

Mathias Scholz

Astrobiologie



Springer Spektrum

Astrobiologie

Mathias Scholz

Astrobiologie

Mathias Scholz
Zittau
Sachsen
Deutschland

ISBN 978-3-662-47036-7 ISBN 978-3-662-47037-4 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-47037-4

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

Springer Spektrum
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

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 Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

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.

Planung: Margit Maly

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Berlin Heidelberg ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
(www.springer.com)

Für Sylvia und Jürgen

Vorwort

Ein populärwissenschaftlicher Vortrag zum Thema „Leben im All“ oder, noch besser, über die „Suche nach außerirdischen Zivilisationen“, ist immer ein guter Garant dafür, dass reichlich interessierte Zuhörer im Auditorium erscheinen. Die Frage, ob es irgendwo weit draußen im Weltall so etwas wie eine zweite Erde gibt, ist offensichtlich eine Frage, die viele Menschen – und darunter nicht nur Wissenschaftler – umtreibt. Vorschub leisten dafür Fernsehserien wie die kultische Star Trek – Saga, aber auch die in großer Zahl erhältlichen pseudowissenschaftlichen Bücher wie beispielsweise diejenigen eines Erich von Däniken, die ohne Zweifel bei dem nicht auf dem Stand der Forschung stehenden Leser eine eigene Faszination auslösen können, gegen die sich nicht immer leicht argumentativ ankämpfen lässt. Und dabei muss man es ganz klar sagen: Die Wissenschaft hat bis heute noch keinen einzigen Beweis dafür gefunden, dass es irgendwo außerhalb der Erde „Leben“ gibt. Auch die Frage, auf welche Weise das „Leben“ auf der Erde einst entstanden ist, gehört immer noch zu den großen Fragestellungen, auf die eine befriedigende Antwort weiterhin aussteht. Fortwährend detailliertere Erkenntnisse darüber, wie irdisches Leben im Detail „funktioniert“, haben jedoch immer mehr die Auffassung bestärkt, dass die Entstehung des Lebens aus anorganischer Materie (Abiogenese) ein naturgesetzlich determinierter Vorgang ist, der sich damit zumindest prinzipiell aufklären lässt. Und was auf der Erde möglich war, sollte auch auf irgendwelchen der vielen anderen Milliarden „erdähnlichen“ Planeten, die man allein in unserer Milchstraße vermutet, möglich gewesen sein.

Die Frage nach der Entstehung, der Entwicklung und der Verbreitung von „Leben“ im Weltall ist natürlich ein Forschungsgegenstand, der nicht allein von den Biologen abgedeckt werden kann. Es handelt sich dabei vielmehr um den Prototyp einer interdisziplinären Wissenschaft, für die sich mittlerweile der Begriff der „Astrobiologie“ etabliert hat und von der einige herausragende Aspekte Gegenstand dieses Buches sind. Die Interdisziplinarität der Astrobiologie zeigt sich insbesondere darin, dass hier Biologen, Chemiker, Physiker, Vertreter der Geowissenschaften und nicht zuletzt Astronomen und Astrophysiker eng zusammenarbeiten, um das Phänomen „Leben“ im kosmischen Kontext zu erforschen und letztendlich zu verstehen. Neben dem eigentlichen Gegenstand macht gerade diese Interdisziplinarität das eigentliche Faszinosum dieser noch recht jungen Wissenschaftsdisziplin aus. Die Lebenswissenschaften (Biologie, Biochemie) liefern dabei wichtige Beiträge

über die Funktionsweise lebender Systeme, deren Entstehung und Evolution sowie über die chemisch-physikalischen Rahmenbedingungen, unter denen es zu existieren vermag. Astronomen und Astrophysiker dagegen erforschen bzw. suchen nach Örtlichkeiten im Universum (insbesondere Exoplaneten), an denen überall „Leben“ möglich erscheint und entwickeln Strategien, wie man es in naher oder fernerer Zukunft vielleicht sogar einmal anhand von „Biomarkern“ detektieren kann. Weitere „astronomische“ Themen betreffen die Beobachtung und die theoretische Erklärung der Bildung von mehr oder weniger komplexen (organischen) Molekülen in kalten interstellaren Gas- und Staubwolken, von denen einige als wichtige „Ausgangsstoffe“ für die Entstehung lebender Materie gelten. Sie können z. B. eingeschlossen in kometarischer Materie auf einen geeigneten Planeten gelangen und dort zusammen mit bereits vorhandenen oder anderweitig synthetisierten Stoffen die materiellen Voraussetzungen für eine chemische Evolution (Abiogenese) schaffen, an deren Ende dann die ersten Uroorganismen stehen. An der Schnittstelle zwischen Astronomie und den Erdwissenschaften „Geologie“ und „Geochemie“ steht schließlich die Planetologie, wobei es den Astrobiologen insbesondere der Planet Mars sowie einige der größeren Eismonde des äußeren Sonnensystems angetan haben, in deren Inneren man „subglaziale“ Ozeane vermutet. Denn das sind die Orte, wo es zumindest eine gewisse Wahrscheinlichkeit dafür gibt, in unserem Sonnensystem Lebensspuren außerhalb der Erde zu finden. Und diese Orte sind prinzipiell mit Raumsonden erreichbar, was bekanntlich bei Exoplaneten nicht der Fall ist.

Das Ziel des vorliegenden Buches ist es – und zwar im Sinne eines interdisziplinären Ansatzes – einen Überblick über die wichtigsten Themenschwerpunkte¹ der Astrobiologie zu geben, auf deren Grundlage ein weitergehendes Studium entsprechender Fachliteratur angeregt und ermöglicht wird. Dazu sind zwar gewisse Grundkenntnisse der angesprochenen Teildisziplinen von Nutzen, die sich aber bei entsprechendem Interesse leicht erwerben lassen. In diesem Zusammenhang sei besonders auf die Sammlung von diversen Vorlesungen zum Thema Zellbiologie, Geologie und Astronomie hingewiesen, die im Internet über TIMMS (<http://timms.uni-tuebingen.de>, Tübinger Multimedia Server) in Form von Videostreams jedermann zugänglich sind.

Zum Abschluss möchte ich mich noch bei Frau Margit Maly und Frau Stefanie Adam vom Verlag Springer Spektrum für die Betreuung dieses Buchprojekts sowie bei Frau Tatjana Strasser für die sorgfältige Korrektur des Manuskriptes bedanken.

Ostern 2015

Mathias Scholz
Zittau

¹ mit Ausnahme der Exoplanetenforschung, da darüber bereits ein entsprechendes Lehrbuch vom Autor erschienen ist (Scholz 2014).

Inhaltsverzeichnis

1 Was ist „Astrobiologie“?	1
2 Was ist und wie funktioniert „Leben“?	5
2.1 Grundlegende Eigenschaften lebender molekularer Systeme	6
2.2 Basiselemente des Lebens	22
2.3 Wasser als universelles Lösungsmittel	33
2.4 Energiequellen des Lebens	51
2.5 Moleküle des Lebens	80
2.6 Information und Leben	93
2.7 Die minimalistische Zelle	94
2.8 Selbstorganisation und Evolution	110
2.9 Grenzen des Lebens	120
3 Wie entsteht Leben? – das Rätsel der Abiogenese	135
3.1 Das Paradigma der „Ursuppe“ und ihre Zutaten	138
3.2 Astrochemie – Moleküle im All	139
3.3 Das Miller-Urey-Experiment	236
3.4 Hydrothermale Quellen und organische Moleküle	243
3.5 Der Planet Erde im Hadaikum und frühen Archaikum	246
3.6 Abiogenese	290
4 Kosmische Voraussetzungen für Leben – die Habitabilität ferner Welten	329
4.1 Der Begriff der Habitabilität	333
4.2 Habitable Zonen	347
4.3 Habitabilität und kosmische Katastrophen	371
5 Leben im Sonnensystem und darüber hinaus	419
5.1 Mögliche Nischen des Lebens im Sonnensystem	421
5.2 Habitable extrasolare Planeten	494
6 SETI – die Suche nach außerirdischen Zivilisationen	505
Literatur	517
Sachverzeichnis	535

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme von drei <i>Nanoarchaeum equitans</i> , die an einem Bakterium der Art <i>Ignicoccus hospitalis</i> angedockt haben. <i>CM</i> ist die Zytoplasmamembran, <i>OM</i> die äußere Membran, <i>Pp</i> bezeichnet das die Bakterienzelle ausfüllende Periplasma und <i>PV</i> periplasmatische Vesikel. Die weiße Linie gibt die Länge von 1 nm an (Jahn et al. 2008)	10
Abb. 2.2	Elementhäufigkeit im Sonnensystem	24
Abb. 2.3	Dichteanomalie des Wassers	38
Abb. 2.4	Spezifische Wärmekapazität von Wasser bei einem Druck von 100 kPa im Temperaturbereich zwischen 0 und 100 °C	39
Abb. 2.5	Verknüpfung zweier Aminosäuren über eine Peptidbindung zu einem Dipeptid unter Freisetzung eines Wassermoleküls	44
Abb. 2.6	Zustandsdiagramm von Wasser	46
Abb. 2.7	Weißer Methanwolken über den großen Kohlenwasserstoffseen im Bereich des Nordpols des Saturnmondes Titan, aufgenommen von der Raumsonde Cassini	50
Abb. 2.8	Strukturformel von Adenosintriphosphat (ATP)	63
Abb. 2.9	Die drei Phasen des Calvin-Zyklus	66
Abb. 2.10	Zweistufige Lichtreaktion der Photosynthese	68
Abb. 2.11	Vereinfachte Darstellung des Citratzyklus. Die im Zyklus auftretenden Reduktionsäquivalente sind in blauer, das als Nebenprodukt freigesetzte Kohlendioxid in grüner und das GTP in roter Schrift dargestellt	73
Abb. 2.12	Bändererz der Moories Group im Barberton-Grünsteingürtel, Südafrika (3,15 Mrd. Jahre alt)	76
Abb. 2.13	Entwicklung des Sauerstoffpartialdrucks in der Erdatmosphäre und der Sauerstoffkonzentration in den oberen Schichten der Ozeane und der Tiefsee	78

Abb. 2.14	2,1 Mrd. Jahre alte Gabonionta aus einem Tonschiefer aus der Nähe von Franceville in Gabun. Es handelt sich dabei um die ältesten Metabionta (Eucaria), die auf der Erde nachgewiesen werden konnten. Sie sind aber offenbar schnell wieder ausgestorben	79
Abb. 2.15	Beispiele für die Molekülstruktur einiger Lipide und Saccharide	81
Abb. 2.16	Das Dipeptid Alanylalanin entsteht bei der Verbindung von zwei Molekülen der proteinogenen Aminosäure Alanin unter Wasserabspaltung	84
Abb. 2.17	Beispiele von Proteinstrukturen in verschiedenen Größen nach Strukturdateien aus der europäischen Proteindatenbank (http://www.ebi.ac.uk/pdbe/)	86
Abb. 2.18	Gegenüberstellung eines RNA-Strangs und eines DNA-Doppelstrangs mit Darstellung der jeweiligen Nukleobasen	88
Abb. 2.19	Stark vereinfachtes Schema der DNA-Transkription (National Human Genome Research Institute)	90
Abb. 2.20	Schematische Darstellung der Proteinbiosynthese von Proteinen am Ribosom auf der Grundlage einer mRNA-Matrize	91
Abb. 2.21	Schematische Darstellung der DNA-Replikation	92
Abb. 2.22	Vergleich zwischen einer prokaryotischen Bakterienzelle (<i>links</i>) und einer eukaryotischen Tierzelle (<i>rechts</i>)	95
Abb. 2.23	Phylogenetischer Stammbaum des Lebens auf der Erde, wie er sich aus RNA-Sequenzanalysen rezenter Lebewesen ergibt (nach Carl Woese)	104
Abb. 2.24	Belousov-Zhabotinsky-Reaktion in einer dünnen Schicht. Eine Wellenfront der Reaktion ist gelb markiert	113
Abb. 2.25	Morning Glory Pool im Yellowstone Nationalpark. Die verschiedenen Farben rühren von extremophilen Archaeen her, welche die heißen Quellen besiedeln (Foto: Matthias Kabel) . . .	127
Abb. 3.1	Verteilung kompakter HII-Regionen und von Riesenmolekülwolken (abgeleitet aus CO-Beobachtungen, kleine Kreise, Masse in M_{\odot}) in Projektion auf die galaktische Ebene. Im rechten Diagramm erkennt man, dass beide zusammen – kompakte HII-Regionen und GMCs – sehr schön die Spiralstruktur der Milchstraße nachzeichnen. Die Position der Sonne (Entfernung zum galaktischen Zentrum = 8,5 kpc, Umlaufgeschwindigkeit = 220 km/s) ist durch ein Sternsymbol gekennzeichnet	152

Abb. 3.2	Integrierte Flussdichte (in $Wm^{-2}str^{-1}$) als Funktion der Frequenz des allgemeinen interstellaren Strahlungsfeldes in der Galaxie . . .	156
Abb. 3.3	Ausschnitt aus dem Seagullnebel (IC 2177) mit rot leuchtenden HII-Regionen um den Ae/Be-Stern HD 53367. Man beachte auch die eingebetteten Dunkelwolken, deren Flanken sich z. T. als blau leuchtende Reflektionsnebel bemerkbar machen (MPG, ESO La Silla)	163
Abb. 3.4	Die Bok-Globule Barnard 68, aufgenommen mit dem VLT (Mt. Paranal) in verschiedenen Spektralbereichen, befindet sich in ~ 500 Lj Entfernung im Sternbild Schlangenträger (Ophiuchus). Da die äußeren Bereiche der Wolke weniger dicht sind als die inneren, verringert sich die scheinbare Größe der Wolke mit wachsender Beobachtungswellenlänge im gleichen Maß, wie das langwellige Licht der Hintergrundsterne die ungefähr sphärische Staubsammlung durchdringen kann (ESO, VLT ANTU)	164
Abb. 3.5	Die HST-Aufnahme des OB-Clusters NGC 3603 zeigt die typische Struktur des Übergangs zu einer photonendominierten Region (PDR)	175
Abb. 3.6	Reaktionsnetzwerk, welches in einer Molekülwolke zur Synthese von Methanal (Formaldehyd) führt	192
Abb. 3.7	Zeitliche Entwicklung der Teilchenzahldichten in der Gasphase (durchgezogene Linien) und auf Staubpartikeln (punktierter Linien) für CO, CH ₄ , NH ₃ , H ₂ O und HCO ⁺ über 50.000 Jahre, gerechnet für die Molekülquelle Sgr B2 (N). Die genannten Moleküle gelten als primäre Komponenten der Eishüllen um Staubpartikel. Das Modell überdeckt die sogenannte <i>Warm up</i> -Phase, in der die Wolke statisch bleibt (d. h. nicht kontrahiert), die Temperatur aber von 10 auf 200 K ansteigt (betrifft sowohl Gas als auch Staub). Die relativ kurze Zeitskala der Größenordnung von 10^4 Jahren gilt als typisch für kompakte Molekülwolken, die zu massereichen Sternen zerfallen. Die Modellergebnisse sind repräsentativ für Gebiete, die sich in einer moderaten Entfernung vom heißen Wolkenkern befinden. Interessant in diesem Zusammenhang ist, dass der Anteil an Wassermolekülen zum Ende der Kontraktionsphase stark zunimmt. Dass Wasser in den äußeren Bereichen protoplanetarer Scheiben in großer Menge vorkommt, zeigt das Beispiel des Wasserdampfhorus um TW Hydrae. (Aus Garrod et al. 2008)	195
Abb. 3.8	Das gleiche Diagramm wie Abb. 3.7, aber diesmal für H ₂ CO, CH ₃ OH, CH ₃ OCH ₃ , HCOOH und HCOOCH ₃ . (Aus Garrod et al. 2008)	196

Abb. 3.9	Zeitliche Entwicklung der Moleküle CH_3CHO , CH_3CN , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, $\text{CH}_2(\text{OH})\text{CHO}$ und CH_2CO der Quelle Sgr B2 (N) gemäß dem Modell von Garrod und Mitarbeitern. (Aus Garrod et al. 2008)	196
Abb. 3.10	Schematischer Aufbau des Miller-Urey-Experiments zur Simulation einer abiotischen Synthese organischer Moleküle unter der Annahme einer reduzierenden Uratmosphäre	238
Abb. 3.11	Entwicklung der Leuchtkraft, des Radius und der effektiven Temperatur der Sonne während ihres Hauptreihenstadiums. (nach Ribas 2009)	277
Abb. 3.12	Ein einfacher reduktiver Citratzyklus, der explizit fast ohne spezifische Enzyme auskommt, das Reduktionspotenzial des Schwefelwasserstoff-Troilit-Systems ausnutzt und auf Sulfidoberflächen lokalisiert ist, könnte theoretisch der Ausgangspunkt für einen ersten selbsterhaltenden Stoffwechselzyklus gewesen sein (<i>Metabolism-first-Hypothese</i>) (Zhang und Martin 2006)	304
Abb. 3.13	Mögliche Schrittfolge der präbiotischen Synthese von Adenin. a Bildung des HCN-Tetramers, b Umwandlung des HCN-Tetramers in 4-Amino-5-Cyano-Imidazole, c Purinbildung aus 4-Amino-5-Cyano-Imidazole bzw. aus dem Hydrolyse-Produkt von 4-Amino-Imidazole-5-Carboxamide. (aus Orgel 2004)	311
Abb. 4.1	Vereinfachte Darstellung des Kohlenstoffkreislaufs der Erde mit seinen Reservoiren und Stoffflüssen. Die Zahlen entsprechen je nach Kontext Gt bzw. Gt/a	342
Abb. 4.2	Wahrscheinlichkeiten für die Entstehung von erdähnlichen Planeten und <i>hot jupiters</i> in Abhängigkeit von der Metallizität der protostellaren Materie nach Simulationsrechnungen verschiedener Autoren (verändert nach (Prantzos 2007))	351
Abb. 4.3	Ungefähre Lage der galaktischen habitablen Zone in der Milchstraße (NASA)	352
Abb. 4.4	Zeitabhängige galaktische habitable Zone im Bereich der Milchstraßenscheibe, abgeleitet aus Simulationsrechnungen auf der Basis von entsprechenden Sternbildungsraten. Die weißen Linien umschließen die Bereiche, innerhalb derer man mit 68%iger Wahrscheinlichkeit (innere Kontur) bzw. 95%iger Wahrscheinlichkeit (äußere Kontur) potenziell bewohnbare Planeten auffinden kann. Die grüne Kurve am rechten Rand gibt die Altersverteilung eventuell vorhandener komplexer Lebensformen an (Lineweaver et al. 2004)	353

Abb. 4.5	Lage der zirkumstellaren habitablen Zone (<i>grün</i>) – von <i>oben</i> nach <i>unten</i> – um einen heißen A-Stern, um einen Stern wie die Sonne und um einen kühlen Roten Zwergstern (NASA)	361
Abb. 4.6	Veränderung der Lage der habitablen Zone im Zuge der Hauptreihenentwicklung der Sonne	363
Abb. 4.7	Entwicklung der solaren habitablen Zone unter Berücksichtigung geodynamischer Prozesse unter der Annahme, dass das Ozean-Land-Verhältnis konstant bleibt (SuW)	367
Abb. 4.8	Photosynthetisch aktive habitable Zone im Sonnensystem in Abhängigkeit von der Zeit für vier verschiedene Kontinentwachstumsszenarien: a verspätetes lineares Wachstum, b episodisches Wachstum, c lineares Wachstum, d konstante Kontinentfläche. Die horizontalen gestrichelten Linien markieren den Abstand der Venus (♀), der Erde (⊕), und des Mars (♂) zur Sonne (Bounama 2007)	370
Abb. 4.9	Lage der photosynthetisch aktiven habitablen Zone eines geodynamisch aktiven Erdzwillings in Abhängigkeit der Sternmasse. Der weiße Bereich stellt die Lage der „klassischen“ habitablen Zone dar. Der mit (I) gekennzeichnete Bereich ist <i>links</i> durch die Aufenthaltsdauer des Sterns der entsprechenden Masse auf der Hauptreihe und der Bereich (II) <i>links</i> durch die maximale Lebensdauer einer Biosphäre begrenzt. Der Bereich (III) gibt den Bereich an, in dem eine gebundene Rotation des Planeten zu erwarten ist. Man erkennt, dass bei einem Abstand von 1 AU dem Bereich der Sternmasse bereits sehr enge Grenzen gesetzt sind, um einen Erdzwilling eine langlebige Biosphäre zu ermöglichen	370
Abb. 4.10	Verteilung von 932 sicher identifizierten Impaktkratern auf der Venusoberfläche (Strom et al. 1994)	376
Abb. 4.11	Grafische Darstellung der Torino-Skala	387
Abb. 4.12	Petschek-Modell. Die Rekonnektion der Magnetfeldlinien findet innerhalb des kleinen Rechtecks im Zentrum der Abbildung statt (Diffusionszone). Die gestrichelten Linien kennzeichnen die Grenzfläche zwischen der langsamen Einströmung und der sehr schnellen jetartigen Ausströmung des im Prozess involvierten Plasmas	395
Abb. 4.13	Chapman-Zyklus	408

Abb. 4.14	Simulation der Kollision und Vereinigung zweier Neutronensterne, die anschließend zu einem Schwarzen Loch kollabieren. Dabei entsteht ein maximal 2 s andauernder Gammablitz, der in einem engen Konus um die Rotationsachse (Jet) abgestrahlt wird. Die Berechnungen wurden mittels eines Supercomputers am Goddard Space Flight Center durchgeführt (NASA)	414
Abb. 4.15	Verteilung der 2704 vom BATSE-Experiment auf dem Compton-Satelliten registrierten Gammablitz über den Himmel. Die Gleichverteilung zeigt deutlich, dass die beobachteten GRBs-Quellen außerhalb des Milchstraßensystems liegen müssen	415
Abb. 5.1	Panoramaaufnahme des Viking 2-Landeplatzes 200 km westlich des Kraters Mie (Utopia Planitia). Der Lander arbeitete vom 3. September 1974 bis zum 11. April 1980 auf dem Mars. Er konnte mittlerweile sogar auf Aufnahmen des Mars Reconnaissance Orbiters identifiziert werden (NASA) ...	425
Abb. 5.2	Vereinfachte Phasendiagramme von Wasser und Kohlendioxid	432
Abb. 5.3	Regionale Verteilung von Wassereis auf dem Mars. Die Farben geben seinen Anteil in Gewichtsprozenten in einer ungefähr einen Meter mächtigen Bodenschicht an. Man beachte unbedingt die unterschiedliche Farbskalierung der äquatorialen Karte und der Polarkarten. Den Karten sind Höhenreliefs, die aus den MOLA-Daten von Mars Global Surveyor abgeleitet worden sind, unterlegt (NASA)	433
Abb. 5.4	Impaktkrater mit einem Durchmesser von etwa 35 km nahe dem Nordpol des Mars bei $\sim 70,5^\circ$ nördlicher Breite und $\sim 103^\circ$ östlicher Länge in der Tiefebene Vastitas Borealis (ESA, DLR, FU Berlin)	436
Abb. 5.5	Die am 13. September 1976 vom Viking 1-Orbiter fotografierte Region (Parana Valley) zeigt auf der rechten Seite deutlich die Strukturen eines <i>valley networks</i> . Ihre Entstehung lässt sich nur durch die Präsenz von flüssigem Wasser zur Zeit ihrer Bildung erklären. Die Bildbreite entspricht ~ 250 km auf dem Mars (NASA)	442
Abb. 5.6	Gebiete mit erhöhter Methankonzentration während der Marssommermonate des Jahres 2003 und ihre Korrelation mit geomorphologischen und mineralogischen Oberflächenformationen. (Aus (Mumma et al. 2009), NASA) ..	447

Abb. 5.7	Mutmaßlicher Schlammvulkan auf dem Mars, aufgenommen mit der HiRISE-Kamera des Mars Reconnaissance Orbiters (NASA, JPL)	448
Abb. 5.8	In genau einer Probe von ALH 84001 glaubte man 1996 erste Spuren außerirdischer Lebewesen in Form von Nanobakterien gefunden zu haben – eine Deutung, die heute kaum noch ernsthaft vertreten wird (NASA)	450
Abb. 5.9	Jupitermond Europa (NASA, JPL)	457
Abb. 5.10	Zerfurchte und verdrehte Eisschollen auf der Oberfläche von Europa (NASA)	457
Abb. 5.11	Häufung von <i>Lenticulae</i> auf einer mit Rissstrukturen durchsetzten Eisfläche auf Europa (NASA)	459
Abb. 5.12	Wostok-See. Auf dieser von dem kanadischen Satelliten RADARSAT-1 aufgenommenen Aufnahme Antarktikas im Bereich der Forschungsstation „Wostok“ fällt die besonders glatte Eisgrenzfläche über dem See auf (RADARSAT)	466
Abb. 5.13	Saturnmond Enceladus. Entlang der hier im unteren Bereich deutlich sichtbaren „Tigerstreifen“ reiht sich eine Vielzahl von Geysire, deren gefrorener Wasserdampf die Eispartikel des torusförmigen E-Rings des Saturn formen (NASA, JPL)	468
Abb. 5.14	Auf dieser Aufnahme des Randes von Enceladus durch Cassini am 21. November 2009 hebt sich eine Vielzahl von aktiven Geysiren gegen den dunklen Hintergrund des Kosmos ab (NASA, JPL)	471
Abb. 5.15	Grundlegendes Funktionsprinzip der Geysire im Bereich der Tigerstreifen auf Enceladus	472
Abb. 5.16	Titan im sichtbaren Licht, aufgenommen in dem Moment, als er am 26. November 2009 von Cassini aus gesehen den Saturnmond Tethys bedeckt (NASA, JPL)	474
Abb. 5.17	Falschfarbencodierte Aperturesynthese-Radaraufnahme von Ligeia Mare (NASA, JPL)	477
Abb. 5.18	Karte der nördlichen Seenplatte von Titan mit den drei großen Maria und einer Vielzahl kleinerer und z. T. noch unbenannter lakes (NASA, JPL, USGS)	479
Abb. 5.19	Mögliche Spuren von Methanniederschlägen aus Wolken im Bereich des Südpols von Titan. Man beachte die auffällige Verdunklung eines kleinen Bereichs links oberhalb des ca. 200 km langen Ontario Lacus (NASA, JPL)	482