

Astro-Biochemie in der Schule

Untersuchung von Voraussetzungen für die Entstehung des Lebens auf verschiedenen Himmelskörpern

In Bezug zu „Leben unter dem Eis von Enceladus?“ in SuW 12/2021, S. 23-26,

WIS-ID: 1571140, Zielgruppe: Oberstufe

Polina Terenteva

Zu den „Urfragen“ der Menschen gehören die nach der Entstehung des Lebens auf der Erde und ob es Leben auch auf anderen Himmelskörpern geben kann. Dieses Thema zieht uns in seinen Bann und ist aus der Schule nicht wegzudenken.

Der vorliegende Artikel ist thematisch im **Gebiet zwischen Astronomie und Biochemie** angesiedelt. Hinsichtlich der Entstehung oder möglichen Entstehung von Leben werden drei kosmische Orte betrachtet: die Erde, der Jupitermond Europa und drei der Exoplaneten des Trappist-1-Systems. Die **Frage nach der möglichen Bildung von Aminosäuren**, die als Bausteine von Proteinen in allen Lebewesen vorkommen, ist dabei zentral. Nach theoretischen Betrachtungen zur möglichen Chemie am Standort werden auch **beeindruckende Versuche** vorgestellt, die mit den Mitteln der Schulchemie nachvollzogen werden können.

Der WIS-Beitrag ist als Extrakt aus einer **Jugend forscht-Arbeit** der Autorin (Regional-Wettbewerb in Rosenheim, Februar 2020) entstanden und bietet so auch eine Idee für weitere Schülerleistungen, wie z. B. eine Seminarfacharbeit.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Planeten, Klein- körper, Raumfahrt	Urerde , Jupiter , Jupitermond Europa , Exoplaneten Trappist 1e und 1f und 1g , superhabitabel , James-Webb-Weltraumteleskop
Physik	Allgemein, E-Lehre, Optik	Physikalischen Bedingungen auf anderen Himmelskörpern , Blitze , Magnetfeld , „Magnetrührer“ , Spektrum , Molekülspektroskopie
Fächer- verknüpfung	Astro - Chemie Astro - Geografie Astro - Biologie	Miller-Urey-Experiment , Urstoffe für das Leben , Nachweis von Aminosäuren Urerde , Urozean , Uratmosphäre Ursuppe , Bausteine des Lebens
Lehre allgemein	Erkenntnisgewin- nungskompetenz Unterrichtsmittel	Entwurf chemischer Experimente , Durchführen chemischer Versuche , Analysieren der Ergebnisse chemischer Versuche, Simulation der Chemie auf dem Jupitermond Europa , Geräte und Hilfsmittel für die Schulchemie , Thema für Seminarfacharbeit



Abbildung 1: Künstlerische Darstellung einer Wasserdampf-Fontäne, die aus der eisigen Oberfläche des Jupitermonds Europa austritt und sehr wahrscheinlich von einem Ozean unter einer kilometer-dicken Eiskruste gespeist wird. Beobachtungsdaten des Hubble-Weltraumteleskops ergaben, dass die Fontänen eine Höhe von 201 km erreichen und vermutlich als Schnee zurückfallen. Flüssiges Wasser gilt als wesentlich für die Entstehung von Leben.

©: NASA/ESA/K. Retherford/SWRI –

<http://www.nasa.gov/content/goddard/europa-water-vapor-plume/>;

see also
<http://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA17659>,

Gemeinfrei,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30126639>.

Die „Ursuppe“ im Chemieraum

[zurück zum Anfang](#)

Die Theorie von der Ursuppe

Um die Möglichkeit der Entstehung von Leben auf anderen Himmelskörpern zu erforschen, müssen wir zuerst den Prozess der Lebensentstehung auf der Erde untersuchen.

Die **Bausteine aller lebenden Organismen** sind Proteine, lange Aminosäureketten mit mehr als 100 Aminosäuren. Aminosäuren sind somit die Grundsubstanz für die Entstehung von Lebewesen. Jede Aminosäure trägt am α -Kohlenstoffatom (C) eine Aminogruppe (NH₂), ein Wasserstoffatom (H), eine Carboxygruppe (COOH) und einen organischen Rest (z. B. H oder CH₃). Dies kann man auch in Abb. 2 exemplarisch sehen.

Für die Synthese von Aminosäuren werden somit die Elemente Stickstoff (N), Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O) und Wasserstoff (H) benötigt (siehe Abb. 2).

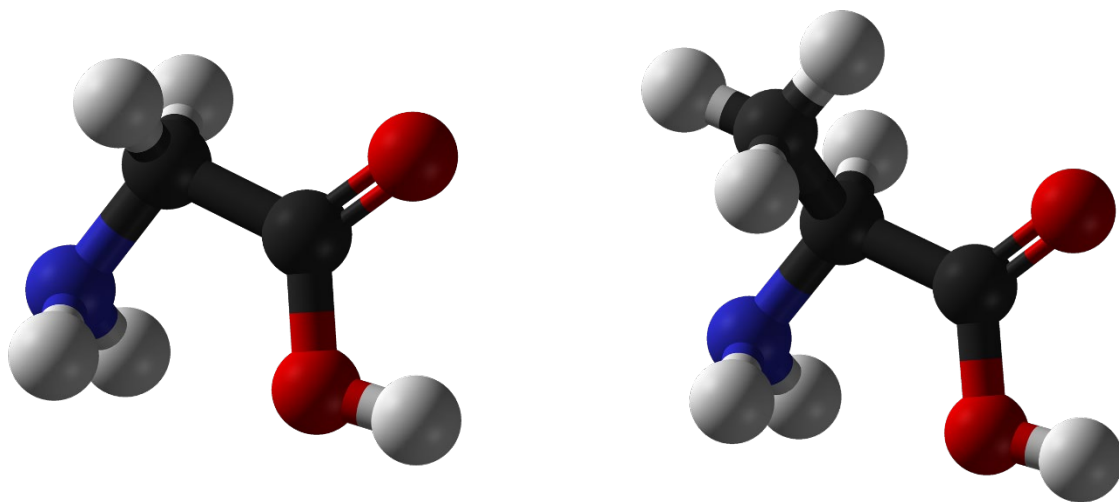


Abbildung 2: Struktur der Aminosäuren Glycin (links: ©: Benjah-bmm27 - Eigenes Werk, Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1738745>) und Alanin (rechts: ©: Benjah-bmm27 - Own work, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1742589>). Die Farben stehen für folgende Atome: Schwarz: Kohlenstoff (C), Grau: Wasserstoff (H), Blau: Stickstoff (N) und Rot: Sauerstoff (O).

Eine der Theorien der Lebensentstehung auf unserem Planeten ist die sogenannte „Ursuppentheorie“. Als **Ursuppe** bezeichnet man dabei **eine Mischung anorganischer Stoffe, die es ermöglichte, unter bestimmten Umständen organische (kohlenstoffhaltige) Moleküle, die für die Leben notwendig sind, hervorzubringen**. Diese Theorie wurde unabhängig voneinander von dem englischen theoretischen Biologen J. B. S. Haldane (1892 – 1964) und dem sowjetischen Biochemiker A. I. Oparin (1894 -1980) aufgestellt (vgl. [3]).

Die Theorie ging von Stoffen auf der **Urerde** aus, die zunächst in der ersten Atmosphäre (eine „Ausgasungsatmosphäre“, die der Uratmosphäre folgte) vorkamen. Die Atmosphäre bestand, so nimmt man an, vor allem aus Wasserdampf (H₂O), Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Schwefelwasserstoff (H₂S) (vgl. [1]) – Gase, die durch intensive vulkanische Aktivitäten freigesetzt wurden (vgl. [2], S. 183). Dazu kamen noch Spuren von Wasserstoff (H₂), Ammoniak (NH₃), Helium (He), Schwefel (S), Salzsäuredampf (HCl), Kohlenstoffmonooxid (CO) und auch schon Stickstoff (N₂).

Neue Forschungen ergaben, dass auch in der ersten Atmosphäre der Erde Stoffe wie Ammoniak oder Methan fehlten (siehe „Sterne und Weltraum“ 9/2021, S. 14 bzw. [33]). Es könnte also davon ausgegangen werden, dass diese „nachgeliefert“ wurden.

Die UV-Strahlung der Sonne, die inzwischen als Stern geboren war und den Raum um sie herum durch den Sonnenwind leergefegt hatte, führte zur fotochemischen Zerlegung von Wasser und Ammoniak und die Atmosphäre änderte sich wiederum, indem mehr und mehr Stickstoff hinzukam. Dies passierte wie folgt:

[zurück zum Anfang](#)

- Der Wasserdampf (H_2O) zersetzte sich in Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) unter dem Einfluss der hochenergetischen Strahlung, die von der mittlerweile strahlenden Sonne kam (vgl. [2], S. 183):
 $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$.
- Der entstandene Sauerstoff (O_2) reagierte mit Ammoniak (NH_3) zu Stickstoff (N_2), wobei wieder Wasser entstand:
 $3\text{O}_2 + 4\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$.

Unter dem Einfluss von Aktivierungsenergie, die insbesondere von elektrischen Entladungen (Blitzen) in der Uratmosphäre und energiereicher (UV-) Strahlung von der Sonne geliefert wird, könnten die genannten Elemente zu der konzentrierten „Ursuppe“ aus Aminosäuren (z. B. Glysin oder Alanin, siehe Abb. 2), Polypeptiden, Stickstoffbasen und Nucleotiden reagiert haben (vgl. [4] Kap.1).

Nachdem die Erde ausreichend abgekühlt war und der Wasserdampf auskondensieren und dann abregnen konnte (40.000 Jahre lang!), bildete sich der Urozean. Die in der Atmosphäre erzeugten Ursuppenstoffe wurden dabei in den Ozean transportiert, wo sich aus ihnen dann die ersten lebenden Organismen gebildet haben könnten (vgl. [3]; [4], Kap.5).

[zurück zum Anfang](#)

Das Experiment zur Theorie

1953 wurde die „Ursuppentheorie“ vom amerikanischen Chemiestudenten S. Miller (1930 – 2007) und seinem Professor H. Urey (1893 - 1981) als Miller-Urey-Experiment umgesetzt. Ziel war es, diese „Ursuppe“ herzustellen und auf Anwesenheit der organischen Verbindungen (Zeichen des Lebens) zu prüfen.

Das Experiment glückte und im Ergebnis bildeten sich organische Moleküle inklusive Aminosäuren, Pyrine und Pyrimidine, Baustoffe des Erbmaterials DNA [vgl. [5)]. Das Experiment hat also bewiesen, dass sich aus den anorganischen Stoffen, aus denen die frühe Erdatmosphäre bestand, organische Stoffe, also die Grundsubstanz für die Bildung von Lebewesen, bilden können.

Im Folgenden wollen wir das **Miller-Urey-Experiment** gemeinsam durchführen. Erstens müssen wir die Apparatur laut Skizze in Abb. 3 oder nach ähnlichem Prinzip aufbauen (siehe Abb. 4). Danach fangen wir mit der Befüllung an.

Der Versuch darf nur unter Aufsicht bzw. teilweise sogar durch eine Chemielehrkraft durchgeführt werden. Insbesondere beim Umgang mit Spannungsquellen und Gasen ist große Vorsicht geboten.

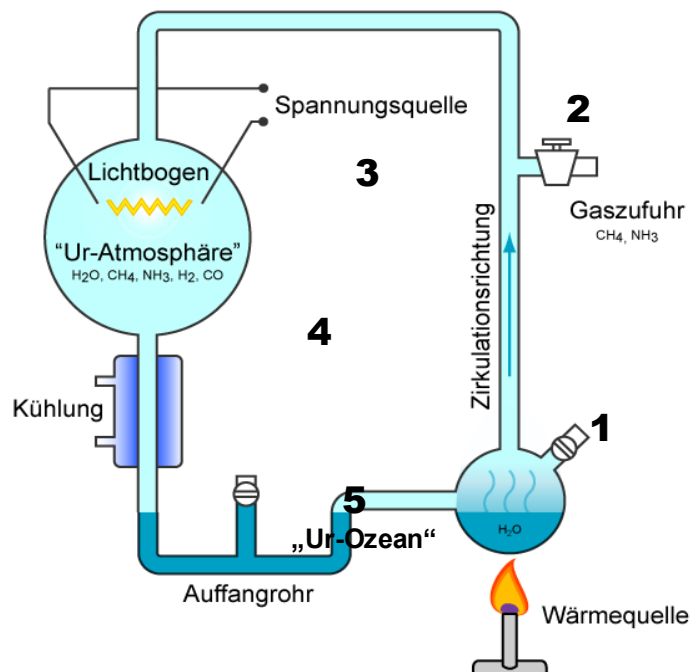


Abbildung 3: Skizze vom Versuchsaufbau des Miller-Urey-Experiments. Man vergleiche auch mit Abb. 3. ©: Miller-Urey-Experiment.png: Xerxes2k 13:18, 15 October 2005 (UTC) / derivative work: Gerbil (talk) - Miller-Urey-Experiment.png, CC BY 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16976210>.

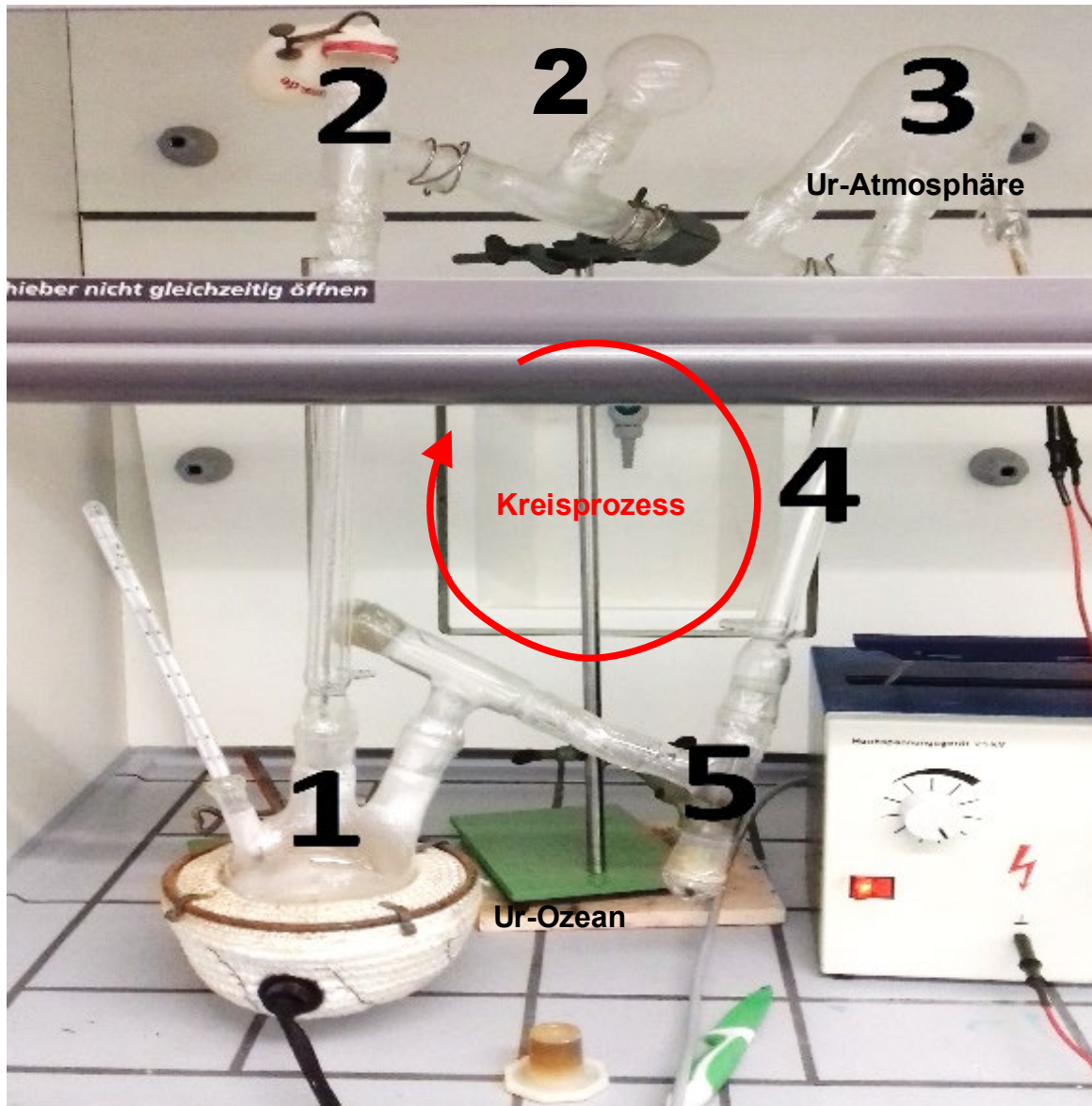
Das Schulexperiment – Aufbau
[zurück zum Anfang](#)


Abbildung 4: Links: Die selbstgebaute Apparatur für das Miller-Urey-Experiment im Chemieraum. Es handelt sich um einen Kreisprozess, bei dem die Gase immer wieder die Funkenstrecke in der „Ur-Atmosphäre“ durchlaufen und so nach und nach chemisch verändert werden. Man vergleiche den Aufbau mit der Skizze in Abb. 3. Folgende Bauelemente werden benötigt: 1: Dreihalsrundkolben in einer Pilzheizhaube für Rundkolben, 2: zwei Glasrohre mit T-Abzweig zum Aufstecken von Luftballons, 3: Dreihalsrundkolben mit Funkenstrecken in einem der Hälse, 4: Glasrohr, 5: Glasrohr mit T-Abzweig. Das Einschubbild zeigt den Bereich mit der Funkenstrecke. Die Blitze werden mit Hilfe der im linken Bild rechts ersichtlichen Hochspannungsquelle erzeugt. ©: Polina Terenteva.

Befüllung: Ausgangsstoffe für die chemische Reaktion

Stoff	Volumen
Wasser (H ₂ O)	0,05 l
Ammoniak (NH ₃)-25% Lsg.	0,05 l
Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	2,5 l
Wasserstoffgas (H ₂)	2,5 l

Als Kohlenstoffquelle wird Kohlenstoffdioxid (CO₂) verwendet.

Tabelle 1: Auflistung der Stoffmengen für das Miller-Urey-Experiment im Chemieraum.

Versuchsablauf

[zurück zum Anfang](#)

Wir füllen Wasser (H_2O) und Ammoniak (NH_3) entsprechend der in Tab. 1 genannten Mengen in einen Kolben (Nr. 1 in Abb. 4), welcher permanent auf 100 °C erhitzt wird. H_2O (Siedepunkt: 100 °C) und NH_3 (Siedepunkt: $37,7\text{ °C}$) gehen so in den gasförmigen Aggregatzustand über und steigen nach oben, wo sie über die T-Abzweige von Glasrohren (Nr. 2 in Abb. 4) Wasserstoffgas (H_2)_(g) und Kohlenstoffdioxid (CO_2)_(g) mit Luftballons hinzugefügt wird (Achtung: nur durch Lehrer auszuführen!). Das nun entstandene Gasgemisch aus H_2O , NH_3 , CO_2 und H_2 wird in Gefäß Nr. 3 (die Uratmosphäre im Experiment, siehe Abb. 4) geleitet. Dort wird es Blitzen ausgesetzt, die zwischen zwei Elektroden erzeugt werden, die in einem der drei Kolbenhälse eingebracht sind und an eine Hochspannungsquelle angeschlossen sind (Achtung: nur durch Lehrer auszuführen!). Die Elektroden werden dabei so eingestellt, dass es zu einer andauernden Blitzentladung (Funkenstrecke) kommt. Nach dem Durchlaufen der Blitzstrecke, welche als Energielieferant vermutlich wesentlich ist für die Bildung der benötigten Urstoffe des Lebens, wird das neue Gasgemisch aus Ausgangsstoffen und Reaktionsprodukten in dem Rohr Nr. 4 (siehe Abb. 4) abgekühlt, wobei es kondensiert und im Rohrende des Glasrohrs mit T-Abzweig (Nr. 5 in Abb. 4) als Flüssigkeit gesammelt wird. Diese Flüssigkeit besteht vor allem aus Wasser, in dem weitere Stoffe gelöst sind und repräsentiert im Versuch den Urozean. Das verbleibende Gas gelangt durch den Abzweig wieder in den Kreislauf. Die Apparatur soll für ca. sechs Tage laufen gelassen (Kreisprozess). Als Produkt bildet sich dann eine trübe Flüssigkeit, welche in der Abteilung Nr. 5 gesammelt wird (siehe Abb. 5).

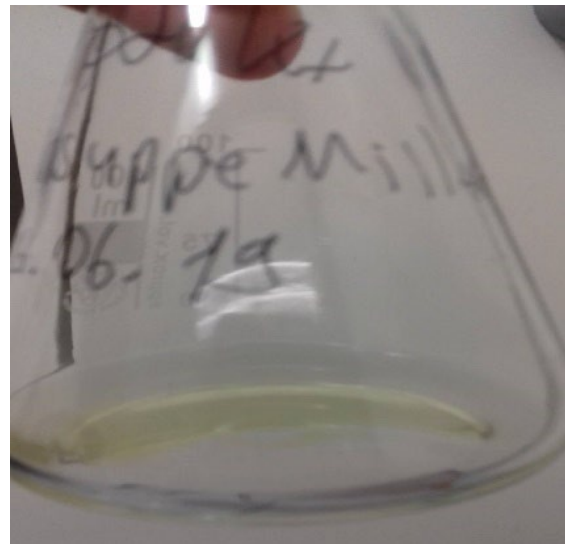


Abbildung 5: Links: Das Reaktionsprodukt des Miller-Urey-Experiments im Chemieraum, eine leicht grünlich aussehende Flüssigkeit, wird nach Kondensation im Teil 5 des Versuchs (siehe Abb. 4) aufgefangen. Rechts: Zur besseren Betrachtung wurde das Reaktionsprodukt in einen Erlenmeyer-Kolben gegeben. ©: Polina



Um das Vorkommen von Aminosäuren im Reaktionsprodukt nachzuweisen, wird es mit Ninhydrin versetzt. Färbt sich die Lösung lila, so ist dies ein Beleg für die Anwesenheit von Aminosäuren (siehe Abb. 6).

Nicht unerwähnt bleiben soll abschließend die Tatsache, dass es mittlerweile auch Zweifel hinsichtlich der Annahmen über die chemische Zusammensetzung der damaligen Erdatmosphäre gibt, so dass weitere Szenarien (z. B. hydrothermale Quellen) in den Blickpunkt rücken.

Abbildung 6: Aminosäurenachweis mit Ninhydrin. Somit ist das Miller-Urey-Experiment geglückt und der Beweis wurde erbracht, dass sich aus anorganischen Stoffen, welche auf der Ureerde vorkamen, Aminosäuren gebildet haben können. ©: Polina Terenteva.

Leben auf dem Jupitermond Europa?

[zurück zum Anfang](#)

Kann es Leben auf anderen Planeten des Sonnensystems oder ihren Monden geben? Einer der möglichen Kandidaten ist der Jupitermond Europa, weil dieser vermutlich unter einer ca. 15 km dicken Schicht aus Wassereis (vgl. [17], S. 381-404) einen Ozean aus flüssigem Wasser besitzt und flüssiges Wasser grundlegend für das Leben ist.

Zunächst sollen in Tab. 2 einige physische Daten von Europa aufgelistet werden, die für die Bedingungen der Entstehung von Leben grundlegend sind.

Entfernung zur Sonne	ca. 780 Millionen km (vgl. [6])
Halbachse der Bahn um Jupiter	671.100 km
Mittlerer Durchmesser	ca. 3121,6 km
Entfernung von Jupiter	ca. 670.900 km (vgl. [6])
Temperatur auf der Oberfläche	ca. -160°C am Äquator und ca. -220 °C an den Polen (vgl. [8])

Tabelle 2: Physische Daten des Jupitermonds Europa.

Ein Kern aus flüssigem Eisen

Der Aufbau von Europa entspricht dem der terrestrischen Planeten. Es befindet sich daher vermutlich ein noch flüssiger Eisen- oder Eisensulfidkern im Inneren von Europa (vgl. [10], S. 2019-2022). Diese innere Wärmequelle ist eine wichtige Voraussetzung für flüssiges Wasser und die chemischen Reaktionen zur Synthese von Aminosäuren. Zur Erwärmung trägt auch die ständige Gezeitenverformung des Mondes im Gravitationsfeld von Jupiter bei.

Der subglaziale Ozean auf Europa



Abbildung 7: Künstlerische Darstellung der Dampffontänen auf Europa. ©: NASA/ESA/K. Retherford / SWRI <http://www.nasa.gov/content/goddard/europa-water-vapor-plume/>; see also <http://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA17659>, Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30126639>.

Aufnahmen mit dem Weltraumteleskop Hubble lieferten überzeugende Beweise dafür, dass sich unter der Eiskruste Europas ein subglazialer* Ozean verbergen könnte, dessen Tiefe ca. 100 km beträgt (vgl. [9], S. 381-404). Abb. 7 zeigt in künstlerischer Darstellung Dampffontänen, die aus der Eiskruste nahe dem Südpol des Mondes strömen (vgl. [7]). Forscher vom Southwest Research Institute San Antonio konnten mit Hilfe von Hubble-Daten zudem feststellen, dass es sich um Wasserdampf (H₂O) handelt (vgl. [7]). Man vermutet, dass die Fontänen eine Verbindung durch die Eisschicht zu einem Ozean haben oder in den Eisschichten durch Reibung entstehen. (vgl. [7]).

Für die Eignung von Europas Ozean als möglicher Ort der Entstehung von Leben spricht der Umstand, dass es Organismen auf der Erde gibt, die in subglazialen, kalten Gewässern entstehen und überleben können und dazu kein Sonnenlicht brauchen, z. B. Bakterien in subglazialen Seen in der Antarktis. Zum Überleben gewinnen sie Energie und Nährstoffe aus chemischen Grundstoffen (vgl. [7]).

Hydrothermale Quellen

Außerdem können sich am Grund des Ozeans Schwarze bzw. Weiße Raucher als hydrothermale Quellen befinden (vgl. [12] und [13]), die zu einer punktuellen Erwärmung des Ozeans auf Europa beitragen. Diese Raucher kommen oft in Ozeanen auf der Erde vor. Aus ihnen tritt über 300 °C heißes (vgl. [14]) Wasser aus und mischt sich mit dem kalten Wasser des Meeresgrundes. In der Umgebung von hydrothermalen Tiefseequellen auf der Erde bildet sich oft ein Biotop. Deshalb sehen die Forscher eine Möglichkeit der Lebensentstehung in der Nähe zu den vermutlichen Rauchern auf Europa.

* unter dem Eis

Chemische Stoffe auf Europa

[zurück zum Anfang](#)

Nun betrachten wir Europa hinsichtlich seiner Stoffzusammensetzung auf der Oberfläche und im Ozean wie auch in der Atmosphäre.

Es wurden Natrium (Na) und Kalium (K) auf Europa nachgewiesen (vgl. [15]). Diese Stoffe wie auch Chlor können sich auch in dem Ozean in einer hydratisierten Ionenform ($\text{Na}^+_{(\text{aq})}$, $\text{K}^+_{(\text{aq})}$, $\text{Cl}^-_{(\text{aq})}$) befinden. Der Ozean könnte also ein erdähnliches salziges Meer sein (vgl. [16]).

- Natrium- bzw. Kaliumionen bilden zusammen mit Chlorid-Ionen Natriumchlorid (NaCl , siehe auch Abb. 8) und Kaliumchlorid (KCl):

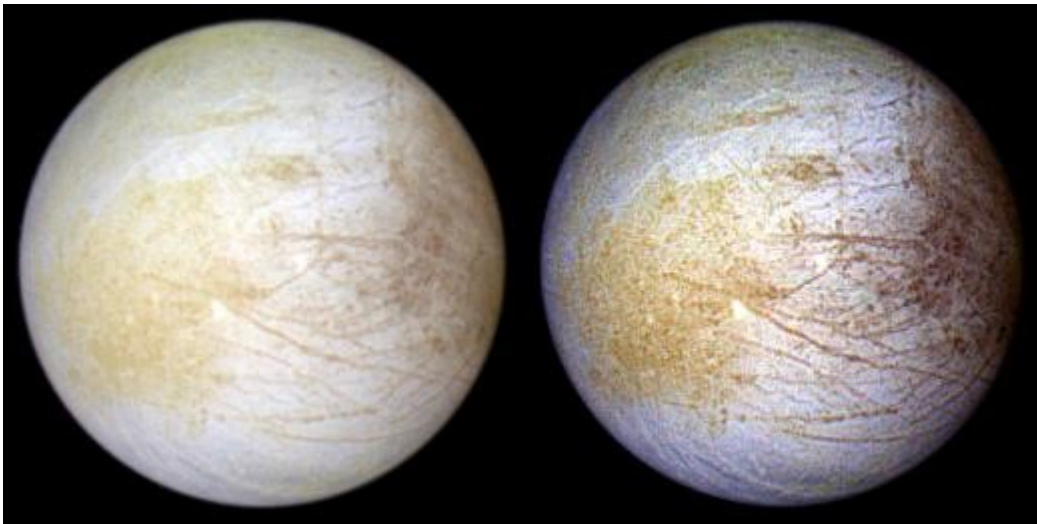
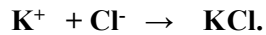
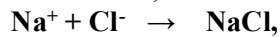
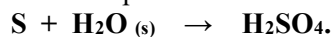


Abbildung 8: Aufnahmen der Raumsonde Galileo. Die gelben Gebiete auf Europa könnten mit Kochsalz erklärt werden. Die rötlich-braunen Stellen hängen womöglich mit Schwefelverbindungen zusammen. ©: NASA/JPL/University of Arizona.

Die rötlichen bis bräunlichen Streifen auf Europas Oberfläche (siehe Abb. 8) hängen eventuell mit Schwefel zusammen, der vom Jupitermond Io kommt (vgl. [15]). Io ist der vulkanisch aktivste Himmelskörper des Sonnensystems, der aus über 300 aktiven Vulkanen auch Schwefel in den Weltraum schleudert und dabei auch Europa treffen kann (vgl. [16], S.1).

- Auf Europa würde Schwefel mit Wassereis zu Schwefelsäure reagieren (vgl. [15]):



Mit Hilfe von Messungen mit einem Infrarot-Spektrometer des Keck-Teleskops auf Hawaii wurde das von der Europa-Oberfläche reflektierte Licht untersucht und es konnten geringe Spuren von Schwefelsäure nachgewiesen werden [34]. Die Schwefelsäure könnte dann als Katalysator bei der Synthese von Aminosäuren und anderen organischen Verbindungen wirken.

Es fand sich auch der „spektrale Fingerabdruck“ einer als Bittersalz bekannten Magnesiumsulfat-Verbindung. Da bei der Entstehungsreaktion von Magnesiumsulfat aus Magnesium und Schwefelsäure Wasserstoff entsteht, könnte man vermuten, dass auf Europa auch Wasserstoff vorkommt. Dies wäre noch eine Ähnlichkeit zu den Bedingungen auf der Erde, denn es gab dort auch Wasserstoff.

- $\text{Mg} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{MgSO}_4 + \text{H}_2.$

Im Europa-Ozean, welcher sehr wahrscheinlich Chlor, bzw. Chlorid-Ionen (Cl^-) enthält, könnte zudem noch die Synthesereaktion eines anderen Magnesiumsalzes ablaufen, zum Beispiel von Magnesiumchlorid (MgCl_2):

- $\text{Mg}^{2+} + 2\text{Cl}^- \rightarrow \text{MgCl}_2.$

[zurück zum Anfang](#)

Kaliumchlorid, Natriumchlorid, Magnesiumchlorid, Wasser(dampf), Magnesiumsulfat und Schwefelsäure sind nicht die einzigen Stoffe in Europas Atmosphäre. NASA-Forscher wollen mit Hilfe des **James-Webb-Weltraumteleskops** im Infrarotbereich spektroskopisch nach Stoffen suchen (siehe Abb. 9), die in der Urerdatmosphäre vorkamen. Dies sind Wasser (H_2O), Kohlenstoffdioxid (CO_2), Kohlenstoffmonoxid (CO) und Methan (CH_4). Theoretisch könnten aus diesen Stoffen Aminosäuren synthetisiert werden.

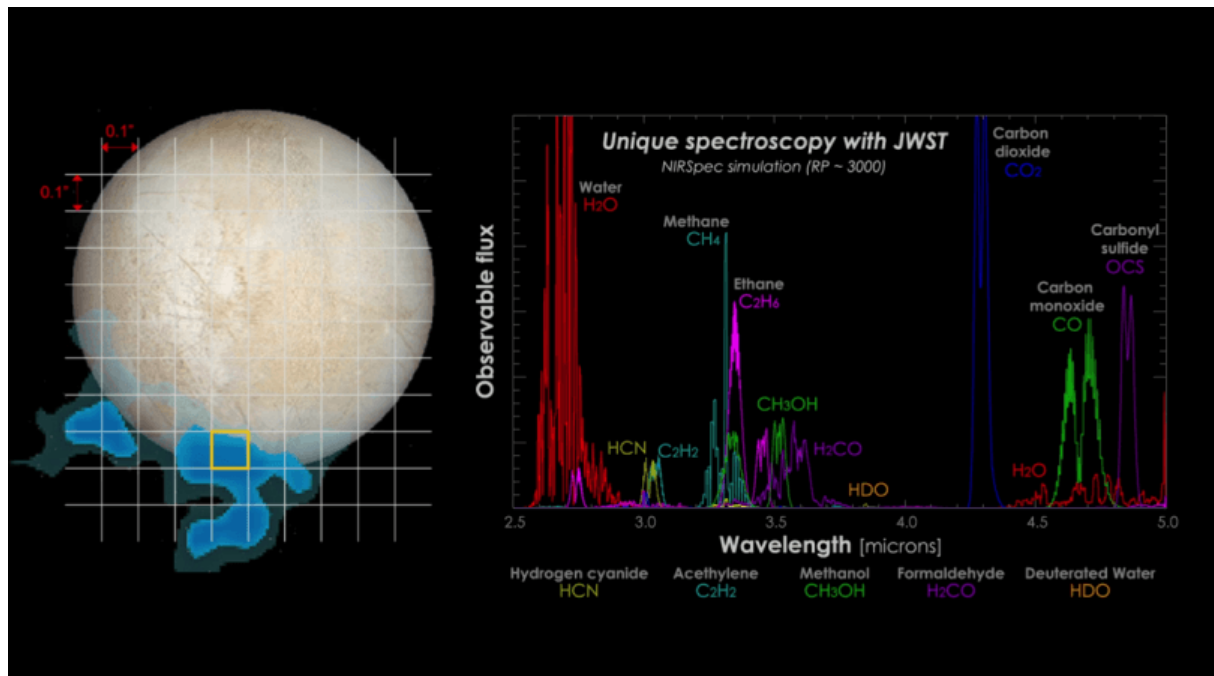


Abbildung 9: So könnten das Infrarot-Spektrum der von einer Fontäne Europas ausgestoßenen Wasserwolke aussehen, welches vom James-Webb-Weltraumteleskop (JWST) aufgenommen werden soll. ©: NASA-GSFC/SVS, Hubble Space Telescope, Stefanie Milam, Geronimo Villanueva.

Die aus dem vermuteten sich im Untergrund befindlichen Ozean des Jupitermondes Europa durch Dampffontänen (siehe Abb. 6) ausgestoßenen Wolken könnten aus folgenden Stoffen zusammengesetzt sein (siehe Abb. 9): Wassereis (H_2O), Schwefelsäure (H_2SO_4), Magnesiumsulfat ($MgSO_4$), Magnesiumchlorid ($MgCl_2$), Natriumchlorid ($NaCl$), Kaliumchlorid (KCl), Cyanwasserstoff (Blausäure, HCN), Methanol, (CH_3OH), Formaldehyd (Methanal) (H_2CO), Deuterium (natürliches Isotop des Wasserstoffs, HDO), Kohlenstoffdioxid (CO_2), Kohlenstoffmonoxid (CO), Carbonylsulfid (OCS), Ethin (C_2H_2), Methan (CH_4), Ethan (C_2H_6). Diese Liste stellt bisher aber nur eine Arbeitshypothese der Wissenschaftler dar. Betrachtet man die in ihr enthaltenen Stoffe, so stellt man fest, dass sie die gesuchten Stoffe der Urerdatmosphäre enthält (H_2O , CO_2 , CO und CH_4).

Das Schulexperiment

Wir wollen nun im Chemieraum der Schule in einem großen Gefäß die vermutliche Stoffzusammensetzung des Ozeans (und der Atmosphäre) des Jupitermondes Europas simulieren und überprüfen, ob sich Aminosäuren bilden. Der Aufbau des Versuchs ist in Abb. 10 zu sehen. Dazu stellen wir im Folgenden eine Liste (siehe Tab. 3) von Stoffen zusammen, die der oben aufgeführten weitestgehend entspricht.

Ausgangsstoffe für das Simulationsexperiment

[zurück zum Anfang](#)

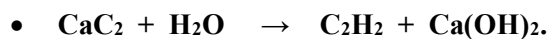
Stoff	Aggregatzustand	Volumen o. Masse
Wasser (H ₂ O)	l	0,05 l
Methanol (CH ₃ OH)	l	0,05 l
Magnesiumsulfat (MgSO ₄)	s	3g
Schwefelsäure (verdünnt)	l	0,05 l
Kaliumchlorid (KCl)	s	3g
Natriumchlorid (NaCl)	s	3g
Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	g	1,25 l
Ethan (C ₂ H ₆)	g	1,25 l
Calciumcarbid (CaC ₂)	s	3 g
Ammoniak (NH ₃)	l	0,05 l

Tabelle 3: Ausgangsstoffe und -mengen für das Experiment zur Simulation der Chemie auf dem Jupitermond Europa.

Cyanwasserstoff (Blausäure, HCN) kann aus Sicherheitsgründen nicht verwendet werden. Deshalb wird der Stoff durch Ammoniak (NH₃) als gleichwertige Stickstoffquelle ersetzt. Formaldehyd (Methanal, H₂CO), Deuterium (HDO), Kohlenstoffmonoxid (CO), Carbonylsulfid (OCS) sowie Methan (CH₄) können aufgrund der Gefahrstoffverordnung nicht verwendet werden. Dies hat aber keine Auswirkungen auf den Versuchsausgang, da die nötigen Atome in den Molekülen anderer Ausgangsstoffe vorhanden sind.

Wenn Sicherheitsanforderungen und Laborausstattung es erlauben, kann fertiges Ethin (C₂H₂) hinzugefügt werden. Alternativ dazu stellen wir Ethin im

Verlauf des Experiments durch die Reaktion von Calciumcarbid (CaC₂) und Wasser (H₂O) her:



Versuchsablauf

[zurück zum Anfang](#)

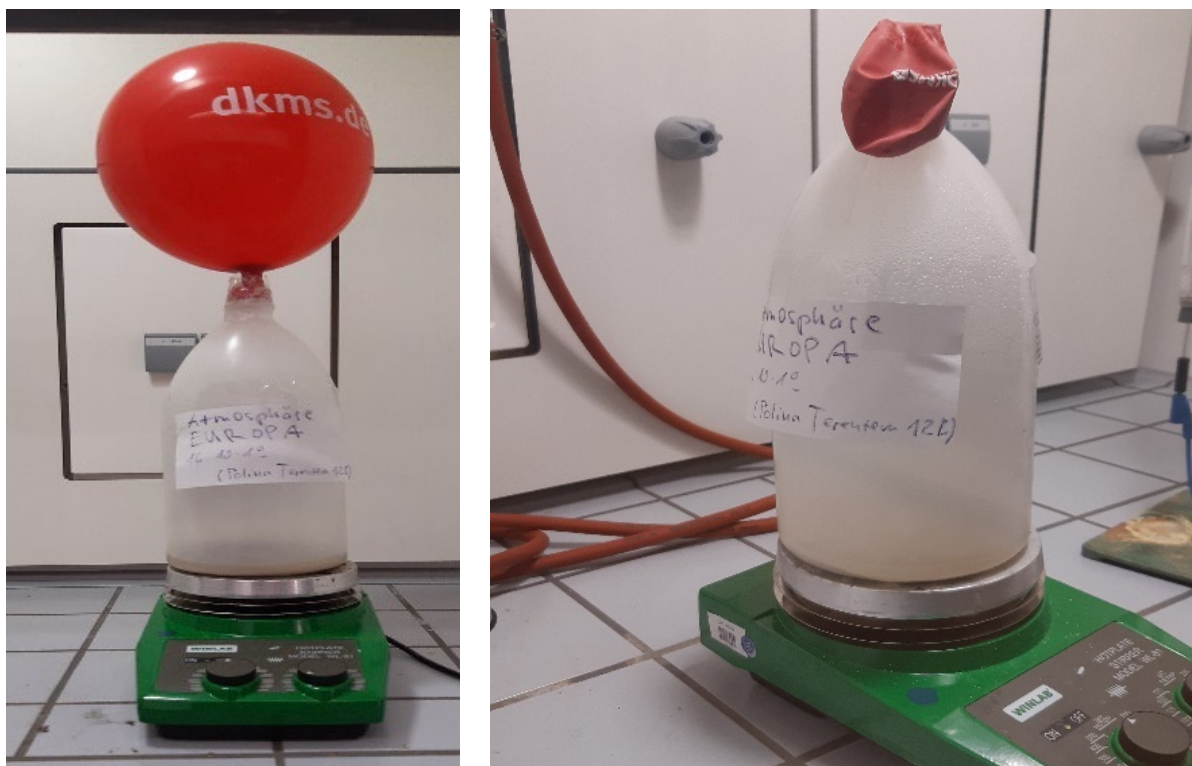


Abbildung 10: Der Aufbau des Experimentes (Versuchsteil 1) zur Simulation der Europa-Chemie, links zu Beginn und rechts am Ende des ersten Versuchsteils. Der entleerte Luftballon zeigt, dass sich die Gase im Laufe des ersten Versuchsteils in der Flüssigkeit gelöst haben. ©: Polina Terenteva.

Im Versuchsteil 1 werden Wasser, Methanol, Magnesiumsulfat, Schwefelsäure, Kaliumchlorid, Natriumchlorid, Ammoniak und Calciumcarbid werden entsprechend den Mengen in Tab. 3 in ein großes Gefäß (hier 2,5 l) gefüllt (siehe Abb. 10). Zusätzlich wird ein Magnetrührstäbchen auf den Gefäßboden gelegt.

[zurück zum Anfang](#)

Ein Luftballon (siehe Abb. 10) wird mit den Gasen Ethan und Kohlenstoffdioxid befüllt (siehe Tab. 3) und gasdicht über den Flaschenhals gestülpt. Somit wird die Gaszufuhr zu den anderen Edukten sichergestellt. Die Flasche wird auf eine **Magnetplatte*** gestellt. Ein in die Flüssigkeit eingebrachtes Magnetrührstäbchen hält diese stets in Bewegung. Dieses wird durch einen unter der Platte angebrachten rotierenden Magneten angetrieben. Dadurch simulieren wir die „umrührende“ Wirkung des Magnetfelds von Jupiter.

Im Versuchsteil 1 lassen wir die Flasche über ca. 6 Tage stehen. Während des Experiments beobachten wir die Entleerung des Luftballons (siehe Abb. 10 rechts), die Gase gehen also in die Flüssigkeit über, wo sie chemisch reagieren. Es entsteht eine trübe Lösung als Zwischenprodukt (siehe Abb. 11).

Im Versuchsteil 2 geht es darum, die Wärmezufuhr, die auf Europa durch die vermuteten Wärmequellen (allgemein: Kern aus flüssigem Eisen, speziell: hydrothermale Quellen) stattfindet, zu simulieren und so chemische Reaktionen zur eventuellen Bildung von Aminosäuren zu aktivieren. Die Flasche ist dafür schlecht geeignet, weil wir uns vor allem für die Reaktionsprodukte im heißeren Bereich, der im Experiment schon dampfförmig ist, interessieren. Daher nehmen wir für den Fortgang der chemischen Reaktion in Versuchsteil 2 bei höheren Temperaturen einen geschlossenen Destillationsapparat (siehe Abb. 11) und erwärmen die Lösung in diesem. Das Methanol verschwindet dabei nicht, da der aufsteigende Dampf mit möglichen Reaktionsprodukten durch die Abkühlung wieder flüssig wird, sodass wir das flüssige Endprodukt (das Destillat) abschließend auf Aminosäuren untersuchen können.

Während des Experiments beobachteten wir auch die Bildung von Magnesiumchlorid (MgCl_2) aus Magnesiumionen und Chloridionen:



Abbildung 11: Links. Das Ergebnis des ersten Versuchsteils des Experiments zur simulierten Europa-Chemie nach 6 Tagen. Rechts: Die für den zweiten Versuchsteil verwendete Destillationsapparatur. ©: Polina Terenteva.

[zurück zum Anfang](#)

Das Endprodukt, d. h. das Destillat (siehe Abb.12) wird anschließend wieder mit Hilfe von Ninhydrin auf das Vorkommen von Aminosäuren untersucht. Im vorliegenden Experiment konnte keine lila Färbung festgestellt werden, d.h., es konnten in der Lösung keine Aminosäuren nachgewiesen werden.

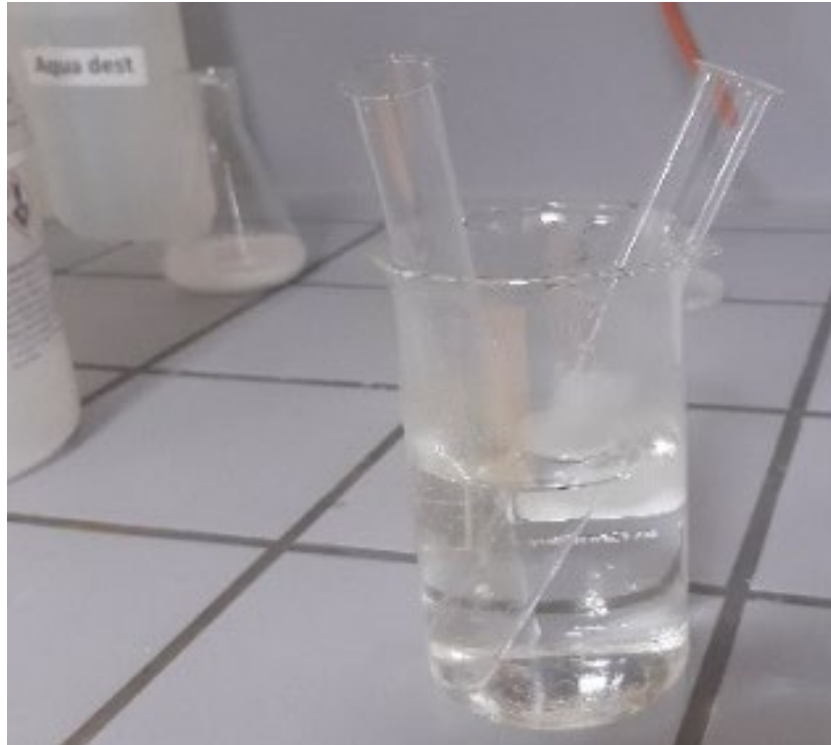


Abbildung 12: Untersuchung des flüssigen Endprodukts (des Destillats) nach dem zweiten Versuchsteil mit Ninhydrin. Leider färbte sich die Probe nicht lila, d.h., es konnten keine Aminosäuren nachgewiesen werden. ©: Polina Terenteva.

Deutung des Versuchsausgangs

Das Nichtzustandekommen der Bildung von Aminosäuren könnte folgende Gründe haben:

1. Im Unterschied zur Urerde, wo die Reaktionen mit Wasser in der Uratmosphäre, d. h. mit Wasserdampf stattfanden, ist der wesentlich Reaktionsort auf Europa der Ozean, wo mit Wasser in flüssiger Form andere Reaktionsbedingungen vorliegen.
2. Der hauptsächliche Unterschied zwischen Europa und der Urerde ist, dass es auf der Urerde Blitze gab. Diese führten zur Ionisierung der Moleküle und Atome in der Uratmosphäre. Ionen sind reaktiver als Atome und gehen die Reaktion deshalb besser ein.
Im Ozean auf Europa braucht man eine andere Quelle für die Aktivierungsenergie zur Synthese von Aminosäuren. Hier kommen mögliche hydrothermale Quellen in Spiel, die auch durch die Gezeitenwirkung Jupiters „angetrieben“ werden könnten.

Auf Europa kommen sehr wahrscheinlich Stoffe vor, die Aminosäuren bilden könnten. Auch die Wärmeenergie für die Synthese ist wahrscheinlich in tiefen Ozeanschichten vorhanden. Wenn es eine Quelle der Aktivierungsenergie gäbe, könnten dort also die entscheidenden Reaktionen stattfinden.

Europa bleibt weiterhin das Objekt der Forschung. Etwa im Jahre 2030 soll es etliche Vorüberflüge am Jupitermond Europa durch die europäische Planetensonde ‚JUICE‘ und die Sonde der amerikanischen Mission ‚Europa Clipper‘ geben. Spätestens dann werden wir der Antwort deutlich näherkommen.

Leben auf Exoplaneten

[zurück zum Anfang](#)

Mittlerweile (seit 1995) finden wir auch Planeten bei anderen Sternen (sogenannte Exoplaneten) und die Frage nach möglichem Leben dort wird für die Forschung aktuell (nachdem sie im Bereich des Science Fiction-Genres schon lange eine Rolle spielt).

Entsprechend der wichtigsten Voraussetzung, um Leben hervorzubringen, haben die Astronomen den Begriff der ‚habitablen Zone‘ geprägt. Damit meinen sie den Abstandsbereich vom Zentralstern, in welchem auf der Oberfläche eines Himmelskörpers (Planet oder Mond) flüssiges Wasser als wohl wesentlichste Voraussetzung für das Leben existieren kann. Seit 2014 spricht man gar von **superhabitablen Planeten**, Exoplaneten, auf denen bessere Bedingungen für Entstehung und Entwicklung von Leben als auf der Erde herrschen (vgl. [18]). Als Kriterien für einen superhabitablen Planeten wurden aufgestellt:

- Optimale Masse für Plattentektonik: ca. 2 Erdmassen (vgl. [19], S. 890-891),
- Radius: ca. 1,2 – 1,3 Erdradien (vgl. [19] S. 890-891),
- Abstand zum Stern: im Zentrum seiner habitablen Zone (vgl. [21], S. 54-59),
- größere Schwerkraft und dichtere Atmosphäre (wegen höherer Masse, vgl. [20]),
- höherer Gehalt an Treibhausgasen ([vgl. [21], S. 59),
- höherer Oberflächenanteil an flüssigem Wasser als bei der Erde (vgl. [22], S. 327-329).

Planeten des Trappist-1-Systems

Möglicherweise sind die Planeten des Trappist-1-Systems superhabitabel. Deren Zentralstern ist Trappist-1 a (siehe Tab. 4).

Entfernung von der Erde	40 Lichtjahre (sehr nahe zur Erde) [vgl. [23]]
Masse	ca. 0,08 Sonnenmassen
Radius	ca. 0,11 Sonnenradien
Oberflächentemperatur	2238°C (vgl. [24], S. 3577-3597) (kühler als die Sonne)

Tabelle 4: Daten des Sterns Trappist 1 (siehe auch Abb. 13). <https://de.wikipedia.org/wiki/Trappist-1> (23. 07. 2021).

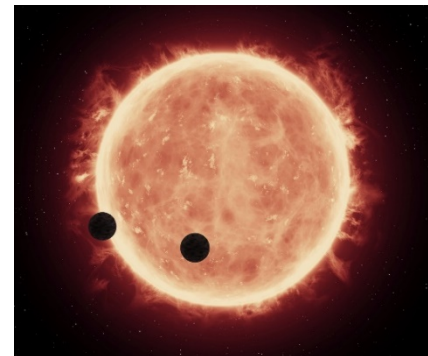


Abbildung 13: Künstlicher Darstellung des Durchlaufs zweier Planeten des Trappist-Systems vor dem Mutterstern Trappist-1a. ©: NASA, ESA, and G. Bacon (STScI).

Der Stern Trappist 1 ist extrem aktiv und sendet große Mengen an hochenergetischen Protonen aus (vgl. [26]). Diese könnten die nötige Aktivierungsenergie für die Bildung von Aminosäuren liefern (was auf der Erde vor allem die Blitze taten).

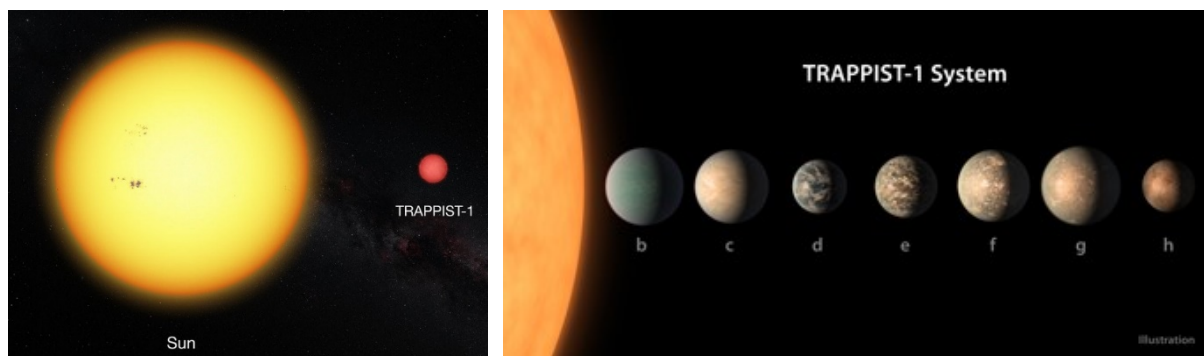


Abbildung 14: Links: Größenvergleich Trappist-1 a und Sonne ©: ESO - <http://www.eso.org/public/images/eso1615e/>, CC-BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=48532941>. Rechts: Die schematische Darstellung des Planetensystems Trappist-1. ©: Von NASA/JPL-Caltech - Catalog page · Full-res (JPEG · TIFF), Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=56513807>.

Die Planeten des Systems Trappist-1

[zurück zum Anfang](#)

Sieben nahezu erdgroße Exoplaneten (Trappist-1 b bis Trappist-1 h) umlaufen den Stern Trappist-1 a (vgl. [26]). Die schematische Darstellung des Planetensystems ist in Abb. 14 zu sehen. Die Entfernung der Planeten des Trappist-1-Systems zueinander beträgt ca. nur 0,01 AU (vgl. [28], S. 6689-6693). Die Forscher meinen, dass man aufgrund des geringen Abstandes geologische Objekte oder Wolken auf den Nachbarplaneten sehen könnte. Diese würden dort sogar größer als der Mond am Himmel auf der Erde erscheinen (vgl. [26]).

Der geringe Abstand zum Stern hat vermutlich dazu geführt, dass die Planeten des Trappist-Systems alle gebunden rotieren, d. h., dass immer eine Seite des Planeten zum Stern hin gerichtet ist und es daher extreme Temperatur- und Klimaunterschiede geben kann (vgl. [26]). Es ist also nicht auszuschließen, dass auf einer Seite der Planeten die Voraussetzungen für die Lebensentstehung vorhanden oder besser entwickelt sind als auf der anderen.

Die Planeten Trappist-1 e-g

In der Tab. 5 sind die physikalischen Eigenschaften der besonders interessanten Exoplaneten Trappist-1 e-g aufgelistet. Auch ausgehend von den physikalischen Eigenschaften werden in Tab. 6 Schlussfolgerungen aufgeführt.

	Entfernung von Trappist-1 a ([31])	Gleichgewichtstemperatur in °C ([24])	Masse in Erdmassen ([31])	Radius in Erdradien ([31])	Gravitationskraft in Vielfachen der Gravitationskraft auf der Erde ([31])	Dichte in Erddichten ([31])
e	0,02928285 AU (4,38 Mio. km)	-27,05 ± 3,50	0,772+0,079 -0,075	0,910+0,026 -0,027	0,930+0,063 -0,068	1,024
f	0,03853361 AU (5,76 Mio. km)	-58,65 ± 3,00	0,934+0,080 -0,078	1,046+0,029 -0,030	0,853+0,039 -0,040	0,816
g	0,04687692 AU (7,01 Mio. km)	-78,65 ± 2,70	1,148+0,098 -0,095	1,148+0,032 -0,033	0,871+0,039 -0,040	0,759

Tabelle 5: Physikalische Eigenschaften der Exoplaneten Trappist-1 e - g.

	Lage	Besonderheit
e	direkt in der habitablen Zone	möglicherweise ein eiserner Kern (vgl. [23])
f	äußerer Rand der habitablen Zone	vermutlich dünne Atmosphäre, keine schweren Moleküle (vgl. [23]) möglicherweise eine Ozeanwelt mit Eiskruste auf der sternabgewandten Seite → Ozean als Gemeinsamkeit mit der Uerde
g	äußerer Rand der habitablen Zone	möglicherweise dünne Atmosphäre (vgl. [23]), die sich mit der Zeit entwickelt, könnte Eisschicht besitzen (vgl. [23]), möglicherweise erdähnlich → optimale Temperaturen für das Leben

Tabelle 6: Lage und Besonderheiten der Exoplaneten Trappist-1 e - g.

Drei von sieben Exoplaneten - Trappist-1 e, Trappist-1 f und Trappist-1 g - befinden sich also in der habitablen Zone des Trappist-1-Systems (vgl. [29] und [30]). Diese Aussage wird deshalb gemacht, weil flüssiges Wasser unterhalb der Oberfläche, die eher noch eisig ist, vermutet wird.

Eine hochgenaue Dichtebestimmung führte in Kombination mit Modellrechnungen zur Zusammensetzung der Exoplaneten zur erstaunlichen Aussage (siehe [32]), dass 5 % der Masse aller drei Planeten in flüssiger Form vorliegt. Dies ist 250-mal mehr als bei der Erde, welche nur 0,02 % der Masse in Wasserform hat (vgl. [23]). Ein höherer Wasseranteil als auf der Erde ist einer der wichtigsten Voraussetzungen für einen superhabitablen Planeten.

[zurück zum Anfang](#)

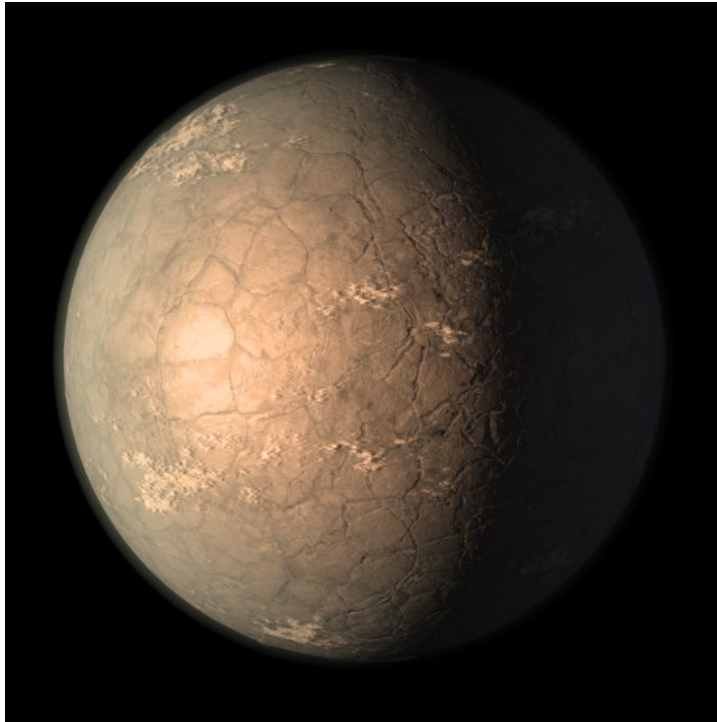


Abbildung 15: Künstlerische Darstellung des Exoplaneten Trappist-1 g.
©: NASA/JPL-Caltech - Cropped from: PIA22093: TRAPPIST-1 Planet Lineup - Updated Feb. 2018, Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=76364489>.

Die Planeten des Trappist-1-Systems befinden sich im Vergleich zu anderen Planetensystemen sehr nah an ihrem Stern. Dies, wie auch die anfangs schon erwähnten geringen Abstände untereinander führen dazu, dass sie einer starken Gezeitenwirkung ausgesetzt sind (man denke an das System Erde-Mond), welche vulkanische Prozesse schüren könnte. Diese würden lokal für Erwärmung und damit eine Bedingung für die Bildung von Aminosäuren und anderen organischen Verbindungen sorgen (vgl. [26]).

Im Falle von Trappist-1 g vermuten die Forscher, dass sich dort mit der Zeit eine Atmosphäre entwickelt haben könnte. Ähnlich wie auf der Erde könnte Kohlenstoffdioxid (CO₂) im Zusammenhang mit austretendem Magma freigesetzt worden sein oder noch werden (vgl. [26]).

CO₂ ist ein Treibhausgas, dass die Erwärmung des Planeten befördern

würde. Dadurch könnten Temperaturen erreicht werden, die für flüssiges Wasser und Synthesereaktionen zur Produktion der für das Leben nötigen Moleküle ausreichen. Die vom Mutterstern kommenden Protonen (eine Teilchenstrahlung) könnten dabei die Aktivierungsenergie für die Reaktionen liefern.

Umgekehrt wäre der Nachweis von CO₂ in der Atmosphäre von Trappist-1g ein Hinweis auf ein heißes Magma im Inneren des Exoplaneten.

Leider ist die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre der Planeten Trappist-1 e, f und g noch unbekannt. Deshalb konnte bisher kein Experiment, das die Entstehung von Aminosäuren prüfen würde, durchgeführt werden.

Die Exoplaneten Trappist-1 e-g könnten unter der Annahme der beschriebenen Vermutungen die nötigen Temperaturen und Aktivierungsenergien zur Bildung der lebensnotwendigen Moleküle besitzen. Allerdings existieren bisher keine Erkenntnisse über die Stoffe, die dort vorkommen.

Die Zukunft wird zeigen, ob auf diesen Planeten die Lebensentstehung möglich ist. Wir brauchen Daten über die chemische Zusammensetzung ihrer Atmosphären (aber auch Hydrosphären und Lithosphären). Es gibt viel zu tun!

Quellen

[zurück zum Anfang](#)

- [1] Steffen Kutterolf GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, GEOMAR|Mobile (Bearbeitungsstand 29.06.2018):
URL: <https://www.geomar.de/de/entdecken/artikel/article/wie-alt-sind-die-ozeane/>
Aufgerufen am 18. 01. 2019 um 16:00 Uhr.
- [2] Zubryashenko E.M., Shmukov V.I., Nemukin A.Y., Polyakova N.V., VGPU „Regionale physische Geographie. Die Erdklimata: lern-methodisches Lehrbuch“ Teil 1, Voronezh, Russland (2007).
(Orig. Зубряшенко Е.М., Шмыков, В.И., Немыкин А.Я., Полякова Н.В., ВГПУ «Региональная и физическая география. Климаты земли: учебно-методическое пособие» Часть 1, Воронеж (2007)).
- [3] Karta Slov: „Die Bedeutung des Ausdrucks „Die Ursuppe“ “ (Orig. Карта Слов: «Значение словосочетания «Первичный бульон» »):
URL: <https://kartaslov.ru>: Search- Значение словосочетания «Первичный бульон»
Aufgerufen am 18. 12. 2018 um 14:01 Uhr.
- [4] Volhonskaya, Yelisejeva, Zubova, Perevalova, Simonyan, Stepanova nach V.N. Lavrinenko u.a. „Die Konzepte der modernen Naturwissenschaft“, Yaroslavl State University. PG Demidov Thema 3. „Die Entstehung des Lebens“, File-Archiv der Studenten StudFiles (Hinzugefügt am 17. 03. 2015) (Orig. Волхонская, Елисеева, Зубова, Перевалова, Симонян, Степанова по В. Н. Лавриненко и др. «Концепции современного естествознания», Ярославский Государственный Университет им. П.Г. Демидова Тема 3. «Происхождение Жизни», Файловый архив для студентов StudFiles: Концепция современного естествознания-КСЕ самост-Историки- Происхождение жизни.doc (Добавлен 17. 03. 2015)):
URL: <https://studfiles.net/preview/2167802/>
Aufgerufen am 19. 12. 2018 um 18:05 Uhr.
- [5] Planet Schule: Wissenspool - Experiment Verwandtschaft- Kurs: „Wir kochen uns seine Ursuppe- das Miller-Urey- Experiment“, SWR (2010):
URL: <https://www.planet-schule.de/wissenspool/experiment-verwandtschaft/inhalt/hintergrund/kurs-wir-kochen-uns-eine-ursuppe.html>
Aufgerufen am 19. 10. 2018 um 14:36 Uhr.
- [6] Elizabeth Howell „Facts About Jupiter’s Icy Moon and Its Ocean“, Space.com NASA- Space Exploration and Astronomy News (veröffentlicht am 22. 03. 2018):
URL: <https://www.space.com/15498-europa-sdcmp.html>
Aufgerufen am 15. 02. 2019 um 17:29 Uhr.
- [7] NASA, scinexx das wissensmagazin:
URL: <https://www.scinexx.de/news/kosmos/wasserdampf-fontaenen-auf-dem-jupitermond-europa/> (veröffentlicht am 13. 12. 2013)
Aufgerufen am 19. 02. 2019 um 18:39 Uhr.
- [8] Seite „Europa (Mond)“ In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie (Bearbeitungsstand 06. 09. 2019 19:48 Uhr): URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Europa_\(Mond\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Europa_(Mond))
Aufgerufen am 21. 02. 2019 um 14:47 Uhr.
- [9] Nimmo F., Manga M. „Geodynamics of Europa’s Icy Shell“, Pappalardo et al., o. O. (2009).
- [10] Anderson J. D., Schubert G., Jacobson R. A., Lau E. L., Moore W. B., Sjogren W. L. „Europa’s Differentiated Internal Structure: Inferences from Four Galileo Encounters“, Science Band 281, New York, USA (1998).
- [11] Das Periodensystem der chemischen Elemente von Uni Terra:
URL: http://www.uniterra.de/rutherford/tab_tmpe.htm
Aufgerufen am 24. 10. 2018 um 18:25 Uhr.

[zurück zum Anfang](#)

- [12] Karl Urban, „Abschied von der habitablen Zone“, Spektrum.de, URL: <https://www.spektrum.de/> (veröffentlicht am 14. 08. 2017) Aufgerufen am 05. 05. 2019 um 17:08 Uhr.
- [13] Spektrum.de: AMQ „Habitable Zone und Gezeitenheizung“, URL: <https://www.spektrum.de/> (veröffentlicht am 14. 10. 2008) Aufgerufen am 05. 05. 2019 um 19:34 Uhr.
- [14] University of Delaware: „Deep Ocean Chemistry“, URL: <https://oria.ceoe.udel.edu/the-deep-ocean/deep-ocean-chemistry/> Aufgerufen am 24. 10. 2019 um 19:32 Uhr.
- [15] Mike Brown „Sea Salt“ (Part 1), Mike Brown’s Planets, COLUMN ARCHIVE- (veröffentlicht am 01. 03. 2013), URL: <http://www.mikebrownplanets.com/2013/03/sea-salt-part-1.html> Aufgerufen am 10. 02. 2019 um 18:56 Uhr.
- [16] Florian Freistetter „Ein Ozean wie auf der Erde: der Jupitermond Europa schmeckt salzig!“, Scienceblogs.de, Astrodicticum simplex (veröffentlicht am 07.03.2013): URL: <http://scienceblogs.de/astrodicticum-simplex/2013/03/07/ein-ozean-wie-auf-der-erde-der-jupitermond-europa-schmeckt-salzig/> Aufgerufen am 14. 10. 2018 um 15:05 Uhr.
- [17] Homepage von NASA’s Webb Telescope Will Study Our Solar System’s “Ocean Worlds”, URL: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/nasa-s-webb-telescope-will-study-our-solar-system-s-ocean-worlds> Aufgerufen am 25. 09. 2019 um 17:48 Uhr.
- [18] René Heller, John Armstrong: Superhabitable Worlds. In: Astrobiology. Band 14, Nr. 1, 2014, S. 50.
- [19] Noack L., Breuer D., University of Münster, Institute for Planetology; DLR, Institute of Planetary Research, Berlin „Plate Tectonics on Earth-like Planets“, Hrsg. EPSC Abstracts Nr. 6, Münster, Berlin, Deutschland (2011).
- [20] Abel Mendez, PHL University of Puerto Rico at Arecibo „Habitable Zone Atmosphere (HZA): A habitability metric for exoplanets“ (Bearbeitungsstand 30. 06. 2012 um 11:49 Uhr): URL: <http://phl.upr.edu/library/notes/habitablezoneatmospherehzaahabitabilitymetricforexoplanets> Aufgerufen am 30. 03. 2019 um 17:38 Uhr.
- [21] Heller R., Armstrong J. „Superhabitable Worlds“, Astrobiology Band 14 Nr. 1, Hrsg. Mary Ann Liebert, Inc., New York, USA (2014).
- [22] Pierrehumbert R. T. „Principles of Planetary Climate“ Hrsg. Cambridge University Press, Cambridge, Großbritannien (2010), ISBN 978-0-521-86556-2.
- [23] Nola Taylor Redd „TRAPPIST-1 Worlds Are Rocky and Rich in Water, New Research Uncovers“, Space.com NASA- Space Exploration and Astronomy News (veröffentlicht am 05. 09. 2018): URL: <https://www.space.com/41714-water-rich-exoplanets-trappist-1-system.html> Aufgerufen am 27. 08. 2019 um 17:21 Uhr.
- [24] Delrez L., Gillon M., Triaud A. H. M. J., Demory B.-O., De Wit J., Ingalls J. G., Agoll E., Bolmont E., Burdanov A., Burgasser A. J., Carey S. J., Jehin E., Leconte J., Lederer S., Queloz D., Selsis F., Van Grootel V., Oxford Academic „Early 2017 observations of TRAPPIST-1 with Spitzer“, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 475 Nr. 3, Hrsg. Oxford University Press, Oxford, Großbritannien (April 2018), ISSN 0035-8711.

[zurück zum Anfang](#)

- [25] Homepage von ESA/Hubble „Comparison between the Sun and the ultracool dwarf star TRAPPIST-1“, URL: <https://www.spacetelescope.org/images/heic1713b/>
Aufgerufen am 10. 10. 2019 um 15:45 Uhr.
- [26] Penn State veröffentlicht von Emily Walla, Arizona Futurity.org (veröffentlicht am 21.04.2019):
URL: <https://www.futurity.org/trappist-1-exoplanets-habitable-zone-2040722/>
Aufgerufen am 29. 08. 2019 um 17:31 Uhr.
- [27] Homepage von NASA Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology
(veröffentlicht am 05. 02. 2018),
URL: <https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA22093>
Aufgerufen am 11. 10. 2019 um 16:38 Uhr.
- [28] Lingam M., Loeb A. United States National Academy of Sciences „Enhanced interplanetary panspermia in the TRAPPIST-1 system“ Proceedings of the National Academy of Sciences 114 (26), o. O. (15. 03. 2017).
- [29] Homepage von NASA exoplanet exploration: „NASA telescope reveals largest batch of Earth-size, habitable-zone planets around single star“(veröffentlicht am 21. 02. 2017):
URL: <https://exoplanets.nasa.gov/news/1419/nasa-telescope-reveals-largest-batch-of-earth-size-habitable-zone-planets-around-single-star/>
Aufgerufen am 01. 09. 2019 um 18:45 Uhr.
- [30] Homepage von NASA Jet Propulsion Laboratory „TRAPPIST-1 Planet Lineup“ (veröffentlicht am 22. 02. 2017), URL: <https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA22093>
Aufgerufen am 01. 09. 2019 um 20:25 Uhr.
- [31] Grimm S. L., Demory B.-O., Gillon M., Dorn C., Agol E., Burdanov A., Delrez L., Sestovic M., Triaud A.H.M.J., Turbet M., Bolmont É., Caldas A., De Wit J., Jehin E., Leconte J., Raymond S.N., Van Grootel V., Burgasser A.J., Carey S., Fabrycky D., Heng K., Hernandez D.M., Ingalls J.G., Lederer S., Selsis F., Queloz D. „The nature of the TRAPPIST-1 exoplanets“, Astronomy & Astrophysics EDP Sciences for European Southern Observatory, o.O. (21. 01. 2018), S. 613.
- [32] Grimm, S. et al.: eso1805 — Science Release „TRAPPIST-1 Planets Probably Rich in Water. First glimpse of what Earth-sized exoplanets are made of“
<https://www.eso.org/public/news/eso1805/>
Aufgerufen am 20. 08. 2021 um 11:00 Uhr.
- [33] Sossi, P. A. et al.: „Redox state of Earth’s magma ocean and its Venus-like early atmosphere“, in: Science Advances 25 Nov 2020: Vol. 6, no. 48, eabd1387, DOI: 10.1126/sciadv.abd1387
- [34] Fischer, P. D. et al.: „SPATIALLY RESOLVED SPECTROSCOPY OF EUROPA'S LARGE-SCALE COMPOSITIONAL UNITS AT 3–4 μm WITH KECK NIRSPEC“, in: The Astronomical Journal, 153:13 (5pp), 2017

Danksagung

Ich bedanke mich bei meinem Seminarleiter Norbert Prebeck, beim Chemielehrer Thomas Leicht und bei Prof. Dr. Elmar Junker für ihre Unterstützung bei der Arbeit an diesem spannenden Thema.

Polina Terenteva