

Gebieten der Erdgeschichte verfügen Wissenschaftler, die sich mit der Atmosphäre beschäftigen, somit über nichts, woran sie wie an Steinen oder Fossilien unmittelbar ablesen könnten, welchen Veränderungen diese in der Vergangenheit unterworfen waren, und sind daher methodisch auf Schlußfolgerungen angewiesen.

Daß dies möglich ist, ist erstens der Tatsache zu verdanken, daß feste Himmelskörper größtenteils dieselben chemischen Verbindungen aufweisen wie Gase, wobei der Unterschied lediglich auf unterschiedlichen Druck- und Temperaturverhältnissen beruht: Aufgrund der – dank ihrer starken Schwerkraft – im Innern herrschenden hohen Drücke geht die Materie dort vom gasförmigen in den flüssigen bzw. festen Aggregatzustand über, während sie im äußeren Bereich wegen des dort schwächeren Schwerefeldes gasförmig bleibt. Dies erklärt auch, warum nicht alle Himmelskörper eine Atmosphäre besitzen, sondern nur solche, deren Anziehungskraft stark genug ist, um die Gase zu halten. Und dies ist sowohl beim Titan der Fall als auch bei der Erde.

Der zweite Grund ist, daß Gase infolge ihrer geringen Dichte ständig in Bewegung sind und daher in Gestalt von Winden und Stürmen verändernd auf die feste Materie einwirken. Die auf diese Weise durch Erosion geprägte Oberfläche der Himmelskörper erlaubt wiederum Rückschlüsse auf frühere Zustände.

## Die Entstehung unseres Sonnensystems

Die meisten Astronomen gehen heute davon aus, daß unser Sonnensystem aus einer rotierenden Gas- und Staubwolke entstanden ist. Als sich vor rund 5 Milliarden Jahren die Materie im Zentrum dieses Sonnenebels durch die Gravitation verdichtete und infolgedessen immer heißer wurde, bis sie schließlich durch Kernfusion Energie zu erzeugen begann, bildete sich die Sonne. Die restliche sowie die von der jungen Sonne abgestoßene überflüssige Materie nahm die Gestalt einer Scheibe an, die sich dann in Ringe aufteilte. Die in diesen Ringen enthaltenen Teilchen ballten sich zunächst zu kleinen und dann zu immer größeren Klumpen zusammen. Als vor etwa 4,6 Milliarden Jahren einige dieser Klumpen genug Masse und damit Schwerkraft gewonnen hatten, um selbst Materie anzuziehen,

formten sich aus den sonnennahen Ringen die vier inneren Gesteinsplaneten Merkur, Venus, Erde und Mars, aus den sonnenfernen Ringen die vier äußeren Gasplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun. Eine Ausnahme bildete Pluto. Er besteht aus den Überresten der von den Gasplaneten nicht gebundenen Materie.

### Die Uratmosphäre

Ursprünglich hatten alle Planeten Gase des Sonnennebels eingefangen und waren daher von Atmosphären umgeben. Während die großen äußeren Planeten diese mittels ihrer starken Schwerefelder bis heute halten konnten, verloren die inneren Planeten ihre hauptsächlich aus Wasserstoff und Helium bestehenden Uratmosphären, als die junge Sonne begann, mit hoher Geschwindigkeit Plasmaströme aus Elektronen und Protonen auszustoßen: Einem atomaren Gebläse gleich fegte der Sonnenwind ihre Gashülle in den interplanetaren Raum. Die heutige Erdatmosphäre kann somit nicht aus der Uratmosphäre hervorgegangen sein, ihr Ursprung muß vielmehr in der Erde selbst liegen.

### Die zweite Atmosphäre

Dank ihrer großen Masse und infolge der Einschläge zum Teil riesiger Körper, deren kinetische Energie sich dabei in Wärme umwandelte, wurde die Erde gegen Ende ihrer Entstehung so heiß, daß ihr Gestein bis in große Tiefen schmolz. Derart verflüssigt, konnten sich nun alle Stoffe nach ihrem spezifischen Gewicht entmischen, sodaß in der Mitte ein fester, von einem flüssigen Äußeren umgebener Eisenkern entstand, während die leichteren Stoffe nach außen wanderten, wo sie den Erdmantel und darüber den Vorläufer der heutigen Erdkruste bildeten. Im Verlauf und als Teil dieses Differentiation genannten Prozesses drangen auch große Mengen flüchtiger Substanzen an die Oberfläche und wurden schließlich als Gase freigesetzt. Bei fortschreitender Erstarrung der Erdoberfläche begann – als Folge der langsamen Abkühlung – zu dieser «Entgasung» vor etwa 4,5 Milliarden Jahren zunehmend auch Vulkanismus beizutragen. Die so entstandene zweite, durch die Schwerkraft der

Erde festgehaltene Atmosphäre war genaugenommen nichts anderes als der gasförmige Teil der Erdkruste und bestand im wesentlichen aus Wasserstoff, Wasserdampf, Methan, molekularem Stickstoff ( $N_2$ ), Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Ammoniak, Schwefelwasserstoff und molekularem Wasserstoff ( $H_2$ ). Sie war äußerst lebensfeindlich und enthielt, wenn überhaupt, nur sehr geringe Mengen freien Sauerstoff.

Allein durch Differentiation läßt sich nach Ansicht zahlreicher Wissenschaftler weder das Vorhandensein sämtlichen Wassers noch die Entstehung des Eisenkerns hinreichend erklären.

Im Universum kommt Wasser zwar häufig vor, in flüssiger Form – eine wesentliche Voraussetzung für Leben – außer an unserem blauen Planeten wurde es jedoch bisher an der Oberfläche keines anderen Himmelskörpers nachgewiesen. Da in jüngster Zeit immer mehr Planetologen annehmen, daß allein durch Entgasung aus dem Erdinneren stammendes Wasser für das Entstehen der Ozeane nicht ausgereicht haben kann, gehen diese davon aus, daß es größtenteils von Einschlägen extraterrestrischer Objekte aus dem äußeren Sonnensystem stammt.

Eines dieser Objekte dürfte der Mehrzahl der Wissenschaftler zufolge ein etwa marsgroßer Asteroid gewesen sein, der vor etwas mehr als 4,5 Milliarden Jahren mit der noch jungen Erde kollidiert ist und ihr dabei nicht nur große Mengen Wasser gebracht hat, sondern dessen Eisenkern infolge des Aufpralls schmolz und sich mit dem noch flüssigen Eisenkern der Erde vereinigte.

Vor allem aber muß durch die Wucht des Einschlags eine Unmenge glühenden Gesteins ins All geschleudert worden sein, wobei sich aus dem in der Erdumlaufbahn verbliebenen Teil innerhalb relativ kurzer Zeit der Mond gebildet hat. Der Umstand, daß der nach der griechischen Mutter der Mondgöttin Theia genannte Asteroid die Erde nur schräg und nicht in der Mitte getroffen hat, erklärt den Drehimpuls, der Erde und Mond noch heute rotieren läßt – wenn auch deutlich langsamer als zu Beginn.

## Die dritte Atmosphäre

Während sich die Erde mit ihrer neuen, zweiten Atmosphäre allmählich abkühlte und sich infolge des Wechsels des Aggregatzustands von Wasserdampf zu flüssigem Wasser Ozeane bildeten, bewirkte der äußerst hohe Anteil vor allem an Kohlendioxid einen Treibhauseffekt: Die durch die Sonnenstrahlung auf die Erde gelangte Wärme wurde zurückgehalten und verhinderte so trotz des durch die Atmosphäre stark getrübbten Lichtes eine Vereisung der Meere. Hinzu kam, daß in der Frühphase der Erde ein höherer Atmosphärendruck herrschte als heute, das «Temperaturfenster» für flüssiges Wasser also wesentlich größer war als  $100^{\circ}\text{C}$ , beispielsweise zwischen  $-5$  und  $+160^{\circ}\text{C}$  bei einem Druck von 5 bar.

Da sich der Wasserstoff bei fortschreitender Abkühlung der Erde verlangsamt in den Weltraum verflüchtigte, verringerte sich allmählich sein Anteil an der Atmosphäre. Zugleich gelangte sehr viel Kohlendioxid mit dem Regen über die Flüsse in die Meere, wo es mit Wasser und Metallen – dabei vor allem mit Kalzium – chemische Verbindungen einging, die dann in unlöslichen Kalkablagerungen der Erdkruste gebunden wurden. Durch die fortgesetzte, bis heute andauernde vulkanische Freisetzung von Gasen trat jedoch immer neues Kohlendioxid aus, sodaß sich sein Anteil an der Atmosphäre – und damit der Treibhauseffekt – weniger reduzierte, als es ohne diese Zufuhr geschehen wäre.

Das veränderte die zweite Atmosphäre so sehr, daß man mit einigem Recht sagen kann, daß sich bis vor etwa 4 Milliarden Jahren eine dritte Atmosphäre entwickelt hatte, die aus der ersten hervorgegangen war, ohne daß sich eine scharfe Trennlinie zur zweiten ziehen ließe.

## Die heutige, vierte Atmosphäre

Von der dritten unterscheidet sich die heutige Atmosphäre nicht nur dadurch, daß sie infolge der Bindung des Kohlendioxids in Kalkgesteinen (sowie in Erdöl, Kohle und Erdgas) nur noch sehr geringe Reste dieses Gases enthält, sondern vor allem durch die hohen Anteile (Volumen-Prozent in trockener Luft) von Stickstoff (rund

78 Prozent) und Sauerstoff (fast 21 Prozent). Da die Atmosphäre ursprünglich so gut wie keinen Sauerstoff enthalten hatte, ist die Frage, woher dieser kam. Die Antwort lautet: Sauerstoff ist ein Produkt lebender Organismen, die sich vor etwa 4 Milliarden Jahren auf der Erde zu entwickeln begannen, was zu einer sich wechselseitig bedingenden Evolution des Klimas und des Lebens führte.

### Die Schichtung der Erdatmosphäre

Der Gasmantel, der die Erde umgibt, ist keine gleichmäßig aufgebaute Hülle, sondern gliedert sich vertikal in mehrere deutlich unterscheidbare, wenn auch nicht scharf voneinander abgrenzbare Schichten. Infolge der Schwerkraft ist er in der Nähe der Oberfläche am dichtesten, wird mit zunehmender Höhe dünner und geht an seinem äußeren Rand fließend in den Weltraum über.

Zunächst unterscheidet man zwischen der bis in etwa 110 Kilometer Höhe reichenden *Homosphäre*, in der die Zusammensetzung der Atmosphäre nahezu homogen ist, da sich ihre Stoffe dank der hier herrschenden Turbulenzen vermischen, und der darüber liegenden *Heterosphäre*, in der sich die Gase entsprechend ihrer Atomgewichte entmischen. Die leichteren Gase entweichen dabei in die oberen Schichten, bis in einer Höhe von über 1000 Kilometern nur noch Wasserstoff vorkommt. Die Übergangszone zwischen Homo- und Heterosphäre bezeichnet man als *Turbopause*, als Bereich, in dem die Turbulenzen aufhören.

Weitere Ursachen für die Schichtung sind vor allem die Temperaturabhängigkeit chemischer Prozesse und die je nach Dichte und Zusammensetzung der Atmosphäre unterschiedliche Durchlässigkeit für bestimmte Strahlen. Danach gliedert man die Atmosphäre in folgende Temperaturzonen:

#### → *Troposphäre*

Die Troposphäre, die als «Wettersphäre» schon im Kapitel «Vom Wetter zum Klima» eine Rolle spielte, ist die unterste und dichteste Schicht. Ihre Obergrenze schwankt je nach Jahreszeit und geographischer Breite. So liegt sie am Äquator zwischen 16 und 18 und an den Polen zwischen 8 und 12 Kilometern Höhe. Obwohl sie die