

2

Der Erdmond – ein besonderer Mond

Dieses Kapitel behandelt in Kurzform das Sonnensystem, seine Entstehung und seine Monde. Des Weiteren wird diskutiert, welche Planeten und Monde unseres Sonnensystems die Voraussetzungen für Leben erfüllen und ob der Mond für das Leben auf der Erde erforderlich ist. Das Kapitel schließt mit einem Ausblick auf die zukünftige Entwicklung des Erde-Mond-Systems. Die verwendeten Maßeinheiten und Konstanten sind in Anhang 1 und 2 zusammengestellt.

2.1 Planetensystem, Ekliptik, Tierkreis und Jahreszeiten

An die Sonne, unser Zentralgestirn, sind acht Planeten gebunden. Dies sind, in der Reihenfolge ihres Abstands von der Sonne, die mit bloßem Auge sichtbaren und seit der Antike bekannten Planeten *Merkur*, *Venus*, *Erde*, *Mars*, *Jupiter* und *Saturn*. Hinzu kommen *Uranus* und *Neptun*, die 1781 bzw. 1846 entdeckt wurden. *Pluto*, dem erst 1930 entdeckten neunten und bei Weitem kleinsten Planeten, wurde der Status eines Planeten durch die Internationale Astronomische Union (IAU) im Jahre 2006 wieder aberkannt. Er zählt seitdem zur Gruppe der Zwergplaneten.

Die Erde läuft einmal im Jahr um die Sonne; dabei rotiert sie einmal pro Tag um die eigene Achse. Die Sonne dreht sich einmal in etwa 25 Tagen um sich selbst.

Von der Erde aus gesehen bewegt sich die Sonne scheinbar auf einer Bahn vor dem Hintergrund der Fixsterne, welche *Ekliptik* genannt wird (Abb. 2.1). Ein Umlauf der Sonne auf der Ekliptik dauert ein Jahr, entsprechend einer Bewegung von etwa 1° pro Tag ($360^\circ/365,24$ Tage) von West nach Ost. Die Ebene der scheinbaren jährlichen Sonnenbahn, also die Ebene der Ekliptik, wird ebenfalls meist Ekliptik genannt. Sie ist mit der Bahnebene der Erde um die (ruhende) Sonne identisch, genauer gesagt mit der Bahnebene des gemeinsamen Schwerpunktes von Erde und Mond.

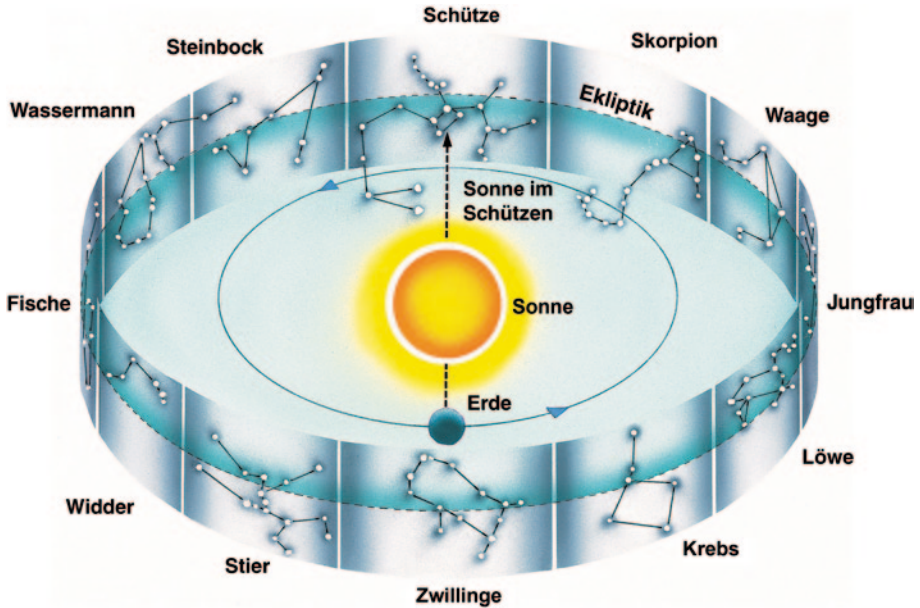


Abb. 2.1 Der scheinbare Lauf der Sonne durch die Ekliptiksternbilder. (Illustration von Frank Kliemt aus WAS IST WAS, Bd. 21: Der Mond © Tessloff Verlag Nürnberg)

Die Umläufe aller Planeten um die Sonne sowie auch der Umlauf des Mondes um die Erde erfolgen *rechtläufig*, vom Nordpol der Ekliptik aus gesehen also im Gegenuhrzeigersinn. Ebenso rotieren Sonne, Erde, Mond und die meisten Planeten rechtläufig um ihre eigenen Drehachsen. Die Bahnebenen aller Planeten und des Mondes sind nur schwach gegen die Ekliptik geneigt. Von der Erde aus gesehen bewegen sie sich deshalb immer in einer relativ schmalen, die Himmelskugel umspannenden Zone, in deren Mitte die Ekliptik verläuft. Aus diesem Grund kommt es nicht nur zu relativ häufigen Sonnen- und Mondfinsternissen, sondern auch zu *Konjunktionen* (Begegnungen) von Planeten untereinander oder mit der Sonne oder zu Planetenbedeckungen durch den Mond. Diese Himmelszone, die *Tierkreis* oder *Zodiakus* heißt, wird durch die zwölf *Tierkreissternbilder* oder *Ekliptiksternbilder* markiert. Diese sind:

Widder, Stier, Zwillinge (Frühling)
 Krebs, Löwe, Jungfrau (Sommer)
 Waage, Skorpion, Schütze (Herbst)
 Steinbock, Wassermann, Fische (Winter)

Die Größen der Sternbilder an der Himmelskugel wurden 1925 durch internationale Vereinbarung festgelegt. Danach gibt es 88 Sternbilder, die den

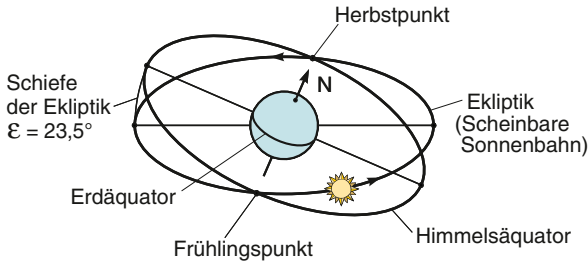


Abb. 2.2 Scheinbare Sonnenbahn und Schiefe der Ekliptik

Himmel lückenlos überdecken. Da die Sternbilder unterschiedlich groß sind, hält sich die Sonne verschieden lange in den einzelnen Tierkreissternbildern auf. So verweilt sie z. B. im Skorpion nur sechs Tage, durchläuft dann 18 Tage lang das 13. Sternbild Schlangenträger, welches gar nicht zu den Tierkreissternbildern gezählt wird, bis sie den Schützen erreicht.

In Abb. 2.2 ist die Sonnenbahn bezogen auf die scheinbar ruhende Erde dargestellt. Die Erdachse ist gegen das Lot auf der Ekliptik um $23,5^\circ$ geneigt oder, was dasselbe ist: Der *Erdäquator* und der in den Weltraum hinein verlängerte *Himmelsäquator* sind um $23,5^\circ$ gegen die Ekliptik geneigt. Diese Neigung nennt man auch *Schiefe der Ekliptik*. Ekliptik und Himmelsäquator haben zwei Schnittpunkte, den *Frühlingspunkt* und den *Herbstpunkt*. Wenn die Sonne diese Punkte passiert, ist *Frühlingsanfang* bzw. *Herbstanfang*; diese Zeitpunkte werden auch *Tag-und-Nacht-Gleiche* oder *Äquinoktien* genannt. Die Zeit zwischen zwei Durchgängen der Sonne durch den Frühlingspunkt heißt ein *tropisches Jahr* und dauert $T_{E, trop} = 365,2422$ Tage (tropisch bedeutet hier: auf den Frühlingspunkt bezogen). Unser gregorianischer Kalender ist durch das Einfügen von Schaltjahren so konstruiert, dass im langjährigen Mittel ein Kalenderjahr gleich einem tropischen Jahr ist. Dabei fällt der Frühlingsanfang stets auf den 20. oder 21. März.

Frühlings- und Herbstpunkt liegen allerdings nicht raumfest am Fixsternhimmel, sondern wandern langsam auf der Ekliptik rückwärts. Dies rührt daher, dass die Erdachse nicht immer in dieselbe Richtung zeigt, sondern eine Taumbewegung vollzieht, die man *Präzession* nennt (von lat. *praecedere* = vorangehen; bezieht sich auf das Voranschreiten des Frühlingspunktes auf der Ekliptik). Unser Planet verhält sich wie ein schräg stehender Kreisel. Hierbei taumelt die Erdachse auf einem Kegelmantel mit halbem Öffnungswinkel von $23,5^\circ$, dessen Achse senkrecht auf der Ekliptik steht. Damit taumelt auch der Himmelsäquator (Abb. 2.2), und folglich verschieben sich dessen Schnittpunkte mit der Ekliptik, also Frühlings- und Herbstpunkt. Der *Zyklus der Präzession* oder die *Präzessionsperiode* beträgt 25.700 bis 25.800 Jahre. Zwar verschieben sich Frühlings- und Herbstpunkt nur um 1° in 71 Jahren, sodass sie in einem Menschenleben als quasi raumfest angesehen werden können,

aber in historischen Zeiträumen ist ihre Verschiebung bereits beachtlich: In $25.750/12 \approx 2150$ Jahren wandern sie um durchschnittlich ein Tierkreissternbild. Zurzeit liegt der Frühlingspunkt im Sternbild Fische und der Herbstpunkt im Sternbild Jungfrau.

In der *Astrologie* hingegen spricht man von *Tierkreiszeichen* oder *Zeichen*, die den Tierkreis in zwölf gleiche Abschnitte von je 30° der Ekliptikzone unterteilen. Die Folge der Tierkreiszeichen lässt man fest am kalendarischen Frühlingsanfang mit dem Widder beginnen, und am Herbstanfang tritt die Sonne in das Zeichen Waage. Die Astrologen ignorieren also die Bewegung des Frühlings- und Herbstpunktes relativ zu den Tierkreissternbildern, obwohl diese schon seit Hipparchos (Abschn. 1.3) bekannt ist. Die Astrologen haben den Himmelszustand, der in hellenistischer Zeit galt, bis heute unverändert beibehalten. In jener Zeit haben die Griechen die Tierkreis- und Planetenastrologie von den Babyloniern und Ägyptern übernommen. Heute sind die Tierkreiszeichen gegen die realen Tierkreissternbilder um etwa ein Sternbild nach vorne verschoben, weil in den gut zwei Jahrtausenden seit damals der Frühlingspunkt um etwa ein Zwölftel eines Vollkreises auf der Ekliptik rückwärts gewandert ist. Die astrologischen Tierkreiszeichen sind somit nichts anderes als *Namen für Zeitabschnitte* des Jahres ab Frühlingsanfang, die mit der wahren Position der Sonne auf der Ekliptik nur entfernt etwas zu tun haben.

Wie in Abb. 2.3 gezeigt, kreist die Erde samt Mond um die als ruhend betrachtete Sonne¹, wobei sich die Erdachse parallel im Raum verschiebt. Durch ihre jeweilige Neigung relativ zur Sonne entstehen die Jahreszeiten: Bei Frühlings- und Herbstanfang steht die Erdachse senkrecht auf der Verbindungslinie Erde–Sonne. Am 21. Juni ist die Erdachse mit $90^\circ - 23,5^\circ = 66,5^\circ$ am stärksten der Sonne zugeneigt und am 22. Dezember mit $90^\circ + 23,5^\circ = 113,5^\circ$ am weitesten von ihr weggeneigt. Diese beiden Daten markieren auf der Nordhalbkugel den Sommeranfang (= Sommersonnenwende = Mittsommertag) bzw. den Winteranfang (= Wintersonnenwende = Mittwintertag). Auf der Südhalbkugel gilt das entsprechend Umgekehrte. Diese beiden Zeitpunkte heißen auch *Solstitien* (*Sonnenstillstand*), weil – wieder im Bild der bewegten Sonne (Abb. 2.2) – die Sonne dann ihren höchsten oder niedrigsten Stand über dem Himmelsäquator hat, also ein Maximum bzw. Minimum durchläuft und damit sozusagen „stillsteht“.

¹ Tatsächlich gibt es im Kosmos keine ruhenden Objekte; unser Sonnensystem bewegt sich innerhalb unserer Galaxie, der Milchstraße.

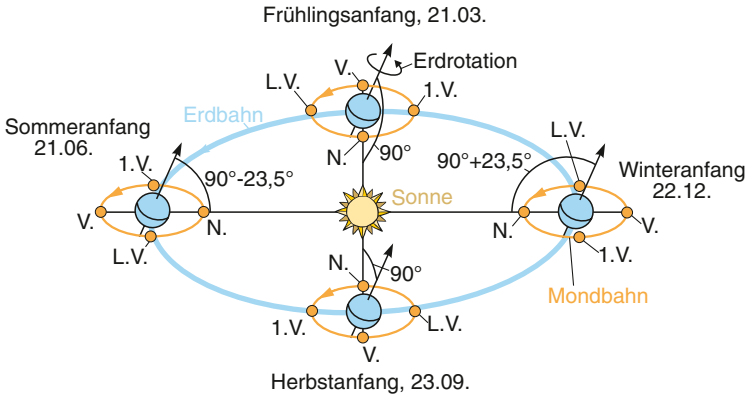


Abb. 2.3 Umlaufbahn von Erde und Mond in Schrägansicht. Die Mondbahn ist hier relativ zur bewegten Erde gezeichnet, die Erdbahn hingegen relativ zur Sonne. Die Erdachse ist um $23,5^\circ$ gegen das Lot auf der Ekliptik geneigt und verschiebt sich beim Umlauf der Erde um die Sonne parallel im Raum. Durch ihre jeweilige Neigung relativ zur Sonne entstehen die Jahreszeiten. N. = Neumond; 1.V. = erstes Viertel, zunehmender Halbmond; V. = Vollmond; L.V. = letztes Viertel, abnehmender Halbmond

2.2 Die Entstehung des Sonnensystems

Nach gängiger Auffassung, die sich auf die Beobachtung unter anderem heute neu entstehender Sonnen und auf Modellrechnungen stützt, ist unser Sonnensystem etwa folgendermaßen entstanden:

Vor rund 4,6 Mrd. Jahren bewegte sich eine ausgedehnte Molekülwolke um ein gemeinsames Zentrum innerhalb der Milchstraße. Dieser *Sonnennebel* bestand größtenteils aus den Gasen Wasserstoff und Helium sowie schweren Elementen in Form von Molekülen und mikroskopisch kleinen Staubteilchen, die aus Resten explodierter Sonnen (=Sternen) einer älteren Sternengeneration stammten. Der Wasserstoff und der überwiegende Teil des Heliums waren bereits beim Urknall entstanden. Durch selbstständiges Zusammenballen aufgrund der Gravitation verdichtete sich diese Wolke stark. Daraus entstand zunächst eine Gaskugel, die sich im Laufe ihrer Verdichtung immer mehr erhitze. Bei der Kontraktion nahm die Rotationsgeschwindigkeit der Gaswolke zu, denn der einmal vorhandene Drehimpuls bleibt erhalten. Darüber hinaus plattete sich die Gaswolke ab und erreichte schließlich die Form einer flachen Scheibe. Wie kam es zu der Form dieser *Akkretionsscheibe*? Senkrecht zu ihrer Drehachse konnte sich die Wolke nicht unbegrenzt verkleinern, das verbot die Drehimpulserhaltung; parallel zur Drehachse konnte sich das Gas jedoch ungehindert komprimieren. Akkretion bedeutet hier den Transport von Partikeln aus der Scheibe zum Zentrum, der wegen Drehimpulserhaltung nur möglich ist, wenn gleichzeitig Partikel auf der Scheibe nach

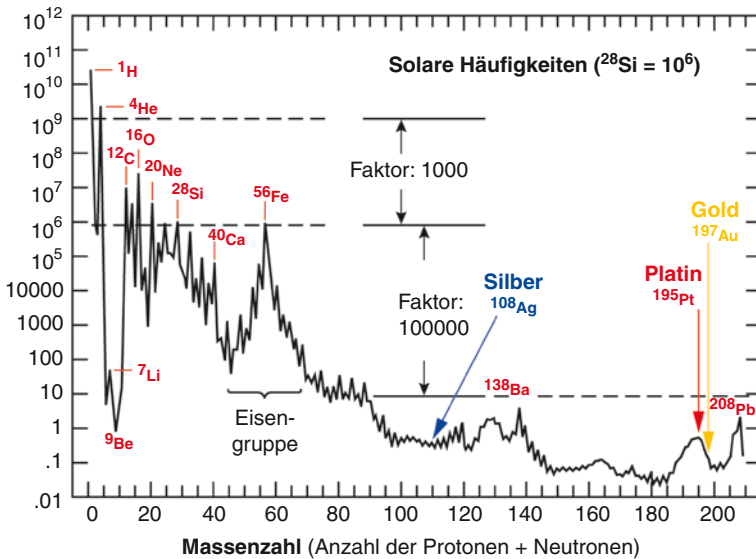


Abb. 2.4 Häufigkeitsverteilung der chemischen Elemente im Sonnensystem. Auf der horizontalen Achse ist die Massenzahl A (d. h., die Zahl der Protonen plus Neutronen im Atomkern) der Elemente und ihrer Isotope aufgetragen. Die Häufigkeit ist logarithmisch dargestellt und der Wert für Silizium-28 willkürlich auf 10^6 gesetzt. Einige markante Spitzen sind mit den zugehörigen Elementen bezeichnet. (© E. Müller, MPI für Astrophysik, Garching, und H.-Th. Janka. Aus: Supernovae und kosmische Gamma- blitze. Springer Spektrum 2011)

außen transportiert werden. Im Laufe von nur etwa 10 Mio. Jahren gingen aus der zentralen, stärkeren Verdichtung die junge Sonne und aus den kleineren Verdichtungen in den Außenbezirken Planeten sowie in deren Nachbarschaft wiederum Satelliten (Monde) hervor. Die Gestalt dieser rotierenden Urscheibe hat sich allen Planeten in Form eines gleichen Umlaufsinn und einer ungefähr gleichen Bahnebene (der Ekliptik) mitgeteilt. Schließlich kam bei der weiteren Verdichtung der jungen, rot leuchtenden Sonne die eigene Energieerzeugung durch Kernfusion in Gang. Die Sonne und das Planetensystem sind also gleichzeitig entstanden.

Die aus ehemaligen Sonnen stammende Materie enthielt neben Wasserstoff und Helium bereits schwerere chemische Elemente. Sie waren im Inneren massereicher Sonnen durch stufenweise Kernfusion, aufsteigend von leichteren zu immer schwereren Kernen, erzeugt worden (Abb. 2.4). Die heute im Planetensystem vorhandenen schweren Elemente bis hin zum Uran existierten also bereits in der interstellaren Wolke und sind nicht durch unsere Sonne produziert worden. Welch eine Vorstellung, dass somit z. B. alle Kohlenstoffkerne in unserem Körper älter sind als das Sonnensystem!

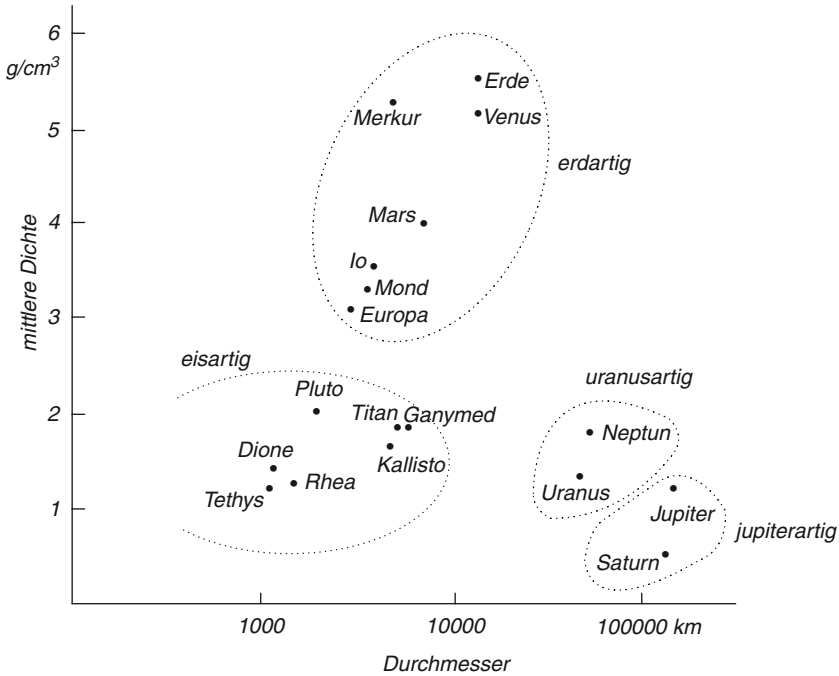


Abb. 2.5 Durchmesser-Dichte-Diagramm von Planeten und Monden

Die *erdartigen* oder *terrestrischen* Planeten Merkur, Venus, Erde und Mars sowie der Erdmond und einige andere Monde weisen schwerere Elemente in viel größerer Häufigkeit auf als die sonnenfernen *jupiterartigen*, *uranusartigen* und *eisartigen* Planeten und Monde (Abb. 2.5). Die erdartigen Gestirne bestehen im Allgemeinen aus einem Eisenkern und einem Gesteinsmantel, die letzteren Gruppen dagegen in unterschiedlicher Weise aus einem kleinen Gesteinskern, umgeben von leichten Atomen und Molekülen wie Wasserstoff, Helium, Wassereis und Methan. Die mittlere Dichte der erdartigen Himmelskörper liegt mit 3,0–5,5 g/cm³ deutlich höher als die der sonnenfernen mit 0,5–1,8 g/cm³.

Wie kam es zu dieser räumlichen Trennung von schweren und leichten Elementen? Die schweren Elemente fielen bereits bei höheren Temperaturen in Sonnennähe als Oxide und ähnliche Verbindungen aus und lagerten sich als Staubteilchen und zunehmend größere Partikel zusammen. Wasserstoff und Helium hingegen blieben gasförmig, denn sie kondensieren erst bei einer absoluten Temperatur² von 20 K bzw. 4 K. Diese sehr leichten Gase konnten deshalb vom *Sonnenwind*, der vor allem aus Protonen, Heliumkernen und

² Absolute Temperatur in Einheiten von Kelvin: $T_{abs}(K) = T(^{\circ}C) + 273,15$

Elektronen besteht, welche der Sonnenkorona entstammen, nach außen geblasen werden.

Restbestandteile der Urwolke sind heute noch die Tausende von *Meteoroiden* (Kleinkörpern) und *Planetoiden* (Kleinplaneten), die die Sonne umkreisen und den *Asteroidengürtel* zwischen Mars und Jupiter sowie den sog. *Kuiper-Gürtel* jenseits der Neptunosphäre ausmachen. Ferner sind es die *Kometen* (Schweifsterne) sowie interplanetare Gase und Staub. Meteoroiden, die auf die Erde oder den Mond prallen, nennt man *Meteorite*.

2.3 Ein Mond unter Monden

Monde sind Himmelskörper, die Planeten umkreisen. Die Zahl der uns bekannten Monde, welche die acht Planeten umkreisen, wächst ständig. Bis September 2008 ergab sich eine Gesamtzahl von 166 bekannten natürlichen Monden (Keller 2005; Voigt et al. 2012). Davon umrunden die allermeisten die riesigen Wasserstoffplaneten Jupiter (63), Saturn (60), Uranus (27) und Neptun (13). Die vier erdartigen Planeten hingegen besitzen zusammen nur drei Monde: Merkur und Venus haben gar keinen Mond, unsere Erde den einen Erdmond und Mars zwei nur 10 und 20 km große Trabanten. Viele der Monde sind allerdings kleine bis winzige Trabanten, denn die modernsten Großteleskope können Monde in Jupiterdistanz bis herab zu 2 km Durchmesser aufspüren. Zudem flogen Raumsonden an Jupiter und Saturn vorbei und *Voyager 2* auch noch im Jahre 1986 an Uranus und 1989 an Neptun. Auch diese Missionen haben etliche neue Monde ans Licht gebracht.

Betrachten wir hingegen nur Monde, deren Durchmesser größer als 1000 km sind, so schrumpft ihre Anzahl auf 15 zusammen. Ihre Durchmesserwerte sind in Klammern angegeben:

Erde	ein <i>Erdmond</i> (3474 km)
Jupiter	die vier Galilei'schen Monde <i>Io</i> (3643 km), <i>Europa</i> (3122 km), <i>Ganymed</i> (5262 km) und <i>Kallisto</i> (4821 km)
Saturn	<i>Titan</i> (5150 km) und vier Monde zwischen 1000 und 1600 km Durchmesser
Uranus	vier große Monde zwischen 1100 und 1600 km Durchmesser
Neptun	ein großer Mond – <i>Triton</i> (2707 km)

Ganymed und Titan sind sogar größer als Merkur (4880 km), der kleinste Planet. Nach diesen beiden sowie nach Kallisto und Io ist der Erdmond der fünftgrößte Mond im Sonnensystem (Abb. 2.6). Da man die beiden winzigen Marsmonde vernachlässigen kann, ist unser Mond der Einzige im Bereich der

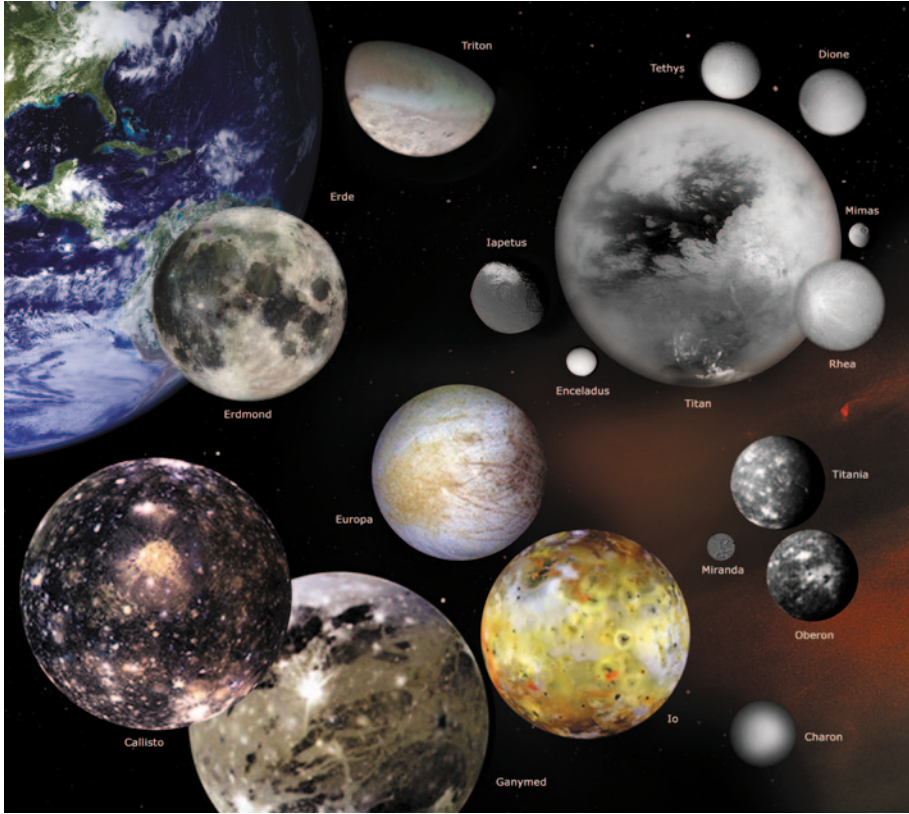


Abb. 2.6 Die größten Monde des Sonnensystems. (© NASA/DLR)

erdartigen Planeten (Abb. 2.7). Vor allem aber ist er der zur Sonne nächstgelegene Mond und deshalb der Himmelskörper mit der am stärksten gestörten Bahn im gesamten Sonnensystem. Er ist also ein besonderer Mond!

Die Monde lassen sich grob in zwei Gruppen einteilen: Die *regulären Monde* umlaufen auf fast kreisförmigen Bahnen ihre Mutterplaneten etwa in deren Äquatorebene. Ihr Umlaufsinn ist rechtläufig, wie der der Planeten. Von den hier betrachteten 15 größten Monden gehören alle bis auf den Erdmond und den Neptunmond Triton zu dieser Gruppe.

Die Bahnen der *irregulären Monde* sind stark exzentrisch und zu den Äquatorebenen ihrer Mutterplaneten stark geneigt. Ihr Umlauf ist häufig auch *retrograd*, wie z. B. bei Triton.

Der Erdmond ist ein Sonderfall. Seine Bahn ist rechtläufig und nur schwach exzentrisch. Sie liegt ungefähr in der Erdbahnebene, um die sie lediglich um $5,1^\circ$ geneigt ist. Somit ist sie um $23,5^\circ \pm 5,1^\circ$ gegen die Erdäquatorebene gekippt.



Abb. 2.7 Größenvergleich von Erde und Mond. (© links NASA/GSFC, rechts NASA/GSFC/Arizona State University, Montage: DLR)

2.4 Voraussetzung für Leben im Kosmos

Alle Planeten und Monde unseres Sonnensystems haben zusammen lediglich eine Masse von 0,13 % der Sonnenmasse. Dennoch sind sie genauso wichtig wie der große Energiespender Sonne, denn nur auf ihnen konnte und kann sich Leben entwickeln.

Der Begriff Leben wird in der Naturwissenschaft als *Selbstorganisation der Materie* verstanden, d. h. die Fähigkeit spezieller Materieformen, bei geeigneten Randbedingungen selbstreproduktive Strukturen hervorzubringen. Welches sind aus astrophysikalischer Sicht die Randbedingungen, die gegeben sein müssen, damit solcherart Leben bestehen kann? Und welche Gestirne erfüllen diese Randbedingungen?

Alle irdischen Organismen enthalten als lebensnotwendige Substanzen hochmolekulare organische Verbindungen, unter anderem Nukleinsäuren und Proteine. Damit ein Gestirn ein Lebensraum sein kann, muss es daher als erste Voraussetzung „schwere“ Elemente enthalten, denn neben Wasserstoff sind vor allem Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff, Phosphor und Kalzium die wichtigsten Bausteine der Biomoleküle. Dafür kommen nach Abb. 2.5 die

Den Mond neu entdecken

Spannende Fakten über Entstehung, Gestalt und
Umlaufbahn unseres Erdtrabanten

Kuphal, E.

2013, X, 211 S., Hardcover

ISBN: 978-3-642-37723-5