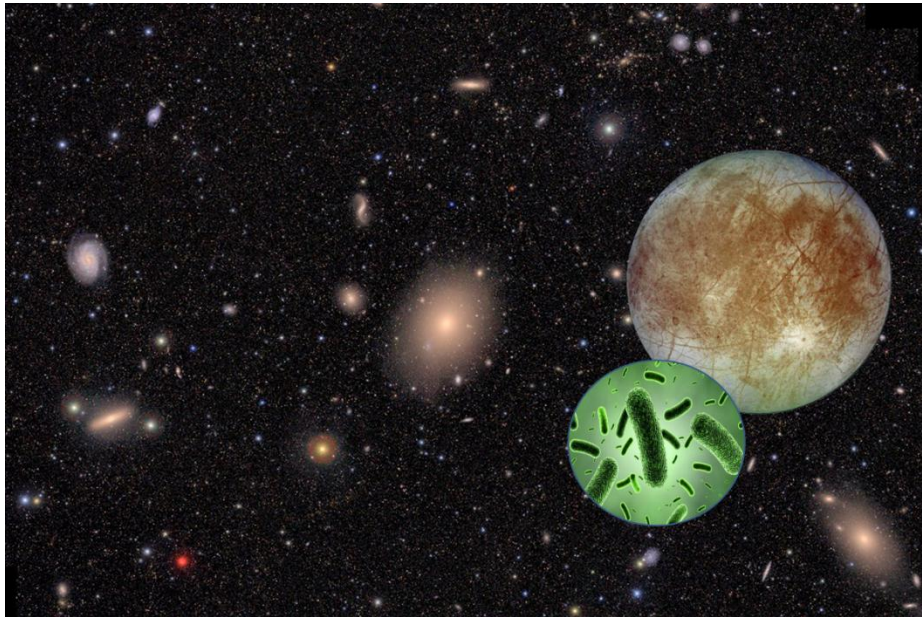


ZUSAMMENFASSUNG

Auf der Suche nach Leben jenseits der Erde.

Yvan Fischer

(für alle Abbildungen und mehr Details, siehe Vortragspräsentation im Mitgliederbereich der Geologie-Zirkel-Homepage: <https://geologie-zirkel-biberach.de/mitgliederbereich/#2025>)



[Bild: © Zusammengesetzt aus [1] [NSF-DOE Vera C. Rubin Observatory](#), [2] [ESA](#), [3] [Clipart Library](#)]

1. EINLEITUNG

Sind wir allein im Universum? Diese Frage regte schon lange die Fantasie und die Neugierde der Menschen an. Die Antwort auf diese Frage hätte aber auch tiefgreifende philosophische Implikationen für unsere Spezies, denn es geht um nichts weniger als unseren Platz im Kosmos.

Unsere Generation ist die erste in der Geschichte der Menschheit, die überhaupt in der Lage ist, die Suche nach Leben jenseits der Erde mit technischen und wissenschaftlichen Mitteln in Angriff zu nehmen. Zu diesem Zweck entstand die noch sehr junge Wissenschaft der **Astrobiologie** (z.T. auch Exobiologie genannt) – die u.a. Astronomie, Biologie und Geologie miteinander verbindet. Ganz wesentlich für die Geburt und die rasche Entwicklung der Astrobiologie war die Raumfahrt, die das Entsenden von Sonden durch das Sonnensystem und sogar Landevorrichtungen wie etwa Marsrover ermöglichte. Ebenso entscheidend waren die schnellen Fortschritte der Astronomie mit immer leistungsfähigeren Teleskopen, wie etwa dem James-Webb-Weltraumteleskop.

Eine zentrale Frage der Astrobiologie lautet aber: **Wonach suchen wir genau?** Denn die Suche nach extraterrestrischem Leben ist mit **grundsätzlichen Schwierigkeiten** behaftet. **Erstens** kennen wir bisher im Grunde **nur eine Lebensform**: denn alle heutigen Lebewesen auf der Erde sind miteinander verwandt, sprich: sie stammen von einem gemeinsamen

Vorfahren ab (LUCA = last universal common ancessor) und haben einige grundlegende Gemeinsamkeiten wie etwa die DNA als Erbsubstanz, verwenden dieselben 20 Aminosäuren und Ribosomen zur Proteinsynthese etc. Mit nur einer bekannten Lebensform, wie wollen wir allgemeine Aussagen über mögliche andere Lebensformen im Universum machen?

Zweitens weist das irdische Leben einen unvorstellbar hohen Grad an **Komplexität** auf und ist kein statischer, starrer Gegenstand, sondern es zeichnet sich durch **dynamische Prozesse** aus. Aus diesen und weiteren Gründen gibt es bis heute noch **keine einheitliche Definition des Lebens**. Dies erschwert natürlich eine genauere Festlegung dessen, wonach wir suchen.

Drittens stellen die o.g. Komplexität und der dynamische Charakter des (irdischen) Lebens eine **technische Herausforderung** dar: sollte außerirdisches Leben auch nur annähernd so komplex sein, wie wollen wir es auf die unvorstellbar großen Entfernungen des Weltraums erfassen, geschweige denn erforschen?

Viertens muss die Wissenschaft grundsätzlich offen sein; **der Fantasie sind keine Grenzen gesetzt**. Wie wollen wir aber ggfls. Lebensformen entdecken, für die wir vielleicht noch keine Konzepte haben? Anders formuliert: wie wollen wir die Nadel im Heuhaufen des Universums finden, wenn wir keine genaue Vorstellung haben, wie diese Nadel aussieht bzw. funktioniert?

Die o.g. Schwierigkeiten wirken vielleicht zunächst entmutigend und es drängt sich die Frage auf, ob es überhaupt realistische Anhaltspunkte bzw. Annahmen gibt, mit denen wir nach außerirdischem Leben suchen können. Die Antwort lautet erfreulicherweise: JA! Dies soll anhand von zwei Beispielen erläutert werden.

Beispiel 1: Das irdische Leben beruht im Wesentlichen auf **Kohlenstoff-haltigen Verbindungen**. Ist es wahrscheinlich, dass dies zumindest für manche fremde Lebensformen auch gelten könnte? Es wurde nämlich die Hypothese aufgestellt, dass **Leben auch auf Silizium-Basis vorstellbar** wäre, denn das Silizium-Atom ist – wie das Kohlenstoff-Atom – chemisch gesehen vierwertig, d.h. beide Elemente können sich mit bis zu 4 anderen Atomen chemisch verbinden. So haben die einfachen Moleküle Methan (CH_4) und Siliziumdioxid (SiO_2) eine ähnliche ‚Pyramiden‘-Struktur (sog. Tetraeder), die bei SiO_2 das Grundelement aller Silikate darstellt. Dennoch ermöglicht Kohlenstoff (aufgrund seines inneren Aufbaus) eine um Größenordnungen vielfältigere Chemie als Silizium. Dies äußert sich z.B. darin, dass man in Meteoriten und im interstellaren Raum bereits Zigtausende verschiedene Kohlenstoffverbindungen (also organische Verbindungen, die in diesem Fall ohne das Zutun von Lebewesen entstanden sind) nachgewiesen hat, während man dort nur etwas mehr als hundert Silizium-Verbindungen identifiziert hat. Deshalb ist nach unserem heutigen Kenntnisstand **Leben auf Siliziumbasis zwar denkbar, aber viel weniger wahrscheinlich als auf Kohlenstoffbasis**.

Beispiel 2: Auf der Erde ist **flüssiges Wasser eine unabdingbare Voraussetzung** für alles Leben. Ist das ein Zufall? Vermutlich nicht, denn H_2O ist nicht nur das dritthäufigste Molekül im Universum (und im Sonnensystem), sondern es stellt ein (fast) universelles Lösungsmittel dar und hat eine Reihe weiterer Eigenschaften, die für stabile Bedingungen und komplexe biochemische Prozesse besonders förderlich sind. Es ist also nicht abwegig, anzunehmen, dass die Anwesenheit von flüssigem Wasser für die Entstehung von Leben außerhalb der

Erde eine wichtige Grundlage darstellen könnte (auch, wenn man damit natürlich eine mögliche Rolle anderer Lösungsmittel nicht grundsätzlich ausschließt).

Aufgrund der obigen zwei Beispiele und weiterer Überlegungen konzentriert sich die heutige Astrobiologie zunächst auf die Suche nach folgenden Dingen:

- sog. **Biosignaturen**: z.B. **Moleküle** (oder Kombinationen von Molekülen), die nicht oder nur bedingt kosmochemisch (also im Weltraum, ohne biologische Prozesse) bzw. geochemisch (also aufgrund der Geologie von z.B. Planeten) entstehen können (solche Moleküle könnten u.a. – aber nicht ausschließlich – bestimmte Kohlenstoffverbindungen sein); oder **Strukturen**, die geologisch nicht entstehen können (z.B. Mikrofossilien).
- **Orte, wo flüssiges Wasser dauerhaft existieren kann** (Planeten, Monde und außerhalb des Sonnensystems: Exoplaneten). In diesem Zusammenhang wurde das Konzept der ‚**bewohnbaren Zone**‘ (Englisch: *habitable zone*) um die Sonne oder andere Sterne herum entwickelt. Es ist derjenige Bereich eines Sonnensystems, der weder zu nah am Stern liegt (wo es zu heiß für die Erhaltung flüssigen Wassers wäre), noch zu weit vom Stern entfernt (wo Wasser zu Eis gefrieren würde). Die Lage der bewohnbaren Zone hängt u.a. auch von der **Leuchtkraft/Oberflächentemperatur des jeweiligen Sterns** ab (wenn das ‚Lagerfeuer‘ zu groß/heiß ist, muss man sich weiter davon wegsetzen, um sich nicht zu verbrennen und, wenn es kleiner/schwächer ist, muss man näher daran, um seine Wärme zu spüren!). Die Lage der bewohnbaren Zone hängt aber auch von der jeweiligen **Planetenmasse und Beschaffenheit** ab, denn nur eine ausreichende Schwerkraft (wie etwa auf der Erde) kann auf Dauer eine Atmosphäre halten, die flüssiges Wasser an der Planetenoberfläche ermöglicht.
- sog. **Technosignaturen** bzw. intelligente Signale aus dem Weltraum, die offensichtlich ein indirekter Beweis für Leben wären. Die ‚**Search for Extraterrestrial Intelligence**‘ = **SETI** wurde in diesem Vortrag aus Zeitgründen jedoch nicht behandelt.

Anmerkungen:

Die im Folgenden ausgesuchten Beobachtungen stellen den aktuellen Stand der Forschung dar, aus Platz- und Zeitgründen konnten jedoch weitere ebenfalls interessante Befunde der Astrobiologie im Vortrag nicht behandelt werden.

Angesicht der potentiellen Bedeutung von Hinweisen auf mögliches extraterrestrisches Leben (bzw. Lebensspuren) gilt für alle aktuellen und zukünftigen Beobachtungen sicher die Devise des Astronomen Carl Sagan (1934-1996): ‚**Außergewöhnliche Behauptungen erfordern außergewöhnliche Beweise**‘ (*Extraordinary claims require extraordinary evidence*).

2. SUCHE NACH LEBEN IM SONNENSYSTEM

Die **Abstände der 8 Planeten unseres Sonnensystems von der Sonne** betragen (in Millionen km): ~58 (Merkur), ~108 (Venus), ~ 150 (Erde), ~228 (Mars), ~778 (Jupiter), ~1400 (Saturn), ~2900 (Uranus) und ~4500 (Neptun). Die 4 Gesteinsplaneten Merkur, Venus, Erde und Mars liegen also im inneren Teil des Planetensystems, während die viel größeren Gasriesen (Jupiter und Saturn) und Eisriesen (Uranus, Neptun) deutlich weiter von der Sonne entfernt

sind. Zwischen der Umlaufbahn von Mars und der von Jupiter liegt der innere Asteroidengürtel (in dem sich u.a. der Zwergplanet Ceres befindet, s.u.).

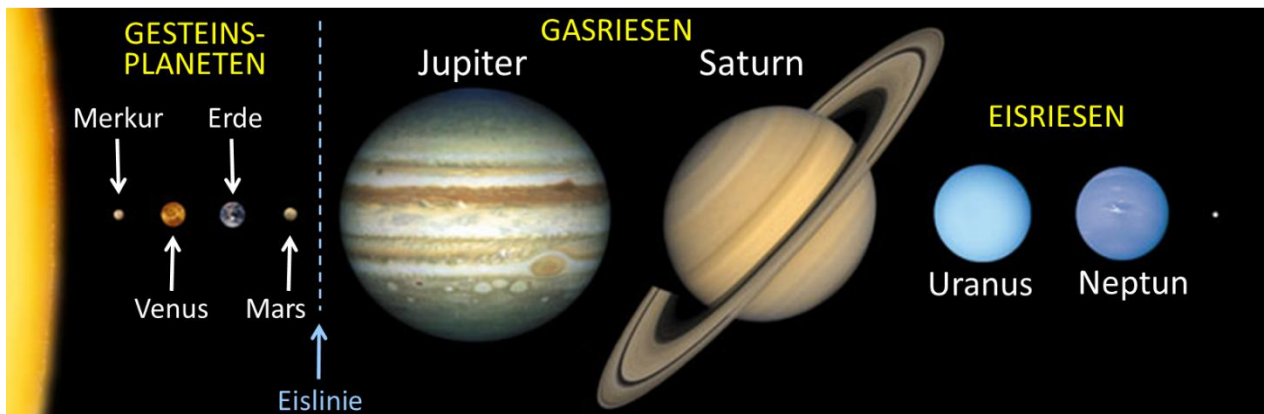


Abb. 1: Überblick über die 8 Planeten unseres Sonnensystems, maßstabgerechter Größenvergleich; links: die Sonne [Bildquelle: modifiziert nach NASA; heruntergeladen via [Wikipedia](#)]

Merkur, Venus

Nach der obigen Definition liegt nur die Erde heute eindeutig in der bewohnbaren Zone. Merkur und Venus, mit mittleren Oberflächentemperaturen von 427 °C bzw. 464 °C sind heiße, extrem trockene Welten und kommen für erdähnliche Lebensformen nicht in Frage (obwohl die Möglichkeit von lebensfreundlicheren Bedingungen in den deutlich kühleren Wolken in der oberen Atmosphäre von Venus diskutiert wird).

Mars

Der Mars ist heute ein kalter und trockener Wüstenplanet, wie wir mittlerweile aus zahlreichen Beobachtungen mit Raumsonden und auch Landevorrichtungen, inkl. fahrender Rover wissen. Der Planet hat eine sehr dünne CO₂-Atmosphäre (mit ~0.6% des Gesamtdruckes der Erdatmosphäre), zeigt nur Spuren von Wasser (als Eis) an der Oberfläche und hat eine mittlere Oberflächentemperatur von -63 °C (obwohl am Tag und am Äquator auch Temperaturen von ca. 20 °C erreicht werden können). Geologisch ist der Mars heute nur noch wenig aktiv.

Trotz dieser für Leben sicher ungünstigen Bedingungen steht der Mars im Fokus vieler astrobiologischer Untersuchungen, weil er in der entfernten Vergangenheit (vor mehr als 3 Milliarden Jahren) ein durchaus anderes Gesicht hatte. Es gibt nämlich zahlreiche aus dem Orbit schon **sichtbare Zeichen vergangener Flusssysteme**, die zeitweise oder dauerhaft flüssiges Wasser geführt haben. Auch deutliche Spuren von ehemaligen **Kraterseen** sind auf Satellitenbildern zu erkennen (z.B. im **Jezero-Krater**, siehe **Abb. 2**). Darüber hinaus deuten geochemische Analysen und morphologische Strukturen an der Oberfläche (z.B. alte Küstenlinien) darauf hin, dass auf der nördlichen Halbkugel (in den tiefliegenden ‚Low Lands‘) eine Zeit lang ein **großer Ozean** existiert haben muss (vor mehr als 3 Milliarden Jahren).

Geologische Untersuchungen **an der Marsoberfläche** mithilfe von Bodenfahrzeugen mit wissenschaftlichen Instrumenten, wie etwa NASAs **Curiosity** (im Gale-Krater) oder **Perseverance** (im Jezero-Krater) belegen ebenfalls eindeutig das Vorhandensein von

fließendem und stehendem Wasser in der Frühgeschichte des Planeten (z.B. **Flusskonglomerate**, schräggeschichtete **Sandablagerungen**, geschichtete **Tonsteine**, fossile **Rippelmarken** etc.; siehe **Abb. 3**).

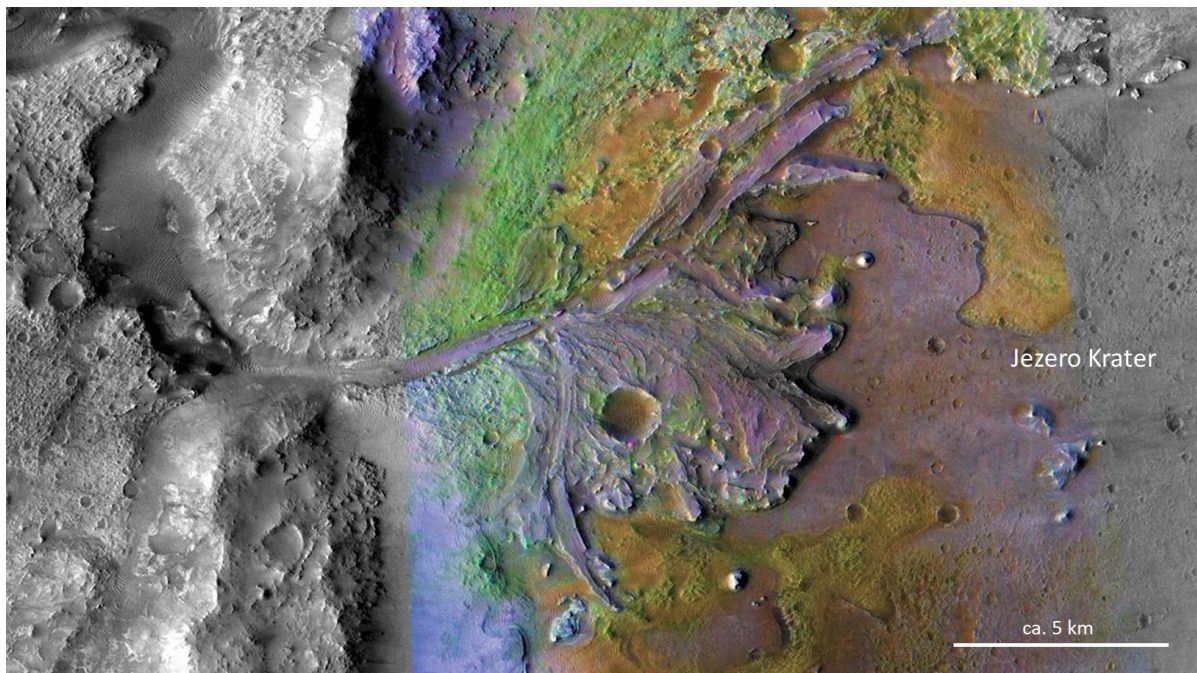


Abb. 2: Aufnahme des Jezero-Kraters aus dem Orbit, mit seinen über 3 Milliarden alten, farblich hervorgehobenen Spuren eines Flussdeltas [Bildquelle: [NASA](#)]

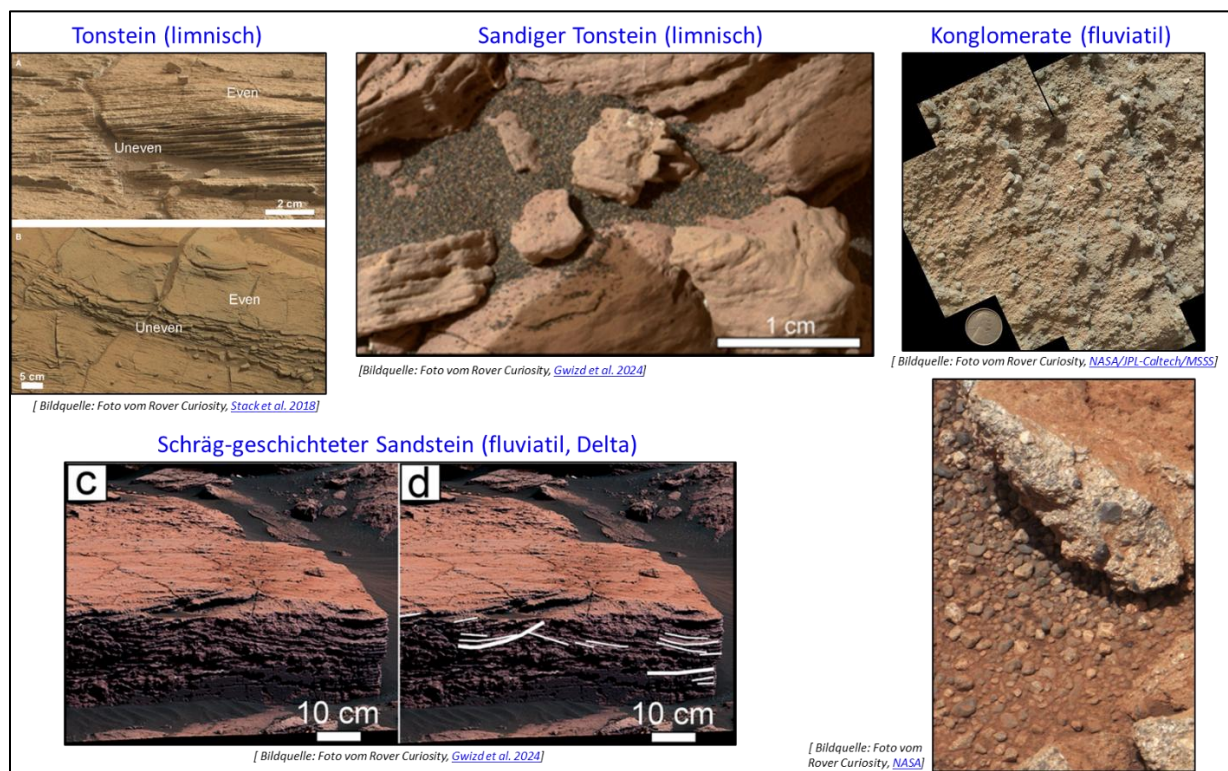


Abb. 3: Sedimentgesteine an der Marsoberfläche als geologische Spuren flüssigen Wassers (vor über 3 Milliarden Jahren) (Aufnahmen durch den Marsrover Curiosity im Gale-Krater) [Bildquellen: [Stack et al. 2018](#), [Gwizd et al. 2024](#), [NASA/JPL-Caltech/MSSS](#), [NASA](#)].

Jüngste Analysen von seismischen Daten (von NASAs Insight Lander) deuten darauf hin, dass **in der Tiefe der Marskruste** (~10-20 km unter der Oberfläche) heute noch größere Mengen flüssigen Wassers vorhanden sein könnten und zwar in Spalten und Porenräumen des Gesteins.

Was **mögliche Biosignaturen** auf dem Mars angeht, wären u.a. folgende Beobachtungen zu erwähnen.

Zunächst einmal wären Untersuchungen an einem vom Mars stammenden Meteoriten (**ALH84001**), der aus ca. 4 Milliarden Jahre altem Gestein besteht, zu nennen. Wie in den 1990er Jahren zunächst publiziert wurde, sind folgende Merkmale auffällig: der Meteorit enthält u.a. Bakterien-ähnliche Mikrostrukturen, Magnetit in einer Modifikation, wie sie auf der Erde nur von Bakterien produziert wird, sowie organisches Material. Die Interpretation diese Merkmale als potentielle Biosignatur ist aber bis heute sehr kontrovers.

Chemische Analysen aus **Bohrungen durch den Marsrover Curiosity** in 3,7 Milliarden alten Tonsedimenten im Gale-Krater haben reichlich organisches Material zutage gefördert; dieses könnte wie oben erwähnt ja auch geochemisch oder kosmochemisch – also abiotisch – entstanden sein. Allerdings findet sich in den Proben jedoch ein Hinweis auf mittelkettige Fettsäuren (C11-C13), die geo- bzw. kosmochemisch nur in geringsten Mengen entstehen können.

Noch interessanter sind die 2025 publizierten Messungen durch den Marsrover Perseverance am Rand des **Jezero-Kraters**: in der sog. **Bright Angel Formation** (die ca. 3,5 Milliarden Jahre alte Sedimentgesteine enthält) wurden millimetergroße Strukturen gefunden, sog. ‚**Leopardenflecken**‘ und ‚**Mohnsamen**‘ (siehe **Abb. 4**). Diese weisen u.a. eine Korrelation zwischen Fe^{2+} -Anhäufung und der Dichte der organischen Materie auf. Ein solches Merkmal wäre auf der Erde mit mikrobieller Aktivität assoziiert. Deshalb könnten Leopardenflecken und Mohnsamen möglicherweise eine fossile Biosignatur darstellen. Dies muss jedoch noch durch weitere Untersuchungen bestätigt werden.

Zusammenfassend hat die bisherige Marsforschung gezeigt, dass auf dem Planeten einst Bedingungen herrschten, die für ein mögliches frühes Leben günstig waren, u.a. flüssiges Wasser und weit verbreitete Sedimente mit einer passenden geochemischen Zusammensetzung (z.B. anorganische und organische Nährstoffe).

Ceres

Der Zwergplanet Ceres ist mit ca. 960 km Durchmesser der größte Körper im Asteroidengürtel zwischen der Umlaufbahn von Mars und der von Jupiter. Hochauflösende Bilder der NASA-Raumsonde Dawn haben auffällige weiße Flecken an der Oberfläche von Ceres gezeigt, die laut detaillierten Analysen **Schichtsilikate, Ca- and Na-Karbonat** (z.T. hydriert) sowie hydriertes NaCl (**Hydrohalit**) enthalten. Diese Minerale und Salze können **nur in flüssigem Wasser entstehen**. Sie müssen – wahrscheinlich in geologisch gesehen sehr junger Zeit (vor maximal 2 Millionen Jahren) – durch eine Form hydrothormaler Aktivität aus der Tiefe an die Oberfläche gelangt sein.

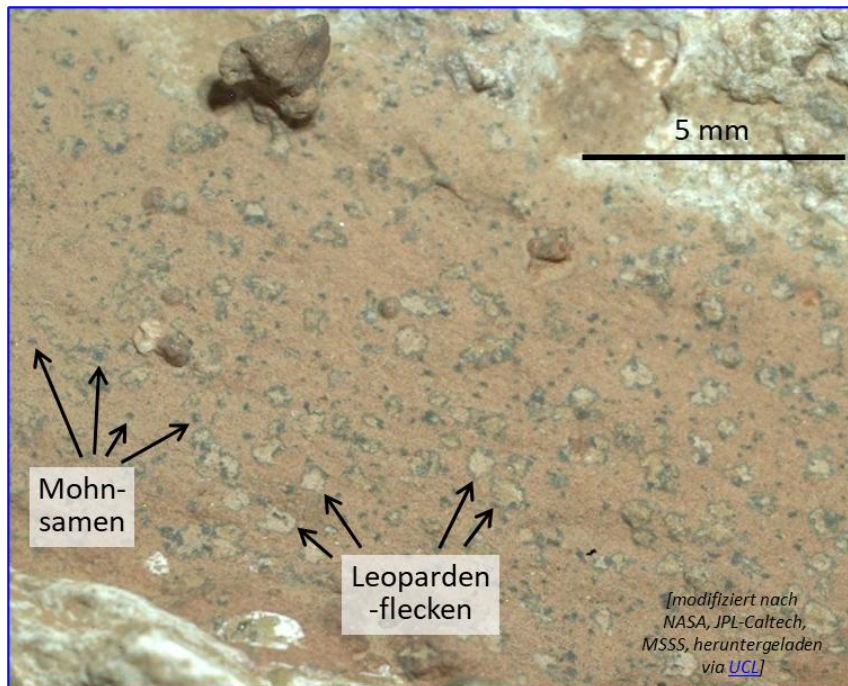


Abb. 4: ‚Mohnsamen‘ & ‚Leopardenflecken‘ in Seesedimenten am Rand des Jezero-Kraters auf Mars (in der sog. Bright Angel Formation). Aufgrund der chemischen Analyse dieser Strukturen werden sie als Hinweis auf eine mögliche Biosignatur aus der Zeit vor über 3 Milliarden Jahren, als der Mars noch flüssiges Wasser an seiner Oberfläche hatte [Foto: modifiziert nach NASA, JPL-Caltech, MSSS, heruntergeladen via [UCL](#)].

Europa (Jupiter-Mond)

Die vier innersten Monde von Jupiter – nach ihrem Entdecker ‚**Galileische Monde**‘ genannt – sind alle sehr groß und sphärisch (d.h. während ihrer Bildung durch Gravitation abgerundet und nach Kern, Mantel und Kruste ausdifferenziert): **Io** (3642 km Durchmesser), **Europa** (3130 km Ø), **Ganymed** (5262 km Ø) und **Kallisto** (4806 km Ø); zum Vergleich: Erdmond 3474 km Ø; Merkur 4881 km Ø, also kleiner als Ganymed.

Io, Europa und Ganymed liegen (mit dem gesamten Jupiter-System) aufgrund ihrer großen Entfernung zur Sonne weit außerhalb der bewohnbaren Zone unseres Sonnensystems (mit mittleren Oberflächentemperaturen um ca. -170 bis -200 °C). Sie besitzen jedoch mit den **starken Gezeitenkräften** – verursacht durch den sehr massenreichen Gasriesen Jupiter – eine **Wärmequelle**, die in ihrem Inneren deutlich höhere Temperaturen ermöglichen. So zeigt Io z.B. eine starke vulkanische Aktivität.

Europa hat einige besonders **auffällige Merkmale**: **(1)** die Wassereis-Oberfläche weist kaum Einschlagskrater auf, ist also **geologisch sehr jung** (~20 – 180 Ma; vermutl. stellenweise jünger); **(2)** Teile der Oberfläche (sog. ‚**chaotic terrains**‘) bestehen aus Eisschollen, die deutliche **Anzeichen einer Tektonik** aufweisen, die offenbar durch wärmeres, mindestens halbflüssiges Medium von unten angetrieben wird; **(3)** insbesondere die chaotic terrains enthalten u.a. **NaCl**; irgendwo unter der Oberfläche muss also flüssiges Wasser mit Gestein interagiert haben; **(4)** zahlreiche Furchen und Gräben (sog. **Lineae**), die die Mondoberfläche durchziehen, werden als **Spreizungs-Strukturen** interpretiert (cf. mittelozeanische Rücken auf der Erde); die Strukturen zeigen nämlich Anzeichen einer seitlichen Verschiebung von der Mitte aus, wo wärmeres, (z.T. flüssiges?) Material an die Oberfläche ausgetreten ist; **(5)** am Südpol von Europa wurden heute aktive **Wasserdampf-Fontänen (Kryogeysire)**

nachgewiesen; diese belegen nicht nur das Vorhandensein von flüssigem Material unter der Eisoberfläche, sondern könnten bei zukünftigen Missionen auch einen Zugang zu diesem Material aus dem Untergrund bieten; **(6)** Europas Eispanzer (also auch die Lineae) bewegt sich mit einer Neigung im Vergleich zu Mondrotation, was zeigt, dass die **Eisdecke auf ,etwas‘ schwimmt**; **(7)** Europa verursacht eine **Anomalie im Magnetfeld von Jupiter**, die nahelegt, dass unter dem Eispanzer eine salzhaltige Flüssigkeit existiert.

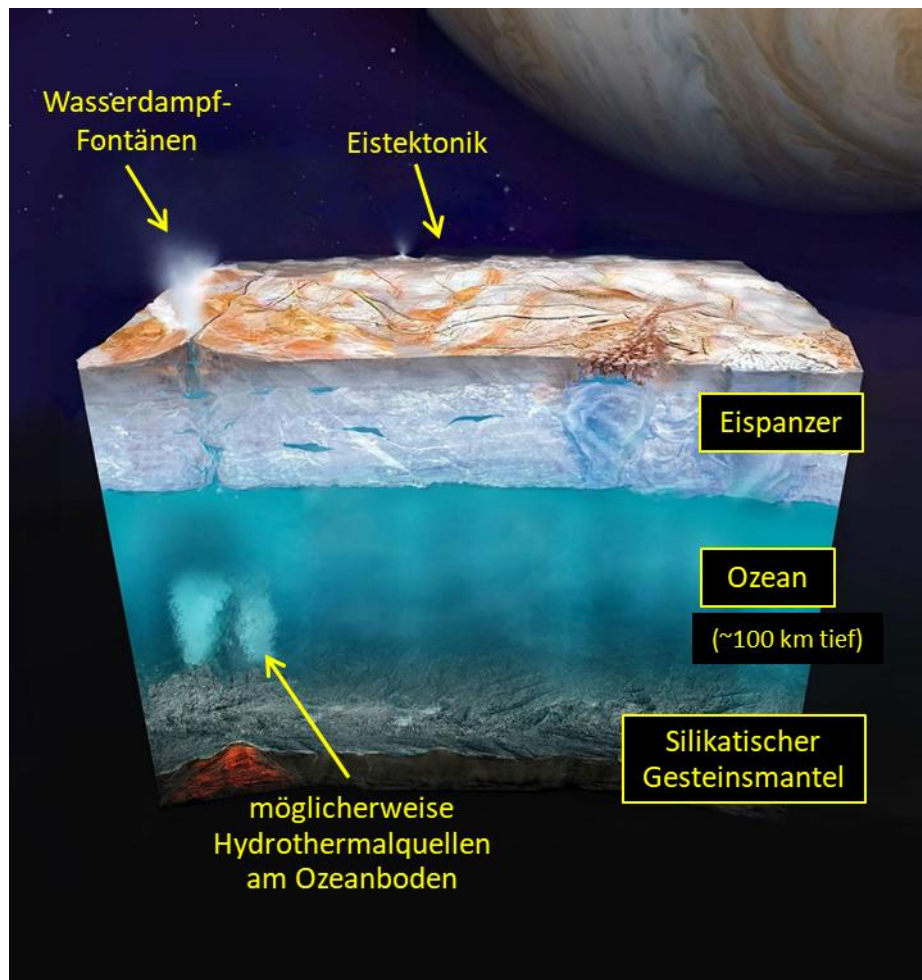


Abb. 5: Hypothetischer Schnitt durch die oberen Schichten des Jupitermondes Europa, basierend auf im Text diskutierten Beobachtungen [Bild: modifiziert nach [NASA/JPL-Caltech](#)].

Zusammengenommen sprechen alle diese Beobachtungen dafür, dass **heute** unter der Eisoberfläche von Europa **ein globaler, vermutlich ca. 100 km tiefer Ozean** liegt (s. **Abb. 5.**)

Ein tiefer Ozean wird übrigens ebenfalls unter der Eisoberfläche von Ganymed vermutet.

Enceladus (ein Mond von Saturn)

Enceladus ist mit einem Durchmesser von nur 500 km ein relativ kleiner Mond, ist dennoch sphärisch. Mit einer mittleren Dichte von $1,6 \text{ g/cm}^3$ besteht Enceladus nicht nur aus Gestein, sondern auch aus H_2O . Die mittlere Oberflächen-Temperatur beträgt ca. -200°C . Wie bei den Galileischen Monden von Jupiter (s.o.) wird Enceladus in seinem Inneren durch die Gezeitenkräfte von Saturn erwärmt. Ähnlich wie Europa weist die sehr helle Wassereis-Oberfläche kaum Einschlagskrater auf. Es gibt auch deutliche Anzeichen einer Eistektonik. Damit ist die Enceladus-Oberfläche **geologisch** insgesamt **sehr jung** ($<100 \text{ Ma}$). Am Südpol

wurden von der Raumsonde Cassini **Wasserdampf-Geysire** beobachtet (siehe [Abb. 6](#)), die von auffälligen länglichen Bodenstrukturen stammen: den sog. ‚**Tigerstreifen**‘ (Engl. ‚*tiger stripes*‘). Bemerkenswert ist, dass diese Kryogeysire Natrium-reiche Salze enthalten, die ja nur in wässrigen Lösungen entstanden sein können. Außerdem sprechen Gravitationsmessungen durch Cassini, dass unter dem Eispanzer ein flüssiger Wasserkörper vorhanden sein muss. Die Astronomen sind sich deshalb weitgehend einig, dass Enceladus unter seiner Eisoberfläche einen Ozean beherbergen muss. Darüber hinaus enthält das ausgeworfene Material der Kryogeysire Wasserstoffgas (H_2), sowie Silikat-Nanopartikel, was auf Hydrothermal-Aktivität am Ozeanboden hinweist. Organische Verbindungen wurden in den Wasserdampf-Fontänen ebenfalls nachgewiesen.

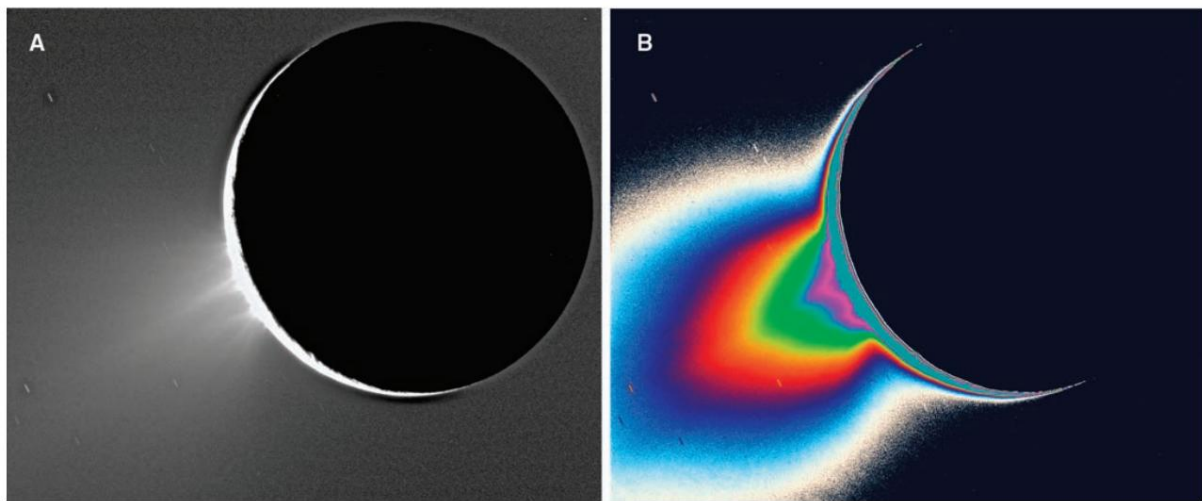


Abb. 6: Von der Raumsonde Cassini beobachtete Wasserdampf-Geysire am Südpol des Saturn-Mondes Enceladus [Quelle: [Porco et al. 2006](#)].

Alles in allem erfüllt Enceladus wichtige Grundvoraussetzungen für Leben: flüssiges Wasser, mögliche Grundbausteine des Lebens (organische Verbindungen), sowie Energiequellen und eine geeignete Geochemie (z.B. Hydrothermalaktivität). Damit wird eine weitere Erforschung dieses Himmelskörpers besonders spannend sein.

Titan (Saturn-Mond)

Im Gegensatz zu Enceladus ist Titan – wie sein Name schon andeutet – ein sehr großer Mond, ist er doch mit einem **Durchmesser von 5150 km** nach Ganymed der zweitgrößte Mond des Sonnensystems. Er hat eine mittlere Dichte von $1,9 \text{ g/cm}^3$, besitzt also neben Gestein auch leichteres Material (u.a. Wassereis und Methaneis) und – eine Ausnahme unter Monden – eine **dichte Atmosphäre** (mit einem höheren Druck als die Erdatmosphäre).

Titan zeichnet sich auch durch weitere Besonderheiten aus. Trotz der niedrigen mittleren Bodentemperatur von ca. -180°C besitzt er ein **Wettersystem**, das v.a. **durch Methan angetrieben** wird und zwar in einer ähnlichen Weise, wie Wasser das Wetter und die Erosion auf der Erde mitbedingt: auf Titan existieren große **Seen aus flüssigem Methan** (sowie Ethan und weiteren organischen Molekülen; siehe [Abb. 7](#)). Bei Verdunstung des Methans gelangt das Gas in die Atmosphäre, wo es zu Eis oder Flüssigkeit kondensiert, die als **Niederschläge** zur Oberfläche fallen. Diese Niederschläge speisen nicht nur Methanflüsse und Seen,

sondern sie **erodieren die Oberfläche** mit ihren Bergen und Sandebenen, die aus Wassereis bestehen.

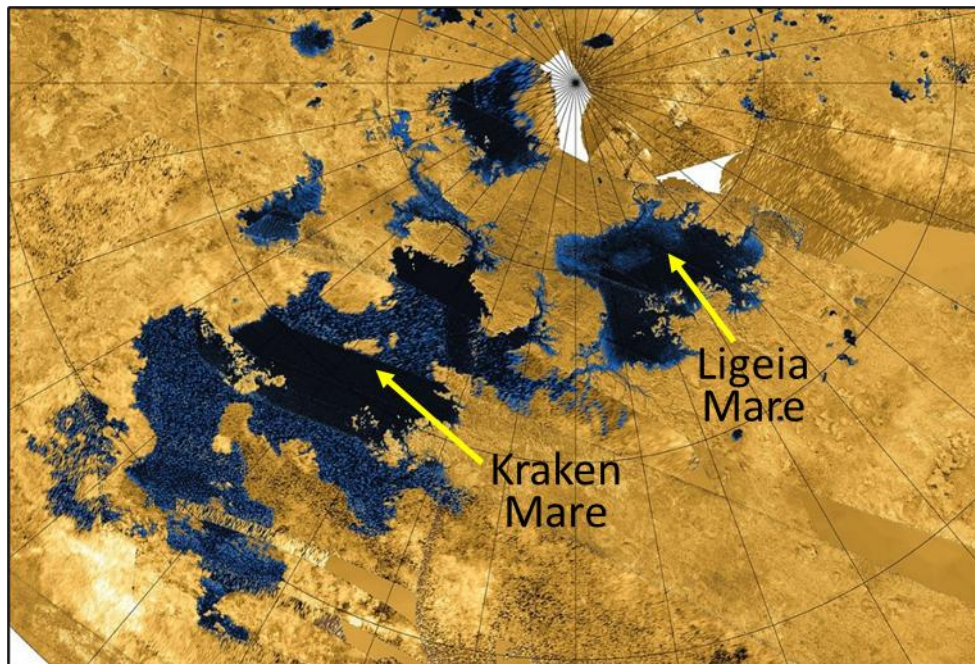


Abb. 7: Radaraufnahme der Nordpolregion des Saturn-Mondes Titan mit Seen aus flüssigem Methan und Ethan
[Bild: NASA / JPL-Caltech / Agenzia Spaziale Italiana / USGS via [Wikipedia](#)]

Aufgrund dieser Wetterprozesse weist Titan insgesamt eine Krater-freie, **geologisch junge Oberfläche** auf. Als weitere Konsequenz seiner besonderen Eigenschaften könnte Titan vielleicht – trotz seiner großen Kälte – eine Brutstätte für eine **andersartige (prä)biotische Chemie** (mit z.B. Methan und Ethan als Ausgangsprodukten) darstellen; also anders als die geo- und biochemischen Reaktionen, die wir auf der Erde kennen.

Darüber hinaus gibt es auch bei Titan Hinweise auf einen **flüssigen Wasserozean** unter der gefrorenen Oberfläche. Zusammengenommen machen alle diese Beobachtungen Titan zu einem außergewöhnlichen, hochinteressanten Ort für die astrobiologische und planetare Forschung.

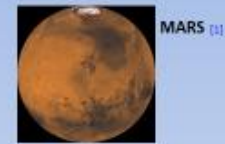
Sonnensystem: Schlussbemerkungen

Die oben erläuterten (sowie weitere) Ergebnisse sind auf **Abb. 8** kurz zusammengefasst. Eine wichtige neue Erkenntnis hieraus ist, dass die **bewohnbare Zone in unserem Sonnensystem**, also die Zone, wo flüssiges Wasser dauerhaft existieren kann, **viel größer** wird, wenn wir große Monde im äußeren Planetensystem miteinbeziehen. Dies könnte vermutlich auch für andere Sternsysteme gelten, obwohl wir z.Z. noch über keine technische Möglichkeit verfügen, sog. **Exomonde** (also Monde von Planeten außerhalb unseres Sonnensystems) zu entdecken und zu erforschen.

Zusammenfassung (Sonnensystem): Überraschende Entdeckungen der letzten ~20-30 Jahre

Neben der Erde gibt es im Sonnensystem

- einen **Planeten** mit **flüssigem Wasser** an seiner Oberfläche (in der Vergangenheit) → **MARS** (gesichert)
- einen **Planeten** mit **flüssigem Wasser** in der Tiefe seiner festen Kruste (jetzt) → **MARS** (möglich)
- einen **Zwergplaneten** mit **flüssigem Wasser / einer Sole** unter seiner Oberfläche (kürzlich oder jetzt) → **CERES** (wahrscheinlich)
- **Monde** mit **Ozeanen** unter ihrer Eisoberfläche (jetzt) → **EUROPA, ENCELADUS** (sehr wahrscheinlich); **GANYMED, MIMAS, TITAN, TRITON** (Mond von Neptun) (möglich) (und noch weitere Kandidaten, z.B. Miranda, Ariel, Pluto, Eris...)
- Zumindest manche dieser Himmelskörper verfügen oder verfügten über für Leben nutzbare **Energiequellen** und **Ausgangsstoffe** (**MARS, EUROPA, ENCELADUS, TITAN**)



[1] NASA/JPL/USGS [2] NASA/JPL-Caltech/UCIA/MPS/DLR/IDA, via astronomy.com [3] Science@NASA [4] NASA/JPL/Space Science Institute

Auf der Suche nach Leben jenseits der Erde – Yvan Fischer

9.2025

21

Abb. 8: Zusammenfassung astrobiologisch relevanter Beobachtungen der letzten Jahrzehnte im Sonnensystem.

3. SUCHE NACH LEBEN AUSSERHALB DES SONNENSYSTEMS (EXOPLANETEN)

Vorbemerkungen

Die enormen Entfernungen zwischen der Erde und den anderen Planeten (und Monde) unseres Sonnensystems machen deren Erforschung schon zu einer großen technischen und wissenschaftlichen Herausforderung. So befindet sich der äußerste Planet **Neptun** in einem Abstand von ca. **4,5 Milliarden km von der Sonne** (und damit praktisch auch von der Erde, die 150 Millionen km von der Sonne entfernt ist). Wollen wir nach Planeten außerhalb unseres Sonnensystems (sog. **Exoplaneten**) Ausschau halten und diese ggfls. erforschen, wird die Suche vielfach schwieriger. Selbst das allernächste Sternsystem, sozusagen unser direkter kosmischer Nachbar, nämlich **Proxima Centauri**, befindet sich bereits ca. **40.000 Milliarden km** von uns.

Umso beachtlicher und bewundernswerter ist es, dass es seit 1995 möglich wurde, Exoplaneten eindeutig nachzuweisen und einige ihrer Merkmale zu studieren. Die Schweizer Pioniere Didier Queloz & Michel Mayor bekamen hierfür 2019 den Physik-Nobelpreis.

Mittlerweile gibt es einige Methoden zur Identifizierung und Erforschung von Exoplaneten. Die zwei wichtigsten sollen hier erwähnt werden. Die **Radialgeschwindigkeits-Methode** macht sich die Tatsache zunutze, dass (besonders größere) Planeten ihren Stern aufgrund ihrer Schwerkraft minimal ‚tanzen‘ bzw. ‚wackeln‘ lassen, was mithilfe hochempfindlicher Teleskope und modernster Computer-Technik genau gemessen werden kann. Bei der **Transit-Methode** wird – ebenfalls mit Teleskopen – geringfügige Abnahmen der

Lichtintensität von Sternen erfasst, die um sie kreisende Planeten verursachen, wenn sie auf ihrer Umlaufbahn zwischen ihrem Stern und uns vorbeiziehen.

Mit diesen Techniken lassen sich Parameter wie Größe, Masse, Dichte, Umlaufbahn etc. von Exoplaneten ermitteln.

Erkenntnisse über Exoplaneten

Vor allem mit den o.g. Methoden ist es seit 1995 bis heute (Mitte 2025) gelungen **ca. 6000 Exoplaneten** nachzuweisen. Die Bestätigung mehrerer Tausend weiterer Exoplaneten wird in den kommenden Jahren erwartet, mit einer steigenden Tendenz. Bereits jetzt steht fest, dass das Vorhandensein von Planeten um Sterne herum die Regel ist (statistisch gesehen **besitzt praktisch jeder Stern mindestens einen Planeten**). Das bedeutet, dass allein in unserer Galaxie Hunderte von Milliarden Exoplaneten existieren müssen.

Interessant ist die Tatsache, dass es eine **große Vielfalt verschiedenartiger Exoplaneten** gibt, etwa **hinsichtlich ihrer Größe**, die von Giganten (die z.T. deutlich größer sind als Jupiter) bis hin zu Planeten, die kleiner sind als die Erde, reicht. Die Vielfalt erstreckt sich aber u.a. auch auf die – verglichen mit unserem Sonnensystem – z.T. ungewöhnliche Entfernung von Exoplaneten von ihrem Stern, etwa bei sog. **„Hot Jupiters“**, Gasriesen, die näher an ihrem Stern liegen als Merkur bei der Sonne, und damit extrem heiß sind.

Auch die **Zusammensetzung von Planetensystemen** variiert stark, mit unterschiedlichen Kombinationen und Zahlen von Gesteinsplaneten und Gasplaneten.

Dennoch lassen sich **Haupttypen von Exoplaneten** in Abhängigkeit von ihrer Größe bzw. Masse grob definieren (NB: es gibt jedoch noch kein international verbindliches System zur Klassifikation extrasolarer Planeten). So findet man z.B. Planeten, die ungefähr so massenreich sind wie die Erde, solche, die in etwa die Masse der Eisriesen Uranus und Neptun haben, sowie Gasriesen, die vergleichbar groß /massenreich oder größer sind als Saturn und Jupiter. Bemerkenswerterweise ist die zahlenmäßig größte Kategorie von Exoplaneten in unserem Sonnensystem nicht vertreten: es sind Exoplaneten mit einer Masse zwischen ca. 2x der Masse der Erde und ca. der von Uranus/Neptun: zu dieser Kategorie gehören sog. **„Supererden“** (ca. 2 – 10 x Erdmassen), sowie die sog. **„Mini-Neptune“** (auch **„Subneptune“** genannt) (ca. 10-14 Erdmassen). Es gilt aber nicht nur in unserem Sonnensystem, sondern generell die Regel, dass **kleine Planeten** wie der Mars und die Erde, sowie zumindest **ein Teil der Supererden, Gesteinsplaneten** sind, also einen hohen Anteil an Metallen und Silikaten enthalten, während **größere Planeten** – von den Mini-Neptunen aufwärts – v.a. **Eis- bzw. Gasplaneten** sind (mit einem hohen Anteil an flüchtigen Molekülen wie Wasserstoff, Helium, Wasser, Ammoniak etc.).

Exoplaneten und die Suche nach Leben im All

Die Entdeckung und Charakterisierung von Exoplaneten sind nicht nur für die Astronomie von großem Interesse, sondern selbstverständlich auch für die Astrobiologie. In diesem Zusammenhang wird bei der Untersuchung von Exoplaneten ermittelt, ob sie sich **in der bewohnbaren Zone ihres Sternsystems** befinden (definiert anhand der Leuchtkraft des jeweiligen Sterns, des Abstands der Exoplaneten-Umlaufbahn vom Stern und der Größe bzw. Masse des Planeten; Monde von Exoplaneten – also **Exomonde** – können noch nicht in diese

Definition mit einbezogen werden, da sie mit heutigen Technologien noch nicht nachgewiesen werden können, obwohl sie mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit existieren).

Welcher **Prozentsatz von Exoplaneten in der habitablen Zone** liegen (nach der obigen, klassischen Definition ohne Berücksichtigung von Monden), ist noch nicht bekannt. Schätzungen gehen allein im Hinblick auf etwa Erd-große Exoplaneten um Sonnen-ähnliche Sterne herum von ca. 20% aus. Und beim häufigsten Sterntyp (sog. **roten Zwergen**, die ca. 80% der Sterne unserer Galaxie ausmachen) könnte allein der Anteil von Supererden in der bewohnbaren Zone bei über 40% liegen. Wie dem auch sei, gilt der **Anteil an Planeten in bewohnbaren Zonen** jedenfalls als **sehr signifikant**. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass ein Exoplanet in einer habitablen Zone nicht notwendigerweise bewohnbar sein muss!

Viel Aufsehen erregte die Entdeckung des **TRAPPIST-1 Systems** als mögliches Beispiel für einen Ort, an dem man prioritär nach Lebensspuren suchen könnte. Dieses System besteht aus einem roten Zwerg als Zentralgestirn und 7 Gesteinsplaneten, die von der Größe und Dichte her mehr oder weniger erdähnlich sind (siehe [Abb. 9](#)). Drei dieser Planeten liegen dabei in der habitablen Zone. Einige der 7 Gesteinsplaneten weisen einen Wassergehalt von bis zu 5% ihres Gewichts auf (was ca. 500 Mal der Wassermenge der Erdozeane entspricht). Aus diesen Gründen wird das TRAPPIST-1 System weiterhin intensiv untersucht.

Ein wichtiger Faktor für möglicherweise lebensfreundlichere Bedingungen auf Exoplaneten ist die **Anwesenheit einer Atmosphäre** und deren Zusammensetzung. Eine Atmosphäre kann nämlich nicht nur die Oberflächentemperatur, sondern eventuell auch die jeweilige Geochemie beeinflussen. Mittlerweile ist es bei einigen Exoplaneten möglich, eine Atmosphäre nachzuweisen und zu untersuchen. Neueste Beobachtungen (Oktober 2025) weisen darauf hin, dass der Exoplanet **Trappist-1e** eine Stickstoff-haltige Atmosphäre besitzen könnte (Trappist-1e liegt in der bewohnbaren Zone des o.g. gleichnamigen Systems und ist unter den hier nachgewiesenen Planeten derjenige, der von seiner Größe und Dichte der Erde am ähnlichsten ist).

Ein weiterer Exoplanet, der unter Planetenforschern viel Aufmerksamkeit bekam, ist eine in der habitablen Zone liegende Supererde: **K2-18b**. Es handelt sich um einen Gesteinsplanet mit ca. 9 Erdmassen und einer Dichte von ca. 4 g/cm^3 . In seiner Atmosphäre wurden u.a. die kohlenstoffhaltigen Moleküle Methan und Kohlendioxid nachgewiesen. Alle diese und weitere Befunde stützen die Hypothese, dass sich auf K2-18b unter einer wasserstoffreichen Atmosphäre ein Wasserozean befinden könnte.

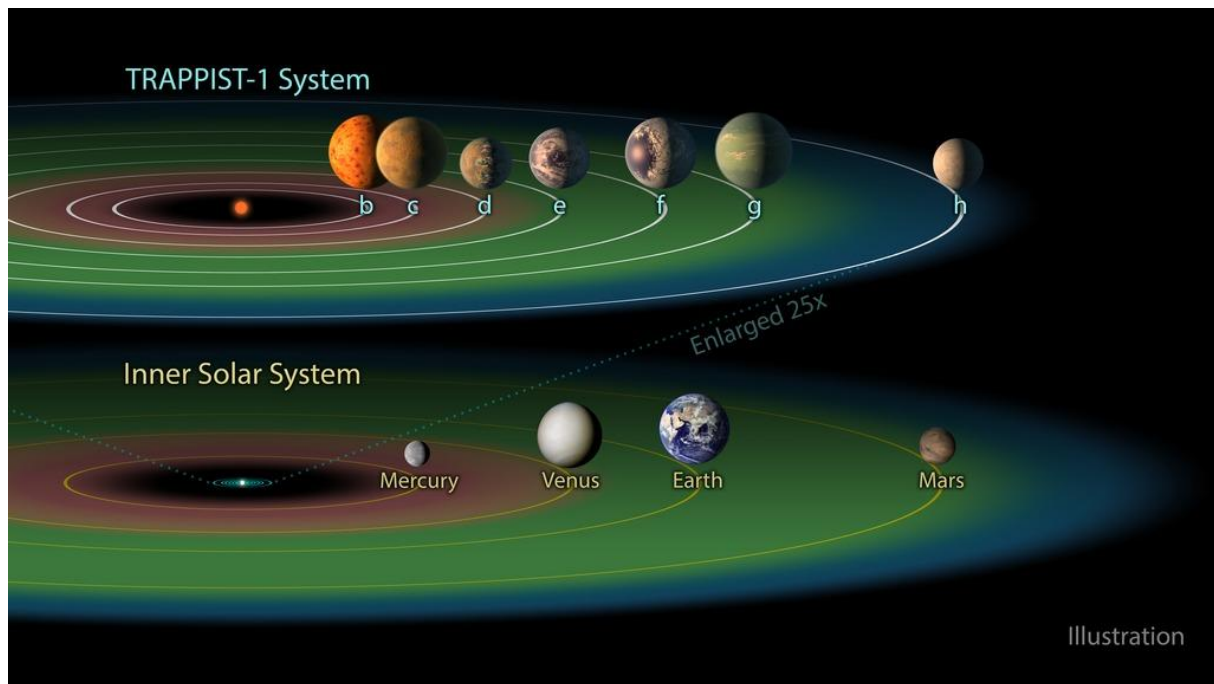


Abb. 9: TRAPPIST-1 System (oben) im Größenvergleich mit unserem Sonnensystem (unten). Dieses System besteht aus dem roten Zwergstern TRAPPIST-1 (der ca. 10 Mal kleiner ist als unsere Sonne) in seiner Mitte und 7 Gesteinsplaneten mit ungefähre Erdgröße, von denen 3 in der bewohnbaren Zone liegen (Trappist-1e, Trappist-1f und Trappist-1g). Die Darstellung der sieben TRAPPIST-1 Planeten stimmt zwar im Größenvergleich zur Erde, die Farben und Beschaffenheit von deren Oberflächen ist jedoch noch rein hypothetisch [Bild: [NASA/JPL Caltech](#)].

Umso mehr Aufsehen und Diskussionen lösten in 2025 publizierte Analysen der K2-18b-Atmosphäre, die auf die Anwesenheit von **Dimethylsulfid** (DMS) – einer auf der Erde durch biologische Prozesse gebildeten Verbindung – hinzudeuten schienen. Diese Beobachtung und ihre Interpretation als mögliche Biosignatur werden mittlerweile aus verschiedenen Gründen infrage gestellt. Sie illustrieren jedoch sehr gut, in welcher Richtung die Exoplanetenforschung sich in den kommenden Jahren entwickeln könnte und wie vorsichtig man mit solchen möglichen Signalen umgehen sollte.

SCHLUSSWORT

Die Erforschung unseres Sonnensystems mittels hochmoderner Teleskope und Raumsonden hat buchstäblich unseren Horizont erweitert und uns gezeigt, dass flüssiges Wasser und potentiell günstige (z.B. geochemische) Bedingungen für die Entstehung von Leben nicht nur auf der Erde, sondern vermutlich auch auf anderen Himmelskörpern unseres Sonnensystems möglich sind (oder waren), wie etwa auf dem Mars und einigen Monden wie Europa oder Enceladus.

Zudem stellt die Entdeckung von Exoplaneten eine wissenschaftliche Revolution dar, denn sie zeigt uns, dass Planeten in der Galaxie kein Randphänomen, sondern beim überwiegenden Teil der Sternsysteme – selbst bei Sternsystemen mit 2 oder 3 Sternen – vorhanden sind. Obwohl sicher nur ein Teil dieser Planeten in einer bewohnbaren Zone liegen werden, ist ihre Zahl buchstäblich astronomisch.

Schließlich hat auch die moderne Biologie auf der Erde die erstaunliche Fähigkeit von Lebewesen, unter extremen, ‚lebensfeindlichen‘ Bedingungen zu gedeihen, aufgedeckt. So

findet man praktisch an jedem Ort auf der Erde – ob in heißen oder stark sauren Quellen, im Eis, in der oberen Atmosphäre oder kilometerweit in der Tiefe der Erdkruste – Organismen (v.a. Mikroorganismen), die dort seit Jahrmillionen problemlos existieren können. Außerdem zeigten Experimente, dass nicht nur manche Bakterien, sondern sogar auch Tiere (wie Bärtierchen) selbst den harschen Bedingungen des Weltraums für eine Weile widerstehen können. Leben könnte also prinzipiell unter für uns Menschen sehr ungünstigen Bedingungen entstehen und gedeihen.

All dies lässt in den Augen der allermeisten Astrobiologen die Existenz von außerirdischem Leben als sehr wahrscheinlich betrachten. Jedoch muss diese Annahme noch bestätigt werden, denn bis heute kennen wir nur eine Lebensform, die irdische. Egal, wie unsere astrobiologische Suche ausgeht, unsere Erde, unsere blaue Perle im Universum ist unendlich wertvoll, denn ein ‚Planet B‘, zu dem wir Menschen umsiedeln könnten (wenn er denn existieren sollte), wird für uns aufgrund der schier unendlichen Entfernungen zwischen Sternsystemen noch für eine sehr lange Zeit (vielleicht für immer?) unerreichbar sein.

Ich möchte mit den Worten von Carl Sagan schließen: ***„The Universe is a pretty big place. If it's just us, seems like an awful waste of space“*** (Das Universum ist ein ziemlich großer Ort. Wenn es nur uns gibt, scheint es eine schreckliche Raumverschwendung zu sein).

Anmerkung: diese Vortragszusammenfassung erhebt natürlich keinen Anspruch auf wissenschaftliche Vollständigkeit, entspricht aber mit bestem Wissen und Gewissen dem allgemein akzeptierten Wissenstand zum Zeitpunkt ihrer Fertigstellung (Oktober 2025). Aus Zeitgründen wurde auf Literaturreferenzen verzichtet.