

Monatsthema April 2020

Wo kommt das viele Wasser her?



Fast drei Viertel der Erdoberfläche sind von Meeren und großen Seen bedeckt. (NASA/Reto Stockli/Alan Nelson/Fritz Hasler)

Die Erde ist der typische Wasserplanet. Immerhin sind 71% der Oberfläche mit freien Wasserflächen, den Ozeanen, Meeren und Seen bedeckt. Nur 29% von ihrer Oberfläche entfallen auf Festländer, Kontinente genannt. Die anderen terrestrischen (erdähnlichen) Planeten Merkur, Venus und Mars besitzen keine freien Wasserflächen. Merkur ist eine Gesteinskugel ohne Atmosphäre und Venus zeigt sich als Gluthölle. In ihrer dichten Atmosphäre gibt es so gut wie keinen Wasserdampf. Die Oberfläche von Mars ist staubtrocken. Lediglich an seinen Polen finden sich Kohlen säureeis und Spuren von Wasserschnee. Unter der Marsoberfläche hält sich Permafrost in Form von Wassereis, wie Bohrungen ergeben haben.

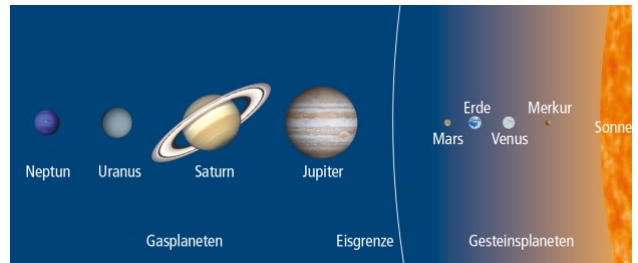
Die Frage lautet nun: Wieso hat ausgerechnet die Erde so viel flüssiges Wasser auf ihrer Oberfläche und als Dampf in ihrer Atmosphäre? Bei den anderen Planeten hat offensichtlich der Sonnenwind, ein heftiger Plasmastrom, unter anderem auch die Wassermoleküle entrissen. Nur die Erde hat die nötige Schwerebeschleunigung, um Wasserdampf in der Atmosphäre zu halten. Hinzu kommt: Das vergleichsweise starke irdische Magnetfeld lenkt die elektrisch geladenen Partikel des Sonnenwindes ab. Es wirkt wie ein schützender Käfig, der die Erde abschirmt. Die anderen terrestrischen Planeten verfügen über kein globales Magnetfeld.

Die Planeten bildeten sich aus einer zirkumsolaren, primordialen (ursprünglichen) Gas- und Staubscheibe, die um die noch junge Sonne rotierte. In dieser protoplanetaren und zunächst heißen Scheibe koagulierte die Staubkörner zu mehr oder minder großen Brocken. Sie wurden durch Kollisionen zu sogenannten Planetesimalen von Dutzenden bis einigen Hundert Kilometer Durchmesser zusammengepresst. Durch fortlaufende Akkretion (Aufsammeln) wuchsen die Planetesimale immer weiter an, bis die Schwerkraft schließlich die Herrschaft übernahm. Die Gravitation sorgte somit dafür, dass weitere Impaktkörper nicht mehr ins Weltall entfliehen konnten. Die Protoplaneten erreichten schließlich ihre heutigen Dimensionen.

Durch die Sonnenhitze war die protoplanetare Staubscheibe in Sonnennähe etwa bis zur Eisgrenze jenseits der heutigen Marsbahn vollkommen trocken. Die Urplaneten innerhalb der Eisgrenze verfügten in ihrem Inneren über kein Wasser. Zumindest war diese Ansicht lange allgemeiner Konsens bei den Planetologen. Die Ozeane entstanden erst längere Zeit nach Bildung der Erde. Sie musste erst abkühlen, um eine flüssige Oberfläche halten zu können, die nicht in Kürze verdampft. Doch woher kam dann das Wasser, um die Ozeane entstehen zu lassen?

In der Frühzeit des Sonnensystems war unser Planet einem heftigen Bombardement ausgesetzt. Neben meteoritischem Material trafen die Erde auch Kometenkerne und Planetoiden. Kometen werden gerne als schmutzige Schneebälle bezeichnet. Sie sind eine Zusammenballung von Staub, Steinen und gefrorenen Gasen wie Methan, Ammoniak und eben auch Wassereis. Allerdings

musste die Fallrate schon gewaltig groß gewesen sein, um diejenige Mengen von Wasser auf der Erde zu sammeln, die heute die Ozeane bilden. Auch wurden Bedenken geäußert: Beim Aufprall von Kometenkernen auf der Erdoberfläche wird kinetische Energie (Bewegungsenergie) augenblicklich größtenteils in dissipative Energie (Wärme) umgewandelt. Etwa ein Prozent macht die mechanische Energie aus, die für die Kraterbildung sorgt. Die dabei auftretenden Temperaturen sorgen für ein Verdampfen der Eiskomponente. Heißer Wasserdampf diffundiert überwiegend ins All. Doch so ganz stimmen die Modellrechnungen doch nicht, wie die Experimente von Peter H. Schultz und Terek Dolay von der Brown University in Providence, Rhode Island (USA) zeigen. Die Experimentatoren schossen murmelgroße Projektile mit fünf Kilometer pro Sekunde (= 18.000 km/h) auf wasserhaltige Ziele, die aus ähnlichen Materialien wie Meteoroiden zusammengesetzt waren, nämlich kohligen (kohlenwasserstoffhaltigen) Chondriten. Es bildeten sich dabei Dampfblasen. Als die geschmolzenen Felsenanteile sich wieder verfestigt hatten, blieben etwa 30% des ursprünglichen Wasseranteils erhalten.



Die Eisgrenze in unserem Sonnensystem.

Deuterium gibt Rätsel auf

Doch die Kometen sind nicht die Verursacher der irdischen Ozeane, wie die Deuteronomien aus den Spuren des Kometeneises ablesen konnten. Deuteronomien werden scherzhaft diejenigen Astronomen genannt, die nach Deuterium im Weltall suchen, um auf die Entwicklung des Weltalls schließen zu können. Als Deuterium wird schwerer Wasserstoff bezeichnet. Ein Wasserstoffatom besteht aus einem positiv geladenen Proton als Kern, um den ein negativ geladenes Elektron kreist. Manche Wasserstoffatome enthalten zwei Kernbausteine, neben dem Proton noch ein elektrisch ungeladenes Neutron. Sie sind doppelt so schwer wie ihre leichten Brüder, weshalb man von schwerem Wasserstoff spricht.

Manche Wasserstoffatomkerne enthalten neben einem Proton noch zwei Neutronen. Man nennt ein solches Wasserstoffatom Tritium. Wasserstoff aus Tritium wird auch als überschwerer oder superschwerer Wasserstoff bezeichnet.

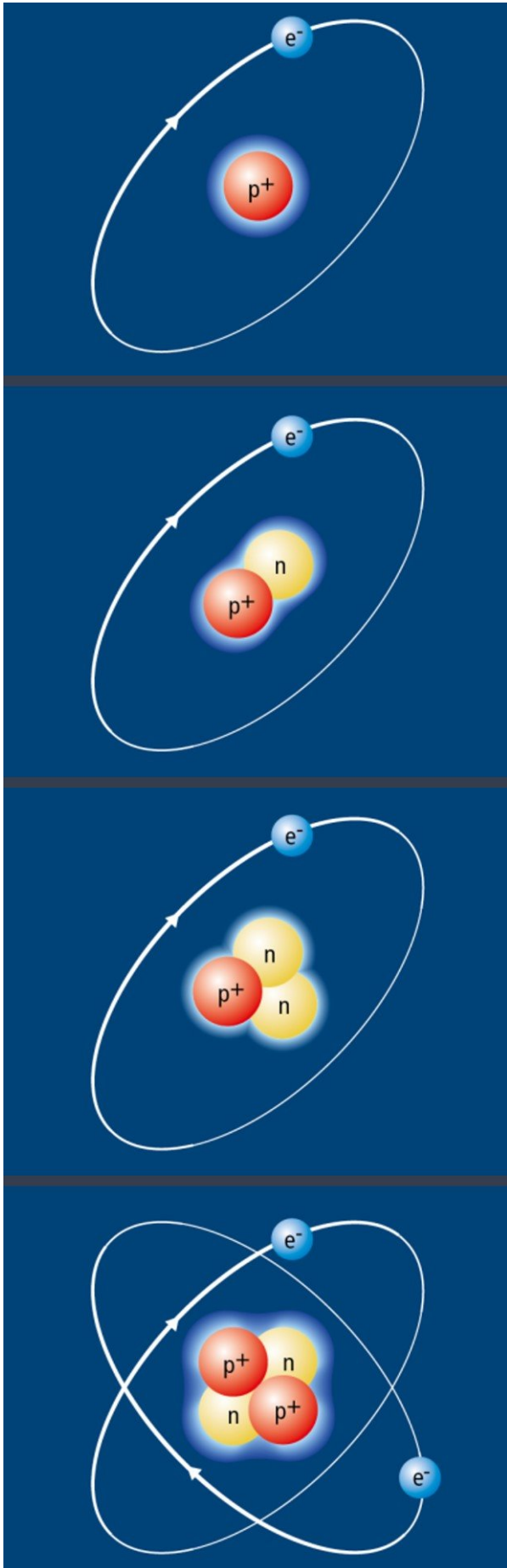
Auch ein Deuterium- und ebenso ein Tritiumatomkern wird von je einem Elektron umkreist, weshalb Deuterium und Tritium (fast) die gleichen chemischen Eigenschaften besitzen wie gewöhnlicher Wasserstoff. Der Fachmann spricht von Wasserstoffisotopen. Isotope sind somit Elemente gleicher Kernladung aber unterschiedlicher Anzahl von Neutronen. Sie unterscheiden sich lediglich durch ihr Atomgewicht.

Entdeckt wurde die Existenz von Deuterium durch den amerikanischen Chemiker und Kosmologen Harold Urey (1893-1981) im Jahre 1932. Zwei Jahre später, 1934, erhielt Urey den Nobelpreis für Chemie.

Ein Wassermolekül setzt sich aus zwei Wasserstoffatomen (2 H) und einem Sauerstoffatom (O) zusammen, dargestellt durch die allgemein bekannte chemische Formel H_2O . Da Deuterium (D) als Wasserstoffisotop die gleichen chemischen Eigenschaften besitzt wie ein gewöhnliches Wasserstoffatom (H), so kann Deuterium auch Wasser bilden, entweder DHO oder D_2O . Im ersten Fall ist eines von zwei Wasserstoffatomen ein Deuteriumkern, im zweiten Fall hat das Wassermolekül zwei Deuteriumkerne.

Deuteriumkerne sind allerdings sehr selten. Auf etwa 10.000 leichte Wasserstoffkerne kommt ein Deuteriumkern. Tritium (T oder 3H) ist noch viel seltener. Außerdem ist Tritium radioaktiv und zerfällt mit einer Halbwertszeit von 12,32 Jahren. Ständig wird in

geringen Mengen neues Tritium gebildet, wenn Stickstoffkerne Neutronen einfangen und dann in Kohlenstoff sowie Tritium zerfallen ($^{14}\text{N}_7 + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{12}\text{C}_6 + {}^3_1\text{H}_1$). Tritium bildet überschweres Wasser (T_2O oder T_2O).



Von oben nach unten: Zusammensetzung der Atomkerne von Wasserstoff, Deuterium und Tritium sowie Helium.

Die Weltmeere enthalten 1,4 Trillionen ($= 1,4 \times 10^{18}$) Tonnen Wasser, davon sind aber nur 50 Billionen Tonnen (5×10^{13}) schweres Wasser. Lediglich zehn Tonnen macht das überschwere Wasser aus, das sich in den oberflächennächsten Schichten des Wassers befindet. Somit kommt auf rund 30.000 gewöhnliche Wassermoleküle ein schweres Wassermolekül. Nur eines von 100 Billionen (10^{17}) Wassermolekülen ist ein überschweres.

Kometen liefern kaum Wasser

Das bisher untersuchte Eis in Kometenkernen hat jedoch ein Wasserstoffisotopenverhältnis, das weit entfernt von dem des irdischen Wassers ist. Eine einzige Ausnahme bildet der Komet 103P/Hartley 2, dessen Eis ein ähnliches Isotopenverhältnis D/H aufweist wie das Wasser in den irdischen Meeren. Ansonsten ist das Verhältnis D/H im Kometenwasser doppelt so groß wie in den irdischen Ozeanen.



Lieferten Kometen das Wasser für die irdischen Ozeane? Aufnahme von Mario Weigand.

Das Eis in und auf Planetoiden hingegen zeigt im Unterschied zum Kometeneis ein dem irdischen Wasser ähnliches Isotopenverhältnis. Allerdings ist der Eisanteil in Planetoiden vergleichsweise gering und die Impaktrate in der Frühzeit der Erdgeschichte war keineswegs so extrem hoch, dass damit die Menge des Meeresswassers zu erklären wäre.

Doch die Wasserfrage lässt sich aus den hochaufgelösten Spektren Weißer Zwerge klären. Seit einem Vierteljahrhundert weiß man, dass nicht nur unsere Sonne von Planeten umrundet wird, sondern auch fremde Sonnen. Inzwischen sind über 3000 solcher Exoplaneten entdeckt worden, die andere Sterne als ihre Muttersonne umrunden. Dabei kommt es immer wieder vor, dass Planeten ihrer Muttersonne zu nahe kommen und durch Gezeitenkräfte zerrissen werden. Vor allem, wenn der Zentralstern zu einem Roten Riesen anschwillt. Das Restmaterial verteilt sich ringförmig um den zentralen Stern, wobei es verdampft. Ein Teil stürzt in den Mutterstern ab.



Ein von einem Weißen Zwerg zerrissener Exoplanet. (NASA/JPL-Caltech/T. Pyle/SSC)

In den komplexen Spektren der meisten Sterne gehen die Absorptionslinien im Spektrum unter, die beim Durchgang des Lichts durch die Gase der zerstörten Planeten auf dem Weg zur Erde aufkopiert werden. Weiße Zwerge hingegen zeigen einfache Spek-

tren mit Heliumlinien. Die schweren Elemente sind in ihr Inneres herabgesunken.

Erscheinen Linien von Kohlenstoff und Stickstoff in den Spektren Weißer Zwerge, so ist dies ein Hinweis, dass ihre Atmosphären durch das Material zerrissener Exoplaneten kontaminiert sind. Im Wasserstoff der zerstörten Exoplaneten lässt sich der Deuteriumanteil nachweisen.

Das Zerreißen von Exoplaneten lässt gewissermaßen einen Blick in ihr Inneres zu, was bei den terrestrischen Planeten unseres Sonnensystems nicht so einfach möglich ist. Als Ergebnis bleibt festzustellen: Beim Entstehungsprozess der terrestrischen Planeten ging keineswegs das gesamte Wasser verloren.

Durch den im Vergleich zu heute heftigen Vulkanismus in der ersten Milliarde Jahre der Erdgeschichte wurde die bereits ins Weltall diffundierte Uratmosphäre aus Wasserstoff und Helium nicht nur durch Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Ammoniak (NH_3), sondern auch durch Wasserdampf (H_2O) ersetzt. Durch die intensive Ultraviolettstrahlung der Sonne wurden zahlreiche Moleküle in ihre Bestandteile zerlegt. Die freigesetzten Wasserstoff- und Sauerstoffatome verbanden sich zu H_2O . Die Erde wurde in eine dichte Dampfatmosphäre eingehüllt.



Vulkanismus und kosmisches Bombardement auf die Erde in den ersten Milliarden Jahren. (NASA/Goddard Space Flight Center Conceptual Image Lab)

Als die Erde sich abkühlte, kondensierte das Wasser in der Atmosphäre. Heftige Regenfälle waren die Folge, die schließlich zur Bildung der Ozeane führten. Noch ist der irdische Vulkanismus nicht vollständig erloschen, wie die von Zeit zu Zeit mehr oder minder heftigen Vulkanausbrüche uns lehren.

Das Wasser ist nicht nur auf der Erde in größeren Mengen vorhanden. In unserem Sonnensystem findet sich jenseits der Eisgrenze gefrorenes Wasser in erheblichem Ausmaß. Die Eisgrenze ist jene Zone in einem Planetensystem, innerhalb derer auf Oberflächen von Himmelskörpern Wasser in flüssigem Zustand oder als Dampf existieren kann. In unserem Sonnensystem liegt die Eisgrenze im Planetoidengürtel zwischen der Mars- und der Jupiterbahn. Außerhalb der Eisgrenze gibt es nur Wasser in gefrorenem Zustand. So bestehen die Partikel in dem noch jungen Saturnring zum großen Teil aus Eis. Auch der Jupitermond Europa wird von einem Eispanzer umschlossen, um nur zwei Beispiele zu nennen.

In einer fernen Zukunft wird durch die zunehmende Sonnenhitze die Eisgrenze immer mehr hinausgeschoben werden. Dann wird das Eis auf Europa schmelzen und einen gemütlich warmen Ozean bilden. Die Erde aber wird ihre Meere verlieren. Noch lange bevor die Sonne sich zu einem Roten Riesen aufbläht, wird die mittlere Oberflächentemperatur der Erde 100°C überschreiten. Nachdem alles Wasser verdunstet ist, wird es bei weiter steigenden Temperaturen ins Weltall entfliehen. Übrig bleibt ein staubtrockener Wüstenplanet Erde. Der Klimawandel lässt sich längerfristig nicht aufhalten - schon gar nicht von einer selbstgefälligen Menschheit, die nur eine kurze Episode auf dem dritten Planeten des Sonnensystems bleibt.