

Wasser im Weltall

Wasser ist ein besonderer Stoff. Es ist die Grundlage des Lebens auf der Erde. Die Oberfläche unseres Planeten besteht zu fast Dreivierteln aus flüssigem Wasser, eine nicht unerhebliche Menge ist in den Polkappen in Form von Wassereis ge-

speichert. Ist unser Planet ein bevorzugter Sammelplatz von Wasser im Sonnensystem, so daß hier die Biologie, wie wir sie kennen, entstehen konnte oder ist Wasser eine im Weltall häufig vorkommende Verbindung?

Um diese Frage zu beantworten, muß weit ausgeholt werden. Die Reise beginnt in der Zeit, als die Spektroskopie für die Astronomie entdeckt wurde und führt uns über die Kometen zur Entstehungsgeschichte der Erde und der anderen Planeten im Sonnensystem. Aber erst ein Blick weit über unser Planetensystem hinaus zu den riesigen interstellaren Gaswolken gibt uns einen Hinweis auf die Herkunft des Wassers, mit dem wir alltäglich unser Leben bestreiten.

Eine lange Entdeckungsgeschichte

Die Entdeckungsgeschichte des Wassers außerhalb der Erde ist so alt wie die Entwicklung der Spektroskopie. Die einzige Möglichkeit, ohne Raumfahrt Wasser außerhalb der Erde nachzuweisen, ist die Analyse des von den Himmelskörpern ausgesendeten oder reflektierten Lichtes mit spektroskopischen Mitteln. Bereits 1814 entdeckte der Physiker und Glasstecher Joseph von Fraunhofer, daß das für das menschliche Auge makellose weiße Licht der Sonne nach der Aufteilung in seine Spektralfarben durch ein Prisma dunkle Linien aufwies. Deren wahre Bedeutung wurde 33 Jahre nach seinem Tod im Jahr 1859 von den Physikern Robert Bunsen und Gustav Robert Kirchhoff interpretiert und schließlich nach ihrem Entdecker Fraunhofer-Linien genannt. Dieses Jahr gilt als das Jahr der Begründung der Spektralanalyse. Während Fraunhofer selbst etwa 1.500 Linien entdeckte, können heute ca. 25.000 Linien im Sonnenlicht nachgewiesen werden.

Diese Linien sind sogenannte Absorptionslinien. Sie entstehen, wenn das Licht aus der Photosphäre der Sonne die darüberliegende Chromosphäre passiert und auf ein Atom trifft.

Hat das Lichtquant genau die richtige Energie, so wird es vom Atom absorbiert, wobei die Atome der verschiedenen Elemente unterschiedliche Absorptions-Energie-niveaus haben. Die Folge: Genau an dieser Stelle im Spektrum des Sonnenlichts taucht eine schwarze Linie auf.

Wird das von dem Atom absorbierte Licht wieder abgestrahlt, was nicht notwendig dieselbe Energie (also dieselbe Farbe) haben muß, so geschieht es ebenfalls auf für jedes Element charakteristischen Energie-niveaus. In diesem Fall beobachtet man Emissionslinien. Jedes Element hinterläßt aufgrund dieser charakteristischen selektiven Absorption und Emission seinen Fingerabdruck im Sonnenlicht und kann eindeutig identifiziert werden.

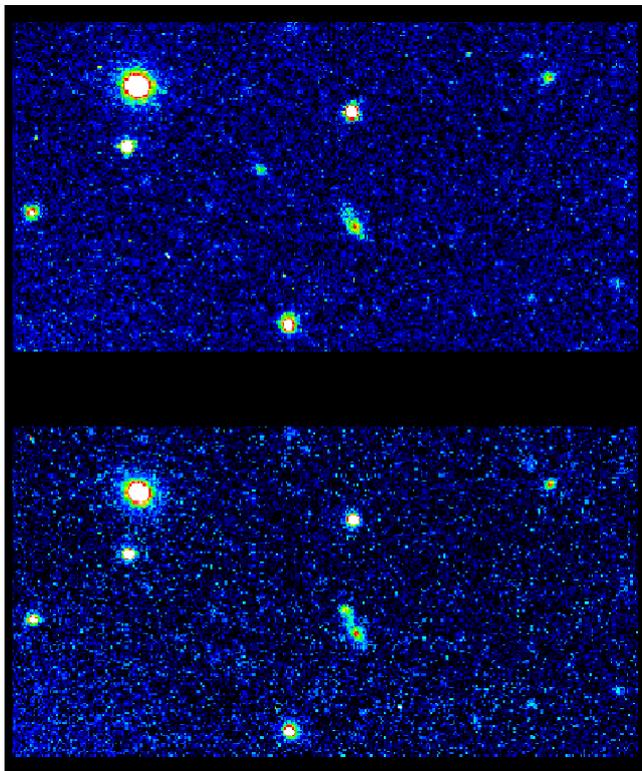
Da Fraunhofer die Absorptionslinien im Sonnenlicht nachwies, hat er damit – wenn auch unbewußt – den Grundbaustein der Astrospektroskopie gelegt. Erst in den 60er Jahren des 19. Jahrhunderts wurde von den Astronomen W. Huggins und A. Secchi nachgewiesen, daß die Spektren anderer kosmischer Objekte ebenfalls Absorptionslinien enthielten. Die Begründung der Astrospektroskopie war damit vollzogen. Die junge Wissenschaft wurde bald zum wichtigsten Zweig der noch ebenfalls



Bild 1: Der Komet Halley, aufgenommen am 12. April 1986. Foto: Cerro Tololo Interamerican Observatorium

in den Kinderschuhen steckenden Astrophysik, die sich bis dahin nur wenig mehr als über die Himmelsmechanik erstreckte. Mit der Astrospektroskopie war es nun zum ersten Mal möglich, Informationen über die Zusammensetzung der Himmelskörper zu erhalten. So war auch 1910 der in das Innere des Sonnensystems zurückgekehrte Halleysche Komet Ziel spektroskopischer Untersuchungen. Hierbei wurde Wasser entdeckt. Was die Öffentlichkeit damals aber mehr aufregte, war die Entdeckung der giftigen Substanz Cyan im Kometenschweif, den die Erde durchquerte. Geschäftemacher boten Atemschutzmasken an, um einen Schutz gegen die vermeintlichen Cyanschwaden, die auf die Erde niedergehen sollten, zu bieten. Was sie verschwiegen (oder schlicht auch nicht gewußt haben), war die Tatsache, daß die Menge Cyan, die die Erde während der Durchquerung des Schweifs des Halleyschen Kometen

ausgesetzt war, keine Gefahr darstellte. Umso größer waren die Mengen des nachgewiesenen Wassers. Dieses beobachtete man auch bei anderen Kometen, so daß der Astronom Fred Whipple schließlich 1949 die Theorie formulierte, daß Kometenkerne nichts anderes als „schmutzige Schneebälle“ seien, die Unmengen an Wasser verlieren, wenn sie der Sonne nahe genug kommen. An der Oberfläche konzentriert sich so langsam der Schmutz an und bildet eine Kruste. Dies konnte von der europäischen Kometensonde Giotto bestätigt werden, die 1986 in nur 1.000 Kilometer Entfernung am Kern des Halleyschen Kometen vorbeiflog. Ihre Aufnahmen zeigten einen im wesentlichen dunklen Körper, der nur an den Stellen hell war, wo diese Kruste aufgerissen ist und Wasser verdampfen konnte. Auf dem Rest ihrer teilweise hochexzentrischen Bahnen, die sie teilweise aus dem Sonnensystem hinausführen, stellen sie nichts anderes als kalte, schwarze Brocken dar.



Die beiden Aufnahmen, die zur Entdeckung des hellsten Objekts aus dem Kuiper-Gürtel im September 1994 geführt haben. Der zeitliche Abstand der Bilder ist 4,6 Stunden. Deutlich ist zu sehen, wie sich das Objekt im unteren Bild bewegt hat. Es hat eine Entfernung von 34 AE.

Fotos: Alan Fitzsimmons, Iwan Williams und Donal O'Ceallaigh (La Palma-Observatorium)

Bald machte man sich auch Gedanken über die Herkunft der Kometen. Der Asteroidengürtel kam nicht in Frage, denn in dieser Region ist es schon zu warm und das Wasser wäre schon längst verlorengegangen. Aufgrund der exzentrischen Bahn vieler Kometen postulierte der niederländische Astronom Jan Hendrik Oort 1950 eine riesige Ansammlung von Kometenkernen außerhalb des Sonnensystems in 20.000 bis 70.000 AE Entfernung (1 AE = Astronomische Einheit, der mittlere Abstand zwischen Erde und Sonne von ca. 149,6 Millionen Kilometer). 70.000 AE entspricht der Entfernung von etwa einem Lichtjahr. Zum Vergleich: Der mittlere Abstand von Pluto beträgt ca. 40 AE! Aufgrund dieses riesigen Abstandes wirken sich kleinste Störungen z.B. durch die nahen Sterne schon aus, so daß über einen längeren Zeitraum hinweg die Bahnen einiger Kometenkerne in Richtung Sonne gelenkt werden und schließlich vollkommen in ihrem Gravitationsfeld gefangen werden. Zwar wurde diese

Wolke bislang noch nie direkt nachgewiesen (und wird es wohl in der nächsten Zeit auch bleiben, denn dunkle Objekte mit einem mittleren Durchmesser in der Größenordnung von 10 km auf dieser Entfernung zu entdecken ist selbst mit den modernsten Geräten nicht machbar), doch ist die Annahme eines riesigen Reservoirs derzeit die plausibelste Theorie. Daran knüpft sich sofort folgende Frage an: Wie können sich Kometenkerne in einem solchen Abstand bilden und vor allem: Wie kommt das ganze Wasser dorthin, welches zur Bildung dieser Kerne nötig war?

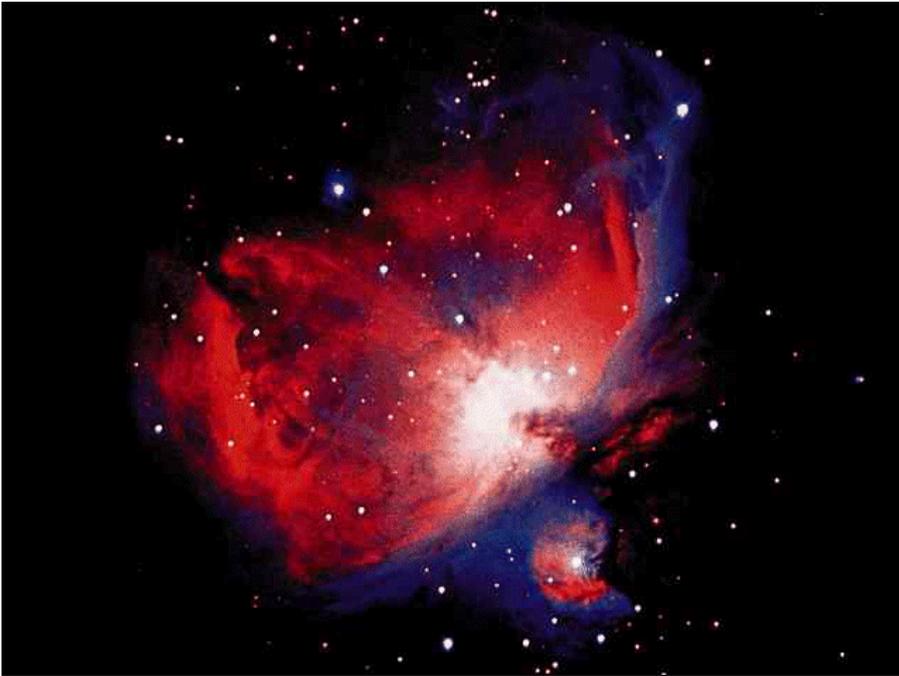
Wasser – Ein Steckbrief

Wasser ist ein Molekül, welches aus drei Atomen besteht: Zwei Wasserstoffatome und ein Sauerstoffatom. Das Wasserstoffatom ist das einfachste und am häufigsten vorkommende Atom im Universum und besteht aus einem elektrisch positiv geladenen Proton und einem negativ geladenen Elektron, während das Sauerstoffatom im Kern 16 Protonen (und je nach Isotop 15, 16, 17 oder 18 Neutronen) sowie entsprechend der Anzahl der Protonen im Kern 16 Elektronen hat.

Gebunden werden die Wasserstoffatome durch elektrische Kräfte an das Sauerstoffatom, denn dieses 'borgt' sich die Elektronen von den Wasserstoffatomen, um so auf 18 Elektronen insgesamt zu kommen (das Bestreben des Sauerstoffatoms, gerade 18 Elektronen bei nur 16 Protonen zu binden, hat ihre Begründung in der Quantenmechanik). Somit ist das Sauerstoffatom insgesamt negativ, die der Elektronen beraubten Wasserstoffatome positiv, so daß eine feste Bindung durch die elektrische Anziehungskraft entstehen kann.

Beide Wasserstoffatome im Wassermolekül nehmen eine feste Position untereinander an und bilden einen Winkel von 120° zueinander. Dies hängt damit zusammen, daß die geborgten Elektronen nicht ganz zu dem Sauerstoffatom hinüberwandern, sondern – in Begriffen der klassischen Mechanik ausgedrückt - auf einer „Bahn“ zwischen dem Sauerstoff- und dem jeweiligen Wasserstoffatom bewegt. Durch diese Konfiguration erhält das Wasser einige Eigenschaften, die es zu einem ganz besonderen Stoff macht. So erreicht Wasser seine größte Dichte bei 4°C, um dann bei noch tieferen Temperaturen wieder abzunehmen, wenn sich die Wassermoleküle zu Eiskristallen ausrichten und wieder mehr Platz brauchen. Eis schwimmt somit auf flüssigem Wasser. Deswegen herrscht auf dem Grund von tiefen Seen und Ozeanen immer eine Temperatur von 4°C und ermöglicht Lebewesen im Wasser dort während Perioden starken Frosts zu überleben.

Das Wassermolekül ist auch zu Schwingungen und Vibrationen fähig. Gerade Strahlen im Infrarotbereich können das Wassermolekül anregen und wird absorbiert. Durch Stöße an benachbarten Molekülen wird Energie übertragen und die Vibrationen abgeschwächt. So wird auf molekularer Ebene Infrarotstrahlung in Wärme umgewandelt. Dies erklärt auch die ungeheure Bedeutung von Wasserdampf in der Erdatmosphäre für den irdischen Energiehaushalt und somit für das irdische Klima. Wasser ist so gesehen ein viel stärkeres Treibhausgas als Kohlendioxid oder Methan. Der Gehalt an Wasserdampf, reguliert sich aber in vielen komplizierten Kreisläufen von selbst.



Der Orion-Nebel, eine riesige Wasserstoff-Wolke in einer Entfernung von 1.600 Lichtjahren von der Erde. In diesem Nebel entstehen täglich Wassermengen, die 60mal die Ozeane der Erde füllen könnten. Foto: US-Naval-Obervatorium

Wasser zwischen den Sternen

Um diese Frage zu beantworten, müssen wir einen Blick in die Kinderstuben des Kosmos werfen, nämlich auf die riesigen, interstellaren Gaswolken wie z.B. der Orion-Nebel, auch bekannt unter der Bezeichnung M42 oder NGC 1976. Er besteht hauptsächlich aus Wasserstoff. In ihm entstehen ständig neue Sterne, wobei sich das Wort ständig auf eine Zeitskala im astronomischen Sinne bezieht, die sich über Jahrtausende erstreckt. Er ist ca. 1.600 Lichtjahre entfernt und hat einen Durchmesser von etwa 15 Lichtjahren. In diesem Nebel befinden sich einige junge, heiße Sterne, deren abgestrahlte Energie den Nebel zum einen von Innen erleuchtet und ihn so zu einem lohnenden Objekt auch schon für kleine Teleskope macht und zum anderen Energie für eine Vielzahl von Prozesse bereitstellt. Dies ist ein wichtiger Aspekt bei der Suche nach der Antwort auf die Frage nach der Herkunft des Wassers in unserem Sonnensystem.

Ein weiteres Puzzlestück der Antwort ist die Methode, mit der Wasser in einer solchen Entfernung nachgewiesen werden kann. Genauso wie Wasser Infrarotstrahlung absorbiert,

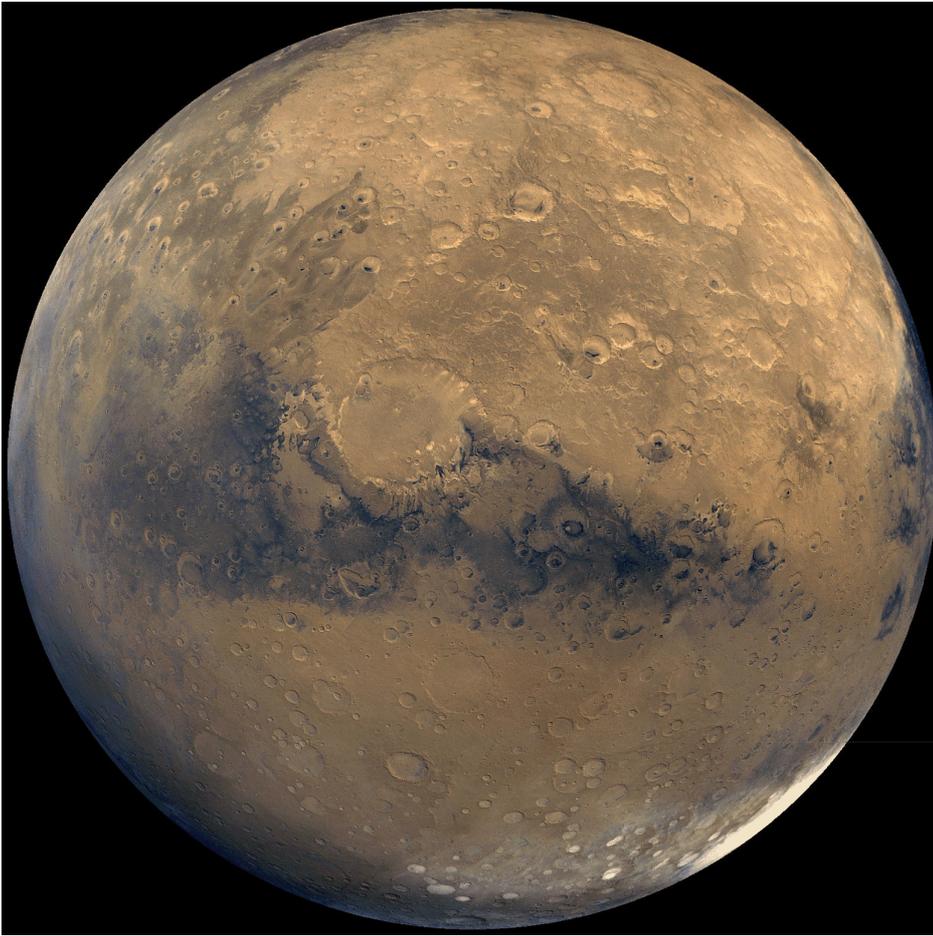
sendet es auch selbst Infrarotstrahlung auf charakteristischen Wellenlängen aus. Mit Hilfe von Spektrometern kann man diese Wellenlängen nachweisen, welche die Existenz von Wasser verraten. Der Haken an der Sache ist nur, daß das Wasser in der Erdatmosphäre die Infrarotstrahlung des Wasser aus dem Weltall verschluckt und so für Teleskope auf dem Erdboden nicht zugänglich ist. Deswegen kann nur mit Infrarot-Teleskopen außerhalb der Erdatmosphäre auf die Suche nach Wasser gegangen werden.

Der leistungsfähigste Infrarot-Astronomiesatellit war das europäische Infrared Space Observatory (ISO), der im Jahr 1998 seine Beobachtungen aufgrund des Verbrauchs seines Kühlmittels einstellen mußte. Kurz davor konnte jedoch nachgewiesen werden, daß sich in den Gaswolken des Orion-Nebels eine riesige Menge an Wasser befindet und das jeden Tag in dieser Region soviel Wasser entsteht, daß die Ozeane der Erde 60mal damit gefüllt werden können! Da diese Region recht warm ist, begünstigt dies sowohl die Entstehung des Wassers als auch dessen Nachweis. Aufgrund der durch die im Nebel eingebetteten Sterne können

sich aus den Sauerstoff- und den reichlich vorhandenen Wasserstoff-Molekülen Wassermoleküle bilden, während diese Moleküle durch die Wärme zur Emission von Infrarotstrahlung angeregt werden, mit denen man sie leicht nachweisen kann. Die Eigenschaft, Infrarotstrahlung auszusenden, ist in den Augen der Astronomen sogar förderlich für das Zusammenziehen einer Gaswolke und zur Bildung eines Sterns und eventuell eines Planetensystem, denn wenn die Gaswolke die durch das Zusammenziehen freiwerdende Energie in Form von Wärme nicht loswird, kann dieser Prozess sogar verhindert werden! Somit kann die Frage nach der Herkunft eines Großteil des Wassers in unserem Sonnensystem beantwortet werden: Das Wasser war schon da, als sich unser Sonnensystem gebildet hat.

Wasser im Sonnensystem

Wasser besteht aus zwei Wasserstoff- und einem Sauerstoffatom. Während Wasserstoff das am einfachsten aufgebaute und deswegen das häufigste anzutreffende Element im Kosmos ist, sieht es für Sauerstoff anders aus. Dieses Element wird neben den anderen höheren Elementen erst in der gewaltigen Explosion einer Supernova gebildet und in den interstellaren Raum hinausgeschleudert. Dort vermengt sich das Sauerstoff mit den anderen Gasen – vornehmlich Wasserstoff – und bildet die Grundlage für andere Sternsysteme, die sich aus diesem Gasgemisch bilden. Zieht sich nun eine Gaswolke durch äußere Störungen zusammen und schickt sich an, ein neues Sonnensystem zu bilden, beginnt eine Ausdifferenzierung der Elemente: Die leichtesten Elemente konzentrieren sich solange im Mittelpunkt, bis der Druck, die Dichte und die Temperatur so hoch sind, daß eine kontinuierliche Kernverschmelzung einsetzt – ein Stern hat sein Leben begonnen. Aufgrund des einsetzenden Strahlungsdrucks findet nun eine Säuberung statt: Alle leichteren Elemente werden aus der Nähe des Sterns gedrängt und sammeln sich in entfernteren Regionen an. In der Nähe blei-



Mars mit seinen beiden weißen Polkappen. Diese Bild ist ein Mosaik aus 100 Aufnahmen des Viking-Orbiters aus dem Jahr 1980. Foto: NASA

ben die schwereren Elemente übrig, aus denen sich Planeten bilden können. Dies ist ein Modell, anhand dem sich im groben die Morphologie unseres Sonnensystems erklären läßt: Die inneren Planeten (Merkur, Venus, Erde, Mars) bestehen hauptsächlich aus schweren Elementen, während die äußeren Gasriesen Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun den aus der Sonnennähe weggeblasenen Wasserstoff aufsammeln und so zu ihrer stattlichen Größe anwachsen konnten. Pluto ist zu kalt, um eine gasförmige Hülle zu haben, doch es wird angenommen, daß auch hier das Verhältnis von leichten zu schweren Elementen deutlich zugunsten der leichteren Elemente ausfällt.

Mit der einsetzenden Kernfusion werden nun auch die Bedingungen zur Bildung von Wasser geschaffen: Es gibt in der Nähe des jungen Sterns jede Menge Staub und Strahlung. Durch die Strahlung wird die für die Bildung der Wassermoleküle nötige Energie bereitgestellt und die Ober-

fläche der Staubkörner begünstigt die Bildung. In der Folgezeit der weiteren Entwicklung des jungen Sternsystems spielen sich mehrere Prozesse gleichzeitig ab: Die leichten Elemente werden aufgrund des Strahlungsdrucks weggedrängt, Wasser bildet sich und

die Staubkörner lagern sich zu immer größer werdenden Gebilden an. Je größer diese Gebilde, desto größer ihre gravitative Anziehungskraft und desto schneller ihr Wachstum. Schließlich bilden sich Vorläufer von Planeten, die sog. Planetesimale, deren Wachstum nun von Einschlägen anderer, kleinerer Seminalen gekennzeichnet ist. Die dabei entstehende Wärme führt zur Aufschmelzung des Inneren, so daß das Wasser entweicht. Außerhalb der Entstehungszonen dieser Seminalen wachsen die mit Wassereis überzogenen Staubpartikel zu dem zusammen, was später einmal Kometenkerne werden. Aus diesem Grund ist das Studium der Zusammensetzung der Kometenkerne für die Wissenschaftler, die sich mit der Entstehung unseres Sonnensystems befassen, äußerst wichtig, denn man geht heute davon aus, daß Kometen in der Frühphase der Entstehungsgeschichte unseres Sonnensystems gebildet wurden und sich dann nicht veränderten. Somit tragen sie wertvolle Informationen über den Zustand unseres Sonnensystems am Beginn ihres Daseins. Missionen zu Kometenkernen, die eine Probe wieder mit zur Erde bringen, sind daher äußerst wichtig.

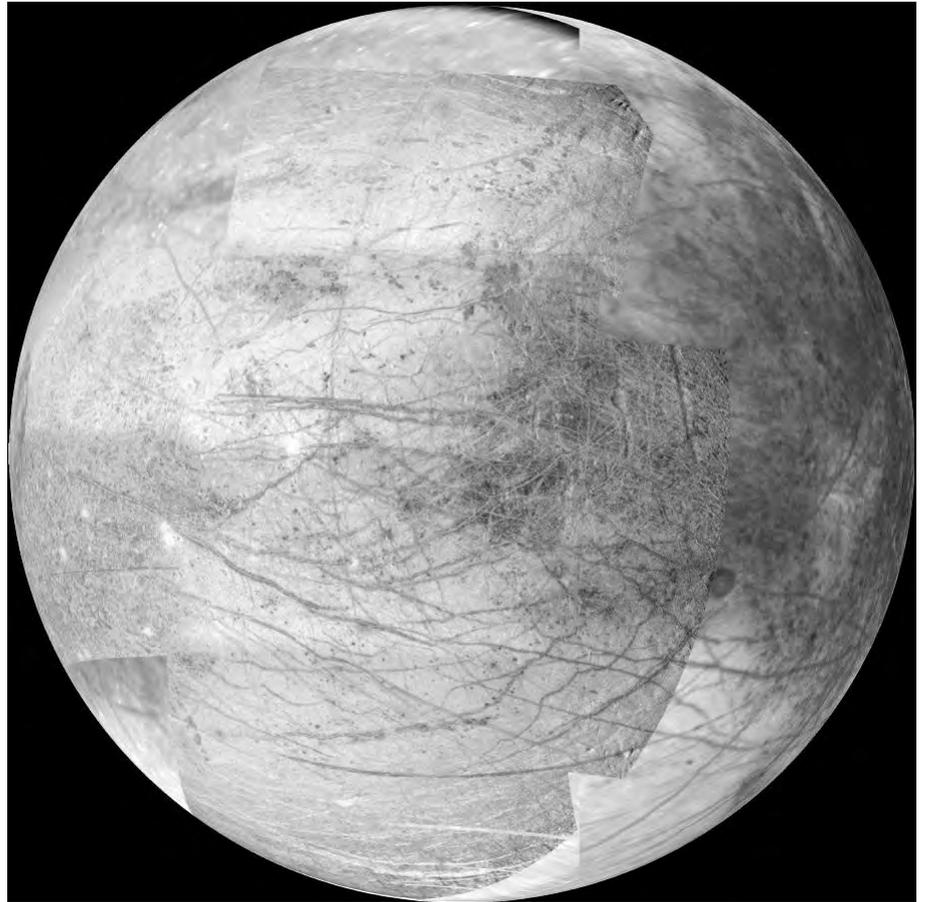
Nach und nach bilden sich aus dem Konzentrationsprozess Planeten



Der Asteroid Eros, zwei Tage vor dem Einschwenken der Raumsonde NEAR am 14. Februar 2000. Auf den bislang übermittelten Photos konnte kein Wassereis nachgewiesen werden. Wenn, versteckt sich das Eis tief unter der Oberfläche des Asteroiden. Foto: NASA

aus. Ihre Frühphase ist nun gekennzeichnet durch den Einschlag der jungen, wasserreichen Kometenkerne. Durch die Einschläge wird das Wasser verdampft; die Gravitation der jungen Planeten ist aber nun stark genug, um den Wasserdampf zu halten. So sammelt sich auf den Planeten das Wasser an, während der Raum zwischen den Planeten durch deren gravitativen Einfluß langsam leergefegt wird. Deswegen nimmt man im Fall unseres Sonnensystems an, daß sich ab der Bahn von Neptun nach außen hin noch viele Kometenkerne im sog. Kuiper-Gürtel befinden, aus denen durch die noch merklichen Einflüsse der Planeten entweder Kometenkerne in das Sonneninnere abgelenkt oder noch weiter nach außen katapultiert werden. Diese Kometenkerne bilden dann die Oortsche Wolke. Kometenkerne aus dieser Wolke zeichnen sich durch extrem lange Umlaufzeiten aus, wenn sie wieder in das Innere des Sonnensystems zurückkehren, während Kometenkerne aus dem Kuiper-Gürtel hochelliptische Bahnen mit kürzerer Umlaufzeit besitzen. Im Jahr 1992 wurden erstmals mit erdgestützten Teleskopen Objekte im Größenbereich von 96 bis 320 Kilometer Durchmesser jenseits der Bahn von Neptun nachgewiesen, die dem Kuiper-Gürtel zugeschrieben werden können. 1995 konnten mit Hilfe des Hubble Space Telescopes eine Vielzahl wesentlich kleinerer Objekte entdeckt werden, so daß die Existenz des Kuiper-Gürtels als gesichert gilt.

Aus diesem Modell geht nun hervor, daß alle Planeten in der Frühzeit ihrer Entstehung mit wasserreichen Kometenkernen bombardiert worden sind. Das bedeutet, daß man Wasser auf allen Planeten und ihren Monden in unserem Sonnensystem finden sollte. Doch Merkur und Venus präsentieren sich als unwirtliche, wasserlose Wüsten. Dies kann man mit der Nähe zur Sonne erklären, so daß der Verlust an Wasser durch die Aufspaltung in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff und das an-



Europa-Mosaik aus mehreren Aufnahmen der Jupiter-Sonde Galileo. Deutlich sind Risse im Eispanzer des Jupiter-Mondes zu sehen. Diese Aufnahme entstand im November 1999. Foto: NASA

schließende Entweichen des Wasserstoffs aus dem Gravitationsfeld des Planeten durch Einschläge nicht ausgeglichen werden kann. Die Erde verliert auch auf dieser Art Wasser, jedoch konnte vor drei Jahren nachgewiesen werden, daß ein ständiger Schauer von Mikrokometen auf die Erdatmosphäre einprasselt und so für einen gewissen Ausgleich sorgt.

Was ist nun mit dem Mars? Hier sollten eigentlich die Bedingungen ideal sein, um Wasser zumindest in Form von Eis zu halten. Doch Teleskopbeobachtungen Anfang dieses Jahrhunderts und Beobachtungen mit Hilfe von Raumsonden haben nachgewiesen, daß auch der Mars eine recht trockene Oberfläche und Atmosphäre hat. An den Polkappen läßt sich in der Tat Wasser in Form von Eis nachweisen, allerdings nicht in der Menge, in der man es erwartet hätte. Das es einmal flüssiges Wasser auf der Oberfläche gegeben hat, beweisen die Flußtäler auf der Marsoberfläche.

Doch wo ist das ganze Wasser hin? Diese Frage wird derzeit zu beantworten versucht. Seit 1996 läuft ein internationales Programm zur systematischen Erkundung des roten Planeten mit Hilfe von Orbitern, Landern und Robotern, die auf der Marsoberfläche begrenzte Touren unternehmen. Der letzte Höhepunkt dieser Anstrengung war die Entsendung des Mars Polar Landers, der am Mars-südpol hätte landen und dort u.a. Untersuchungen über den Wassergehalt des Bodens hätte anstellen sollen. Leider konnte nach der Einleitung des Landemanövers auf den Mars kein Kontakt mehr hergestellt werden, so daß diese Mission als gescheitert gilt.

Die Asteroiden, deren Bahnen typischerweise zwischen Mars und Jupiter, sind ebenfalls aussichtsreiche Kandidaten für Fundstellen von Wasser tief unter der Oberfläche. Man hat allerdings bislang noch keine Hinweise gefunden, daß sich winzige Wasserkristalle unter der Oberfläche

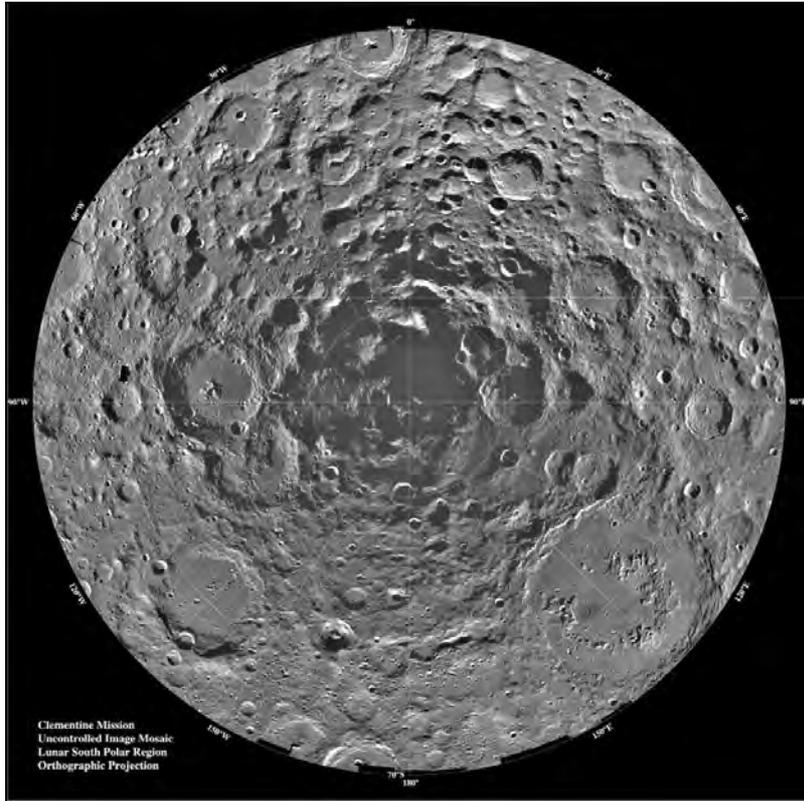
verbergen könnten. Die Raumsonde NEAR, die seit Dezember 1999 den Asteroiden Eros umkreist, könnte hier wertvolle Informationen liefern.

Spektakuläre Funde

Der Verlust des Mars Polar Landers und kurz davor des Mars Climate Orbiters ist ein herber Rückschlag für das Programm zur Erkundung des Mars. Derzeit haben es die Raumfahrtagenturen rund um die Welt schwer, Sinn und Zweck der Erkundung des Mars aufgrund dieser und anderer gescheiterten Missionen zu erklären. Doch der Nachweis von Wasser

an anderen Stellen in unserem Sonnensystem ist bereits gelungen.

Die beiden baugleichen Sonden Voyager 1 und 2 wurden kurz nacheinander im Jahr 1977 gestartet. Das Missionsziel war, die beiden äußeren Gasriesen Jupiter und Saturn zu erkunden. Die zahlreichen Monde des Jupiter und die Saturn-Ringe versprechen eine reichliche wissenschaftliche Ausbeute. Zwei Jahre später, im Mai und im September 1979, flogen die beiden Sonden an ihrem ersten Ziel Jupiter vorbei und funkten eine Unmenge von Daten und Bildern zur Erde zurück. Neben der Entdeckung eines kleinen Ringsystems konnten noch weitere Monde entdeckt werden sowie aktive Vulkane auf dem Jupitermond Io, deren Energie aus den durch Jupiter hervorgerufenen Gezeitenkräften stammen. Doch ebenso spektakulär war die Erkenntnis, dass der Jupitermond Europa einen soliden, wohl mehrere Kilometer dicken Panzer aus Wassereis besitzt! Die Bilder dieses Mondes enthüllten eine stark zerklüftete Landschaft mit weißen Flecken dort, wo Meteoriten-



Mosaik aus 1.500 Bildern von Clementine des Mond-Südpols. Die Region, in der eine verstärkte Absorption von Neutronen festgestellt wurde und als heißer Kandidat für eine Region mit Wassereis auf dem Mond gilt, liegt genau in der Mitte des Bildes. Foto: NASA

Einschläge das noch frische Eis aus tieferen Schichten freilegt. Obwohl die Vorbeiflüge der Raumsonden an Europa aus recht großer Distanz erfolgten und die Bilder dementsprechend keine große Auflösung hatten, konnten Strukturen auf der Oberfläche erkannt werden, die an riesige Eisschollen erinnern. In den oberen Wolkenschichten Jupiters konnte ebenfalls Wasser in Form von winzigen Eiskristallen nachgewiesen werden. Eine Quelle dieser Kristalle wurde 1994 spektakulär vorgeführt: Der bei einer früheren Begegnung mit Jupiter in mehrere Teile zerbrochene Komet Shoemaker/Levy 9 stürzte auf Jupiter ab und hinterließ für mehrere Tage deutlich sichtbare Spuren in der Atmosphäre des Riesenplaneten, u.a. Löcher, deren Durchmesser ein Vielfaches des Erddurchmessers betragen. Dieses Schauspiel hat uns vermittelt, welchen katastrophalen Kometenregen auch die Erde in der Entstehungszeit des Sonnensystems ausgesetzt war!

Die Vorbeiflüge an Saturn im Jahr 1980 (Voyager 1) und 1981 (Voyager 2)

brachten die Erkenntnis, daß im Mondsystem des Saturns ebenfalls Wasser vorhanden war. Inspiriert von den Ergebnissen der Voyager-Sonden wurde die Raumsonde Galileo 1989 gestartet mit dem Ziel, 1995 in eine Umlaufbahn um Jupiter einzuschwenken und dort Beobachtungen über einen langen Zeitraum anzustellen. Mit an Bord war eine Atmosphärenkapsel, die kurz vor dem entscheidenden Einschwenkmanöver ausgestoßen werden sollte, um in die Atmosphäre von Jupiter einzutauchen. Man wollte herausfinden, wie die Atmosphäre von Jupiter aufgebaut ist und u.a. auch dem genauen Wassergehalt auf den Grund gehen.

Das Manöver gelang: Die Sonde wurde problemlos ausgesetzt und Galileo schwenkte in eine Umlaufbahn ein. Kurz danach tauchte die Atmosphären-Sonde in die Jupiteratmosphäre ein und übermittelte per Funk Daten an Galileo, die anschließend zur Erde weitergeleitet wurden. Diese zeigten jedoch an, daß die Atmosphärensonde wohl zufälligerweise in eine Region eingetreten ist, die sich durch große Trockenheit auszeichnete, denn Wasser wurde kaum angezeigt. Dafür wurde man umso mehr mit Bildern von Europa entlohnt. Die Bilder mit einer wesentlich besseren Auflösung als die Voyager-Bilder zeigten in der Tat Strukturen, die an Eisschollen erinnern sowie tiefe Furchen und Rillen. Nach Abschluß der Hauptmission im Jahr 1998 wurde die Bahn von Galileo derart verändert, daß sie nun häufiger und dichter an Europa vorbeifliegt. Dieser Teil der Mission wird Galileo-Europa-Mission genannt und dauert bis heute an.

Doch zurück zur Erde und ihrem Begleiter, dem Mond. Offensichtlich hat die Erde viel Wasser abbekommen. Doch wie schaut es auf dem Mond aus? Allein die Beobachtung mit bloßem Auge ergibt, das es auf der Mondoberfläche keine größere Ansammlung von offenem Wasser und Eis gibt. Dies ist auch nicht verwunderlich, denn ohne Atmosphäre der sengenden Hitze der Sonne ausgesetzt, würde Wasser sofort wegkochen und Eis sublimieren, also ohne flüssig zu werden verdampfen. Dies wurde durch die Apollo-Mission der späten 60er und frühen 70er Jahren zementiert: Die mitgebrachten Proben präsentierten die Mondoberfläche als trockene Wüsten. Doch wo die Sonnenstrahlen nicht hinkommen, kann Wasser in Form von Eis durchaus existieren. Tiefe Krater an den Polen des Mondes sind daher Kandidaten für Stellen, wo man bei der Suche nach Wasser fündig werden kann, denn die Böden dieser Krater sind ständig im Dunklen.

Der bislang einzige ernsthafte Versuch, dort nach Wasser zu suchen, war die Mission der amerikanischen Sonde Lunar Prospector (Start: Januar 1998) mit ihrem spektakulären Ende. Ausgerüstet mit einem Neutro-

nenspektrometer, welches die Energie von der Mondoberfläche kommender Neutronen analysiert, kann Wasser nachgewiesen werden. Diese Neutronen werden von der kosmischen Strahlung erzeugt, die mit ihrer Energie Neutronen aus den Atomen des Mondbodens herausschlagen. Neutronen mit bestimmter Energie werden von den Wasserstoffatomen abgebremst. Befindet sich nun Wassereis und somit Wasserstoff im Mondboden, so macht sich dies als Lücke im Energiespektrum der Neutronen bemerkbar.

Bereits zwei Monate nach dem Start verkündete die NASA stolz, daß sie Lücken im Energiespektrum der Neutronen genau an den richtigen Stellen gefunden habe. Wenig später kamen auch die ersten Schätzungen: 6 Milliarden Tonnen Wasser könnten die Mondpole beherbergen, eine Wassermenge vergleichbar mit der des Bodensees in Deutschland.

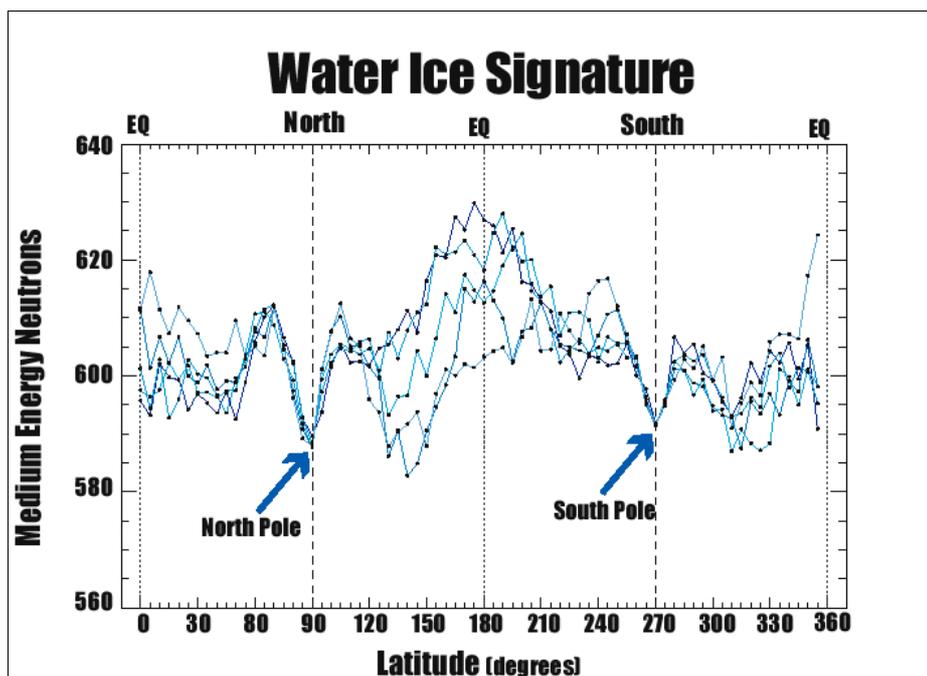
Doch diese Informationen sind mit Vorsicht zu genießen, denn diese Methode kann lediglich Wasserstoff nachweisen. Es ist zwar plausibel, daß dieser Wasserstoff in Form von Wasser gebunden ist, ein direkter Nachweis fehlte aber immer noch.

Dieser sollte nun zum Ende der Mission geliefert werden durch den kontrollierten Absturz des Lunar Prospectors in einen Pol-Krater. Die Wissenschaftler erhofften sich durch den Aufprall eine mit Wassereis durchsetzte Staubwolke, die über den Horizont aufragt und so von der Erde aus beobachtbar ist. Damit hätte man den Beweis erbracht. Doch leider kam es anders: Am 31. Juli 1999 schlug Lunar Prospector zwar wie geplant auf der Mondoberfläche auf, doch konnte keine Staubwolke beobachtet werden. Der direkte Nachweis von Wasser auf dem Mond steht also noch aus, doch haben sich die Hinweise verdichtet, daß es Wasser dort gibt.

Hilfe für die Besiedlung des Sonnensystems?

Wasser ist die Grundlage des Lebens auf der Erde. Wo von Natur aus kein Wasser ist, können Menschen nur existieren, wenn sie einen Wasservorrat haben. Dies ist in den einfachsten Worten eine der Grundproblematiken der Besiedlung von Plätzen außerhalb der Erde durch Menschen. Wasser muß bei bemannten Vorhaben also entweder immer als Vorrat mitgenommen oder vor Ort produziert werden, wobei hier nur das Problem verlagert wird, denn wenn die Grundbestandteile des Wassers (Wasserstoff und Sauerstoff) ebenfalls nicht vorhanden sind, kann durch chemische Reaktionen kein Wasser produziert werden.

Eine andere Rolle spielt Wasser als Treibstoff für Antriebe und als Quelle für Sauerstoff. Wo Wasser ist, kann das Wasser mit Hilfe von Sonnenenergie elektrolytisch in seine Bestandteile zerlegt werden – heraus kommt Wasserstoff und Sauerstoff. Diese Elemente können als Treibstoff für chemische Antriebe (wobei man den Sauerstoff wieder braucht) oder Ionentriebwerke verwendet werden, wobei man hier nur den Wasserstoff braucht. Der Sauerstoff wird zum Atmen gebraucht.



Dies ist der bislang stärkste Hinweis von Wassereis auf dem Mond. Die Anzahl der vom Lunar Prospector gezählten Neutronen ist an den Polen bei mehreren Messungen am geringsten, was auf eine signifikante Menge von Wasser schließen lässt. Foto: NASA

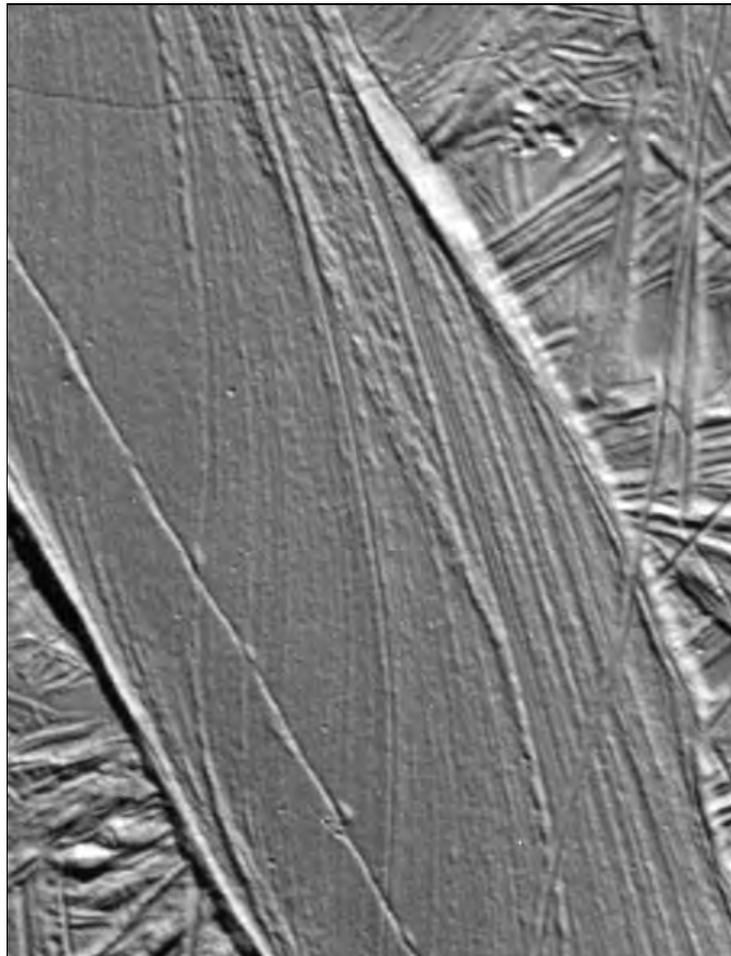
Bei der Besiedlung von Himmelskörpern in unserem Planetensystem spielen Wasservorräte vor Ort also eine entscheidende Rolle. Deswegen ist es für Pläne über eine zukünftige Besiedlung des Mondes und des Mars wichtig zu wissen, ob vor Ort ausreichend große Wasservorräte vorhanden sind, denn eine Kolonie ständig von der Erde aus mit Wasser zu versorgen ist extrem kostspielig.

Sollten spätere Missionen zum Mond die genaue Größe des Wasservorrats an den Polen bestimmen können, die für eine Kolonie mit einer begrenzten Zahl von Mitgliedern ausreicht, so ist eine Besiedlung des Mondes in greifbarer Nähe gerückt. Denkbar wären zunächst Stationen in Polnähe, so das der Weg zum Wasser nicht weit und die von der Sonne gelieferte Energie noch ausreichend ist.

Während das Wasser auf dem Mond und dem Mars sich gut versteckt, ist man auf den Monden der äußeren Planeten fündig geworden. Vor allem Europa mit seinem dicken Eispanzer wäre als Ort einer Kolonie insofern attraktiv, als das man sich nur genügend tief in den Eispanzer zu graben bräuchte, um vor der tödlichen Strahlung in Jupiternähe geschützt zu sein. Das Wasserproblem stellt sich nicht, da man ja von Eis umgeben ist. Dafür stellen sich aber wiederum andere Probleme wie z.B. die Dynamik des Eises (Eisbeben) etc. So wird eine Siedlung auf dem Jupitermond Europa wohl zunächst den Charakter einer Forscherkolonie auf begrenzte Zeit haben, wobei die Chancen der Realisierung dieser Vision in absehbarer Zeit gleich Null ist.

Zum Abschluß dieser Betrachtungen sei noch eine Bemerkung erlaubt: Bei der Planung solcher Kolonien

muß trotz eventuell vorhandener natürlicher Wasservorräte auf Sparsamkeit und geschlossene Kreisläufe bezüglich des Wassers und seiner Bestandteile geachtet werden. So ist es geboten, während der ersten Zeit der Kolonie einen Vorrat an Wasser und Sauerstoff zu gewinnen, um diese Vorräte dann durch geeignete Maßnahmen so gut wie es geht zu behalten. Dazu gehört die Einrichtung von Treibhäusern, deren Pflanzen die Luft vom Kohlendioxid säubern und gleichzeitig Nahrung liefern wie auch ausgeklügelte Systeme zur Reinigung



Detail des Südpols von Europa. Hier hat der Eispanzer einen großen Riß (Breite: ca. 11 Kilometer). Die Schollen bewegen sich voneinander weg und aus dem Inneren quillt frisches Eis nach. Diese Bild wurde am 26. September 1998 von der Jupiter-Sonde Galileo aufgenommen. Foto: NASA

des Brauchwassers. Es ist gut vorstellbar und auch notwendig, daß im Zuge der Besiedlung des Mondes und des Mars das Bewußtsein der Menschen auf der Erde für das lebenswichtige Element Wasser geändert wird und das für die Kolonien entwickelte Technologien für die Wieder-

verwertung und Reinigung des Wasser auch auf der Erde Einsatz finden.

Fazit

Wasser ist eine im Weltall häufig vorkommende Verbindung mit faszinierenden Eigenschaften. Die Funde von Wassereis auf den Monden von Jupiter und Saturn belegen, daß die Erde kein bevorzugter Sammelplatz von Wasser in unserem Sonnensystem ist. Angesichts der riesigen Mengen an Wasser, die täglich in den interstellaren Gaswolken entsteht, wirken die irdischen Meere winzig. Das Vor-

handendsein von Wasser in solchen Gaswolken wirkt sich günstig auf die Entstehung von Sternen und Planetensystemen aus, denn das Wasser kann die überschüssige Wärme einer sich zusammenziehenden Gaswolke abstrahlen. Wasser ist also sowohl Katalysator für die Entstehung von Planeten als auch Grundlage für Prozesse, an deren Ende die Entstehung von wie auch immer gearteten Leben stehen kann.

Trotz der riesigen Mengen an Wasser im Weltall ist das Wasser auf der Erde einzigartig, denn es bildet die Grundlage des irdischen Ökosystems und damit auch unsere Lebensgrundlage. Eine Besiedlung anderer Himmelskörper kann nur dort erfolgen, wo ein ausreichender Wasservorrat ist, andernfalls müssen gewaltige Anstrengungen unternommen werden, um selbst

eine kleine Kolonie ständig mit Wasser von der Erde zu versorgen. Angesichts der Tatsache, daß unser Überleben vom Wasser abhängt, ist es unverständlich, wie die Menschheit derzeit mit dem Wasser auf der Erde umgeht. RD