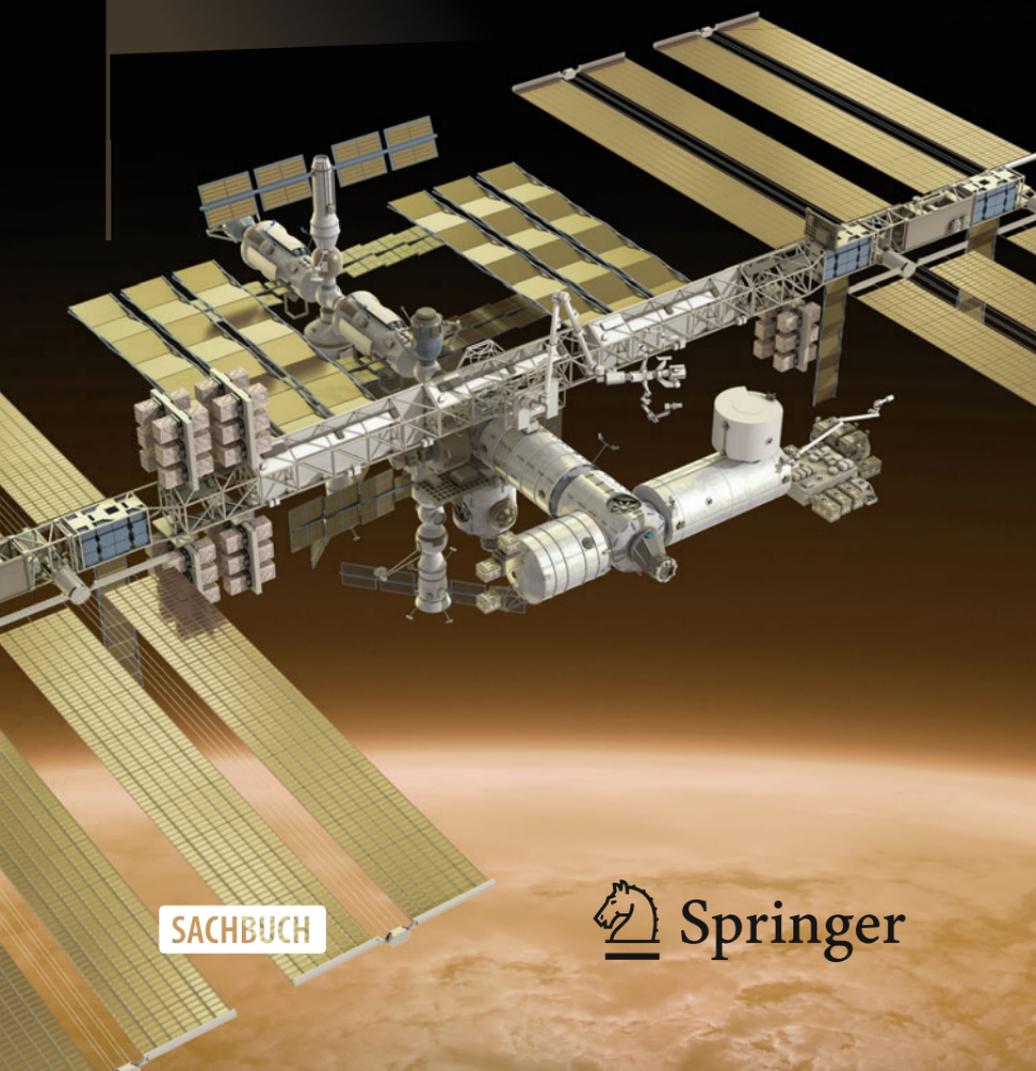


Wolfgang W. Osterhage · Christian Gritz-
ner

Die Geschichte der Raumfahrt



SACHBUCH



Springer

Die Geschichte der Raumfahrt

Wolfgang W. Osterhage ·
Christian Gritzner

Die Geschichte der Raumfahrt

2. Auflage

 Springer

Wolfgang W. Osterhage
Wachtberg-Niederbarchem
Deutschland

Christian Gritzner
Wachtberg-Niederbarchem
Deutschland

ISBN 978-3-662-66518-3 ISBN 978-3-662-66519-0 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-66519-0>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2021, 2022

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Caroline Strunz

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort zur 2. Auflage

Nachdem die Raumfahrt-Euphorie nach der ersten Mondlandung im Jahre 1969 abgeklungen war, ist im letzten Jahrzehnt wieder eine Zunahme des Interesses an der Raumfahrt zu verzeichnen. Projekte wie Rosetta und insbesondere die internationale Raumstation ISS, die zeitweise von dem Deutschen Alexander Gerst kommandiert wurde, stießen die Diskussion wieder an. Mittlerweile wurde sozusagen im Hintergrund eine Weltraum-basierte Infrastruktur geschaffen, ohne die unser tägliches Leben nicht oder zumindest ganz anders funktionieren würde: Navigationssysteme (GPS) und Kommunikationssatelliten (Fernsehen, Mobilfunk) bestimmen unser Leben. Eine ganze Flotte von Satelliten beobachtet das Wetter und Veränderungen in der Umwelt.

Möglicherweise werden sich in Zukunft noch ganz andere Perspektiven durch die weitere Erforschung des Mondes und des Mars ergeben. Die natürlichen Ressourcen auf der Erde sind endlich, aber die Nachfrage

VI Vorwort zur 2. Auflage

durch weiteres Bevölkerungswachstum steigt kontinuierlich. Die Erschließung von Bodenschätzen z. B. auf dem Mars mag heute als technologisch schwierig und wirtschaftlich uninteressant erscheinen, aber in Zukunft ganz anders zu bewerten sein.

Dieses Buch zeichnet die Entwicklung der Raumfahrt, wie wir sie bis heute kennen, nach. Wegen der rasanten Entwicklung von Technologien und Projekten ist es notwendig geworden, bereits zwei Jahre nach der 1. eine 2. Auflage zu erstellen.

Die Autoren danken dem Springer-Verlag für die Möglichkeit, diese aufregende Geschichte erzählen zu dürfen. Besonderer Dank geht an die Mitglieder des Redaktionsteams von Caroline Strunz, insbesondere auch an Ramkumar Padmanaban, für die geduldige Unterstützung und die guten Hinweise während des Entstehungsprozesses.

Wachtberg-Niederbachem
Oktober 2022

Wolfgang W. Osterhage
Christian Gritzner

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Der Kosmos und unser Planetensystem	9
3	Von den Anfängen der Raketentechnik	29
4	Antriebe und Raketentechnik	49
5	Erdsatelliten	61
6	Erste Menschen im Weltraum	73
7	Bemannte Raumschiffe	87
8	Mondmissionen	107
9	Organisationen	133
10	Raumstationen	143

VIII	Inhaltsverzeichnis	
11	Missionen im Sonnensystem	163
12	Die Reise zum Mars	221
13	Der Blick in die Ferne	253
14	Blick nach vorn	275
	Appendix	283
	Stichwortverzeichnis	293



1

Einleitung

Zuerst kamen das Sehen und Staunen: der Himmel, die Sterne, die Sonne und der Mond – dann das Spekulieren und die Weltbilder – und die ersten exakten Beobachtungen im Rahmen des technisch Möglichen. Und irgendwann stellte sich die Sehnsucht danach ein, die fremden Welten da draußen besser kennenzulernen. Und wie kann man das „Besserkennenlernen“ am besten erreichen? – Indem man dorthin fährt und sich die Sache aus der Nähe anschaut. Die ersten Reisen fanden allerdings zunächst in der Fantasie und in Romanen statt. Schon Johannes Kepler, der große Weltharmoniker, schrieb – neben einem riesigen Konvolut von wissenschaftlichen Büchern und Artikeln – die Science-Fiction-Geschichte „Somnium seu opus posthumum Astronomiae lunaris“, veröffentlicht 1634 durch seinen Sohn Ludwig, über eine Reise zum Mond. Schon im Jahre 1610 hatte Kepler in seiner Stellungnahme „Dissertatio cum Sidereo“ zu Galileis Veröffentlichung „Sidereus Nuncius“ darüber

spekuliert, dass Mond und Jupiter bewohnte Himmelskörper seien und man eines Tages dorthin reisen würde, um das zu überprüfen.

Und so ging es weiter bis hin zu Jules Vernes *Reise zum Mond*. Je weiter jedoch die wissenschaftlichen Erkenntnisse den Weltraum und das Planetensystem zu entschlüsseln begannen, desto mehr traten auch Skeptiker auf den Plan. So behauptete noch 1835 Auguste Compte, dass es sinnlos sei, sich über die Zusammensetzung von Fixsternen Gedanken zu machen, da man ohnehin nie in der Lage sein würde, diese jemals zu verifizieren.

Schließlich waren es zwei Motivationen, die die Weltraumfahrt von der Theorie in die Praxis umsetzen halfen: militärische Überlegungen und der Pioniergeist einzelner Männer, die sich auch vor Fehlschlägen und öffentlicher Häme nicht scheuten.

Heute können wir sagen, dass der Traum von der Reise in den Weltraum und zu den Sternen zu einem großen Teil wahr geworden ist. In den 1950er- und bis in die 1960er-Jahre hinein war die Technologiebegeisterung bei vielen, besonders jungen Menschen noch ungebrochen. Man sprach abwechselnd vom Raketen- oder Atomzeitalter. Die Nachfrage nach Science-Fiction-Literatur wuchs (Issac Asimov, Stanislaw Lem, Hans Dominik, „Perry Rhodan“, „Meteor“, „Nick, der Weltraumfahrer“). In Zeitungen, Radio und später auch im Fernsehen wurden die Meilensteine der Weltraumfahrt im Wettlauf zwischen den USA und der UdSSR mit Begeisterung verfolgt: Sputnik I, Affen in Weltraumkapseln, Juri Gagarin, die erste Frau im Weltraum, der erste „Weltraumspaziergang“, die Mondlandung von Apollo 11 usw. Das Fernsehen brachte regelmäßig Sondersendungen, in denen Modelle von Raumfahrzeugen gezeigt wurden.

Ende der 1960er-Jahre kamen dann die ersten kritischen Stimmen. Angesichts der Nachrichten über

Hungerkatastrophen in Afrika (Biafra) stellten sie die Frage, ob man das Geld, das für die Raumfahrt, deren unmittelbare Vorteile für die Menschheit nicht offensichtlich waren, ausgegeben wurde, nicht besser in globale oder nationale soziale Projekte investieren sollte. Diese Frage stellt sich natürlich immer, wenn es um technologische Großprojekte geht. Sie kann nicht beantwortet werden, da man nicht weiß, was passiert wäre, wenn man umgekehrt gehandelt hätte. Es ist die Grundsatzfrage nach dem „Warum?“ von Wissenschaft und technischem Fortschritt überhaupt – auf allen Gebieten. Wenn es überhaupt eine Antwort darauf gibt, dann muss man sie in den Ergebnissen suchen.

Neben dem Kostenargument entwickelte sich in den folgenden Jahrzehnten eine zunehmende Technologieskepsis in Teilen der Bevölkerung, die bis heute anhält. Über die Ursachen soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Tatsache ist, dass damit einher auch das bis dahin rege Interesse an der Raumfahrt erkalte. Trotz mancher Budgetkürzungen in den nationalen Raumfahrtorganisationen gingen die Bemühungen von Wissenschaftlern und Technikern aber weiter.

Im letzten Jahrzehnt jedoch ist wiederum eine Zunahme des Interesses an der Raumfahrt zu verzeichnen. Projekte wie Rosetta und insbesondere die internationale Raumstation ISS, die zeitweise von dem Deutschen Alexander Gerst kommandiert wurde, stießen die Diskussion im positiven Sinne wieder an. Mittlerweile wurde sozusagen im Hintergrund eine weltraumbasierte Infrastruktur geschaffen, ohne die unser tägliches Leben nicht oder zumindest ganz anders funktionieren würde: Navigationssysteme (GPS) und Kommunikationssatelliten (Fernsehen, Mobilfunk) bestimmen unser Leben. Wo früher im mittleren Westen der USA ein Farmer am Rande seiner riesigen Felder durch eigene Inspektion

entscheiden musste, ob sein Getreide erntereif wäre, genügt ihm heute eine Nachricht im Radio oder über das Internet über den günstigsten Zeitpunkt nach Auswertung von Satellitenbildern. Eine ganze Armee von Satelliten beobachtet das Wetter und Veränderungen in der Umwelt. Die Frage nach dem Sinn der Raumfahrt ist damit wohl beantwortet – unabhängig von den Forschungen in der Schwerelosigkeit, die auf der ISS durchgeführt werden.

Möglicherweise werden sich in Zukunft noch ganz andere Perspektiven durch die weitere Erforschung des Mondes und des Mars ergeben. Die natürlichen Ressourcen auf der Erde sind endlich, aber die Nachfrage durch weiteres Bevölkerungswachstum steigt kontinuierlich. Die Erschließung von Bodenschätzen z. B. auf dem Mars mag heute als technologisch schwierig und wirtschaftlich uninteressant erscheinen, aber in Zukunft ganz anders zu bewerten sein. Niemand hat die Flut von Auswanderern und die Entstehung einer Nation mit über 300 Mio. Menschen (USA) vorhergesehen, als Amerika entdeckt wurde. Es braucht nicht einzutreffen, aber ein Außenposten auf dem Mars könnte eines Tages vielleicht einen ähnlichen Sog ausüben. Die Erde ist und war die Wiege der Menschheit mit all ihrer Intelligenz und ihrem Erfindungsreichtum. Vielleicht wird sie in Zukunft tatsächlich auch ein Ausgangspunkt für die Weiterverbreitung dieser Intelligenz über ihre engen Grenzen hinaus sein – vielleicht sogar notwendigerweise, wenn Ressourcen erschöpft und Lebensbedingungen weniger erträglich geworden sein werden.

Dieses Buch zeichnet die Entwicklung der Raumfahrt, wie wir sie bis heute kennen, nach. Teilweise folgt es dabei der historischen Entwicklung, andererseits sind bestimmte

Projekte thematisch zusammengefasst. Innerhalb der thematischen Kapitel wurde dann wieder die historische Reihenfolge beachtet.

Damit überhaupt eine Einschätzung der bisherig begrenzten Bemühungen zur Erforschung des Weltraumes möglich ist, wird zu Anfang der kosmische und planetarische Bezugsrahmen erläutert. Die Erforschung unseres Planetensystems erschöpft sich nicht nur in der Aufnahme des Status quo, sondern versucht immer auch, die Entstehungsgeschichte des Sonnensystems und damit auch unserer Erde zu entschlüsseln. Wir beginnen also mit der Klassifikation der großen Himmelskörper im Sonnensystem innerhalb der Milchstraße im großen weiten Kosmos.

Die spätere Erforschung des erdnahen und interplanetaren Raumes sowie die Installation von Teleskopen, die bis in die fernsten Winkel des Universums blicken, sind nur möglich geworden durch den Pioniergeist von Theoretikern und den Mut von Praktikern, die an ihre Ideen geglaubt haben. Dazu gehören Persönlichkeiten wie Konstantin Ziolkowski, Hermann Oberth, Robert Goddard und Wernher von Braun. Eng verbunden mit diesen Pionierleistungen ist die Entwicklung von Raketenantrieben als elementare Voraussetzung für den Sprung in den Weltraum überhaupt.

Nach diesen Grundlagen geht die Geschichte dann los mit Sputnik I und dem Kapitel über Satelliten und welche Rolle sie bis heute spielen. Streng genommen ist alles, was irgendwie die Erde umkreist, ein Satellit – auch die ISS und auch jedes Stückchen Weltraumschrott. Wir beschränken uns an dieser Stelle allerdings auf Raumsonden im erdnahen Orbit, die besondere wissenschaftliche und technische Aufgaben erfüllen, wenn auch mit begrenzter Lebensdauer.

Der nächste entscheidende Schritt für alles Weitere war der bemannte Raumflug mit Juri Gagarin als Vorreiter, gefolgt von Mehrfachumrundungen der Erde, Parallelflügen mit mehreren Kapseln, der ersten Frau im Weltraum, Ausstieg eines Kosmonauten aus seiner Kapsel und manuellen Rendezvousmanövern. In einem gesonderten Kapitel werden diverse Typen von Raumfahrzeugen, wie sie von unterschiedlichen Nationen entwickelt wurden, bis hin zum Space Shuttle und privater Raketentechnologie (Crew Dragon) vorgestellt.

Es folgt dann ein Kapitel über die Erforschung des Mondes – zuerst durch unbemannte Sonden und dann das erfolgreiche APOLLO-Programm durch die NASA.

All die Erfolge der Raumfahrt wären nicht denkbar ohne die nationalen und internationalen Weltraumorganisationen, die diese Projekte initialisiert und gesteuert haben, wenn auch in letzter Zeit verstärkt private Unternehmen in dieses Geschäft eingestiegen sind. Es folgt also ein Kapitel über die wichtigsten Raumfahrtbehörden, zu denen in neuerer Zeit auch Institutionen aus Schwellenländern gestoßen sind.

Große internationale Kooperationen werden am deutlichsten sichtbar beim Aufbau und der Nutzung von quasipermanenten Raumstationen, denen ebenfalls ein eigenes Kapitel gewidmet ist.

Neben der Erforschung des Mondes erwachte schon früh das Interesse, die zunächst fremden Welten anderer Planeten durch unbemannte Raumsonden zu erkunden. Alle Planeten des Sonnensystems und deren größte Monde bis hin zu Asteroiden und Kometen sind mit immer wieder verbesserten Sonden erforscht worden. Dabei erhielt der Mars bisher die höchste Aufmerksamkeit. Grund dafür sind u. a. konkrete Pläne, diesen Planeten in naher Zukunft durch Menschen besuchen zu lassen. Deshalb ist ihm in diesem Zusammenhang auch ein eigenes Kapitel gewidmet.

Neben Missionen zu individuellen Planeten ist die Menschheit dazu übergegangen, Sonden innerhalb des Sonnensystems auf unterschiedlichen Orbits zu parken, um astronomische Beobachtungen durchzuführen. Dazu gehören u. a. Teleskope, die Beobachtungen in verschiedenen Spektralbereichen durchführen, und z. B. Sonden, die nach Exoplaneten suchen.

Kein Geschichtsbuch ohne Ausblick: Weltraumfahrten durch Menschen und Erkundungen des Raumes gehen weiter. Deshalb erfolgt am Schluss des Buches eine kurze Bestandsaufnahme aktueller Zukunftsprojekte. Hierbei handelt es sich natürlich um ein schwimmendes Ziel, denn während diese Zeilen geschrieben und mit Zeitverzug umgesetzt werden, schreitet die Forschung voran, und hinter dem Horizont warten neue, noch ungeahnte Entwicklungen.



2

Der Kosmos und unser Planetensystem

In diesem Kapitel geben wir eine kurze Einführung in dasjenige Umfeld, welches ja das eigentliche Ziel aller wissenschaftlichen und technischen Anstrengungen ist, es zu erforschen und zu bereisen: das All, den Kosmos, den Weltraum. Dabei müssen wir uns allerdings zunächst bescheiden. Wir bereisen ja noch nicht den ganz großen Kosmos. Stattdessen sind die bisherigen Anstrengungen der Menschheit im Vergleich zu den kosmischen Dimensionen im Grunde genommen ja nicht mehr als kleine Sprünge statt weiter Flüge. Dennoch ist es sinnvoll, sich über Entstehung und Beschaffenheit des Weltraums Gedanken zu machen, weil wir ja darin eingebettet sind und die Planeten, die wir bereisen wollen, Ergebnis dieser Entstehungsgeschichte sind.

Es wird allerdings an dieser Stelle auf eine ausführliche Darstellung kosmologischer Theorien oder eine Physik der Sterne und Planeten verzichtet. Das wäre Gegenstand eines eigenen Buches. Es wird kurz auf das

kosmologische Standardmodell eingegangen, gefolgt von einem Abschnitt, der ein Gespür für kosmische Entfernungen vermittelt, danach wird auf die Gestalt unserer Milchstraße und den neusten Stand der Kenntnisse über unser Planetensystem und dessen Entstehung eingegangen.

2.1 Entstehung des Kosmos

Immer schon, seit der Mensch sein Habitat verstehen wollte, machte er sich Gedanken über die Wirklichkeit seiner Umgebung. Primäres Ziel war es wohl, diese Umgebung so zu beschreiben, wie sie tatsächlich wäre. Das ist ihm bis heute nicht vollständig gelungen. Er bleibt verhaftet in Bildern oder – in bester Näherung – in Modellen. Lassen Sie uns nun einen kurzen Abriss dieser Modellgeschichte geben, bevor wir uns dem heutigen Standardmodell der Kosmologie zuwenden.

Sehr früh schon treffen wir auf eine alte indische Kosmologie. Sie besagt, dass 4.320.000.000 Menschenjahre einem einzigen Tag des Brahma entsprechen. An diesem Tag durchläuft der Kosmos seinen ganzen Zyklus – immer wieder: Jedes einzelne Atom löst sich im ursprünglichen Wasser der Ewigkeit auf, aus dem alles einmal entstanden ist.

Später schrieb Plato, dass die Welt auf eine Art geschaffen wurde, die es dem Verstand ermöglicht, sie zu begreifen. Diese Welt verharrt auf immer im selben Zustand. Sie ist eine lebendige Kreatur mit Seele und Verstand. Sonne, Mond und einige Sterne entstanden, damit die Zeit gemessen werden konnte.

Auch Aristoteles konstatierte, dass es seit Menschengedenken keinen Beweis und keinen Bericht darüber gebe, dass sich die Welt je geändert hätte. Er setzte voraus, dass die Erde der Mittelpunkt der Welt sei und eine Kugel und

um sie herum die ganze Welt in Form von Sphären. Zu seiner Zeit wurde der Erdumfang mit einer Genauigkeit von 85 % des heutigen Wertes berechnet. Auf diesen Wert bezogen sich noch die Berechnungen von Kolumbus für seine Entdeckungsreisen.

Der muslimische Philosoph Avicenna, der von 980–1037 lebte, konstatierte, dass Zeit ein Maß für Bewegung ist und Raum etwas, das von Materie abstrahiert werden müsse und nur im menschlichen Bewusstsein existiere.

Nikolaus Cusanus (1401–1464) schließlich stellte fest, dass sämtliche Teile des Himmels, inklusive der Erde, in Bewegung seien. Und nun kommen wir schon sehr nahe an die Zeit von Kopernikus, der die Sonne ins Zentrum rückte. Bevor Kepler 200 Jahre danach die elliptischen Bewegungen der Planeten berechnete und das heliozentrische Modell von Galileo Galilei bestätigt wurde, theoretisierte Giordano Bruno, dass das Universum voll sein müsse von unzähligen Sonnen und unzähligen Erden.

Es folgte nun eine Sukzession von Forschern und Philosophen, unter ihnen Huygens, Halley, Wright und Kant, die sich mit der Zahl von Fixsternen, der Interpretation der Milchstraße und ihrer Orientierung und dem Phänomen der Galaxien auseinandersetzten. Und noch 1835 spekulierte Auguste Comte, dass es sinnlos sei, sich über die Zusammensetzung von Fixsternen Gedanken zu machen, da man ohnehin nicht in der Lage sein würde, diese zu verifizieren.

Grundlage moderner kosmologischer Modelle sind die zugehörigen astronomischen Beobachtungen. Dazu gehören: Das Universum ist homogen und isotrop über Entfernungen von 10^8 Lichtjahren und weiter. D. h., Sterne, Galaxien und Galaxiencluster sind gleichmäßig verteilt und bewegen sich in Größenordnungen von Entfernungen von einem, 10^6 und etwa 3×10^7 Lichtjahren.

Nimmt man aber den Helikopterblick ein, so erkennt man kaum Unterschiede innerhalb eines Volumenausschnitts von 10^8 Lichtjahren Seitenlänge, wo immer man dieses Volumen ausschneidet (Abb. 2.1).

Das Universum dehnt sich aus. Diese Aussage scheint zunächst paradox. Wenn alles expandiert – die Entfernung zwischen Galaxienclustern, zwischen Sonne und Erde, die Länge eines Messstabes oder gar das Atom –, wie kann man dann überhaupt von Expansion reden? Aber natürlich expandieren weder das Atom noch der Messstab, lediglich die enormen Entfernungen zwischen Galaxien

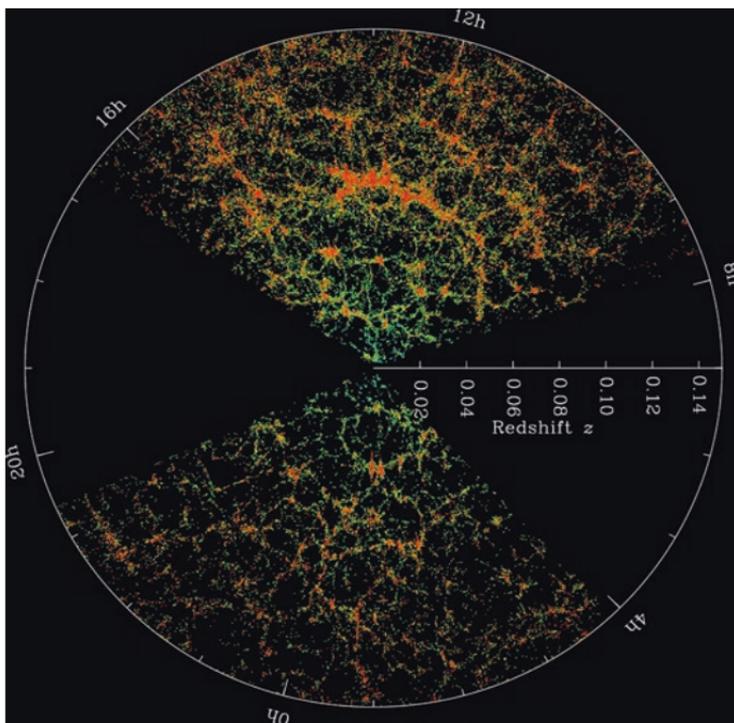


Abb. 2.1 SDSS-Karte des Universums; jeder Punkt bedeutet eine Galaxie. (© M. Blanton, SDSS)

Tab. 2.1 Eckdaten des Kosmos

Kosmische Größe	Heute akzeptierter Wert
Maximaler Expansionsradius	18,94 (MP) 10^9 Lichtjahre
Zeit bis zur maximalen Ausdehnung	29,76 (MP) 10^9 Jahre
Alter	1,4 (MP) 10^{10} Jahre
Heutige Dichte	14,8 (MP) 10^{-30} [g cm ⁻³]
Heutiges Volumen	38,3 (MP) 10^{84} [cm ³]
Dichte am Maximum	5 (MP) 10^{-30} [g cm ⁻³]
Maximales Volumen	114 (MP) 10^{84} [cm ³]
Gesamtmasse	5,68 (MP) 10^{56} [g]
Anzahl Baryonen	3,39 (MP) 10^{80}

z. B. unterliegen diesem Prinzip. Das kann man sich durch ein Gedankenexperiment vergegenwärtigen:

Klebt man auf einen Ballon jede Menge 1-Cent-Stücke und bläst ihn dann auf, so wird man feststellen, dass sich die Abstände zwischen den 1-Cent-Stücken vergrößern, die Größe der jeweiligen 1-Cent-Stücke aber bleibt gleich. Tab. 2.1 listet die wichtigsten astronomischen Daten, die modernen kosmologischen Modellen zugrunde liegen, auf:

2.2 Das Standardmodell

Das „standard hot big bang model“ basiert auf der Tatsache, dass die Gravitation die gesamte Entwicklung des Universums dominiert, die beobachteten Details jedoch werden von den Gesetzen der Thermodynamik, der Hydrodynamik, der Atomphysik, der Kernphysik und der Hochenergiephysik bestimmt. Eine elegante Variante dieses Standardmodells ist das Lambda-CDM-Modell. Lambda ist die kosmologische Konstante und CDM steht für Cold Dark Matter. Dieses Modell benötigt nur sechs Parameter, um die Entstehung des Universums zu beschreiben. Die Abb. 2.2 illustriert Entstehung und Werdegang unseres Universums.

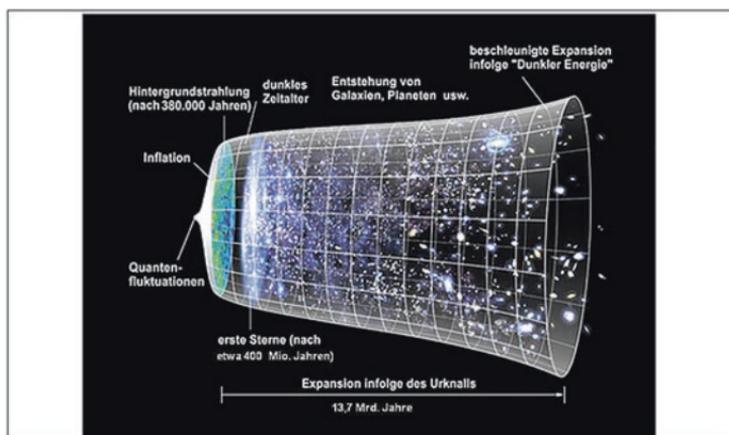


Abb. 2.2 Werdegang des Universums nach der Urknall-Theorie. (© NASA)

Es wird davon ausgegangen, dass während der ersten Sekunde nach dem Anfang die Temperatur so hoch war, dass ein vollständiges thermodynamisches Gleichgewicht herrschte zwischen Photonen, Neutrinos, Elektronen, Positronen, Neutronen, Protonen und diversen Hyperonen und Mesonen und möglicherweise Gravitonen sowie hypothetischen Teilchen, die man noch nicht kennt – darin enthalten auch die dunkle Materie.

Nach einigen Sekunden jedoch fiel die Temperatur durch die Expansion auf etwa 10^{10} K, und die Dichte betrug etwa 10^5 g/cm³. Teilchen und Antiteilchen hatten sich ausgelöscht, Hyperonen und Mesonen waren zerfallen, und Neutrinos und Gravitonen hatten sich von der Materie entkoppelt. Das Universum bestand jetzt aus freien Neutrinos und vielleicht Gravitonen sowie elektromagnetischen Wellen und Materie. Gravitonen sind die Feldquanten von Gravitationswellen.

In der nachfolgenden Periode zwischen 2 und etwa 1000 s fand eine erste ursprüngliche Bildung von Elementen statt. Vorher wurden solche Gebilde durch hochenergetische Photonen wieder zerstört. Diese Elemente waren im Wesentlichen α -Teilchen (He-4), Spuren von Deuterium, He-3 und Li, und machten 25 % aus, der Rest waren Wasserstoffkerne (Protonen). Alle schwereren Elemente entstanden später in Supernova-Explosionen bzw. Fusionsprozessen in Sternen.

Zwischen 1000 s und 10^5 Jahren danach wurde das thermische Gleichgewicht gehalten durch einen kontinuierlichen Transfer von Strahlung in Materie sowie permanenter Ionisationsprozesse und Atom-bildung. Gegen Ende fiel die Temperatur auf wenige tausend Grad. Das Universum wurde nun von Materie statt von Strahlung dominiert. Zu jenem Zeitpunkt, etwa 380.000 Jahre nach dem Urknall, als der Wasserstoff neutral wurde, wurde das All durchsichtig. Photonen waren nicht mehr so energiereich, um z. B. Wasserstoffatome permanent zu ionisieren. Materie und Strahlung entkoppelten und Strahlung breitete sich ungehindert aus. Wegen der weiteren Expansion des Universums vergrößerte sich die Wellenlänge der Strahlung, sodass ihre Reste heute im Mikrowellenbereich beobachtet werden können. Sie sind bekannt als CMB (Cosmic Microwave Background).

Nachdem der Photonendruck verschwunden war, konnte die Kondensation der Materie in Sterne und Galaxien beginnen: zwischen 10^8 und 10^9 Jahre danach. Unklarheit herrscht nach wie vor darüber, was die Ursache für jene kleinen Störungen war, die letztendlich die perfekte Isotropie des Anfangs verletzte, damit solche differenzierten Strukturen überhaupt entstehen konnten.

2.3 Kosmische Entfernungen

Um eine Vorstellung zu bekommen, wie klein die „Sprünge“ ins Weltall sind, die unter die Kategorie „Raumfahrt“ fallen, sind in Tab. 2.2 einige kosmische Entfernungen aufgelistet. Die Entfernungsangaben ver-hundertfachen sich dabei in jeder Zeile mit Ausnahme des Sprungs vom Saturn zu den nächsten Fixsternen (Faktor 10^4). Kosmische Entfernungen erscheinen uns deshalb sehr bald „astronomisch“ hoch, weil wir historisch als primären Maßstab unsere eigene Körpergröße genommen haben bzw. noch nehmen. Aber gerade diese Tatsache relativiert letzten Endes auch unsere Bemühungen der technologisch großartigen Unternehmungen, die wir unter dem Sammelbegriff „Raumfahrt“ kennen: Es sind große Sprünge, gemessen an den Dimensionen, mit denen wir sonst in unserem Alltag umgehen, aber doch recht kleine, gemessen am ganz großen Weltraum selbst.

2.4 Milchstraße

Wenn man sich – aus den ganz großen Weiten des Kosmos kommend – der Erde nähert, ist der nächste Zwischenstopp die Milchstraße. Sie hat einen Durchmesser von

Tab. 2.2 Mittlere kosmische Entfernungen in [m]

Bezugsgröße	Entfernung
Durchmesser der Erde	10^7
Durchmesser der Sonne	10^9
Entfernung des Saturn	10^{11}
Nächste Fixsterne	10^{15}
Entfernung offener Sternhaufen	10^{17}
Entfernung von Milchstraßenwolken	10^{19}
Entfernung von Kugelhaufen	10^{21}
Entfernung von Galaxien	10^{23}
Entfernung von Quasaren	10^{25}

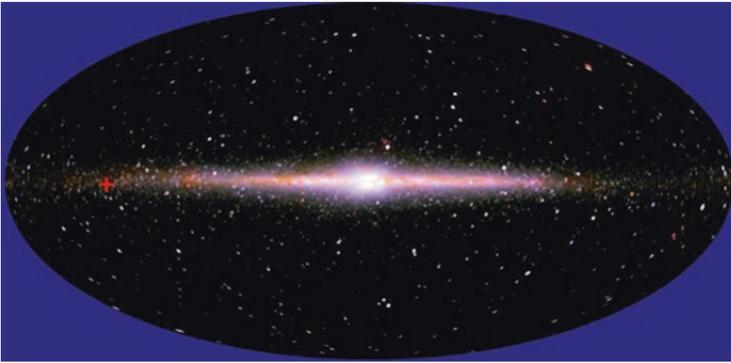


Abb. 2.3 Milchstraße mit Sonnenposition. (© NASA, GSFC, COBE)

170.000–200.000 LJ und ist zwischen 3000 und 16.000 LJ dick. In ihr wohnen schätzungsweise 100–300 Mrd. Sterne – die Sonne eingeschlossen. Abb. 2.3 zeigt eine Darstellung des Milchstraßensystems. Das rote Kreuz gibt die ungefähre Position des Sonnensystems an.

2.5 Sonnensystem

Die Frage, wie unser Sonnensystem entstanden ist, ist immer noch nicht endgültig beantwortet. Das wird schon daran ersichtlich, dass weiterhin Sonden zu anderen Planeten geschickt werden, um Hinweise auf die Entstehungsgeschichte zu erhalten. Spekuliert über die Entstehung wurde allerdings schon in frühen Zeiten. Bereits Immanuel Kant entwickelte im Jahre 1755 eine Theorie dazu, genannt Meteoritenhypothese. Er stellte sich eine riesige Wolke aus Teilchen in ungeordneter Bewegung vor. Die Wolke selbst hätte sich in einer Drehbewegung befunden. Durch die Stöße untereinander hätten die Teilchen Bewegungsenergie abgegeben und damit letztendlich zum Zentrum dieser Wolke migriert, woraus sich

die Sonne gebildet hätte. Weiterhin hätten sich an den Rändern der Wolke Materieverdichtungen ergeben, aus denen dann die Planeten entstanden wären. Dieses Modell wirft jedoch Fragen auf: Weshalb kommt es zu einem Verdichtungsprozess an den Rändern durch Zusammenstöße? Warum ist die Masseverteilung so, dass die Sonne den Hauptanteil trägt, aber der Drehimpuls fast ausschließlich von den Planeten getragen wird?

Trotz aller Fragen ist die Grundidee Kants auch in modernen Erklärungsversuchen geblieben. Der allgemeine Konsens heute ist, dass unser Planetensystem aus einer Urwolke entstanden ist. Gerard Peter Kuiper, ein niederländisch-amerikanischer Astronom, entwickelte die Theorie weiter. Er nahm an, dass die Urwolke, aus der später die Sonne entstand, sich zu einer Dicke von 3 Mio. km abgeflacht hätte.

Auch Carl Friedrich von Weizsäcker beschäftigte sich im Jahre 1944 mit einer Theorie zur Entstehung des Planetensystems. Seine Vermutung war, dass sich innerhalb der Urwolke Wirbel bildeten, die sich ringartig um das Zentrum – die spätere Sonne – gruppierten. In der weiteren Entwicklung verdichtete sich die Materie in diesen Wirbelzonen zu den späteren Planeten. Es wird angenommen, dass diese Protoplaneten erheblich größer und massereicher gewesen sind als heute.

Nach heutigen Erkenntnissen kann man sich die Entstehung des Sonnensystems etwa folgendermaßen vorstellen:

Vor ungefähr 4,6 Mrd. Jahren befand sich anstelle unseres Sonnensystems die unstrittige Urwolke, bestehend aus einzelnen Molekülen: zu 99 % Wasserstoff und Helium mit eingestreuten Staubteilchen, einige schwerere Elemente, sonst hauptsächlich Wasserstoff- und Kohlenstoffverbindungen. Infolge der Gravitation verdichteten

sich Teile dieser Wolke. Der Anstoß dazu kann von einer Supernova in der Nachbarschaft gekommen sein.

Unser Sonnensystem bildete sich aus dem Teil der Urwolke, der als Sonnennebel bezeichnet wird. Bei dessen Kontraktion wurde der Drehimpuls dieser Staubscheibe erhalten, und die bereits vorhandene Rotation beschleunigte sich durch den sog. Pirouetteneffekt. Die Fliehkräfte führten zur Abflachung der Wolke in eine Akkretionsscheibe. Der größte Teil der vorhandenen Materie migrierte ins Zentrum, um dort über das Zwischenstadium eines Protosterns schließlich zu unserer Sonne zu werden.

2.6 Entstehung der Planeten

Nach einer gewissen Zeit wandelte sich die Akkretionsscheibe zu einer protoplanetaren. Durch Verklumpung entstanden sog. Planetesimale: Staubteilchen verdichteten sich zu immer größeren Gebilden, die durch Gravitation letztendlich zu Planeten anwuchsen. Die schweren Gebilde beeinflussten wiederum die Entstehung leichterer Brocken usw. Wichtig bei der Entstehung der Planeten war natürlich auch ihr Abstand zur Sonne. Während die sonnennahen Planeten ihre Gase verloren, behielten die Planeten in den entfernteren, kälteren Regionen ihre leichtflüchtigen Materieanteile. Man unterscheidet deshalb erdähnliche und jupiterähnliche Planeten.

Erdähnliche Planeten in unserem Sonnensystem haben einen kleinen Sonnenabstand (58–228 Mio. km). Ihr Durchmesser ist ebenfalls klein (4840–12.757 km). Ihre Masse beträgt 0,01–1 der Erdmasse, wogegen ihre Dichte groß ist: 3,9–5,6 g/m³. Sie besitzen eine schwache bis mäßige Atmosphäre, bestehend aus Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid und einigen Edelgasen. Die Rotationszeiten

sind lang (24 h–243 Tage). Sie besitzen gar keine oder höchstens zwei Monde. Ihr innerer Aufbau besteht aus Gestein und Metallen.

Bei den jupiterähnlichen Planeten sieht es anders aus. Ihr Sonnenabstand ist groß (778–4498 Mio. km), ebenso ihr Durchmesser (44.600–142.800 km) sowie ihre Masse (17–318 Erdmassen), während ihre Dichte klein ist (0,7–2,3 g/cm³). Ihre Atmosphäre beinhaltet starke Bestandteile von Wasserstoff, Helium, Methan und Ammoniak. Sie besitzen viele Monde. Ihr innerer Aufbau besteht aus gefrorenen Gasen. Vielleicht gibt es einen inneren Kern aus Metall oder Gestein.

Weitere Unterscheidungsmerkmale bei unseren Planeten finden sich in Tab. 1 im Appendix.

Die gängige Entstehungstheorie des Sonnensystems lässt allerdings einige Fragen unbeantwortet:

- Das Drehimpulsproblem: Warum besitzt die Sonne, die ja fast 99,9 % der Masse hält, nur 0,5 % des Gesamtdrehimpulses?
- Wie kam es zu der Neigung der Äquatorebene der Sonne gegenüber der mittleren Bahnebene der Planeten (7 %)?
- Hat die Theorie Allgemeingültigkeit auch für andere Sonnensysteme (die Beobachtungen von Exoplaneten haben zur Entdeckung von Abweichungen dieser und anderer Parameter geführt, z. B. Gegenläufigkeit von Planetenbahnen im selben Sonnensystem, extreme Bahnneigungen etc.)?

2.7 Jupiter

Auf Abb. 2.4 sind die Wolkenstrukturen des Jupiters deutlich erkennbar. Sie ändern sich jedoch ständig. Auffallend sind die beiden Bänder in Äquatornähe. Und besonders

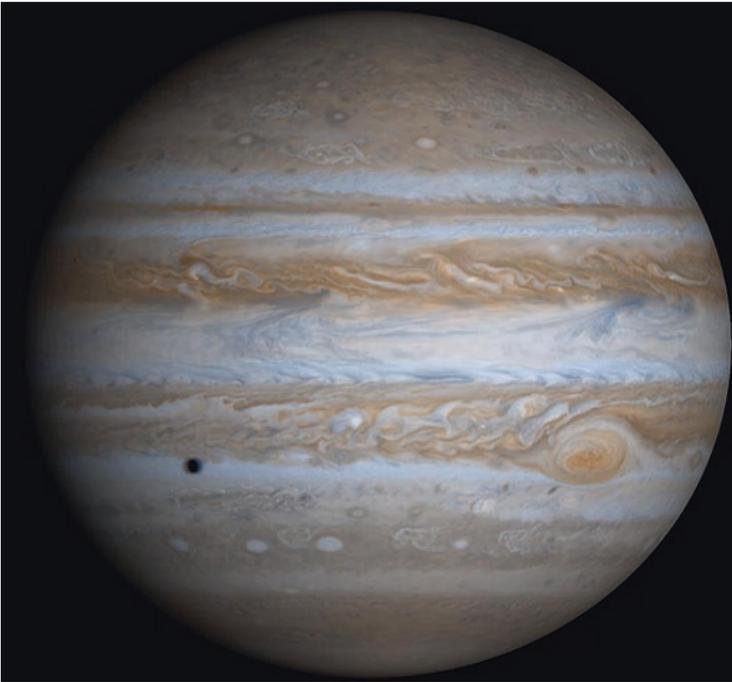


Abb. 2.4 Jupiter, fotografiert von Cassini-Huygens. (© NASA)

auffällig ist der berühmte rote Fleck. Seine Position bezogen auf den Äquator ist ziemlich stabil, während er sich aber in west-östlicher Richtung bewegt.

Jupiter besitzt eine Unmenge von Trabanten. Die vier größten wurden bekanntlich von Galileo Galilei im Jahre 1610 entdeckt und sind nach ihm als Galileische Monde benannt (Ganymed, Kallisto, Io und Europa). Gegenwärtig (2020) sind mittlerweile 79 Monde registriert worden, die meisten davon allerdings sehr klein mit teilweise sehr exzentrischen Bahnen mit starker Neigung zur Äquatorebene des Planeten.

2.8 Saturn

Saturn ist der zweitgrößte Planet unseres Sonnensystems und ist dem Jupiter sehr ähnlich, vgl. hierzu Abb. 2.5. Das betrifft insbesondere auf seine Atmosphäre zu, in der es allerdings weniger turbulent zugeht. Die gelegentlich sichtbaren hellen Flecken führt man auf Eruptionen in tieferen Schichten zurück. Das signifikanteste Merkmal dieses Planeten sind seine Ringe in der Äquatorebene. Sie wurden als solche zuerst von Christian Huygens entdeckt. Bis zu den jetzigen verfeinerten Beobachtungsmethoden wusste man, dass das Ringsystem mindestens drei unterschiedliche Zonen besitzt, heute kennt man mehr als 100.000 einzelne Ringe, die aus größeren Brocken bis hin zu sehr kleinen Staubteilchen bestehen. Die Durchmesser der Ringe variieren zwischen 134.000 und 960.000 km. Die Dicke des Ringsystems wird auf höchstens 15 km geschätzt mit einer Gesamtmasse, die etwa $1/27.000$ der Saturnmasse beträgt. Mittlerweile kennt man 62 Monde, die um den Saturn kreisen und sich untereinander und das Ringsystem beeinflussen. Der bekannteste unter ihnen ist Titan mit einem Durchmesser von ca. 5000 km.

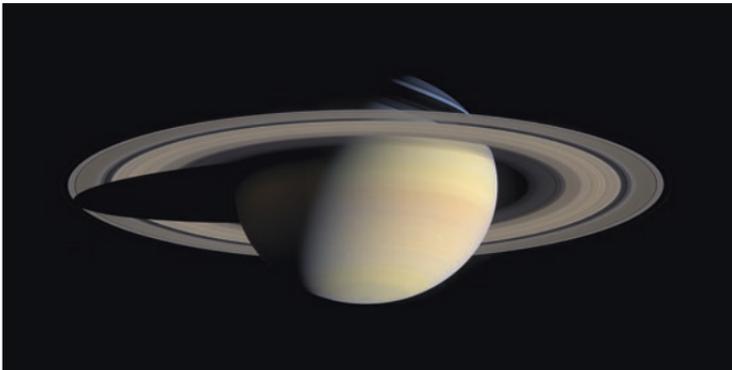


Abb. 2.5 Saturn, fotografiert von Cassini-Huygens. (© NASA)