

Astrobiologie – dem Leben im Universum auf der Spur

Dirk Wagner¹, Jean-Pierre de Vera², Jasmin Joshi³, Thomas Leya⁴, Dirk Schulze-Makuch^{5,6}

¹ Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

² Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Berlin

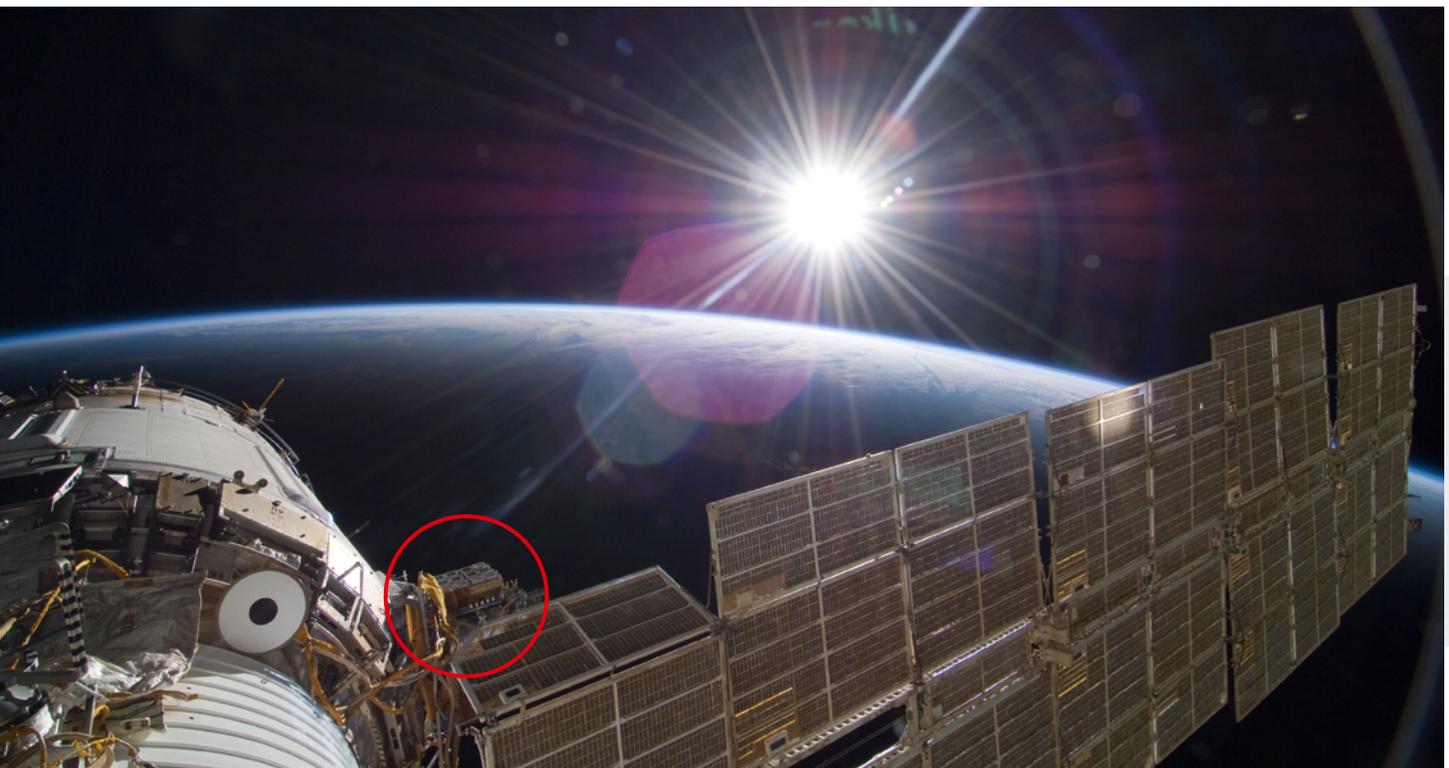
³ Universität Potsdam

⁴ Fraunhofer Institut für Zelltherapie und Immunologie (IZI-BB), Potsdam

⁵ Technische Universität Berlin

⁶ Washington State University, Pullman, USA

This article provides first insights into some of the fascinating aspects of astrobiology. The central focus of this research theme is directed towards questions which have interested humans for millennia: How has life developed? Where do we come from? Are we alone in the Universe? In order to approach these questions, astrobiology brings together a variety of disciplines such as astronomy, astrophysics, biology, biochemistry, chemistry, geology, mineralogy, and cosmology. In particular, scientists are more and more interested into the biological aspects and the interactions of (micro)-organisms with their geological environment. This interest is further fueled by numerous NASA and ESA missions to Mars that have spawned new insights into Mars as a potential habitat for life. Earth analog environments, which are characterized by conditions that occur in other parts of our solar system in even more extreme forms play an important role for astrobiological research. Examples include habitats that are characterized by extreme dryness and/or coldness such as the Atacama Desert in Chile, liquid asphalt lakes in Trinidad or the permafrost areas in Siberia. Extremophilic microorganisms such as cyanobacteria and methanogenic archaea or higher organisms such as lichens and bryophytes are used as model organisms to study the limits of life under simulated extreme conditions. In recent years, an active research network has been established in the Berlin-Brandenburg region that carried out joint astrobiology and habitability studies and which among other projects is currently conducting an ESA experiment onboard the International Space Station ISS.



In der ursprünglich als Exobiologie bezeichneten Forschung beschäftigten sich viele Forscherinnen und Forscher zunächst mit der Möglichkeit der Entstehung und Existenz von Leben außerhalb unserer Erde. Mit diesem engen Fokus provozierte die exobiologische Forschung das Vorurteil, es handle sich nicht um seriöse Wissenschaft, sondern um Science-Fiction, insbesondere da es bis heute keinen Nachweis von Leben jenseits der Erde gibt und somit im engeren Sinne der eigentliche Forschungsgegenstand fehlt. Im Gegensatz zur Exobiologie befasst sich die in den letzten Jahrzehnten entwickelte Astrobiologie als ein interdisziplinäres Forschungsthema mit fundamentalen Fragen zur Entwicklung des Lebens und den physikalischen und chemischen Bedingungen, die diesen Prozess beeinflussen. Die Astrobiologie schaut dabei nicht nur ins Universum, sondern versucht auch die Entwicklung des Lebens auf der Erde zu verstehen, um daraus Erkenntnisse für die mögliche Entwicklung des Lebens und der Suche nach möglichen Spuren außerhalb der Erde zu erlangen. Die Triebfeder dieser Forschung sind grundlegende Fragen, mit denen sich die Menschheit schon seit Jahrhunderten befasst: Wie hat sich das Leben entwickelt? Wo kommen wir Menschen her? Sind wir alleine im Universum? Um sich diesen Fragen anzunähern, bringt die Astrobiologie eine Vielzahl von Disziplinen wie Astronomie, Astrophysik, Biologie, Biochemie, Chemie, Geologie und Mineralogie zusammen. Entsprechend vielfältig sind die im Mittelpunkt stehenden Forschungsthemen:

- Ursprung des Lebens und die frühe Evolution auf der Erde
- Geo-Bio-Interaktionen auf der frühen Erde
- Überleben und Anpassung von extremophilen (Mikro-) Organismen an lebensfeindliche Umweltbedingungen auf der Erde und im Weltall
- Suche nach fossilem oder rezemtem Leben in unserem Sonnensystem
- Suche und Erforschung erdähnlicher extrasolarer Planeten
- Werkzeuge und Strategien für zukünftige Weltraummissionen zur Erkundung der Bewohnbarkeit von Planeten
- Zukunft des Lebens auf der Erde

Links: Blick auf das Swesda-Modul (links im Bild) der Internationalen Weltraumstation (ISS) mit dem großen Sonnensegel auf der rechten Seite. Der rote Kreis zeigt die Installation der Expositionsplattform „EXPOSE“ für biologische Experimente an der Außenseite der Raumstation (Foto: NASA)

Left: View of the Zvezda module (left side) of the International Space Station (ISS) with the large solar panel on the right side. The red circle shows the installation of the exposure platform “EXPOSE” for biological experiments on the outside of the Space Station (photo: NASA)

Insbesondere die biologischen Aspekte und die Interaktionen von (Mikro-)Organismen mit dem geologischen Umfeld sind in den letzten Jahren auf verstärktes Interesse der Wissenschaft gestoßen. Das Themenfeld der geologischen und biologischen Interaktionen stellt auch einen der neuen Schwerpunkte der Forschungsaktivitäten am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ dar. Dies findet seinen Ausdruck in der Etablierung einer Reihe von nationalen und internationalen Projektverbänden (u. a. DFG-Schwerpunktprogramm „Mars und die terrestrischen Planeten“, Helmholtz-Allianz „Planeten Evolution und Leben“, ESA-Projekt „BIOMEX – Biologie und Marsexperiment“). Für die astrobiologische Forschung spielen Habitate auf der Erde, die Bedingungen aufweisen, wie sie in noch extremerer Form auf anderen Planeten und Monden in unserem Sonnensystem auftreten, eine wichtige Rolle. Dazu gehören beispielsweise Habitate, die durch extreme Trockenheit und/oder Kälte gekennzeichnet sind und die sich daher als analoge Studienobjekte besonders eignen, wie beispielsweise die Atacama-Wüste in Chile, flüssige Asphaltseen in Trinidad oder der Permafrost in Sibirien, der Arktis und Antarktis. Aus diesen Habitaten wurden Mikroorganismen gewonnen, die aufgrund ihrer Anpassung an die extremen Bedingungen ihres Lebensraums als Modelle für Leben außerhalb der Erde untersucht werden.

Erd-analoge Habitate für mögliche extraterrestrische Lebensräume

Extrem-Mikrohabitate für Bakterien und Archaeen in einem flüssigen Asphaltsee

Der „Pitch Lake“ auf Trinidad, der von der Washington State University und der TU Berlin untersucht wird, ist einer von nur drei natürlich vorkommenden flüssigen Asphaltseen auf der Erde (Abb. 1). Die Wasseraktivität als ein Maß für das frei verfügbare Wasser im See liegt unter der Grenze, die Leben auf der Erde erlaubt. Trotzdem wurden dort Mikroorganismen gefunden. Basierend auf Phospholipid-Fettsäuren (PLFA) und genetischer Sequenzierung konnten über 600 bisher unbekannte Mikroorganismen identifiziert werden. Die Mikroben lagen in inselartigen Populationen vor, anscheinend adaptiert an verschiedene Nischen in der Asphaltmatrix. Im Pitch Lake leben nur Prokaryoten (einzellige Organismen ohne echten Zellkern), hauptsächlich Schwefel- und Stickstoffbakterien, während methanogene Archaeen wesentlich seltener sind (Schulze-Makuch et al., 2011). Die Mikroorganismen leben vorwiegend in ökologischen Nischen, die eine höhere Wasseraktivität aufweisen, und zwar in kleinen wasserhaltigen Tröpfchen. Eine chemische Analyse der Wasserzusammensetzung ergab eine Salzkonzentration vergleichbar mit Meerwasser. Isotopische Wasserstoff- und Sauerstoffanalysen wiesen nach, dass diese Tröpfchen aus dem tiefen Untergrund kommen. Die Vorstellung ist, dass Meerwasser unter hohem Druck



Kontakt: D. Wagner
(dirk.wagner@gfz-potsdam.de)

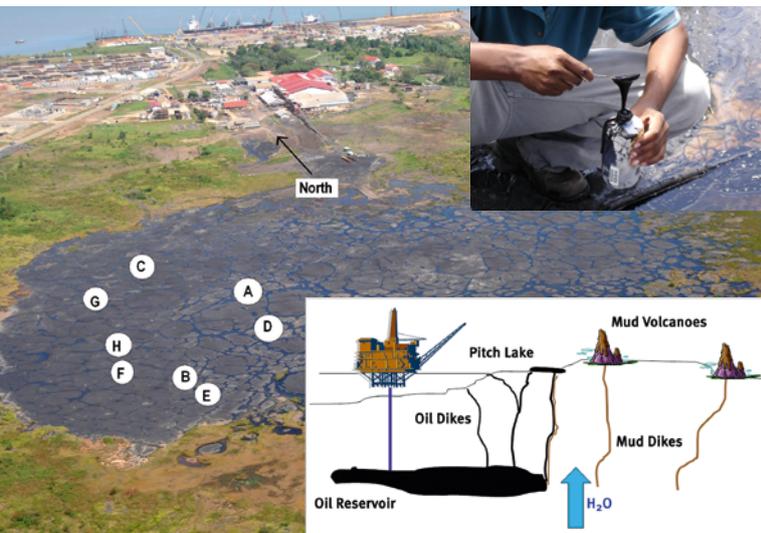


Abb. 1: Luftbild vom „Pitch Lake“ (Trinidad) mit den Beprobungspunkten. Oben rechts: Wegen der hohen Viskosität ist es schwierig mit dem flüssigen Asphalt zu arbeiten. Unten rechts: Hypothese, wie die Forschergruppe sich den Ursprung des Pitch Lake vorstellt und dessen Zusammenhang mit Schlammvulkanen (Fotos und Graphik: D. Schulze-Makuch, TU Berlin)

Fig. 1: Pitch Lake (Trinidad) as photographed from the air, including sampling points. Top right: The liquid asphalt is difficult to work with due to its high viscosity. Bottom right: Hypothesized origin of Pitch Lake with relation to nearby mud volcanoes

durch das Reservoir gepresst wird und dann eine Vermischung von Tiefenwasser und Reservoiröl stattfindet (Abb. 1B). Diese Tröpfchen stellen eigenständige kleine Ökosysteme dar, vielleicht sogar die kleinsten bekannten Ökosysteme der Erde (Meckenstock et al., 2014). Außerdem könnten diese Tröpfchen enorm wichtig für den Abbau von Kohlenwasserstoffen sein, da sie die Angriffsfläche von Kohlenwasserstoffen sehr stark vergrößern und daher zu einem viel schnelleren Abbau führen. Vom Standpunkt der planetarischen Habitabilität sind diese Umweltbedingungen eine weitere Option, unter denen Leben existieren kann – Umweltbedingungen wie sie sehr ähnlich beispielsweise auf dem Saturnmond Titan existieren könnten.

Erforschung des Trockenlimits des Lebens in der Atacama-Wüste

Im Innern der Atacama-Wüste in Chile beträgt die durchschnittliche Luftfeuchtigkeit weniger als 40% mit einem durchschnittlichen Niederschlag unter 2mm pro Jahr. Die Trockenheit auf dem Mars ist jedoch noch 2- bis 50-mal höher. Dennoch ist die Atacama-Wüste wegen ihrer Trockenheit eines der besten Mars-analogen Habitate auf der Erde (Abb. 2). Besonders geeignet ist die Atacama für die Erforschung der ökologischen Übergänge zu immer trockener werdenden Umweltbedingungen. Auch gibt es spezielle Trockenhabitate in der Atacama wie zum Beispiel Hypolithe, das sind Mikroben, die an der Unterseite von Quarzgesteinen wachsen und Mikro-



Abb. 2: Maria-Elena-Beprobungspunkt in Mars-analoger Landschaft. Unten links: Beprobungspunkt Yungay mit beschichteten Plastikfolien an einem Stab, um organische Stoffe aus der Atmosphäre für spätere Analysen zu sammeln. (Fotos: D. Schulze-Makuch, TU Berlin)

Fig. 2: Maria-Elena field site with Mars-analog landscape. Bottom left: Yungay sampling site with coated plastic foils on a stick to trap organic compounds from the atmosphere for later analysis

habitate ausnutzen, sowie halophile Mikroorganismen, die in Salzkristallen leben und durch hygroskopische Salze Wasser direkt aus der Atmosphäre aufnehmen können. Diese Anpassungsstrategien und speziellen Habitate sind sehr relevant für die Suche nach Leben auf dem Mars – falls es dort existiert. Momentan läuft ein großes Forschungsprojekt (ERC Advanced Grant HOME) unter Leitung von Prof. Dirk Schulze-Makuch mit Beteiligung des GFZ (Sektion Geomikrobiologie) und weiterer nationaler und internationaler Forschergruppen, um das Trockenlimit des Lebens in der Atacama zu bestimmen. Eine Zielsetzung ist es herauszufinden, ob die gefundene DNA in der hyperariden Zone tatsächlich biologische Spuren von stoffwechselaktiven mikrobiellen Gemeinschaften aufzeigt oder ob diese lediglich die gut konservierten Überreste abgestorbener Zellen darstellen.

Mikrobielles Leben im terrestrischen Permafrost

Permafrost auf der Erde, der überwiegend in polaren und sub-polaren Regionen vorkommt, gilt aus astrobiologischer Sicht als ein Analogon für extraterrestrischen Permafrost, weil dieser ein weitverbreitetes Phänomen in unserem Sonnensystem, wie beispielsweise auf dem Mars, darstellt (Abb. 3). Terrestrischer Permafrost ist durch extreme Klima- und Geländebedingungen gekennzeichnet. Insbesondere das saisonale Gefrieren und Tauen in der aktiven Auftauzone (active layer) führt zu ausgeprägten Gradienten in der Temperatur und Geo-

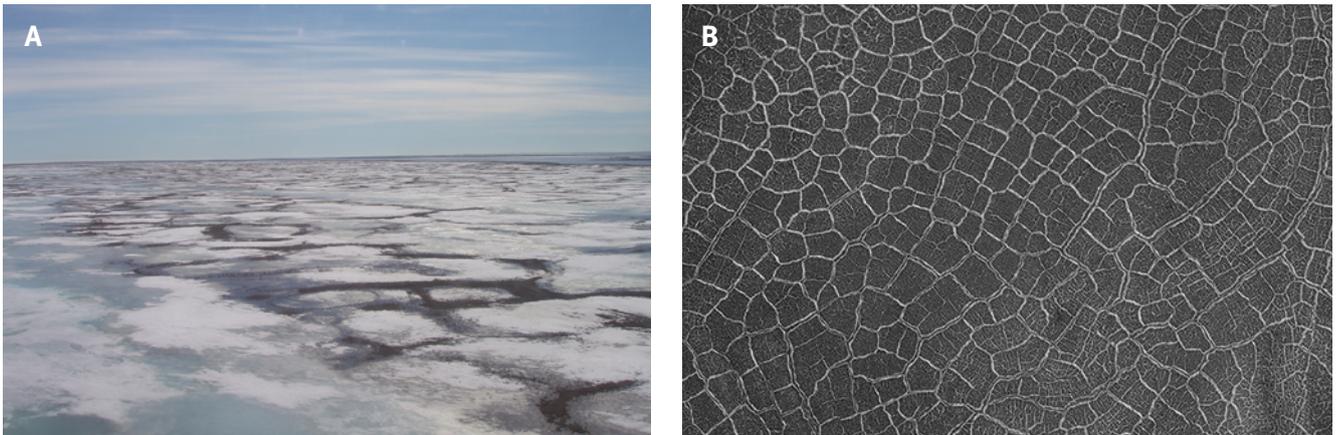


Abb. 3: Polygonale Permafroststrukturen. (A) Gefrorene Permafrostlandschaft im sibirischen Lena Delta (Foto: D. Wagner, GFZ); (B) Permafrost in der nördlichen Hemisphäre des Mars (Foto: NASA)

Fig. 3: Polygonal patterned ground. (A) Frozen permafrost landscape in the Siberian Lena Delta; (B) Permafrost in the northern hemisphere of Mars

chemie in den Permafrostböden. Dies führt wiederum zu drastischen Veränderungen weiterer, für mikrobielles Leben wichtiger Ökosystemparameter, wie beispielsweise der Salinität, des Bodendrucks, der Sauerstoffkonzentration und der Nährstoffverfügbarkeit. Mikroorganismen im terrestrischen Permafrost müssen also an eine Kombination von verschiedenen extrem schwankenden Umweltparametern angepasst sein. Trotz dieser Extrembedingungen finden wir eine hohe Diversität von Mikroorganismen, bestehend aus Vertretern aller drei Domänen des Lebens (Bakterien, Archaeen, Eukaryoten) mit einer Biomasse, die mit Mikroorganismenpopulationen in Bodenökosystemen gemäßigter Klimate vergleichbar ist (Wagner, 2008). Lebensfähige und stoffwechselaktive Mikroorganismen wurden auch in tiefen, gefrorenen und bis zu 3 Mio. Jahre alten Permafrostablagerungen in Sibirien nachgewiesen (Rivkina et al., 1998). Diese Organismen leben unabhängig vom Sonnenlicht und generieren die für den Stoffwechsel benötigte Energie aus der Oxidation von Schwefelwasserstoff, Methan oder reduzierten Stickstoffverbindungen. Sollte sich Leben auf dem frühen Mars ähnlich wie auf der frühen Erde entwickelt haben, erscheint es nicht unmöglich zu sein, dass dieses Leben in Nischen in tiefen Marsedimenten bis heute überdauert hat. Das GFZ leistet hier mit seiner Expertise im Bereich der Tiefen-Biosphären-Forschung einen wichtigen Beitrag für das Verständnis von Leben in extremen Habitaten auf der Erde und entsprechenden Habitaten außerhalb der Erde. Seit die ESA-Mission *Mars Express* 2003 erstmalig Methan in der Mars-Atmosphäre nachweisen konnte, konzentrieren sich neuere Studien auf methanbildende Mikroorganismen – sogenannte methanogene Archaeen („Urbakterien“) – aus terrestrischen Permafrosthabitaten als mögliche Kandidaten für Leben auf dem Mars.

Methanogene Archaeen als Modelle für Leben auf dem Mars

Die für die Methanbildung auf der Erde verantwortlichen Mikroorganismen werden phylogenetisch als Archaeen klassifiziert. Archaeen unterscheiden sich von Bakterien in einigen spezifischen Charakteristika, wie beispielsweise der Zellwandzusammensetzung und den Coenzymen. Bei den methanogenen Archaeen handelt es sich um streng anaerobe Mikroorganismen, die nicht in der Lage sind, Sporen oder andere Dauerstadien zu bilden. Aufgrund ihrer spezifischen Anpassung an die Bedingungen der frühen Erde (u. a. kein Sauerstoff, keine oder nur wenige organische Substrate) und ihres phylogenetischen Ursprungs, werden sie als eine der initialen Organismengruppen für das Leben auf der Erde angesehen. Sie sind weitverbreitet in der Natur und werden in hohen Abundanzen in extremen Habitaten gefunden. Methanogene Archaeen sind zu lithoautotrophen Wachstum befähigt, wobei die benötigte Energie aus der Oxidation von Wasserstoff stammt und Kohlendioxid als einzige Kohlenstoffquelle genutzt werden kann. Organische Substanzen werden also bei dieser Art des Stoffwechsels nicht als Kohlenstoffquelle benötigt.

Kürzlich aus sibirischen Permafrostböden isolierte methanogene Archaeen wie beispielsweise *Methanosarcina soligelidi* SMA-21 (Abb. 4A und 4B; Wagner et al., 2013) haben sich als erstaunlich widerstandsfähig gegenüber Austrocknung, osmotischem Stress, extrem niedrige Temperatur, Strahlung und Hunger (Nährstoffmangel) gezeigt (Morozova und Wagner, 2007). Darüber hinaus zeigte ein erstes Marssimulationsexperiment, dass methanogene Archaeen aus dem sibirischen Permafrost eine dreiwöchige Exponierung unter den simulierten thermophysikalischen Marsbedingungen schadlos überstan-

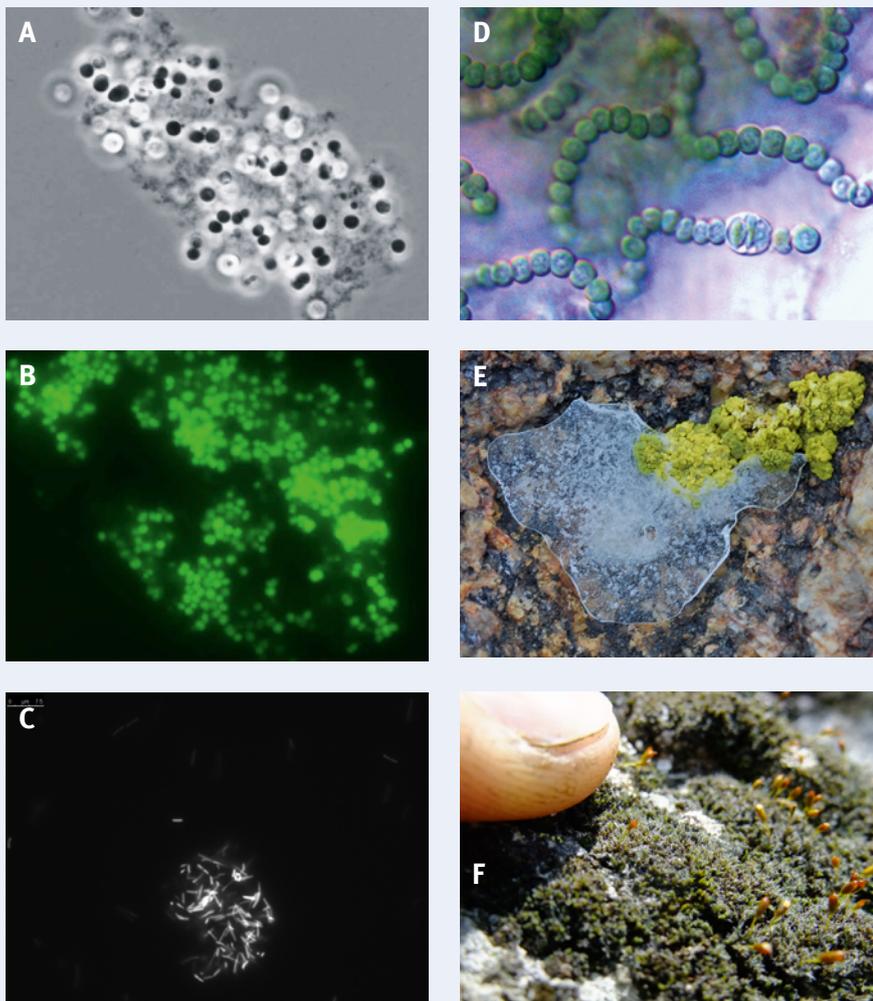


Abb. 4: Extremophile (Mikro-)Organismen, die aufgrund ihrer Toleranz gegenüber extremen Stressbedingungen für astrobiologische Experimente/Weltraumexperimente eingesetzt werden: (A) und (B) *Methanosarcina soligelidi* SMA-21, methanogenes Archaeum aus einem sibirischen Permafrostboden; (C) *Methanobacterium movilense* MC-20, Referenzorganismus aus einem Permafrost unbeeinflusstem Habitat; (D) *Nostoc spec.*, ein Cyanobakterien-Isolat aus einem Mars-analogen Gebiet in Spitzbergen; (E) *Pleopsidium chlorophanum*, eine Mars-resistente Flechte aus der Antarktis (North Victoria Land); (F) *Grimmia sessitana*, ein Moos aus dem alpinen Permafrost der Walliser Alpen (Fotos: A-C: O. Burckhardt, GFZ; D,E: J. P. de Vera, DLR; F: J. Joshi, Universität Potsdam)

Fig. 4: Extremophilic (micro-)organisms that were used for astrobiological experiments/space experiments because of their tolerance against extreme stress conditions: (A) and (B) *Methanosarcina soligelidi* SMA-21, methanogenic archaea from a Siberian permafrost soil; (C) *Methanobacterium movilense* MC-20, reference organism from a non-permafrost environment; (D) *Nostoc spec.*, isolates of cyanobacteria from a Mars-analog area in Svalbard; (E) *Pleopsidium chlorophanum*, a Mars-resistant lichen from Antarctica (North Victoria Land); (F) *Grimmia sessitana*, a moss from alpine permafrost in the Wallis-Alps

den haben, während Vergleichsorganismen aus Permafrost unbeeinflussten Habitaten wie beispielsweise *Methanobacterium movilense* MC-20 (Abb. 4C) nach dem Experiment zu fast 100 % geschädigt waren (Morozova et al., 2007). Diese Studien deuten darauf hin, dass methanogene Archaeen aus Permafrost generell besser an extreme Bedingungen angepasst sind als vergleichbare Mikroorganismen aus gemäßigten Habitaten. Diese Vermutung wird auch durch aktuelle Studien des GFZ in einer Kooperation mit dem DLR gestützt, die mittels Raman-Spektroskopie zeigen konnte, dass unabhängig von der phylogenetischen Verwandtschaft, die chemische Zusammensetzung der methanogenen Archaeen aus dem sibirischen Permafrost einem Cluster zuzuordnen ist, während die Vergleichsorganismen aus von Permafrost unbeeinflussten Habitaten einem anderen Cluster zuzuordnen waren (Serrano et al., 2014). Dieser Befund spiegelt die biochemischen Verän-

derungen in den Permafroststämmen wider, die offensichtlich im Zuge der Anpassung stattgefunden haben.

Weitere GFZ-Untersuchen zeigen den positiven Einfluss sogenannter Mars-analoger Mineralien (MAMs, bereitgestellt von Jörg Fritz, Museum für Naturkunde, Berlin) auf die Stoffwechselaktivität und das Wachstum von methanogenen Archaeen unter simulierten Marsbedingungen (Schirmack et al., 2015). Bei den verwendeten Mineralmischungen handelt es sich um eine palagonitische Tephra (Abb. 5C; JSC Mars-1A) sowie um phyllosilikatische (Abb. 5A; hauptsächlich Montmorillonit und Chamosit) und sulphatische (Abb. 5B; hauptsächlich Gabbro und Kalziumsulfat) Mineralmischungen. Es konnte gezeigt werden, dass Methanbildung in Modellböden aus MAMs (Abb. 5D) nur mit Wasserstoff und Kohlendioxid ohne den Zusatz weiterer lebensnotwendiger Elemente möglich ist. Ein Lang-



Abb. 5: Experimente mit Mars-analogen Mineralen (MAMs): (A) phyllosilikatische Mineralmischung (P-MAM); (B) sulphatische Mineralmischung (S-MAM); (C) palagonitische Tephra (Johnson Space Center, JSC Mars-1A); (D) wassergesättigte Modellböden aus S-MAM, P-MAM und JSC Mars-1A (von links nach rechts); (E) Inkubationskammer für die anaerobe Austrocknung der entsprechenden Mikroorganismen auf MAMs (Fotos: J. Schirmack, TU Berlin)

Fig. 5: Experiments with Mars analog minerals (MAMs): (A) phyllosilicatic mineral mixture (P-MAM); (B) sulphatic mineral mixture (S-MAM); (C) palagonitic tephra (Johnson Space Center, JSC Mars-1A); (D) water saturated model soils of S-MAM, P-MAM and JSC Mars-1A (from left to right); (E) incubation chamber for anaerobic desiccation of the microorganisms on MAMs

zeit-Austrocknungsexperiment mit methanogenen Archaeen auf MAMs (Abb. 5E) zeigte weiterhin eine bemerkenswerte Austrocknungsresistenz der getesteten Stämme über einen Zeitraum von 400 Tagen. Die besten Ergebnisse wurden bei diesen Experimenten im Zusammenspiel der Mikroorganismen mit der phyllosilikatischen Mineralmischung erhalten. Das Überleben der langfristigen Austrocknung und die Fähigkeit, aktiven Stoffwechsel in Mars-analogen Mineralböden zu betreiben, erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass methanogene Archaeen oder physiologisch ähnliche Organismen in ökologischen Nischen auf dem Mars existieren könnten.

Cyanobakterien, Flechten und Moose als Modelle für Tests der Habitabilität des Mars

Cyanobakterien gelten als potenzielle Lebensformen, die neben den Archaeen ebenfalls auf dem Mars früh in dessen Entwicklungsgeschichte entstanden sein könnten. Prokaryonten, wie Archaeen und Bakterien, sind vermutlich erstmals auf der Erde vor 3,8 bis 3,5 Mrd. Jahren entstanden. Die frühesten irdischen Mikrofossilien, die coccoiden und filamentösen

Cyanobakterien ähneln und die in Apex-Chert-Gesteinen der Warrawoona-Gruppe in Australien gefunden wurden (Schopf *et al.*, 1993), wurden auf eine Zeit von vor 3,5 Mrd. Jahren datiert. Obwohl es lange eine große Debatte über die wahre Natur der Mikrofossilien gab, bestätigen aktuellere Ergebnisse (Wacey *et al.*, 2011) diese These. Aus diesem Grund wurden Cyanobakterien genau wie Archaeen als sehr gute Modellorganismen für die Suche nach Leben auf dem Mars angesehen. Mit Hilfe der Raman-Spektroskopie, einer Methode, die auf der nächsten ESA Mars-Landemission namens ExoMars angewandt wird, versucht das DLR beispielsweise mit Hilfe eines kälteangepassten Isolats der Gattung *Nostoc* (Abb. 4D) charakteristische Biosignaturen, die als Fingerabdrücke für die Suche nach Leben auf dem Mars fungieren können, zu erkennen und zu katalogisieren (Böttger *et al.*, 2012). Die dabei gewonnenen Daten werden, wie die Daten der Archaeen, in eine Biosignaturen-Datenbank eingespeist. Diese Datenbank verfügt dann auch über Metadaten wie Mineralhintergrund, atmosphärische Zusammensetzung, temperatur-, druck-, feuchte- und strahlungsabhängige Veränderungen, die bei den Messungen auf dem Mars eine Rolle spielen könnten. Dies geschieht durch Messungen während entsprechender Marssimulationen

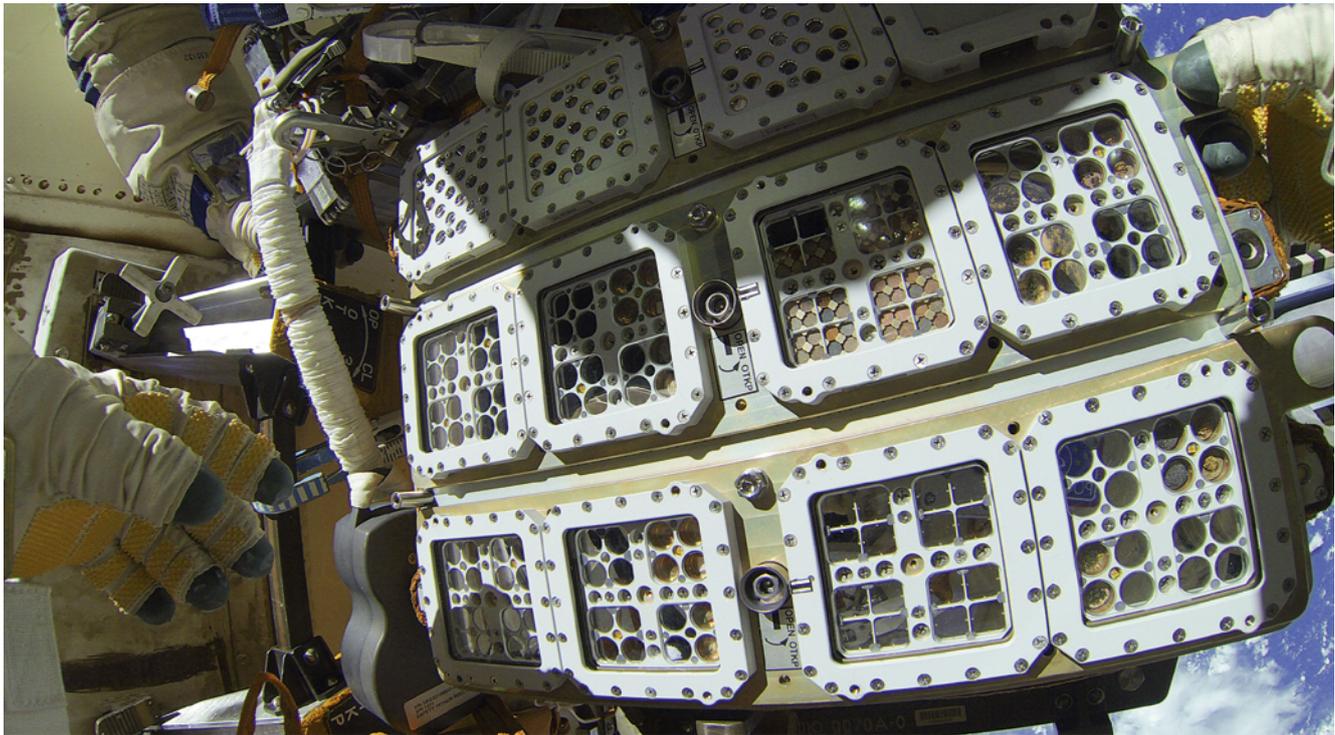


Abb. 6: Die Expositionsplattform „EXPOSE-R2“ mit dem Biologie- und Mars-Experiment (BIOMEX) wird von Astronauten außen an das russische Swesda-Modul der Internationalen Weltraumstation (ISS) montiert (Foto: ESA; für weitere Informationen siehe auch Alexander Gerst's Mission Blue Dot, siehe: http://www.dlr.de/rb/Portaldata/38/Resources/dokumente/broschueren-pdf/DLR-Blue-Dot-de_en_2014-05.pdf).

Fig. 6: The exposure platform 'Expose-R2' with the Biology and Mars Experiment (BIOMEX) is fixed onto the Russian Zvezda module of the International Space Station (ISS; Photo: ESA; for more information see Alexander Gerst's Mission Blue Dot: http://www.dlr.de/rb/Portaldata/38/Resources/dokumente/broschueren-pdf/DLR-Blue-Dot-de_en_2014-05.pdf).

in speziell dafür gebauten Marskammern (Lorek und Koncz, 2013). Darüber hinaus dienen die Cyanobakterien, die das DLR in Zusammenarbeit mit seinen Partnern von der Universität Potsdam und dem Fraunhofer Institut für Zelltherapie und Immunologie untersucht, als Testorganismen für Vitalitätstests unter Marsbedingungen. Fraglich ist z. B., ob der Mars neben seinen vermuteten lebensfreundlichen Umweltbedingungen in der frühen Phase seiner Entwicklungsgeschichte eventuell auch heute noch für irdische Organismen habitabel wäre. Neben Cyanobakterien werden dazu auch komplexere und evolutiv jüngere Organismen wie Flechten und Moose (Abb. 4E und 4F) getestet. Da sich insbesondere Flechten aus Mars-analogen Permafrostgebieten der Alpen sowie der Arktis und Antarktis bereits mehrmals als Vertreter der Eukaryonten als äußerst weltraumresistent erwiesen haben (Meeßen et al., 2013), soll auch untersucht werden, bei welchen weiteren Organismengruppen die Grenze der Lebensfähigkeit unter Marsbedingungen erreicht wird. Moose als älteste Gruppe der Landpflanzen (erste moosähnliche Mikrofossilien aus dem Ordovizium sind rund 470 Mio. Jahre alt) stellen dabei die nächsthöher organisierten Vertreter der Pflanzen dar. Moose sind größtenteils haploid, verfügen also im Gegensatz zu höheren Pflanzen nur

über einen einfachen Chromosomensatz. Da sie unbeschadet lange Trockenphasen überstehen, den Stress großer Temperaturschwankungen aushalten und extreme Umweltbedingungen in Ruhestadien überdauern können, lässt sich erwarten, dass einzelne Moosarten auch extreme extraterrestrische Umweltbedingungen tolerieren können. So wurden schon Moose beobachtet, die nach 400-jährigem Einfrieren in polarem Eis wieder weiterwachsen konnten (La Farge et al., 2013). In mehreren Versuchen mit Flechten, die in Mars-analogen Mineralien eingebettet und simulierten Marsbedingungen ausgesetzt waren, wurde ihre photosynthetische Aktivität positiv getestet (de Vera et al., 2014). Derzeit finden Untersuchungen an Moosen statt, die bereits jetzt auf eine hohe Widerstandsfähigkeit hinweisen. Weitere Untersuchungen, unter anderem im All (z. B. ESA-Projekt BIOMEX auf der Internationalen Weltraumstation ISS; Abb. 6), werden ebenfalls klären, ob die Grenze der Überlebens- und der Lebensfähigkeit der ersten komplexeren Organismen erreicht ist oder ob weiter im Stammbaum des Lebens geforscht werden muss, wo die Grenze der Vitalität unter Mars- und Weltraumbedingungen liegt. Zudem liefern die Ergebnisse ebenfalls konkrete Hinweise darauf, für welche Organismen der heutige Mars für eine gewisse Zeit habitabel sein könnte.

Ausblick

Die astrobiologische Forschung erwartet in naher Zukunft weitere Erkenntnisse zur Habitabilität von Planeten, insbesondere vom Mars, durch die gegenwärtig laufende NASA-Mission Curiosity sowie durch die für 2018 geplante ESA-Mission ExoMars. Während Curiosity an der Marsoberfläche nach Spuren von Leben sucht und erst kürzlich eine fettsäureähnliche organische Verbindung nachweisen konnte, soll ExoMars erstmals in den Marsboden bohren, um mineralogische und chemische Untersuchungen an den oberflächennahen Sedimenten durchzuführen, mit dem Ziel, organische Verbindungen als Hinweis auf mögliches Leben, zu finden. Eine wichtige Grundlage für die Suche nach Lebensspuren beispielsweise auf dem Mars ist die Kenntnis von sogenannten Biosignaturen, die auf vergangenes oder gegenwärtiges Leben hinweisen. Zu diesem Zweck werden zurzeit im Rahmen des BIOMEX-Projekts verschiedene Experimente mit dem Ziel durchgeführt, eine Biosignaturen-Datenbank aufzubauen. Hierzu gehören auch Simulationsexperimente unter „Mars-nahen“ Bedingungen, in denen beispielsweise der Einfluss von Mars-analogen Mineralen auf die Überlebensfähigkeit von extremophilen Mikroorganismen und deren mineralogisch-biotische Interaktionen untersucht wird. Weiterhin werden die Studien zu den molekularen Mechanismen, mit denen Organismen extreme Stressbedingungen wie Trockenheit, Kälte und Strahlung bewältigen, fortgeführt, um mögliche Adaptionsfähigkeiten von Lebensformen auf anderen Planeten und Monden besser verstehen zu können. Ein wichtiger Schwerpunkt der zukünftigen Forschung am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ wird sich mit den Interaktionen von geologischen und biologischen Prozessen, die nicht nur in der Astrobiologie sondern auch in zahlreichen anderen Themenfeldern eine herausragende Rolle spielen, beschäftigen. Dazu wird gegenwärtig das GeoBioLab am GFZ aufgebaut, das spezielle Labore beispielsweise für Langzeitexperimente oder Untersuchungen unter *In-situ*-Bedingungen für die angestrebte interdisziplinäre Forschung zur Verfügung stellt.

Literatur

- Böttger, U., de Vera, J.-P., Fritz, J., Weber, I., Hübers, H.-W., Schulze-Makuch, D. (2012): Optimizing the detection of carotene in cyanobacteria in a Martian regolith analogue with a Raman spectrometer for the ExoMars mission. - *Planetary and Space Science*, 60, 1, p. 356-362.
- de Vera, J.-P., Schulze-Makuch, D., Khan, A., Lorek, A., Koncz, A., Möhlmann, D., Spohn, T. (2014): Adaptation of an Antarctic lichen to Martian niche conditions can occur within 34 days. - *Planetary and Space Science*, 98, p. 182-190.
- La Farge, C., Williams, K. H., England, J. H. (2013): Regeneration of Little Ice Age bryophytes emerging from a polar glacier with implications of totipotency in extreme environments. - *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 110, 24, p. 9839-9844.
- Lorek, A., Koncz, A. (2013): Simulation and measurement of extraterrestrial conditions for experiments on habitability with respect to Mars. - In: de Vera, J. P., Seckbach, J. (Eds.), *Habitability of other planets and satellites, (Cellular origin, life in extreme habitats and astrobiology; 28)*, Dordrecht [u.a.]: Springer, p. 147-162.
- Meckenstock, R. U., von Netzer, F., Stumpp, C., Lueders, T., Himmelberg, A. M., Hertkorn, N., Schmitt-Kopplin, P., Harir, M., Hosein, R., Haque, S., Schulze-Makuch, D. (2014): Water droplets in oil are microhabitats for microbial life. - *Science*, 345, 6197, p. 673-676.
- Meeßen, J., Sánchez, F. J., Sadowsky, A., de la Torre, R., Ott, S., de Vera, J.-P. (2013): Extremotolerance and Resistance of Lichens: Comparative Studies on Five Species Used in Astrobiological Research II. Secondary Lichen Compounds. - *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 43, 6, p. 501-526.
- Morozova, D., Wagner, D. (2007): Stress response of methanogenic archaea from Siberian permafrost compared to methanogens from non-permafrost habitats. - *FEMS Microbiology Ecology*, 61, 1, p. 16-25.
- Morozova, D., Möhlmann, D., Wagner, D. (2007): Survival of Methanogenic Archaea from Siberian Permafrost under Simulated Martian Thermal Conditions. - *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 37, 2, p. 189-200.
- Rivkina, E., Gilichinsky, D., Wagener, S., Tiedje, J., McGrath, J. (1998): Biogeochemical activity of anaerobic microorganisms from buried permafrost sediments. - *Geomicrobiology Journal*, 15, 3, p. 187-193.
- Schirmack, J., Alawi, M., Wagner, D. (2015): Influence of Martian regolith analogs on the activity and growth of methanogenic archaea, with special regard to long-term desiccation. - *Frontiers in Microbiology*, 6, p. 210.
- Schopf, J. W. (1993): Microfossils of the early archean apex chert: new evidence of the antiquity of life. - *Science*, 260, 5108, p. 640-646.
- Schulze-Makuch, D., Haque, S., Antonio, M. R. S., Ali, D., Hosein, R., Song, Y. C., Yang, J., Zaikova, E., Beckles, D. M., Guinan, E., Lehto, H. J., Hallam, S. J. (2011): Microbial life in a liquid asphalt desert. - *Astrobiology*, 11, 3, p. 241-258.
- Serrano, P., Wagner, D., Böttger, U., de Vera, J.-P., Lasch, P., Hermelink, A. (2014): Single-cell analysis of the methanogenic archaeon *Methanosarcina soligelidi* from Siberian permafrost by means of confocal Raman microspectroscopy for astrobiological research. - *Planetary and Space Science*, 98, p. 191-197.
- Wacey, D., Kilburn, M. R., Saunders, M., Cliff, J., Brasier, M. D. (2011): Microfossils of Sulphur-Metabolizing Cells in 3.4-Billion-Year-Old Rocks of Western Australia. - *Nature Geoscience*, 4, 10, p. 698-702.
- Wagner, D. (2008): Microbial communities and processes in Arctic permafrost environments. - In: Dion, P., Nautiyal, C. S. (Eds.), *Microbiology of Extreme Soils, (Soil Biology ; 13)*, Springer, p. 133-154.
- Wagner, D., Schirmack, J., Ganzert, L., Morozova, D., Mangelsdorf, K. (2013): *Methanosarcina soligelidi* sp. nov., a desiccation and freeze-thaw resistant methanogenic archaeon from a Siberian permafrost-affected soil. - *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 63, p. 2986-2991.