber einem Orbiter ist, daß sie quasi im Kontakt das anliegende Gestein direkt untersuchen können. Wichtige Meßgeräte für diesen Zweck sind das Alpha-

Röntgenspektrometer (APXS) und das Mößbauer-Spektrometer MIMOS II, die beide aus Deutschland stammen und vom Max Planck-Institut für Chemie bzw. von der Universität Mainz betreut und betrieben werden. Bereits die ersten Messungen mit diesen Geräten am Landeort von Opportunity ergaben unerwartete Ergebnisse: Das weiße Gestein, auf welches das APXS angesetzt wurde, erwies sich als kompaktes Sedimentgestein mit einem hohen Anteil an Schwefelsalzen in Verbindung mit dem allgegenwärtigen Marsstaub. Es kann aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung und seiner mechanischen Eigenschaften nur in einem austrocknenden Salzsee entstanden sein. Wann diese Sedimentation stattgefunden hat, läßt sich nicht exakt bestimmen. Die ehemals mit kleinen Seen und Tümpeln bedeckte Meridiani-Ebene ist aber sicherlich schon seit mehr als zwei Milliarden Jahren staubtrocken.

Auch die Untersuchungen im 130 km großen Gusev-Krater führten zu neuen Erkenntnissen über die Frühgeschichte des Mars. Eine erste Sichtung der Meßergebnisse ergab z.B. einen erhöhten Gehalt des Elements Brom in einer Gesteinsprobe. Da Bromsalze in Wasser leicht löslich sind, gilt das als ein Hinweis auf eine ehemals „feuchte“ Umgebung, in dem der untersuchte Stein einmal gelegen haben muß. Auf dem vom Landeort benachbarten „Columbia-Hills“ konnte schließlich der Nachweis von echten Sedimenten erbracht werden. Ihr Gehalt an Schwefel und Chlor in Verbindung mit vulkanischen Aschen ist ein wichtiges Indiz, daß hier einmal Staub in einem Salzsee abgelagert wurde. Auch in diesem Fall ist eine Bestimmung des Zeitpunktes, wann das geschehen ist, sehr schwierig. Weitere Hinweis auf die Existenz von Wasser erhoffte man sich aus der Identifikation von Mineralien, die nur in wäßriger Umgebung entstehen. Dazu gehört z.B. Hämatit, ein auch auf der Erde häufiges Eisenerz. Überraschenderweise konnten kugelförmige (Durchmesser maximal 1.5 cm) Kongregationen von Opportunity in großer Zahl zwischen flachen Steinen auf der Marsoberfläche fotografiert werden. Wegen ihrer bläulichen Farbe hat man sie „blueberries“ genannt.

Weiterhin konnten Hinweise auf das Mineral Jarosit - ein gelbliches, hydratisiertes Eisen-Schwefel-Mineral mit trigonalen Kristallgitter - gefunden werden, welches auf der Erde nur unter Mitwirkung von Wasser gebildet wird. Die von Opportunity untersuchten Gesteine im Endurance-Krater ließen sich eindeutig als klastisch identifizieren. Sie wiesen Merkmale auf die darauf hindeuten, daß sie vor sehr langer Zeit einmal salzigem, fließenden Wasser ausgesetzt waren bzw. in einem stehenden Gewässer entstanden sind.

Opportunity konnte also die Vermutung bestätigen, daß vor ca. 2 bis 3 Milliarden Jahren die Meridiani-Ebene einmal ein wasserreiches Gebiet mit Tümpeln und kleinen Seen war. Diese Seen, die sich z.B. in Kratergruben befanden, könnten im Laufe der Frühgeschichte des Mars zahlreiche Episoden von Füllung durch Überflutungen oder Niederschläge, Verdunstung und Austrocknung sowie Vereisung durchgemacht haben. Sie beweisen außerdem, daß der Mars nicht immer ein trockener, kalter Planet gewesen ist, wie er uns heute erscheint. Deshalb ist die Rekonstruktion der Klimageschichte des roten Planeten auch ein Schlüssel für das Verständnis seiner heutigen reichhaltigen morphologischen Strukturen. Auf jeden Fall waren die Zeiten, wo Wasser im flüssigen Zustand präsent war, im Vergleich zum Alter des Planeten relativ kurz. Die meiste Zeit wird es wohl so wie heute als Eis vorgelegen haben um nur gelegentlich unter besonders günstigen oder außergewöhnlichen Bedingungen als flüssiges Medium die Landschaften des Mars entscheidend zu formen. Für zukünftige (und vielleicht auch einmal bemannte) Marsmissionen ist es jedoch wichtig zu wissen, daß auch heute noch auf dem Mars Wasser in großen Mengen - wenn auch in Form von Eis - vorhanden ist.

## Atmosphäre

Die Marsatmosphäre ist sehr dünn, durchsichtig und besteht zum überwiegenden Teil aus Kohlendioxidgas (ca. 95.3%) und ein wenig Stickstoff (ca. 2.7%). Was bedeutet das nun konkret? Mars Pathfinder hat - wie Jahrzehnte zuvor die Viking-Lander - meteorologischen Untersuchungen an seinem Landeplatz vorgenommen. Während der 83 „Marstage“, in denen er in Betrieb war, konnten folgende Meßwerte zur Erde übermittelt werden:

- § Die Temperaturen schwanken an der Landestelle im Mittel zwischen  $-75^{\circ}\text{C}$  nachts und  $-11^{\circ}\text{C}$  am frühen Nachmittag. Die Extremwerte waren  $-81.5^{\circ}\text{C}$  und  $-5.7^{\circ}\text{C}$ .
- § Auch die Luftdruckwerte schwanken in einem Tag- und Nacht-Rhythmus im Bereich zwischen 6.55 mbar und 6.85 mbar.

Diese Werte sind für den Marssommer in der nördlichen Marshemisphäre repräsentativ.

Die beiden Viking-Lander haben die Oberflächentemperatur und den Druck über einen noch längeren Zeitraum überwacht. Auch dazu einige Eckwerte:

### Viking 1:

- § Mittlere tägliche Temperaturschwankungen zwischen  $-77^{\circ}\text{C}$  und  $-14^{\circ}\text{C}$
- § Im Winter ging der Luftdruck auf 6.8 mbar zurück. Im Sommer lag er bei rund 9 mbar.

### Viking 2:

- § Die tiefste Temperatur, die gemessen wurde, lag bei  $-120^{\circ}\text{C}$ . Die höchste Temperatur wurde während eines Staubsturms im Winter erreicht, ca.  $+4^{\circ}\text{C}$ .
- § Der Luftdruck schwankte saisonal bedingt zwischen 7.3 und 10.8 mbar.

Chemische Zusammensetzung der Marsatmosphäre

Bestandteil	Prozent
Kohlendioxid	95.32
Stickstoff	2.7
Argon	1.6
Sauerstoff	0.13
Kohlenmonoxid	0.07
Wasser	0.03
Neon	0.00025
Krypton	0.00003
Xenon	0.000008

Die Temperatur der Gasschicht über der unmittelbaren Planetenoberfläche wird primär durch deren Aufheizung bei direkter Sonneneinstrahlung tagsüber und durch die Abstrahlung im infraroten Spektralbereich während der Nachtstunden kontrolliert. Das bedeutet, daß die Marsatmosphäre genauso wie die Erdatmosphäre von unten her erwärmt wird. Da die Sonneneinstrahlung in den äquatorialen Gebieten höher ist als in den gemäßigten Breiten und der Mars ungefähr genauso schnell

rotiert wie die Erde, bilden sich großräumig auch ähnliche Strömungsverhältnisse in der Atmosphäre aus: Hadley-Zellen über dem Äquator und westliche Stromsysteme in den mittleren Breiten (Corioliskraft). Letztere treten auf dem Mars in merklicher Form jedoch nur in den Wintermonaten der jeweiligen Hemisphäre auf, da nur dann der breitenabhängige Temperaturgradient die Werte erreicht, die für die Entstehung von Jetstreams erforderlich sind. Diese Strahlströme, die in großen Höhen als starke Westwinde wehen, führen in den bodennahen Atmosphärenschichten zur Ausbildung periodischer zyklonaler und antizyklonaler Windsysteme, welche Energie aus den Strahlströmen abziehen und polwärts transportieren. Die Messungen der Viking-Lander zeigen, daß damit verbundene Wetterfronten mit einer überraschend konstanten Periode von ungefähr 3 Tagen die Landeplätze überstreichen. Ein Meteorologe auf dem Mars hätte zwar einen sehr langweiligen Job, aber seine Vorhersagegenauigkeit wäre um einiges besser als das seiner Kollegen auf der Erde.

Die großräumigen Zirkulationsmuster hängen auf dem Mars sehr stark von der Jahreszeit ab. Ursachen dafür sind:

- § die Neigung der Marsachse (ca.  $25^\circ$ )
- § die große Bahnexzentrizität (führt dazu, daß die Jahreszeiten in den beiden Hemisphären unterschiedlich lang sind)
- § das Auskondensieren von  $CO_2$  während der Wintermonate, was u.a. zu einer zyklischen Änderung des Luftdrucks an der Oberfläche führt
- § der relativ geringe Treibhauseffekt (ca.  $8^\circ$ )
- § das zyklische Auftreten von Staubstürmen (Erhöhung der Opazität der Atmosphäre).
- § der äußerst geringe Wasserdampfgehalt der Marsatmosphäre

Außerdem führt der Höhenunterschied zwischen der niedriger gelegenen Nordhalbkugel und der einige Tausend Meter höher gelegenen Südhalbkugel zu einer Beeinflussung der großräumigen atmosphärischen Strömungen. Computersimulationen von RICHARDSON und WILSON (2002) zeigen sehr schön, daß es – wie auch beobachtet – auf der Südhalbkugel in dieser Beziehung heftiger zugeht.

Ein wesentlicher Unterschied zur Erde ist, daß der jeweils wärmste Bereich auf der Marsoberfläche im Sommer der subsolare Punkt ist. Auf der Erde ist das nicht so ausgeprägt, weil der Wärmeaustausch zwischen Oberfläche und Atmosphäre maßgeblich von den Ozeanen bestimmt wird, die eine enorme thermische Pufferwirkung entfalten. So etwas fehlt natürlich auf dem Mars. Das führt dazu, daß sich nicht - wie bei der Erde – zwei zum Äquator symmetrische Hadley-Zellen ausbilden, sondern nur eine mit dem Zentrum in der Breite des subsolaren Punktes. Für das Auftreten der Strahlströme ist – wie bereits erwähnt - der breitenabhängige Temperaturgradient verantwortlich. Dieser Gradient ist dann am größten, wenn z.B. im Frühjahr das Trockeneis an den Polkappen zu sublimieren beginnt und der subsolare Punkt sich zu höheren Breiten hin bewegt. In dieser Jahreszeit ist der Jetstream besonders stark ausgeprägt und „bläst“ um einiges stärker als sein Pendant auf der Erde.

Im Mars-Sommer sind die Temperaturen über dem Planeten dann soweit ausgeglichen, daß die großräumigen Windsysteme im Prinzip zusammenbrechen.

Durch die starke Bahnexzentrizität ergibt sich noch ein weiterer marsspezifischer Effekt. Die Länge und meteorologischen Bedingungen der Jahreszeiten sind auf beiden Hemisphären recht

unterschiedlich. Auf der Südhalbkugel sind Frühling und Sommer kurz und heiß und der Herbst und Winter lang und kalt. Auf der Nordhalbkugel ist es genau umgekehrt.

Daß es auf dem Mars riesige Staubstürme gibt, ist seit langem bekannt. Die ersten Beobachtungen gehen auf den französischen Astronomen HONORE FLAUGERGUES (1755-1835) zurück, der 1796 „gelbliche Wolken“ mit seinem Fernrohr auf der Marsoberfläche wahrnahm. Während der Opposition von 1924 bemerkte der deutsche Astronom KASIMIR GRAFF (1878-1950), daß die Marsatmosphäre nur im Marshochsommer klar und durchsichtig erscheint. Davor und danach können viele bekannte Oberflächendetails wie z.B. die Große Syrte nur angetrübt oder gar nicht im Fernrohr gesehen werden. Da die eintrübenden Wolken eine deutliche rötliche Färbung aufweisen, kann es sich dabei nur um aufgewirbelten Sand oder Staub handeln.

Als 1971 Mariner 9 den roten Planeten erreichte und die an diesem Projekt beteiligten Wissenschaftler auf die ersten Detailaufnahmen der Marsoberfläche warteten, wurden sie enttäuscht. Ein Staubsturm machte die Marsatmosphäre quasi undurchsichtig und nur die großen Tharsis-Vulkane blickten wie Inseln aus dem Staubozean hervor. Erst einen Monat später hatte sich der Staub soweit abgesetzt, daß Mariner 9 mit der fotografischen Kartierung der Marsoberfläche beginnen konnte.

Im Jahre 2001 ergab sich dann die Gelegenheit, die Entstehung und Entwicklung eines außergewöhnlich starken Staubsturms, der selbst auf der Erde mit bescheidenen Amateurteleskopen auszumachen war, im Detail zu untersuchen. Eine Aufnahme des Hubble Weltraumteleskops vom 26. Juni zeigt, wie sich ein Staubsturm im Bereich des Hellas-Beckens entwickelt. Bereits drei Wochen später hat er den gesamten Planeten in eine detaillose Kugel verwandelt. Die Ausbreitung dieses Sturms konnte mit Hilfe des IR-Wärmeemissions-Spektrometers (TES) von „Mars Global Surveyor“ im Detail dokumentiert werden. Es zeigte sich, daß es sich dabei nicht um ein einziges, sich ständig vergrößerndes Phänomen handelt. Vielmehr führte das lokale Ereignis in der Hellas-Region zur Entstehung weiterer Stürme, die oft viele tausend Kilometer voneinander entfernt waren und die sich später zu einem globalen Staubsturm vereinigten. Erst einige Monate danach klangen sie ab und die Oberflächendetails des Mars wurden wieder sichtbar.

Der Staub, der während eines solchen Sturms aufgewirbelt und in die Atmosphäre verfrachtet wird, ist außergewöhnlich fein, in der Größe vergleichbar mit den Rußpartikeln im Rauch einer Zigarette (ca. 1  $\mu\text{m}$ ). Deshalb dauert es auch oft mehrere Wochen, bis er sich nach Abklingen des Windes wieder auf der Marsoberfläche abgesetzt hat. Auf diese Weise wird der Staub sehr gleichmäßig über den Planeten verteilt. Man erkennt das auch daran, daß die chemische Zusammensetzung des Staubes an den verschiedenen Landeplätzen der Marssonden ziemlich identisch ist. Während eines starken Sturms wird der Staub bis in eine Höhe von 50 Kilometern aufgewirbelt und von Winden mit Windgeschwindigkeiten größer als 100 km/h über den Planeten verteilt. Äolische Prozesse stellen aus diesem Grund zumindest z.Z. den wichtigsten Erosionsfaktor auf dem Mars dar.

Ein wichtiges Ergebnis der TES-Messungen des „Mars Global Surveyor“ ist, daß sich die stauberfüllte Atmosphäre im Äquatorbereich insbesondere in ihren oberen Schichten stark erwärmt (bis über 20°C, Strahlung wird vom Staub absorbiert und danach an das umgebende Gas abgegeben, das sich dadurch erwärmt), während sich die Temperaturen im bodennahen Bereich signifikant verringerten. Der Grund dafür liegt in der hohen Opazität der Staubwolken, die das Durchdringen der Sonnenstrahlen und damit

die Erwärmung der Marsoberfläche effektiv verhindern. Übrigens, auf der Erde hat man in einem anderen Zusammenhang für diese Erscheinung einmal den Begriff „Nuklearer Winter“ geprägt... Diese Abkühlung der Oberfläche ist wahrscheinlich auch ein Grund dafür, daß nach einiger Zeit die Stürme abklingen und letztendlich wieder verschwinden.

Globale Staubstürme entstehen interessanterweise nicht jedes Jahr auf dem Mars, was eine genaue Klärung ihrer Entstehungsmechanismen erschwert. Nach Meinung einiger Planetenforscher scheinen hier einige subtile Rückkopplungsmechanismen zwischen Staubgehalt der Atmosphäre, den großräumigen Strömungsverhältnissen und der saisonal sich ändernden Einstrahlung der Sonne zu wirken. Auch die Größe und Ausdehnung der Polkappen scheint eine Rolle zu spielen.

Eine weitere jahreszeitliche Erscheinung ist die Änderung des Atmosphärendrucks im Laufe eines Marsjahres. Die Ursache dafür ist der sogenannte  $CO_2$ -Zyklus, der sich in einer hemisphären-abhängigen jahreszeitlichen Deposition und Sublimation von Trockeneis an den Polen äußert. Das bedeutet, es wird an den Polen im Winter so kalt (unter 150 K), daß bis zu 20% des atmosphärischen Kohlendioxids in Form von Trockeneis ausfrieren und sich auf der Marsoberfläche ablagern. Steigen die Temperaturen im Frühjahr wieder, dann sublimiert das Trockeneis und der Atmosphärendruck nimmt wieder zu: Der aufmerksame Astronom auf der Erde kann in seinem Fernrohr das „Abschmelzen“ der Polkappen beobachten. Dabei verhalten sich die beiden Polkappen etwas unterschiedlich. Da die Herbst- und Wintermonate auf der Nordhalbkugel kürzer sind, bleibt die von Trockeneis bedeckte Nordpolkappe stets etwas kleiner als die Südpolkappe. Letztere erreicht in etwa  $45^\circ$  südliche Breite ihre maximale Ausdehnung während die Nordpolkappe kaum über  $50^\circ$  nördliche Breite hinausreicht.

Die durch den  $CO_2$ -Zyklus bedingten Druckänderungen liegen nach den Messungen der Viking-Lander zwischen zwei und drei Millibar.

In der Marsatmosphäre treten drei Arten von Wolken auf. Neben den bereits erwähnten Staubwolken sind das Wolken aus Wasserdampf – und, wenn es besonders kalt ist, Wolken aus gefrorenen Kohlendioxid.

Wassereiswolken beobachtet man besonders häufig in der nördlichen Hemisphäre während der Sommermonate, also dann, wenn der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre aufgrund von Sublimationsvorgängen im Bereich der Polarkappen wieder ansteigt. Obwohl sie natürlich viel „dünner“ sind als vergleichsweise in der Erdatmosphäre, sind sie auf Satellitenaufnahmen und auf Aufnahmen mit dem Hubble-Teleskop gut zu sehen. In dem Bereich der Polkappen beobachtet man häufig Bodennebel und smogartige Wettererscheinungen, die sich in den jeweiligen Herbstmonaten häufen.

Wolkenbildungen (mit Ausnahme der globalen Staubstürme) treten auf dem Mars immer lokal auf, d.h. es gibt keine großräumige Wolkenbedeckung. So kommt es nicht selten vor, daß z.B. in den frühen Morgenstunden die Gipfelcalderen der großen Marsvulkane in Wolken eingehüllt sind.

Seitdem Ende 2004 die Sonde Mars-Expreß in der Marsatmosphäre im Vergleich zu anderen Spurengasen größere Mengen von Methan ( $CH_4$ ) und von Formaldehyd (Methanol,  $CH_2O$ )

gefunden hat, wird über deren Entstehung sehr kontrovers diskutiert. Dazu muß man wissen, daß Methan auf der Erde zum allergrößten Teil biologischen Ursprungs ist. Es entsteht hauptsächlich durch anaerobe Zersetzung von organischen Stoffen und ist Hauptbestandteil des Erdgases.

Gas	Häufigkeit (ppb)
Methan	10 - 10.5
Formaldehyd	130

V.FORMISANO, 2004

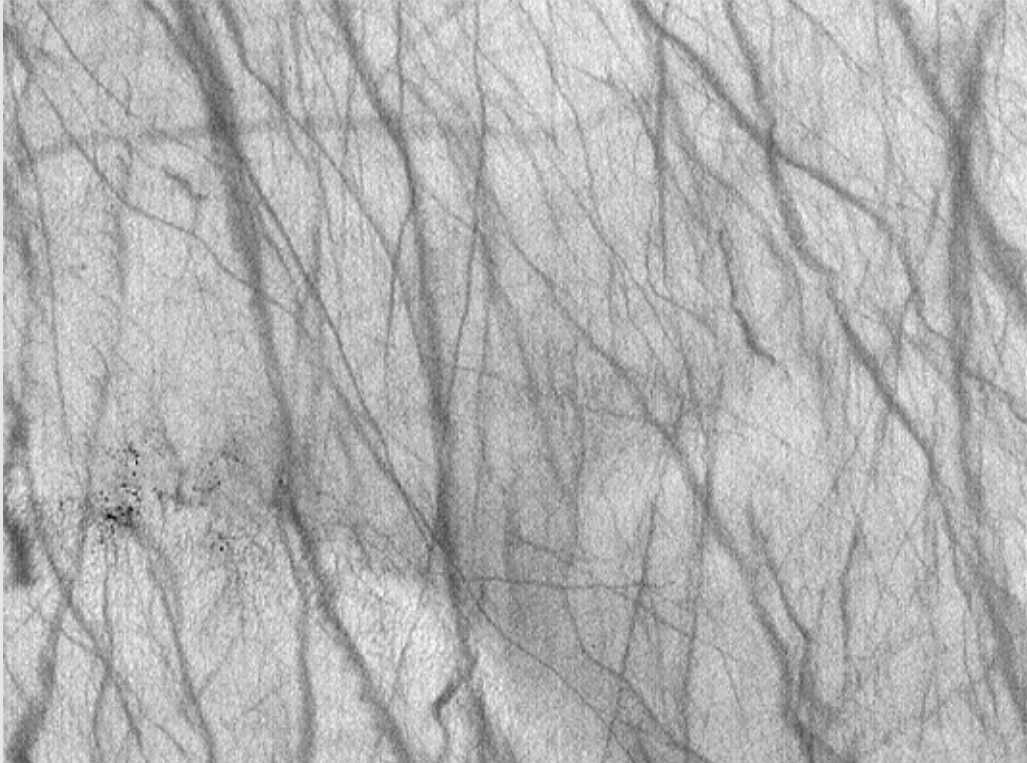
Während sich die Konzentration von 10 ppb Methan noch relativ zwanglos durch vulkanische Restentgasung erklären läßt (Methan muß kontinuierlich nachgeliefert werden, da die Moleküle durch chemische Reaktionen verbraucht oder durch Photodissoziation zerstört werden, was ihre mittlere Lebensdauer auf einige Jahrzehnte bis mehrere Jahrhunderte begrenzt), sieht es bei Formaldehyd ganz anders aus. Dieses Molekül hat unter den Bedingungen der Marsatmosphäre nur eine mittlere Lebensdauer von ca. 7.5 Stunden (!). Andererseits kommt es in einer bedeutend höheren Konzentration vor als Methan, aus dem es bei der Oxidation als Zerfallsprodukt entsteht.

Wenn man davon ausgeht, daß die gemessene Menge an Formaldehyd ausschließlich aus Methan entsteht, dann reicht die Methanmenge in der Marsatmosphäre bei weitem nicht aus, um die  $CH_2O$ -Menge im chemischen Gleichgewicht zwischen Entstehung und Vernichtung zu erklären. Vorsichtigerweise muß aber darauf hingewiesen werden, daß die Ergebnisse des Fourierspektrometer-experiments von Mars-Expreß nahe an dessen technischer Leistungsgrenze gewonnen wurden und deshalb zumindest zurückhaltend zu interpretieren sind.

Wenn sich diese hohe Konzentration aber bestätigen sollte, muß es auf dem Mars große Quellen von Methangas geben, die summa summarum eine kontinuierliche Erzeugungsrate von ca.  $2.5 \cdot 10^6$  t/a gewährleisten müssen um die Formaldehyd-Konzentration zu erklären (VITTORIO FORMISANO). Davon entfallen auf vulkanische Prozesse höchstens einige  $10^5$  t/a. Außerdem ist die Verteilung des Formaldehyd-Gases über die Marsoberfläche sehr ungleichmäßig und koinzidiert relativ stark mit der Wasserdampfkonzentration in der unteren Atmosphäre. Da auf der Erde Methan zu einem beträchtlichen Teil von anaeroben Bakterien erzeugt wird, liegt die Vermutung nahe, daß es auch auf dem Mars Mikroorganismen geben muß. Ob das so ist, kann jedoch aus der derzeitigen Erkenntnislage nicht entschieden werden. Der Nachweis dieser beiden kritischen Gase durch das Planetare Fourierspektrometer (PFS) auf Mars-Expreß ist zwar durchaus ein Indiz dafür. Man sollte es aber auch nicht überbewerten. Zumindest Mikrobiologen, die die sonstigen Bedingungen auf Mars kennen, wollen nicht so recht daran glauben. Außerdem gibt es auf dem Mars große Mengen an dem Mineral Olivin, welches ein Hauptbestandteil vulkanischer Gesteine darstellt. Wie neuere Untersuchungen zeigen, entsteht durch den Prozeß der Serpentinisierung aus diesem Mineral wahrscheinlich genügend Methan, um die Methan- und Formaldehyd-Konzentration in der Marsatmosphäre auch ohne Mikroben erklären zu können (SHARMA, OZE 2005).

### **Staubteufel (Dust Devils)**

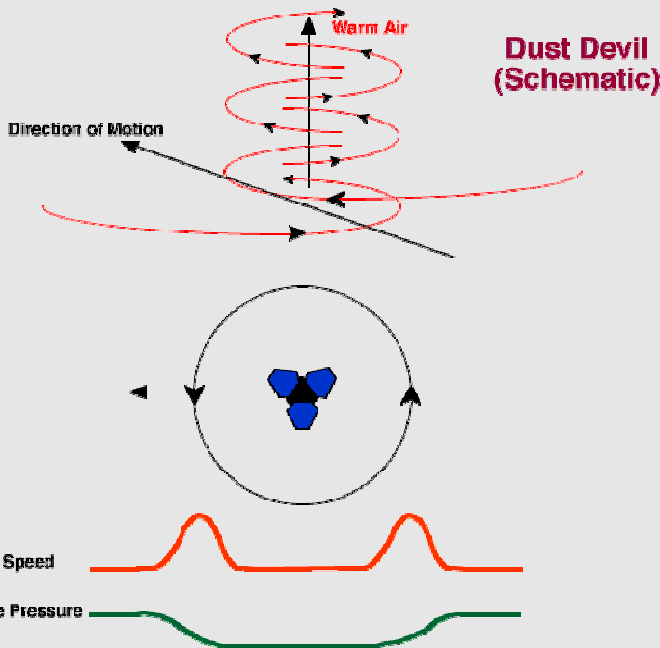
Auf manchen hochauflösenden Fotos der Marsoberfläche sind dünne dunkle Spuren auszumachen, die sich über eine größere Entfernung erstrecken und die Tendenz haben, bestimmte Richtungen zu bevorzugen. Sie bilden auf der sandigen und staubigen Oberfläche ein Gewirr von Linien, deren Entstehung zuerst nicht klar war.



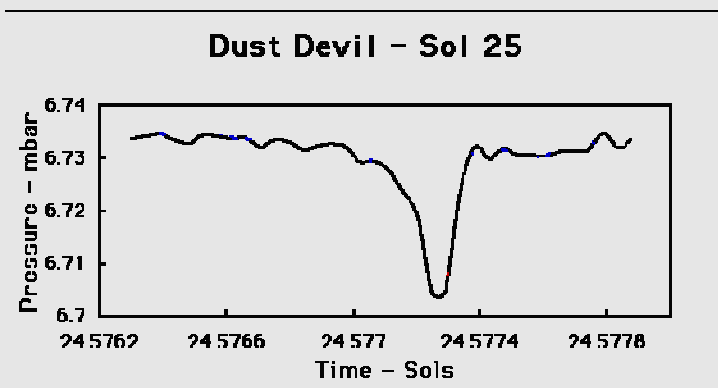
Das änderte sich, als Mars Global Surveyor mit seiner Kamera die Entstehung einer solchen linienartigen Struktur direkt beobachten konnte. Es handelte sich um eine - auf der Erde würde man sagen „Windhose“ - die über das flache Land raste und dabei die hellere Bodenschicht empor wirbelte so daß entlang ihrer Bahn der dunklere Untergrund zum Vorschein kam. Dabei ist die Bezeichnung „Windhose“ für einige Exemplare auf dem Mars eher verharmlosend, denn diese schnell rotierenden Staubwirbel können eine Höhe von mehreren Kilometern erreichen und dabei ein Zerstörungspotential entwickeln, die mit irdischen Tornados vergleichbar sind und sie in dieser Beziehung sogar um Einiges übertreffen können. Diese marsianischen Staubwirbel werden gewöhnlich als Staubteufel („*dust devils*“) bezeichnet und sind in den Sommermonaten in manchen Gebieten des Mars ein alltägliches Phänomen. Kleinere Exemplare konnten z.B. vom Marsrover „Spirit“, der im Gusev-Krater seine Arbeit verrichtet, in den Sommermonaten fast täglich beobachtet werden.

Staubteufel entstehen immer dann, wenn sich bei hochstehender Sonne die Luftschicht dicht über dem Boden stark erwärmt und aufzusteigen beginnt (man spricht in solch einem Fall von einer in Bezug auf die Temperatur labilen Schichtung der Luftmassen, da sich bei nahezu Windstille die warme bodennahe Schicht mit der darüber liegenden kalten Schicht nicht durchmischen kann). Im Bereich des Gusev-Kraters ist diese Bedingung im Mars-Sommer gewöhnlich zwischen 10 Uhr und 15 Uhr Ortszeit (ein Marstag ist mit 24 Stunden und 39 Minuten nur 39 Minuten länger als ein Tag auf der Erde) erfüllt. Dabei entstehen kleine konvektive Warmluftblasen, die vertikal zu rotieren beginnen. Bläst jetzt ein kleiner Windstoß solch eine konvektive Zelle um, dann beginnt sie u.U. immer schneller horizontal zu rotieren, nimmt dabei Staub auf und es entsteht in einem sich selbstverstärkenden Prozeß eine vertikale, rotierende Säule - ein Staubteufel eben. Die antreibende Kraft ist dabei die heiße Luft im Zentrum, die eine Aufwärtsströmung bildet und - bei den größeren Exemplaren - Staub und Sand bis in mehrere Kilometer Höhe zu transportieren vermag. Der zentrale Bereich entspricht dabei

erwartungsgemäß einem Druckminimum und die größten (horizontalen) Windgeschwindigkeiten werden an der Peripherie des Wirbels erreicht.



Diese typische Signatur konnten bereits die Meßgeräte der „Sagan Memorial Station“ (Mars Pathfinder) nachweisen. Das Diagramm stellt den Verlauf des Luftdrucks über einen Zeitraum von ungefähr zwei Minuten dar und zeigt recht deutlich den Druckabfall um etwa 0.5% gegenüber dem normalen Luftdruck beim Durchgang der Windhose.

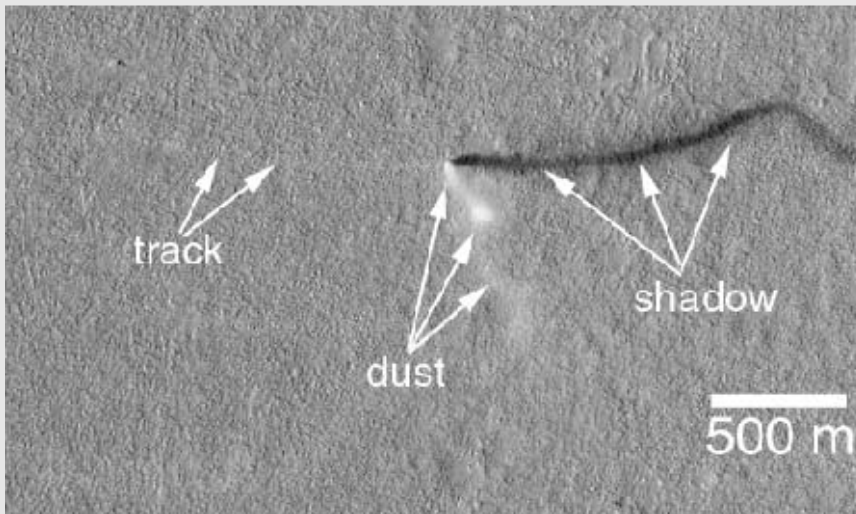


Außerdem konnten die Meßgeräte des Pathfinder-Landers sehr deutlich die wechselnden Windrichtungen bemerken, die sich aufgrund der Rotation des Wirbels ergeben.

Besonders nachhaltig wirkt sich der Effekt der Drehimpulserhaltung bei der Entwicklung einer sich drehenden Trombe (wie man solche Phänomene in der Meteorologie nennt) aus. Ausgangsparameter sind die Rotationsgeschwindigkeit und die Rotationsfläche, gemessen an der Basis. Durch das Strecken der rotierenden Luftsäule aufgrund der aufsteigenden Luftströmung im Zentrum, verringert sich die Rotationsfläche bzw. dessen Radius. Das führt wegen der Drehimpulserhaltung zu einer Vergrößerung der Rotationsgeschwindigkeit der Luftsäule und somit auch der Geschwindigkeit der einströmenden Luft.

Die stärksten „Dust Devil“, die man bisher auf dem Mars beobachten konnte, erreichten am Marsboden einen Durchmesser von mehreren Hundert Metern und eine Höhe von mehreren Kilometern. Sie sind ungefähr 10 mal stärker als die stärksten bekannten irdischen Tornados (die aber auf eine völlig andere Art und Weise entstehen) und sind damit in der Lage - quasi wie ein

Riesenstaubsaugers - riesige Mengen Lockermaterial entlang ihres Weges abzutragen. Man kann ihren Durchmesser anhand ihrer zurückgelassenen Spuren und ihre Höhe an der Länge ihres Schattens bestimmen, wie folgende MGS-Aufnahme von 1999 zeigt:



Irdische Staubteufel können außergewöhnlich große elektrisch Ladungen - und damit verbunden - Magnetfelder aufweisen. Sie erhalten ihre Ladung von dem aufgewirbelten Staubkörnchen unterschiedlicher mineralogischer Zusammensetzung, die aneinander reiben und dabei Ladungen freisetzen. Ähnliches beobachtet man auch, wenn man z.B. Bernstein an einem trockenen Tuch reibt. Kleinere Staubteilchen haben die Tendenz, sich negativ aufzuladen während größere Sandkörnchen eher positiv geladen sind. Da die aufsteigende, zentrale Säule aus heißer Luft, die den Staubteufel antreibt, den negativ geladenen Staub nach oben transportiert und die schwereren, positiv geladenen Sandkörner nahe am Boden läßt, werden die Ladungen getrennt. Auf diese Weise wird ein elektrisches Feld mit einer Stärke von bis zu 20 kV/m erzeugt. Einen ähnlichen Effekt erwartet man auch auf dem Mars. Wenn vielleicht auch nicht die Feldstärken irdischer Tromben erreicht werden, so kann doch der Betrag der Energie, der im elektrischen Feld eines großen Staubteufels gespeichert ist, durchaus um einiges größer sein. Deshalb ist es möglich, daß das Dust Devils die Elektronik von Marslandegeräten durchaus ernsthaft beeinträchtigen können obwohl ihr anderer Effekt - nämlich das Wegblasen von Staub von Sonnenkollektoren - beispielsweise, mitgeholfen hat, die Lebensdauer der Marsrover Spirit und Opportunity wesentlich zu verlängern.



Kleinere Dust Devils im Gusev-Krater, aufgenommen am 13. Juli 2005 mit der Navigationskamera des Rovers. © NASA

## Biosphäre

Die Frage, ob es auf dem Mars Leben gibt oder ob es auf diesem Planeten einmal Leben gegeben hat (als dafür die Bedingungen noch besser waren), bleibt weiterhin spannend (2007). Es gibt auf diese Frage einfach noch keine Antwort. Irdisches Leben in Form von an extreme Umweltbedingungen angepaßten Bakterien (Extremophile) können jedenfalls unter Marsbedingungen gedeihen und sich sogar vermehren, wie eine ganze Reihe von Experimenten gezeigt haben. Aber da man noch nicht einmal weiß, wie das Leben auf der frühen Erde entstanden ist, bleiben - solange konkrete Nachweise fehlen - alle Mutmaßungen über marsianische Lebensformen Spekulation. Wenn es aber im Sonnensystem außer auf der Erde doch noch irgendwo Leben geben sollte, dann ist der Mars ohne Zweifel die erste Adresse dafür. Aus diesem Grund war es ganz natürlich, daß man die ersten Marslander, die Mitte der 70ziger Jahre des vorigen Jahrhunderts die Marsoberfläche erreichten (Viking 1 und 2), mit ausgeklügelten Experimenten ausgestattet hatte um zumindest einen Hinweis auf außerirdisches Leben zu finden. Die Ergebnisse waren leider indifferent und nicht interpretierbar, so daß die Bemühungen nicht von Erfolg gekrönt waren. Ein neuer Anlauf in dieser Hinsicht ist mit der Sonde Phoenix geplant, dessen Lander im Bereich des wasserreichen, aber eisigen Nordpols ab 2008 nach Leben suchen soll.

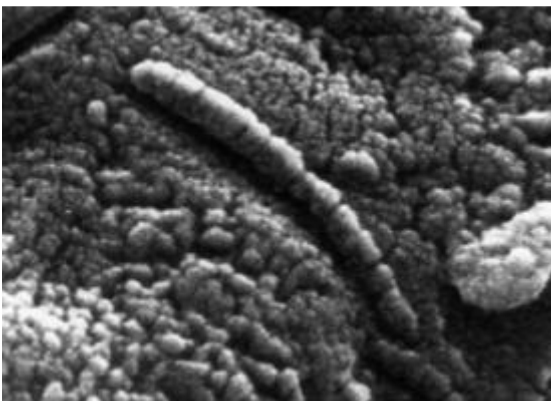
Besondere Aufmerksamkeit auch außerhalb der wissenschaftlichen Community erregte die 1996 bekanntgegebene Entdeckung von vermeintlichen Lebensspuren in einem Meteoriten aus der Antarktis (ALH 84001), der zweifelsfrei vom Mars stammte. Es handelt sich dabei um einen kataklastischen Orthopyroxenit, der entsprechend seines Bestrahlungsalters vor ca. 15 Millionen Jahren den Mars bei einem Impakt verlassen haben soll. Bei der elektronenmikroskopischen Untersuchung fielen DAVID S.MCKAY und seinen Mitarbeitern längliche Strukturen im Nanometer-Bereich auf, die verblüffend (bis auf ihre zu geringe Größe) irdischen Bakterien ähnelten. Heute ist diese Deutung weitgehend umstritten und nur noch wenige Wissenschaftler, die sich mit dieser Materie beschäftigen, gehen davon aus, daß man es mit fossilisierten „Marsbakterien“ zu tun hat. Wenn es sich wirklich um Mikrofossilien handeln sollte (was keineswegs klar ist), dann handelt es sich eher um Verunreinigungen irdischen Ursprungs. Auch die Entdeckung von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH, „*Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*“) im gleichen Meteoriten ist kein Beweis für außerirdisches Leben, obwohl diese Stoffe häufig beim Zerfall von Bakterien entstehen.

Da wir wissen, das Leben auf der Erde relativ schnell entstanden ist (innerhalb von wenigen 100 Millionen Jahren nachdem die Umweltbedingungen dafür geeignet waren), gibt es auch eine gewisse Wahrscheinlichkeit, daß dieselben oder ähnlichen biochemischen Prozesse auch auf einem „feuchten“ und „warmen“ Mars stattgefunden haben. Da sich aber anschließend die Umweltbedingungen relativ schnell verschlechterten (es wurde trocken und kalt), dürften heute nur noch wenige ökologische Nischen auf dem Mars vorhanden sein, in die sich primitive Mikroorganismen zurückgezogen haben könnten. Das betrifft insbesondere die im Untergrund wasser(eis)reichen gemäßigten Breiten sowie die Polarregionen mit ihren permanenten Wassereiskappen. Glaubt man den Evolutionsbiologen, dann stehen die Chancen jedoch ziemlich schlecht, endemische Marsorganismen zu finden. Eher kann es sein, daß der Mars einmal in früherer Zeit von der Erde „angesteckt“ wurde. Denn wenn ein Meteorit vom Mars auf die Erde gelangen kann, ist sicherlich auch der umgekehrte Weg möglich.

### **Methan in der Marsatmosphäre**

Die Entdeckung, daß es auf dem Mars das Treibhausgas Methan in einer unerwartet hohen Konzentration gibt (ca. 10 ppbv (*parts per billion by volume*)), hat unter den Astrobiologen einiges

Aufsehen hervorgerufen. Dazu muß man wissen, daß dieses Gas auf der Erde vorwiegend biologischen Ursprungs ist wobei die wichtigsten Methanbildner spezielle Bakterien sind. Um die heute in der Erdatmosphäre beobachtete Methankonzentration von ca. 1750 ppbv aufrechtzuerhalten (Methanmoleküle werden in der Atmosphäre kontinuierlich abgebaut wobei die Lebensdauer eines Moleküls ca. ein Jahrzehnt beträgt), müssen pro Jahr über 500 Millionen Tonnen erzeugt werden. Auf dem Mars sind die Verhältnisse dagegen vollkommen anders. In seiner fast reinen  $CO_2$ -Atmosphäre ist Methan nur ein Spurengas. Ein Methanmolekül überlebt dort im Mittel rund 600 Jahre. Das bedeutet, daß bei einer stabilen Konzentration von 10 ppbv pro Jahr rund 100 Tonnen von diesem Gas neu entstehen muß. Vulkanismus (der auf der Erde ca. 0.2 % der erforderlichen Menge liefert) scheint auf dem Mars auszuschließen, da trotz genauester Fernerkundung keine Anzeichen für rezente Vulkanismus gefunden werden konnte. Eine weitere denkbare Methanquelle wäre der Eintrag durch Kometenkerne, die ab und an den Mars treffen. In solch einem Fall müßte solch ein Ereignis quasi vor kurzem (d.h. innerhalb der letzten 2000 Jahre) stattgefunden haben. In diesem Fall würde man gegenwärtig nur eine temporäre Anreicherung in der Marsatmosphäre beobachten und andere Erklärungsmodelle wären obsolet. Dieser sehr eleganten Erklärung steht aber die Beobachtung entgegen, daß das Methan in der Marsatmosphäre sehr ungleichmäßig verteilt ist. Lokale Entstehungsmechanismen können diese Verteilung sehr viel besser erklären wobei aber die denkbaren Mechanismen der Methanbildung nur sehr begrenzt sind. Es kommen eigentlich nur mikrobiologische und anorganisch-chemische Bildungsmechanismen in Frage. Seitdem man weiß, daß es im Marsboden relativ viel Wasser gibt, könnte ein spezieller chemischer Vorgang, der als Serpentinisierung bezeichnet wird, des Rätsels Lösung sein. Die Zutaten, Wasser, Kohlendioxid und das Mineral Olivin (ein wichtiger Bestandteil vieler Eruptivgesteine, insbesondere von Basalten), sind auf dem Mars vorhanden. Wenn Olivin (aber auch andere Minerale wie z.B. Amphibole oder Pyroxene) mit kohlesäurehaltigen Wasser in Berührung kommen, dann wandeln sich die genannten Minerale im Rahmen einer exothermen Reaktion in weißliche Serpentine (das sind gesteinsbildende Schichtsilikate, die sehr viel Magnesium enthalten) um wobei Wasserstoff frei wird. Die metamorphen Gesteine, die sehr viel von dem Silikat Serpentin enthalten, bezeichnet man als Serpentinite. Auf der Erde kann man ihre Entstehung im Bereich heißer untermeerischer Quellen im Bereich von sogenannten „Black and White Smoker“ beobachten. Der bei der Umwandlung freigesetzte Wasserstoff kann anschließend mit Kohlenstoff und Kohlenstoffverbindungen (Kohlenmonoxid, Kohlendioxid) reagieren und dabei Methan bilden. Man schätzt, daß pro Jahr ca. 80000 Tonnen Olivin umgewandelt werden müssen, um die heutige Methankonzentration in der Marsatmosphäre stabil zu halten. Das ist nicht soviel, daß es nicht möglich wäre. Das Problem ist eher die Präsenz von flüssigem Wasser. Auf jeden Fall gibt es aber durchaus Möglichkeiten die Methanvorkommen auf dem Mars auch ohne methanbildende Mikroorganismen zu erklären. Um Leben auf dem Mars zu postulieren, braucht man stichhaltigere Beweise.



Vermeintliches „Marsbakterium“ (ALH 84001)

## Magnetfeld

Eine genauere Analyse des Marsmagnetfeldes wurde ab 1997 durch die Magnetometermessungen der amerikanischen Marssonde Mars-Global-Surveyor (MGS) möglich. Vorangegangene Missionen (beginnend mit Mariner 4) hatten bereits erste Hinweise auf die Existenz eines sehr schwachen Magnetfeldes ergeben. Mars 2 und Mars 3 (UdSSR) fanden darüber hinaus Hinweise auf eine Stoßregion, da ihre Meßgeräte beim Einflug zum Mars eine deutliche Erhöhung der lokalen Elektronendichte und Elektronentemperatur erfaßten. Der subsolare Punkt der Stoßfront befand sich dabei ca. 1.5 Marsradien (3394 km) vom Planeten entfernt. Auch hier entsteht die Stoßfront genauso wie bei der Venus durch eine direkte Wechselwirkung mit der Ionosphäre, denn das Eigenfeld von Mars ist viel zu gering, um bei der Ausbildung einer Magnetosphäre eine größere Rolle zu spielen (induzierten Magnetosphäre).

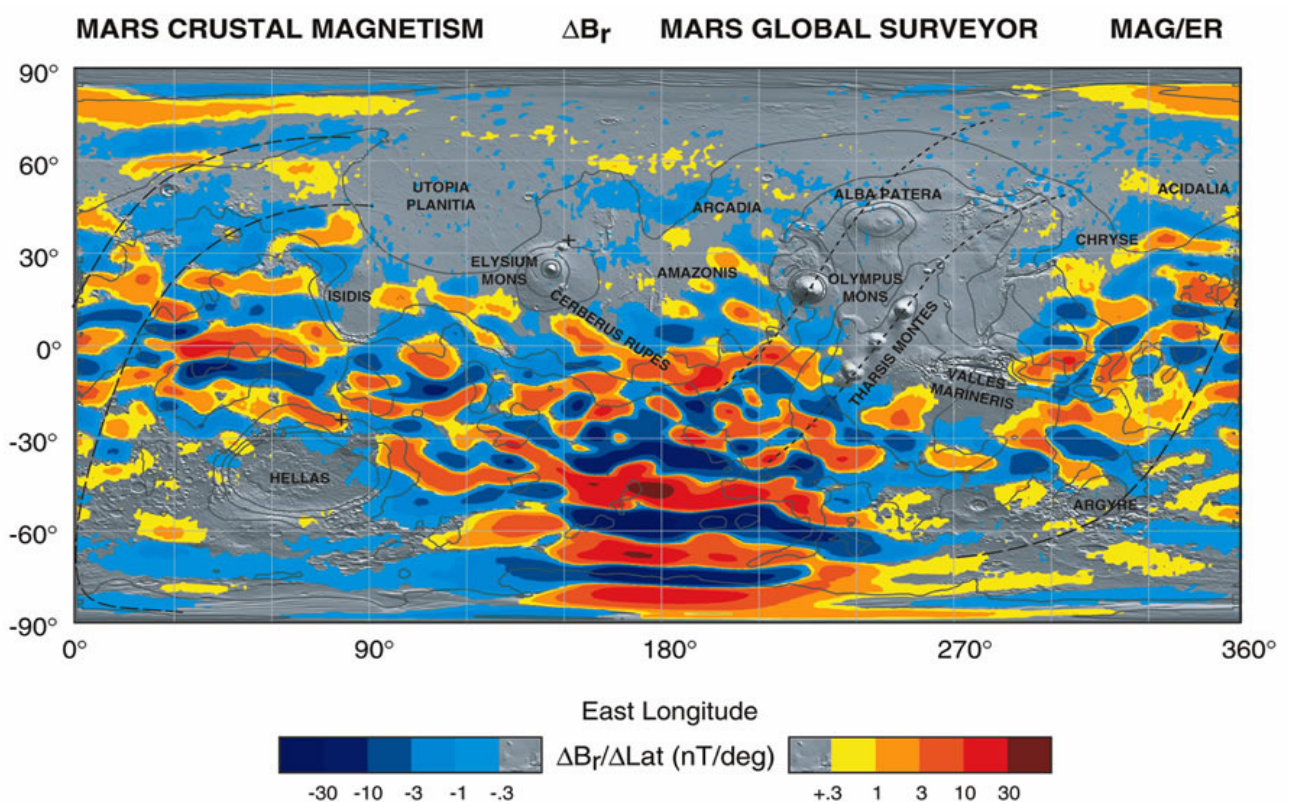
Dadurch, daß der Sonnenwind direkt mit der Marsatmosphäre in Kontakt kommt, ist der auf diese Weise verursachte Teilchenverlust sehr groß. Ionen, die aus der Marsatmosphäre durch den Sonnenwind herausgerissen wurden, hat zum ersten Mal 1989 die russische Marssonde Phobos beim Durchfliegen der Nachtseite des Planeten nachgewiesen. Eine Hochrechnung der Ergebnisse zeigt, daß die heute sehr dünne Kohlendioxidatmosphäre des Mars in der Vergangenheit überaus mächtiger gewesen ist und vielleicht sogar in großen Mengen Wasserdampf enthalten hat. Auf das Vorhandensein von flüssigem Wasser in der Vergangenheit des heute staubtrockenen Planeten weisen deutlich Fließspuren auf der Planetenoberfläche hin. Die Ionenverlustrate, die aus den Daten von Phobos errechnet wurden, liegt in der Größenordnung von rund 100 g/s für Sauerstoffionen. Auch der geringe Stickstoffanteil der Marsatmosphäre hat wahrscheinlich seine Ursache in den durch den Sonnenwind verursachten Erosionsprozessen.

Genauere Ergebnisse konnten ab 2004 mit dem Ion Maß Analyzer (IMA) des ASPERA-3 -Detektors (Analyzer of Space Plasma and Energetic Atoms) der Sonde Mars-Express gewonnen werden. Das Resultat von Phobos, daß Sonnenwind-Ionen ( $H^+$ ,  $He^{++}$ ) tief in die Ionosphäre des Mars eindringen können (d.h. bis in eine Höhe von ca. 270 km), wurde eindrucksvoll bestätigt. Das bedeutet, daß die induzierten Magnetosphärenengrenze für einen Teil des Sonnenwinds durchlässig ist mit der fatalen Folge, daß planetare Ionen bei der Wechselwirkung mit dem Sonnenwind auf 400 bis 500 km/s beschleunigt werden und damit das Schwerefeld des Planeten in den freien Weltraum verlassen. Die Marsatmosphäre verlor auf diese Weise über Jahrmilliarden hinweg an Substanz was ihre heutige geringe Dichte erklärt und darüber hinaus Rückschlüsse auf ihre Vergangenheit zuläßt.

Begonnen hat die Erosion der Marsatmosphäre wahrscheinlich im späten Noachian, als der davor noch vorhandene geodynamische Dynamo seinen Betrieb einstellte und das Magnetfeld zusammenbrach. Modellrechnungen, die auf dem ersten Mars-Express Kongreß 2005 vorgestellt wurden gehen davon aus, daß in der Frühzeit des Mars ein mildes Klima, eine wasserreiche Oberfläche und eine dichte Atmosphäre bestanden hat. In dem seitdem vergangenen ca. 3.5 Milliarden Jahren ist diese ehemals dichte Atmosphäre jedoch weitgehend verlorengegangen. Die in die Ionosphäre gelangten Wassermoleküle wurden z.B. photochemisch dissoziiert. Der leichte Wasserstoff diffundierte in den Weltraum und die schwereren Sauerstoffionen konnten aufgrund ihrer Wechselwirkung mit dem ungebremsten Sonnenwind den Planeten verlassen. Abschätzungen ergaben, daß seit dieser Zeit eine Wassermenge, die ungefähr einem planetenumfassenden Meer mit einer Tiefe von 10 bis 20 m

entsprochen hat, in den Weltraum entwichen ist. Da aber um die vielfältigen, von flüssigen Wasser hervorgerufenen morphologischen Strukturen der Marsoberfläche zu erklären, eine Wassermenge, die einer globalen Schicht mit einer Tiefe von ungefähr 150 m entspricht, erforderlich ist, kann man davon ausgehen, daß sich der größte Teil davon immer noch im gefrorenen Zustand auf dem Planeten befindet.

Als besonders interessant erwies sich die magnetische Kartierung der Marsoberfläche mit dem MAG/ER-Experiment vom MGS. Die Magnetisierung der Oberflächengesteine ist offensichtlich nicht gleichmäßig über den Planeten verteilt. Es gibt vielmehr Magnetfeldanomalien, die besonders im Bereich der Marsvulkane auffällig sind. Die Tharsis-Region scheint dagegen frei von derartigen Anomalien zu sein. Diese lokalen Magnetfelder wirken übrigens wie kleinräumige Magnetosphären, weshalb sie auch intensiv erforscht werden.



Connerney, J. E. P. et al., (2005) Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 102, No. 42, 14970-14975.

R1599\_1pub

Eine weitere interessante Entdeckung war der Nachweis von Polarlichtern mit Hilfe des SPICAM-Instruments („Spectroscopy for the Investigations and the Characteristics of the Atmosphere on Mars“) der ESA-Sonde Mars Express. Zuvor waren Aurorae nur von der Erde, von der Nachtseite der Venus und von den Riesenplaneten Jupiter und Saturn bekannt. Beim Mars bilden die „Polarlichter“ jedoch keinen Kranz um die Pole (was das Vorhandensein eines magnetischen Dipolfeldes voraussetzen würde), sondern sie sind auf Oberflächengebiete mit lokalen Magnetanomalien beschränkt. Die von dort ausgehenden Felder fokussieren den Elektronenfluß in der darüber liegenden Marsatmosphäre (d.h. in einer Höhe von 220 bis 250 Kilometer), wobei die in diesen Magnetfeldern beschleunigten Elektronen in Wechselwirkung mit in tieferen Regionen vorhandenen Sauerstoffatomen und Kohlendioxid-Molekülen treten und dabei Leuchterscheinungen im UV-Bereich auslösen.

**Daten****BAHNPARAMETER**

Große Halbachse ( $10^6$ km)	227.92
Umlaufszeit (siderisch) in Tagen	686.980
Umlaufszeit (tropisch) in Tagen	686.973
Perihelabstand ( $10^6$ km)	206.62
Aphelabstand ( $10^6$ km)	249.23
Mittlere Bahngeschwindigkeit (km/s)	24.13
Max. Bahngeschwindigkeit (km/s)	26.50
Min. Bahngeschwindigkeit (km/s)	21.97
Bahnneigung (Grad)	1.85
Numerische Exzentrizität	0.0935
Sidereale Rotationsperiode (Stunden)	24.623
Länge eines Tages (Stunden)	24.66

**PLANETENPARAMETER**

Masse ( $10^{24}$ kg)	0.6418
Volumen ( $10^{10}$ km <sup>3</sup> )	16.318
Äquatorradius (km)	3397
Polradius (km)	3375
Abplattung	0.0065
Mittlere Dichte (kg/m <sup>3</sup> )	3933
Schwerebeschleunigung (m/s <sup>2</sup> )	3.69
Entweichgeschwindigkeit (km/s)	5.03
Albedo	0.250
Geometrisches Albedo	0.150
Solarkonstante (W/m <sup>2</sup> )	589.2
Strahlungstemperatur (K)	210.1

**ATMOSPHERE**

Oberflächendruck (bar)	~6.36
Oberflächendichte (kg/m <sup>3</sup> )	~0.020
Skalenhöhe (km)	11.1
Mittlere Oberflächentemperatur (K)	~210
Tägliche Temperaturschwankungen Oberfläche (K)	184-242
Windgeschwindigkeit Oberfläche (m/s)	2-7 / 17-30
Mittleres Molekulargewicht (g/mol)	43.34

## Literatur zum Thema

K. Lindner: **Taschenbuch der Astronomie**, Fachbuchverlag Leipzig, 1997

H. Bernhard, K.Lindner, M.Schukowski: **Wissensspeicher Astronomie**, Volk und Wissen 1995

A.Unsöld, B.Baschek: **Der neue Kosmos**, Springer-Verlag 2004

A.Weigert, H.J. Wendker: **Astronomie und Astrophysik**. Ein Grundkurs, Wiley-VCH 2004

H. Karttunen et.al.: **Fundamental Astronomy**, Springer-Verlag 2000

B.W. Jones: **Discovering the Solar System**, Wiley 2000

McBride, Gilmour: **Introduction to the Solar System**, Cambridge University Press 2004

McNab, Younger: **Die Planeten**, RM Buch- und Medienvertrieb 1999



## Index

### A

Adams-Williamson-Gleichung 56  
Agyre 90  
Alba Patera 109  
Albor Tholus 111  
Aldrin, Edwin 10  
Alpha-Regio 26  
Alteo Regio 34  
Amazonian 96, 97  
Amazonis Planitia 111  
Aphrodite Terra 26, 31  
Apogäum 53  
Arachnoide 32, 33  
Ares-Vallis 99, 116  
Argyre 94, 97  
Armstrong, Neil 10  
Arsia Mons 90, 108  
Ascræus Mons 90, 108  
Asthenosphäre 57, 58, 66  
Astronomische Einheit 22, 52  
Atalanta Planitia 27  
Atla Regio 31, 32  
Atlantik 66, 67  
Atmosphäre (Erde) 75  
Atmosphäre (Mars) 119  
Atmosphäre (Merkur) 19  
Atmosphäre (Venus) 41

### B

Bakterien 81  
Bakterien, extremophile 127  
Basalt 36, 57, 93  
Beta Regio 26, 27, 34  
Biodiversität 69  
Biosphäre (Erde) 80  
Biosphäre (Mars) 127  
Blitzentladungen 34  
Blueberries (Hämatit) 118  
Bromsalze 118  
Bullen, Keith Edward 57  
Byerly-Diskontinuität 58

### C

Caldera 33  
Caloris Plantania *Siehe* Caloris-Becken  
Caloris-Becken 16  
Ceres (Zwergplanet) 8  
Charon (Plutomon) 7  
Chryse Planitia 97, 116  
Cohen 59

Columbia-Hills 118  
Cook, James 22  
Corioliskraft 46, 78, 79, 120  
Coronae 32, 33  
Cyanobakterien 75

### D

D''-Schicht 58  
Däniken, Erich von 88  
Danilova-Krater (Venus) 28  
Dao Vallis 98  
Dawkins, Richard 81  
de Duve, C.R. 81  
Deimos 91  
Deuterium 45  
Diana Chasma 27  
Diapir 31. 58  
Diskontinuität 57  
Dome 33  
Doppelplaneten 52  
Druckgradientenkraft 78  
Dynamoeffekt 15, 93

### E

Einschlagkrater (Mars) 96  
Einstein, Albert 14  
Eisvorkommen (Merkur) 19  
Eklogite 58  
Elongation 24  
Elysium Mons 111  
Elysium-Region 94, 110, 111  
Emmerich, R. 74  
Endurance-Krater 118  
Epizentrum 53, 54  
Erdbebenwellen 53  
Erde 11, 12, 14, 51  
Erdkern, äußerer 59  
Erdkern, innerer 58, 59  
Erdkruste 57  
Erdmantel 57, 65  
Eris 8  
Eukaryonten 81  
Eurasia 62  
Europa (Jupitermond) 9, 81  
Evolution 83  
Exosphäre 19, 78  
Extinktion (Massenaussterben) 82

## F

Flaugergues, Honore 121  
Forget 113  
Formaldehyd 122, 123  
Formisano, Vittorio 123

## G

Gaja-Hypothese 80  
Galilei, Galileo. 21  
Ganymed (Jupitermond) 14, 81  
Geodynamo 59  
Geoid 53  
Gesteinsproben (Venus) 36  
Gipfelcaldera 110  
Gleichgewicht, geostrophisches 47  
Gleichgewicht, zyklotropisches 47  
Glutwolken 110  
Gold, T. 85  
Golfstrom 72  
Gondwana 61, 67  
Gould, Stephen Jay 84  
Graff, Kasimir 121  
Granat 58  
Grenzschicht, planetare 77  
Große Syrte 121  
Guinevere Planitia 27  
Gula-Montes 32  
Gullies 103  
Gusev-Krater 117, 118  
Gutenberg-Wiechert-Diskontinuität 58  
Gutenberg-Zone 57

## H

Hadley-Zelle 46, 120  
Hämatit 118  
Hansen, J.E. 47  
Hart, Michael 70  
Hartmann, W.K. 115  
Head, W. 107  
Hecates Tholus 111  
Heliopause 7  
Hellas 90, 94, 96, 97  
Herrick 40  
Herschel, Friedrich Wilhelm 8  
Hesperia Planum 96, 97, 110  
Hesperos (Abendstern) 24  
Hochdruckgebiete 79  
Hovenier, J.W. 47  
HRSC-Kamera 93  
Hydrosphäre (Erde) 70

## I

Ignimbrite 110  
Impaktkraterstatistik 96  
Inlandeis 70  
Innerer Aufbau (Erde) 53  
Innerer Aufbau (Mars) 91  
Innerer Aufbau (Merkur) 14  
Innerer Aufbau (Venus) 24  
Io (Jupitermond) 9  
Ionopause 49  
Ionosphäre 48  
Ishtar Terra 26, 27  
Isidis 97  
Isostasie 57, 62

## J

Jahreszeiten 52  
Jarosit 118  
Jetstreams 46, 79, 120  
Jupiter 11

## K

Kallisto (Jupitermond) 14, 81  
Kalmenzone 79  
kambrischen Explosion 82  
Karbonatgesteine 44  
Karbonatzyklus 69  
Kepler, Johannes 22  
Klima 69  
Klimapuffer 72  
Kohlendioxid-Zyklus 122  
Kohlenstoffkreislauf 44  
Komatiite 92  
Kometen 9, 49  
Kompressionsmodul 55  
Kontinentalblöcke 62, 65, 66, 67  
Kontinentaldrift 61  
Kontinentalklima 72  
Kontinentalverschiebung 64  
Konvektionsströmungen 46, 59, 65  
Kryosphäre 43  
Kuiper Belt Objects 8  
Kuiper-Gürtel 8

## L

Landhemisphäre 61  
Laufzeitkurven 54, 56  
Lavakanäle (Venus) 29  
Lavinia Planitia 27

Leben 51, 75, 80, 127  
Leben, Entstehung 81  
Lithosphäre 56, 57, 64  
Lomonossow, Michail W. 22, 41  
Longitudinalwellen 53  
Lovelock, James 80  
Lowell, Percival 88  
Lunae Planum 110  
Lysokline 72

## M

Maadim Vallis 117  
Maat Mons 31,32  
Magellan 22, 24- 26, 29, 31, 32, 35, 37, 39, 40, 42  
Magmakammer 58, 110  
Magnetfeld 15  
Magnetfeld (Mars) 129  
Magnetfeld (Merkur) 19  
Magnetfeld (Venus) 48  
Magnetisierungsmuster (Mars) 93  
Magnetosphäre 129  
Magnetosphäre, induzierte 48  
Mantel, oberer 57  
Mantel, unterer 58  
Mantelkonvektion 92  
Mantelkühlung 70  
Mantelplume (Diapir) 92  
Mare Orientale (Mond) 17, 95  
Mariner 10 13, 15, 16, 17, 19, 22  
Mariner 4 89, 129  
Mariner 9 89, 112, 113, 121  
Mars 11, 12, 75  
Mars 2 89, 129  
Mars 3 89, 129  
Mars Global Surveyor 88, 89, 91- 93, 101, 109, 111, 114, 121, 124, 129  
Marsatlas 93  
Marsatmosphäre, Zusammensetzung 119  
Mars-Expreß 92, 93, 94, 106, 122, 123, 129  
Marsgesicht 88  
Marskanäle 88  
Marsmenschen 88  
Mars-Meteorite (ALH 84001) 127  
Maxwell, James Clerk 26  
Maxwell-Montes 26, 27  
Mayr, Ernst. 84  
McKay, D.S. 127  
Mead-Krater (Venus) 28  
Meeresströmungen, globale 73  
Meerwasser, Bestandteile 71  
Merkur 11, 12, 13, 21, 97  
Merkurkrater 15

Mesopause 77  
Mesosphäre 58, 77  
Methan 123, 128  
Mohorovicic, Andrija 57  
Mohorovicic-Diskontinuität 57  
Mond 52, 97  
Monsun 79

## N

Neptun 11  
Neukum, Gerhard 92, 113, 115  
Neutralschicht 49  
Niger Vallis 98  
Nix Olympica *Siehe* Olympus Mons  
Noachian 97  
Noachis 96  
Nova (Vulkantyp) 33  
Novae (Vulkantyp) 33

## O

Oberfläche (Erde) 61  
Oberfläche (Mars) 93  
Oberfläche (Merkur) 15  
Oberfläche (Venus) 26  
Oberflächenwellen 53  
Olivin 58, 117, 123  
Olympus Mons 90, 91, 92, 94, 97, 108, 109, 110, 112  
Oortsche Kometenwolke 9  
Opportunity (Marsrover) 116, 117, 118  
Ovdia Regio 27  
Oze 123  
Ozeane 61, 66, 69, 72  
Ozonschicht 77  
Ozza Mons 31,32

## P

Parmetier 40  
Pausen 76  
Pavonis Mons 90, 108  
Peridotite 58  
Perigäum 53  
Periheldrehung, relativistische 14  
Periheloppositionen 90  
Permafrostboden 98, 111  
Perowskit 91  
Pfannkuchenvulkane 33  
Phasendiagramm 99  
Phasenübergänge 60  
Phobos 91  
Phobos (Marssonde) 129

Phoebe 35  
 Phosphoros (Morgenstern) 24  
 Phosphorsäure 47  
 Photolyse 76  
 Photosynthese 75  
 Piazz, Guisepe 8  
 Plagioklas 117  
 Planeten, erdartige 12  
 Planetesimal 96  
 Planetoidengürtel 8, 12  
 Planum Australe 96  
 Planum Boreum 95  
 Plateaubasalte 29  
 Plattenränder 64  
 Plattentektonik 36, 44, 57, 61, 69  
 Plinius dem Jüngeren 110  
 Plutinos 8  
 Pluto 7, 11  
 Polarfrontjet 79  
 Polarzirkulation 79  
 Polkappen (Mars) 120, 122  
 Prokaryonten 81  
 Prozesse, äolische 121  
 P-Wellen 53, 59  
 Pyroxen 58, 111, 117

## Q

Quaoar 8

## R

Rampartkrater 98  
 Raumwellen 53  
 Rayleigh-Streuung 42  
 Reese, C.C. 40  
 Resonanz 14, 24  
 Resurfacing 25, 29, 37, 97  
 Richardson 120  
 Riesenplaneten 7, 9  
 Riftzone 63, 58  
 Rossbreiten 79

## S

Sacajawea Patera 33  
 Sappas Mons 31,32  
 Saturn 9, 11  
 scarps 15, 16  
 Schiaparelli, Giovanni 88, 112  
 Schilde 62  
 Schildvulkane (Venus) 31  
 Schwefel 47

Schwefelsäure 47  
 Sedna 8  
 Seismologie 56  
 Serpentin 128  
 Serpentinisierung 123  
 SETI 84  
 Sharma 123  
 Shergotty-Meteorit 111  
 Sif-Montes 32  
 Silitinkjewitsch 46  
 Snider-Pelligrini, Antonio 61  
 SOHO 49  
 Sojourner (Marsrover) 116  
 Sonne 7  
 Sonnenaktivität 77  
 Sonnenwind 7, 48  
 Sonnenzyklus 77  
 Spinell 91  
 Spirit (Marsrover) 116, 117  
 Starrheitsmodul 54  
 Staubring 7  
 Staubstürme (Mars) 89, 120, 121, 122  
 Staubteufel (Windhose) 124  
 Stishovit 58  
 Stixrude 59  
 Stofan, E.R. 38  
 Stratopause 77  
 Stratosphäre 76, 77  
 Subduktionszone 36, 44, 61, 65, 66, 69, 71, 116  
 Subtropenjet 79  
 Superrotation 41, 47  
 S-Wellen 53, 55, 59  
 Synthetic Aperture Radar 26

## T

Taylor, H.A. 38  
 Tesseræ 29  
 Tethys (Urozean) 66, 67  
 Tharsis Montes 111  
 Tharsis-Region 92, 97, 108, 111  
 Thermosphäre 43, 77  
 Thetis Regio 27  
 Tiefdruckgebiete 79  
 Tiefseegräben 64  
 Titan (Saturnmond) 9  
 Titius, Johann Daniel 8  
 Titius-Bode'sche Reihe 8  
 Totalvereisung 70  
 Trägheitsmoment 56  
 Transformstörungen 63, 64  
 Transversalwellen 53  
 Treibhauseffekt 41, 43, 44, 69, 111

Treibhausinstabilität 44, 69, 70

Trockeneis 120, 122

Tropopause 76, 77

Troposphäre 46, 76, 77

Troposphäre / Mesosphäre (Venus) 43

Turcotte 39

Tyrrhena Patera 110

## U

Übergangszone, oberer - unterer Mantel 58

Uranus 8, 11

Utopia Planitia 117

## V

Valles Marineris 27, 90, 92, 97, 110

Varuna 8

Velikowsky, Immanuel 88

Venus 11, 12, 21, 75

Venusdurchgang 22, 41

Venusphasen 21

Venuswolken 45

Viking 9, 88, 89, 91, 93, 101, 102, 116, 117, 119, 120, 122,  
127

Vulkan, hypothetischer Planet 14

Vulkane (Venus) 31

## W

Wächterhäuser, G. 81

Ward, Peter D. 82

Wärmetransport 46

Wasser (Mars) 101

Wasserhemisphäre 61

Wegener, Alfred 61

weird terrain 17

Welles, Orson 88

Wells, Herbert George 87

Wilson, Edward O. 85

Wilson, John Tuzo 67

Wilson-Zyklus 67, 69

Windsystem, zonales 46

## Z

Zerfall, radioaktiver 69

Zirkulation, meridionale 78

Zodiaklicht 9

Zwergplaneten 7, 11

Zyklone 47