

# 2

## Extreme Organismen und Transspermie

Extremophile Organismen bewohnen die unwirtlichsten Orte unseres Planeten, und einige könnten extraterrestrische Aufenthalte oder gar interplanetare Reisen erfolgreich überdauern. Sind Sie selbst überhaupt ein Erdling?



© ESO

Raumsonden können verschiedenste Körper unseres Sonnensystems ansteuern und auch mit Erfolg auf ihnen landen. Dabei steht vor allem ihre elektronische Grundausstattung vor gewaltigen Herausforderungen, etwa durch starke Temperaturschwankungen, die Verhältnisse der Schwerelosigkeit oder hochenergetische Strahlung unserer Sonne und anderer kosmischer Quellen. Dieses Kapitel thematisiert unter Betrachtung astrophysikalischer und bewegungsökologischer Gesichtspunkte, ob auch Lebewesen eine extraterrestrische Reise antreten und überdauern können, ohne dass dabei ihre genetische Ausstattung und physiologische Funktionsfähigkeit leidet oder zerstört wird.

Der Überlieferung nach war es der antike griechische Philosoph Anaxagoras, der erste dokumentierte Überlegungen darüber anstellte, ob Lebewesen durch das Weltall gereist sein könnten, bevor sie auf unserem Planeten eintrafen, und ob dieser Fragestellung folgend das Leben auf der Erde tatsächlich irdischen Ursprungs sei. Er sprach – noch sehr mystisch – von Samen, die in reiner Form schon immer vorhanden waren und unzählige Welten des Kosmos mit allerlei Lebensformen bereichern können.

Ob sich elementare Bestandteile von Organismen, oder sogar funktionstüchtige Lebewesen selbst, durch die Weiten des uns bekannten Universums bewegen und somit Planeten wie unsere Erde mit dem Phänomen Leben „infizieren“ können, wird heute aber auch von mythenfernen Forschern unter dem Begriff *Panspermia* diskutiert, der erstmals von dem schwedischen Chemiker und Physiker Svante Arrhenius im Jahr 1908 vorgeschlagen und ausführlich konkretisiert wurde [1]. Dabei wurde von Kritikern damals stets zu Recht betont, dass die Hypothese der „All-Saat“ (in etwa

die Bedeutung aus dem Griechischen) völlig spekulativ sei – Gegner wendeten im letzten Jahrhundert mitunter herablassend ein, dass sie nicht falsifizierbar sei und auch nie sein werde und deshalb für immer im Reich der Metaphysik hätte bleiben sollen. Mit den heutigen technischen Möglichkeiten und ausgeklügelten Experimenten hat sich die generelle Ansicht seit der Jahrtausendwende jedoch deutlich verschoben. Für die derzeitigen Befürworter sind es vor allem extrem widerstandsfähige Lebensformen, sogenannte extremophile Organismen, die beweisen sollen, dass ein längerer Aufenthalt fernab der Erde prinzipiell überlebbar ist.

Heute arbeiten Raumfahrtingenieure und Astrophysiker deshalb immer häufiger mit Mikrobiologen und Ökologen an transdisziplinären Experimenten, die mitunter außerhalb des Erdbits durchgeführt werden – sowohl mit einigen speziellen, als auch vielen gewöhnlichen Mikroben und komplexeren Lebewesen an Bord der interplanetaren Labore. Aber es sind vor allem auch „erdgebundene“ Mikrobiologen, Mykologen, Botaniker und Tiefseeökologen, die extrem unwirtliche ökologische Nischen auf der Erde erforschen – sozusagen die irdischen Extremisten als Referenz.

Vor den weiteren Ausführungen in diesem Kapitel möchte ich jedoch deutlich klarstellen, dass ein wesentlicher Bestandteil der Panspermie-Hypothese schon längst bewiesen ist: Die Ausbreitung und der Transfer von Leben zwischen benachbarten Körpern (Planeten und Monden) im selben Sternensystem – die sogenannte Transspermie. Es gibt in unserem Sonnensystem zweifelsfrei eine ganz besonders extreme Spezies, die mit den aus der biologischen Evolution entstandenen Gehirnen ihrer Individuen technologische Strategien erdacht hat, um interplanetare Reisen zu überleben und

sich fernab der Erde auszubreiten: *Homo sapiens*. Der linke Fuß des Individuums Neil Armstrong zeigte vor fast fünfzig Jahren eindrucksvoll, dass ein Aufsetzen irdischen Lebens auf anderen Himmelskörpern im Sonnensystem möglich ist.

## Extreme Habitate

Wenn man behauptet, dass transspermische Reisen von Leben in Form des Menschen bereits angetreten wurden, werden einige erwidern, dass die eigentliche und ursprüngliche Idee der Panspermie nur auf einfache Organismen ohne technische Hilfsmittel wie Raumanzüge und Sauerstoffflaschen beschränkt war. Doch ein Transfer von niederem Leben hat höchstwahrscheinlich ebenfalls schon im letzten Jahrhundert stattgefunden – und zwar unbeabsichtigt.

Die sogenannte Vorwärts-Kontamination bekräftigt, dass mit menschengemachten Raumsonden automatisch auch kaum abtötbare Mikroorganismen in den Innenräumen und sogar auf den Außenwänden der Sonden außerirdische Reisen angetreten haben – neben den Astronauten waren also wohl auch stets allerlei Mikronauten an Bord. Die beteiligten Forscher sind über diese blinden Passagiere in der Regel jedoch alles andere als erfreut – schließlich sollen auf der Suche nach tatsächlich außerirdischen Mikroorganismen keine unnötigen und (falls publiziert) peinlichen Verwechslungen auftreten. Für die Desinfektion der Raumsonden ist bei der NASA deshalb das eigens eingerichtete Office of Planetary Protection (Amt für den Schutz von Planeten) zuständig, und die ESA ist am Leibniz-Institut DSMZ (Deutsche Sammlung von Mikroorganismen

und Zellkulturen) unter anderem für die Aufbewahrung von extrem widerstandsfähigen Organismen zuständig, die zuvor aus verschiedensten Raumfahrzeugen isoliert wurden. Dass dies keine teure Spinnerei einzelner Raumfahrtorganisationen und deren Vorgesetzter ist, zeigt spätestens der von den Vereinten Nationen ins Leben gerufene und von 98 Staaten unterzeichnete Weltraumvertrag („Vertrag über die Grundsätze zur Regelung der Tätigkeiten von Staaten bei der Erforschung und Nutzung des Weltraums einschließlich des Mondes und anderer Himmelskörper“). Im neunten Artikel dieses Weltraumrechts wird explizit vorgeschrieben, dass man gegen eine Kontamination extraterrestrischer Körper vorgehen muss.

Anlass dieser Raumfahrt-Regelungen inmitten der Wirren des Kalten Krieges (weshalb es darin hauptsächlich um Ansprüche an Exo-Ressourcen und mögliche Atombombentests außerhalb der Erde geht) waren unter anderem die damals bereits abgeschlossenen unbemannten Mondlandungen der amerikanischen Surveyor-Raumsonden (sowie die erfolgreichen Luna-Missionen der Sowjetunion) und die bevorstehende, heiß ersehnte Landung von Surveyor 3 auf unserem Trabanten (1967). Zwei Jahre nach dieser erfolgreich beendeten Mission landeten dort bekanntlich mit Apollo 11 die ersten Menschen – die Luft- und Raumfahrtstechniker Neil Armstrong und Buzz Aldrin. Schon vier Monate später setzten mit Apollo 12 auch Pete Conrad und Alan LaVern Bean auf dem Mond auf, und zwar etwa 200 Meter vom Surveyor-3-Modul entfernt, welches zu dem Zeitpunkt schon zweieinhalb Jahre lang Bestandteil der Mondoberfläche war und nun vor Ort untersucht werden konnte. Dabei demonstrieren die beiden Amerikaner unter anderem die Objektive

der Kamera und brachten sie unter den damals als steril angesehenen Sicherheitsvorkehrungen wieder zurück zur Erde.

Beteiligte Mikrobiologen entdeckten kurz nach der Rückkehr in einem NASA-Labor in Houston schließlich das Unglaubliche: Innerhalb der untersuchten Bestandteile befanden sich bis zu hundert „vertrocknete“ Bakterien (*Streptococcus mitis*) [2]. Die Gattungen der gefundenen Streptokokken bilden in natürlichen Habitaten oftmals sogenannte Zellteilungsverbände, das heißt, dass die Folgegenerationen einer Mutterzelle nach der Teilung an ihr haften bleiben und so charakteristische kettenartige Strukturen bilden, weshalb die Spezies auch die altgriechische Vorsilbe *streptós* („Halskette“) als Teil des Artnamens erhielt. Sie können, wie in diesem Fund der NASA-Mikrobiologen, aber auch voneinander getrennt vorliegen und alle lebensnotwendigen Funktionen unter Isolation von ihren Kettenmitgliedern ausführen. Als ob der Befund, dass die Proben zwar vertrocknet und die Zellverbände gelöst waren, aber die Zellen an sich überhaupt nicht zerstört schienen, nicht erstaunlich genug gewesen wäre, wurden sie nach der ersten Untersuchung in einen Brutschrank für Mikroben gestellt. Und siehe da: Die Bakterien begannen sich unter den künstlichen, aber optimalen Bedingungen nach einiger Zeit zu winden und zu strecken und generierten sogar völlig munter ihre Nachfolgegenerationen, als wäre nie etwas geschehen. Die winzigen Organismen hatten, so schien es zunächst, sowohl den Start, als auch die Hin- und Zurückreise und vor allem den zweieinhalbjährigen Aufenthalt auf dem eigentlich lebensfeindlichen Mond erfolgreich überdauert.

Mit neueren Erkenntnissen über die mikrobielle Ökologie des menschlichen Körpers wurde von externen Überprüfern,

aber auch aus den eigenen Reihen der NASA, über die Jahrzehnte jedoch immer öfter die kritische Ansicht vertreten, dass die beteiligten Forscher das Objektiv nach dessen Rückkehr selbst kontaminiert haben könnten, denn *Streptococcus Mitis* ist im Umfeld des Menschen weit verbreitet und gedeiht auch in Ihrem Mund- und Rachenbereich besonders gut. Heute überwiegt die Meinung, dass die damaligen NASA-Mitarbeiter einen kleinen, aber schmutzigen Fehler begangen haben, nachdem die Probe wieder zur Erde zurückgebracht worden war. Diese Kritik wird von einigen Beteiligten aber immer noch strikt zurückgewiesen, da die untersuchte Bakterienkultur erst nach einer ungewöhnlich langen Zeitspanne, obwohl sie unter den optimalen Bedingungen im Brutschrank aufbewahrt wurde, zu wachsen begann, was tatsächlich nicht für eine frische Kontamination von „gesunden“ Bakterien spricht, da die Kontrollgruppen eigentlich nicht lange warteten und optimale abiotische Verhältnisse sofort auszunutzen wussten.

Doch selbst wenn eine Eigenkontamination durch Mitarbeiter des Labors der Grund für den Fund der Mikroben gewesen sein sollte, kann man als Befürworter der Panspermie-Hypothese gerade deswegen optimistisch bleiben und das Sterilisations-Problem aus dem entgegengesetzten Blickwinkel betrachten: Wenn es den beteiligten Astronauten und Forschern unter (schon damals) strengen Hygienevorkehrungen tatsächlich gelungen ist, das sie das vergleichsweise winzige Objektiv nach der Rückkehr auf die Erde unabsichtlich kontaminiert haben, dann ist wohl kaum davon auszugehen, dass eine riesige Raumsonde in einer noch riesigeren Konstruktionshalle vor ihrem Start zu unseren Nachbarn völlig steril sein kann. Darüber hinaus war einer der

Astronauten auf dem Mond erkältet – der Kontaminationsweg von Mund zu Kameragehäuse hätte also auch innerhalb des Mondlandemoduls von den Mikroben bestritten werden können, was bedeuten würde, dass die freigesetzten Organismen zumindest die zehntägige Rückreise unter Einfluss der Schwerelosigkeit in der Raumkapsel problemlos überstanden haben. Bis heute ist kein offizieller und endgültiger Beschluss über die Interpretation der Ergebnisse gefallen, wenngleich die Skepsis – wie hoffentlich immer in den Naturwissenschaften – deutlich überwiegt. Der renommierte Marsforscher Stephen Petranek ist sich angesichts der vergangenen Marsmissionen jedoch sicher:

Egal, wie gründlich wir unser Raumschiff bei der Abreise von der Erde reinigen, wir werden wahrscheinlich Heerscharen von Mikroben als blinde Passagiere mit auf den Mars nehmen. [der Autor bezieht sich hauptsächlich auf die Curiosity-Mission]. [...]. Die vermeintlich sauberen Räume, in denen sie auf der Erde lagerten, waren nämlich nach heutiger Kenntnis nicht ganz so sauber wie gedacht. [3]

## Phantastische Eiswelten

Die Übertragung von biologischem Material innerhalb des Sonnensystems hat im Zuge der Raumfahrt vermutlich schon mehrmals stattgefunden. Das mag ein Grund sein, weshalb heutige Astrobiologen oft ohne größere Zurückhaltung über den Tellerrand hinausblicken und weitgreifende Überlegungen anstellen oder ältere Fragestellungen konkretisieren. Wie hoch ist wohl die Wahrscheinlichkeit, dass eine Lebensform eine kosmische Reise an Bord von Raumsonden



überleben und nach einer solchen unbeabsichtigten Distribution mehr oder weniger zufällig eine ökologische Nische auf anderen Himmelskörpern einnehmen kann?

Sollten die gefundenen Surveyor-3-Streptokokken nicht vom Mund eines Labormitarbeiters nach der Rückkehr des Objektivs zur Erde stammen, sondern tatsächlich auf unserem Trabanten gewesen sein, dann hätten diese Mikroben nicht in einem „natürlichen“ Mond-Habitat überdauert, sondern sich in einem etwas merkwürdigen (menschengemachten) Lebensraum eingenistet – und zwar im Isolierschaum des Kameraobjektivs, in welchem die vertrockneten und wiederbelebten Zellen nachgewiesen wurden. Das Habitat „Isolierschaum“ ist schon recht bizarr und wohl alles andere als dauerhaft wünschenswert für die diversen Lebensansprüche der kleinen Überlebenskünstler. Die abiotischen Bedingungen auf der Oberfläche oder im Untergrund eines fremden Himmelskörpers sind meistens jedoch noch deutlich lebensfeindlicher.

Stellen Sie sich dazu ein außerirdisches, bizarres und extremes Habitat vor. Zum Beispiel eine unterirdische Unterwasserwelt, wie sie beispielsweise unter der Eiskruste des Jupitermonds Europa vermutet wird (nächstes Kapitel). Stellen Sie sich weiterhin vor, dass diesen Lebensraum kein einziger energispendender Sonnenstrahl erreicht – die geschlossene Kruste über dem Ozean ist einen Kilometer mächtig und sorgt für absolute Finsternis. Doch trotz der Dunkelheit und den eisigen Wassertemperaturen, so stellen wir uns es jetzt einfach optimistischerweise vor, gibt es hier ein Ökosystem – normale und eigenartige, einfache oder auch komplexe Wesen. Vielleicht in Form von ekligen Tentakeln, die aus dem Eis heraus ins Wasser ragen, oder glitschige, pflanzenähnliche Körper, die

nicht aus dem Untergrund, sondern kopfüber aus dem bloßen Eis wachsen. Eine perfekte Umgebung für einen düsteren Science-Fiction-Roman, oder?

Sollten Sie nun in Versuchung kommen, ein Buch über Ihre phantastische außerirdische Welten veröffentlichen zu wollen, sollten Sie sich bewusst sein, dass eine Gruppe von Wissenschaftlern Ihren Einfallsreichtum und kreativen Geist ernsthaft in Frage stellen, oder Sie sogar des Plagiats bezichtigen könnte, denn das oben beschriebene Habitat, mitsamt den aus dem Eis ragenden und glitschigen Tentakeln fernab jeglichen Sonnenlichts ist keine Idee von mir, sondern existiert tatsächlich – und zwar auf unserem Planeten! Genauer gesagt befindet sich dieses komplexe und vor Leben strotzende Ökosystem unter der Antarktis (unter dem Riiser-Larsen-Schelfeis beziehungsweise dem Ross-Schelfeis), welche von Zoologen wie Yuuki Watanabe von der Universität Tokio und den Tiefseeökologen um Brent Christner von der Louisiana State University im letzten Jahrzehnt eingehend untersucht wurden.

Beide Forschergruppen hatten ursprünglich, wie so oft in den Naturwissenschaften, ganz andere Fragestellungen im Sinn (zufällige Entdeckungen, nach denen gar nicht gesucht wurde, spielten in der gesamten Wissenschaftsgeschichte sogar so eine wichtige Rolle, dass man für dieses Prinzip eigens den Begriff der Serendipität einführte). Der Japaner wollte 2003 eigentlich das Jagd- und Fressverhalten von antarktischen Robben untersuchen. Klingt nicht sehr astronomisch. Doch die an den Tieren angebrachten Messinstrumente zeigten an, dass sie anscheinend in Tiefen hinabtauchten, die für diese Spezies eher unüblich und den Kenntnissen nach – auch unter den widrigen Bedingungen

der Kältewüste – nicht unbedingt notwendig sind, um ausreichend Nahrung zu finden. Was hatten die eindeutig gut genährten, ja sogar richtig fetten Robben dort unten also zu suchen, wo unter dicken Eisschichten mit Sicherheit ein weniger üppiges Fisch-Buffer als in höhergelegenen Tauchplätzen auf die Säuger wartete? Zunächst vermutete Watanabe besonders nahrhafte Fische als Leckerbissen, welche, wieso auch immer, die unwirtlichen Habitate unter dem antarktischen Eis besiedeln. Doch diese etwas gewagten Vorstellungen des Zoologen wurden nicht nur umgeworfen, sondern sogar weit übertroffen. Um dem Treiben genauer auf den Grund zu gehen, brachte er eine Unterwasserkamera an einem Tier an und fing während des Tauchgangs auf seinem Bildschirm zum ersten Mal etwas ein, was so zuvor noch nicht vermutet oder gar beobachtet wurde: Ein Ökosystem voller Tentakel und anderer skurriler, sich windender Gebilde unter dem Eispanzer – eine Unterwasserwelt, die den aufwendig am Computer simulierten Landschaften in Science-Fiction-Filmen wie *Europa Report* (eine fiktive Reise zum Ozean auf dem Mond Europa) in Nichts nachsteht [4].

Die Crew um den Tiefseeökologen Brent Christner fluchte sogar lauthals vor Überraschung, als sie an Bord ihres Forschungsschiffes auf die Monitore blickten. Eigentlich wollten sie untersuchen, wie sich das 750 Meter dicke Eis und das Wasser unter dem Eispanzer unter Einfluss des Klimawandels verhalten (850 Kilometer weit vom freien Ozean und seinen sonnendurchfluteten obersten Schichten entfernt – das ist etwa die Breite Frankreichs). Stattdessen entdeckte der ausgesandte Tauchroboter Deep-SCINI im Lichtkegel seiner Scheinwerfer quicklebendige Fische, verschiedenfarbige und filigrane Quallen und (bereits 2010

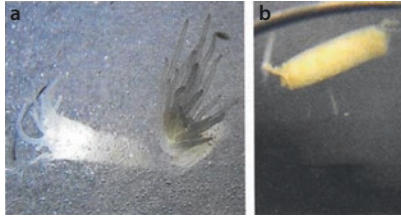


Abb. 2.1 Unter dem 740 Meter mächtigen Ross-Schelfeis befindet sich ein komplexes Ökosystem, in dem Seeanemonen (*Edwardsiella andrillae*) kopfüber ins Wasser hängen und auf der Unterseite des Gletschers verwurzelt sind (links). Der Tauchroboter DEEP-SCINI machte auch Aufnahmen von Organismen, die nicht zugeordnet werden konnten – eine Lebensform erhielt deshalb kurzerhand den Namen „Frühlingsrolle“ (rechts). (© ANDRILL Science Management Office, University of Nebraska-Lincoln“, mit freundlicher Genehmigung)

entdeckte) Seeanemonen, die nicht aus dem Meeresgrund empor wuchsen, sondern im Eis der Gletscher-Unterseite verwurzelt waren und somit kopfüber aus der Eisdecke hingen [5]. Einige Organismen konnten die Forscher nicht einmal zuordnen – aufgrund seiner rundlich-länglichen Form und teigartigen Farbe wurde eine vorbeiswebende und sich windende Lebensform deshalb kurzerhand „Frühlingsrolle“ getauft (Abb. 2.1).

Tatsächlich ist diese Welt unter dem antarktischen Eis noch um einiges bizarrer und übersteigt die Kreativität vieler Einfälle von Science-Fiction-Produzenten bei Weitem. Schwimmfähige Tiere wie Fische und Quallen suchen hier nämlich nicht am Boden nach Futter, sondern sie schnappen nach von oben herabrieselnden energispendenden Nährstoffen, da täglich etwa ein Millimeter des Eises an der Unterseite des Gletschers schmilzt, wodurch die nahrhaften

Partikel aus dem Eis gelöst und freigesetzt werden. Zudem gibt es hier (im Ozean!) eigene Flüsse, die keinem Relief im Boden folgen, sondern darüber hinwegschweben. Gefrorenes Wasser aus der Eisdecke schmilzt hierbei unter Einwirkung des salzigen Meerwassers und fließt aufgrund seiner geringeren Dichte separat an der Unterseite der Kruste oberhalb der tierischen Bewohner mit den typischen Mustern von Flussverläufen stetig entlang – eine verkehrte Welt, wenn man so will, in der die Flüsse über einem hinwegströmen und das Essen von oben herabregnet.

Komplexe Lebewesen – von denen sicherlich weitere noch auf ihre Entdeckung warten, da der Roboter nur relativ kleine Ausschnitte zeigen konnte – leben und gedeihen in diesem exotischen Lebensraum trotz diesen widrigen, bizarren und regelrecht außerirdischen Bedingungen aber offensichtlich überaus prächtig. Von einfachen Lebensformen wie Bakterien ganz zu schweigen – sie sind wie überall massenhaft vorhanden. Dasselbe Team hatte bereits 2013 den subglazialen Lake Whillans erforscht – dieser liegt noch einmal weitere 100 Kilometer vom Ozean Richtung Inland entfernt und bietet dort speziellen Mikroben eine Heimat, die ohne jegliches energiespendendes Sonnenlicht Ammoniak und Methan zur Biosynthese ihres Körpers nutzen [6].

## **(Un-)Gezielte Lebensimpfung**

Die unter der Antarktis lebenden und sich prächtig vermehrenden Organismen (zumindest die, die eindeutig klassifiziert werden konnten) weisen – und das ist noch einmal deutlich verblüffender – keine ersichtlichen Unterschiede zu ihren in

„normalen Welten“ lebenden und gut dokumentierten Artgenossen auf, obwohl sie in einem völlig andersartigem und extremen Ökosystem leben. Die gefundenen Seeanemonen etwa gehören der bekannten Familie der Edwardsiidae an, deren Individuen sich eigentlich in Sedimenten, Löchern oder Gesteinsritzen verankern, aber auch über den Meeresgrund kriechen können. Die entnommenen Eier der kopfüberhängenden und an der Unterseite des antarktischen Eispanzers verwurzelten Seeanemonen weisen laut der Meeresbiologin Marymegan Daly von der Ohio State University zwar die Auffälligkeit auf, dass sie einen erhöhten Fettgehalt besitzen und damit zur Eisdecke schweben, statt wie üblich zum Untergrund zu sinken – der ausgewachsene Organismus selbst ist den ersten Beschreibungen der Forscher nach rein anatomisch jedoch „nothing special“ [7]. Weitere Forschungen des Teams sollen klarstellen, ob es vielleicht doch an extreme Bedingungen adaptierte (aber nicht direkt zu erkennende) Anpassungen bei *Edwardsiella andrillae* gibt, etwa auf der molekulargenetischen Ebene. Oder ob – und das wäre eine ebenso denkbare Lösung – unsere Vorstellung von „extrem“ aufgrund unserer anthropozentrischen Sichtweise (nur aus Perspektive des Menschen betrachtet) schlicht und ergreifend falsch ist und Habitate unter ewigem Eis (seien sie auf der Erde oder auf Jupitermonden) genauso normal sind wie ein in angenehm temperierten Zonen wachsender Wald mit den verschiedensten Bäumen oder der feuchte Waschlappen in Ihrer Küche mit seinen über 50 Milliarden Bakterien pro Kubikzentimeter [8]. Dabei sind der Kreativität keine unüberwindbaren Grenzen gesetzt. So lebt etwa der Krankheitserreger *Helicobacter pylori*, der 1994 von der Weltgesundheitsorganisation als erstes bekanntes karzinogenes

(krebsauslösendes) Bakterium klassifiziert wurde, im extrem sauren und eigentlich alles abtötenden Milieu unserer Mägen, obwohl man zuvor eigentlich felsenfest davon überzeugt war, dass es keinerlei Magenflora geben kann – heute weiß man sogar, dass über fünfzig Prozent aller lebenden Menschen ein von diesem Mikroorganismus besiedeltes innerkörperliches Habitat in sich tragen [9].

Dass unsere Einschätzungen und beschriebenen Habitat-eigenschaften etwas unbedacht sein könnten, zeigt neben den exotischen Habitaten in Ihren Innereien insbesondere auch der gigantische Wostoksee. Er liegt ebenfalls unter der Antarktis und zwar – das muss man sich vor Augen führen – unter einer vier Kilometer mächtigen und völlig undurchlässigen Eisschicht, unter der flüssiges Wasser wegen des enormen Drucks sogar unter dem Gefrierpunkt ( $-3$  Grad Celsius) als sogenanntes unterkühltes Wasser vorhanden ist. Zudem ist der See, im Gegensatz zu den Schelfeis-Gebieten, von jeglichem offenen Gewässer abgeschnitten – und zwar seit etwa 400.000 Jahren! Und dennoch: Im absolut finsternen See (der selbst rund 1200 Meter tief zu sein scheint) besteht laut Analysen von DNA- und RNA-Proben ein äußerst artenreiches Ökosystem [10]. Identifiziert wurden die Erbanlagen von tausenden verschiedenen Spezies, hauptsächlich Bakterien. Neben einigen Pilzen, Archaeen und Eukarya (Zellen mit Zellkern) fanden sich aber auch bekannte Parasiten, welche darauf schließen lassen, dass höhere Tiere wie Würmer oder auch Fische dort völlig isoliert in ihrer eigenen Welt erfolgreich gedeihen könnten (selbstverständlich wurden später immer öfter, wie fast immer in dieser Teildisziplin der „entdeckerischen“ biologischen Forschung, die kritische Ansicht geäußert, dass die Proben kontaminiert gewesen sein könnten

und nicht die tatsächliche Diversität unter dem Eispanzer widerspiegeln). Auf jeden Fall scheint es jedoch allein schon unter der Beachtung der subantarktischen Schelfeis-Habitate weitaus plausibler, dass ein eingeschleppter Mikroorganismus in möglichen Wasserressourcen eines Planeten oder (konkreter) im Meer des Mondes Europa (zum Beispiel an Bord der Europa-Clipper-Mission, Kap. 3) prinzipiell in der Lage wäre, eine exoökologische Nische erfolgreich zu besetzen. Dazu müssten die Keimlinge des Lebens jedoch erst einmal dorthin gelangen, ohne während der kosmischen Distribution zu verenden oder ihre genetischen Informationen zu verlieren.

Die Ähnlichkeit der gefundenen Seeanemonen unter dem Schelfeis mit ihren normalen Familienangehörigen, aber auch der in der Dunkelheit gefundenen Fische (weit verbreitete Antarktische, Notothenioidei) mit ihren Artgenossen im etwa 850 Kilometer entfernten offenen Ozean zeigt, dass auch in diesen irdischen Fällen von einer „Lebensimpfung“ die Rede sein kann. Aus dem offenen Meer spalteten sich also ab und an einzelne Organismen oder Schwärme aus ihrer „Home range“ ab und traten aufgrund irgendwelcher Attraktoren (zum Beispiel Nahrung) oder Repressionen (Ausweichen von Konkurrenz) ihre Reise in die ewige Dunkelheit an, bis die einzelnen Subpopulationen schließlich unter dem antarktischen Eis das Ökosystem bildeten, das Forschern genauso gefällt wie dicken Robben. Die schlussfolgernde exo- und bewegungsökologische Fragestellung bezüglich transspermischer Gesichtspunkte lautet folglich: Kann eine Wanderung (*dispersal*) von einfachen Lebensformen auch durch die Dunkelheit des Alls erfolgreich beendet



werden? Mit dem Reiset motto: Egal wohin, Hauptsache eine geeignete Unterkunft (passende ökologische Nische in einem geeigneten extraterrestrischen Patch)? Und vor allem: Können Lebensformen diese Reise eigenständig, also ohne „technologische Hilfe“ des Menschen antreten?

Die letzte Frage wird von einigen Kritikern immer wieder aufgeworfen. Sie akzeptieren, dass ein Raumschiff prinzipiell ein geeignetes Taxi für interplanetare Mikrobotrips sein könnte – man spricht in diesem Falle von „Gerichteter Panspermie“ (*directed panspermia*), weil sie durch gezielte menschliche Aktivität bedingt ist. Der Astronaut Scott Kelly scherzte im Januar 2016 diesbezüglich über Twitter mit seiner Nachricht „Yes, there are other life forms in space!“ und meinte hiermit eine prächtig orangefarben blühende Zinnie, welche mit Hilfe seines außerirdisch grünen Daumens die erste im Weltraum erfolgreich gezüchtete Blume war. Tragen wir hingegen, wie zum Beispiel im Falle der bereits gestarteten Marsrover-Missionen, unabsichtlich niedere Organismen durch das Sonnensystem, ist auch der separate Begriff „Versehentliche Panspermie“ (*accidental panspermia*) gebräuchlich. Im Falle von Aliens, die durch ihre Aktivitäten einen solchen Transfer möglicherweise ebenfalls bereitstellen oder in der Vergangenheit ermöglicht haben, sprach der 2004 verstorbene österreichische Astrophysiker Thomas Gold sogar von lebendem kosmischem Müll.

Doch wie könnte sich ein fremder Himmelskörper mit Leben „infizieren“, wenn keine raumfahrenden Intelligenzen, seien sie nun menschlich oder nicht, und ihre Raumschiffe als geeignete Übergangshabitate während einer interplanetaren Reise beteiligt sind?

## Exposed to Space

Ein Planetary Protection Officer (das ist kein Begriff aus den Militärtruppen der Star-Wars-Saga, sondern eine tatsächlich gebräuchliche Berufsbezeichnung der NASA) ist dafür zuständig, dass Raumsonden so steril wie nur möglich sind und eine unbeabsichtigte Vorwärts-Kontamination völlig verhindert oder auf ein zu vernachlässigendes Minimum reduziert wird. Diese, nun ja, lebensausrottende Tätigkeit kann jedoch erst recht nichts ausrichten, wenn die ohnehin widerstandsfähigen mikrobiellen Passagiere überhaupt keine astrein gereinigten Raumsonden als kosmische Vehikel benötigen, sondern sich an Bord natürlicher Transportmittel befinden (natürlich im Sinne von naturogen, also nicht durch den Menschen bedingt).

In einem Vortrag über die Widerstandsfähigkeit und räumlich-zeitliche Distribution von Pflanzensamen fragte ich die etwa dreißig Zuhörer (zum größten Teil Ökologen und Umweltingenieure) nach ihrer Meinung, durch welche Ereignisse ein Pflanzensamen oder eine Mikrobe vom Erdboden aus in eine Position außerhalb des irdischen Gravitationsfeldes gelangen könnten und in der Vergangenheit vermutlich auch schon mal gelangt sind. Nach etwa zehn Sekunden hob sich zögernd eine Hand. Was denken Sie?

Die Antwort des Mannes, dass ein Vulkanausbruch hierfür verantwortlich sein könnte, musste ich abweisen, da mir einerseits keine einzige Publikation diesbezüglich bekannt war und andererseits selbst der Ausbruch eines Super-Vulkans meiner vorläufigen Einschätzung nach zwar nachweislich ausreicht, um Partikel in die oberen Atmosphärenschichten

zu transferieren, aber dennoch zu wenig Energie für das Herauskatapultieren von biologischen Komponenten in den interplanetaren Raum bereitstellt.

Das am häufigsten genannte Beispiel für einen natürlichen Transfer muss also etwas deutlich gewaltigeres sein: der Einschlag von Meteoriten oder gar Asteroiden, wodurch Staub, größere Partikel und Aggregate oder (bei einem genügend starken Impact) ganze Felsbrocken aus dem Gravitationseinfluss der Erde geschleudert werden können. Dieser eigens als Lithopanspermie bezeichneter Prozess (von griechisch *lithos*: Stein) sagt also aus, dass innerhalb des Bodens lebende Organismen (vor allem sogenannte endolithische Mikroorganismen) mitsamt ihres Habitats unter gewissen Umständen der Anziehung der Erde entweichen und nach einiger Zeit in das Gravitationsfeld eines anderen Körpers, in erster Linie des Mars, gelangen könnten [11]. Physikalische Simulationen zeigen, dass ein solcher Transfer zwischen Erde und Mars, allein durch die gravitative Wechselwirkung bedingt, etwa elf Millionen Jahre dauert [12] – ein flüchtiger Wimpernschlag in der viereinhalb Milliarden Jahre alten Geschichte unseres Sonnensystems, von der das Kapitel des Lebens schon vor 4 Milliarden Jahren aufgeschlagen wurde (wäre die Breite dieser Buchseite mit ihren 12,8 Zentimetern das Alter des Sonnensystems, würde dieser natürliche Transfer zum Mars nur ein Drittel Millimeter Breite einnehmen – diese Linie wäre also kaum sichtbar). Hinzu kommt, dass der Boden der mit Abstand am dichtesten besiedelte und diverseste Lebensraum der gesamten Erde ist – selbst die Ozeane können die unglaubliche Anzahl an Lebewesen, die allein in einem Gramm Boden (nach heutigem Stand bis zu 50.000

Arten [13]) bei Weitem nicht erreichen. Die genaue Zahl von in der Vergangenheit eingeschlagenen oder heute auf die Erde niedergehenden Meteoriten und die Menge des dadurch herausgeschleuderten Materials ist natürlich sehr schwer zu bestimmen. Die Oberfläche unseres Mondes ist aufgrund der Abwesenheit einer Atmosphäre und fehlender Erosionsprozesse jedoch wie ein historisches Buch zu lesen, welches uns die Bombardements der Vergangenheit aufzeigt und wegen der geringen Entfernung zur Erde auch für die Aufklärung des heutigen Beschusses unseres Planeten herangezogen werden kann. Vor einigen Jahren wurde noch angenommen, dass die oberen zwei Zentimeter des Mondregoliths ganzheitlich betrachtet etwa alle zehn Millionen Jahre vollständig durch Einschläge von Gesteinsbrocken umgepflügt werden. Astrophysiker um Emerson Speyerer von der Arizona State University wiesen im Oktober 2016 durch die Auswertungen der Oberflächenaufnahmen des Lunar-Reconnaissance Orbiter (LRO) jedoch nach, dass der Mond allein schon heute einem viel stärkerem Beschuss ausgesetzt ist – die Umpflütrate beträgt den neuen Hochrechnungen zufolge nur noch rund 80.000 Jahre und dürfte in vergangenen Erdzeitaltern deutliche geringer gewesen sein [14].

Neben der Idee, dass das Edaphon (Bezeichnung für die Gesamtheit der Lebensformen im Boden) mitsamt seines Lebens- und Aktivitätsraums aufgrund des gewaltigen Einschlags eines extraterrestrischen Körpers durch das Sonnensystem schwirren könnte, wurde in den letzten Jahrzehnten auch diskutiert, ob allein der Strahlungsdruck der Sonne im Zuge eines elektromagnetischen Ausbruchs in der Vergangenheit massenhaft Mikroben aus dem Gravitationsfeld der Erde

gelöst haben könnte (sogenannte Radiopanspermie) [11] – auch der Begründer der Panspermie-Hypothese vermutete schon vor über hundert Jahren diesen Prozess und nicht etwa den Einschlag von fremden Gesteinskörpern. Zwar gibt es ausgeklügelte Simulationen aus dem Jahr 2004, die eindeutig zeigen, dass durch den Einfluss von starken Strahlungsdrücken deutlich größere Mengen an Mikroorganismen auf einen Schlag in den interplanetaren Raum gelangen können als bei der Lithopanspermie (Größenordnung von mehreren Kilogramm bis zu einer Tonne) [15], doch wie etliche konkurrierende Überlegungen und auch die späteren EXPOSE-Experimente (nächstes Unterkapitel) verdeutlichen, überleben selbst die widerstandsfähigsten Mikroorganismen und Sporen nicht, wenn sie nicht von einer schützenden Schicht vor der schädlichen UV-Strahlung der Sonne und den hochenergetischen Partikeln des Kosmos abgeschirmt werden. Eine hohe Anzahl von Lebensformen oder einzelnen biologischen Komponenten allein reicht im gnadenlos von Strahlung durchdrungenen Raum des Sonnensystems also nicht aus – vor allem dann nicht, wenn sich Oh-my-god-Teilchen quer durch den Raum schlagen. Für lange Reisezeiten im interplanetaren Raum müsste ein gewöhnlicher Felsbrocken deshalb mindestens einen Durchmesser von einem Meter besitzen, um darin eingebettete extremophile Mikroorganismen oder Sporen vor destruktiven Strahlungseinflüssen zu schützen [16] – das wird von Skeptikern der im Kameraobjektiv überlebten Mond-Bakterien heute selbstverständlich ausführlich betont. Bei einem Meteoriden- oder gar Asteroideneinschlag sind herausgeschleuderte Gesteinsbrocken über einem Meter Durchmesser alles andere als unrealistisch (der Wert liegt bei großen Einschlägen bestimmt um ein Vielfaches höher),

weshalb die Lithopanspermie heute viel stärker im Fokus der exoökologischen Forschung steht als das Herauslösen von biogenen Komponenten durch stellare Strahlungswinde.

## Extreme Gäste auf der ISS

Egal ob in einem Felsbrocken oder an Bord einer Raumsonde – ein interplanetarer Transfer birgt todbringende Risiken für Leben (auch für uns Menschen trotz der technischen Schutzschilde). Während der Reise sind es insbesondere die energiereiche elektromagnetische Strahlung der Sonne (vor allem im UV-Bereich) und die allgegenwärtige, hochenergetische Partikelstrahlung des Kosmos, aber auch die auftretenden Temperaturen (starke Schwankungen und plötzliche Temperaturschocks) und die Bedingungen im Vakuum. Bei der Lithopanspermie muss zudem beachtet werden, dass Mikroben oder deren Überdauerungszustände den Einschlag eines Meteoriten und die Beschleunigungen bei dem Herausschleudern genauso überleben müssen, wie den hitzigen Eintritt in eine extraterrestrische Atmosphäre und den harten Aufschlag auf einem anderen Himmelskörper.

Nun kann man sich zunächst fragen, wie man solche „Tests“ in irdischen Laboren überhaupt authentisch durchführen soll, und vor allem, was das für eigenartige Leute sind, die sich beispielsweise damit bespaßen, arme kleine Mikroorganismen in Kapseln zu stecken und sie gegen Stahlwände zu schießen. Tatsächlich fanden sich diese Leute – auch in Deutschland. Und sie erwägten sogar, unseren Heimatplaneten für manche Experimente hinter sich zu lassen. Um

konkrete Aussagen über das Überlebenspotential ausgewählter widerstandsfähiger Organismen und biologischer Strukturen unter den Bedingungen des Weltraums zu ermöglichen, wurden zwischen 2008 und 2015 auf der Internationalen Raumstation ISS (International Space Station) von der ESA die sogenannten EXPOSE-Experimente durchgeführt und etappenweise erfolgreich beendet.

Die biologischen Materialien des ersten Experiments EXPOSE-E (darunter zum Beispiel Aminosäuren, Sporen und Pflanzensamen) wurden 2008 mithilfe des Space-Shuttles Atlantis zum Außenposten der Menschheit befördert. Die Andockung am Modul Columbus (ein in Italien hergestelltes Raumlabor) ermöglichte die ersten groß angelegten und präzise kontrollierbaren exoökologische Untersuchungen im Rahmen der European Technology Exposure Facility (EuTEF). Während bei dieser Mission insbesondere die Wirkung von UV-Strahlung auf biologische Komponenten getestet wurde, startete im selben Jahr das Material des EXPOSE-R-Experiments, welches am russischen Modul andockte und einige ähnliche, aber auch viele andere Untersuchungen ermöglichte. Im Juli 2014 startete schließlich das letzte Experiment EXPOSE-R2 – mit an Bord waren in diesem Fall 46 Bakterien-, Pilz- und Arthropoden-Arten (Arthropoden sind die übergeordnete Gruppe der Gliederfüßler, zu denen neben den Krebstieren auch die Insekten und Spinnentiere gehören).

Alle beendeten EXPOSE-Experimente sind mitsamt kurzer Beschreibungen der Ziele und Ergebnisse aufgelistet (die Untersuchungen und Auswertungen von EXPOSE-R2 sind noch nicht vollständig abgeschlossen).

## Überblick EXPOSE-Experimente

EXPOSE-E:

### 1. PROCESS [17]:

Ziel: Verhalten von organischen Molekülen und Aminosäuren unter simulierten Mars- und Weltraumbedingungen.

Ergebnisse: Organisches Material unter 1,5-jähriger UV-Belastung wie in Marsatmosphäre völlig degradiert – kein stabiler Aufenthalt möglich.

### 2. ADAPT [18]:

Ziel: Anpassung von Endosporen im interplanetaren Raum und unter Mars-UV-Belastung (559 Tage).

Ergebnisse: Größter Schaden an bakteriellen Endosporen durch UV-Strahlung (interplanetar und Mars). 8 % Überlebensanteil von Endosporen im Erdorbit und 100 % auf dem Mars, wenn effektiv vor Strahlung abgeschirmt.

### 3. PROTECT [19]:

Ziel: Resistenz von Endosporen gegen Weltraumbedingungen und Fähigkeit der Erholung von den Schäden nach Aussatz.

Ergebnisse: Außer durch UV-Strahlung keine großen Schäden – deutlich mehr Stress im interplanetaren Raum als auf Mars. Erhöhung von intrazellulären Resistenz-Mechanismen während des Aussatzes.

### 4. LiFE [20]:

Ziel: Strahlungseinflüsse auf extremophile Flechten (Symbiose von Pilzen und Mikroorganismen) im Weltraum.

Ergebnisse: Zwei Organismen konnten nach 1,5 Jahren im Weltraum wieder auf der Erde erfolgreich wachsen, wenn sie vor Strahlung geschützt waren. Großteil der DNA blieb nach Mars-Bedingungen intakt.

### 5. SEEDS [21]:

Ziel: Überleben von Pflanzensamen und Bestand von chemischen UV-Schutzschichten im Weltraum.

Ergebnisse: Rund ein Viertel der Samen konnten nach 1,5-jährigem Aufenthalt im Weltraum physiologisch intakte Pflanzen hervorbringen, vor allem wenn vor UV-Strahlung geschützt.



EXPOSE-R:

6. AMINO [22]:

Ziel: Einfluss solarer UV-Strahlung auf Aminosäuren im Orbit um die Erde und unter angenommenen Bedingungen auf Saturnmond Titan.

Ergebnisse: Aminosäuren in Meteoritenstaub deutlich resistenter gegen Degradierung. Aliphatische Kohlenwasserstoffe am robustesten. RNA-Nukleobasen werden von direkter Strahlung stark geschädigt.

7. ORGANIC [23]:

Ziel: Zeitliche Entwicklung von biologischem Material bei Aussatz im Weltraum.

Ergebnisse: Kompakte Kohlenwasserstoffe sind stabiler als freie Verbindungen. Am anfälligsten, wenn kein Kohlenstoff oder Wasserstoff in organischer Verbindung.

8. ENDO [24]:

Ziel: Einfluss von Weltraumbedingungen auf endolithische Mikroorganismen (in Gesteinen und im Untergrund lebend – Lithopanspermie).

Ergebnisse: Durch Einschläge gelöste Gesteinsformationen sind geeignete Habitats für einige Mikroorganismen, hauptsächlich wegen dem UV-Schutz (auch auf Uerde vorstellbar).

9. OSMO [25]:

Ziel: Aussetzen von osmophilen (geringe Wasseraktivität liebend) und salzliebenden Bakterien im Weltraum.

Ergebnisse: Im Vakuum überleben 90 %, wenn vor Strahlung geschützt. Unter solarer UV-Strahlung kein einziger überlebender Organismus.

10. SPORES [26, 27]:

Ziel: Überleben von in künstlichen Meteoriten eingebetteten Sporen im Weltraum (Lithopanspermie).

Ergebnisse: Bakteriensporen überdauern erfolgreich wenn im Inneren des Meteoriten eingelagert (auf Oberfläche und äußersten Schichten Zerstörung der DNA durch UV-Strahlung). Von den ebenfalls untersuchten Pilz-Sporen

überdauerten 30 % wenn vor Strahlung geschützt (auch unter Strahlung überlebten welche, wenn sie in zusammenhängenden Clustern freigesetzt wurden – äußerste Sporenschichten schützen innere Sporen).

#### 11. PUR [28]:

Wirkung verschiedener UV-Dosierungen im interplanetaren Raum auf den Bakteriophagen T7 (Virus, das Bakterien infiziert) und auf Uracil (RNA-Bestandteil).

Ergebnisse: Das gesamte UV-Spektrum verursacht Schäden der Nucleinsäuren und deren Bestandteile. Bestimmte Strahlungsmuster können diesen Effekt jedoch auch wieder umkehren.

#### 12. IBMP [29]:

Ziel: Einfluss interplanetarer Bedingungen auf Verbreitungseinheiten und Organismen im Ruhezustand ihres Lebenszyklus (darunter: Bakterien- und Pilzsporen, Pflanzensamen, Eier niederer Krebstiere und Larven).

Ergebnisse: Nach 1-jährigem Aufenthalt überlebten einige Bakterien- und Pilzsporen und Pflanzensamen, alle anderen Organismen nicht.

Insgesamt betrachtet zeichnete sich im Rahmen der Auswertungen aller EXPOSE-Untersuchungen ab, dass die solare UV-Strahlung mitsamt der kosmischen Strahlung anderer Quellen das größte Problem für Lebensformen und deren Sporen im interplanetaren Raum, sowie auf freien (nicht durch eine dichte Atmosphäre oder Bodenkruste geschützten) Oberflächen war. Bei der Interaktion zellulärer Bestandteile mit energiereichen Photonen (Photoionisation) werden die Nucleinbasen der DNA oder RNA teilweise direkt beschädigt – und die Wahrscheinlichkeit steigt mit der Höhe, weshalb Astronauten und auch Flugzeugpiloten regelmäßig

Gesundheitschecks durchführen müssen, um präventive Maßnahmen effizienter gestalten und die Effekte der erhöhten Dosis der UV-Strahlung, aber auch der Höhenstrahlung (historische Bezeichnung der kosmischen Strahlung) besser einschätzen zu können. Auch auf dem Erdboden verursachen die durch die kosmische Strahlung bedingten Teilchenschauer die Ionisierung von DNA-Molekülen, welche im besten Fall dazu führt, dass eine Zelle bei direktem Beschuss einen „freiwilligen“ programmierten Zelltod (Apoptose) einleitet, oder im ungünstigen Fall, wie etwa bei radioaktiver Bestrahlung, genetisch mutiert und sich im Gewebe unkontrolliert zu teilen beginnt (Krebs). Die Teilchenschauer auf der Erde bestehen jedoch (zum Glück) nicht mehr aus den sehr energiereichen, von den kosmischen Quellen direkt stammenden Teilchen (wie Protonen oder geladenen Atomkernen), sondern aus energieärmeren und weniger schädlichen Sekundärteilchen, die sich durch die Streuung der Strahlung in der schützenden Erdatmosphäre bilden, sofern das Magnetfeld und der Van-Allen-Strahlungsgürtel der Erde die Gefahr noch nicht vollkommen abgeschirmt haben. Ionisierung bedeutet am Beispiel der kosmischen Strahlung also, dass der resultierende Teilchenschauer in Form einzelner hochenergetischer Partikel auf Moleküle eines Körpers trifft und diese durch die Absorption von dabei ebenfalls entstehenden Photonen und dem dadurch bedingten Herausschleudern von Elektronen positiv auflädt. Das kann die biochemischen Bedingungen im Erbgut schnell durcheinanderbringen oder extragenomische Moleküle zu freien Radikalen werden lassen, die besonders reaktionsfreudig sind und für Geschwüre bis hin zu Tumoren verantwortlich sein können. Interessanterweise war bei dem EXPOSE-Experiment SEEDS die Wirkung der

UV-Strahlung auf Pflanzensamen deutlich schädlicher als die der viel energiereicheren Partikelstrahlung des Universums – die kosmische Strahlung in Form von relativistischem Teilchenbeschuss verursachte lediglich eine verzögerte Keimung der Sämlinge (*germination delay*), aber das Überleben (*survival*) wurde insgesamt nicht negativ beeinträchtigt [21].

Dieses erstaunliche Ergebnis zeigt bereits, dass die kosmische Strahlung aus evolutionsbiologischer Sicht (genauso wie die radioaktive Strahlung) nicht nur schwarzgemalt werden sollte – denn beide sind nicht nur an Krankheiten in Geweben und Veränderungen von Computerchips, sondern auch grundlegend an der Neuordnung unserer „Schaltkreise“ beteiligt. Genetische Mutationen entstehen zwar auch dadurch, dass bei der DNA-Replikation spontane Ablesefehler geschehen – die Fehlerquote ist aber bei gesunden Zellen ziemlich gering, und zwar eine Fehloperation auf etwa eine Millionen Operationen (wäre dieses Buch mitsamt all seiner etwa 400.000 Zeichen eine DNA-Abfolge, gäbe es demnach also nur in jedem dritten Buch einen einzigen kleinen Rechtschreibfehler. Gerne würde ich Ihnen das so verkaufen, aber mein Lektor kennt zu seinem Leidwesen die tatsächliche Quote). Abgesehen von diesen „inneren“ Unsauberkeiten, kommen für spontane Änderungen des Genoms aber eben auch elektromagnetische und kosmische Strahlungsausbrüche neben vielen anderen Faktoren für einige vergangene Mutationen in irdischen Organismen in Frage, die es allen Lebewesen erst ermöglichen, neue Adaptionen unter einem stetigen Selektionsdruck der Umwelt hervorzubringen und durch veränderte Genflüsse mit der Zeit zu evolvieren [30]. Eine direkte Verbindung also – zwischen den Weiten des Universums und dem uns auf der Erde überall umgebenden Leben in allerlei Form.

Neben diesen überraschenden Ergebnissen zeigten die EXPOSE-Experimente wie erwartet, dass die Widerstandsfähigkeit der erbguttragenden Sporen von Bakterien und Pilzen (diese werden wir noch eingehend behandeln) gegen alle Einflüsse deutlich höher ist als die der „ausgewachsenen“ Organismen. Pflanzensamen schnitten besonders gut ab. Zuvor wurde eigentlich vermutet, dass ihr im Vergleich mit mikrobiellen Sporen deutlich höheres Volumen und ihre größere Oberfläche auch mehr Angriffsfläche für abiotische Einflüsse (vor allem kurzweilige Strahlung) bereitstellen sollte. Tatsächlich scheint es aber so zu sein, dass der Schutz des Erbguts durch die – im Vergleich zu den Außenhüllen von Sporen – deutlich mächtigere Samenschale in Verbundenheit mit schützenden chemischen Molekülen auf der Oberfläche überwiegt und pflanzliche Samen somit einer der aussichtsreichsten Vehikel für den interplanetaren Transfer von genetischem Material sind („plant seeds as vectors for life“ [31]). Pilze und Flechten (Flechten sind eine Vergesellschaftung von Algen oder Cyanobakterien mit Pilzen) können zwar im Vakuum einige Zeit lang erfolgreich überdauern, aber die anderen Bedingungen im Weltraum (Temperatur, Strahlung) machen Ihnen den Experimenten zufolge schon nach einigen Stunden deutlich zu schaffen – bei einem Meteoriteneinschlag werden zusammenhängende Flechten ohnehin regelrecht zerfetzt, während sie auf der Erde einer der wichtigsten Primärbesiedler extremer Habitats sind und allerlei Oberflächen überziehen. Viel Aufmerksamkeit erlangten in letzter Zeit auch die mikroskopisch kleinen sogenannten Bärtierchen (Tardigrada), die im Stamm der Tiere bisher die widerstandsfähigsten Extremisten zu sein scheinen. Nicht nur wurden sie aus Moosproben rekultiviert,

die 30 Jahre lang eingefroren waren – Bärtierchen überlebten auch als eine von wenigen Gruppen die 5 letzten Massenaussterben und als bisher einzige Tiere auch einen 10-tägigen Aufenthalt im All mit Temperaturen nahe dem Nullpunkt (-273 Grad Celsius) und harter Strahlung [32]. Nun gab es in den breiten Medien ebenfalls einige Artikel, die diesen Tierchen – die übrigens wie Hybride zwischen Bär und Staubsauger ausschauen – sogar zuschrieben, dass sie die einzigen Organismen wären, die viele Formen der Apokalypse überleben könnten. Hier wurden die Originalpublikationen aber etwas ungenau zitiert – es sind zwar vermutlich durchaus die extremsten Tiere, die anderes Getier mit Sicherheit überdauern dürften, aber an extreme Lebensformen in der Welt der Bakterien kommen auch diese Space Bears nicht heran.

## **Mikrobielle Wiedergeburt – wieso kämpfen, wenn man schlafen kann?**

Viele Bakterienarten haben im Laufe der Evolution Strategien entwickelt, um ihren Stoffwechsel an extreme Umweltbedingungen anzupassen und vorteilhafte physiologische Adaptationen zu entwickeln. „Das wohl selbstgenügsamste Geschöpf der Erde ist im Jahr 2008 knapp drei Kilometer unter der Erde im Minenwasser eines südafrikanischen Bergwerks gefunden worden ...“, schrieb der Parasitologe und Wissenschaftsjournalist Jan Osterkamp diesbezüglich im Oktober 2016 und meinte das extremophile Bakterium *Desulforudis audaxiviator* [33]. „Es überlebt dort völlig autark als einziges Lebewesen bei Temperaturen von 60 Grad Celsius und deutlich basischen pH-Werten mit der einzigen Energiequelle der

sonnenlosen Tiefe, radioaktiver Strahlung“. Die Temperaturangabe ist hierbei nicht wirklich beeindruckend – auf vielen heißen Flecken in Ozeanen und Gewässern leben Archaeen (Urbakterien), die sogar nur dann wachsen können, wenn es heißer ist als 80 Grad Celsius (hyperthermophil). Aber dass ein Organismus direkt von der Energie der von uns ausschließlich negativ angesehenen radioaktiven Strahlung lebt, übertrifft die skurrilen Vorstellungen vieler Science-Fiction-Autoren wieder mal bei Weitem. Der Anlass seines Artikels war, dass der Astrophysiker Dimitra Atri zuvor zeigen konnte, dass eine solche kuriose Lebensweise theoretisch ebenfalls auf Gesteinsbrocken wie Asteroiden und Kometen infrage kommt – der primäre Energielieferant wäre hier aber nicht die Radioaktivität, sondern eben die kosmische Strahlung, welche durch die resultierenden photochemischen Reaktionen auf diesen Himmelskörpern ausreichend verwertbare Substanzen erzeugen könnte [34].

Ein anderer Lebenskünstler der Erde sucht ebenfalls seinesgleichen. Die besondere Eigenschaft dieses Organismus ist sogar so eindrucksvoll, dass sie den wissenschaftlichen Namen der Spezies bestimmt: *Deinococcus radiodurans*. Dieses Bakterium verkörpert mit den Cyanobakterien der Gattung Chroococcidiopsis die absolute Spitze der Widerstandsfähigkeit lebender Wesen, und sie sind, man kann es nicht anders sagen, extreme extremophile Organismen (polyextremophil). So ist es auch nicht verwunderlich, dass sie enorm tolerante Generalisten sind – dieser ökologische Begriff wird Arten zugeteilt, die ubiquitär auftreten, also eigentlich überall auf der Erde zu finden sind und alle möglichen natürlichen und auch künstlichen Bedingungen tolerieren können, sei es die Kälte im antarktischen Eis oder die Strahlung im radioaktiven Kühlwasser

von Kernkraftwerken (radiodurans bedeutet letztlich so viel wie „langlebig unter Strahlung“). Da *Deinococcus radiodurans* kurzzeitige Dosierungen von bis zu 17.500 Gy (Gy = Gray, Maß für ionisierende Strahlung) aushalten kann [35], sind diese Bakterien prinzipiell optimale Kandidaten zur Etablierung eines Sukzessionsstadiums durch initiale Besiedelung unbelebter Himmelskörper (Menschen sterben übrigens ohne Ausnahme ab 7 Gy, eine dauerhafte Bestrahlung von 5 Gray würde 50 Prozent der Weltbevölkerung innerhalb eines Monats töten [36]). Zwar besitzt das Bakterium auch eine relativ stark vernetzte Zellwand, die es mit Sicherheit vor gewissen Strahlenmengen abzuschirmen vermag, aber es ist vor allem die besonders faszinierende Fähigkeit dieser Lebensform, geschädigte DNA nahezu sofort zu reparieren – diese Instandhaltung ist bei diesem Organismus sogar so effizient, dass komplette Doppelstrangbrüche der DNA kein Problem darstellen und auch ganze Chromosomen mitsamt ihrer Funktionen aus völlig fragmentierten Bestandteilen rekonstruiert werden können [37]. Zudem scheint die toroidale Form (eine in sich geschlossene Ring-Struktur, die letztlich aussieht wie ein mikroskopischer Donut) und die stark geordnete Strukturierung der DNA im Zellkern eine elementare Rolle für die besonderen Fähigkeiten dieser Spezies zu spielen. Die unvergleichbare Resistenz gegen UV- und auch Röntgenstrahlen machte die Organismen schon kurz nach ihrer Entdeckung innerhalb von Fleischkonserven im Jahr 1956 zu einer der interessantesten Forschungsobjekte in der Medizin, im Militärssektor (das zitierte Paper zur Strahlendosis stammt tatsächlich vom „Committee on Battlefield Radiation Exposure Criteria“) und der aufkeimenden Exobiologie. Für die Hypothese der Transspermie ist besonders



interessant, dass auch extreme Geschwindigkeiten und sprunghafte Beschleunigungen, wie sie durch einen Meteoriteneinschlag entstehen würden, für den Organismus keine tödlichen Faktoren darstellen (in einem Experiment überlebten je nach Stichprobe 40 bis 100 Prozent aller Exemplare sogar unter der 2,5 bis 25-fach höheren Beschleunigung, als sie bei einem großen Einschlag vermutet wird [38]). Im Regolith des Mars machen die marsianischen Temperaturen und Luftfeuchtigkeitsschwankungen, geringere Schwerkraft und anoxische (sauerstofffreie) Gasumgebung dem ausgewachsenen Organismus auf Dauer jedoch deutlich mehr zu schaffen – dort wäre ein längerfristiger intensiver UV-Schutz durch endolithische Einlagerung zudem lebensnotwendig, auch wenn der Organismus kurzfristig extremst strahlungsresistent sein kann [39]. Höchstwahrscheinlich kommen hierbei die lebenserhaltenden Funktionen der DNA-Reperaturenzyme durch die dauerhafte Belastung in der marsianischen Umwelt allmählich zum Erliegen, auch wenn sie auf der irdischen Oberfläche, oder sogar auf völlig exponierten Staubpartikeln in der Luft, ohne Weiteres ihre Arbeit verrichten können. Nichtsdestotrotz ist *Deinococcus radiodurans* – und vor allem mögliche durch Menschen erzeugte und optimierte Mutanten – die mit Abstand aussichtsreichste Spezies für die Biospace-Engineering-Projekte der Zukunft.

Doch es geht tatsächlich noch extremer – dabei handelt es sich jedoch nicht mehr um Organismen im klassischen Sinne.

Im Gegensatz zu extremophilen Organismen, die ihre physiologischen Abläufe an unwirtliche abiotische Verhältnisse anpassen, können sich einige Bakterienarten gewissermaßen in einen trotztenden „Dauerschlaf“ versetzen, indem sie eine „Überdauerungskapsel“ produzieren und ihren anfälligen

Körper hierfür sogar einfach selbstständig zerstören. Der zugehörige mikrobiologische Prozess heißt Sporulation und ermöglicht einem Bakterium eine sogenannte Endospore zu bilden. Diese zellartigen Gebilde sind neben multiresistenten Erregern vermutlich die meistgefürchteten und – gehassten Erbgutträger in Operationssälen, weil sie für Infektionen unter sorgfältigsten Hygienevorschriften verantwortlich sein können und gegen jegliche Antibiotika, aber auch allerlei physikalische und chemische Einflüsse resistent sind. Gleichwohl sind sie gerade deswegen auch die beliebtesten Hoffnungsträger für Astrobiologen und Exoökologen – während meine Mutter zur Zeit ihrer Tätigkeit als Infektionsbiologin in der Tierzucht also ironischerweise alles dafür tun musste, die Endosporenbildung zu neutralisieren, kann ich mir kaum etwas wundervolleres erträumen. Der „angegriffene Körper“ ist bei diesen Tagträumen (die sich manchmal auch als kurze Nickerchen in Vorlesungen zu erkennen gaben) aber selbstverständlich kein tierischer oder menschlicher, sondern die Infektion erstreckt sich interplanetar auf Himmelskörper.

Von gewöhnlichen Zellen kann bei Endosporen aber keineswegs mehr die Rede sein. Schon unter einem Elektronenmikroskop zeigen diese Gebilde ihre erheblich differenzierte Struktur und erscheinen im Gegensatz zu „normalen“ vegetativen Zellen regelrecht als mobile DNA-Festungen [40]. Das Erbgut ist hier nicht nur von der üblichen Zellwand des Kerns, sondern auch noch durch drei weitere Schichten geschützt und die Spore enthält zudem nur etwa 10 Prozent des Wassergehalts einer normalen vegetativen Zelle – sie ist also völlig dehydriert. Was für eine lebende Zelle und auch unseren Körper lebensbedrohlich klingt (unser Körper besteht je nach Alter schließlich aus fünfzig bis achtzig Prozent Wasser), ist für eine

„schlafende“ Spore tatsächlich einer der lebenswichtigsten Vorteile. Das Fehlen von Wasser fährt zwar den Stoffwechsel völlig herunter und versetzt die Spore in einen Stand-by-Modus des Lebens (Kryptobiose), aber genau dadurch wird insbesondere die Hitzeresistenz der „getrockneten“ DNA-Kapsel deutlich erhöht (problemlose Überdauerung von stundenlangem Kochen), aber auch der Hydrolyse (chemische Spaltung von Biomolekülen durch Wasser) und abbauenden enzymatischen Vorgängen wird so nur noch eine minimale Angriffsfläche geboten. Zusätzlich bilden sich während der Sporulation sogenannte SASPs (*small acid soluble spore proteins*). Diese Proteine binden sich direkt an die DNA und erzeugen einen kompakteren Zustand des Erbguts (sogenannte „A-Form“ der DNA), welche insbesondere gegen die mutagene Wirkung von UV-Strahlung deutlich resistenter ist (siehe EXPOSE-Experimente ADAPT, PROTECT, SPORES und IBMP), aber auch vor völliger Austrocknung, trockener Hitze und auch klirrender Kälte schützt.

Die Bildung einer Endospore wird initiiert, wenn das betreffende Bakterium erheblichem Stress ausgesetzt ist und das Wachstum der einzelnen Zelle, oder auch der gesamten Kolonie, innehält. Stress bedeutet in diesem Fall, dass beispielsweise lebensnotwendige Nährstoffe wie Stickstoff oder Kohlenstoff im Habitat nicht mehr frei verfügbar oder auffindbar sind, sich die mikroklimatischen Bedingungen des eigenen Lebensraums sprunghaft verändert haben, oder auch, dass ein aktiver oder passiver Wechsel in ein anderes, ungünstiges Habitat stattgefunden hat. Die reife Spore, die ihr Mutterbakterium zuvor platzen lässt und somit vollständig zerstört, wächst nicht und befindet sich im Zuge der Kryptobiose auch metabolisch im absoluten Ruhezustand – sie ist also nach

ihrer Ausdifferenzierung ein weitgehend starres Gebilde, welches aber sehr wohl hochmobil ist (ideale passive Verbreitung durch Wasser, Wind, Tierkot oder eben auch durch das Herausschleudern von Bodenaggregaten nach einem Meteoriteneinschlag). Ein Bakterium leitet durch die Sporulation also die eigenständige Selbstzerstörung des Zellkörpers ein, damit die DNA in einer erheblich resistenteren Kapsel verbleiben kann. Es ist gewissermaßen so, als ob nicht der Organismus selbst, sondern nur das Erbgut „überleben will“, egal um welchen Preis. Doch was nützt einem Bakterium diese Selbstopferung? Die Antwort finden wir wieder im Albtraum eines jeden Infektionsmediziners oder Operateurs – oder vielmehr des Patienten: Die Keimung einer Endospore.

Sporen können lange im kryptobiotischen Ruhezustand verbleiben, aber sie können sich durch äußere Einwirkungen (z. B. erhöhte Temperaturen oder Wiederverfügbarkeit von spezifischen Nährstoffen) innerhalb von Stunden wieder in voll funktionsfähige und exponentiell vermehrende vegetative Zellen „zurückverwandeln“. Der Ruhezustand einer Endospore kann Funden und Untersuchungen zufolge dabei mit Sicherheit mehrere tausend Jahre unbeschadet erhalten bleiben (zum Beispiel in Sedimentkernen von Seen [41]). Es gibt auch Hinweise für das Überdauern von bakteriellen Endosporen über Jahrmillionen in Gedärmen von urzeitlichen Bienen, die zu ihren Lebzeiten vor rund 25 Millionen Jahren in Bernstein eingeschlossen wurden, oder sogar für sporenbildende Bakterien, die über eine Viertelmilliarde Jahre in Salzkristallen überdauert haben [42]!

Eine Operationswunde, die nach dem Eingriff kein einziges lebendes Bakterium mehr aufweist (was ohnehin nicht möglich ist), kann sich unter einfachen Umständen also

Wochen später noch infizieren und entzünden. Wechseln wir jedoch von diesem Albtraum eines Patienten im Krankenhauszimmer in die Traumwolke über dem Bett (oder der Schulbank) eines Astrobiologen, erscheinen die resistenten und krankheitserregenden Sporen nun als Hoffnungsschimmer. Statt in klaffenden oder geschlossenen Wunden eines Körpers Entzündungen auszulösen, infizieren sie in diesem Traum offene Himmelskörper und deren Untergründe mit „verborgenem“ Leben. Die Frage, die sich für die exoökologische Forschung diesbezüglich stellt, ist demnach: Kann eine Endospore eine interplanetare Reise mit deutlich höherer Wahrscheinlichkeit als eine ausgewachsene und lebende Zelle überstehen und nach Ankunft auf einem fremden Himmelskörper entweder weiterhin als uneinnehmbare DNA-Festung verbleiben, oder sich sogar unter geeigneten extraterrestrischen abiotischen Bedingungen wieder zu einem funktions- und teilungsfähigem Bakterium entwickeln?

Die EXPOSE-Experimente geben unterstützende Hinweise darauf, dass eine solche interplanetare DNA-Ausbreitung möglich sein könnte. Sind die Endosporen vor freier Strahlung mehr oder weniger abgeschirmt, zum Beispiel eingebettet in Meteoriten und Gesteinspartikeln (oder sogar in bloßen Sporen-Clustern – siehe Experiment SPORES), ist ein Überdauern vieler Sporen wahrscheinlich. Auch die Erhitzung während eines Meteoriteneinschlags und den Eintritt in eine Exo-Atmosphäre kann eine widerstandsfähige Endospore im Gegensatz zu vielen ausgewachsenen Mikroben überleben [43, 44]. Für Pflanzensamen, die letztlich als die botanischen Äquivalente zu mikrobiellen DNA-Kapseln angesehen werden können, scheinen die Beschleunigungen bei dem Herausschleudern jedoch zu hoch zu sein, was ihre

besonders guten EXPOSE-Resultate in deutlich trüberes Licht stellt (einzelne abgetrennte organische Bestandteile des Samens halten die Bedingungen eines Einschlags jedoch vermutlich aus) [45]. Die Leiter des *SEEDS*-Experiment beschwichtigen dies in ihrer Publikation jedoch mit der Aussage, dass Pflanzensamen oftmals eine Vielzahl an Mikroorganismen unterhalb der schützenden Samenschale beherbergen und den Mitreisenden somit als Ausbreitungsvektoren dienen könnten, auch wenn der Embryo der Pflanze bei einem Einschlag selbst nicht überlebt.

Ob die deutlich kleineren Endosporen jedoch aufgrund günstiger Bedingungen wieder aufkeimen und die dadurch entstehenden Zellen sogar eine dauerhaft verfügbare ökologische Nische auf einem fremden Himmelskörper einnehmen können, ist nicht so einfach zu beantworten, da wir eine fremde extraterrestrische Landschaft nicht ohne Weiteres eins zu eins auf der Erde oder der ISS nachahmen können, sondern nur Nachahmungen im Labor erzeugen können. Doch die bisherigen Experimente zeigen zumindest innerhalb ihres experimentellen Rahmens, dass eine Keimung in nachgebildeten marsähnlichen Untergründen genauso möglich ist wie auf der Erde, nachdem die Sporen eine interplanetare Reise durchmacht haben (siehe ADAPT und PROTECT).

Die Möglichkeit der Keimung von Sporen in exoökologischen Nischen (die in manchen Fällen, wie zum Beispiel Exo-Ozeanen auf Monden, vielleicht sogar weniger extrem sein könnten als manch irdische Bedingungen) erscheint unter Beachtung aller bisheriger Experimente also durchaus gegeben – selbst überzeugte Kritiker müssen nach dem heutigen Kenntnisstand zugeben, dass eine extraterrestrische Wiedergeburt von Endosporen nicht ausgeschlossen werden

kann. Mehr weiß man, und das muss auch deutlich gesagt werden, zum heutigen Zeitpunkt jedoch nicht. Die bisherigen EXPOSE-Ergebnisse werden in entsprechenden Blog-Einträgen im Netz meines Erachtens leider immer wieder viel zu euphorisch ausgelegt, was es für Laien schwierig machen kann, die Ergebnisse selbst zu interpretieren oder sachlich zu hinterfragen. Man kann aber sehr wohl viel kritisieren. So waren die EXPOSE-Materialien den Verhältnissen im Weltraum bis zu zwei Jahre ausgesetzt – ein interplanetarer Transfer an Bord von herausgeschleuderten Gesteinsbrocken dauert hingegen mehrere Millionen Jahre, was vor allem die anfallende Gesamtwirkung von Strahlungseinflüssen um ein Vielfaches erhöht. Besonders ernüchternd finde ich die Tatsache (die in fast keinem EXPOSE-Paper erwähnt oder eingehend konkretisiert wird), dass die ISS „nur“ etwa 400 Kilometer über unseren Köpfen hinwegschwebt – und das aus gutem Grund! Denn ab einer Höhe von 700 Kilometern beginnt die Zone des inneren Strahlungsgürtels der Erde (Van-Allen-Gürtel), der im Zuge des irdischen Magnetfelds die relativistischen und geladenen Partikel des Kosmos und der Sonne auffängt (im inneren Gürtel vorwiegend hochenergetische Protonen, in den äußeren Zonen vor allem Elektronen). Die Besatzung der ISS ist dadurch vor der direkten kosmischen Strahlung selbstverständlich weitgehend abgeschirmt – und so waren es auch die Bärtierchen und die biologischen Proben aller EXPOSE-Experimente. Das Magnetfeld der Erde ist der effektivste planetare Schutzschild, und Lebensformen, die unter dieser Schutzwirkung im Weltraum überdauern, könnten im tatsächlich „freien“ Raum deutlich schneller oder auch sofort vernichtet werden. Wenn man bewegungsökologische Fragestellungen auf einen astronomischen Maßstab

skaliert, dürfen diese Aspekte meiner Ansicht nach nicht einfach unbeachtet bleiben, vor allem dann nicht, wenn im Diskussions-Teil einer wissenschaftlichen Arbeit gewagte Panspermie-Spekulationen vertreten werden.

Dass die Gefahr eines mikrobiellen Transfers zumindest im Zuge der menschlichen Raumfahrt jedoch sehr ernst genommen wird, zeigen neben den *Planetary Protection Offices* auch die beiden NASA-Raumsonden Cassini und Juno. Beide werden, wie schon Galileo im Jahr 2003, 2017 in die Saturn-Atmosphäre beziehungsweise 2018 in die Gashölle des Jupiters gestürzt, um jegliche Kontamination der untersuchten Monde dieser Planeten (auf welche die Raumsonden höchstwahrscheinlich irgendwann herabsinken würden, wenn die Energie der antreibenden Instrumente nicht mehr ausreicht, um ihre Umlaufbahnen um die Monde stabil zu halten) im Vorhinein zu vermeiden. Im Falle des Mars ist man sich jedoch sicher, dass sich aufgrund der bereits geglückten und für die nächsten Jahre geplanten Marsrover-Missionen irdisches Erbgut bereits auf unserem roten Nachbarn befindet und weitere biologischen „Verschmutzungen“ hinzukommen werden – in welcher Form und Verfassung auch immer. Lange bevor der erste Mensch auf unserem roten Nachbarplaneten landet.

## Marsmenschen

Ob extremophile Organismen oder Sporen auf anderen Welten im Sonnensystem überleben können, ist selbstverständlich in erster Linie eine Frage, die letztlich der kindlichen Neugier von Forschern, aber auch der von interessierten Laien geschuldet ist. Der Mars erfuhr bereits nach den



angeblich beobachteten Schiffskanälen Ende des 19. Jahrhundert viel Beachtung, aber auch im letzten Jahrzehnt durch die geglückten NASA-Missionen – insbesondere die Marsrover Spirit, *Opportunity* und Curiosity, die im Grunde Exo-Geochemiker sind, immer noch fleißig arbeiten und die Fans regelmäßig per Facebook und Co. über ihre extraterrestrischen Erfahrungen informieren.

Neben interessierten Bürgern und träumenden Forschern gibt es aber auch reiche – extrem reiche – Menschen, deren Neugierde nicht nur durch etwaige Lebensformen auf dem Mars geweckt wird, sondern die ihre gesamten Unternehmen auf der Idee der Transpermie aufbauen und immense Gewinnmargen in den nächsten Jahrzehnten erwarten. Multimilliardäre wie Elon Musk (Gründer des privaten Raumfahrtunternehmens *SpaceX*) beteuern in ihren Reden sogar, dass die Existenz der menschlichen Spezies unter anderem davon abhängen wird, ob wir genug Wissen über extremophile Organismen und ihren interplanetaren Transfer von einer Welt in die andere besitzen werden – spätestens dann, wenn die Erde aufgrund unseres Zutuns oder auf natürliche Art und Weise nicht mehr komfortabel sein wird oder irgendwann vielleicht auch einem für unsere Ansprüche völlig unbewohnbaren Gesteinsbrocken entspricht. Vor allem aber werden es – und Musk als einer der reichsten Menschen der Erde kann das wohl authentisch untermauern – wirtschaftliche Interessen sein, die Reisen auf andere Himmelskörper initiieren werden, seien es neue Ressourcen in Friedenszeiten oder auch vorteilhafte militärische Außenposten. Redner beziehen sich dabei oftmals auf die durch den Goldrausch ausgelöste Kolonisierung Amerikas, aber auch friedliche touristische Business-Konzepte werden – so hoffe ich – eine Rolle spielen.

## Planetarische Ökosynthese

Das wirtschaftliche Interesse zukünftiger bemannter interplanetarer Missionen bezieht sich in erster Linie auf den Mars, da er und unsere Erde nicht nur direkte Nachbarn sind (was sich vor allem in den „Reisekosten“ positiv niederschlägt), sondern beide Körper durchaus ökologische Gemeinsamkeiten besitzen, wie zum Beispiel der geologische Vergleich der trockenen Täler der Antarktis und der Marspole oder die ähnliche Achsenneigung beider Planeten und die dadurch bedingten Jahreszeiten zeigen. Auch wenn einige geoökologische Eigenschaften des Mars aus der irdischen Perspektive nachvollziehbar sind, überwiegen die abiotischen Differenzen die Gemeinsamkeiten jedoch selbstverständlich deutlich – das wissen auch die extravaganten Geschäftsleute und Mars-Investoren. Für höheres Leben, allen voran für Menschen und seine Aktivitäten, nennen viele Autoren, darunter auch der Futurologe Stephen Petranek, neben „banalen“ Problemen wie Nahrung und Bekleidung, insbesondere die elementaren „Wasser- und Sauerstoffprobleme“ [46].

Eine menschliche Besatzung auf dem heutigen Mars würde ohne die Einleitung bestimmter Maßnahmen über Kurz oder Lang unter Wassermangel leiden. Das liegt in erster Linie daran, dass der Transport von Wasser von der Erde zum Mars ökonomisch völlig ineffizient ist – vor allem in Hinblick auf die anfallenden Technik- und Treibstoffkosten – und die Geschäftsleute, so reich sie auch sein mögen, auf Dauer überfordern würde. Elon Musk sieht künftige Marsmissionen sogar viel eher durch Finanzierungsprobleme gefährdet als durch technische und ökologische

Herausforderungen [47]. Andererseits sind die natürlichen (kostenlosen) Wasservorräte des Mars zwar durchaus gewaltig (vermutlich mindestens 1,6 Millionen Kubikkilometer, was ausreichen würde, um einen hunderte Meter tiefen Ozean auf dem Mars zu füllen [48]), doch ist das Wasser bislang nur im gefrorenem Zustand vorrätig (nicht nur an den Polen, sondern vor allem auch in tieferen Schichten des Regoliths). Im November 2016 veröffentlichte die NASA nach der Auswertung von Daten des Mars-Orbiters Reconnaissance beispielsweise riesige Wasserressourcen in der Tiefebene Utopia Planitia [49], welche bereits früher als einer der aussichtsreichsten Standorte für eine zukünftige bemannte Landung auf dem Mars galt und in der auch schon die *Viking*-Sonden in den 1970er Jahren landeten, um nach Hinweisen marsianischen Lebens zu suchen. Besonders eindrucksvoll: Die zwischen 80 und 170 Meter dicke vereiste Schicht liegt nur zehn Meter unter der Oberfläche, an manchen Stellen muss man vermutlich sogar nur einen einzigen Meter bohren, um an das gefrorene Wasser zu gelangen. Das gesamte Volumen entspricht in etwa dem Lake Superior in Nordamerika, welcher die größte Fläche aller Süßwasserseen der Erde aufweist (etwa ein Viertel der gesamten Fläche Deutschlands). Sobald das Eis jedoch natürlicherweise zur Oberfläche des Mars befördert werden würde, um es zu erwärmen und zu schöpfen, würde es sich aufgrund des kaum vorhandenen Druckes, der trockenen und sehr dünnen Marsatmosphäre und den herrschenden Temperatur sofort als Gas verflüchtigen (eine flüssige Aggregatsphase wäre nicht vorhanden, sogenannte Sublimation). Unter einem marsianischen Trinkhahn geneigt würden Sie mit Ihrem Mund also bestenfalls verflüchtigten Dampf

aufsaugen können – das dürfte Ihren Durst mit Sicherheit nicht stillen. Eine unterirdische Aufbereitung dieses mit Staub vermischten gefrorenen Wassers in für Menschen verfügbares Trinkwasser hingegen wäre zwar technisch ziemlich aufwendig, aber prinzipiell auf jeden Fall möglich. Um unseren roten Nachbarn jedoch zu einem eigenständigen und dauerhaften Spender von flüssigem Wasser transformieren zu können, ohne ständig die Treppen in eine wasseraufbereitende Mars-Mine hinunterklettern zu müssen, müssten sich erst die Temperaturen, also allen voran die abiotischen Eigenschaften der Marsatmosphäre wesentlich verändern.

Für uns ist die Marsatmosphäre selbstverständlich allein aufgrund des fehlenden freien Sauerstoffs völlig unwirtlich – wir würden dort ein Gasgemisch aus 95 Prozent Kohlendioxid, etwa je zwei Prozent Stickstoff und Argon und Spuren von Kohlenmonoxid und Sauerstoff einatmen [50]. Kurz gesagt: Nach einigen Minuten wären wir tot. Hinzu kommt, dass die Gashülle so dünn und der atmosphärische Druck so gering ist, dass wir ohne Raumanzüge rein physiologisch überhaupt keinen Atemzug durchführen könnten – unser Blut würde aufgrund des sehr geringen Siedepunktes sofort kochen (weshalb Sie bei einem sehr hoch fliegendem Flugzeug auch auf keinen Fall die Türen öffnen sollten). Und selbst wenn der Luftdruck passen sollte, würde eine bloße und schnelle Erhöhung des Sauerstoffs freilich nicht ausreichen, denn auch zu viel Sauerstoff ist schädlich – es zerstört aufgrund seiner Reaktionsfreudigkeit tatsächlich direkt unsere Lungenbläschen. Auf der Erde ist unser eigentlicher Lebensretter deshalb der in dieser Hinsicht völlig unterschätzte atmosphärische Stickstoff, den wir mit jedem unserer Atemzüge am meisten konsumieren und der aufgrund seiner

Inertgas-Eigenschaften kaum mit unserer Lunge reagiert. Stickstoff besetzt regelrecht die relevanten Stellen in der Lunge, damit nicht übermäßig viel des ebenfalls lebenswichtigen, aber physiologisch schädlichen Sauerstoffs eingeatmet und verarbeitet wird.

Doch wie könnte man nun aus einer extrem dünnen und lebensfeindlichen Marsatmosphäre eine erdähnliche, oder sogar eine imitierte irdische Gashülle mit hauptsächlich elementaren Stickstoff (rund 78 Prozent) und Sauerstoff (etwa 21 Prozent) synthetisieren, um ein geeignetes Exo-Ökosystem für Menschen zu gestalten?

Um aus dem Mars ein anthropophiles Habitat zu entwerfen, gibt es zwei grundsätzliche ökologische Möglichkeiten. Entweder wir verändern uns selbst, wie es im Falle unseres Genoms schon natürlicherweise im Zuge von Umweltveränderungen und Anpassung seit jeher der Fall ist – und diese Selbstanpassung erscheint heute anders als vor einigen Jahrzehnten im Zuge der synthetischen Biologie, Gentechnologie, aber auch den aufkeimenden Cyborg-Wissenschaften für die nächsten Jahrhunderte deutlich effizienter, gezielter und im Zeitraffer vorstellbar. Oder aber wir verändern den Mars, insbesondere seine atmosphärischen Eigenschaften, zu unseren Gunsten. Diese zweite Option wird treffend unter dem Begriff Terraforming zusammengefasst. Die Umsetzung einer solchen „Erdanpassung“ benötigt selbstverständlich menschliche Geldgeber, fleißige Techniker und Ingenieure, raffinierte Biologen und Ökologen, Physiker und auch außerirdisch kreative Architekten und Landschaftsplaner. Doch das sind alles nur sekundäre Akteure. Die Hauptrolle für unser Leben auf dem Mars nehmen wieder die kleinsten und unscheinbarsten Lebensformen ein. Ohne extremophile

Mikroben als Protagonisten läuft auf der marsianischen Bühne des Lebens gar nichts.

Extreme Einzeller sind aufgrund ihrer besonderen und für komplexere Organismen lebenswichtigen Fähigkeiten zwangsweise elementare Bestandteile aller heutigen Überlegungen bezüglich menschlichen Lebens auf dem Mars. Das in deutschen Medien am häufigsten anzutreffende Menschen-auf-dem-Mars-Projekt ist die private Stiftung *Mars One* (nicht zuletzt ist sie hier deshalb so populär, weil sie ihren Sitz unmittelbar bei unseren niederländischen Nachbarn hat). Wie gemeinhin bekannt, soll das Projekt bereits im Jahr 2027 die ersten Menschen auf den Mars befördern, die nach der hoffentlich weichen Landung eine dauerhaft bewohnbare Siedlung aufbauen sollen [51]. Laut Veranstalter soll die Landung und das Leben auf der Station nicht nur eine naturwissenschaftliche Sensation, sondern auch das größte TV-Ereignis aller Zeiten werden – und zwar in Form einer Reality-Show, deren Schwerpunkt jedoch nicht wie heute leider üblich schlecht inszenierte Liebe, Sex und Fremdgeherei, sondern authentische Wissenschaft und Technik sein soll (Wobei es durchaus auch humanpsychologische Studien im Auftrag der NASA gibt, die eingehend untersuchen, wie sich der Entzug von Sex oder Selbstbefriedigung bei langandauernden Aufenthalten an Bord von Raumschiffen oder auch auf sehr engen und wenig Privatsphäre bietenden Kapseln auf dem Mars auf die Psyche auswirkt – man will schließlich keine deprimierten oder gar aggressiven Astronautinnen und Astronauten als erste Bewohner des Mars, auch wenn ein aufflammendes Verhalten womöglich die TV-Einschaltquote erhöhen würde.).

Von dem Ökosystem, in dem das Leben der TV-Stars dann eingebettet sein wird, wird sich schon (nach heutiger

Planung) 2021 ein noch nicht ausgewähltes Ehepaar ein erstes Bild aus der Vogelperspektive machen. Sie sollen im Zuge des privaten Mega-Projekts *Inspiration Mars* die ersten Menschen sein, die einen Vorbeiflug am Mars absolvieren, die Marslandschaft aus dem Orbit betrachten und wieder zur Erde zurückkehren [52]; die gesamte Reisedauer wird etwa 500 Tage innerhalb einer isolierten Weltraumkapsel betragen, was u. U. natürlich dafür sprechen könnte, dass es sich hier nicht ganz so gut ausschließen lässt, dass die ersten Marsumrunder ihrem Partner gegenüber durchaus genervt oder aggressiv gestimmt sein könnten (im Gegensatz zu diesem Ehepaar gibt es übrigens kein garantiertes Rückfahrtticket für die ersten Menschen im Zuge der *Mars-One*-Mission). Und dann gibt es noch Projekte und Bestrebungen, welche im Gegensatz zu *Mars One* und *Inspiration Mars* keine Ziele einer privaten Stiftung, sondern eines bereits heute milliardenschweren Unternehmens sind: *SpaceX*.

Der Begründer und Hauptverantwortliche ist Elon Musk, der Gründer der bedeutenden Elektrofahrzeugfirma *Tesla Motors* und Initiator des mittlerweile allgegenwärtigen Finanztransaktionssystems *PayPal*. Er verfolgt viele futuristische Konzepte, etwa das Hyperloop-Projekt, bei dem kapselartige Züge im Vakuumröhren mit Schallgeschwindigkeit reisen sollen, oder laut seiner Bekanntgabe im Oktober 2016, neuartige Solarzellen, die wie gewöhnliche Dachziegel aussehen und möglichst jedes Haus unseres Planeten schmücken sollen. Doch sein wohl ehrgeizigstes Ziel ist es, wie er immer völlig überzeugt beteuert, dass „*Homo sapiens* zu einer multiplanetaren Spezies wird“ [47]. Musk ist bei seinen Mars-Konkurrenten wohl nicht unbedingt allzu beliebt, zumal seine Pläne sogar die von führenden Organisationen wie NASA und ESA in den

Schatten stellen, während die Beteiligten der anderen Projekte eher bei diesen Weltraumorganisationen um Hilfe bitten. Ja, er schoss sogar wie eine seiner Space-Raketen an ihnen vorbei, als er ankündigte, dass dank seines Unternehmen bereits im Jahr 2050 vierzig- bis fünfzigtausend Menschen auf dem Mars leben werden! Erst einmal könnte man sich fragen, wer eine solche waghalsige Reise überhaupt in Kauf nehmen würde. Ich weiß nicht wie es um Sie steht, aber mir wäre allein schon die Hinreise viel zu riskant. Wenn man aber nur die über 200.000 Anmeldungen für die *Mars-One*-Tickets (und das sind alles One-Way-Tickets ohne Rückflugmöglichkeit!) betrachtet, erscheinen die von Musk genannten Zahlen an Exo-Menschen sogar untertrieben – von Millionen potentieller Marsbewohnern, wenn es die Technik noch in diesem Jahrhundert erlaubt, war in authentischen Fachvorträgen und Symposien tatsächlich schon ernsthaft die Rede.

Dabei sind es nicht nur die großen Predigten und verfügbaren Finanzmittel, die *SpaceX* von anderen ebenso großspurig auftretenden Organisationen unterscheidet. Elon Musk benennt in seinen exzellenten Vorträgen auch immer alle möglichen ökologischen Schwierigkeiten und redet sie groß statt klein. Aber – und das ist seine Kunst – er konkretisiert auch stets die Lösungen aller denkbaren Probleme unter plausiblen technischen und ingenieur- und naturwissenschaftlichen Gesichtspunkten. Diese Aussagen sind für die nächsten zwei Jahrzehnte unter normalen Verhältnissen selbstverständlich mal mehr oder weniger realistisch, doch betrachtet man den wissenschaftlichen Fortschritt der letzten zwanzig Jahre (und vor allem den Geldbeutel des zielstrebigen Gründers), rückt eine Marsbesiedelung meiner Ansicht nach tatsächlich in greifbare Reichweite. Da er sein Projekt noch zu seinen



Lebzeiten verwirklicht sehen will und nebenbei auch die Beteiligten von *Mars One* seine Unterstützung suchen, kann man mit ziemlicher Sicherheit davon ausgehen, dass unsere Generation oder die unserer Kinder gebannt vor Monitoren sitzen und die Missionen (aufgrund der Entfernung und den entsprechenden Lichtlaufzeiten nicht ganz) live mitverfolgen können. Musk will eigenen Aussagen zufolge sogar auf dem Mars sterben und meint damit vermutlich nicht den Tod während einer Bruchlandung. Auch die in der Raumfahrt führenden Nationen kündigten bereits bemannte Marsmissionen an – Orion (USA), *Aurora* (Europa), aber auch Programme Russlands, Chinas und Indiens. Die voraussichtlichen Starttermine erscheinen im Gegensatz zu den ausgefeilten Plänen von *SpaceX* jedoch bei allen Nationen aufgrund anderer politischer Prioritäten noch nicht wirklich durchdacht und werden irgendwann zwischen 2030 und 2050 angestrebt.

Um eine planetare Ökosynthese zugunsten menschlichen Lebens zu ermöglichen, stehen bei *SpaceX* neben technischen Instrumenten die extremophilen Mikroben und auch widerstandsfähige Pflanzen an vorderster Front der Marskolonisation. Doch bevor diese transferierten Organismen mit ihrer Fähigkeit der Nährstofffixierung, Stoffumwandlung und oxygenen Photosynthese, gasförmigen Sauerstoff auf dem Mars produzieren können, müssen selbstverständlich erst einmal ihre absolut fundamentalen irdischen Lebensgrundlagen erfüllt sein (sofern sie genetisch und physiologisch nicht ausreichend veränderbar wären oder sogar keine eigentlichen naturogen-irdischen, sondern rein synthetische und eigens dafür produzierte Organismen beziehungsweise Biomaschinen wären). Es ist also ein hinderliches Paradoxon, dass ein relativ ertragreicher Boden, eine lebensfähige Atmosphäre

und flüssiges Wasser zunächst in lokalem Maßstab verfügbar sein müssten, um dieselben lebensnotwendigen Eigenschaften mithilfe der betreffenden Organismen dann auf eine planetare Ebene hochskalieren zu können.

Laut den Berechnungen des renommierten Raumfahrt-Ingenieurs Robert Zubrin würde ein Spiegel mit 240 Kilometer Durchmesser und dessen gebündeltes Sonnenlicht auf der Oberfläche ausreichen, um die Temperatur um den vereisten Marssüdpol kurzfristig um ganze zehn Grad Celsius zu erhöhen [53]. Dies würde zunächst massiv Kohlendioxid auftauen und in die Atmosphäre befördern, deren erhöhter Treibhauseffekt anschließend vermutlich ausreichen könnte, um Wasserdampf aus dem gefrorenen Regolith zu lösen. (Es ist übrigens nicht das  $\text{CO}_2$ , sondern wegen seiner Abundanz der irdische Wasserdampf das mit Abstand mächtigste und wirkungsvollste Treibhausgas der Erde.) Der Vorteil von riesigen Spiegel-Konstellationen ist, dass das oben beschriebene Anfangsparadoxon (Lebensbedingungen müssen erst vorhanden sein, um sie in größeren Skalen zu erzeugen) nicht mehr vorhanden wäre. Außerdem sind die anderen abiotischen Ideen (zum Beispiel die gezielte Lenkung von Meteoriten oder gar Asteroiden auf den Mars) alles andere als kurzfristig planbar oder gar durchführbar. Wenn der Mars oder strategisch sinnvolle Zonen seiner Oberfläche mit diesen „nicht-biologischen“ Methoden auf ein Maß erwärmt werden könnten, die es erlauben würden, dass irdische oder mehr oder weniger stark veränderte Pflanzen und Mikroben Wasser schöpfen können, wäre ein allmähliches Gedeihen und die Reproduktion von solchen Organismen wahrscheinlich gut möglich – aufgrund der kohlenstoffdioxidreichen Atmosphäre, sofern sie nach den Maßnahmen dicht genug wäre,

wäre organisches Wachstum in Lebensräumen des Mars unter Umständen sogar schneller als in vielen irdischen Habitaten. Das Regolith scheint vielen Experimenten zufolge als Wurzelraum für Pflanzen übrigens gut geeignet zu sein – tatsächlich enthält er alle nötigen Nährstoffe, jedoch oft in anderen als den benötigten Mengen [54].

Sauerstoff könnte darüber hinaus unter Umständen auch direkt aus Wasserreserven durch *Wasserelektrolyse* gewonnen werden. Dieses Verfahren wird eigentlich im ergiebigen Sektor der regenerativen Energien verwendet, wenn es darum geht, elementaren Wasserstoff zu gewinnen und als zukünftig bedeutenden Energiespeicher einzusetzen – sei es in Großanlagen oder als Wasserstoffantrieb für künftige Fahrzeuge. Bei der Spaltung von Wasser entsteht neben elementarem Wasserstoff auch Sauerstoff – eine präzise Abgabe in eine Exo-Atmosphäre wäre mit diesem elektrochemischen Verfahren also prinzipiell durchführbar, doch es ist wohl kaum zu erwarten, dass diese technisch aufwendige Methode auf Dauer so effizient wäre wie der kostenlose Einsatz von lebendigen und bereits voll zusammengebauten „Maschinen“ in Form von Photosynthese betreibenden Pflanzen und Mikroben. Das Regolith scheint laut den Analysen der *Viking*-Sonden möglicherweise selbst ebenfalls eine potentielle chemische Sauerstoffquelle zu sein, wenn es mit Wasser und Kohlendioxid reagiert [55].

Völlig ungeklärt ist jedoch, und das wird in populären und spektakulären Mars-Vorträgen vermutlich mit Bedacht nicht allzu ausführlich thematisiert, wie das Fehlen eines Magnetschutzschildes kompensiert werden soll. Die größengewahnsinnige, aber zunächst naheliegendste Idee, ein globales marsianisches Magnetfeld auszubilden, übersteigt

all unsere technischen Möglichkeiten – wir müssten dafür nämlich in der Lage sein, den metallischen Marskern etwa mit der Explosion von Atomsprengköpfen zu verflüssigen (Liquidation), während wir es auf der Erde heute nicht einmal schaffen, durch Bohrungen überhaupt irgendwie bis zu den äußersten Kernschichten vorzudringen (den Rekord hält die in Russland durchgeführte Kola-Bohrung mit 12.262 Metern Tiefe, was dem Anfang des unteren Erdmantels entspricht, aber immer noch tausende Kilometer weit vom äußeren Erdkern entfernt ist). Für eine weiter entfernte Zukunft thematisierte die NASA im Rahmen des Planetary Science Vision 2050 Workshops Ende Februar 2017 jedoch bereits grob die potentielle Möglichkeit, durch riesige stationierte künstliche Magneten eine geschützte interplanetare Umgebung herzustellen [56]. Ohne die Beachtung der Magnetosphäre wären alle menschlichen Bemühungen um eine dichtere und lebensfähige Atmosphäre für dieses Jahrhundert also nur sehr temporärer Natur – eine stabile Gaschicht würde sich auf dem Mars vermutlich nicht mal ein Jahr lang halten können. Allein zwischen 2007 und 2008 registrierte die NASA-Sonde Mars Express nämlich 36 starke Sonnenwind-Ereignisse, die bei einem fehlenden Schutzschild leichte atmosphärische Gase aus dem Gravitations-einfluss des Mars befördern würden [57]. Im Gegensatz zur Erde oder dem Merkur verlor der Mars Modellrechnungen zufolge bereits nach etwa einer halben Milliarde Jahre seinen internen Dynamo-Effekt – es ist jedoch nicht ausgeschlossen, dass bei einer weiteren Abkühlung des Marskerns neue interne Konvektionsquellen auftreten könnten, die ihm laut Forschungen von Andrew Stewart der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich für einige Milliarden Jahre

auf natürliche Art und Weise wieder ein globales magnetares Schutzschild bescheren könnten [58]. Wann und ob dieser Prozess eintritt, ist selbstverständlich eher spekulativer Natur – deshalb kann man für das Setting der ersten Mars-Reality-TV-Show meines Erachtens bestenfalls eine große künstliche Kuppel oder einen unterirdischen Bunker erwarten. Bei einem kleinen internen Mars-Symposium an unserer Universität (Technische Universität München) fragte mich eine junge Frau in der Podiumsdiskussion in diesem Zusammenhang eine, wie ich finde, sehr interessante und in Anbetracht des Mars-Hypes kaum thematisierte Frage: Wie kommt es, dass die Venus, die ebenfalls kein nennenswertes globales Magnetfeld besitzt und zudem deutlich näher an der Sonne positioniert ist, eine extrem dichte Atmosphäre halten kann, der Mars aber nicht? Und wieso versuchen wir nicht viel eher, aus unserer heißen Nachbarin ein kühleres menschenfreundliches Exohabitat zu entwickeln? Könnten extremophile und photosynthetisch aktive Mikroorganismen nicht in die  $\text{CO}_2$ -reiche Atmosphäre (Anteil von 96,5 %) transferiert werden, die dort Sauerstoff akkumulieren und Kohlenstoffdioxid binden würden? Beachtet man den atmosphärischen Druck der Venus, sollte Wasserdampf in der Atmosphäre bei einer etwa 100 Grad Celsius geringeren Temperatur (ca. 350 Grad Celsius) ohnehin flüssig werden und so könnte dieses besonders effektive Treibhausgas zu einem flüssigen Lebenselixier auf der Oberfläche werden. Trotz dieser höchstinteressanten Fragestellung sind Studien zu einer Erdanpassung der Venus im Vergleich zum Mars-Terraforming extrem unterbesetzt, obwohl die Venus sogar im Mittel deutlich näher an der Erde gelegen ist als der Mars und die Reisedauer dementsprechend rund zwei Drittel der

Zeit in Anspruch nehmen würde. Einen ultimativen Grund, wieso sich Elon Musk strikt gegen eine Besiedlung der Venus durch sein Unternehmen entschieden haben könnte, ist mir zugegebenermaßen aus all seinen Vorträgen und nach der Literaturrecherche tatsächlich nicht bekannt (vermutlich ist es einfach technisch sehr viel einfacher und günstiger, eine Station in einer zunächst kalten Umgebung zu installieren, als in einer Temperaturhöhle). Und tatsächlich, so muss ich weiterhin zugeben, ist mir keine Publikation bekannt, die eindeutig beantwortet, wieso die Venus eine so starke Atmosphäre ohne ein planetares Schutzschild halten kann. Das Nicht-Vorhandensein von leichteren Elementen wie Wasserstoff und Sauerstoff in der Gashülle von Venus (neben dem  $\text{CO}_2$  sind dort noch sehr geringe Mengen von Stickstoff und Schwefeldioxid vorhanden) kann von mir hierzu befragten Professoren zufolge vermutlich auf die Effekte solarer Winde zurückgeführt werden, für die schwereren Elemente der Venus-Atmosphäre gilt dieser den Mars beherrschende Effekt aber offenbar nicht.

Neben dem fehlenden Magnetschutzschild ist das eigentliche atmosphärische Problem unserer beiden Nachbarplaneten, bei dem die Fundamente der Lösungen immer noch sehr wackelig sind, der unsere Lunge schützende Stickstoff. Auf der Erde ist er zum Glück als Puffergas vorhanden – auf dem erdangepassten Mars oder der terraformierten Venus müsste er ebenfalls in beträchtlichen Mengen zur Abwehr von Sauerstoffvergiftungen vorhanden sein, wenn wir ohne Hilfsmittel nicht sofort sterben wollen. Auch andere Inertgase – also sehr reaktionsträge Gase – sind prinzipiell in der Lage, diese schützende Funktion zu übernehmen. Geeignet wäre zum Beispiel Xenon, welches beim Einatmen (im Gegensatz zu

Helium) für kurze Zeit jedem eine tiefe Morgan-Freemant-Stimme beschert und als Edelgas kaum mit unserer Lunge reagiert. Für die uns bekannten Pflanzen und deren Biomasseaufbau wären diese Elemente jedoch nicht optimal oder gar nicht zu gebrauchen.

Stickstoff ist neben seiner Funktion als Lungenschutz für das irdische Leben darüber hinaus eines der wichtigsten Elemente überhaupt, da er nicht nur wesentlicher Bestandteil von Aminosäuren und Proteinen, sondern auch der DNA selbst ist. Für alle uns bekannten Lebewesen ist Stickstoff also absolut lebensnotwendig, weshalb sie – egal ob kleinste Mikroben in Kameraobjektiven auf dem Mond, Sie selbst in Ihrem Sessel oder kopfüberhängende Seeanemonen unter dem antarktischen Eis – ihn auf irgendeine Art und Weise aus ihrer Umwelt aufnehmen und verarbeiten müssen (Stickstoff-Assimilation). In der irdischen Atmosphäre ist molekularer Stickstoff ( $N_2$ ) mit 78,084 Prozent mit Abstand der Hauptbestandteil. Dabei befinden sich nahezu 99 Prozent des gesamten irdischen Stickstoffs in der Gashülle. Für Pflanzen und deren Aufbau von Biomasse ist diese molekulare Form des Elements jedoch nicht direkt aus der Luft zur Aufnahme geeignet (im Gegensatz zu  $CO_2$ ) und tatsächlich können nur sehr wenige Lebensformen überhaupt etwas mit der molekularen Variante des Stickstoffs anfangen, obwohl der Stoff an sich einer der absoluten Fundamente des uns bekannten Lebens ist. Grund hierfür ist die starke Bindung des atmosphärischen Stickstoffs zwischen den beiden Atomen – nur wenige Mikroorganismen sind in der Lage, die vorhandene Dreifachbindung in reaktive und bioverfügbare Formen aufzuspalten (biotische Stickstofffixierung). Obwohl auch eine abiotische Stickstofffixierung durch Vulkanaktivität,

Oxidation oder Blitzentladungen möglich ist, spielt diese im irdischen Stickstoffkreislauf allein der produzierten Menge nach eine deutlich untergeordnete Rolle. Man kann also ohne jegliche Übertreibung sagen, dass das gesamte Leben auf der Erde letztlich neben dem hochgepriesenem Wasser und der lebensspendenden Sonne auch von denjenigen winzigen Mikroben abhängt, die im Laufe ihrer Evolution die Fähigkeit entwickelt haben, molekularen Stickstoff in für andere Prozesse verfügbare Formen umzuwandeln. Dazu gehören insbesondere mikrobiische Bodenorganismen wie die der Bakteriengattung *Azotobacter*, welche durch die Aufspaltung molekularen Stickstoffs letztlich Ammonium produzieren, aus dem anschließend mithilfe des Enzyms Nitrogenase alle anderen Stickstoffverbindungen synthetisiert werden können, um welche die Pflanzenwurzeln und andere Lebensformen konkurrieren.

Unter anaeroben Bedingungen im Boden kann Ammonium von gewissen Prokaryoten (insbesondere von nitrifizierenden Bakterien) weiter zu Nitrat oxidiert werden, welches einen besonders ergiebigen Nährstoff für Pflanzen darstellt. Aufgrund dessen haben sich Pflanzen schon sehr früh in ihrer Evolution an eine Zusammenarbeit mit diesen Stoffumwandlern angepasst: Neben ungebunden lebenden Mikroorganismen sind es vor allem auch Bakterien und *Rhizobien* (sogenannte Knöllchenbakterien), die unter der Erde mit den Wurzeln von Pflanzen eine sogenannte *mutualistische* Symbiose eingehen. Als Symbiose bezeichnet man in der Biologie eine obligate oder fakultative Vergesellschaftung von Organismen unterschiedlicher Spezies (in Ratgebern und Zeitschriften ist ab und an zu lesen, dass Ehepartner eine symbiontische Beziehung eingehen sollten – dieser Tipp wäre



aber nur dann biologisch korrekt, wenn Ihr Lebenspartner einer anderen Art angehören würde oder gar ein Alien wäre, was sie bei kleinen Streitigkeiten und unnötigen Kontroversen vielleicht manchmal vermuten könnten aber hoffentlich nicht der Fall ist). Der erweiterte Begriff „Mutualismus“ sagt zudem aus, dass im Gegensatz zu einer parasitischen Symbiose beide Partner von der Kooperation profitieren. Die meisten Pflanzen scheiden dabei aktiv sogenannte *Exsudate* aus ihren Wurzeln aus, in denen sich schließlich gewisse Mikroorganismen ansiedeln können, welche der betreffenden Pflanze dabei helfen, sie mit ausreichend Nährstoffen – insbesondere dem umgewandelten Stickstoff – zu versorgen. Im Gegenzug erhalten die angezapften Symbionten von der Wirtspflanze in erster Linie den benötigten Kohlenstoff zum Aufbau ihrer eigenen Biomasse. Für potentielle Vegetation auf dem Mars würden hierbei insbesondere die irdischen Mykorrhiza-Pilze eine Rolle spielen – sie beeinflussen durch ihre Anheftung an Wurzeln allein schon auf der Erde etwa 80 Prozent aller Landpflanzen in ihrem Wachstum positiv [59] (es gibt sogar Pflanzen, wie zum Beispiel Orchideen, die ohne die Hilfe der Pilze überhaupt nicht gedeihen können). Zum einen sind die Pilzhyphen (gewissermaßen die Sprösslinge eines Pilzes) um einiges feiner als die dünnsten Pflanzenwurzeln und können so wasser- und nährstoffgefüllte Poren im Boden anzapfen, in welche die Pflanze selbst nie eindringen könnte. Das Wichtigste ist jedoch die durch die angekettete und komplex vernetzte Hyphenstruktur extrem vergrößerte Wurzeloberfläche und die daraus resultierende stark erhöhte Rate der Nährstoffaufnahme. Symbiontische Pilze als auch Bakterien sollten bei einer Besiedelung des Mars also stets mitberücksichtigt werden, damit die benötigten Nährstoffe wie Nitrat optimal

angezupft werden können. (Im Hollywood-Blockbuster „Der Marsianer“ wird auf dieses Phänomen des symbiontischen Mutualismus im Gegensatz zu vielen anderen Filmen dieser Art zu meiner Freude ausführlich eingegangen.) Symbiontische Bakterien und Pilze aus der irdischen *Rhizosphäre* (Teil des Bodens, der direkt von Pflanzenwurzeln beeinflusst wird) können in nachgeahmten Marsregolith mit geeigneter Atmosphäre dauerhaft überleben und die geringere Schwerkraft scheint keine großen negativen Effekte auf das Wachstum oder physiologische Flüssigkeitsabläufe der Pflanzen oder ihrer kleinen Kooperationspartner zu haben [60].

2014, ein Jahr bevor „Der Marsianer“ in den deutschen Kinos erschien, konnte der Marsrover Curiosity auf seinen von der Erde aus gesteuerten Streifzügen nachweisen, dass im Regolith des Mars tatsächlich bereits reichlich Nitrat vorhanden ist, was zunächst einmal darauf hindeutet, dass der Mars früher große Mengen atmosphärischen Stickstoffs besaß und mit den vermuteten verschwundenen Ozeanen und einem frühen Magnetfeld möglicherweise nicht nur lebensfreundlich gewesen sein könnte, sondern auch, dass es irgendwelche Prozesse der Nitratanreicherung im Boden gegeben haben muss [61]. Darauf aufbauend erwägen manche Forscher die prinzipielle und nicht völlig auszuschließende Möglichkeit, dass vergangene marsianische Mikroben ebenfalls aktiv waren und so nachweisbare Rückstände in fossilführendem Gestein des Mars (insbesondere in tieferen Sedimentschichten) hinterlassen haben könnten. Es wurde sogar schon zu Bedenken gegeben, ob schon längst „inaktiviertes“ mikrobiotisches Leben auf dem Mars vorhanden sein könnte, welches im Zuge des Terraformings bei erneuter Erwärmung – ähnlich wie bei den Endosporen – zu neuer Lebensaktivität führen

könnte, ohne dass wir zuvor irdische Lebensformen transferieren müssen (zum Beispiel endosporenähnliche Gebilde im Regolith-Eis). Doch bei auf unserem roten Nachbarn bereits vorhandenem oder „schlafendem“ Leben und potentiellen marsianischen Wiedergeburten befinden wir uns – und das muss betont werden – im Gegensatz zu den vielen anderen Punkten immer noch im absolut spekulativen und momentan nicht nachweisbaren Bereich (die *Viking*-Sonden konnten in den 1970er Jahren diesbezüglich nicht eindeutig zeigen, dass es Mikroben oder ähnliche Lebewesen auf dem Mars gibt – Kap. 3).

Ungeachtet übermäßiger Spekulationen oder vieler Rückschläge sind sich Elon Musk und etliche andere Investoren und beteiligte Forscher aber sicher: Menschen werden in diesem Jahrhundert auf dem Mars leben können, egal ob in eigens kreierte isolierten Atmosphären-Habitaten (vielleicht vergleichbar mit tropischen Gewächshäusern in den Zoos großer Städte), in vor kosmischer Strahlung schützenden Bunkern in tieferen Schichten des Regoliths, oder vielleicht auch mit Sauerstoffmasken bei kontrollierten Freigängen. Sind Menschen mitsamt ihrer Werkzeuge erst mal auf dem Mars gelandet, können die wirklich interessanten exoökologischen Fragen aufgrund der ständigen Anwesenheit deutlich effizienter als heute angegangen werden: Gibt es tief im Inneren des Regoliths Spuren von vergangenem Leben auf dem Mars? Oder gar heute aktive Lebensformen? Wir und unsere Kinder dürfen also gespannt sein auf das Fernsehprogramm der nächsten Jahrzehnte, bei denen die Rolle der wahren Bioingenieure – winzige Bakterien, unterstützende Pilze und leistungsstarke Pflanzen – neben den menschlichen Ikonen hoffentlich nicht zu kurz kommen wird.

## Zum Ursprung zurück?

Wie die Untersuchung der Innenräume, aber auch der Außenwände von Raumsonden zeigen, sind wir vermutlich nicht die ersten irdischen DNA-Träger, die den Mars erreichen werden – alleine die Marsrover Spirit, *Opportunity* und Curiosity brachten wohl schon irdische „Verschmutzungen“ in Form von bakteriellem Erbgut, biogenen Proteinen und Aminosäuren auf den Mars. Zudem ist in Anbetracht der Lithotranssspermie die hochgerechnete Zahl der Meteoriten, die seit den urzeitlichen, aber bereits belebten Phasen der Erdgeschichte von unserem Planeten gelöst wurden und nach dem gravitativen Transfer den Mars bombardierten, gewaltig. Davon ausgehend möchte ich zum Abschluss dieses Kapitels noch auf etwas hinweisen, was sich aus der Fragestellung der Transsspermie ergibt und Ihnen zunächst überaus phantastisch anmuten mag.

Laut den Forschungen unter Leitung des 2005 verstorbenen Astrophysikers Curt Mileikowsky erreichten in der Vergangenheit nicht nur irdische Gesteine unseren Nachbarn im Sonnensystem, sondern vor allem weit über vier Milliarden Tonnen Marsgestein die Erde, ohne auf der gesamten Reise auf über hundert Grad Celsius erhitzt worden zu sein. Dabei könnten Hochrechnungen zufolge insgesamt etwa 100 Billionen Mikroorganismen an Bord gewesen sein, falls es denn im Regolith des Mars in etwa so viele Mikroorganismen gegeben hätte, wie heute in irdischen Böden vorhanden sind. Von denen konnten auf Berechnungen basierende Schätzungen etwa 100 Millionen den interplanetaren Transfer innerhalb von genügend großen Aggregaten, bei denen die inneren Kerne unbeschadet blieben, überleben und die Erde als

Reiseziel erreichen [16]. Am bekanntesten ist diesbezüglich der Marsmeteorit *ALH84001*, welcher in seinem Inneren einige von bakteriellen Aktivitäten bekannte Zerfallsprodukte und sogar mögliche Zellstrukturen zeigt, deren tatsächliche Ursprünge bis heute, über dreißig Jahre nach dem Fund in der Antarktis, ungeklärt sind [62]. Wie bereits angedeutet, nimmt heute die Mehrzahl der Forscher aufgrund stichhaltiger Indizien an, dass der Mars früher weitaus lebensfreundlicher war als heute – mitsamt eines gewaltigem Ozeans, oder zumindest mit großen Gewässern, einem schützendem Magnetfeld und einer deutlich dichteren Atmosphäre und erdähnlicherem Klima. Die gesichertsten Indizien, dass flüssiges Oberflächenwasser in der vergangenen geologischen Geschichte des Mars eine wichtige Rolle spielte, sind die mitunter gewaltigen, bereits aus dem Weltraum sichtbaren, ausgetrockneten Flusstäler oder gar ganze Deltamündungen (wie zum Beispiel Kasei Valles, der vermutlich größte ehemalige und heute vom Weltraum aus sichtbare Stromverlauf auf unserem Nachbarplaneten). Durch die Vor-Ort-Untersuchungen der Rover kann man neben den vorhandenen Stickstoffquellen sogar auf die Geschwindigkeiten der längst verschwundenen Wasserflüsse schließen – am bekanntesten sind hier die Bilder von 2012 entdeckten abgerundeten Kieselsteinen, deren Größe und Verteilungen wie bei den irdischen Steinchen Auskunft darüber geben, ob sie im Zuge von Wassertransport allmählich abgeschliffen worden oder beispielsweise dauerhaft im Sediment eines Gewässers verharret sind. Mitte Januar 2017 teilte die NASA in einer Pressemitteilung sogar mit, dass Curiosity bei seinen Vor-Ort-Untersuchungen auch Spuren von Überresten getrockneten Schlammes auf dem Mars gefunden hat [63].

Unter diesen Rückschlüssen und weiterführenden Annahmen war unser planetarer Nachbar also womöglich viel früher eine Lebensoase als unsere Erde. Wenn sich die menschenunabhängige Transspermie durch Meteoriteneinschläge und herausgeschleuderte Gesteinsbrocken noch plausibler erweisen sollte, als sie mit den Ergebnissen der EXPOSE-Experimente bereits ist, dann könnte das also bedeuten: Die Ursprünge allen irdischen Lebens, Sie und ich mit eingeschlossen, stammen vielleicht gar nicht von der Erde, sondern vom ehemals lebensfreundlichen Mars! Besonders interessant für panspermische Gesichtspunkte: Die heftigste Epoche, während der die Erde gnadenlos mit Gesteinsgeschossen (von Meteoriden, über Asteroiden, bis hin zu ganzen Zwergplaneten) bombardiert wurde, wird treffend als Late Heavy Bombardment bezeichnet. Und dieser Beschuss fand vor 4,1 bis zu 3,8 Milliarden Jahren statt – genau die Zeit, in der die Entstehung des ersten Lebens auf unserem Heimatplaneten vermutet wird. Dieser Zusammenhang scheint vielen Forschern alles andere als zufällig zu sein.

Wenn wir mit den Raumfahrtprogrammen der nächsten zwei Jahrzehnte (insbesondere durch die *ExoMars*-Missionen der ESA – Kap. 3) oder spätestens bei der Landung von Menschen Lebensformen auf dem Mars finden sollten, die sich nicht als irdische Verschmutzungen durch die menschliche Raumfahrt herausstellen, sind wir – so unglaublich das klingen mag – möglicherweise tatsächlich Marsianer, die in diesem Jahrhundert zu ihren exoökologischen Wurzeln zurückkehren werden.

Mit dieser Thematik des „Ursprungs“ sind wir schließlich bei der kleinsten Skala des Lebendigen angekommen – am Anfang der Geschichte des Lebens: Die Abiogenese.

## Literatur

- [1] Arrhenius S (1908) Worlds in the making – the evolution of the universe, Harper, London, das gesamte Buch ist im Internet frei verfügbar unter. <https://archive.org/details/world-sinmakingev00arrhrich>. Zugegriffen: 09. Dez. 2016
- [2] Mitchell FJ, Ellis WL (1971) Surveyor III: Bacterium isolated from lunar-retrieved TV camera. Proceedings of the Lunar Science Conference, The MIT Press, Vol. 2, S 2721–2733
- [3] Petranek S (2016) Unser Leben auf dem Mars. Fischer Verlag, Frankfurt am Main, S. 86
- [4] Watanabe Y, Bornemann H, Liebsch N et al (2006) Seal-mounted cameras detect invertebrate fauna on the underside of an Antarctic ice shelf. Mar Ecol Prog Ser 309:297–300
- [5] Fox D (2015) Life at hell's gate. Sci Am 313:46–53. doi:10.1038/scientificamerican0715-46. (Zum jetzigen Zeitpunkt besteht nur diese Sekundärliteratur, ein Primär-Paper wurde noch nicht veröffentlicht – Stand 09. Dez. 2016)
- [6] Christner BC, Priscu JC, Achberger AM et al (2014) A microbial ecosystem beneath the West Antarctic ice sheet. Nature 512:310–313. doi:10.1038/nature13667
- [7] Murray AE, Rack F, Zook R et al (2016) Microbiome composition and diversity of the ice-dwelling sea anemone, *Edwardsiella andrillae*. Integr Comp Biol 56(4):542–555. doi:10.1093/icb/icw095
- [8] Cardinale M, Kaiser D, Lueders T et al (2017) Microbiome analysis and confocal microscopy of used kitchen sponges reveal massive colonization by Acinetobacter, Moraxella and Chryseobacterium species. Nature Scientific Reports 7(5791). doi: 10.1038/s41598-017-06055-9
- [9] Amieva M, Peek Jr, RM (2016) Pathobiology of *Helicobacter pylori*-induced gastric cancer. Gastroenterology 150(1):64–78. doi:10.1053/j.gastro.2015.09.004

- [10] Shtarkman YM, Koçer ZA, Edgar R et al (2013) Subglacial Lake Vostok (Antarctica) accretion ice contains a diverse set of sequences from aquatic, marine and sediment-inhabiting bacteria and eukarya. PLOS 8(7):e67221. doi:[10.1371/journal.pone.0067221](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067221)
- [11] Unter anderem genannt in: Nicholson WL (2009) Ancient micronauts: Interplanetary transport of microbes by cosmic impacts. Trends Microbiol 17(6):243–250. doi:[10.1016/j.tim.2009.03.004](https://doi.org/10.1016/j.tim.2009.03.004)
- [12] Gladmann B (1997) Destination: Earth. Martian meteorite delivery. Icarus 130(2):228–246. doi:[10.1006/icar.1997.5828](https://doi.org/10.1006/icar.1997.5828)
- [13] Roesch LF, Fulthorpe RR, Riva A et al (2007) Pyrosequencing enumerates and contrasts soil microbial diversity. ISME J. 1(4):283–290. doi:[10.1038/ismej.2007.53](https://doi.org/10.1038/ismej.2007.53)
- [14] Speyerer EJ, Povilaitis RZ, Robinson MS et al (2016) Quantifying crater production and regolith overturn on the Moon with temporal imaging. Nature 538:215–218. doi:[10.1038/nature19829](https://doi.org/10.1038/nature19829)
- [15] Wallis MK, Wickramasinghe NC (2004) Interstellar transfer of planetary microbiota. Mon Not R Astron Soc 348(1): 52–61. Open access unter: <http://articles.adsabs.harvard.edu/full/2004MNRAS.348...52W/0000052.000.html>
- [16] Mileikowsky C, Cucinotta FA, Wilson JW et al (2000) Natural transfer of viable microbes in space: 1. From mars to earth and earth to mars. Icarus 145(2):391–427. doi:[10.1006/icar.1999.6317](https://doi.org/10.1006/icar.1999.6317)
- [17] Noblet A, Stalport F, Yong Guan Y et al (2012) The PROCESS experiment: Amino and Carboxylic acids under mars-like surface UV radiation conditions in low-earth-orbit. Astrobiology 12(5):436–444. doi:[10.1089/ast.2011.0756](https://doi.org/10.1089/ast.2011.0756)
- [18] Wassmann M, Moeller R, Rabbow E et al (2012) Survival of spores of the UV-Resistant *Bacillus subtilis* Strain MW01 after exposure to low-earth orbit and simulated martian conditions: Data from the space experiment ADAPT on



- EXPOSE-E. *Astrobiology* 12(5):498–507. doi:[10.1089/ast.2011.0772](https://doi.org/10.1089/ast.2011.0772)
- [19] Vaishampayan PA, Rabbow E, Horneck G et al (2012) Survival of *Bacillus pumilus* spores for a prolonged of time in real space conditions. *Astrobiology* 12(5):487–497. doi:[10.1089/ast.2011.0738](https://doi.org/10.1089/ast.2011.0738)
- [20] Scalzi G, Selbmann L, Zucconi L et al (2012) LIFE experiment: Isolation of cryptoendolithic organisms from antarctic colonized sandstone exposed to space and simulated mars conditions on the international space station. *Orig Life Evol Bios* 42(2):253–262. doi:[10.1007/s11084-012-9282-5](https://doi.org/10.1007/s11084-012-9282-5)
- [21] Tepfer D, Zalar A, Leach S (2012) Survival of plant seeds, their UV screens, and *nptII* DNA for 18 months outside the international space stations. *Astrobiology* 12(5):517–528. doi:[10.1089/ast.2011.0744](https://doi.org/10.1089/ast.2011.0744)
- [22] Bertrand M, Chabin A, Colas C et al (2015) The AMINO experiment: Exposure of amino acids in the EXPOSE-R experiment on the International Space Station and in laboratory. *Int J Astrobiology* 14(1):89–97. doi:[10.1017/S1473550414000354](https://doi.org/10.1017/S1473550414000354)
- [23] Bryson KL, Salama F, Elsaesser A et al (2015) First results of the ORGANIC experiment on EXPOSE-R on the ISS. *Int J Astrobiology* 14(1):55–66. doi:[10.1017/S1473550414000597](https://doi.org/10.1017/S1473550414000597)
- [24] Bryce CC, Horneck G, Rabbow E et al (2015) Impact shocked rocks as protective habitats on an anoxic early Earth. *Int J Astrobiology* 14(1):115–122. doi:[10.1017/S1473550414000123](https://doi.org/10.1017/S1473550414000123)
- [25] Mancinelli RL (2015) The affect of the space environment on the survival of *Halorubrum chaoviator* and *Synechococcus* (Nägeli): data from the space experiment OSMO on EXPOSE-R. *Int J Astrobiology* 14(1):123–128. doi:[10.1017/S147355041400055X](https://doi.org/10.1017/S147355041400055X)

- [26] Panitz C, Horneck G, Rabbow E et al (2015) The SPORES experiment of the EXPOSE-R mission: *Bacillus subtilis* spores in artificial meteorites. *Int J Astrobiology* 14(1):105–114. doi:[10.1017/S1473550414000251](https://doi.org/10.1017/S1473550414000251)
- [27] Neuberger K, Lux-Endrich A, Panitz C et al (2015) Survival of spores of *Trichoderma longibrachiatum* in space: data from the space experiment SPORES on EXPOSE-R. *Int J Astrobiology* 14(1):129–135. doi:[10.1017/S1473550414000408](https://doi.org/10.1017/S1473550414000408)
- [28] Bérces A, Egyeki M, Fekete A et al (2015) The PUR Experiment on the EXPOSE-R facility: Biological dosimetry of solar extraterrestrial UV radiation. *Int J Astrobio* 14(1): 47–53. doi:[10.1017/S1473550414000287](https://doi.org/10.1017/S1473550414000287)
- [29] Novikova N, Deshevaya E, Levinskikh M et al (2015) Study of the effects of the outer space environment on dormant forms of microorganisms, fungi and plants in the „EXPOSE-R“ experiment. *Int J Astrobiology* 14(1):137–142. doi:[10.1017/S1473550414000731](https://doi.org/10.1017/S1473550414000731)
- [30] Scalo J, Wheeler C (2002) Astrophysical and astrobiological implications of Gamma-ray burst properties. *Astrophys J.* 566(2):723–737. 10.1086/338329
- [31] Tepfer D, Leach S (2006) Plant seeds as model vectors for the transfer of life through space. *Astrophys & Space Sci* 306(1):69–75. doi:[10.1007/s10509-006-9239-0](https://doi.org/10.1007/s10509-006-9239-0)
- [32] Jönsson KI, Rabbow E, Schill RO et al (2008) Tardigrades survive exposure to space in low Earth orbit. *Current Biology* 8(17):R729-R731. doi: [10.1016/j.cub.2008.06.048](https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.06.048)
- [33] Osterkamp J (2016) Überleben Extrembakterien ohne Sonne im All?. *Spektrum der Wissenschaft – News, Open Access.* <http://www.spektrum.de/news/ueberleben-extrembakterien-ohne-sonne-im-all/1425924>. Zugegriffen: 09. Dez. 2016
- [34] Atri D (2015) On the possibility of Galactic Cosmic Ray-induced radiolysis-powered life in subsurface environments in the Universe. *J R Soc Interface* 13(123). doi:[10.1098/rsif.2016.0459](https://doi.org/10.1098/rsif.2016.0459)

- [35] Daly MJ, Minton KW (1997) Recombination between a resident plasmid and the chromosome following irradiation of the radioresistant bacterium *Deinococcus radiodurans*. *Gene* 187(2):225–229. PMID: 9099885
- [36] Johnson JC, Thaul S (1997) An evaluation of radiation exposure guidance for military operations: Interim report. National Academy Press, Washington, DC
- [37] Madigan MT, Martinko JM (2006) Brock Mikrobiologie, 11. Aufl.. Pearson Studium, München, 463f
- [38] Mastrapa RME, Glanzberg H, Head JN et al (2001) Survival of bacteria exposed to extreme acceleration: implications for panspermia. *Earth Planet Sci Lett* 189:1–2, 1–8. doi:[10.1016/S0012-821X\(01\)00342-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00342-9)
- [39] De La Vega P, Rettberg U, Reitz G (2007) Simulation of the environmental climate conditions on martian surface and its effect on *Deinococcus radiodurans*. *Adv Space Res* 40(11):1672–1677. doi:[10.1016/j.asr.2007.05.022](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.05.022).
- [40] Madigan MT, Martinko JM (2006) Brock Mikrobiologie, 11. Aufl.. Pearson Studium, München, 94–99
- [41] Gest H, Mandelstam J (1987) Longevity of microorganisms in natural environments. *Microbiol Sci* 4(3):69–71
- [42] Vreeland RH, Rosenzweig WD, Powers DW (2000) Isolation of a 250 million-year-old halotolerant bacterium from a primary salt crystal. *Nature* 407:897–900. doi:[10.1038/35038060](https://doi.org/10.1038/35038060)
- [43] Fajardo-Cavazos P, Link L, Melosh HJ et al (2005) *Bacillus subtilis* spores on artificial meteorites survive hypervelocity atmospheric entry: implications for Lithopanspermia. *Astrobiology* 5(6):726–736. doi:[10.1089/ast.2005.5.726](https://doi.org/10.1089/ast.2005.5.726)
- [44] Horneck G, Stöffler D, Ott S et al (2008) Microbial rock inhabitants survive hypervelocity impacts on Mars-like host planets: first phase of lithopanspermia experimentally tested. *Astrobiology* 8(1):17–44. doi:[10.1089/ast.2007.0134](https://doi.org/10.1089/ast.2007.0134)

- [45] Jerling A, Burchell MJ, Tepfer D (2008) Survival of seeds in hypervelocity impacts. *Int J Astrobiol* 7(3–4):217–222. doi:[10.1017/S14735550408004278](https://doi.org/10.1017/S14735550408004278)
- [46] Petranek S (2016) *Unser Leben auf dem Mars*. Fischer Verlag, Frankfurt am Main, 57–67
- [47] Musk E (2017) Making Humans a Multi-Planetary Species. *New Space* 5(2):46–61. doi:[10.1089/space.2017.29009.emu](https://doi.org/10.1089/space.2017.29009.emu)
- [48] Christensen PR (2007) Water at the poles and in permafrost regions of Mars. *GeoScienceWorld* 3(2):151–155. doi:[10.2113/gselements.2.3.151](https://doi.org/10.2113/gselements.2.3.151)
- [49] Caputo A, Webster G (National Aeronautics and Space Administration) (2016) Mars ice deposit holds as much water as Lake Superior. Presseveröffentlichung der NASA, aufrufbar unter. <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=6680>. Zugegriffen: 09. Dez. 2016
- [50] Mahaffy PR, Webster CR, Atreya SK et al (2013) Abundance and isotopic composition of gases in the martian atmosphere from the curiosity rover. *Science* 341(6143):263–266. doi:[10.1126/science.1237966](https://doi.org/10.1126/science.1237966)
- [51] Mars One (2012) Mars One's human mission to Mars – 2012 introduction film, missionsbeschreibendes Video des offiziellen Mars One YouTube-Channels. Zugegriffen: 09. Dez. 2016. Auf der Homepage der Seite ist eine übersichtliche Chronik aller geplanten Ereignisse einsehbar. <http://www.mars-one.com/mission/roadmap>. Zugegriffen: 09. Dez. 2016
- [52] Tito D, MacCallum T, Clark J et al (2013) Inspiration Mars – a mission for America. Vortrag des Gründers Dennis Tito und anderen Verantwortlichen im National Press Club, Washington, DC, USA, Aufzeichnung des gesamten Vortrages unter. <https://www.youtube.com/watch?v=aLfvFp3eFj8>. Zugegriffen: 09. Dez. 2016. (Zu diesem Zeitpunkt war der Start noch im Jahr 2018 geplant)

- [53] Zubrin RM, McKay CP (1993) Technological requirements for terraforming Mars. Präsentation bei der 29th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Monterey, USA, Seite 14f, Open Access der Ausarbeitung unter. <http://www.users.globalnet.co.uk/~mfogg/zubrin.htm>. Zugegriffen: 09. Dez. 2016
- [54] Jordan G (2015) Can plants grow with Mars soil?. Mitteilung des NASA Johnson Space Centers, aufrufbar unter. <https://www.nasa.gov/feature/can-plants-grow-with-mars-soil>. Zugegriffen: 09. Dezember 2016
- [55] McKay CP, Toon OB, Kasting JF (1991) Making Mars habitable. *Nature* 352:489–496. doi:10.1038/352489a0
- [56] Green JL, Hollingsworth J, Brain D et al (2017) A future Mars environment for science and exploration. Planetary Science Vision 2050 Workshop 2017, Konferenzarbeit aufrufbar unter. <http://www.hou.usra.edu/meetings/V2050/pdf/8250.pdf>. Zugegriffen: 19. März 2017
- [57] Edberg NJT, Auster U, Barabash S et al (2009) Rosetta and mars express observations of the influence of high solar wind pressure on the Martian plasma environment. *Annalely Geophysicae – J Eur Geosci Union* 27:4533–4545. doi:10.5194/angeo-27-4533-2009
- [58] Stewart AJ, Schmidt MW, Van Westrenen W et al (2007) Mars: A new core-crystallization regime. *Science* 316(5829):1323–1325. doi:10.1126/science.1140549
- [59] Madigan MT, Martinko JM (2006) Brock Mikrobiologie, 11. Aufl., Pearson Studium, München, 745
- [60] Kliman DM, Cooper JB (2000) Martian soil plant growth experiment: The effects of adding nitrogen, bacteria, and fungi to enhance plant growth. Conference Paper in Lunar and Planetary Science and Exploration, 31. <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2000/pdf/1871.pdf>. Zugegriffen: 09. Dez. 2016

- [61] Stern JC, Sutter B, Freissinet C et al (2015) Evidence for indigenous nitrogen in sedimentary and aeolian deposits from the *Curiosity* rover investigations at Gale Crater, Mars. Proc Natl Acad Sci U.S.A 112(14):4245–4250. doi:[10.1073/pnas.1420932112](https://doi.org/10.1073/pnas.1420932112)
- [62] McKay DS, Gibson Jr, EK, Thomas-Keprta KL et al (1996) Search for past life on mars: Possible relic biogenic activity in martian Meteorite ALH84001. Science 273(5277): 924–930. doi:[10.1126/science.273.5277.924](https://doi.org/10.1126/science.273.5277.924)
- [63] Webster G, Cantillo L, Brwon D (National Aeronautics Space Administration) (2017) Mars Rover curiosity examines possible mud cracks. Presseveröffentlichung der NASA, aufrufbar unter. <https://www.nasa.gov/feature/jpl/mars-rover-curiosity-examines-possible-mud-cracks>. Zugegriffen: 19. März. 2017



<http://www.springer.com/978-3-662-54786-1>

Lebensraum Universum

Einführung in die Exoökologie

Janjic, A.

2017, XIII, 220 S. 10 Abb., 9 Abb. in Farbe. Book +  
eBook., Softcover

ISBN: 978-3-662-54786-1