



Bausteine, die vom Himmel fallen

Wie entstand das Leben auf der Erde? Dieser wahrlich existenziellen Frage widmen sich Wissenschaftler der „Heidelberg Initiative for the Origins of Life“. Sie gehen sogar noch einen Schritt weiter und untersuchen die Bedingungen, unter denen Leben entstehen kann. Gegründet von **Thomas Henning**, Direktor am Heidelberger **Max-Planck-Institut für Astronomie**, vereint die Initiative Forscher aus Chemie, Physik sowie den Geo- und Biowissenschaften.





TEXT THOMAS BÜHRKE

Es sind die großen Fragen unserer Existenz, die uns faszinieren: Wie ist das Universum entstanden, wie die Erde und wie das Leben? Gibt es woanders Leben, oder sind wir allein in den Weiten des Alls? Wissenschaftler nähern sich diesen Rätseln von verschiedenen Seiten – und finden Teilantworten. Lange Zeit gab es eine klare Aufgabenteilung: Für das Universum und die Erde waren Astro- und Geophysiker zuständig, für das Leben Biologen und Chemiker.

Entwicklungen in der jüngeren Vergangenheit zwingen aber geradewegs dazu, diese Spezialisierung aufzubrechen und unterschiedliche Disziplinen zusammenzubringen. „Das versuchen wir mit der vor drei Jahren gegründeten ‚Heidelberg Initiative for the Origins of Life‘“, sagt Thomas Henning. HIFOL, so die Abkürzung, umfasst nicht nur Forscher aus unterschiedlichen Disziplinen, sondern arbeitet eng mit ausländischen Institutionen wie der McMaster University in Hamilton, Kanada, zusammen.

Auslöser dieser Initiative war die Entdeckung von immer mehr Gesteinsplaneten bei anderen Sternen. „Wir wissen heute, dass solche festen Planeten häufiger sind als die jupiterähnlichen Gasriesen, die wir anfangs gefunden haben“, sagt Henning. Es gibt demnach Milliarden von Gesteinsplaneten allein in unserer Milchstraße, von denen einige vermutlich Umweltbedingungen bieten, welche die Entstehung von Leben, wie wir es kennen, begünstigen. Und genau mit dieser Erkenntnis erweitert sich die Fragestellung der Heidel-

Kostbare Fracht: Meteoriten brachten möglicherweise Grundstoffe wie die Nukleinbasen Adenin, Guanin und Uracil auf die Erde und lieferten damit die Zutaten für die Entstehung von RNA-Molekülen.



Kosmische Kreißäle: Sterne und Planeten werden in Wolken aus Gas und Staub geboren. Das Bild oben zeigt gleich drei solcher Gebiete, den Omega- und den Adlernebel sowie den Komplex Sharpless 2-54 (von links). Dieser Entstehungsprozess brachte nicht nur vor ungefähr 4,6 Milliarden Jahren unser Sonnensystem hervor, sondern er spielt sich noch immer an vielen Orten im All ab. So formten sich auch der 40 Lichtjahre von der Erde entfernte rote Zwergstern Trappist-1 und seine sieben bisher bekannten, relativ erdähnlichen Gesteinsplaneten (rechte Seite).

berger Initiative: Es geht nicht nur darum, wie das Leben auf der Erde entstanden sein könnte, sondern wie ganz allgemein die Bedingungen sein müssen, damit so etwas passiert – auch auf extrasolaren Planeten.

LOB UND TADEL FÜR AUSGEZEICHNETE ARBEIT

Ende vergangenen Jahres erregte eine Veröffentlichung einiges Aufsehen, in der Thomas Henning zusammen mit seinem Kollegen Dmitry Semenov sowie Ben Pearce und Ralph Pudritz von der McMaster University ein Szenario für die Entstehung von Leben auf der Erde vorschlagen. „Wir haben dafür sowohl Anerkennung und Lob als auch Kritik erhalten“, sagt Henning.

Letztere kam von angestammten Origins-of-Life-Wissenschaftlern, die den Astronomen Unkenntnis vorwarfen, nach dem Motto: Was verstehen Sternenforscher schon von Biomolekülen – selbst wenn sie sich sehr gut in Astrochemie auskennen? Die National Academy of Science sah das anders und verlieh dieser Arbeit den Cozzarelli-Preis 2017 für „außergewöhnliche wissenschaftliche Exzellenz und Originalität“. Tatsache ist, dass Astronomen durchaus etwas zu den Fragen beizutragen haben, welche Bedingungen geherrscht haben könnten, als sich die ersten Lebensmoleküle oder deren Vorfüräger bildeten. Und wie es dazu kam.

Ausgangspunkt der Studie von Henning und seinen Kollegen ist die vor rund 30 Jahren von dem Chemie-Nobel-

preisträger Walter Gilbert aufgestellte und heute sehr beliebte Hypothese der RNA-Welt. Sie besagt, dass die allerersten irdischen Lebensformen auf Ribonukleinsäuren (RNA) basierten. Vom Aufbau her ähnelt die RNA dem Informationsträger heutigen Lebens, der DNA: Beide bestehen aus vier organischen Basen, wobei Adenin, Guanin und Cytosin in beiden vorkommen; die RNA hingegen enthält statt Thymin die Base Uracil. Außerdem ist die RNA – anders als die doppelsträngige DNA – meistens einsträngig.

RNA-Moleküle können ebenfalls genetische Information übertragen und auch katalytische Funktionen ausüben. In der Mehrzahl der Lebewesen spielt die RNA jedoch als Informationsträger eine der DNA unterordnete



Rolle, lediglich in Viren fungiert sie als Speichermedium. Hat sich folglich aus der einfacheren RNA die komplexere DNA entwickelt?

Es galt als großer Durchbruch, als im Jahr 2009 britische Forscher in einem chemischen Experiment herausfanden, dass RNA-Bausteine entstehen können, wenn bestimmte Moleküle vorhanden sind und diese unter sehr speziellen Bedingungen miteinander reagieren. Doch wo lagen in der Natur die günstigsten Bedingungen vor?

Seit Langem werden hydrothermale Quellen am Grund der Tiefsee, auch Schwarze oder Weiße Raucher genannt, als Orte der Entstehung von Leben vermutet. Es ist aber unklar, ob hier der für die Synthese nötige Stickstoff in ausreichender Konzentration existiert. Außerdem verdünnen sich die Stoffe in dem ständig strömenden Wasser, was komplexe chemische Reaktionen behindert.

„Hier kommen wir ins Spiel“, sagt Thomas Henning. „Wir haben uns gefragt, welche anderen möglichen geo-

chemischen Bedingungen geherrscht haben könnten, damit diese RNA-Synthese ablaufen konnte.“ Die Idee: Die wichtigsten Bausteine kamen aus dem All auf die Erde. Tatsächlich wurden die Nukleinbasen Adenin, Guanin und Uracil sowie Aminosäuren im Innern von Meteoriten nachgewiesen. Sie entstehen bei Anwesenheit von Wasser aus den einfachen Molekülen Cyanwasserstoff, Kohlenmonoxid und Ammoniak.

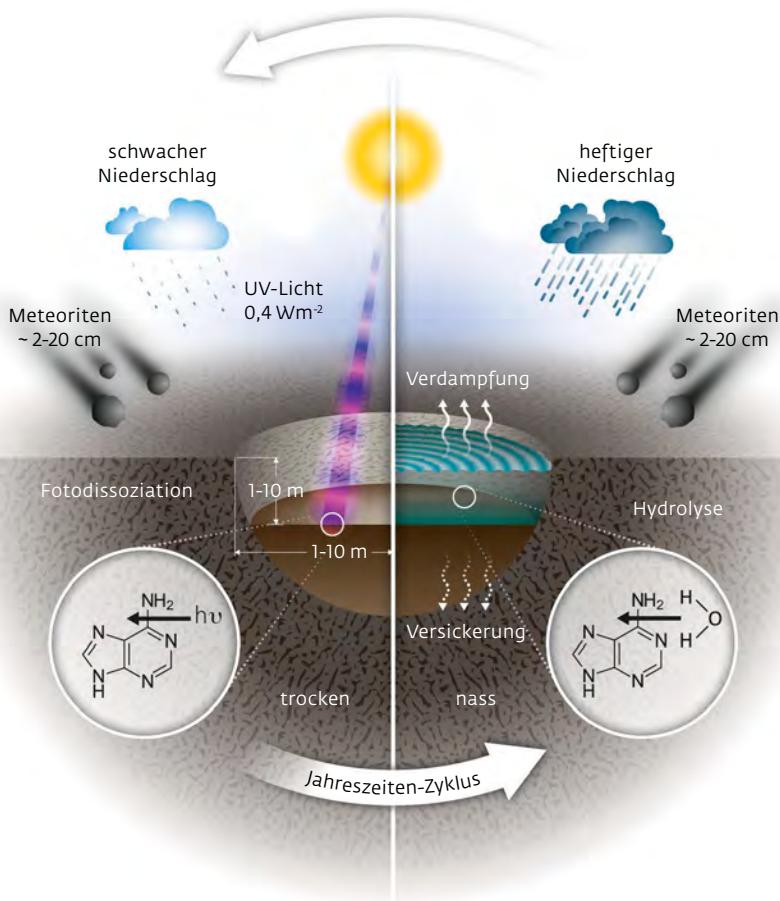
ZIRKONKRISTALLE DEUTEN AUF FESTE ERDKRUSTE HIN

Außerdem findet man in Meteoriten das Mineral Schreibersit, das in Wasser Phosphorgruppen freisetzt – auch die werden für die RNA-Synthese benötigt. All diese Stoffe sind in den Staubscheiben vorhanden, in denen Planeten entstehen, wie astronomische Beobachtungen belegen. Sie waren also mit Sicherheit auch in jener Wolke vorhanden, in der vor 4,6 Milliarden Jahren das Sonnensystem geboren wurde.

Doch wie und wann gelangten die organischen Bausteine auf die Erde? Und wie sah es hier aus?

Aus der ganz frühen Phase, in der unser Planet von einem Glutball zu einem Gesteinsplaneten erkaltete, gibt es so gut wie keine Überreste mehr. Lediglich winzige Zirkonkristalle, die bis zu 4,4 Milliarden Jahre alt sein könnten, deuten darauf hin, dass sich schon recht früh eine feste Kruste bildete. Gleichzeitig war die Erde damals einem viel stärkeren Bombardement von Meteoriten ausgesetzt als heute. Dies belegt die Kraterstatistik des Mondes, der diesem Beschuss in gleicher Weise ausgesetzt war. Diese kosmischen Geschosse brachten vermutlich sowohl Wasser als auch organische Moleküle auf unseren Planeten.

Wie die Land- und Wasserflächen in der Urzeit verteilt waren, ist ebenso unbekannt wie etwa die für chemische Reaktionen sehr wichtige Temperatur. Deswegen haben die Astronomen Modelle gerechnet, in denen sie die wich-



Wiege des Lebens: Dmitry Semenov (links) und Thomas Henning vom Max-Planck-Institut für Astronomie haben ein Szenario entworfen, wonach einst in kleinen warmen Teichen vielfältige Reaktionen abliefen; diese führten zur Bildung der ersten selbst-replizierenden RNA-Moleküle. Die Grafik links zeigt die vielen Einflüsse, die in solchen Kleinstgewässern auf chemische Verbindungen einwirken.

tigsten Parameter der sich entwickelnden Erdkruste über einen großen Bereich variierten. Sicher gab es damals wie heute eine weite Größenverteilung der Wasserflächen.

Große Seen und Meere eigneten sich vermutlich nicht als Brutstätten der RNA, weil die Vorläuferstoffe konzentriert vorliegen müssen, damit sie miteinander reagieren können. Hingegen waren kleine Tümpel mit wenigen Metern Durchmesser und Tiefe nach dem Modell optimal: Sie waren groß genug, um nicht zu schnell auszutrocknen, und klein genug, um rasch eine hohe Nukleobasen-Konzentration zu ermöglichen.

Zugleich waren die Biomoleküle zerstörenden Angriffen ausgeliefert: Im Wasser bedrohte sie die Elektrolyse, im Freien die intensive UV-Strahlung der Sonne. Schon eine einen Meter dicke Wasserschicht absorbiert etwa 95 Prozent der UV-Strahlung. Ein mit den Jahreszeiten schwankender Füllstand der Tümpel durch Regen und Austrocknen durch Verdunsten und Versickern scheint

nach den Szenarien optimal gewesen zu sein: „Die Zyklen, in denen flache Teiche erst austrocknen und dann wieder mit Wasser gefüllt werden, begünstigten möglicherweise die Entstehung längerer RNA-Ketten“, sagt Henning.

DER IDEALE RADIUS LIEGT ZWISCHEN 40 UND 80 METERN

In der Modellsimulation variierten die Forscher zudem die Einschlagsrate und die Größenverteilung der Meteoriten. Sind sie zu klein, verglühen sie vollständig in der Atmosphäre, sind sie zu groß, schlagen sie mit zu großer Wucht auf. „Ein Größenbereich zwischen 40 und 80 Meter Radius ist optimal, damit die Meteoriten ihre molekulare Fracht am Boden abliefern können“, erklärt Dmitry Semenov, Experte für chemische Netzwerke in protoplanetaren Staubscheiben und Mitautor der Studie.

Der genannte Bereich ist zweimal so groß wie der Meteorit, der im Februar 2013 über der russischen

Stadt Tscheljabinsk explodierte. Wie dieses Ereignis eindrucksvoll demonstrierte, erreichen Meteorite dieser Größenordnung nicht unverhohlen den Erdboden. Sie zerbrechen in viele kleine Fragmente und gehen über einem großen Bereich nieder. So können kleine, wenige Zentimeter große Splitter in den Tümpeln landen. Darin geben sie – abhängig von der Größe – innerhalb von Tagen bis Monaten die Nukleobasen ab. Nun müssen die Nukleotide und die daraus entstehenden RNA-Moleküle sich innerhalb weniger Jahre synthetisieren.

Diese Simulationen zeigen, dass Meteoriten eine ausreichende Menge an Nukleobasen zu Tausenden in kleine Teiche auf der Erde transportiert haben könnten und damit die Entstehung von RNA-Molekülen in mindestens einem dieser Teiche anstießen. Die RNA-Welt könnte innerhalb von 200 bis 300 Millionen Jahren entstanden sein, nachdem die Erdoberfläche bewohnbar geworden war, also vor mehr als vier Milliarden Jahren.



„Basierend auf dem, was wir über die Planetenbildung und die Chemie des Sonnensystems wissen, haben wir ein konsistentes Szenario für die Entstehung des Lebens auf der Erde vorschlagen“, sagt Semenov. „Jetzt müssen die Experimentatoren herausfinden, wie das Leben unter diesen ganz spezifischen frühen Bedingungen tatsächlich entstanden sein könnte.“ In der Tat sind die Nukleobasen nur ein erster Schritt. Weitere Prozesse sind nötig, wie die Entstehung von komplexen RNA-artigen Molekülen, von Zellmembranen und schließlich die Bildung der DNA-Protein-Welt heutiger Organismen.

Wenn es um chemische Experimente zur Entstehung des Lebens geht, darf das berühmte Miller-Urey-Experiment aus den 1950er-Jahren nicht fehlen. Stanley Miller und Harold Clayton Urey hatten in einem Reaktionsgefäß einfache chemische Substanzen unter einer hypothetischen frühen Erdatmosphäre elektrischen Entladungen ausgesetzt, um die Energiezufuhr durch Ge-

witterblitze nachzubilden. Nach einiger Zeit konnten sie mit einem Chromatografen organische Moleküle nachweisen, darunter auch Aminosäuren.

Allerdings gehen Forscher heute davon aus, dass die Uratmosphäre der Erde anders zusammengesetzt war, als von Miller und Urey angenommen. Sie enthielt weniger Methan, stattdessen mehr Wasserstoff, Kohlendioxid, Stickstoff und Wasser. Unter diesen Bedingungen war die Synthese der für die RNA notwendigen Bausteine wahrscheinlich schwieriger.

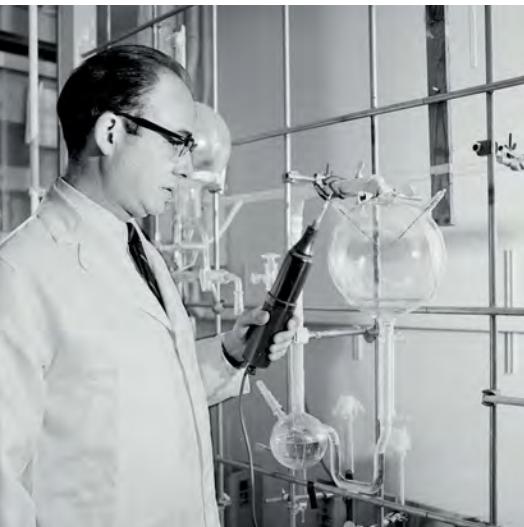
ECHTES METEORITENMATERIAL REAGIERT IM REAKTOR

Wie dies doch möglich gewesen sein könnte, untersucht Oliver Trapp. Er forschte an der Universität Heidelberg, bevor er eine Professur an der LMU München annahm. Um die fruchtbare Zusammenarbeit mit den Heidelbergern aufrechtzuerhalten, wurde Trapp Max Planck Fellow: Die Max-Planck-Gesell-

schaft unterstützt ihn mit Forschungsgeldern und finanziert einen Teil seiner 16-köpfigen Gruppe.

„Wir stellen in unseren chemischen Experimenten die Bedingungen so nach, wie sie uns die Astrophysiker vorgeben“, sagt Trapp. So verwenden die Forscher richtiges Meteoritenmaterial und lassen es im Reaktor reagieren. Es entstehen dann viele organische Moleküle, die mit schnellen chromatografischen Verfahren analysiert werden. Ein überraschendes Ergebnis: Die winzigen Meteoritenpartikel im Nanometerbereich arbeiten als Katalysatoren für diese Reaktionen.

Interessanterweise bilden sich dabei Substanzen, die selbst katalytisch wirken und entweder die Produktion der selben oder auch anderer Substanzen beschleunigen. Die Reaktion gerät in ein dynamisches Ungleichgewicht: Nur jene Stoffe, die sich am schnellsten katalytisch bilden, reichern sich an. „Es findet eine chemische Evolution statt“, sagt Oliver Trapp. „Ziel ist es zu sehen,



Evolution im Labor: Zusammen mit Harold Clayton Urey gelang es Stanley Miller (im Bild) in den 1950er-Jahren, in einem Reaktionsgefäß organische Moleküle zu erzeugen, darunter auch Aminosäuren. Das berühmte Experiment inspiriert Forscher heute zu weiterführenden Versuchen.

ob diese chemische Entwicklung in eine RNA-Welt mündet.“ Bei diesen Experimenten hat sich auch angedeutet, dass eine Art Motor zum Antrieb der Reaktionen notwendig ist: der natürliche Hell-Dunkel-Rhythmus von Tag und Nacht. In anderen Experimenten beschäftigt sich Trapps Gruppe mit Fettsäuren und der Frage, wie sich Zellmembranen gebildet haben könnten.

Voraussetzung für die Analyse der chemischen Reaktionen unter verschiedenen Bedingungen ist der Einsatz von Hochdurchsatz-Screening-techniken. So verfügt Trapps Labor über die Möglichkeit, in 64 jeweils nur 1,5 Milliliter fassenden Minireaktoren chemische Vorgänge ablaufen zu lassen und zu analysieren. Erweisen sich hierbei bestimmte Bedingungen als besonders vielversprechend, werden diese in zwei Liter fassenden Reaktoren detailliert nachuntersucht. „Wir nennen das scherhaft unser Urey-Miller 2.0“, sagt Trapp.

DIE SUCHE NACH BIOMARKERN IN DER ATMOSPHÄRE

Die Reaktionen sind sehr komplex, bei vielen Fragen stehen die Forscher noch ganz am Anfang. Oliver Trapp glaubt jedoch, dass Leben zwangsläufig entsteht, wenn die Bedingungen stimmen. „Ich bin sogar ganz fest davon überzeugt, dass die chemische Struktur von möglichem extraterrestrischem Leben der unseren sehr stark ähnelt.“

Damit stellt sich auch die Frage, ob wir die Aktivität von Leben auf einem anderen Planeten nachweisen können. Molekularer Sauerstoff, Ozon und Methan gelten hierfür gemeinhin als atmosphärische Biomarker. Allerdings muss man bedenken, dass auf der Erde die Sauerstoffkonzentration erst vor etwa 300 Millionen Jahren den heutigen Wert erreichte. Das ist der zeitlich kürzere Teil in der biologischen Evolution.

Zudem könnte es eine bislang unbekannte Schwierigkeit geben, diese Stoffe bei einem Exoplaneten nachzuweisen. Das Problem betrifft Planeten, die lichtschwache kühle Sterne, sogenannte M-Zwerge, umkreisen. Dazu zählen die jüngsten Beispiele Proxima Centauri b und Trappist-1d. Bei ihnen liegt die bewohnbare Zone viel näher am Stern als bei unserer heißen Sonne. Ein potenziell belebter Planet wird also vermutlich eine gebundene Rotation aufweisen: Er wendet dem Stern stets dieselbe Hemisphäre zu, sodass auf der einen Hälfte immer Tag und auf der gegenüberliegenden Hälfte stets Nacht ist.

In der Atmosphäre eines solchen Planeten bildet sich laut Computersimulationen einer Forschungsgruppe um Ludmila Carone vom Heidelberger Max-Planck-Institut für Astronomie eine Luftströmung aus, welche das Ozon im Äquatorbereich ansammelt, während es in sämtlichen anderen Bereichen praktisch nicht vorkommt. „Wenn wir auf einem fernen Planeten kein Ozon nachweisen, muss das nicht bedeuten, dass es dort überhaupt keinen Sauerstoff gibt“, erläutert Carone. „Vielleicht haben wir schlicht am falschen Ort gesucht – und das Ozon ist anderswo versteckt.“

Dennoch fahnden Astronomen nach einer möglichen zweiten Erde, auch bei M-Zwergsternen, zumal diese viel häufiger sind als sonnenähnliche Sterne. Auch die Heidelberger Max-Planck-Forscher gehen seit gut zwei Jahren auf eine ganz besondere Planetenjagd. Hierfür haben sie zusammen mit Kollegen aus anderen deutschen und spanischen Instituten ein Instrument gebaut, das am größten Teleskop des Calar-Alto-Observatoriums in Südspanien rund 300 M-Zwerge untersucht und nach Hinweisen auf Gesteinsplaneten Ausschau hält.

Große Hoffnung setzen die Astronomen aber auf das *James Webb Space Telescope*, das frühestens in zwei Jahren starten soll. Millionen von Kilometern



Gigantisches Facettenauge: Der goldbedampfte Hauptspiegel des *James Webb Space Telescope* hat einen Durchmesser von sechseinhalb Metern und besteht aus 18 Segmenten. Frühestens von Mai 2020 an soll das Instrument den Himmel durchmustern und auch ferne Exoplaneten ins Visier nehmen.

von der Erde entfernt, wird der *Hubble*-Nachfolger das Universum erkunden. Ein Hauptziel ist die Untersuchung von Exoplaneten. Für eines der vier Messinstrumente namens MIRI hat das Max-Planck-Institut für Astronomie wichtige Komponenten entworfen und gebaut. Damit haben die Heidelberger Astronomen auch die Gelegenheit, mit dem Superteleskop erste Beobachtungen zu machen.

Wie sein Kollege Oliver Trapp ist auch Thomas Henning zuversichtlich, dass es auf fernen Planeten Leben gibt: „Schon allein die enorme Zahl von vielleicht einer Milliarde gesteinsähnlicher Planeten in unserer Milchstraße und die Erkenntnis, dass das Leben auf der Erde sehr schnell entstanden ist, macht die Existenz von Leben auf anderen Planeten für mich sehr wahrscheinlich.“ Steuern wir also auf eine zweite kopernikanische Revolution zu? „Nein“, antwortet Henning, „Wir sind bereits mittendrin.“

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Heutiges Leben basiert auf dem Erbinformationsträger DNA. Auf der frühen Erde könnte als Vorläufer eine auf dem einfacheren Biomolekül RNA beruhende Welt existiert haben.
- Die Bausteine für RNA könnten im Innern von Meteoriten auf die Erde gelangt sein. Computersimulationen legen nahe, dass die anschließende RNA-Synthese in wenige Meter großen Tümpeln begann.
- Mit Hochdurchsatz-Screenings ist es möglich, in kurzer Zeit sehr viele chemische Reaktionen zu testen und so die optimalen Bedingungen für die Entstehung von Leben herauszufiltern.

GLOSSAR

Elektrolyse: Aufspaltung einer chemischen Verbindung unter Einwirkung von elektrischem Strom, wodurch elektrische Energie in chemische Energie umgewandelt wird. Die Elektrolyse entspricht der umgekehrten Reaktion, die in einer Batterie oder Brennstoffzelle stattfindet.

Exoplanet: Planetarer Himmelskörper, der außerhalb des Gravitationsfeldes unserer Sonne, aber innerhalb des Gravitationsfeldes eines anderen Sterns liegt. Gegenwärtig kennen die Astronomen rund 3800 Exoplaneten.

Nukleobasen: Bestandteile von Nukleinsäuren wie DNA oder RNA. DNA enthält die Nukleobasen Adenin, Guanin, Cytosin und Thymin, bei RNA-Molekülen ist Thymin durch Uracil ersetzt. Basen heißen sie, weil sie in wässriger Lösung schwach basisch reagieren. Adenin und Thymin sowie Guanin und Cytosin bilden jeweils Basenpaare und stellen somit zusammen mit dem Zuckermolekül Desoxyribose sowie einer Phosphatgruppe das Grundgerüst der DNA-Doppelhelix.