

Bernhard Mackowiak

Die
Erforschung der
Exoplaneten

Bernhard Mackowiak

Die Erforschung der **Exoplaneten**

Auf der Suche nach
den Schwesterwelten
des Sonnensystems

KOSMOS

INHALT



Die Exoplaneten-Jagd läuft

6

Schnellkurs über Exoplaneten

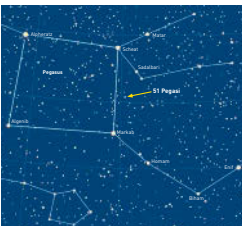
8



1 | Fremde Welten in Science und Fiction

10

Warum Menschen schon immer über fernes Leben und fremde Welten nachdachten



2 | Ein neuer Himmel

32

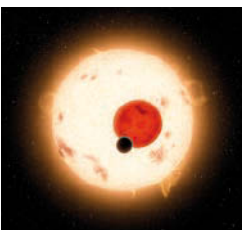
Die kurze Geschichte der ersten Exoplanetenentdeckung



3 | Unsere Heimatadresse im Kosmos

46

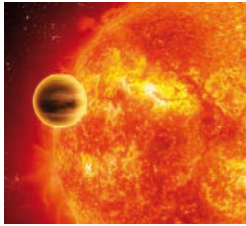
Die Erde und das Sonnensystem



4 | Verborgen im Rampenlicht

66

Von der Schwierigkeit, Exoplaneten nachzuweisen



5 | Vom Heißen Jupiter bis zur zweiten Erde 82

Planeten um andere Sterne und deren Steckbriefe



6 | Leben auf Exoplaneten? 124

Von der Bewohnbarkeit außersolarer Welten



7 | Der zweiten Erde auf der Spur 148

Die Zukunft der Exoplanetenforschung



8 | Exoplaneten für jedermann 166

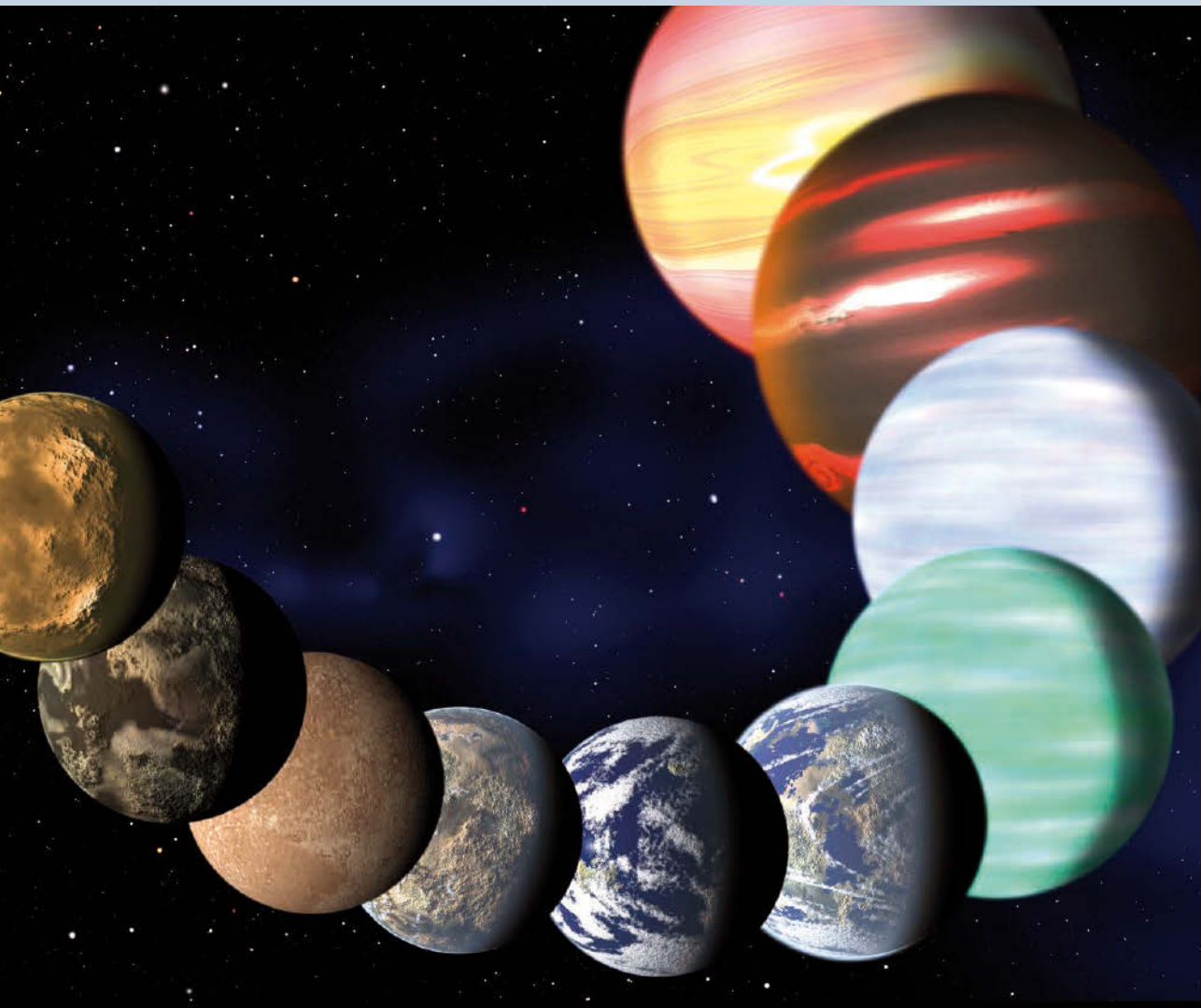
Amateurastronomen und ihr Beitrag

Literaturhinweise und Internetlinks 170

Register 171

Bildnachweis 174

DIE EXOPLANETEN-JAGD LÄUFT



Gibt es Planeten bei fernen Sternen? Was gestern noch wie ein Märchen klang und die Domäne der Science-Fiction war, ist heute zur Gewissheit geworden: die Existenz von Planeten jenseits unseres Sonnensystems – kurz Exoplaneten genannt. Seit der Entdeckung des ersten Exoplaneten namens 51 Pegasi b im Jahre 1995 hat sich die Suche nach Planeten bei anderen Sternen zu einem der spannendsten Arbeitsgebiete der Astronomie entwickelt.

| Eine rasante Entwicklung

20 Jahre nach der ersten Entdeckung eines Exoplaneten kann sich die Ausbeute sehen lassen: Anfang 2015 waren 1888 Exoplaneten in 1187 fernen Sonnensystemen bekannt, darunter 477 mit zwei bis sieben Planeten sowie über 2000 weitere Planetenkandidaten – und es werden fast täglich mehr. Der Grund dieser Suchaktion ist einfach: Wenn unser Sonnensystem nicht einzigartig ist, dann ist es höchstwahrscheinlich unsere Erde ebenso wenig – und damit auch jenes Phänomen, das wir Leben nennen.

So gleicht die Suche nach Exoplaneten einem Theater- oder Opernstück mit dem Kosmos als Bühne. Die vier Akte dieses himmlischen Schauspiels heißen:

1. Spekulationen über extrasolare Welten
2. Ihr wissenschaftlicher Nachweis
3. Suche nach weiteren Kandidaten
4. Erforschung der neuen Welten

| Entdeckung einer zweiten Erde

Was uns bisher in den Akten Eins bis Vier geboten wurde, ist aufregend genug. Und doch fiebern alle dem dramatischen Höhepunkt im Schlussakkord entgegen: der Entdeckung von „Terra II“, einer Schwesterwelt unserer Erde. Vielleicht müssen wir darauf noch Jahre warten, vielleicht aber hat die Meldung darüber bereits die Runde gemacht, wenn dieses Buch erschienen ist. Für heute gilt: Wir kennen die unterschiedlichsten Charaktere unserer Protagonisten namens Exoplaneten. Sie reichen von Welten mit den Dimensionen und Eigenschaften unseres Riesenplaneten Jupiter bis hin zu großen Gesteinsplaneten, den sogenannten Supererden. Manche Exoplaneten nähern sich ih-

rem Zentralgestirn auf riskanten Bahnen und laufen dabei Gefahr, von ihm verschlungen zu werden, andere vagabundieren ohne Zentralstern durch die dunklen Tiefen des Weltalls.

Mit diesem Buch erhalten Sie einen grundlegenden Überblick über den aktuellen Stand der Exoplanetenforschung. Es richtet sich an all jene, für die dieses Thema zwar zu den interessantesten Forschungsgebieten gehört, die aber nicht gleich ein Studium der Astronomie betreiben wollen. Auf diese Einführung folgt ein Schnellkurs, so dass man nicht vollkommen unvorbereitet dieses Neuland betritt.

Mein herzlicher Dank gilt Professor Dieter B. Herrmann, dem emeritierten Direktor der Archenhold-Sternwarte und Leiter des Zeiss-Großplanetariums in Berlin, für seine fachliche Beratung. Ferner danke ich meinem langjährigen Freund Wolfgang Siebert sowie meiner Schwester Martina Wöckener. Sie waren als Testleser tätig und haben das Geschriebene auf Verständlichkeit hin überprüft. Sollten dennoch Fehler verblieben sein, so gehen sie selbstverständlich allein zu Lasten des Autors.

Ganz gleich, aus welchem Grund jemand zur Lektüre dieses Buches greift: Er wird erfahren, dass kein anderes Stück zurzeit so spannend und dramatisch ist – zumal es laufend fortgeschrieben wird – wie das mit dem Titel: „Die Erforschung der Exoplaneten – auf der Suche nach den Schwesterwelten des Sonnensystems“.

Bernhard Mackowiak

Neu-Westend, Berlin-Charlottenburg (-Wilmerdorf), Deutschland in Europa, auf dem dritten Planeten des Sonnensystems, bei 57 Grad galaktischer Länge und 22 Grad galaktischer Breite im Orion-Arm der Galaxis, im Galaxienhaufen der Lokalen Gruppe, Teil des Virgo-Superhaufens, am 31. Tag des dritten Monats im Jahr 2015.

SCHNELLKURS ÜBER EXOPLANETEN

Im Zuge der Exoplanetenforschung sind zum einen neue Begriffe entstanden, zum anderen haben bereits existierende eine neue Bedeutung erfahren. Die nachfolgende Übersicht soll den Einstieg in dieses Thema erleichtern.

| Exoplanet

Ein Planet, der jenseits unseres Sonnensystems um einen anderen Stern kreist. Exoplaneten werden von der Helligkeit ihres Muttersterns überstrahlt, so dass sie nur in sehr seltenen Fällen direkt gesehen werden können. Außerdem sind Sterne und ihre Exoplaneten so weit von uns entfernt, dass das Maß des Kilometers nicht mehr ausreicht, um die Distanz „handhabbar“ anzugeben. Deshalb verwendet die Astronomie das

| Lichtjahr

Die Strecke, welche das Licht (rund 300.000 km/s) in einem Jahr zurücklegt. Sie beträgt 9,5 Billionen Kilometer. Der nächste Stern ist 4,3 Lichtjahre von uns entfernt. Doch nicht nur zwischen den Sternen und Galaxien, sondern auch in einem Planetensystem herrschen gewaltige Distanzen, für die eine Angabe in Kilometern ebenfalls eine zu große Zahlenschreibweise bedeutet. Hier benutzen die Astronomen deshalb die nach dem Lichtjahr nächst kleinere Entfernungsangabe, die

| Astronomische Einheit

Sie wird mit „AE“ abgekürzt und ist der mittlere Abstand zwischen Erde und Sonne, rund 150 Millionen Kilometer. Merkur ist nur 0,4 AE von der Sonne entfernt, Saturn fast 10 AE und Neptun 30 AE. Viele Exoplaneten sind ihrem Stern viel näher als Merkur. Da sie im Glanz ihres Mut-

tersterns nicht direkt sichtbar sind, basiert eine Nachweismethode auf der

| Spektralanalyse

Darunter versteht man die Zerlegung des Sternenlichts in die Farben des Regenbogens. In einem Sternspektrum sind dunklen Linien erkennbar, die Informationen über den Stern selbst enthalten, zum Beispiel seine chemische Zusammensetzung. Minimale Verschiebungen der Spektrallinien lassen auf einen zweiten Stern oder sogar Exoplaneten schließen. Das zugrundeliegende Phänomen nennt sich

| Dopplereffekt

Er wird durch die Bewegung einer Schall- oder Strahlungsquelle hin zum Beobachter oder weg von ihm verursacht, was eine Frequenzänderung zur Folge hat. Beim Schall zeigt sie sich in einem höheren Ton bei Annäherung und einem tieferen beim Entfernen. Im Spektrum eines Sterns macht sich die Annäherung durch die Verschiebung der Absorptionslinien in den blauen Bereich bemerkbar; sind sie zur roten Farbe hin verschoben, entfernt sich der Stern von uns. Auch Radiostrahlung zeigt ein solches Phänomen.

| Spektralklassen

Um Sterne nach ihren Eigenschaften zu klassifizieren, bedient man sich der Buchstabenfolge O, B, A, F, G, K und M. Dabei sind blauweiße O-Ster-

ne besonders heiß, rötliche M-Sterne am kühls-ten. Unsere gelb leuchtende Sonne ist mit 5500 Grad Oberflächentemperatur nach dieser Einteilung ein Stern des Typs G und wird als Zwergstern bezeichnet. Sterne wie die Sonne und kühlere Typen sind für Leben tragende Exoplaneten die am besten geeigneten Kandidaten, denn sie verfeuern ihre Energie nur langsam und leuchten Milliarden Jahre lang.

Der Nachweis von Exoplaneten ist nur mit speziellen Verfahren möglich – am häufigsten geschieht das indirekt, in einigen Fällen bereits auf direkte Weise. Zu den indirekten Nachweismethoden gehören die

| Transitmethode

Sie nutzt das Vorüberziehen eines dunklen Exoplaneten vor seinem Mutterstern, was sich in einem geringen Abfall der aufgezeichneten Helligkeit bemerkbar macht.

| Radialgeschwindigkeitsmethode

Sie misst die Bewegungsgeschwindigkeit eines Sterns auf uns zu oder von uns weg (Dopplereffekt). Das minimale Zittern eines Exoplaneten an seinem Zentralstern führt zu periodischen Veränderungen in den Absorptionslinien.

| Astrometrische Methode

Sie basiert darauf, dass nicht nur der Mutterstern durch seine Gravitation den Planeten beeinflusst, indem er ihn auf eine Umlaufbahn zwingt, sondern dass auch der umlaufende Planet mit seiner Schwerkraft auf den Zentralstern einwirkt. Dann scheint der Stern vor dem Hintergrund anderer Sterne zu „wackeln“. Bisher konnte mit der astrometrischen Methode kein Exoplanet zweifelsfrei nachgewiesen werden; man erwartet aber Erfolge durch die genauen Messungen der Astrometrie-Raumsonde *Gaia*.

| Mikrolinseneffekt

Diese Methode des Exoplanetennachweises macht sich die Tatsache zunutze, dass Körper mit ihrer Masse und somit ihrer Schwerkraft den umgebenden Raum minimal verbiegen. Zieht vor einem weit entfernten Stern ein anderer, näher gelegener vorbei, dann bündelt die Schwerkraft

des vorderen Sternes das Licht des hinteren so in Richtung des Beobachters, dass dessen Helligkeit charakteristisch schwankt. Falls ein Planet den Vordergrundstern begleitet, macht er sich in der aufgezeichneten Lichtkurve bemerkbar.

| Direktaufnahme

Um einen Exoplaneten durch ein Foto und damit auf direktem Weg nachzuweisen, ist ein hoher technischer Aufwand nötig: Im Teleskop wird das Licht des Sterns, bei dem man einen Exoplaneten vermutet, durch eine Blende abgeschattet. In einigen Fällen ist es auf diese Weise bereits gelungen, Exoplaneten zu fotografieren, allerdings ohne Details.

| Heiße Jupiter

Diese Exoplanetenart hat in unserem Sonnensystem kein Pendant. Zwar ähneln die Heißen Jupiter mit ihren dichten Wasserstoff-Methan-Ammoniak-Atmosphären und gewaltigen Dimensionen dem größten Planeten unseres Sonnensystems, kreisen jedoch in äußerst geringem Abstand um den Mutterstern (näher als Merkur um die Sonne). Dadurch werden sie sehr stark aufgeheizt und haben hohe Oberflächentemperaturen.

| Supererden

Sie stellen den zweiten und ebenfalls exotischen Exoplanetentyp dar, der entdeckt wurde. Sie kreisen wie die Erde in jener Zone um ihren Stern, wo die Temperaturen so sind, dass flüssiges Wasser und damit Leben existieren kann (habitable Zone). Doch sind diese Planeten um ein Vielfaches größer und schwerer als die Erde.

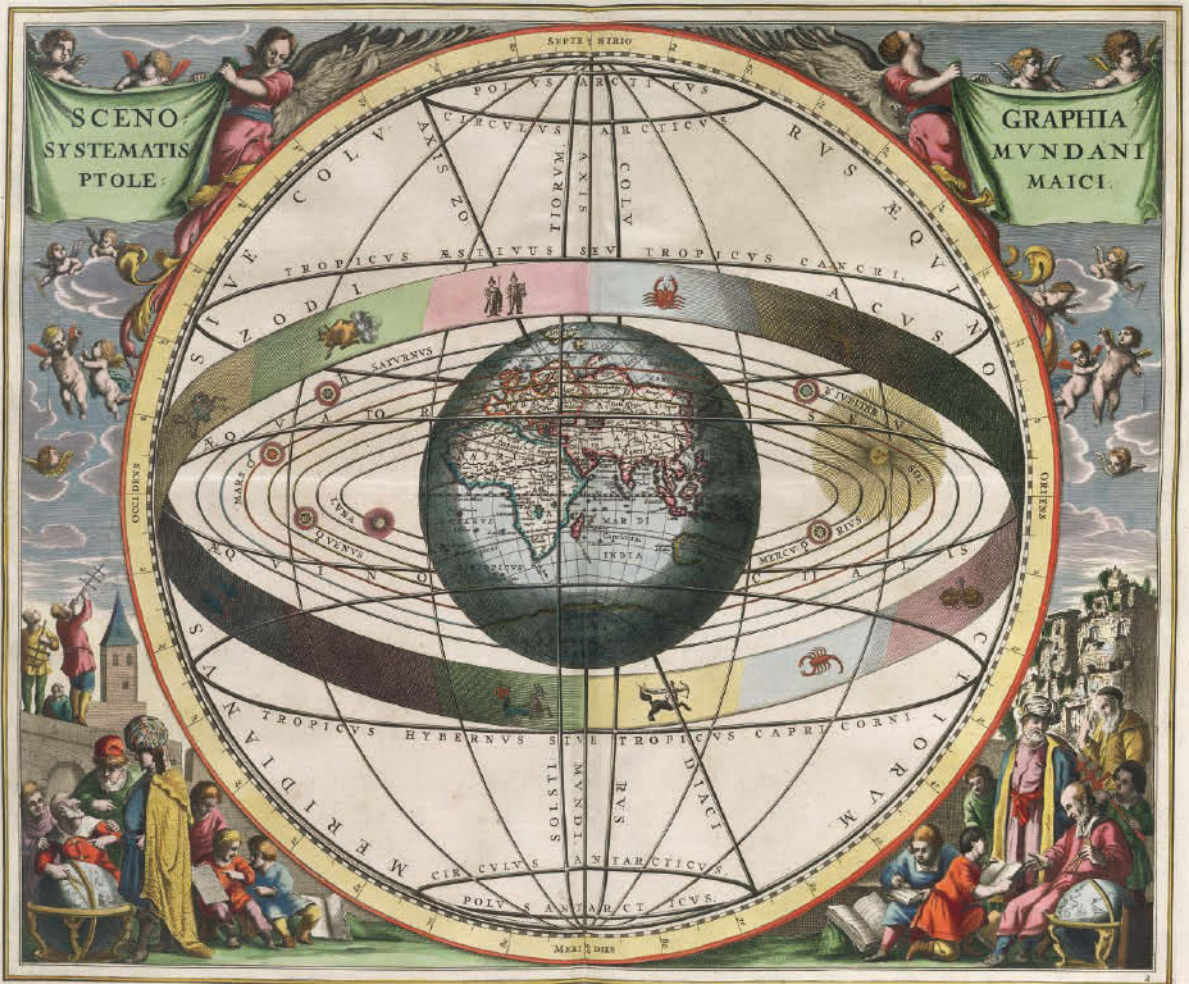
| Habitable Zone

Die habitable (= bewohnbare) Zone ist jener Abstand um einen Stern, in der Wasser auf einem Exoplaneten in flüssiger Form vorkommt. Der Nachweis von Lebensspuren, wie Sauerstoff und Methan sowie Chlorophyll, ist das oberste Ziel. Es ergibt sich daraus, dass Leben, wie wir es kennen, drei Bestandteile braucht: flüssiges Wasser; Elemente wie Kohlenstoff, Stickstoff und Schwefel sowie eine Energiequelle.

1

FREMDE WELTEN IN SCIENCE UND FICTION

Warum Menschen schon immer über ferne Welten und fremdes Leben nachdachten



Als der Mensch begann, zu den Gestirnen aufzublicken, stellte er sich die Frage, was diese Objekte wohl sein mögen: Sind es von höheren Mächten angebrachte Himmelslichter oder verbergen sich dort Welten wie unsere Erde? Darüber konnte man lange Zeit nur spekulieren. Auch nachdem das Fernrohr in die Astronomie Einzug gehalten hatte und die Naturwissenschaften sowie der technische Fortschritt eine solidere Grundlage für die Beantwortung dieser fundamentalen Fragen bereitstellten, änderte sich daran für lange Zeit nichts.

Eine neue Sichtweise der Natur

Gibt es außer unserer Erde noch andere Erden oder zumindest erdähnliche Welten im Weltall? Und falls ja: Sind diese bewohnt? Mit anderen Worten: Sind wir allein im Kosmos? Seit wann die Menschen über diese Fragen nachdachten und wer zuerst versuchte, darauf eine Antwort zu finden, wissen wir nicht. Nur so viel ist sicher: Es musste ein Umdenken über das Wesen der Naturphänomene stattgefunden haben. Die Welt und ihre zahlreichen Naturerscheinungen wurden nicht mehr als Ausdruck göttlichen Willens und Waltens gesehen. Stattdessen wurde die Natur als Ansammlung belebter und unbelebter Dinge aufgefasst. Aus den Beobachtungen der Phänomene wurden Erkenntnisse gewonnen, welche schließlich in ein möglichst widerspruchsfreies Erklärungsmodell mündeten. Wesentlichen Anteil daran hatte die Entwicklung von Beobachtungs- und Messinstrumenten: Thermometer und Barometer, Mikroskop und Teleskop verhalfen dem noch jungen Gebiet der Naturwissenschaft im 17. Jahrhundert zu gewaltigen Fortschritten. Erst mit ihrer Hilfe konnten sich die Biologie, Astronomie, Physik und Chemie sowie die Meteorologie zu den modernen Naturwissenschaften entwickeln.

Und zur Natur gehörte nicht nur die Erde mit ihren vielfältigen Erscheinungen – also Landschafts- und Lebensformen sowie Naturgewalten –, sondern auch der Himmel. Er erschien bereits den Griechen geordnet und ewig, weshalb sie vom „Kosmos“ sprachen. Die Untersuchung der kosmischen Objekte stellte jedoch die frühen naturforschenden Menschen vor ein Problem,

das sich bis heute nur wenig geändert hat. Es sind die riesigen und meist unüberwindlichen Entfernungen der Gestirne: Sonne, Planeten und Sterne sind unserer direkten Erfahrung entzogen.

Gedanken von Philosophen und Literaten

Lange Zeit gab es keine Möglichkeit, über unsere Welt hinauszublicken; und so konnten die Menschen nur spekulieren. Die Beantwortung der Frage, ob es andere Erden jenseits der Erde gäbe und damit auch andere Lebewesen außer den irdischen, lag deshalb zumeist in den Händen der Naturphilosophen und Literaten. Doch die machten bereits vor mehr als 2000 Jahren Aussagen, die für uns und das hier behandelte Thema merkwürdig vertraut klingen – und das zu einem Zeitpunkt, wo die Menschen nur das vom Himmel kannten, was ihnen ihre Augen und ihr Gehirn offenbarten.

Die frühen Weltbilder sahen die Erde als Zentrum des Kosmos. An der sich über sie wölbenden Himmelskugel zogen Sonne, Mond, Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn als sogenannte Wandelsterne ihre Bahn. Das geschah unter den unzähligen unbeweglichen Sternen, die deshalb „Fixsterne“ genannt wurden. Die Frage, ob es sich vor allem bei den Wandelsternen um belebte Welten handelt, wurde nur am Rande gestreift oder gar nicht diskutiert, denn Erde und Menschen wurden als Krone der Schöpfung gesehen und galten daher als einzigartig im Kosmos. Was stattdessen unter den Gelehrten

Entfernungen im Weltall

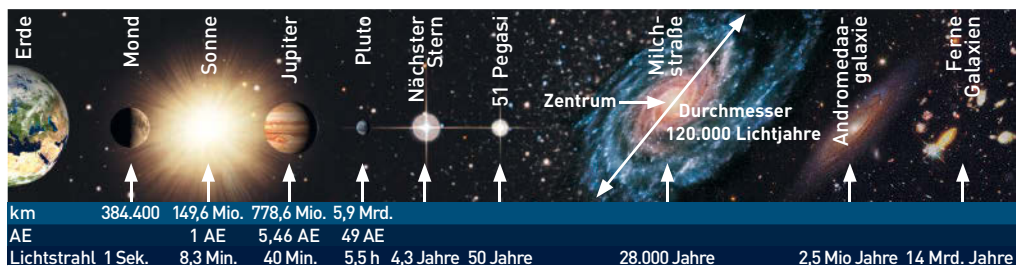
Um die Entfernungen im Kosmos auszudrücken, ist die irdische Einheit „Kilometer“ nicht geeignet, da die Werte rasch unhandlich werden. Für das Weltall haben die Astronomen daher eigene Maßeinheiten eingeführt. Im Sonnensystem wird die Astronomische Einheit (AE) verwendet. Sie ist definiert als der mittlere Abstand zwischen Erde und Sonne und beträgt 149,6 Millionen Kilometer.

Noch größere Entfernungen, wie sie zwischen Sternen und Galaxien herrschen, werden in zwei Größen ausgedrückt: Das Lichtjahr (Lj) als jene Distanz, die das Licht bei einer Geschwindigkeit von 299.792 Kilometer

pro Sekunde in einem Jahr zurücklegt. Einem Lichtjahr entsprechen 63.240 AE oder 9,46 Billionen Kilometer. Weiterhin gibt es das Parsec (pc), abgekürzt von „Parallaxensekunde“. Unter der Parallaxe versteht man den Winkel (gemessen in Bogensekunden), unter dem ein Stern relativ zu weiter entfernten Sternen zu verschiedenen Jahreszeiten von der Erde aus zu sehen ist. Ein Parsec misst 3,26 Lj, was wiederum 206.260 AE oder 30,9 Billionen Kilometer entspricht.

Die nachfolgende Tabelle verdeutlicht die genannten Maßeinheiten anhand der Laufzeiten des Lichtes:

Erde zu Mond	384.400 km = 1 Lichtsekunde
Erde zur Sonne	149,6 Mio. km = 1 AE = 8,3 Lichtminuten
Sonne zu Jupiter	778,6 Mio. km = 5,46 AE = 40 Lichtminuten
Sonne zu Pluto	5,9 Mrd. km = 49 AE = 5,5 Lichtstunden
Sonne zum nächsten Stern	4,3 Lichtjahre
Sonne zum Stern 51 Pegasi	50 Lichtjahre
Sonne zum Zentrum der Milchstraße	ca. 28.000 Lichtjahre
Durchmesser der Milchstraße	ca. 120.000 Lichtjahre
Distanz zur Andromedagalaxie	rund 2,5 Millionen Lichtjahre
Distanz zu den entferntesten Galaxien	rund 14 Milliarden Lichtjahre



Schon auf der Erde sind große Distanzen, etwa zwischen den Kontinenten, kaum nachvollziehbar, da sie außerhalb unserer Alltagserfahrung liegen. Noch viel unvorstellbarer verhält es sich mit den Entfernungen im Weltall, hier an bekannten Objekten und der Laufzeit des Lichts verdeutlicht.

ausgiebig diskutiert wurde, war: Wie ist die Welt aufgebaut und welche Kräfte bewegen sie? Die daraus entstandenen Vorstellungen über Erde und Himmel wurden im alten Babylon von den Priestern entwickelt, die den Himmel von den

zahlreichen stufenförmigen Tempeltürmen aus beobachteten. Im antiken Griechenland waren es Philosophenschulen wie die der Atomisten und Pythagoreer, die sich über den Aufbau des Kosmos Gedanken machten.

Daher gab es auch nicht ein Weltbild der Antike, sondern verschiedene Weltbilder. Sie lösten einander auch nicht unbedingt ab, sondern existierten weitgehend nebeneinander. Ihr Ziel war, den Aufbau des damals bekannten Universums und die sich daraus ergebenden Erscheinungen logisch zu erklären.

| Ein Universum aus Atomen

In Griechenland waren die Atomisten der Meinung, dass unsere Welt aus Leere und Atomen aufgebaut sei. Und diese Atome seien unteilbar – daher der Name für die lange Zeit als kleinste Bausteine der Materie angesehenen Teilchen. Am Anfang der Welt beherrschten sie als wirbelnde Masse das gesamte Universum und erzeugten den Zustand des Chaos. In ihm kollidierten dann die Atome und bildeten größere Brocken aus Materie, bis aus diesem Prozess die Erde hervorging und alles, was sich auf ihr befand.

Vertreten wurden diese schon sehr modernen Gedanken, die unseren Vorstellungen von der Entstehung der Welt recht nahekommen – ebenso was die Rolle der Materieteilchen angeht –, von Leukipp (im 5. Jh. v. Chr.) und seinem Schüler Demokrit (ca. 5. Jh. v. Chr.). Daraus ergab sich für Demokrit die Folgerung und Frage: Weshalb sollte aus diesem Wirrwarr von Uratomen nur eine Welt hervorgehen – und außer unserer Erde nicht noch andere Welten geboren werden? Und wenn aus der Zusammenballung von Atomen so das Leben auf der Erde entstehen konnte – also nicht als willkürlicher Akt der Götter –, dann musste das natürlich auf anderen Welten ebenfalls geschehen sein, meinte auch der Philosoph Epikur (341–270 v. Chr.) In einem seiner Briefe schrieb er: „Es gibt unzählige Welten, sowohl solche wie die unsere als auch andere. (...) Nichts spricht gegen eine unendliche Anzahl Welten (...) Wir müssen akzeptieren, dass es auf allen Welten Lebewesen, Pflanzen und andere Dinge gibt, wie wir sie auf unserer Welt erblicken.“ Damit war die Erde im Kosmos nicht alleine, sondern auch die Menschen waren im Universum nur ein Volk unter vielen.

Der Aufbau des Weltalls

Ein Blick zum klaren Nachthimmel zeigt den Mond, einige Planeten und tausende Sterne. Sie sind unterschiedlich hell, im Fernrohr erkennt man die Größen der Planeten, doch Sterne bleiben auch im besten Teleskop der Welt punktförmig. All diese Körper sind aus dünnen Nebeln entstanden, der interstellaren Materie. Man kann diese Nebel als leuchtende Wolken beobachten – am bekanntesten ist der Orion-Nebel –, oder sie zeichnen sich als dunkle Schemen vor dem Hintergrund der Sterne ab, wie es beim „Kohlensack“ im Sternbild Kreuz des Südens der Fall ist.

Die interstellare Materie besteht überwiegend aus Wasserstoff, dem Grundbaustein des Universums, vermischt mit schwereren Elementen, die durch eine Sternexplosion (eine Supernova) entstanden sind. Diese Materie bildet das Baumaterial für neue Sterne, Planeten, Kometen und kleinere Gesteinsbrocken.

Die kleinsten Brocken werden als Meteoroiden bezeichnet, größere als Asteroiden oder Planetoiden, gefolgt von Kometen. Dann kommen die Monde und Planeten sowie die Sterne, um die sie kreisen. Sterne entstehen oft in Sternhaufen; und alle Sterne am Himmel sind Teil unserer Milchstraße, einer Galaxie. Ihr Band mit zahlreichen Sternen ist die Scheibenebene der spiralförmigen Galaxis.

Diese Welteninseln sind wiederum in sogenannten Haufen organisiert (die Milchstraße gehört mit 76 anderen Galaxien zur sogenannten Lokalen Gruppe), die sich zu Superhaufen wie dem Virgo-Superhaufen mit 100–200 Galaxienhaufen vereinigen. Diese sind in Filamenten (fadenförmigen Verbindungen zwischen Galaxien- und Superhaufen) um riesige Voids (Leerräume) angeordnet und geben dem beobachtbaren Universum die Form von Seifenschaum.

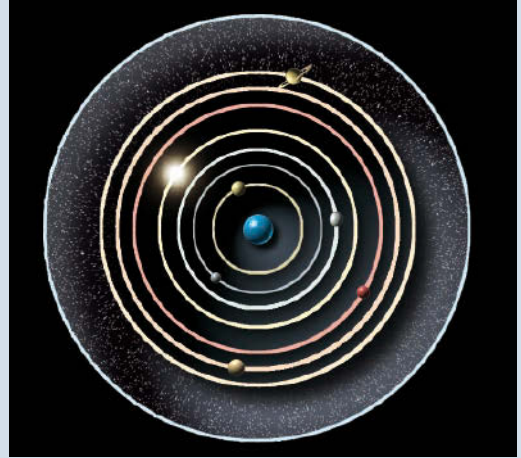
Das Räderwerk des Himmels

Alle antiken Völker, die Himmelsbeobachtung betrieben, konnten sich nur an dem orientieren, was ihnen der Augenschein bot. Danach erschien ihnen die Erde als ruhende Scheibe, über die sich halbkugelförmig der Himmel wölbt. Vor dem Hintergrund der festgehefteten Gestirne (Fixsterne), die als Öffnungen gesehen wurden, durch die das himmlische Feuer schien, wanderten Sonne, Mond und die Planeten Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn als Vertreter der Götter über den Himmel um die Erde, weshalb sie als „Wandelsterne“ bezeichnet wurden.

Ihren Lauf versuchten die babylonischen und ägyptischen Himmelskundler zu erkunden, um einen funktionierenden Kalender für Aussaat und Ernte sowie Festtage zu erhalten. Für diese beiden Völker standen rein praktische Erwägungen im Vordergrund.

Dagegen sahen die Griechen die Bewegungen am Himmel unter dem Blickwinkel der Geometrie und wollten dessen Gesetzmäßigkeiten herausfinden. Die Schule der Pythagoreer nahm aus diesem Grund die Kugelgestalt der Erde und des Kosmos an, ferner dass Sonne, Mond und die fünf Planeten auf verschiedenen Kugelschalen gleichmäßige Bewegungen um die Erde vollführten. Die Reihenfolge und Abstände der Planeten von der Erde wurden durch die scheinbaren Proportionen vorgegeben, also Mond, innere Planeten (Merkur, Venus), Sonne, gefolgt von den äußeren Planeten (Mars, Jupiter, Saturn) sowie der Sphäre der Fixsterne.

Während sich die tägliche Umdrehung des Fixsternhimmels als eine gleichmäßige Bewegung vollzog, wiesen die Planeten auch entgegengesetzte, nicht kreisförmige Eigenbewegungen auf, die sich zudem im Helligkeitswechsel widerspiegelte. Dieses Verhalten versuchten die griechischen Astronomen durch die Epizykeltheorie zu erklären. Demnach bestand eine Planetenbahn aus einem die Erde umlaufenden großen Hauptkreis (Deferent), der wiederum



Das Planetensystem mit der Erde im Zentrum.

Mittelpunkt eines kleineren Kreises war (Epizykel). Auf diesem Kleinkreis lief der Planet um, während er gleichzeitig mit ihm auf dem Großkreis um die Erde wanderte.

Mit diesem Bewegungsmuster konnten die periodischen Stillstände und rückläufigen Bewegungen sowie wechselnden Abstände zwischen einem Punkt der kleinsten Entfernung von der Erde (Perigäum) und dem der größten Distanz (Apogäum) zufriedenstellend erklärt, ja vorausberechnet werden. Das funktionierte die ganze Antike hindurch gut bis zum ausgehenden Mittelalter.

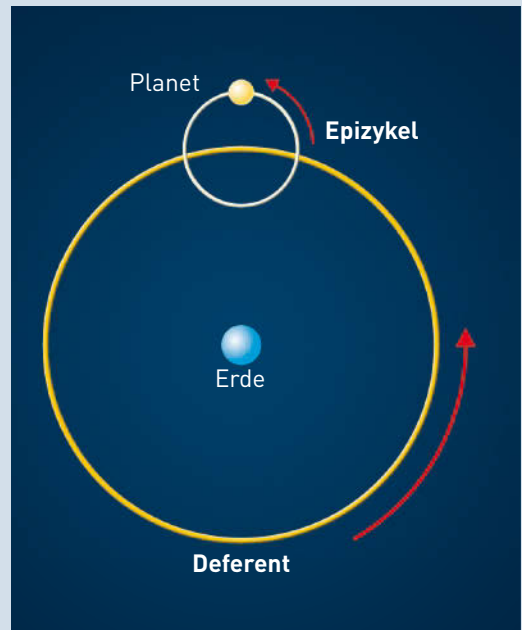
Dann aber waren die Abweichungen zwischen den berechneten und tatsächlichen Positionen so groß geworden, dass die Astronomen sich schließlich der heliozentrischen Theorie der Planetenbewegung zuwandten. Sie wurde auch schon von einigen antiken Naturforschern und -philosophen wie Aristarch von Samos vertreten. Danach ist die Sonne der Mittelpunkt des Planetensystems, und alle Bewegungen im Planetensystem sind auf sie zu beziehen. In diesem Zusammenhang ist folgende schriftliche Äuße-

rung des griechischen Mathematikers, Physikers und Ingenieurs Archimedes (um 287 – 212 v. Chr.) in seiner „Sandrechnung“ interessant:

„Du, König Gelon, weißt, dass ‚Universum‘ die Astronomen jene Sphäre nennen, in deren Zentrum die Erde ist, wobei ihr Radius der Strecke zwischen dem Zentrum der Sonne und dem Zentrum der Erde entspricht. Dies ist die allgemeine Ansicht, wie du sie von Astronomen vernommen hast. Aristarch aber hat ein Buch verfasst, das aus bestimmten Hypothesen besteht, und das, aus diesen Annahmen folgernd, zeigt, dass das Universum um ein Vielfaches größer ist als das ‚Universum‘, welches ich eben erwähnte. Seine Thesen sind, dass die Fixsterne und die Sonne unbeweglich sind, dass die Erde sich um die Sonne auf der Umfanglinie eines Kreises bewegt, wobei sich die Sonne in der Mitte dieser Umlaufbahn befindet, und dass die Sphäre der Fixsterne, deren Mitte diese Sonne ist und innerhalb derer sich die Erde bewegt, eine so große Ausdehnung besitzt, dass der Abstand von der Erde zu dieser Sphäre dem Abstand dieser Sphäre zu ihrem Mittelpunkt gleichkommt.“

Aristarch denkt hier seiner Zeit weit voraus: Wenn nicht die Erde, sondern die Sonne im Zentrum steht, so müssten wir eigentlich eine Parallaxe beobachten (Verschiebung der scheinbaren Position eines Sterns am Himmel durch die unterschiedliche Stellung, die die Erde auf ihrer Wanderung um die Sonne während eines Jahres auf ihrer Bahn einnimmt. Jeder kann diesen Effekt selbst beobachten, indem er den Daumen ansieht, wenn er die Augen wechselseitig schließt. Er scheint dann zu springen). Auf die gleiche Weise müsste sich das Erscheinungsbild des Sternhimmels abhängig von der aktuellen Position während eines Umlaufs der Erde um die Sonne verändern.

Doch der Parallaxenwinkel ist selbst bei den sonnennächsten Sternen kleiner als eine Bo-



Mit dem „Epizykelsystem“ wurden früher die Planetenschleifen erklärt: Ein Planet bewegt sich auf einem kleinen Kreis (Epizykel) und der wiederum auf einem großen Kreis (Deferent) um die Erde.

gensekunde und daher mit bloßem Auge nicht feststellbar. Diese anscheinend fehlende Parallaxe war das Hauptargument gegen Aristarchs Modell. Den Grund ihrer Winzigkeit erklärt Aristarch mit der unvorstellbar großen Entfernung zu den Fixsternen, gegenüber der der Durchmesser der Erdbahn verschwindend klein sei. Deshalb konnte sich Aristarchs Modell zu seiner Zeit nicht durchsetzen, und auch Kopernikus und seine Anhänger konnten zu ihrer Zeit diesen Beweis nicht antreten. Dass sie dennoch für das heliozentrische Modell eintraten, lag einfach daran, dass sich mit ihm die Planetenpositionen genauer berechnen ließen. Die Fixsternparallaxe wurde erst 1838 durch Beobachtungen mit einem Teleskop nachgewiesen.

Die erste Idee eines heliozentrischen Weltsystems

Ansichten, die ihrer Zeit weit voraus waren, wurden auch in der Philosophenschule der Pythagoreer gelehrt. Nach Philolaos von Kroton (um 5. Jh. v. Chr.) gibt es in der Mitte des Alls ein gewaltiges, aber für Menschen nicht sichtbares Feuer, um das sich alle damals am Himmel beobachtbaren Wandelsterne bewegen, zu denen auch die Sonne gezählt wird. Diese Idee war somit Vorläufer des heliozentrischen Weltsystems. Es war schließlich Aristarch von Samos (um 310–230 v. Chr.), der diese Vorstellung abänderte, indem er die Sonne ins Zentrum der Planetenbahnen stellte. Er gilt somit als einer der ersten Vertreter jenes Weltsystems, wonach alle Planeten die Sonne umlaufen und lediglich der Mond um die Erde kreist.

Auch die Erde wurde von den Verfechtern dieser Idee nicht mehr als ruhende Scheibe angenommen, sondern drehte sich als Kugel einmal täglich um ihre Achse. Sie besaß nach Philolaos von Kroton sogar ein Gegenstück in Form einer Gegenerde, die sich unserem Planeten genau gegenüber um dieses Zentrum bewegte. Diese Idee nahm übrigens 1966 der US-amerikanische Fantasy- und Science-Fiction-Autor John Norman, um seinen 33 Bände umfassenden Gor-Zyklus zu schreiben, von dem bis heute in deutscher Übersetzung 25 erschienen sind.

Der Mond als Spiegelbild der Erde

Andere Autoren der Antike griffen nicht so weit hinaus, sondern beschäftigten sich, was erdähnliche Welten und Leben auf ihnen betraf, mit den nahen Himmelskörpern wie Mond und Sonne, denn diese offenbarten dem beobachtenden bloßen Auge zumindest einige interessante Merkmale.

Das galt besonders für den Mond. Sein beleuchteter Teil zeigt helle und dunkle Gebiete, die zu entsprechenden Spekulationen und Erzählungen reizten. Bis zur Erfindung des Fernrohrs wurden sie als Wasserflächen angesehen, weshalb sie auch den lateinischen Namen „Mare“

erhielten, was „Meer“ bedeutet. Die Gedanken-spiele der damaligen Menschen fielen entsprechend aus. Der populärphilosophische Schriftsteller Plutarch (um 45–125 n. Chr.) ließ sich in einer sehr scharfsinnigen Schrift mit dem Titel „De facie in orbe lunae – Das Gesicht im Mond“ über die Bewohnbarkeit unseres Trabanten aus, wandte sich jedoch dabei vor allem gegen die damals vorherrschende Ansicht, die dunklen Flecken auf der Mondscheibe seien eine Art Spiegelbild der irdischen Länder und Meere. Seiner Meinung nach stellte der Mond eine eigene Welt dar – allerdings etwas kleiner als unser Heimatgestirn.

Der erste utopische Roman

Ideen dieser Art wurden dann auch im Jahr 160 von dem Schriftsteller Lukian von Samosata (125–180 n. Chr.) aufgegriffen und zu einer satirischen Erzählung verarbeitet. Er lässt in seinen „Verae Historiae“ („Wahre Geschichten“) tapfere Seeleute mit ihrem Segelschiff durch einen Orkan zum Mond reisen, den sie nach sieben Tagen und Nächten erreichen. Dort geraten sie unter Soldaten, die auf riesigen dreiköpfigen Geiern reiten. Die Gestrandeten werden zu König Endymion geführt, der einen Angriff gegen die Sonne vorbereitet. Rund 60 Millionen Infanteristen und 130.000 Kavalleristen auf Geiern, Kohlvögeln und Riesenflöhen rücken in die lunaren Bereitstellungsräume ein. Auch Spinnen, von denen die „kleinste so groß wie die größte der Zykladeninseln“ ist, sowie Knoblauchwerfer und andere moderne Waffen gehören zu diesem Heer.

Außerdem können die Reisenden von der Erde auch die Sitten und Gebräuche der Mondbewohner genau studieren. Besonders seltsam sind Geburt und Tod dieser Menschen: Sie treten ins Leben, indem sie aus der Wade eines anderen Mondbewohners entspringen, und verwandeln sich am Ende ihres Daseins in eine Rauchwolke. „Umweltschonend“ ist auch, dass diese Wesen keinerlei Exkreme ausscheiden.

Beispiele wie das hier angeführte zeigen, wie sehr sich die Menschen der damaligen Zeit über extraterrestrische Welten und extraterrest-

risches Leben bereits Gedanken machten – und sei es nur, um ihre Mitmenschen zu unterhalten. Lukians Geschichte gilt als der erste utopische Roman und sollte noch zahlreiche Nachahmer bis hin zur modernen Science-Fiction finden.

Aristoteles und das geozentrische Weltbild

Das seiner Zeit weit vorausseilende heliozentrische Weltbild des Aristarch stieß kaum auf Anerkennung, da es im Schatten der Arbeiten von Aristoteles (384–322 v. Chr.) und Claudius Ptolemäus (um 100–160 n. Chr.) stand: Die Erde ruht nach deren Ansicht in der Mitte des Weltalls und ist dessen absolutes Zentrum. In dieser Theorie war einfach kein Platz für Leben auf anderen Himmelskörpern.

Trotzdem flackerte die Idee anderer bewohnter Welten immer wieder auf. Und so konnte der römische Dichter Lukrez (97–55 v. Chr.) – ein begeisterter Anhänger Epikurs – in seinem Lehrgedicht „De rerum natura“ („Über die Natur“) schreiben:

„...Notwendig ist es, deutlich zu zeigen, dass auch andere Erden in anderen Welten bestehen.
Mit verschiedenen Rassen von Menschen
und Sippen von Tieren“

Die Erde als Schemel Gottes

Dieses geozentrische Weltbild wurde nachhaltig von dem griechischen Mathematiker, Geograf, Astronom, Astrologe, Musiktheoretiker und Philosoph Claudius Ptolemäus vertreten. Sein 13 Bücher umfassendes Werk „Mathematike Syntaxis“ („Mathematische Zusammenstellung“) wurde von den Arabern in ihrer Sprache unter dem Titel „Almagest“ übersetzt und vor dem Vergessen bewahrt. Es war für die Himmelskundler des Mittelalters aufgrund seiner großen Datensammlung das Standardwerk für die Beschreibung und Erklärung der astronomischen Phänomene. Da es die Erde ruhend und sozusagen als Schemel Gottes beschrieb, um den sich alles auf verschiedenen kristallinen Sphären



Claudius Ptolemäus in einem Gemälde aus dem Jahre 1584 in der Kleidung dieser Zeit mit einem typischen Beobachtungsinstrument. Er vertrat nachhaltig das geozentrische Weltbild.

bewegte, wurde es von der christlichen Kirche als allein gültiges Weltbild gesehen. Es stimmte nämlich mit der Bibel bestens überein, nach deren Erzählung laut Josua, Gott Sonne und Mond stillstehen ließ.

Eine neue heliozentrische Sicht

Doch im 15. und 16. Jahrhundert wurde dieser Autoritätsglaube in der Wissenschaft langsam überwunden, und es begann sich zaghaft wieder ein freies, selbstständiges Nachdenken über die Erscheinungen der Natur durchzusetzen. Eine Folge dieses Aufbruchs war, dass auch neue Gedanken über die mögliche Bewohnbarkeit anderer Welten auftauchten.

Als einer ihrer ersten Verfechter in dieser Zeit gilt der deutsche Mathematiker, Philosoph und Theologe Kardinal Nicolaus Cusanus (1401–1464). In seinem Werk „De docta ignorantia“ („Über die belehrte Unwissenheit“) vertrat er



Künstlerische Darstellung des heliozentrischen Planetensystems aus dem Jahr 1661 mit den um diese Zeit bekannten Planeten und ihren Monden sowie dem Tierkreis.

die Meinung, dass auf keinem Gestirn das Leben ausgeschlossen werden könne.

Der italienische Priester, Dichter, Philosoph und Astronom Giordano Bruno (1548–1600) spann diesen Gedanken eines aus unzähligen Sternen bestehenden Universums weiter und war wie Cusanus von der weiten Verbreitung höheren und niederen Lebens überzeugt. Für seine Ansichten wurde er von der Inquisition der Ketzerei und Magie für schuldig befunden und vom Gouverneur von Rom zum Tod auf dem Scheiterhaufen verurteilt.

Die kopernikanische Wende

Doch das Umdenken in der Wissenschaft – und in unserem Fall in der Astronomie – war nicht mehr aufzuhalten: 1543 war das Werk von Nikolaus Kopernikus (1473–1543) „De revolutionibus orbium coelestium“ („Über die Kreisbewegungen der Weltkörper“) erschienen. In diesem Buch vertrat der Domherr zu Frauenburg, der in seiner Freizeit Astronomie und Mathematik betrieb, die Auffassung, nicht die Erde stehe im Mittelpunkt des Universums. Stattdessen bewege sie sich wie die anderen Planeten auf einer Kreisbahn um die Sonne.

Im Jahre 1609 veröffentlichte der deutsche Naturphilosoph, Mathematiker, Astronom, Astrologe und evangelische Theologe Johannes Kepler (1571–1630) in seiner „Astronomia nova“ die ersten beiden Gesetze der Planetenbewegung. Er war durch Beobachtungen der Bewegung des Planeten Mars auf sie gekommen. Danach wandern die Planeten auf Ellipsen um die Sonne, wobei sie sich in Sonnennähe schneller als in Sonnenferne bewegen. Kepler sah den Mond ebenfalls als bewohnt an, und zwar von schlangenartigen Wesen. Er beschrieb ihn in seinem utopischen Roman „Somnium“ („Traum“) als Welt mit Flüssen, Bergen, Tälern, Städten und Burgen. Als Zeichen für die Existenz dieser Bauwerke sah er die riesigen Krater, die damals schon in den primitiven Fernrohren erkannt werden konnten.

Nikolaus Kopernikus auf einem Epitaph in der Johanniskirche in Thorn aus dem Jahre 1589, nach einem Selbstporträt. Der Domherr zu Frauenburg vertrat erneut das heliozentrische Planetensystem, das auf Aristarch von Samos zurückgeht. Doch Kopernikus konnte es durch die Erfindung des Buchdrucks breit publizieren.

