



Sebastian Simon, BSc

Mission Mars
Forschungsstation auf unbekanntem Terrain

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Architektur

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Architekt, Roger Riewe

Institut für Architekturtechnologie

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

11.09.2020

Datum

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'E. Gebel', written over a horizontal line.

Unterschrift

VORWORT

Die vorliegende Masterarbeit mit dem Thema „Mission Mars – Forschungsstation auf unbekanntem Terrain“ entstand aus dem Eigeninteresse heraus, das in mir geweckt wurde, nachdem ich einen Artikel gelesen habe, der von einem Architekturwettbewerb der NASA berichtete. Die NASA suchte in diesem Wettbewerb Möglichkeiten Häuser mit Hilfe von 3D-Druckern auf anderen Planeten zu errichten. Die Neugier hatte mich sofort gepackt und ich war erstaunt, dass auch namenhafte Architekturbüros, wie Foster + Partners, sich der Aufgabe stellten, Habitate auf anderen Planeten zu errichten. Ich musste mir nach dem Lesen des Artikels zwanghaft die Fragen stellen: Wie baut man ein Haus auf dem Mars? In einem Umfeld ohne baulichen Kontext, wo es noch nichts gibt außer der naturbelassenen Oberfläche des Planeten? In einer Atmosphäre, die der unseren zwar ähnelt, aber definitiv als bedrohlich für den menschlichen Organismus anzusehen ist? Die Bedeutung der Architektur nimmt bei dieser Aufgabe eine noch nie zuvor bezogene Stellung ein. In diesem Kontext gibt es keine Theorie, keine Praxis und keine Vorbilder. Wie soll man also bauen? Welchen Anforderungen muss ein außerirdisches Habitat gerecht werden? Welche Materialien verwendet man beim Bau und wie ändern sich die Bedürfnisse der Menschen, wenn sie einmal die Sphären unserer bekannten Welt verlassen?

Diese und noch viele weitere Fragen weckten meine Neugier zu der Frage nach einer Architektur, die sicherlich nicht sehr konventionell ist, aber genau deswegen, weil sie eben nicht konventionell, nicht herkömmlich ist, sondern ein sehr spezifisches Feld innerhalb der Disziplin der Architektur anspricht, mit dem sich die meisten Architekten bisher noch nicht beschäftigt haben, deshalb ist dieses Thema für mich so spannend.

Gemeinsam mit meinem betreuenden Professor, Hr. Roger Riewe, entwickelte ich die Fragestellung, den Aufbau und die Schwerpunkte meiner wissenschaftlichen Arbeit. Nach einem sehr guten Input und einem einleitenden Gespräch mit Prof. Riewe konnte ich mich sehr gut in die Thematik einarbeiten. Hr. Roger Riewe hat mich in der Zeit der Entstehung dieser Arbeit bestens begleitet und mir immer rasches und sorgfältiges Feedback gegeben. Herzlichen Dank dafür!

Außerdem gilt mein besonderer Dank meinen Eltern Harald und Rosemarie Simon, die mich nicht nur während dieser Zeit, sondern schon mein ganzes Studium lang kräftig unterstützt haben und ohne die dies alles nicht möglich gewesen wäre. Sie haben mich immer auf neue Artikel und Ereignisse zu dem Thema dieser Masterarbeit aufmerksam gemacht und waren mir bei der Ergänzung meiner Quellenrecherche eine große Hilfe. Vielen Dank!

Zuletzt noch ein großes Danke an meine Studienkollegen und Freunde, die viel Zeit investiert haben, um diese Arbeit auf Korrekturen durchzulesen und mich immer motiviert haben. Danke!

Graz, am 11.09.2020,



INHALTSVERZEICHNIS

EINLEITUNG	2
HAUPTTEIL	3
<u>1 DER ROTE PLANET</u>	2
1.1 Die Neugier des Menschen	2
1.2 Die Geschichte des Mars	4
1.3 Das Klima	8
1.3.1 Boden	9
1.3.2 Wasser	10
1.3.3 Atmosphäre	11
1.3.4 Strahlung	12
1.3.5 Gravitation	15
1.3.6 Stürme	15
1.3.7 Erdbeben	17
1.3.8 Exkurs: Terraforming	18
<u>2 LEBEN AUF DEM MARS</u>	20
2.1 Wohnen	20
2.1.1 Alltag	22
2.1.2 Bedürfnisse	25
2.1.3 Nahrungsmittelherstellung	26
2.2 Arbeiten	28
2.3 Energie	30
2.3.1 Energiebedarf	30
2.3.2 Energieherstellung	32
<u>3 BAUEN AUF DEM MARS</u>	34
3.1 Standortkandidaten	35
3.2 Materialien / Baustoffe	39
3.3 Gebäudehülle	42
3.4 Bautechnologien	44
3.4.1 3D Druck	44
3.4.2 Tunnelbau	47
3.4.3 Inflatables / Aufblasbare Systeme	48
3.4.4 Solitäre / Modulbauweise	49
3.5 Missionsende und Recycling	56
SCHLUSS	59

EINLEITUNG

Ausgehend von der Möglichkeit, dass unser Planet in naher oder ferner Zukunft nicht mehr bewohnbar sein wird, gibt es von vielen Seiten das Bestreben, die Erforschung anderer Planeten voranzutreiben. Sowohl die NASA als auch die ESA haben bereits Forschungsroboter auf den Mars geschickt. Erst kürzlich wurde Wasser in vereister Form auf dem Planeten nachgewiesen. Der nächste große Schritt in der Erforschung des Planeten wäre die Untersuchung des Bodens nach Leben, da die Grundlage allen Lebens, nämlich Wasser, bereits gegeben ist.

In dieser wissenschaftlichen Arbeit möchte ich mich mit dieser Thematik auseinandersetzen. Die Erforschung und Erkundung des Mars ist aktueller denn je und eine bemannte Raummission würde die Forschung erheblich vorantreiben. Ein Labor direkt auf dem Mars hätte viele Vorteile. Zum einen könnte man Bodenproben direkt vor Ort untersuchen und durch menschliche Hand könnte man schneller eingreifen als mit einem Roboter, dessen Signale für etwaige Befehle nur mit großer Verzögerung am Planeten ankommen. Immer wieder gehen Roboter kaputt oder bleiben im Wüstenterrain hängen. Zahlreiche Missionen wurden schon auf diese Weise beendet. Durch menschliches Handeln vor Ort wäre es möglich diese Probleme zu überwinden und Reparaturen schneller durchzuführen.

Diese theoretische Abhandlung beschäftigt sich mit dem Thema einer Forschungsstation auf dem Mars und mit den großen Fragen wie man eigentlich auf einem fremden Planeten baut. Welche Materialien können verwendet werden? Welche Bautechniken können angewendet werden? Wäre ein System vorstellbar, das vollständig rezyklierbar ist, um den Planeten nach den Forschungsarbeiten wieder unversehrt verlassen zu können, ohne Müll oder Fremdkörper zu hinterlassen?

Ich werde mich in dieser Arbeit nicht mit der Frage einer Besiedlung auseinandersetzen, da eine Kolonisation eines anderen Planeten ein stark politischer Eingriff wäre und in höchstem Maße kritisch zu betrachten ist. Es geht hier um die reine Erforschung des roten Planeten, um Zusammenhänge zur Entstehung unseres Sonnensystems zu erfassen und um die Errichtung einer temporären, wieder abbaubaren Forschungseinrichtung.

HAUPTTEIL

1 DER ROTE PLANET

1.1 Die Neugier des Menschen

Woher kommt der unermüdliche Drang des Menschen, andere Planeten zu erforschen? Suchen wir nach einer zweiten Heimat, einen Zufluchtsort, zu dem wir im Falle einer Bedrohung fliehen und unsere Spezies retten können? Oder liegt es bloß in der Natur des Homo Sapiens sich mehr und mehr Fläche anzueignen, sich auszubreiten und sich zu vermehren? Der Gedanke fremde Welten zu erforschen und zu besiedeln ist so alt wie die Menschheit selbst. Dieses Verlangen hat Columbus zur Entdeckung Amerikas getrieben und die NASA zur ersten Mondlandung geführt. Die unermüdliche Neugier des Menschen und das technologische Wettrennen der Nationen hat die Raumfahrt in den letzten Jahrzehnten massiv vorangetrieben. Die geglückte Mondmission „Apollo 13“ der NASA im Jahre 1969 eröffnete völlig neue Perspektiven für den Menschen.

Motivationsziele für die Erforschung anderer Planeten sind unter anderem die Überlegungen eines Zufluchtsortes für die menschliche Zivilisation, die einerseits von Naturkatastrophen, wie den Ausbruch einer der sieben bekannten Supervulkane, oder Katastrophen in Folge der Auswirkungen des Klimawandels bedroht wird, und andererseits die von den Supermächten selbst erschaffene Zerstörungskraft der Atomwaffen, die eine Auslöschung unserer Spezies nicht unmöglich macht.

Die Suche nach Leben auf dem roten Planeten hat oberste Priorität, da man von den Ergebnissen der Forschung auf zahlreiche Entwicklungen des Planeten und eventuell auf die Entstehung des Universums selbst Rückschlüsse ziehen kann. Eine Forschungsstation vor Ort hätte demnach viele Vorteile. Die von der Erde gesteuerten Roboter reagieren mit einer Zeitverzögerung von bis zu 20 Minuten, da das Signal einen weiten Weg durch das All zurücklegen muss. Audio- und Videokommunikation sind bei dieser Verzögerung kaum möglich. Somit sind Fehler in der Kommunikation zum Mars wesentlich fataler als beispielsweise zum Mond, da dort schneller reagiert werden kann. Der bis vor kurzem noch aktiver Rover Opportunity war der bisher mobilste. Und selbst dieser war mit einer Leistung von 3,7 Kilometer pro Jahr sehr eingeschränkt. Ein bemanntes Marsfahrzeug könnte in derselben Zeit ein Vielfaches dieser Strecke zurücklegen, mehr Gesteinsproben

entnehmen und tiefer in der Oberfläche schürfen als jeder Rover. Entnommene Proben könnten direkt vor Ort in einem Labor untersucht werden. Fehler können schneller korrigiert werden, Instrumente schneller repariert werden. Die Errichtung einer temporären Forschungsstation ist demnach für den nächsten Schritt von außerordentlicher Wichtigkeit.

1.2 Die Geschichte des Mars

Die ältesten Dokumente, die auf den roten Planeten hinweisen, gehen auf die Sternkarten des ägyptischen Baumeisters Senenmut zurück und sind bereits über 3500 Jahre alt. Chinesische Aufzeichnungen aus dem Jahre 1045 v. Chr. weisen ebenfalls auf eine Sichtung des Planeten hin. Nach und nach wurde das Verhalten des unbekanntes Himmelskörpers systematisch beobachtet und studiert. Von vielen Völkern wurde der Planet immer wieder als ihr Gott des Krieges bestimmt. Was bei den Babyloniern Nergal, Gott für Krieg und Pestilenz, war, ist für die Griechen Ares, der Kriegsgott. Auch die Römer erkannten in dem Planeten die Manifestation ihres Kriegsgottes, von dem sich auch heute noch der Name des Planeten ableitet: Mars.¹

Der erste Mensch, der den Mars durch ein Teleskop beobachtet hat, war Galileo Galilei. Im Jahr 1610 erfasste sein Auge den roten Planeten und er beobachtete eine Veränderung der sichtbaren Größe des Körpers, die auf eine Entfernungsveränderung zur Erde zurückzuführen ist. Ein detailliertes Bild der Marsoberfläche konnte man mit dem Stand der damaligen Technik noch nicht erkennen, jedoch berichteten mehrere Forscher, so auch die italienischen Astronomen Giovanni Riccioli und Francesco Grimaldi, von 2 auffälligen dunklen Flecken auf der Marsoberfläche.²

Weitere 4 Jahre vergingen, bis der erste Plan vom Mars angefertigt wurde. Durch die Hand des holländischen Astronomen Christiaan Huygens entstand eine Karte, die sowohl Regionen mit unterschiedlicher Reflektivität zeigen als auch eine Polkappe. Huygens war auch der erste Mensch, der die Rotationszeit mit ungefähr 24 Stunden bestimmte. Die heute gültige Rotationszeit des Mars beträgt „24 Stunden,

¹ Vgl. Nebel 2018, 5.

² Vgl. Nebel 2018, 5.

37 Minuten und 22 Sekunden“³ und kommt somit der damaligen ersten Einschätzung von Huygens schon sehr nahe.⁴

Es war Sir William Herschel der bei seinen Forschungen zwischen 1777 bis 1781 erkannte, dass die Polregion mit Eis bedeckt ist und diese in ihrer Größe schwankt. Er schlussfolgerte daraus, dass es ähnlich wie auf unserer Erde Jahreszeiten auf dem fernen Planeten geben musste.⁵

Durch das vom deutschen Physiker Joseph von Fraunhofer weiterentwickelte Teleskop wurde es möglich Anfang des 19. Jahrhunderts ein bedeutend detaillierteres Bild der Oberfläche zu erzeugen. Johann Mädler und Wilhelm Beer bestimmten mit dem Teleskop eine markante Stelle auf der Planetenoberfläche und fixierten an diesem Punkt den Nullmeridian des Mars. Von diesem Punkt ausgehend fertigte Mädler in den darauffolgenden 10 Jahren die erste detaillierte Karte des Planeten an.⁶

In der 1884 entstandenen Karte von Giovanni Schiaparelli erkennt man verschiedene Oberflächeneigenschaften. Er unterschied dabei zwischen Wasser, Land und Untiefen. Weiters sprach er von sogenannten „canali“ und bezeichnete diese mit Namen von bekannten irdischen Flüssen. Die Illusion eines warmen Planeten mit Jahreszeiten und Gewässern wurde umso mehr durch seine Namensgebungen gestärkt.⁷

Spätere Beobachtungen mit neueren und besseren Teleskopen widerlegten jedoch Schiaparelli's Annahme von Kanälen und Flüssen. Die unterschiedlichen Oberflächen entstehen lediglich durch eine Abfolge von einzelnen Objekten.⁸

1924 wurde die Hoffnung von einem warmen Planeten durch die amerikanischen Astronomen Seth Barnes Nicholson und Edison Pettit endgültig widerlegt. Sie bestimmten mit ihren Beobachtungen die Temperaturen an den Polen mit -68°C und am Äquator mit 7°C . Später wurde auch Herschels Annahme einer dichten Atmosphäre widerlegt. Der Marsatmosphärendruck wurde auf ein Maximum von 24mbar bestimmt. Außerdem stellte man fest, dass die Atmosphäre doppelt so viel Kohlendioxid enthält wie die der Erde.⁹

³ Nebel 2018, 36.

⁴ Vgl. Nebel 2018, 5.

⁵ Vgl. Nebel 2018, 6.

⁶ Vgl. Nebel 2018, 6.

⁷ Vgl. Nebel 2018, 7.

⁸ Vgl. Nebel 2018, 7.

⁹ Vgl. Nebel 2018, 7.

Seit der Initialzündung der Raumfahrt in den 1960er Jahren unternahm die Sowjetunion mehrere Versuche ein unbemanntes Raumschiff zum Mars zu senden. Nach 5 gescheiterten Missionen gelang es schließlich der NASA 1964, noch vor der gelungenen Mondlandung der Apollo 11 im Jahre 1969, mit ihrer Raumsonde Mariner 4 am Mars vorbeizufiegen und 21 Bilder zu übermitteln. Mariner 9 war 1971 zwar die erste Sonde die den Marsorbit erreichte, doch nur 14 Tage später erreichte auch die sowjetische Einheit Mars 2 den Orbit und sandte den Mars Rover Prop-M als erstes, vom Menschen gemachte, Objekt auf die Oberfläche des roten Planeten. Dieser zerschellte jedoch an der Oberfläche und konnte keine Information übermitteln. Der Nachfolger Mars 3 konnte erfolgreich vom Orbiter getrennt werden und sicher auf die Marsoberfläche absteigen. Er übermittelte ein einziges Bild, ehe er nach 14,5 Sekunden seine Funktion einstellte. Das erhaltene Bild enthielt keine brauchbaren Informationen. Die Sowjetunion konnte an den Erfolg der Landung nicht mehr anknüpfen und so war es wiederum die NASA, die mit ihrer Sonde Viking 1 im Jahre 1976 das erste Foto vom Mars lieferte, auf dem brauchbare Information enthalten war. In den 6 Jahren ihrer Betriebsdauer führte die Sonde zahlreiche Experimente durch und untersuchte den Planeten auf Spuren von Leben. Die zugehörigen Orbiter lieferten Bilder, auf denen ausgetrocknete Flussbetten zu erkennen waren, was auf fließendes Wasser zurückzuführen ist. 100 Jahre nachdem Schiaparelli über wasserführende „canali“ spekuliert hatte, gibt es nun also tatsächlich Hinweise darauf, dass diese Kanäle zumindest irgendwann einmal existierten. Diese These bestärkt die Suche nach Leben auf dem Mars, da Wasser die Grundlage allen Lebens ist. Das bekannteste Marsfoto der Viking Missionen wurde am 25. Juli 1976 aufgenommen: Das Gesicht auf dem Mars.¹⁰

¹⁰ Vgl. Nebel 2018, 8-11.

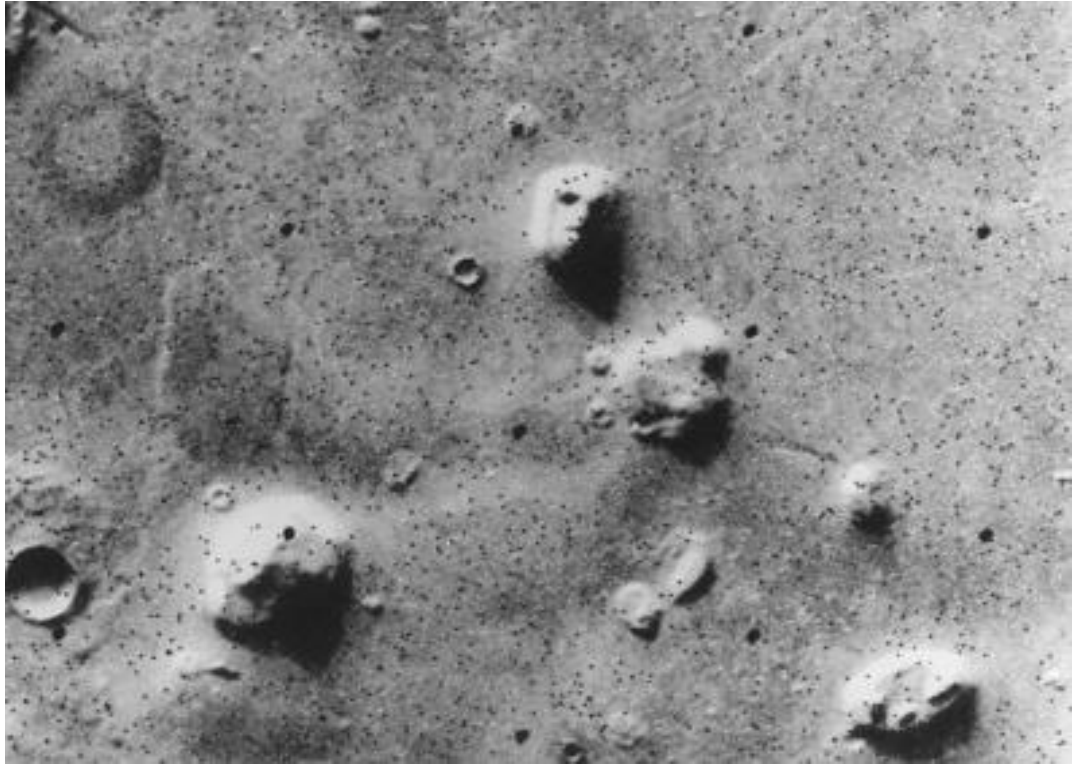


Abb.1: Das Gesicht auf dem Mars

1997 erreichte der Mars Global Surveyor der NASA den Marsorbit und kartierte den gesamten Planeten von der Ionosphäre bis zur Oberfläche und unterstützte zahlreiche weitere Marsmissionen bis ins Jahr 2006, ehe er aus dem sicheren Modus nicht mehr aktiviert werden konnte. Nach einigen Fehlschlägen am Ende des Jahrtausends gelang es der heute noch aktiven Sonde Mars Odyssey 2001 den Orbit des Mars zu erreichen. Sie ist mit zahlreichen Sensoren und Spektrometern ausgestattet und untersucht den Planeten nach Spuren von Wasser und vulkanischen Aktivitäten. Außerdem fungiert die Sonde als Telekommunikationssatellit für Rover auf der Oberfläche.¹¹

Die erste europäische Marsmission der ESA erfolgte im Jahr 2003 und bestand aus einem Orbiter und einem Lander, dem Beagle 2. Während man den Kontakt zum Lander aus ungeklärten Gründen verloren hat, ist der Orbiter heute noch aktiv und liefert hochauflösende Bilder der Oberfläche. Außerdem verwendet er ein Radar zur Kartierung und Analyse der oberen Bodenschichten bis in den Permafrostbereich und untersucht die Atmosphärenzusammensetzung.¹²

¹¹ Vgl. Nebel 2018, 12f.

¹² Vgl. Nebel 2018, 13.

Anfang 2004 erreichten die beiden NASA Rover Spirit und Opportunity den Planeten. Zu den Aufgaben der Rover zählte unter anderem die Suche nach Wasser. Dazu werden Bodenproben entnommen und Gesteine untersucht. Spirit blieb 2007 im Sand stecken und konnte nicht mehr aus dieser Position herausmanövriert werden. Als stationäre Plattform fungierte der Rover noch bis 2010, ehe man die Kommunikation dann endgültig verlor. Opportunity blieb bis 2018 aktiv und mobil, bevor der Rover nach einem Sandsturm nicht mehr wieder aktiviert werden konnte.¹³

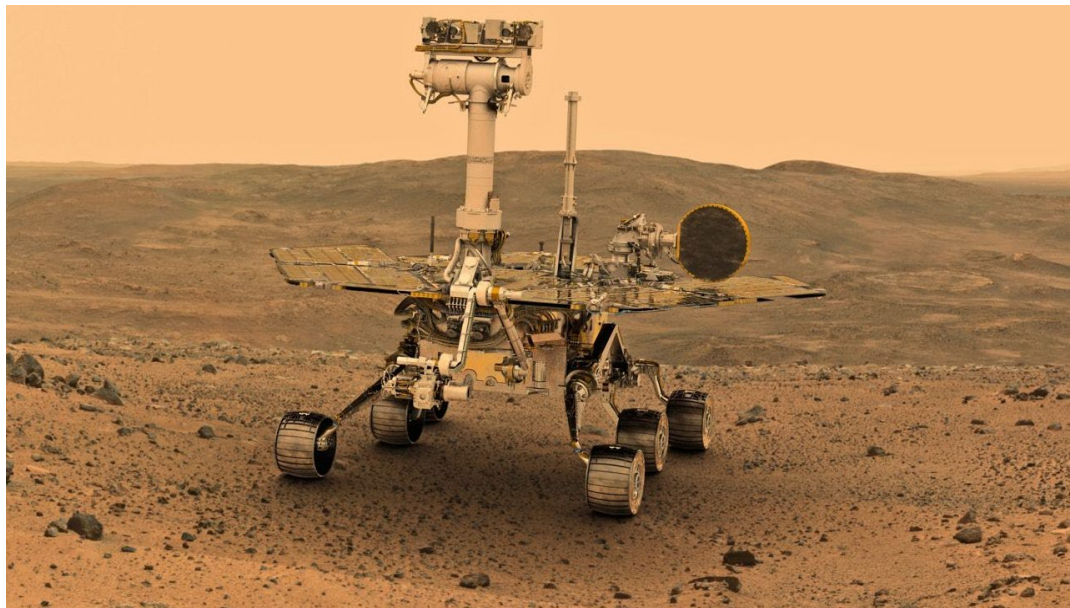


Abb.2: Opportunity Rover

1.3 Das Klima

Der Mars ist der vierte Planet in unserem Sonnensystem und umkreist die Sonne auf einer elliptischen Bahn. Durch die größere Distanz zur Sonne herrschen auf dem Mars wesentlich niedrigere Temperaturen als auf der Erde. Doch in vielen Punkten sind sich die Erde und der Mars sehr ähnlich. Ein Tag auf dem Mars dauert 24 Stunden, 39 Minuten und 35 Sekunden, also fast gleich lang wie auf der Erde. Die Neigung der Rotationsachsen unterscheiden sich nur um 7%, was bedeutet, dass es auch auf dem Mars Jahreszeiten gibt. Die längere Umlaufbahn des Mars bewirkt jedoch, dass ein Marsjahr 351 Erd-Tage länger dauert als ein Erdjahr. Der Mars besitzt vereiste Polkappen und eine Atmosphäre, wenn auch um ein Vielfaches dünner als die unsere. Es gibt sowohl Winde und Stürme als auch

¹³ Vgl. Nebel 2018, 13.

Schnee im Winter. Der Mars hat außerdem 2 ungleichmäßig geformte Monde, die ihn auf einer engen Umlaufbahn umkreisen und im Vergleich zu unserem Erdmond viel kleiner sind.¹⁴

Obwohl der Planet zahlreiche Ähnlichkeiten mit unserer Erde hat, stellt die Atmosphäre und das Klima eine große Herausforderung für den Menschen dar. Das Leben im Freien ist undenkbar, die Ansprüche an den Menschen und das Material sind enorm.

Die Erde und der Mars im direkten Vergleich:

Eigenschaften	Mars	Erde
Äquatordurchmesser	6.792,4 km	12.756,32 km
Masse	6,419 x 10 ²³ kg	5,974 x 10 ²⁴ kg
Mittlere Dichte	3,933 g/cm ³	5,515 g/cm ³
Fallbeschleunigung	3,69 m/s ²	9,81 m/s ²
Fluchtgeschwindigkeit	5,03 km/s	11,186 km/s
Rotationsperiode	24h 37m 22s	23h 56m 4,1s
Neigung der Rotationsachse	25,19°	23,44°
Geometrische Albedo	0,15	0,367

Tab.1: Eigenschaften Mars

1.3.1 Boden

Den Marsboden kann man im Wesentlichen in 3 Teile unterscheiden: Sand, Staub und andere feinkörnige Materialien, die unter dem Begriff Regolith zusammengefasst werden. Hinzu kommen feste Materialien wie Steine, Felsen und Gebirge. Das Regolith entspricht der obersten Bodenschicht der Erde und Landwirtschaft könnte tatsächlich funktionieren, ist aber stark von der Zusammensetzung des Regoliths abhängig. Die Rover Spirit, Opportunity und Curiosity haben an ihren Einsatzorten das dort vorgefundene Regolith untersucht und die Ergebnisse zeigen, dass das Regolith in seiner Zusammensetzung die landwirtschaftliche Nutzung unterstützt. Computersimulationen haben gezeigt, dass unter Zuführung von geringen Mengen Düngemittel dasselbe Pflanzenwachstum möglich ist, wie auf der Erde. Durch die geringere Anziehungskraft des Mars kann man außerdem 90% Wasser

¹⁴ Vgl. Nebel 2018, 35.

einsparen, da dies viel langsamer versickert.¹⁵

Die Zusammensetzung des Gesteins wurde überwiegend aus Satelliteninformationen hergeleitet. Die Mars Odyssey hat neben Wasserstoff auch die Elemente Silizium, Eisen, Chlor, Kalium und Thorium feststellen können.¹⁶

1.3.2 Wasser

Fotografien aus den Jahren 2006 und 2009 zeigen 2 Meter breite, sich nach unten hin verjüngende, Rillen in der Wand des Russel Kraters auf dem Mars. Diese Rillen sind typisch für versickerndes Wasser. Die Spuren von Wasser deuten darauf hin, dass es vor Milliarden von Jahren tatsächlich fließendes Wasser, möglicherweise sogar ganze Ozeane, auf der Oberfläche gegeben hat. Heute erscheint uns der Planet als einige trockene Wüste. Im Gegensatz zu seiner Entstehungszeit hat der Mars heute eine viel dünnere Atmosphäre und Wasser kann deshalb nicht in flüssiger Form auftreten, zumindest nicht an der Oberfläche. In gefrorenem Zustand ist Wasser auf dem Mars wesentlich leichter zu finden.¹⁷

Am 25. Mai 2008 landete die NASA Raumsonde Phönix auf der Oberfläche des roten Planeten, näher am nördlichen Polareis als jede Mission zuvor es geschafft hatte. Mit einem kleinen Bagger ausgerüstet schürfte die Raumsonde an der Oberfläche und nur knapp darunter fand man schließlich den ersten visuellen Beweis für die Existenz des Wassereises.¹⁸ Die Sonde Mars Odyssey wurde mit einem speziellen Gamma Spektrometer ausgestattet, mit dem es möglich war, die gesamte Marsoberfläche nach einer Signatur von Wasserstoff abzutasten. Die Wassermenge konnte man anhand des jeweiligen Wasserstoffgehalts ableiten und die Sonde erstellte eine Karte vom Mars, die die Verteilung des Wassers unter der Oberfläche zeigt. Wie tief sich die Eisvorkommen unter dem Boden ausbreiten ist noch nicht bekannt, jedoch schätzt man das Wasservolumen der beiden Pole auf etwa 1,6 Millionen km³. Würde man beide Pole schmelzen, könnte diese Menge ausreichen, um die gesamte Nordhalbkugel mit 44m Wasser zu fluten.¹⁹

¹⁵ Vgl. Nebel 2018, 43f.

¹⁶ Vgl. Nebel 2018, 44.

¹⁷ Vgl. Nebel 2018, 42.

¹⁸ Vgl. Nebel 2018, 16.

¹⁹ Vgl. Nebel 2018, 42f.

Nach langjährigen Spekulationen und Debatten über die Möglichkeit von flüssigem Wasser unter der Oberfläche konnte ein Team des italienischen nationalen Instituts für Astrophysik in Bologna dies nun bestätigen. Ähnlich den unterirdischen Seen der Antarktis und Grönlands vermutete man solche Vorkommen auch unter der gefrorenen Oberfläche des Mars. Mit der Mars-Express Sonde der ESA suchte das Team von Roberto Orosei Teile der Südpolregion ab und fand eine deutlich abgegrenzte Region, die dieselben Radarsignaturen aufweist wie die unterirdischen Seen auf der Erde. Auf der Erde fand man zahlreiche Mikroben in den unterirdischen Seen. Ob es auch auf dem Mars Leben in den Höhlen gibt ist fraglich. Da auf dem Mars noch viel tiefere Temperaturen herrschen als auf der Erde, die Forscher schätzen die Temperatur auf -68°C , schwindet die Chance darin Leben zu finden. Um bei diesen Temperaturen in einem flüssigen Aggregatzustand zu verharren, müsste der See voller Salze sein, die den Gefrierpunkt deutlich herabsetzen. Die italienischen Forscher meinen, dies sei durchaus plausibel, da die Vorkommen von Magnesium, Kalzium und Natriumsalzen auf dem Mars gegeben sind.²⁰

1.3.3 Atmosphäre

Die Atmosphäre des Mars ist sehr dünn, der durchschnittliche Luftdruck beträgt nur 6mbar, das ist ein 167tel des irdischen Normaldrucks. Nicht einmal auf dem Gipfel des Mount Everest herrscht ein derart niedriger Luftdruck. Der niedrigste, vom Menschen erträgliche Druck wären 63 mbar. Bei diesem Druck würde Wasser schon bei normaler Körpertemperatur zu kochen beginnen.²¹

Die Atmosphäre besteht zum größten Teil aus Kohlenstoffdioxid (siehe Tabelle 2). Während wir auf der Erde einen Sauerstoffanteil von 20,95% haben, sind es auf dem roten Planeten nur 0,13%. Ein freies Atmen in der Atmosphäre ist demnach nicht möglich.²²

Die Zusammensetzung der Atmosphäre variiert in Abhängigkeit zur Jahreszeit, da im Winter einige Gase an den Polen gefrieren, die dann im Frühling wieder in die Atmosphäre abgegeben werden.²³

²⁰ Vgl. o.V.: Forscher finden See mit flüssigem Wasser auf dem Mars, 25.07.2018, <https://futurezone.at/science/fluessiges-wasser-forscher-finden-see-unter-poleis-am-mars/400071593>, 17.02.2020.

²¹ Vgl. Nebel 2018, 38.

²² Vgl. Neben 2018, 38.

²³ Vgl. Petranek 2015, 64.

Der Temperaturunterschied zwischen Tag und Nacht ist aufgrund fehlender Wärmespeicherfähigkeit der dünnen Atmosphäre extrem. Während am Äquator an einem Sommertag angenehme 27°C möglich sind, fallen die Temperaturen an den Polkappen auf bis zu -133°C ab.²⁴

Atmosphäreneigenschaften	Mars	Erde
Luftdruck	0,006 bar	1,014 bar
Min. Temperatur	140 K (-133°C)	184 K (-89°C)
Mittlere Temperatur	218 K (-55°C)	288 K (+15°C)
Max. Temperatur	300 K (+27°C)	331 K (+58°C)
Kohlenstoffdioxid	95,32%	0,038%
Stickstoff	2,7%	78,08%
Argon	1,6%	0,93%
Sauerstoff	0,13%	20,95%

Tab.2: Atmosphäreneigenschaften

1.3.4 Strahlung

Während wir auf der Erde durch das natürliche Magnetfeld des Planeten geschützt sind vor den Sonnenwinden, verfügt der Mars nicht über ein solches Magnetfeld. Es gibt dort nur lokal auftretende Magnetfelder, die nicht flächendeckend sind und ohne Messwerte kaum vorhersehbar sind. Die Sonne sendet hochenergetische Partikel aus, die vom Magnetfeld um die Erde herumgeleitet werden. Die Strahlenbelastung auf der Erde ist zwar vorhanden, aber in einem noch größtenteils unbedenklichen Ausmaß. Die erhöhte Strahlenbelastung muss für den Menschen nicht unbedingt tödlich sein, kann aber die Erkrankung an Krebs begünstigen.²⁵

Die natürliche Strahlenbelastung im Weltraum wird auf etwa 500 mSv (Milli-Sievert) pro Jahr berechnet, ist jedoch stark abhängig von der Sonnenaktivität. Durch das Magnetfeld unserer Erde wird die Intensität der Strahlung auf ein Minimum reduziert. Der Richtwert der Strahlungsbelastung auf der Erdoberfläche auf

²⁴ Vgl. Nebel 2018, 38.

²⁵ Vgl. Nebel 2018, 49f.

Meeresniveau wird auf 0,3 mSv festgelegt. Dosen von bis zu 20 mSv pro Jahr gelten als weitestgehend unbedenklich.²⁶

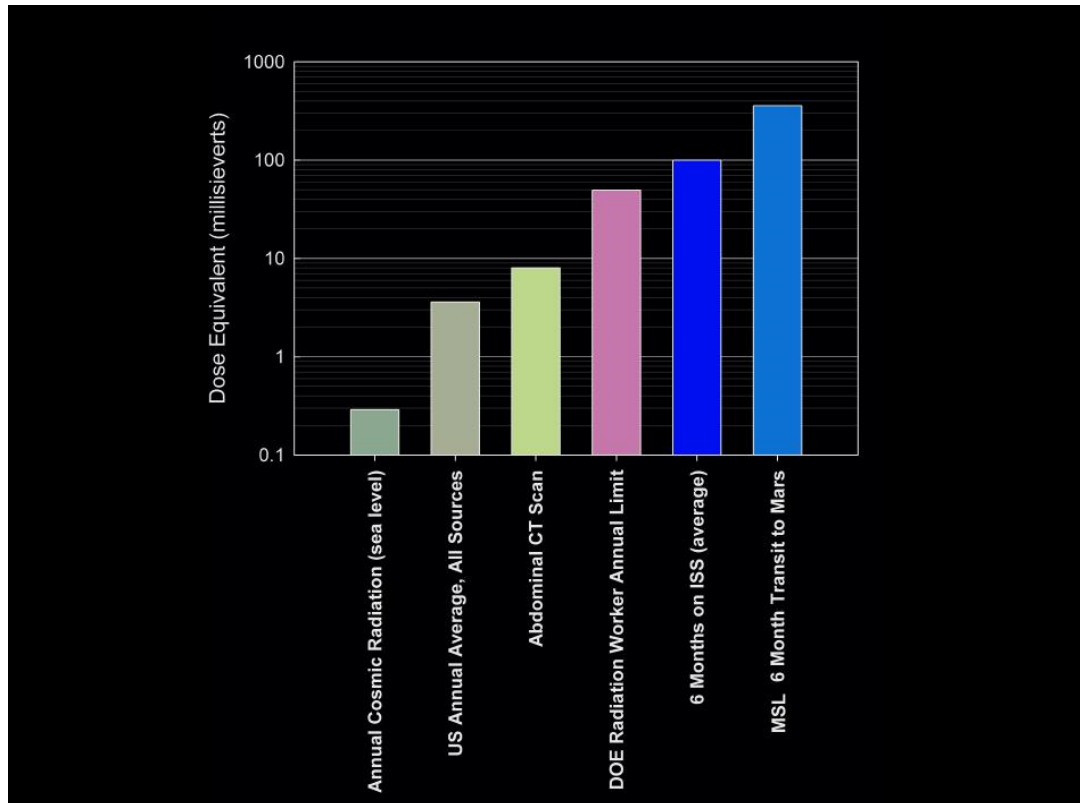


Abb. 3: Strahlungsbelastungen

In der Grafik kann man erkennen, dass die Strahlenbelastung auf einem 6-monatigen Flug zum Mars 3,3-mal so hoch ist, wie ein Aufenthalt der selben Dauer auf der Internationalen Raumstation. Pro Tag ergibt sich ein Wert von 1,8 mSv auf dem Weg zum Mars. Aufgrund der Messdaten des Curiosity Rovers während der ersten 300 Tage seines Einsatzes geht man davon aus, dass die auf der Marsoberfläche auftretende Strahlenbelastung niedriger ist als im Raumschiff auf dem Weg zum Planeten.²⁷

²⁶ Vgl. Nebel 2018, 48.

²⁷ Vgl. Nebel 2018, 48f.

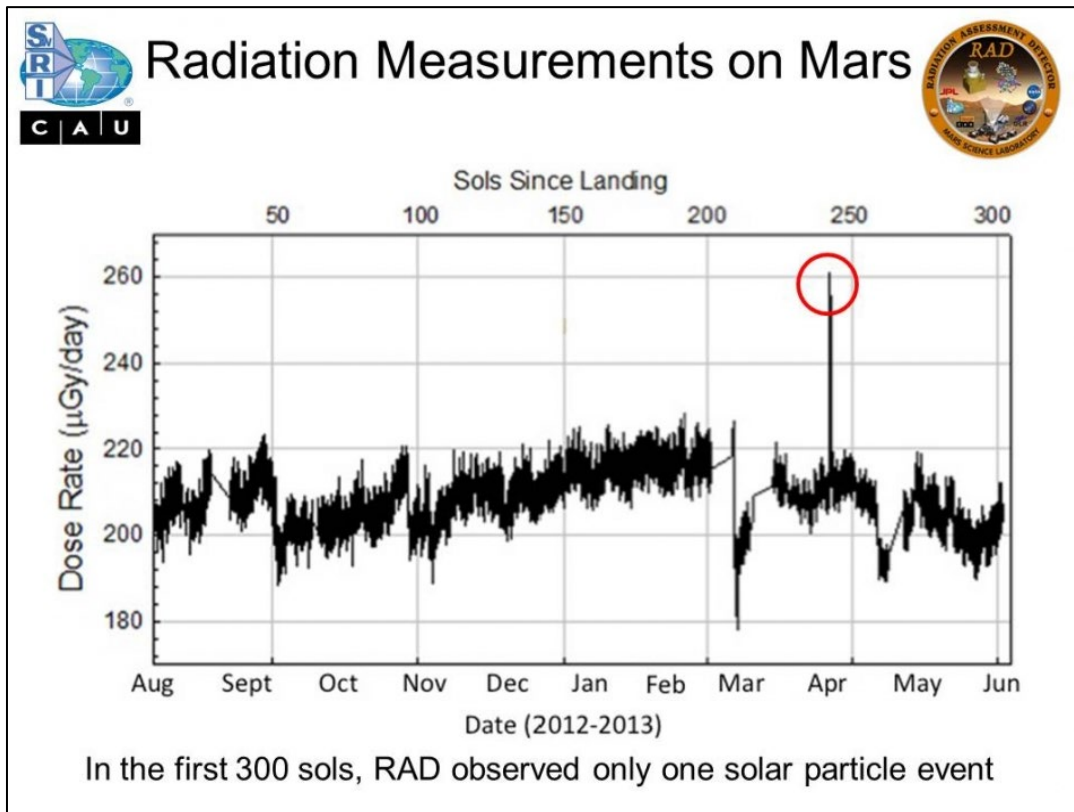


Abb. 4: Strahlungswerte des Curiosity Rovers

Die hohe Strahlenbelastung auf dem Mars ist auf lange Sicht gesehen schädlich für den menschlichen Organismus. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen der sonnenbedingten Strahlung und der kosmischen Strahlung. Die Sonneneinstrahlung ist das, was wir tatsächlich am Körper spüren. Sie besteht aus energiegeladenen Teilchen von der Sonne, die die Atmosphäre durchdringen und uns einen Sonnenbrand auf unserer Haut bescheren. Um ein Vielfaches gefährlicher sind die kosmischen Strahlen, die ihren Ursprung weit außerhalb unseres Sonnensystems haben. Sie weisen eine viel höhere Energie auf und sind deshalb auch um ein Vielfaches gefährlicher für den Menschen. Sie dringt sogar durch extrem dickes Metall und kann elektronische Systeme lahmlegen.²⁸

²⁸ Vgl. Petranek 2015, 72f.

1.3.5 Gravitation

Die Gravitation ist aufgrund der geringen Masse des Planeten signifikant geringer und beträgt ungefähr ein Drittel der Anziehungskraft auf der Erde. Ein 100 kg schwerer Mann erfährt auf dem Mars demnach dieselbe Anziehungskraft, wie ein 37,6kg schwerer Körper auf der Erde.²⁹

Der britische Astronom Chris Impey spricht in einem Radio Interview über die physiologischen Veränderungen des Menschen unter Einwirkung der geringen Gravitation und die Entwicklung des Menschen hin zu einer neuen Spezies.

"They'll evolve physiologically quite quickly, because if the gravity is less — as it would be on Mars or the moon — then they will change [...] Their physical bodies will change even while they're alive. And then if they have children and grandchildren — then they'll change even more."³⁰

Wie wir von den Astronauten der ISS wissen, hat man in der Schwerelosigkeit des Alls mit akutem Muskel- und Knochenschwund zu kämpfen. Täglich müssen die Astronauten mindestens 1,5 Stunden trainieren, um dem Abbau der Muskelmasse entgegenzuwirken. Auf der Erde zurückgekehrt haben diese Menschen anfangs Schwierigkeiten, sich an die irdische Gravitation zu gewöhnen, zu gehen und überhaupt aufrecht zu halten. Muskeln und Knochen regenerieren sich nach einiger Zeit wieder.³¹

1.3.6 Stürme

Während des Frühjahres auf dem Mars kann es zu starken Staubstürmen kommen. Durch die ansteigende Sonneneinstrahlung fegt der Staub mit bis zu 400km/h über die Oberfläche. Dabei kann es außerdem zu Gewittern kommen.³²

Der NASA Rover Opportunity gelangte im Jahre 2018 in einen Sandsturm und man verlor jeden Kontakt zu dem Roboter. Anfangs hoffte man noch auf die Wiederaufnahme der Kommunikation, sobald sich der Sturm gelegt hatte. Die NASA war voller Hoffnung, dass ihr Rover den Sandsturm überstehen würde und glaubte, dass die Temperatur der Maschine im Sandsturm nicht unter -36°C fallen werde, was

²⁹ Vgl. Nebel 2018, 35.

³⁰ Interview mit Chris Impey, geführt von Terry Gross, 11.5.2015.

³¹ Vgl. Kai Stoppel: Mars könnte neue Menschen hervorbringen, 2.11.2015, <https://www.n-tv.de/wissen/Mars-koennte-neue-Menschen-hervorbringen-article16224451.html>, 14.02.2020.

³² Vgl. Nebel 2018, 39.

noch nicht als kritischer Bereich für die Funktionen angesehen wird. Sobald der Sturm wieder ausreichend Sonnenlicht durch die Atmosphäre lassen würde, könnten sich die Batterien des Rovers wieder aufladen und Kontakt hergestellt werden. Am 13. Februar 2019 erklärte die NASA das Programm jedoch für beendet.³³

Stürme wie diese hat man schon vor über 200 Jahren mit Teleskopen beobachtet, wenngleich in einem ganz anderen Detaillierungsgrad. Man erkannte einen Sturm daran, dass die ohnehin schon undeutlich erkennbare Oberfläche mit ihren Details bei einem Sturm zur Gänze verschwand. Diese Stürme können den ganzen Planeten bedecken und sie erweckten schon damals großes Interesse der Forschung. Die Stürme sind heute nicht nur ein Hindernis der Forschung, sondern auch Objekt der Forschung selbst.³⁴

Auf der Erde sind Stürme stark abhängig vom Wasser in der Atmosphäre. Feuchte Luft steigt über den Gewässern auf und kühlt stetig ab. Mit fallender Temperatur fällt auch der maximale gasförmige Wassergehalt der Luft, weshalb das Wasser in der Luft kondensiert und in Folge dessen Wolken entstehen. Diese Luft kühlt nicht mehr so schnell ab wie andere, nicht so wasserhaltige Luft in dieser Höhe und ist auch leichter. Sie steigt deshalb umso schneller auf in noch kältere Luftschichten. Das Aufsteigen dieser Luft sorgt für ein Tiefdruckgebiet am Boden und der entstehende Wind ist das Ergebnis des Druckausgleiches mit der Umgebung.³⁵

Auf dem Mars gibt es weder große Ozeane noch sonstige größere Wassermengen. Der für einen Mars-Sturm entscheidende Faktor ist der Staub. Sobald ein Wind auf der Marsoberfläche eine Geschwindigkeit von 30 m/s überschreitet, löst sich der Staub vom Boden und wird aufgewirbelt. Löst sich dieser Staub auf großen Flächen, dann hat dieser Effekt einen großen Einfluss auf die Temperatur der Atmosphäre. Der Boden wird durch die Sonneneinstrahlung aufgeheizt. Wird der Staub nun aufgewirbelt, gibt der Staub die erhaltene Wärme an die Luft ab. Die warme Luft steigt auf und erzeugt am Boden ein Tiefdruckgebiet. Der entstehende Wind wirbelt in Folge noch mehr Staub auf und verstärkt diesen Zyklus. In der Nacht schützt die Staubschicht in der Luft den Planeten vor dem Wärmeverlust in das All.

³³ Vgl. Wunderlich-Pfeiffer: Die Staubstürme des roten Planeten, 18.06.2018, <https://www.golem.de/news/mars-die-staubstuerme-des-roten-planeten-1806-135010-2.html>, 18.02.2020.

³⁴ Vgl. Wunderlich-Pfeiffer: Die Staubstürme des roten Planeten, 18.06.2018, <https://www.golem.de/news/mars-die-staubstuerme-des-roten-planeten-1806-135010-2.html>, 18.02.2020.

³⁵ Vgl. Wunderlich-Pfeiffer: Die Staubstürme des roten Planeten, 18.06.2018, <https://www.golem.de/news/mars-die-staubstuerme-des-roten-planeten-1806-135010-2.html>, 18.02.2020.

Ähnlich wie der Treibhauseffekt auf der Erde wird die vom Planeten abgegebene Wärme von der Staubschicht zu einem Teil reflektiert und zu einem Teil ins All geleitet. Es entsteht ein sich selbst verstärkender Effekt, der erst dann abklingt, wenn die Staubstürme so groß werden, dass die Druckunterschiede in Wechselwirkung so klein werden, dass sie keinen Wind mehr erzeugen. Bis der Staub jedoch wieder auf der Oberfläche landet, dauert es Monate. In diesem Zeitraum kann sich der Staub auf dem ganzen Planeten verteilen.³⁶

Staubstürme auf dem roten Planeten sind stark abhängig von der vorherrschenden Jahreszeit. An dem Punkt, an dem der Planet auf seiner exzentrischen Umlaufbahn der Sonne am nächsten ist, herrscht der südliche Sommer. Zu dieser Zeit ist die Sonne 40 % heller als im Winter und hat den höchsten Stand am Himmel. Dieser Umstand verstärkt den Erwärmungseffekt der Sonne auf den Staub und Effekte, wie die Erwärmung unterschiedlich heller Bodenstrukturen und der damit einhergehenden Entstehung von Hoch- und Tiefdruckgebieten.³⁷

1.3.7 Erdbeben

Zwischen Februar und September des Jahres 2019 konnte die NASA-Sonde Insight mehrere kleine Erdbeben registrieren. 174 seismische Aktivitäten wurden durch die Instrumente der Sonde wahrgenommen, das entspricht etwa einem Beben alle 2 Tage. Zwar hat man auch auf unserem Mond Erdbeben festgestellt, die seismischen Signale auf dem Mars ähneln jedoch eher einem Beben auf der Erde als auf dem Mond.³⁸ Vedran Lekic, Mitautor der Studie und Geologe der University of Maryland, ergänzt:

„Auf Basis der Wellenbewegungen können wir Rückschlüsse auf die geologischen Schichten innerhalb des Planeten ziehen.“³⁹

³⁶ Vgl. Wunderlich-Pfeiffer: Die Staubstürme des roten Planeten, 18.06.2018, <https://www.golem.de/news/mars-die-staubstuerme-des-roten-planeten-1806-135010-2.html>, 18.02.2020.

³⁷ Vgl. Wunderlich-Pfeiffer: Die Staubstürme des roten Planeten, 18.06.2018, <https://www.golem.de/news/mars-die-staubstuerme-des-roten-planeten-1806-135010-2.html>, 18.02.2020.

³⁸ Vgl. o.V.: Der Mars bebt: NASA-Sonde stellt Erdbeben auf dem Mars fest, 29.02.2020, <https://www.vol.at/der-mars-bebt-nasa-sonde-stellt-erdbeben-auf-dem-mars-fest/6533434/amp>, 04.03.2020.

³⁹ Vedran Lekic, zit. n. Der Mars bebt: NASA-Sonde stellt Erdbeben auf dem Mars fest, 29.02.2020, <https://www.vol.at/der-mars-bebt-nasa-sonde-stellt-erdbeben-auf-dem-mars-fest/6533434/amp>, 04.03.2020.

1.3.8 Exkurs: Terraforming

Die hohe Strahlenbelastung, die tiefen Temperaturen und der hohe Anteil an Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre des Mars macht das menschliche Leben ohne Schutzanzug praktisch unmöglich. Ein Aufenthalt auf dem Mars ist von strengen Sicherheitsvorkehrungen bestimmt und definitiv nur für einen gewissen Zeitraum verträglich für den Organismus des Menschen. Dies stellt in Folge die Frage nach dem Sinn einer längeren Mars-Mission oder gar einer Besiedlung. Macht es Sinn nach einem Dasein auf dem Mars zu streben, der die Lebensqualität dermaßen einschränkt? Um den Planeten tatsächlich unschädlich und behaglich für den Menschen zu machen, entwickelte man die Idee des Terraformings. Das Terraforming beruht auf der Idee, einen Planeten in einen bewohnbaren, erdähnlichen Ort umzuwandeln. Die Grundvoraussetzung dafür ist der Aufbau einer dichteren Atmosphäre. Die Atmosphäre muss so dicht werden, dass sie in der Lage ist genug Wärme zu halten. Ungefähr ein Drittel des Luftdrucks auf dem Meeressniveau der Erde sind dafür nötig, das entspricht 300 mbar.⁴⁰

Wasser ist die Basis jeder Lebensform und daher von primärer Wichtigkeit. Obwohl man Wasser nun auch in flüssigem Zustand unter der Oberfläche nachgewiesen hat, muss man das gefrorene Eis der Pole schmelzen. Die Temperatur des Planeten muss über den Gefrierpunkt steigen, damit Wasser in den flüssigen Aggregatzustand übergeht und auch darin verharrt.⁴¹

„Im Marsgestein sind ausreichende Mengen Kohlendioxid gespeichert, das wie alle Treibhausgase dafür sorgt, dass das Sonnenlicht im infraroten Spektralbereich nicht zurückgestrahlt werden kann – es wird wärmer. Ist dieser Prozess einmal in Gang gesetzt, hält er sich selbst am Laufen: Je mehr CO₂ in der Atmosphäre ist, desto wärmer wird es, was wiederum noch mehr CO₂ freisetzen lässt.“⁴²

Das Problem hierbei ist jedoch, dass der Mars um zwei Drittel weniger Sonnenlicht abbekommt als die Erde und das nicht ausreicht für eine Erwärmung des Planeten durch Kohlenstoffdioxid.⁴³

⁴⁰ Vgl. Mamczak/Pirling 2015, 288f.

⁴¹ Vgl. Mamczak/Pirling 2015, 289.

⁴² Mamczak/Pirling 2015, 289.

⁴³ Vgl. Mamczak/Pirling 2015, 289.

Ist der Planet erst mal warm genug, könnte sich der Mensch bereits ohne Schutzanzug im Freien bewegen, nicht jedoch ohne Atemmaske, denn der CO₂ Anteil ist zum Atmen immer noch zu hoch. Würde man den Marsboden mit Bakterien fruchtbar machen, könnten diese die Fotosynthese initiieren und die Luft mit Sauerstoff anreichern. Über die Jahre hin entwickeln sich von primitiven Moosen und Flechten komplexere Pflanzen und Bäume und erhöhen den Sauerstoffgehalt der Atmosphäre weiter und senken gleichzeitig den CO₂ Gehalt auf unter 1%. Dann erst könnte der Mensch die Atemmaske abnehmen. Dieser Prozess hat auf der Erde jedoch mehrere Milliarden Jahre gedauert und ist auf dem Mars in einem absehbaren Zeitraum nicht realisierbar. Außerdem hat der rote Planet seine damals dichtere Atmosphäre schon einmal verloren. Die geringe Schwerkraft und das Fehlen eines Magnetfeldes stellen die Machbarkeit des Terraformings auf diesem Planeten in Frage, denn niemand kann versichern, dass sich die Atmosphäre nicht wieder abbaut. Außerdem stellt sich neben den technologischen und wissenschaftlichen Fragen auch noch eine grundsätzliche Frage über alle anderen, nämlich die der Moral. Darf man einen fremden Planeten einfach verändern? Der Planet gehört uns nicht, wer erlaubt uns diesen so zu verändern, dass er für unsere Spezies angenehm ist? Lediglich der so genannte Weltraumvertrag bildet eine rechtliche Grundlage, demzufolge es allen Staaten, die den Vertrag unterzeichnet haben, erlaubt ist das All und die Himmelskörper zum Wohl der Menschheit zu erforschen und zu nutzen, solange es in friedlicher Absicht passiert und andere Staaten nicht darin gehindert werden gleiches zu tun. Ob eine Besiedlung oder eine Veränderung der Atmosphäre in den Begriff „nutzen“ einzubeziehen ist, sei dabei hingestellt und im höchsten Maße kritisch anzusehen.⁴⁴

⁴⁴ Vgl. Mamczak/Pirling 2015, 290f.

2 LEBEN AUF DEM MARS

2.1 Wohnen

Was braucht man zum Wohnen und Arbeiten auf dem Mars? Was braucht es an räumlichen Strukturen, um einerseits den Anforderungen auf dem Mars gerecht zu werden und andererseits den dort lebenden und forschenden Astronauten einen behaglichen Wohnraum zu bieten? Das Leben auf dem Mars unterscheidet sich grundsätzlich von dem auf der Erde und hat dementsprechend auch einen Einfluss auf die Architektur. Das Urmotiv der Architektur, des Bauens ist das Bedürfnis nach Schutz, einen Unterschlupf, einen Rückzugsort zu schaffen. Während man in der frühen Menschheitsgeschichte Schutz vor wilden Tieren und Unwettern suchte, muss man auf dem Mars auf die dort bedrohenden Lebensumstände reagieren und Schutz suchen vor der kosmischen Strahlung, den niedrigen Temperaturen und Sonnenstürmen. Auch die mangelnde Gravitation auf dem Mars ist auf Dauer nicht gesund für den menschlichen Organismus. Ziel ist es demnach ein Habitat für die Forscher zu errichten, das sowohl Platz für das Arbeiten als auch ausreichend Platz für das Wohnen, das Leben bietet.

Christiane Heinicke, Geophysikerin vom Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM), hat ein aus sechs Modulen bestehendes Habitat entwickelt. Das Habitat ist konzipiert für den Einsatz sowohl auf dem Mond also auch auf dem Mars. Sie ist der Meinung, dass Menschen, die über einen längeren Zeitraum auf engstem Raum zusammen arbeiten und wohnen, eine lebenswerte Umgebung benötigen, da diese sonst den Verstand verlieren könnten. Ein zentraler Aspekt in ihrem Konzept ist dabei ein Fenster. Aus technischer Sicht natürlich im höchsten Maß ineffizient und kostspielig, für Ingenieure ein Alptraum. Diesen Luxus argumentiert Heinicke mit der positiven Wirkung auf die menschliche Psyche. Ein Fenster ermöglicht den Astronauten ihren Raum visuell zu erweitern und schwächt das Gefühl der Beengtheit innerhalb der Raumkapsel. Die Forscher würden einige Monate lang einer starken psychologischen Herausforderung gegenüberstehen. Da sei die Implementierung eines Fensters in die Gebäudehülle ein großer Vorteil, der den Menschen im All dabei hilft, geistig gesund und fit zu bleiben. Heinicke selbst hat auf Hawaii einen 18-monatigen Testversuch

absolviert, bei dem sie auf 100m² mit 5 Kolleginnen und Kollegen unter extraterrestrischen Bedingungen lebte.⁴⁵

„Eigentlich sind es Probleme, die man aus dem Alltag kennt, nur eben deutlich verschärft. [...] Unter Normalbedingungen hat man Urlaub, Wochenende, Feiertage, um räumlich und mental Abstand zu gewinnen. Das geht unter solchen Bedingungen nicht. Kein Abstand, keine Pause.“⁴⁶

Volker Schmid, Leiter der Abteilung ISS, Astronautische Raumfahrt und Exploration am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), sieht diesen Aspekt ebenfalls als wichtig an und erklärt, dass ein Habitat so geplant sein muss, dass die menschliche Psyche keinen Schaden nehmen kann. „Das darf nicht nur eine weisse[sic.] Blechkiste sein“, meint Schmid.⁴⁷

Das Weltraumhabitat von Heinicke besteht aus folgenden Einheiten: Schlafen, Küche, Freizeit, Labor, Werkstatt und Gewächshaus. Die einzelnen, zylinderförmigen Elemente sind sieben Meter hoch und werden miteinander verbunden. Das Labor-Modul besteht aus 2 Etagen und bietet eine Grundfläche von 15 m². Das Habitat soll in einer Art Hangar stehen, wo es von einer ein Meter dicken Betonaußenwand geschützt ist, um vor der Weltraumstrahlung und den Sonnenstürmen abgeschirmt zu sein.⁴⁸

⁴⁵ Vgl. o.V.: So lebt und arbeitet man in Zukunft auf Mond und Mars, 05.01.2020, <https://www.bluewin.ch/de/news/wissen-technik/wohnen-und-arbeiten-auf-mond-und-mars-342155.html>, 19.03.2020.

⁴⁶ Christiane Heinicke, zit.n.: So lebt und arbeitet man in Zukunft auf Mond und Mars, 05.01.2020, <https://www.bluewin.ch/de/news/wissen-technik/wohnen-und-arbeiten-auf-mond-und-mars-342155.html>, 19.03.2020.

⁴⁷ Vgl. o.V.: So lebt und arbeitet man in Zukunft auf Mond und Mars, 05.01.2020, <https://www.bluewin.ch/de/news/wissen-technik/wohnen-und-arbeiten-auf-mond-und-mars-342155.html>, 19.03.2020.

⁴⁸ Vgl. o.V.: So lebt und arbeitet man in Zukunft auf Mond und Mars, 05.01.2020, <https://www.bluewin.ch/de/news/wissen-technik/wohnen-und-arbeiten-auf-mond-und-mars-342155.html>, 19.03.2020.

2.1.1 Alltag

HI-SEAS Simulation

Wie ein Tagesablauf auf dem Mars aussehen kann, zeigt uns ein Experiment der NASA und der Universität Hawaii aus dem Jahr 2015. Das HI-SEAS (Hawai'i Space Exploration Analog and Simulation) Projekt auf Hawaii fand auf rund 2500 Höhenmetern über dem Meeresspiegel statt, in einem isolierten, dem Mars topographisch ähnlichen Lebensraum.⁴⁹

Für ein ganzes Jahr bewohnten auf rund 100 Quadratmetern 6 Testpersonen, 3 Männer und 3 Frauen, eine Forschungsstation. Am 28. August 2015 bezogen die Forscher das Domizil und exakt 1 Jahr später, am 28. August 2016, wurden diese mit den Worten „Willkommen zurück auf der Erde“ begrüßt. Die Raumstation wurde auf dem Fuße des Mauna Loa Vulkans errichtet. Unter einer sechs Meter hohen, weißen Kuppel lebten die 6 Menschen auf engstem Raum zusammen und lebten mit den auf dem Mars zu erwartenden, lebenseinschränkenden Maßnahmen. Jedem Forscher stand ein eigenes Zimmer mit Bett und Schreibtisch zur Verfügung. Es gab weder Fernsehen noch Telefonate. Die Kommunikation nach außen fand lediglich mit Emails statt, die über den Server mit 20 Minuten Verzögerung ein und aus gingen. Dies entspricht ungefähr der Zeit, die eine Mail tatsächlich vom Mars zur Erde benötigen würde. Zu essen gab es nur Tiefgefrorenes. Wasser zum Duschen musste so eingeteilt werden, dass jeder einzelne mit 8 Minuten pro Woche auskam. Für jeden Ausflug ins Freie musste ein schwerer Raumanzug angelegt werden. Jeder der sechs Forscher hatte eine bestimmte Aufgabe, die akribisch mit zahlreichen Kameras von außen beobachtet wurde. Das Team wurde rund um die Uhr überwacht. Es wurden Schritte gezählt, der Schlaf und der Puls überwacht. Die stetige Gesundheit der Crew hatte oberste Priorität.⁵⁰

⁴⁹ Vgl. o.V.: Hawai'i Space Exploration Analog and Simulation, o.Z., <https://hi-seas.org/>,06.04.2020.

⁵⁰ Vgl. o.V.: Mars-Simulation auf Hawaii, 29.08.2016, <https://www.br.de/themen/wissen/mars-hawaii-nasa-100.html>,06.04.2020.

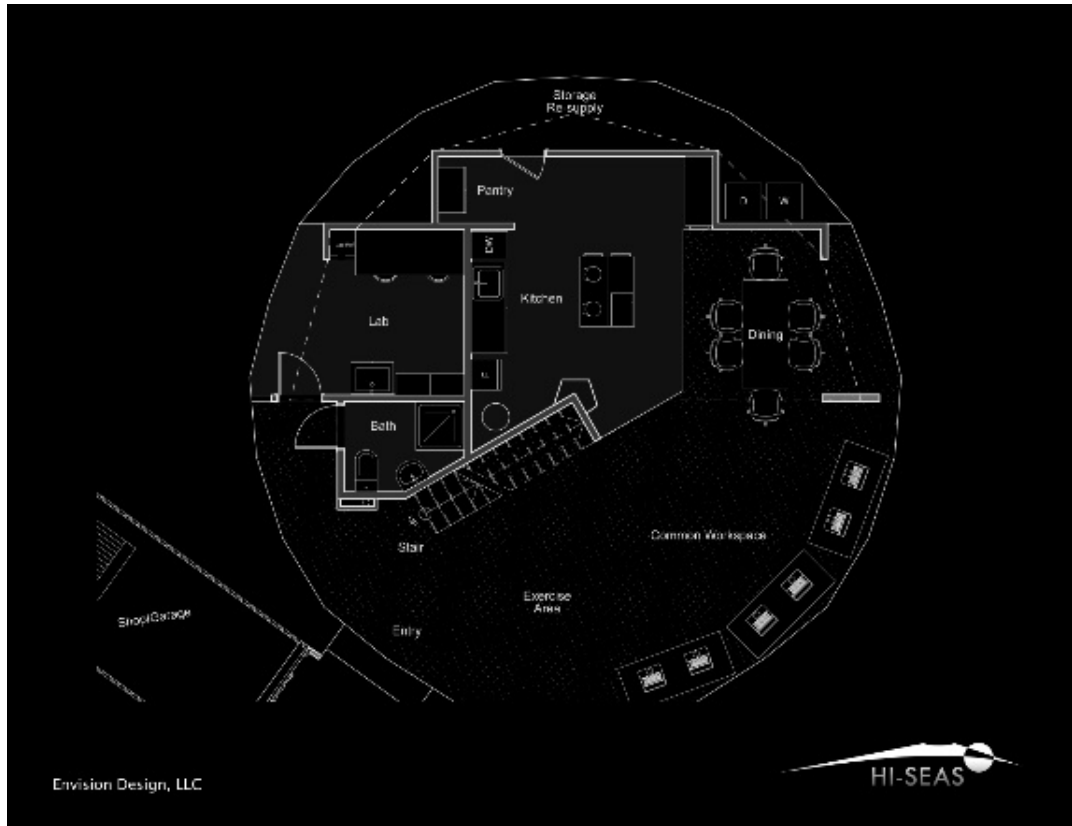


Abb.5: Erdgeschoß Hi-Seas

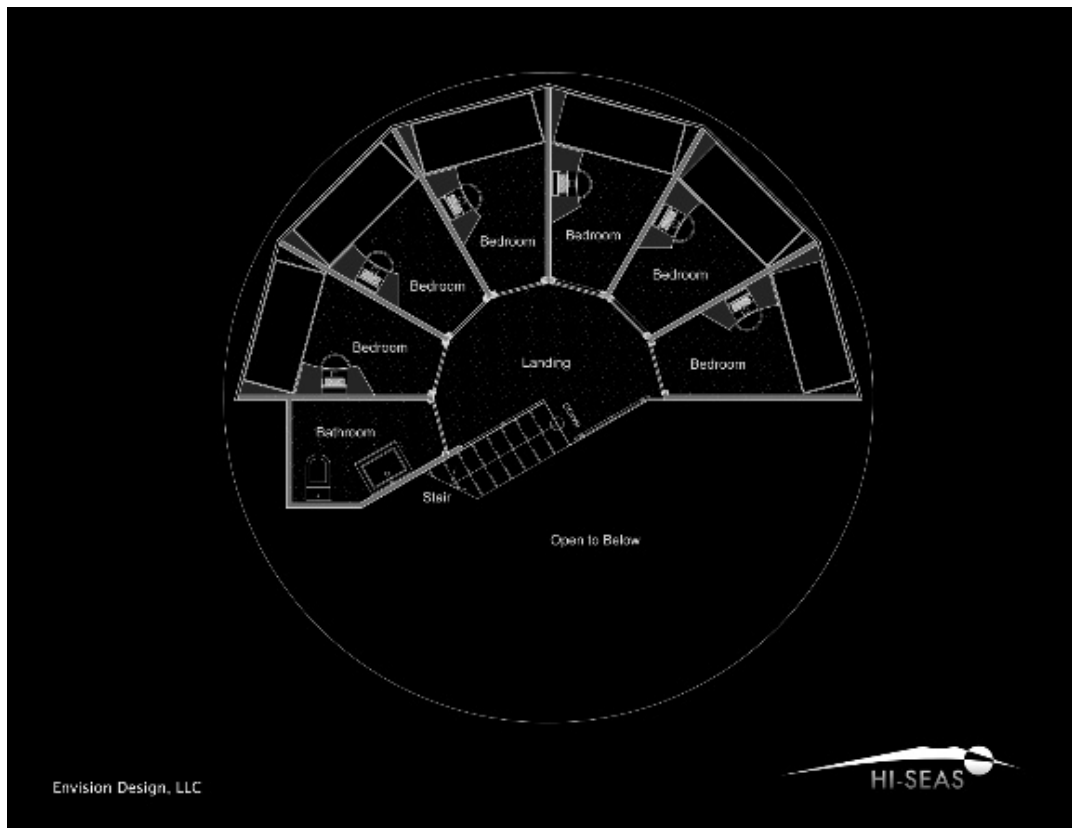


Abb.6: Obergeschoß Hi-Seas

Das primäre Ziel der Simulation war es zu ergründen, wie sich die Gruppendynamik innerhalb des Teams, völlig isoliert, über einen Zeitraum von 365 Tagen entwickelt und wie sie sich gegebenenfalls steuern lässt. Das Funktionieren des Teams ist maßgebend für den Erfolg der wissenschaftlichen Experimente und die mentale Gesundheit der Mitglieder.⁵¹

Eine der sechs Forscher war die deutsche Geophysikerin Christiane Heinicke. In einem Blog schildert sie ihren Tagesablauf auf der simulierten Mars-Mission. Ihr Tag beginne je nachdem, was auf dem Tagesplan steht, meistens zwischen 8:30 und 9:00. Einige ihrer Kollegen sind schon wesentlich früher auf den Füßen. Da sie für die Außenexperimente zuständig ist, verlässt sie häufiger das Habitat als die anderen. Eine EVA (extravehikuläre Aktivität) bezeichnet einen solchen Aufenthalt außerhalb des Raumfahrzeuges bzw. einer Raumstation. Diese Missionen sind für den Körper eine hohe Belastung, da der Raumanzug schwer und laut Heinicke „heißer als ein Backofen“ ist. Inklusive der Vor- und Nachbereitung müssen für eine EVA rund 4 Stunden Zeit eingerechnet werden. Danach ist Heinicke erfahrungsgemäß körperlich erschöpft und muss ihre Energiereserven wieder auffüllen. Wenn die deutsche Forscherin nicht mit Außeneinsätzen beschäftigt ist, verbringt sie ihren Vormittag damit, Emails zu beantworten oder Planungen am Computer zu machen. Zahlreiche Sozialexperimente und Sport begleiten das Team den ganzen Tag. Das Abendessen ist für die Crew das Highlight des Tages, weil meistens erst dann alle das erste Mal an einem Tisch zusammenkommen und miteinander interagieren. Nach dem Essen wird geredet, gescherzt und man versucht sich mit verschiedenen Dingen die Zeit zu vertreiben. Einige lesen Bücher, andere versuchen ein neues Instrument zu lernen.⁵²

„Bringt etwas Sinnvolles mit, woran ihr arbeiten könnt. Einer eurer größten Feinde ist Langeweile.“⁵³ – Christiane Heinicke

⁵¹ Vgl. o.V.: Mars-Simulation auf Hawaii, 29.08.2016, <https://www.br.de/themen/wissen/mars-hawaii-nasa-100.html>,06.04.2020.

⁵² Vgl. Christiane Heinicke: Mein Tagesablauf, 18.10.2015, <https://scilog.spektrum.de/leben-auf-dem-mars/mein-tagesablauf/>,06.04.2020.

⁵³ Christiane Heinicke, zit.n. Mars-Simulation auf Hawaii, 29.08.2016, <https://www.br.de/themen/wissen/mars-hawaii-nasa-100.html>,06.04.2020.

2.1.2 Bedürfnisse

Um auf dem Mars zu überleben braucht der Mensch fünf grundlegende Dinge: Nahrung, Wasser, Unterkunft, Kleidung und Sauerstoff. Der Mensch erleidet bereits nach 5 Minuten ohne Sauerstoff einen Gehirnschaden, nach 15 Minuten gilt der Entzug als tödlich. Der Sauerstoff in der Atmosphäre des Mars macht jedoch nur einen geringen Teil (0,13%) davon aus und reicht nicht aus, um im Freien normal zu atmen. Um in einem geschützten Habitat für genug Sauerstoff zu sorgen, muss man Sauerstoff produzieren.⁵⁴

Eine Möglichkeit wäre zum Beispiel die Gewinnung von Sauerstoff durch Elektrolyse. Dabei wird elektrischer Strom durch Wasser geleitet und dieses in Sauerstoff und Wasserstoff aufgespalten. Eine andere Möglichkeit wäre das Wasser direkt aus der Atmosphäre zu ziehen. Die NASA Raumsonde Viking, die 1976 als erstes Raumschiff überhaupt sicher auf dem Planeten landete, lieferte Informationen über die Feuchtigkeit der Atmosphäre. Diese Luftfeuchtigkeit beträgt trotz der dünnen Atmosphäre oftmals 100%. 1998 wurde eine wissenschaftliche Studie der University of Washington veröffentlicht, die ein Gerät vorstellte, das genügend H₂O aus der Atmosphäre absorbieren könnte, um die nötige Voraussetzung für menschliches Leben auf dem Planeten zu schaffen. Dieser Wasserdampfaufnahmereaktor wurde Water Vapor Absorption Reactor, kurz WAVAR, genannt. Der WAVAR soll 2 Jahre vor der ersten bemannten Mission auf dem Mars abgesetzt werden, um schon mit der Produktion von Wasser zu beginnen.⁵⁵

Obwohl sich in der Atmosphäre des Mars nur 0,13% Sauerstoff befinden (siehe Tabelle 2), ist eine große Menge Sauerstoff im CO₂ der Atmosphäre gebunden. Das Molekulargewicht des Kohlenstoffdioxids stammt zu nur 28% vom Kohlenstoff und zu 72% vom Sauerstoff. Besteht die marsianische Luft laut Tabelle 2 nun zu etwa 95% aus CO₂, dann folgt daraus, dass, der molekularen Masse nach, der Sauerstoff rund 70% der gesamten Luft in der Atmosphäre ausmacht.⁵⁶

Das Wasser auf dem Mars besteht sogar zu 89% aus Sauerstoff, der mit Hilfe der Elektrolyse aus dem H₂O abgespalten werden kann. Nach der Aufspaltung der Moleküle kann der Sauerstoff zum Atmen und der Wasserstoff als Treibstoff oder Energiequelle verwendet werden. Ein Problem der Elektrolyse ist der sehr hohe

⁵⁴ Vgl. Petranek 2015, 57.

⁵⁵ Vgl. Petranek 2015, 57-63.

⁵⁶ Vgl. Petranek 2015, 64.

Energiebedarf.⁵⁷

Mit der für das Jahr 2020 geplanten Nachfolgemission des Curiosity Rovers will die NASA eine Brennstoffzelle zum Mars transportieren, die das Kohlenstoffdioxid der Marsatmosphäre in Sauerstoff und Kohlenmonoxid aufspalten kann. Mit dem Gerät, genannt MOXIE (Mars Oxygen In-Situ Resources Utilization Experiment), will die NASA nicht nur beweisen, dass sie Sauerstoff zum Atmen vor Ort herstellen kann, sondern auch, dass sie auf dem Mars einen Raketentreibstoff für den Rückflug zur Erde erzeugen kann. Dadurch würde man sich eine große Menge an Gewicht beim Hinflug sparen.⁵⁸

Das MOXIE Modul der kommenden Mars Mission wird Berechnungen zufolge etwa 15 Liter Sauerstoff pro Stunde produzieren können. Das würde gerade reichen für einen nicht sehr aktiven Astronauten. Das Modul ist jedoch nur ein Modell im Maßstab 1:100, ein Experiment. Sollte sich die Funktion als einwandfrei ergeben, plant die NASA das Gerät in 100-facher Vergrößerung auf dem Mars zu errichten. Als Energiequelle für eine solch große Maschine müsste dann allerdings ein Kernreaktor dienen.

„Wir planen, zunächst eine Roboterstation einzurichten, in der sich der Kernreaktor und die Sauerstoffanlage befinden. Wenn wir dann mit Sicherheit wissen, dass der O₂ Tank gefüllt ist und der Reaktor funktioniert, werden wir 26 Monate später den Menschen entsenden.“⁵⁹ – Dr. Michael Hecht, Forschungsleiter der NASA für das MOXIE-Projekt

2.1.3 Nahrungsmittelherstellung

Da eine Tierzucht auf dem Mars viel zu ineffizient ist, werden die ersten Menschen auf dem Mars auf die Nahrungsmittelproduktion der Agrarwirtschaft angewiesen sein und sich somit vegetarisch ernähren. Es können natürlich Lebensmittel von der Erde mitgebracht werden, jedoch ist jeder Platz, den man im Raumschiff spart Gold wert, da jedes zusätzliche Kilo Ladung die Investitionssumme einer solchen Mission weiter in die Höhe schießen lässt. Das Konzept eines Gewächshauses kann hier durchaus funktionieren. Die Temperaturen am Tag sind in Äquatornähe ausreichend hoch, um eine Vegetation zu begünstigen. Um die Temperatur im

⁵⁷ Vgl. Petranek 2015, 64f.

⁵⁸ Vgl. Petranek 2015, 65f.

⁵⁹ Michael Hecht, zit. n. Petranek 2015, 66.

Gewächshaus auch in der Nacht aufrecht zu erhalten, muss dieses mittels elektrischer Energie beheizt werden. Die Atmosphäre müsste laut Botanikern wesentlich dichter werden, und zwar in etwa ein Zehntel von dem Druck auf der Erde. Zwar weiß man von Experimenten auf der ISS, dass Pflanzen sehr wohl ohne Gravitation gedeihen und wachsen können. Was man nicht weiß ist, welche Auswirkungen die im Vergleich zur Erde nur etwa 38% betragende Gravitation auf die Pflanzen haben könnte.⁶⁰

Die von den vergangenen Marslandern entnommenen Gesteinsproben deuten darauf hin, dass das am Mars vorkommende Regolith einen guten Nährboden für Pflanzen abgibt. In dem Regolith hat man Anteile von Smektit festgestellt, einer Art Ton, der auch bei uns auf der Erde vorkommt und oft in Katzenklos verwendet wird, weil er viel Wasser aufnehmen kann. Dieses Smektit eignet sich hervorragend für den Anbau von Pflanzen.⁶¹ Der Künstler und Biologe Angelo Vermeulen hat monatelang in einer simulierten Marsumgebung gelebt und hält das Konzept eines Gewächshauses für umstritten:

„Persönlich bin ich nicht davon überzeugt, dass Gewächshäuser funktionieren werden. Es gibt zu wenig Sonnenlicht und zu viel Strahlung.“⁶²

Unter der Voraussetzung, dass Wasser leicht verfügbar und in flüssiger Form speicherbar gemacht werden kann, wäre auch eine Hydrokultur denkbar. Eine Hydrokultur ist ein Pflanzenanbau in nährstoffreichem Wasser ohne Erde.⁶³ Vermeulen sagt weiter:

„Beim Nahrungsmittelanbau auf dem Mars geht es um permanente Kontrolle. Man muss die Umwelt minutiös kontrollieren. Mit einer LED-Beleuchtung lässt sich die Frequenz, das Spektrum und die Intensität des Lichts steuern. Bei der Hydrokultur können Wasser und Nährstoffe engmaschig überwacht werden, damit man eine größere Sicherheit gewinnt, dass die eigene Ernte gut wird.“⁶⁴

⁶⁰ Vgl. Petranek 2015, 67f.

⁶¹ Vgl. Petranek 2015, 68.

⁶² Angelo Vermeulen, zit. n. Petranek 2015, 68.

⁶³ Vgl. Petranek 2015, 68.

⁶⁴ Angelo Vermeulen, zit. n. Petranek 2015, 69.

Die Nutzpflanzen auf dem Mars müssen zum einen nahrhaft sein und zum anderen möglichst platzsparend und effizient sein. Bohnen zum Beispiel weisen einen hohen Protein- und Ballaststoffgehalt auf. Pilze kann man gut auf dem Kompost der unverdaulichen Bestandteile der Pflanzen angebaut werden. Ein Kopfsalat hingegen wäre eher ein Luxusgut, da er viel Platz benötigt und verhältnismäßig wenig Nährstoffe beinhaltet.⁶⁵

Für den Biologen Vermeulen ist die Vorstellung eines Essens aus der Tube undenkbar. In den Köpfen der Menschen ist das die Vorstellung einer Nahrungsaufnahme im Weltall. Doch die Astronauten auf der ISS sehnten sich nach einem Tisch, den man zuvor entfernt hatte. Sie wünschten sich ein Möbel zurück, an dem man gemeinsam essen konnte, einen Bezug zu ihrer Kultur in ihrer Heimat, ein Stück Identität.⁶⁶

Vermeulen glaubt nicht, dass man jemals in der Lage sein wird den Nahrungsmittelbedarf auf dem Mars mit dem Anbau vor Ort zu decken:⁶⁷

„Ehrlich gesagt, wenn wir es schaffen könnten, 10 Prozent unserer Nahrung selbst zu züchten, dann wäre das schon ein schöner Erfolg.“⁶⁸

Der Rest der Nahrung müsste von der Erde importiert werden, da die Gewächsräume und die nötigen Anlagen viel zu teuer sind, sowohl in ihrem Energieverbrauch als auch hinsichtlich ihrer Masse.⁶⁹

2.2 Arbeiten

Die Astronauten verwalten die gesamte Mission vor Ort. Ihnen obliegt die Führung und Organisation aller Vorgehensweisen des gesamten Forschungsteams. Sie sind mit allen Aspekten der Raumfahrt vertraut und sind bestens ausgebildet im Fach der Elektronik. Sie können Ausrüstung herstellen, warten und reparieren und kümmern sich für den reibungslosen Ablauf auf der Forschungsstation auf dem Mars. Die Astronauten sind außerdem zuständig für die Erkundung der Umgebung und die Außenmissionen.⁷⁰

⁶⁵ Vgl. Angelo Vermeulen, zit. n. Petranek 2015, 69f.

⁶⁶ Vgl. Angelo Vermeulen, zit. n. Petranek 2015, 70.

⁶⁷ Vgl. Petranek 2015, 71.

⁶⁸ Angelo Vermeulen, zit. n. Petranek 2015, 71.

⁶⁹ Vgl. Petranek 2015, 71.

⁷⁰ Vgl. Nebel 2018, 138.

Erfahrene Bergleute sind für die Errichtung eines unterirdischen Habitats und für notwendige Gesteinsbohrungen unabdinglich. Sie sind die hohe körperliche Anstrengung gewohnt und kennen die unterschiedlichen Beschaffenheiten von Gesteinsschichten. Sie sind außerdem geschickte Handwerker und wissen um die Gefahr an ihrem Arbeitsplatz, dem Berg.⁷¹

Der Mediziner sollte in erster Linie für Gesundheit auf der Station sorgen. Er sollte im Stande sein, Krankheiten und Verletzungen zu versorgen und im Falle eines schwerwiegenden Vorfalls einen chirurgischen Eingriff vorzunehmen. Außerdem ist er verantwortlich für die Lebensmittelvorräte, Trinkwasserqualität und Luftqualität.⁷²

Der Biologe ist vorrangig für die Erforschung und Suche nach Leben auf dem Planeten zuständig, der Hauptmotivation der Mission. Außerdem unterstützt er den Anbau von Lebensmitteln vor Ort und ist auch im Bereich der Medizin erfahren.⁷³

Ingenieure kümmern sich um die Instandhaltung der elektrischen Geräte, Energiegewinnungsanlagen und Ausrüstungen. Sie halten die Energieversorgung aufrecht und erfüllen auch Aufgaben der Materialherstellung.⁷⁴

Ein Baumeister ist zuständig für die Stollensicherung im Bergbau bis zur Errichtung eines Habitats. Die Erfahrung eines Baumeisters ist von großem Vorteil auf der Mars-Mission.⁷⁵

Das Wissen eines Astronauten umfasst im besten Fall nicht nur ein einziges, spezielles Fachgebiet, sondern gleich mehrere. Einige Disziplinen lassen sich gut vereinen, wie zum Beispiel die Medizin und die Biologie. Es ist also sinnvoller weniger Forscher auf den Mars zu schicken, die eine Vielzahl von Aufgaben erfüllen können, als für jede Teildisziplin einen eigenen Fachmann an Bord zu haben. Die Zahl der Besatzungsmitglieder sollte nach dem Leitsatz -so viel wie notwendig, so wenig wie möglich- bestimmt werden, da dies ressourcenschonender ist. Zudem sollte jeder der Forscher über ein grundlegendes Wissen über die technische Ausrüstung und die medizinischen Versorgungen verfügen.

⁷¹ Vgl. Nebel 2018, 137.

⁷² Vgl. Nebel 2018, 138.

⁷³ Vgl. Nebel 2018, 138.

⁷⁴ Vgl. Nebel 2018, 139.

⁷⁵ Vgl. Nebel 2018, 139.

2.3 Energie

2.3.1 Energiebedarf

Um auf dem Mars forschen und leben zu können braucht man jede Menge Energie. Zum Bauen eines Unterschlupfes, zum Bedienen der technischen Geräte, zur Instandhaltung der Sauerstoffproduktion und natürlich für die Aufrechterhaltung eines für den Menschen behaglichen Raumklimas. Ohne Energie kann eine Mission auf dem Mars nicht stattfinden. Die größten Anteile des Energiebedarfs auf dem Mars fallen dabei auf folgende Bereiche:

Wärmeversorgung

Um in einer Behausung auf dem Mars eine Temperatur zu schaffen, die für den Menschen behaglich ist, ist es notwendig die Räume ausreichend zu beheizen. Die Temperaturen auf dem Mars erreichen auch in Äquatornähe tiefe Temperaturen in der Nacht. Eine dementsprechende Isolierung der Gebäudehülle ist notwendig, um einen zu großen Wärmeverlust zu verhindern.⁷⁶

Mobilität

Da man die exakte Landeposition auf dem Mars nicht genau vorherbestimmen kann, ist man auf Fahrzeuge angewiesen. Angeflogene Ausrüstung oder Versorgungsfrachten müssen mithilfe von Fahrzeugen eingesammelt werden und zum Stützpunkt gebracht werden. Diese Frachten können auf Grund der ungenauen Vorhersage der Landeellipse nicht genau geortet werden und können in mehreren Kilometern Abstand zum Stützpunkt landen.⁷⁷

Elektrische Geräte

Zur Forschung und Steuerung der gesamten Einrichtung sind Computer und elektrische Systeme notwendig. Kommunikationsanlagen, Werkzeuge, Laborgeräte und andere Hilfsmittel sind für die Erforschung und für das Leben unumgänglich.⁷⁸

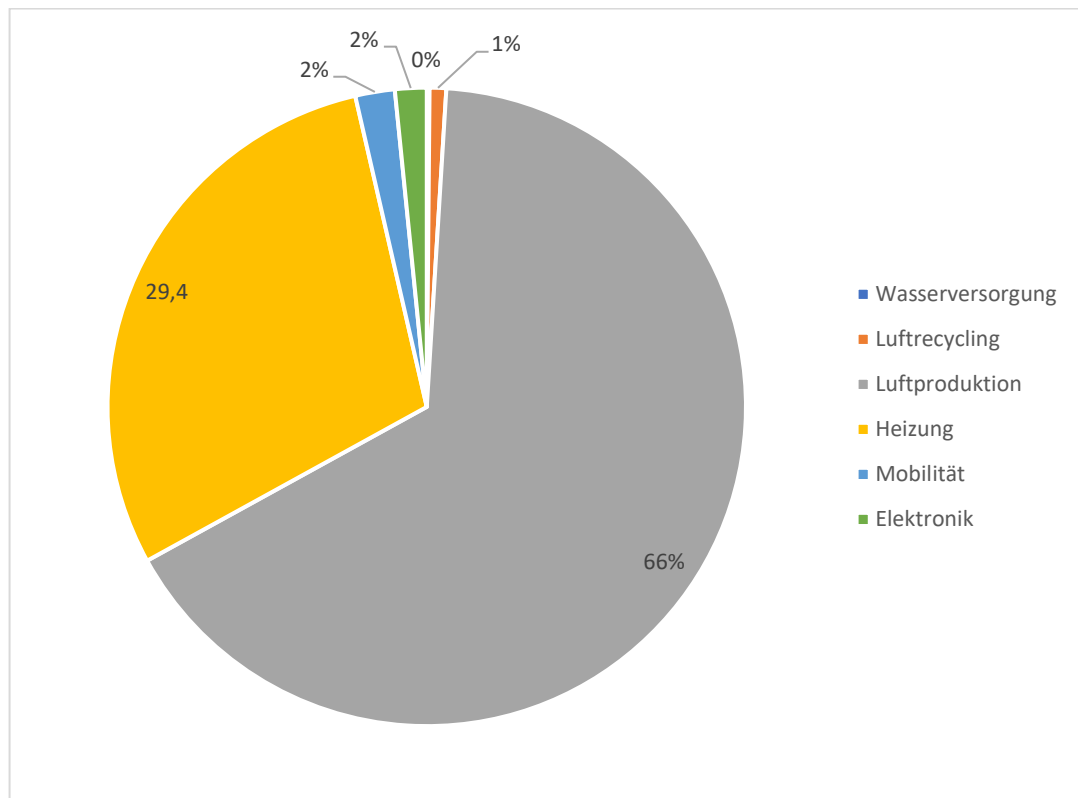
⁷⁶ Vgl. Nebel 2018, 86.

⁷⁷ Vgl. Nebel 2018, 87.

⁷⁸ Vgl. Nebel 2018, 87.

Atemluftproduktion

Der größte Energieverbraucher ist die Produktion von Atemluft. Für den Menschen atembare Luft kann entweder durch einen CO₂ Prozessor hergestellt werden oder durch einen Atmosphärenprozessor. Der CO₂ Prozessor ist ein vergleichsweise kleines Gerät, das unter anderem auf der ISS zum Einsatz kommt. Das Gerät bereitet verbrauchte Atemluft wieder auf, indem es durch Elektrolyse CO₂ in Kohlenstoff und Sauerstoff aufspaltet. Bei dem Atmosphärenprozessor wird die Marsluft in 4 Schritten verdichtet und komprimiert. Danach wird das CO₂ in der Luft ausgefroren bei ca. -38°C, das Gas wird flüssig. Genau wie bei dem CO₂ Prozessor wird auch hier in Folge einer Elektrolyse Kohlenstoff und Sauerstoff abgespalten.⁷⁹



Energiebedarf auf dem Mars⁸⁰

⁷⁹ Vgl. Nebel 2018, 83-88.

⁸⁰ Vgl. Nebel 2018, 88.

2.3.2 Energieherstellung

Solarenergie

Photovoltaikanlagen erzeugen elektrischen Strom aus einfallendem Sonnenlicht. Die Anlagen haben eine lange Lebensdauer, sind nicht auf Brennstoffe angewiesen und erzeugen keine umwelt- oder gesundheitsschädlichen Nebenprodukte. Viele Rover auf dem Mars wurden mit dieser Technologie angetrieben. Das Problem bei den Solaranlagen ist, dass, wie auch auf der Erde, kein kontinuierlicher Stromfluss gegeben ist. Aufgrund von Tag und Nacht sowie der unterschiedlichen Jahreszeiten ist eine Sonneneinstrahlung nicht durchgehend möglich. Außerdem sorgen die auftretenden Sandstürme für weitere Minimierung der Einstrahlung.⁸¹

Windenergie

Während in einer Sturmsaison auf dem Mars die Photovoltaikanlage nicht effizient ist, wäre in diesem Zeitraum eine Verwendung von Windkraftwerken denkbar. Die Stürme können bis zu 400km/h schnell werden und das Kraftwerk ausreichend antreiben. Außerhalb der Saison kann man jedoch mit keiner Energieproduktion rechnen, da durch die dünne Atmosphäre nahezu kein Wind weht. Eine Kombination aus Solar- und Windanlagen ist somit denkbar. Eine reine Solarzellenanlage würde im Vergleich mit der Hybrid-Version viel mehr Platz erfordern, was die Hybrid-Version technisch gesehen besser umsetzbar macht.⁸²

Thermionischer Kernreaktor

Ein thermionischer Kernreaktor kann Wärme in elektrischen Strom umwandeln. Bereits zur Zeit der Sowjetunion kamen solche Reaktoren bei Erdbeobachtungssatelliten zum Einsatz. Das TOPAZ II Modell wurde in den 1990er Jahren auf seine Gebrauchstauglichkeit untersucht und die Ergebnisse bestätigten eine Eignung als Reaktor auch auf dem roten Planeten.⁸³

Als Brennstoff für den Kernreaktor wird hochreines Uranoxid verwendet und man erreicht damit eine thermische Leistung von 110 kW, von denen bis zu 7 kW mit Hilfe des thermionischen Effektes in elektrische Energie umgewandelt werden können. Abhängig von der Höhe des tatsächlichen Energiebedarfes auf dem Mars kann

⁸¹ Vgl. Nebel 2018, 88f.

⁸² Vgl. Nebel 2018, 90f.

⁸³ Vgl. Nebel 2018, 91.

der thermoionische Kernreaktor durchaus, zumindest temporär, als Versorgungsquelle eingesetzt werden. Die Maschine wiegt in ihrem ursprünglichen Design 1061 Kilogramm, ist nur 92cm hoch und 41cm breit.⁸⁴

Thermoelektrische Radionuklidbatterie

Anders als beim Kernreaktor wird die durch die Radionuklidbatterie verwendete Energie nicht aus der Kernspaltung gewonnen, sondern durch die Energie, die beim Kernzerfall freigesetzt wird. Radionuklidbatterien auf Basis von Plutonium-238 sind schon seit langem in der Raumfahrt im Einsatz. Fast alle Sonden, die ins äußere Sonnensystem geschickt werden, arbeiten mit der Kernzerfalls-Energie. Auch die MSL Curiosity arbeitete mit einer Plutonium-238 Radionuklidbatterie. Eine Versorgung einer Forschungsstation auf dem Mars durch diese Energie ist theoretisch möglich und mit ihren 270 Kilogramm ist diese Batterie im Vergleich zum Kernreaktor erheblich leichter. Die Lebensdauer einer solchen Batterie wird auf mindestens 14 Jahre gerechnet, womit sie auch für eine längere Missionszeit geeignet wäre. Der einzige Nachteil ist, dass es von dem benötigten Plutonium nur mehr wenig auf der Erde gibt. Bis 1988 stellten die USA den Rohstoff selbst her, 1993 musste das Material bereits von Russland importiert werden. Doch auch die russischen Reserven gehen zu Ende.⁸⁵

Kilopower by NASA

Kilopower ist ein von der NASA entwickelter Atomreaktor im kleinen Format. Gemeinsam mit dem Los Alamos National Laboratory und dem Energieministerium haben die Forscher der NASA bereits 2018 einen Prototyp entwickelt und erfolgreich getestet. Ein Atomreaktor wäre insofern vorteilhaft, weil man sich den aufwendigen und teuren Transport von Treibstoff von der Erde sparen würde. Die Anlage wurde in mehreren Ausführungen geplant, die eine Leistung von einem bis zu zehn Kilowatt erbringen. Mit rund 40 Kilowatt sollte sich ein kleines, bescheidenes Marshabitat betreiben lassen.⁸⁶ Ein Sprecher der NASA äußerte sich bei einer Pressekonzferenz folgendermaßen:

⁸⁴ Vgl. Nebel 2018, 92f.

⁸⁵ Vgl. Nebel 2018, 94f.

⁸⁶ Vgl. McClure, Poston: How a small nuclear reactor could power a colony on mars or beyond (op-ed), 18.01.2018, <https://www.space.com/39413-small-nuclear-reactor-kilopower-mars-colony.html>, 27.03.2020.

"Die kompakte Bauweise und die Robustheit erlauben uns, einige dieser Reaktoren mit einer Landefähre auf der Oberfläche abzusetzen und so zweistellige Kilowattkapazitäten zu installieren" ⁸⁷

Das Team der NASA geht davon aus, dass das miniaturisierte Kraftwerk bis 2022 voll funktionsfähig sein wird und bereit wäre für einen Testflug. Diese völlig neu interpretierte Version eines Thermo-Reaktors könnte schon in naher Zukunft eine neue Ära der Weltraumforschung einleiten. ⁸⁸

3 BAUEN AUF DEM MARS

Für den Bau eines Habitats bieten sich grundsätzlich 3 Möglichkeiten an:

- 1) Eine unterirdische Anlage, gebaut und gegraben in metertiefem Regolith, das die Astronauten vor der kosmischen und solaren Strahlung schützt.
- 2) Aufblasbare Anlagen
- 3) Mittelweg zwischen aufblasbaren und fest verbauten Anlagen

Aufblasbare Habitate sind im Gegensatz zu unterirdischen Anlagen schnell errichtet und in finanzieller Hinsicht wesentlich günstiger. Unterirdische Anlagen sind auf Grund ihrer Schutzwirkung auf lange Sicht gesehen unabdinglich, jedoch braucht man schwere Geräte, genügend Rohstoffe vor Ort, ein hohes Maß an Energie und viel mehr Zeit, um diese zu errichten. Die einfach zu transportierenden aufblasbaren Anlagen könnten mit zusätzlichen Zeltstangen verstärkt werden, was den Vorteil hätte, dass das Grundgerüst im Falle eines Druckabfalls beständig bleibt. ⁸⁹

Die Atmosphäre des roten Planeten ist zwar undurchlässig genug gegenüber der einfachen Sonnenstrahlung, jedoch bietet sie keinen Schutz vor der aggressiven kosmischen Strahlung oder der Strahlung, die im Falle einer Sonneneruption auftritt. Um dauerhaften Schutz zu garantieren müssen sich die Menschen tief in den Regolith- und Gesteinsboden bohren. Die Unterkünfte der Menschen auf dem Mars müssen unter einer

⁸⁷ o.V. zit.n.: Strom für den Mars. NASA testet Mini-Atomreaktor, 21.01.2018, <https://futurezone.at/science/strom-fuer-den-mars-nasa-testet-mini-atomreaktor/307.618.089>, 27.03.2020.

⁸⁸ Vgl. Nardi: Kilopower. NASA's offworld nuclear reactor, 28.08.2019, <https://hackaday.com/2019/08/28/kilopower-nasas-offworld-nuclear-reactor/>, 27.03.2020.

⁸⁹ Vgl. Mamczak 2015, 78.

meterdicken Gesteinsschicht vergraben sein, um gegen die bedrohliche Strahlung abgeschirmt zu sein.⁹⁰

Der US-amerikanische Raumfahrt-Ingenieur Robert Zubrin sprach sich schon 1990 mit seiner geplanten Mission Mars Direct für einen bemannten Flug zu dem Planeten aus. Über die Jahre hinweg wurden seine Pläne immer konkreter und er sah für die Behausung der Astronauten vor Ort gewölbte Decken vor, nach dem Vorbild der Römer. Er ist der Meinung, dass eine Reihe von nebeneinanderstehenden Gewölben sowohl Schutz vor der eisigen Kälte als auch vor der Strahlung bietet. Gefertigt werden sollen diese Gewölbe mit vor Ort hergestellten Ziegeln aus Regolith.⁹¹

Die Abschirmung gegen die hochenergetische Strahlung ist kompliziert und wird mit hohem Ressourceneinsatz erforscht. Sicher ist, dass hohe Dichte und große Dicke der Abschirmung nicht unbedingt besser bedeutet. Partikel, die auf ein Metallschild treffen, können Sekundärpartikel erzeugen, die oft noch schädlicher sein können.⁹² Es gilt grundsätzlich:

„[...] je leichter ein Atomkern eines Materials ist, desto besser ist der Schutz“⁹³

Wasser und Polyethylen haben sich bei Tests besser bewährt als zum Beispiel Aluminium. Wasserstoffreiche Materialien gelten grundsätzlich als sehr vielversprechend.⁹⁴

3.1 Standortkandidaten

Nicht jeder Standort auf dem Mars eignet sich für eine Landung und den Aufbau einer Behausung. Mehrere Kriterien und Faktoren sind maßgebend für die

⁹⁰ Vgl. Petranek 2015, 72f.

⁹¹ Vgl. Petranek 2015, 73.

⁹² Vgl. o.V.: ESA untersucht, ob sich Mars- oder Mondgestein für den Schutz von Astronauten vor Weltraumstrahlung eignet, 21.09.2012 in: European Space Agency, https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/ESA_untersucht_ob_sich_Mars-_oder_Mondgestein_fuer_den_Schutz_von_Astronauten_vor_Weltraumstrahlung_eignet, 04.04.2020.

⁹³ Alessandra Menicucci, zit.n. o.V.: ESA untersucht, ob sich Mars- oder Mondgestein für den Schutz von Astronauten vor Weltraumstrahlung eignet, 21.09.2012 in: European Space Agency, https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/ESA_untersucht_ob_sich_Mars-_oder_Mondgestein_fuer_den_Schutz_von_Astronauten_vor_Weltraumstrahlung_eignet, 04.04.2020.

⁹⁴ Vgl. o.V.: ESA untersucht, ob sich Mars- oder Mondgestein für den Schutz von Astronauten vor Weltraumstrahlung eignet, 21.09.2012 in: European Space Agency, https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/ESA_untersucht_ob_sich_Mars-_oder_Mondgestein_fuer_den_Schutz_von_Astronauten_vor_Weltraumstrahlung_eignet, 04.04.2020.

Bestimmung des genauen Ortes. Zum einen sollte die Topografie der Umgebung nicht zu komplex sein, um eine gewisse Standsicherheit der Landungssphären und Transportraketen sicherzustellen. Die Verfügbarkeit von Wasser in der unmittelbaren Umgebung wird nicht nur für Forschungszwecke wichtig sein, sondern auch für die lebenserhaltenden Maßnahmen der Astronauten. Da Wasser nicht gleichermaßen auf dem Planeten verteilt ist, sollte man den Standort der Forschungsstation dementsprechend anpassen. Die Wahrscheinlichkeit Wasser zu finden steigt prinzipiell nach Norden gehend an, während sie auf der Südhalbkugel bei nahezu bei null liegt.⁹⁵

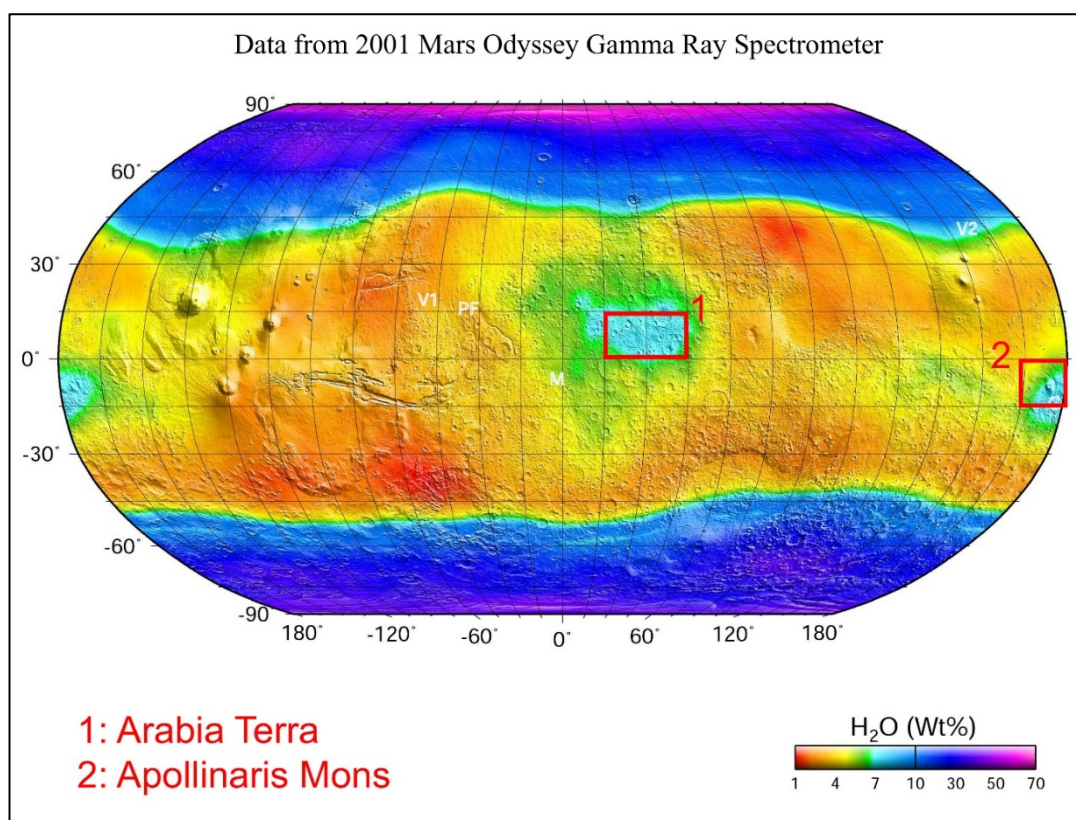


Abb.7: Wasserkarte Mars

Polarregion: Korolev Krater

Der 79 Kilometer breite Krater, der nach dem russischen Raketeningenieur Sergej Pavlovich Korolev benannt wurde, liegt in der nördlichen Tiefebene und bildet eines der sichersten Wasserreservoirs auf dem Planeten. Der Krater wird von bis zu 1300 Meter hohen Wänden umfasst, die den innen liegenden Gletscher

⁹⁵ Vgl. Nebel 2018, 143.

umschließen. Der tiefste Punkt des Gletschers liegt bei etwa 6,2 Kilometer unterhalb des definierten Nullniveaus des Planeten. Der Ursprung des Wassereises, das den Krater bedeckt, ist noch nicht bekannt. Die Menge des gefrorenen Wassers wird auf 2500 km³ geschätzt, eine Menge, die den Wasserverbrauch der Republik Deutschland für 20.000 Jahre decken würde.

Ein erheblicher Nachteil der nördlichen Lage des Kraters ist die geringe Intensität der Sonne. Im Marswinter wird das Sonnenlicht an diesem Standort nicht ausreichen, um eine Forschungsstation mit ausreichend Energie und Wärme zu versorgen. Auf Höhe des Polarkreises ist mit Tagestiefsttemperaturen von bis zu minus 90°C zu rechnen.

Ein weiterer Nachteil ist, dass durch zunehmende Nähe zu einem der Pole ein Raketenstart massiv erschwert wird, da an den Polregionen weniger Energie aus der Planetenrotation auf das Startgerät der Rakete übertragen werden kann. Das ist auch der Grund, warum die meisten Raketen auf der Erde in Äquatornähe gestartet werden.⁹⁶

Äquatorregion: Arabia Terra

Auf der Wasserkarte des Mars, lässt sich eine Region auf dem Äquator erkennen, auf der der Wasseranteil auf bis zu 6,5% berechnet wird. Aus einer Tonne Marsboden könnte man demnach 65 Kilogramm Wasser gewinnen. In besagter Region, der Arabia Terra, gibt es zudem ein Restmagnetfeld, das einen positiven Einfluss auf die Abschirmung der gefährlichen Strahlung haben könnte. Es wird außerdem vermutet, dass der Ursprung des in der Atmosphäre enthaltenen Methans hier liegt. Mehrere Krater in dieser Region kommen hier für einen Standort eines Habitats in Frage, da sie alle ein gewisses Maß an Restmagnetismus und teilweise steile Felswände haben, die vor Strahlung abschirmen und vor Stürmen schützen. Zusätzlich könnte das Methan von großem Nutzen für die Astronauten sein, sollte sich die Quelle tatsächlich in dieser Region befinden.⁹⁷

⁹⁶ Vgl. Nebel 2018, 143-145.

⁹⁷ Vgl. Nebel 2018, 145-151.

Äquatorregion: Apollinaris Region

Die wasserreichste Region außerhalb des Nordpols ist die Apollinaris, vom griechischen „dem Apollo geweiht“. Der dort liegende Vulkan, der Dominante Apollinaris Mons, ist 5000 Meter hoch und misst 300 Kilometer Durchmesser an seiner Basis. Er gilt als schon seit langer Zeit erloschener Vulkan und die Messungen der Mars Odyssey Mission schätzen den Wassergehalt im Boden auf bis zu 8%. Satellitenmessungen deuten auf eine restliche Magnetfeldstärke hin, die dem Wert in der Region Arabia Terra sehr nahe kommt. Der Vulkan selbst eignet sich aufgrund seiner Höhe nicht für eine Landung, jedoch schließen am Fuß des Berges tiefer liegende Regionen an, die für eine Landung sehr wohl im Bereich des Möglichen liegen. Das Gestein selbst ist vulkanischen Ursprungs, welches erfahrungsgemäß mit hoher Tragfähigkeit und Stabilität verbunden ist. Dies würde den Bau von unterirdischen Höhlen begünstigen. Es besteht außerdem die Möglichkeit vorkommende Lavaröhren zu finden. Diese Lavaröhren sind typisch für Schildvulkane und man hat solche auch auf der Erde gefunden. Die Lavaröhren bieten einen natürlichen Schutz vor der kosmischen Strahlung und müssten nicht erst aufwendig vom Menschen in den Berg gebohrt werden.⁹⁸

Während der Korolev Krater also klare Vorteile hat, was die nahezu unbegrenzten Wasservorräte betrifft, machen ihn die tiefen Temperaturen und der geringe Sonnenertrag eher unbehaglich für eine lange Mission. Zur Energiegewinnung gibt es hier wenige Möglichkeiten und die Verwendung eines Kernreaktors wird hier unumgänglich sein. Eine Überbrückung des Marswinters mit Batterien oder Solarzellen wird in diesem Fall nicht kosteneffizient realisierbar sein.⁹⁹

Die Apollinaris Region profitiert von ausreichenden Wasservorräten, Restmagnetismus und stabilem Marsgestein. Die gemäßigten Temperaturen am Äquator ermöglichen eine Landwirtschaft in geeigneten Gewächshäusern und die intensivere Sonneneinstrahlung ermöglicht zudem eine Energieversorgung durch Solarzellen.¹⁰⁰

⁹⁸ Vgl. Nebel 2018, 152-154.

⁹⁹ Vgl. Nebel 2018, 156.

¹⁰⁰ Vgl. Nebel 2018, 163-165.

3.2 Materialien / Baustoffe

Schwefelbeton

Eine Möglichkeit um auf dem Mars stabile, dauerhafte und beständige Gebäude zu errichten wäre die Verwendung eines speziellen Betons. Der Transport des schweren Betons von der Erde zum Mars wäre aufgrund der hohen Masse und der damit verbundenen finanziellen Mehrbelastung ein zu hoher Aufwand und alles andere als wirtschaftlich. Anders als hier auf der Erde kann der speziell entwickelte Beton bei der Herstellung auf dem Mars auf Wasser verzichten. Man verwendet auf dem roten Planeten vorhandenes Erdmaterial und vermischt dieses mit flüssigem Schwefel. Der Schwefel wird auf 240°C erhitzt, das ist mehr als sein zweifacher Schmelzpunkt, und geht in den flüssigen Aggregatzustand über. Wird der Schwefel dann mit der Erde des Mars vermischt, verbinden sich die beiden Stoffe und es bildet sich ein harter, steinartiger Baustoff, der Schwefelbeton. Nach zahlreichen Experimenten ermittelten die Forscher das beste Mischungsverhältnis für den Beton: 50% Schwefel und 50% Mars-Erde, wobei die einzelnen Partikel nicht größer als 1mm sein sollten. Der Schwefelbeton ist deutlich stabiler als herkömmlich hergestellter Beton auf der Erde. Des Weiteren kann der Beton unter Zuführung von Hitze wieder geschmolzen und wiederverwertet werden.¹⁰¹

Aerogel

Aerogel ist ein hochporöser Festkörper aus amorphem Siliciumoxid. Er besteht zu 99,8% aus luftgefüllten Poren und ist dadurch extrem leicht. Ein Liter dieses Materials wiegt nur 70 bis 100 Gramm, also nur rund ein Zehntel des Gewichts von Wasser. Das Aerogel ist zudem einer der effizientesten Dämmstoffe überhaupt.¹⁰² Das Aerogel ist für sichtbares Licht durchlässig, blockiert jedoch jegliche UV-Strahlung. Eine Anwendung für ein Gewächshaus wäre demnach gut vorstellbar. Die Pflanzen werden ausreichend mit Licht versorgt und die UV-Strahlen können keinen Schaden an der Vegetation anrichten. Wärme kann aufgrund ihres guten Dämmwertes nur schlecht nach außen entweichen. Forscher der Harvard University haben die isolierenden Eigenschaften des Aerogels getestet, indem sie eine

¹⁰¹ Vgl. o.V.: Materials Scientists Make Martian Concrete, 05.01.2016, <https://www.technologyreview.com/s/545216/materials-scientists-make-martian-concrete/>, 04.03.20.

¹⁰² Vgl. o.V.: Aerogel – Der Hochleistungswärmedämmstoff, <https://www.agitec.ch/page/aerogel/index.php>, 06.05.2020.

zwei cm dicke Schicht des Stoffes unter einer Lampe platzierten. Die Lampe simulierte das Sonnenlicht auf dem Mars und erwärmte die darunter liegende Oberfläche auf 65°C, eine Temperatur, die ausreichen würde, das Eis auf dem Planeten zu schmelzen.¹⁰³

Ziegelstein

Im Fachmagazin „Scientific Reports“ veröffentlichte das Team rund um Yu Qiao von der University of California in San Diego die Ergebnisse eines neuen Baumaterials für den Mars. Dem Team gelang es einen eisenoxidhaltigen Boden, ähnlich der Zusammensetzung auf dem roten Planeten, unter Einwirkung von hohem Druck zu einem tragfähigen Material zu verdichten. Die Eisenoxid-Partikel verhalten sich laut Qiao wie ein Kleber, der das Material zusammenhält. Die gefertigten Ziegelsteine können sogar fester werden als Beton.¹⁰⁴

Außerdem kann die Biegefestigkeit des komprimierten Steins durch den Verdichtungsdruck beeinflusst werden.¹⁰⁵

Nicht nur, dass man nur vor Ort auffindbares Material verwenden kann, begünstigt die Verwendung dieses Baustoffes, sondern auch der verhältnismäßig geringe Energieaufwand, da nicht mal Wärme für den Prozess notwendig wäre und jede Energieeinsparung auf dem Planeten anzustreben ist.¹⁰⁶

Sonnenziegel & Bioziegel

Forscher des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt haben einen speziellen Stein hergestellt, der lediglich aus Vulkanasche besteht. Unter der Hitze des konzentrierten Sonnenlichtes bringen sie die Asche zum Schmelzen, und gießen sie zu Ziegelsteinen. Laut den Forschern ist die Vulkanasche dem Regolith auf dem Mars sehr ähnlich und deshalb wäre die Fertigung vor Ort selbstverständlich möglich. Ingenieure der Harvard University in Kalifornien und die NASA nehmen sich Schneckenhäuser und Muschelschalen als Vorbild für ihren neu entwickelten

¹⁰³ Vgl. Pluta: Forscher testen Aerogel als Baumaterial für Mars-Gewächshaus, 17.07.2019, <https://www.golem.de/news/raumfahrt-forscher-testen-aerogel-als-baumaterial-fuer-mars-gewaechshaus-1907-142593.html>, 05.03.2020.

¹⁰⁴ Vgl. o.V.: So bauen wir Städte auf dem Mars, 23.02.2018 in: Mitteldeutscher Rundfunk, <https://www.mdr.de/wissen/staedte-auf-dem-mars-100.html>, 23.03.2020.

¹⁰⁵ Vgl. Yu Qiao: Direct Formation of Structural Components Using a Martian Soil Simulant, 27.04.2017 in: Scientific Reports, <https://www.nature.com/articles/s41598-017-01157-w>, 23.03.2020.

¹⁰⁶ Vgl. o.V.: So bauen wir Städte auf dem Mars, 23.02.2018 in: Mitteldeutscher Rundfunk, <https://www.mdr.de/wissen/staedte-auf-dem-mars-100.html>, 23.03.2020.

Baustoff. Denn diese Naturprodukte haben ihre hohe Festigkeit speziellen Proteinen zu verdanken. Die amerikanischen Forscher sind sich sicher, dass man die Proteine als wirksamen Ersatz von Zement verwenden kann. US-Forscher haben bereits einen erfolgreichen Versuch mit einem Protein gestartet, das sie im Blut von Rindern fanden. Vermischt man das Blut mit Regolith und bringt es in eine Form, so entsteht mit der Aushärtung ein Stein, der der Festigkeit eines Betonklotzes nahekommt. Die benötigten Proteine könnten in einem vor Ort situierten Bioreaktor von Bakterien erzeugt werden.¹⁰⁷

Sowohl der Sonnenziegel als auch der Bioziegel sind zwei wirksame Möglichkeiten Baustoffe vor Ort herzustellen und die Transportmengen von der Erde drastisch zu reduzieren. Ein weiterer Pluspunkt wäre, dass es sich bei beiden Baustoffen um reine Naturprodukte handelt. Somit würde es der Umwelt auf dem Mars nicht schaden und man würde keinen Abfall hinterlassen. Aufgrund dieser Tatsache sind die Baustoffe nicht nur für den Mars geeignet, sondern auch auf der Erde denkbar.¹⁰⁸

Urin-Beton

Im Rahmen der von der NASA geplanten Mond-Mission, die in naher Zukunft starten soll, hat ein internationales Forschungsteam der ESA einen Baustoff entwickelt, der dabei helfen soll, eine Station auf dem Mond zu errichten. Um so wenig Materialien wie möglich von der Erde mitzunehmen, haben die Forscher daran gearbeitet eine Art Beton aus dem Mondgestein zu entwickeln. Ähnlich wie auf dem Mars gibt es auch dort reichlich Regolith, das gemeinsam mit menschlichem Harnstoff dabei hilft den Beton formbar zu machen ehe dieser aushärtet. Dafür muss dieser zunächst auf 80°C erhitzt werden und wird in Folge der niedrigen Temperaturen auf dem Mond eingefroren. Die Ergebnisse hinsichtlich der Tragkraft des Baustoffes waren zufriedenstellend und zeigten, dass der Beton stark genug ist, um große Lasten zu tragen. Die Co-Autorin der Studie, Anna-Lena Kjøniksen äußerte sich dazu in einem Statement¹⁰⁹:

¹⁰⁷ Vgl. o.V.: Proteine aus dem Bioreaktor: Baustoff aus Rinderblut für Häuser auf dem Mars, 10.05.2017 in: ingenieur.de, <https://www.ingenieur.de/technik/forschung/baustoff-rinderblut-fuer-haeuser-mars/>, 23.03.2020.

¹⁰⁸ Vgl. o.V.: Proteine aus dem Bioreaktor: Baustoff aus Rinderblut für Häuser auf dem Mars, 10.05.2017 in: ingenieur.de, <https://www.ingenieur.de/technik/forschung/baustoff-rinderblut-fuer-haeuser-mars/>, 23.03.2020.

¹⁰⁹ Vgl. o.V.: Astronauten könnten Mondbasis mit Hilfe von Urin bauen, 31.03.2020, <https://futurezone.at/science/astronauten-koennten-mondbasis-mithilfe-von-urin-bauen/400798538>, 31.03.2020.

„Das Wasser im Urin könnte zusammen mit dem, was auf dem Mond gefunden werden kann, für das Gemisch genutzt werden.“¹¹⁰

Ob sich das Material eignet, um mit einem 3D Drucker verarbeitet zu werden, wird zurzeit noch geprüft.¹¹¹

Blei

Blei bietet als einzig bekanntes Material einen wirksamen Schutz gegen Gamma-Strahlung. Während Alpha- und Betastrahlung durch vergleichsweise wenig Aufwand abschirmbar ist, durchdringt die Gammastrahlung jedes Material und kann nicht zu 100% abgemindert werden. Die Reduzierung der Strahlungsintensität wächst mit ansteigender Schichtdicke des Abschirmmaterials. Man kann die Strahlung auf einen Bruchteil minimieren, aber nicht zur Gänze auslöschen. Wolfram und Uran erzielen zwar bei der Schwächung der Gammastrahlen bessere Ergebnisse, sind aber aufgrund ihrer geringen Verfügbarkeit und der hohen Kosten, die damit verbunden sind, nicht wirtschaftlich.¹¹²

Man kann auch andere, schwere Materialien für die Abschirmung verwenden. Der Bleigleichwert gibt hier die Schichtdicke eines Stoffes in Millimetern an, die für die gleiche Schwächung von Strahlung notwendig ist, wie eine Schicht aus 1 Millimeter Blei.¹¹³

3.3 Gebäudehülle

Die Fassade des Mars-Habitats muss auf die gegebenen Anforderungen reagieren und eine Vielzahl von Aufgaben erfüllen. Wie auch bei unseren Gebäuden auf der Erde muss die Haut des Habitats wärmedämmend sein. Im Unterschied zu den irdischen Bedingungen sind die Temperaturdifferenzen auf dem Mars wesentlich höher und es wird eine Außentemperatur von bis zu -133°C erreicht.¹¹⁴ Bei dieser Temperatur könnte der menschliche Organismus nicht lange überleben. Ein

110 Anna-Lena Kjøniksen, zit.n: Astronauten könnten Mondbasis mit Hilfe von Urin bauen, 31.03.2020, <https://futurezone.at/science/astronauten-koennten-mondbasis-mithilfe-von-urin-bauen/400798538>, 31.03.2020.

¹¹¹ Vgl. o.V.: Astronauten könnten Mondbasis mit Hilfe von Urin bauen, 31.03.2020, <https://futurezone.at/science/astronauten-koennten-mondbasis-mithilfe-von-urin-bauen/400798538>, 31.03.2020.

¹¹² Vgl. o.V.: Abschirmung von Strahlung, http://www.energiwelten.de/lexikon/lexikon/seiten/htm/020630_Abschirmung_von_Strahlung.htm, 22.04.2020.

¹¹³ Vgl. o.V.: Bleigleichwert, <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/bleigleichwert/1736>, 22.04.2020.

¹¹⁴ Vgl. Nebel 2018, 38.

geschütztes Raumklima, das den irdischen Gegebenheiten ähnelt, muss innerhalb des Habitats geschaffen werden, um die Gesundheit des Menschen nicht zu gefährden. Der Wärmeverlust nach außen sollte auf ein Minimum reduziert werden. Innerhalb des Habitats wird Sauerstoff der Luft zugeführt, um frei atmen zu können. Der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre ist zu gering, um atmen zu können und der Luftdruck von nur 0,006 bar in der Atmosphäre ist für den Lebensraum des Menschen nicht geeignet.¹¹⁵ Die Luft muss innerhalb des Habitats künstlich verdichtet werden, um sich ohne Schutzanzug im Gebäude fortzubewegen und frei atmen zu können. Um den Druckausgleich zwischen innen und außen zu verhindern muss die Gebäudehülle komplett dicht sein. Luft darf nicht nach außen entweichen. Um das Habitat betreten und verlassen zu können muss es an geeigneten Stellen der Gebäudehülle Luftschleusen geben, innerhalb welcher der Druckausgleich erfolgt.

Um gegen die kosmische Strahlung geschützt zu sein, benötigt die Außenwand einen ausreichend groß dimensionierten Querschnitt, der die kosmische Strahlung auf ein Minimum reduziert. Die Strahlenmenge, die ins Innere des Gebäudes durchdringt, darf die Grenzwerte nicht überschreiten, da sonst die Gesundheit der Menschen gefährdet ist.¹¹⁶ Dabei muss auch auf die Verwendung der Materialien geachtet werden. Während Materialien wie Blei sich sehr wirksam gegen die Gamma-Strahlung erwiesen haben, können andere Materialien die Intensität der Strahlen sogar verstärken.¹¹⁷

Um für natürliches Licht innerhalb des Habitats zu sorgen, sind kleine, lichtdurchlässige Öffnungen aus Glas oder Kunststoff denkbar. Es ist jedoch zu beachten, dass diese Öffnungen einen verminderten Schutz gegenüber der kosmischen Strahlung bieten. Es empfiehlt sich die Öffnung an eine der Strahlungsrichtung abgewandten Seite zu positionieren.

¹¹⁵ Vgl. Nebel 2018, 38.

¹¹⁶ Vgl. Nebel 2018, 48-50.

¹¹⁷ Vgl. o.V.: Abschirmung von Strahlung, http://www.energiewelten.de/elexikon/lexikon/seiten/htm/020630_Abschirmung_von_Strahlung.htm, 22.04.2020.

3.4 Bautechnologien

3.4.1 3D Druck

Die neue Technologie rund um den 3D-Druck könnte auch auf fremden Planeten angewendet werden. Das Errichten eines Habitats mit lokalen Rohstoffen, die vom 3D-Drucker verwertet werden können, würde den Astronauten viel Zeit und Kraft ersparen und zudem viel Transportkosten von der Erde. Die Machbarkeit dieser Idee wurde von der ESA in Kooperation mit einigen Industriepartnern und dem Architekturbüro Foster + Partners untersucht.¹¹⁸



Abb.8: Lunar Habitat / Foster + Partners

Zunächst untersuchte man, ob 3D gedruckte Strukturen auf dem Mond möglich werden. Foster + Partners entwickelten dafür eine Kuppelform mit einer zellulär strukturierten Wand, die Schutz vor kleinen Meteoriten und der gefährlichen Strahlung bieten soll. Die Struktur der zellenartig aufgebauten Wand erinnert ein bisschen an den Knochenbau eines Vogels und hat ein gutes Verhältnis von Kraft zu Gewicht.¹¹⁹

¹¹⁸ Vgl. o.V.: Building a lunar base with 3D printing, 31.01.2013, http://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Building_a_lunar_base_with_3D_printing, 08.04.2020.

¹¹⁹ Vgl. o.V.: Building a lunar base with 3D printing, 31.01.2013, http://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Building_a_lunar_base_with_3D_printing, 08.04.2020.

3D-Drucke werden Schicht für Schicht aufgebaut. Der Gründer des 3D Druck Unternehmens Monolite, Enrico Dini erklärt den Vorgang:¹²⁰

“First, we needed to mix the simulated lunar material with magnesium oxide. This turns it into ‘paper’ we can print with [...] Then for our structural ‘ink’ we apply a binding salt which converts material to a stone-like solid. [...] Our current printer builds at a rate of around 2 m per hour, while our next-generation design should attain 3.5 m per hour, completing an entire building in a week.”¹²¹

Der Unternehmer geht also davon aus, dass man mit der nächsten Generation von 3D Druckern 3,5 Meter Material drucken kann und es möglich ist ein ganzes Gebäude innerhalb einer einzigen Woche zu errichten.

Giovanni Cesaretti von dem italienischen Weltraumforschungsunternehmen Alta SpA bestätigt außerdem, dass der Druckprozess im Vakuum des Weltalls stattfinden kann.¹²²

NASA 3D-Druck Habitat Challenge

In einem mehrjährigen und in mehreren Stufen stattfindenden Wettbewerb der NASA sollen nachhaltige Unterkünfte auf dem Mars für Astronauten entwickelt und entworfen werden. Insgesamt elf Teams wurden von einer Jury bewertet. Die Kriterien für den Entwurf waren: Aufbau, Ästhetik, Machbarkeit und Skalierbarkeit. Jedes Team musste außerdem ein detailliertes Computermodell erstellen.

Mars X House V1 / SEArch+

Den ersten Platz erreichte nach dieser Bewertung das in New York ansässige Team von SEArch+. In der ersten Phase des Wettbewerbs entwarf das Team ein Eis-Haus, mit dem sie sich für die nächste Runde qualifizieren konnten. Der neue Vorschlag umfasst einen Lebensraum, der mithilfe von lokalem Marsregolith in Kombination mit Polythylenkunststoff in 3D gedruckt werden kann. Ziel dieser Anlage,

¹²⁰ Vgl. o.V.: Building a lunar base with 3D printing, 31.01.2013, http://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Building_a_lunar_base_with_3D_printing, 08.04.2020.

¹²¹ Enrico Dini, zit.n.: Building a lunar base with 3D printing, 31.01.2013, http://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Building_a_lunar_base_with_3D_printing, 08.04.2020.

¹²² Vgl. o.V.: Building a lunar base with 3D printing, 31.01.2013, http://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Building_a_lunar_base_with_3D_printing, 08.04.2020.

die sie Mars X House nennen, ist es, für eine einjährige Mission auf dem Mars Lebensraum für vier Astronauten zu garantieren. Entscheidende Entwurfsparameter für den Lebensraum wurden mit Spezialisten fachübergreifender Disziplinen abgestimmt.¹²³

"Wir haben uns mit einem Team von über 10 Fachexperten in so unterschiedlichen Bereichen wie Planetengeologie, Robotik, Bauingenieurwesen und Materialwissenschaften beraten, um die wichtigsten Entwurfsentscheidungen unseres Vorschlags zu treffen."¹²⁴ – Melodie Yashar, Mitbegründerin von SEArch+ und Projektleiterin des Mars X House



Abb. 9: Mars X House

Yashar betonte, dass ihr Konzept auf die menschlichen Bedürfnisse in einer fremden, abgeschiedenen Umgebung, verstärkt reagiert und deshalb für ausreichend natürliches Licht sorgt.¹²⁵

„Im Rahmen unseres Vorschlags führen wir einen vertikalen Hydrokulturgarten als Nahrungsquelle und Mittel zur Luftauffüllung ein und stellen für die Besatzung eine direkte Verbindung zur Natur her. Wir haben den Lebensraum so programmiert, dass er Arbeit und Freizeit sowie öffentliche und private Räume voneinander trennt.“¹²⁶ - Melodie Yashar

¹²³ Vgl. Lauren Grace Morris: Want to see life on Mars? Look to SEArch+'s prize-winning habitat concept for NASA, 12.04.2019, <https://www.frameweb.com/news/search-mars-x-house-nasa>, 08.04.2020.

¹²⁴ Melodie Yashar, zit.n.: Want to see life on Mars? Look to SEArch+'s prize-winning habitat concept for NASA, 12.04.2019, <https://www.frameweb.com/news/search-mars-x-house-nasa>, 08.04.2020.

¹²⁵ Vgl. Lauren Grace Morris: Want to see life on Mars? Look to SEArch+'s prize-winning habitat concept for NASA, 12.04.2019, <https://www.frameweb.com/news/search-mars-x-house-nasa>, 08.04.2020.

¹²⁶ Melodie Yashar, zit.n.: Want to see life on Mars? Look to SEArch+'s prize-winning habitat concept for NASA, 12.04.2019, <https://www.frameweb.com/news/search-mars-x-house-nasa>, 08.04.2020.

3.4.2 Tunnelbau

Ein Tunnel zu einer tief liegenden Höhle wäre für eine Mission, die sich über einen längeren Zeitraum streckt, sehr vorteilhaft. Die Höhle bietet, bedeckt von metertiefem Gestein, Schutz vor der kosmischen und solaren Strahlung. Astronauten könnten die Höhle zum Forschen an der Oberfläche temporär verlassen, zumindest für eine Dauer, in der die Strahlendosis die Gesundheit der Menschen nicht lebensbedrohlich gefährdet. Im Falle eines Sonnensturms könnten sich die Astronauten in die Höhle zurückziehen um ausreichend geschützt zu sein.

Der Nachteil des Bergbaus ist der hohe Energieaufwand und die zeitliche Komponente. Mit schwerem Gerät und einem hohen Maß an Energie muss man sich Stück für Stück in den Berg hineingraben, bis man eine Tiefe erreicht hat, in der die Strahlung nicht mehr durchdringen kann. Dieser Prozess ist sehr zeitaufwendig. Zeit, die die Astronauten womöglich nicht haben, wenn sich ein plötzlich auftretender Sonnensturm der Basis nähert. Vorstellbar wäre, einen Tunnel von einem Roboter graben zu lassen, der schon einige Zeit vor der Mission auf dem Mars entsendet wird und selbstständig in den Berg vordringt. Die Instandhaltung der Roboter und Lösung von auftretenden Problemen beim Bergbau muss jedoch in diesem Fall von der Erde aus abgewickelt werden, was ein großes Problem darstellt. Sollte die Kommunikation zum Roboter verloren gehen oder der Roboter beschädigt werden, könnte ein Mensch vor Ort dieses Problem lösen. Von der Erde aus bleiben solche Versuche erfahrungsgemäß eher erfolglos. (Stichwort: Opportunity)

Es besteht die Möglichkeit der Existenz von Lavaröhren auf dem Mars. Lavaröhren sind natürlich entstandene Höhlen innerhalb einer gehärteten Lavaschicht, die typischerweise in der Nähe von Schildvulkanen zu finden sind. Solche Vulkane findet man auf dem Mars in großer Zahl. Eine solche natürliche Höhle wäre für eine Behausung ideal, da hier die kosmische Strahlung abgeschirmt ist und die Höhle nicht erst durch den Menschen mit hohem Arbeitsaufwand aus dem Berg gegraben werden muss.¹²⁷

¹²⁷ Vgl. o.V.: Merkwürdige Marshöhle könnte außerirdisches Leben beherbergen, 06.04.2020, <https://www.derstandard.at/story/2000116585436/merkwuerdige-marshoehle-koennte-ausserirdisches-leben-beherbergen>, 07.05.2020.

3.4.3 Inflatables / Aufblasbare Systeme

Der amerikanische Unternehmer Robert Bigelow gründete seine Firma Bigelow Aerospace mit der Intention eine aufblasbare Struktur für Raumschiffe, Raumstationen und Raumbasen für andere Planeten zu entwickeln. Der Vorteil eines aufblasbaren Raumes wäre die massive Platz- und Treibstoffersparnis. Zusammengefaltet können diese pneumatischen Objekte mit konventionellen Frachtraketen in den Weltraum befördert werden und auf andere Planeten entsendet werden. Vor Ort können diese dann mit Gas auf ihre tatsächliche Größe aufgeblasen werden. Gewöhnliche Raumstationen bestehen immer aus einer Vielzahl von verschiedenen Modulen, die nach und nach ins All geschossen werden. Jeder Raketenstart ist aus finanzieller Sicht gesehen ein Luxus, weshalb aus ökonomischer Sicht eine Platzersparnis durch die aufblasbaren Strukturen erheblich wirtschaftlicher ist. Zudem sind die zahlreichen Verbindungsstücke zwischen den vielen Modulen immer ein Schwachpunkt der Raumstationen. Wenn man diese Schwachpunkte vermeiden kann, würde dies erheblich zur Sicherheit der Astronauten an Bord beitragen. Der Entwurf von der Firma Bigelow enthält viel weniger Einzelteile und Module als herkömmliche Raummodule.¹²⁸

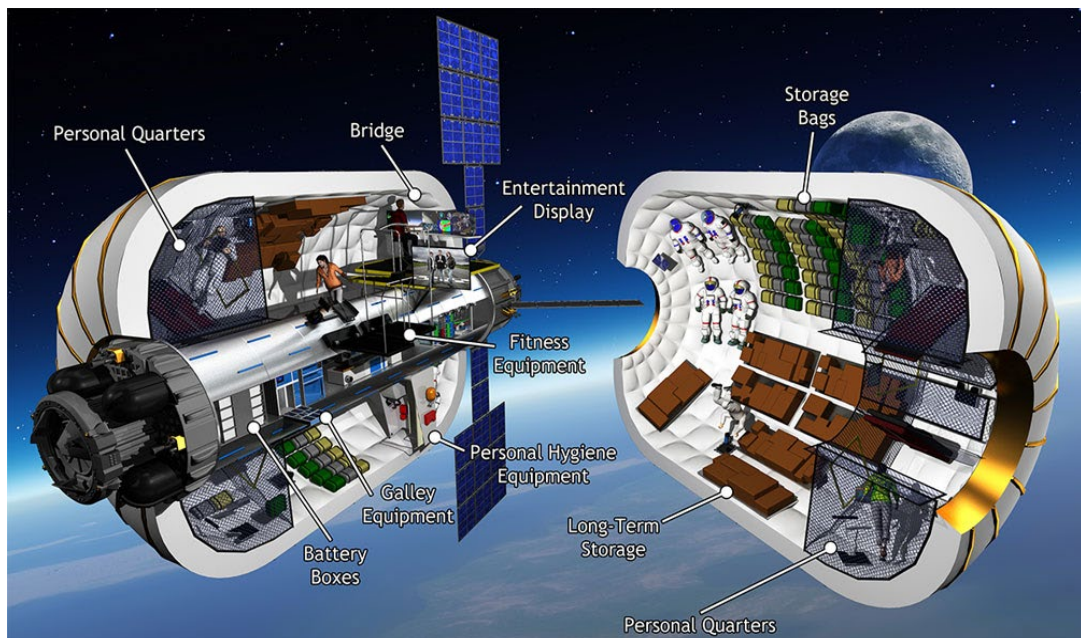


Abb.10: Bigelow B330

¹²⁸ Vgl. o.V.: Eine aufblasbare Raumstation, die zum Mars fliegen soll, 13.09.2019, <https://futurezone.at/science/eine-aufblasbare-raumstation-die-zum-mars-fliegen-soll/400605389>, 07.04.2020.

Der Prototyp B330 hat eine zylindrische Form und schließt ein Volumen von 330 Kubikmetern in sich ein. Im aufgeblasenen Zustand finden darin drei Decks, zwei Kombüsen, zwei Toiletten, ein Frachtraum, Arbeitsstationen und ein Raum für Pflanzenzucht Platz. B330 ist als autarke Raumstation konzipiert und laut dem CEO Robert Bigelow könnten fünf Astronauten mehrere Monate darin leben.¹²⁹

Für Bigelow kann der Prototyp sowohl als Raumstation als auch als Habitat dienen. Er kann sich außerdem vorstellen, dass der B330 ein Teil des Raumschiffes selbst wird, da man auf dem Weg zum Mars viel Platz benötigt.¹³⁰

Gegen die kosmische Strahlung schützen soll ein Verbund aus verschiedenen Ebenen, dessen Wirksamkeit von der NASA noch geprüft wird und auch wie es sich im Vergleich zum Strahlenschutz der ISS verhält.¹³¹

Sollten sich die aufblasbaren Habitate als wirksam gegen die kosmische und solare Strahlung erweisen, wäre eine Verwendung als Habitat auf der Marsoberfläche grundsätzlich denkbar. Wenn der Strahlenschutz nicht ausreicht, könnte man die aufblasbaren Räume zusätzlich mit Regolith bedecken, sodass diese eine Art Höhle innerhalb einer Gesteinsschicht aufspannt.

3.4.4 Solitäre / Modulbauweise

Marsha – Mars Habitat der AI SpaceFactory

Die effiziente Erforschung des Mars und das Errichten eines Habitats steht in direktem Verhältnis zu den auf dem Mars zur Verfügung stehenden Materialien, die sich für eine bauliche Struktur eignen. Denn nur die Verwendung der vor Ort befindlichen Ressourcen macht eine Forschungsstation aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll. Zu hoch sind die Kosten für den Raketentreibstoff, um sämtliche Materialien von der Erde zu importieren. Pro 10 Pfund Gewicht auf der Rakete wird etwa 90 Pfund mehr Treibstoff benötigt. Eine Gleichung die die Sinnhaftigkeit der Ressourcennutzung vor Ort bestätigt. Mit Hilfe von Maschinen, die von Raumfahrtagenturen und -unternehmen zum Mars geschickt werden, könnten schon vor der bemannten

¹²⁹ Vgl. o.V.: Eine aufblasbare Raumstation, die zum Mars fliegen soll, 13.09.2019, <https://futurezone.at/science/eine-aufblasbare-raumstation-die-zum-mars-fliegen-soll/400605389>, 07.04.2020.

¹³⁰ Vgl. o.V.: Eine aufblasbare Raumstation, die zum Mars fliegen soll, 13.09.2019, <https://futurezone.at/science/eine-aufblasbare-raumstation-die-zum-mars-fliegen-soll/400605389>, 07.04.2020.

¹³¹ Vgl. Erin Mahoney: BEAM Facts, Figures, FAQs, 17.07.2015, <https://www.nasa.gov/feature/beam-facts-figures-faqs>, 07.04.2020.

Mission Materialien auf dem Planeten gesammelt werden und zu Bauelementen weiterverarbeitet werden, ehe die Maschinen die künftigen Lebensräume für die Astronauten aufbauen.¹³²



Abb.11: Marsha Habitat

Das Konzept des MARSHA Habitats besteht aus einer mehrstöckigen, kokon-artigen Struktur, die aufrecht auf der Marsoberfläche deponiert ist. Die konische Form der Hülle entspricht den Anforderungen auf dem Mars und ist auf den atmosphärischen Druck und die thermischen Spannungen abgestimmt. Das Außenhaut des Habitats besteht aus einer Doppelschalen-Konstruktion, um die bewohnbaren Räume von den außen einwirkenden Belastungen zu isolieren. Während die äußere Schicht den Anforderungen gemäß optimiert ist, kann die innere Raumstruktur frei gestaltet werden und die Lebensbereiche so gestaltet werden, dass ein gesundes Leben, den menschlichen Bedürfnissen entsprechend, über einen langen Zeitraum garantiert wird. Eine Forschungsmission verlangt nach einer strengen Raumstruktur, die auf die Belastungen und Herausforderungen und Ziele der Mission abgestimmt werden muss. Sie spiegelt den typischen Ablauf der Mission mit ihren Aufgaben wider. Zusätzlich zu dem optimierten Arbeitsraum muss das Habitat aber auch Lebensräume bieten, die der sozialen und psychischen Gesundheit der Astronauten dienen, einen Raum, der den Menschen aus der monotonen Existenz, die zum größten Teil durch

¹³² Vgl. o.V.: Marsha. AI Spacefactory's Mars Habitat, in: AI Spacefactory, <https://www.aispacefactory.com/marsha>, 25.03.20.

den Arbeitsprozess bestimmt wird, herausreißt und für angenehme Abwechslung sorgt.¹³³

Die verschiedenen Funktionsbereiche des Habitats verteilen sich auf vier Ebenen, die von einem Oberlicht und mehreren Fenstern mit diffusem, natürlichem Licht versorgt werden.¹³⁴

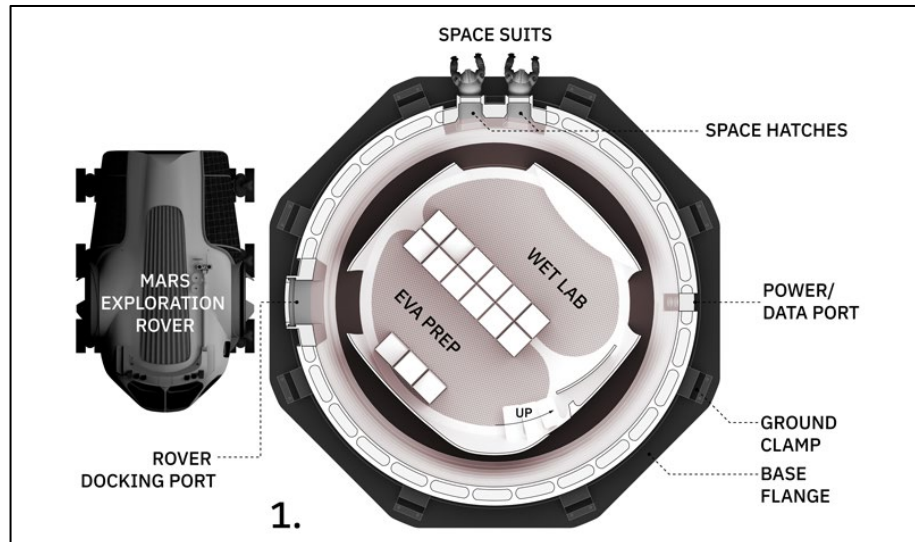


Abb.12: Erdgeschoß Marsha

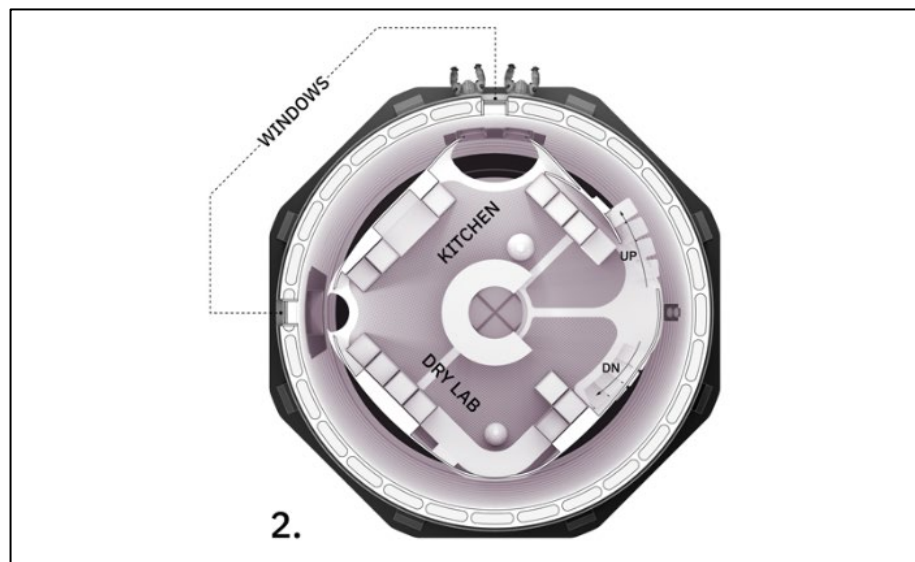


Abb.13: 1.Obergeschoß Marsha

¹³³ Vgl. o.V.: Marsha. AI Spacefactory's Mars Habitat, in: AI Spacefactory, <https://www.aispacefactory.com/marsha>, 25.03.2020.

¹³⁴ Vgl. o.V.: Marsha. AI Spacefactory's Mars Habitat, in: AI Spacefactory, <https://www.aispacefactory.com/marsha>, 25.03.2020.

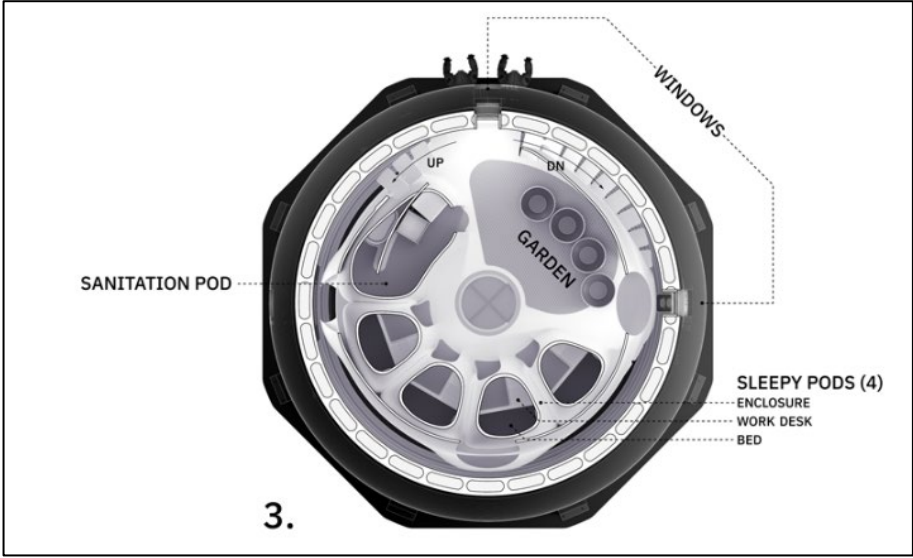


Abb.14: 2.Obergeschoß Marsha



Abb.15: 3.Obergeschoß Marsha

Team Zopherus

Corey Guidry erklärt, dass der Drucker, den er und sein Team, namens Zopherus entwickelt haben, so entworfen und dimensioniert worden war, dass er in eine der aktuellen Raketen der NASA integrierbar wäre.¹³⁵

“That led to a very specific size and shape of our habitat. ... We also developed a design which can construct a fully functional habitat using a single delivery vehicle.”¹³⁶ – Corey Guidry

Der mobile Drucker vom Team Zopherus kann modulare Einheiten herstellen und je nach Bedarf nach und nach weitere Elemente erstellen. Als Filament des Druckers baut man auf Beton aus Mars-Regolith, der in einer Druckkammer Schicht für Schicht aufgebaut wird. Die Druckkammer schützt den Beton während des Aushärtens vor den starken Temperaturunterschieden und Staubstürmen. Für ihren kuppelartigen Abschluss am oberen Ende ihres Habitats benötigte man eine Art Schalung, die die gedruckte Konstruktion stützt während diese aushärtet. Dafür entwickelte Team Zopherus einen zweiten Druckerkopf, der parallel zum Beton eine Schicht aus Polyethylen hoher Dichte druckt. Dieses Material soll den Beton bei Überhangstrukturen stützen können. Ein großes, rundes Fenster bietet außerdem ausreichend natürliches Licht im Habitat und ermöglicht einen Hydrokulturgarten im Inneren des Gebäudes.¹³⁷

Der Herstellungsprozess der Habitate vor Ort funktioniert ganz ohne menschliche Intervention. Nach der Landung des Moduls auf der Oberfläche des Mars sucht sich der Roboter selbstständig einen geeigneten Untergrund für den Druckvorgang. Kleinere Rover suchen in der Umgebung nach Rohstoffen und sammeln diese ein. Währenddessen sorgt der positionierte Drucker in seiner Kammer für einen stabilen Luftdruck und stabile Temperatur für den Druckvorgang. Schicht für Schicht wird nun der runde Grundriss des Habitats aufgebaut und gleichzeitig werden Luftschleusen und Fenster eingesetzt. Nach der Fertigstellung wird der Druckzylinder

¹³⁵ Vgl. o.V.: Teams design 3D printed habitats for mars, 10.08.2018, <https://appel.nasa.gov/2018/08/10/teams-design-3d-printed-habitats-for-mars/>, 13.04.2020.

¹³⁶ Corey Guidry, zit.n.: o.V.: Teams design 3D printed habitats for mars, 10.08.2018, <https://appel.nasa.gov/2018/08/10/teams-design-3d-printed-habitats-for-mars/>, 13.04.2020.

¹³⁷ Vgl. o.V.: Teams design 3D printed habitats for mars, 10.08.2018, <https://appel.nasa.gov/2018/08/10/teams-design-3d-printed-habitats-for-mars/>, 13.04.2020.

mit Hilfe von hydraulischen Beinen nach oben weggehoben und wandert weiter. Es können in modularer Bauweise nun weitere Elemente direkt angehängt oder solitär freistehend errichtet werden.¹³⁸

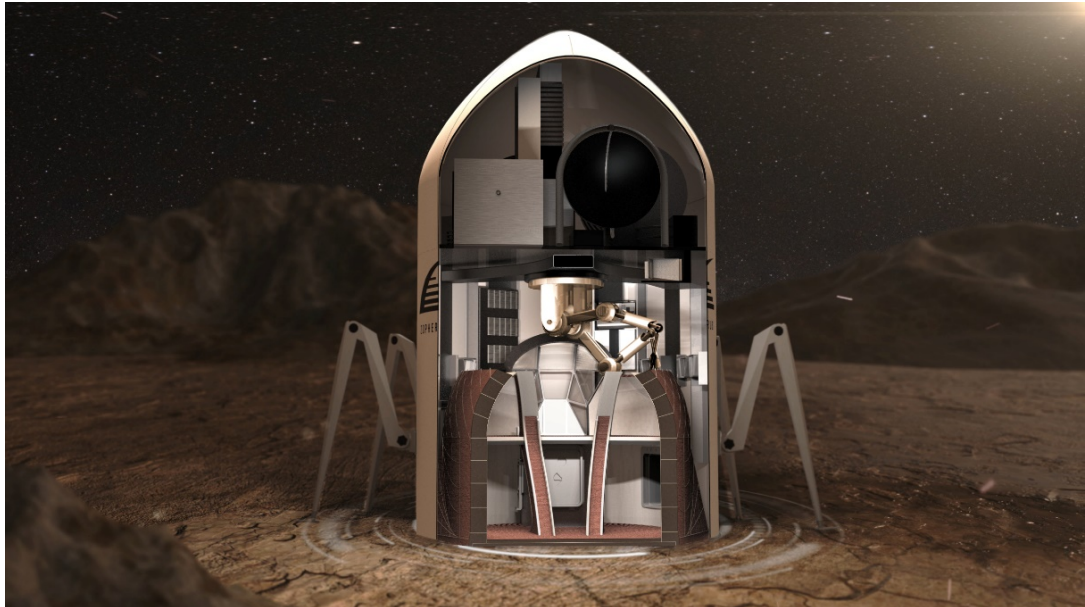


Abb.16: Zopherus

Der Baustoff, der für das MARSHA Habitat entwickelt wurde, besteht aus Basaltfasern, die aus dem Marsgestein gewonnen werden können, und erneuerbaren Biokunststoffen, die aus auf dem Mars gezüchteten Pflanzen verarbeitet werden. Der recyclebare Polymerverbundstoff wurde auf Festigkeit, Haltbarkeit und Druckfestigkeit getestet und es stellte sich heraus, dass dieser Baustoff herkömmlichen Beton in allen Kategorien übertraf. Bis zu drei Mal stärker soll der Baustoff unter Druckeinwirkung sein und bis zu fünf Mal haltbarer unter den starken Temperaturschwankungen.¹³⁹

Mars One Mission

Seit 2011 setzte sich die niederländische Privatstiftung Mars One zum Ziel, bis zum Jahr 2023 mindestens 4 Menschen zum Mars zu schicken, um dort eine Siedlung aufzubauen, zu leben und zu forschen. Der CEO der Mission Bas Lansdorp plante die Mission zum größten Teil aus Investments aus einer eigenen Reality-TV Show

¹³⁸ Vgl. NASA's Marshall Space Flight Center: Team Zopherus – Phase 3: Level 1 of NASA's 3D-printed habitat challenge, 23.07.2018, https://www.youtube.com/watch?v=CZEUYKePV_0, 13.04.2020.

¹³⁹ Vgl. o.V.: Marsha. AI Spacefactory's Mars Habitat, in: AI Spacefactory, <https://www.aispacefactory.com/marsha>, 25.03.2020.

zu finanzieren, durch die Zuschauer die Astronauten auf ihrem Weg zum Mars live mitverfolgen konnten. Der angedachte Sender zog sich jedoch bereits 2015 von diesem Vorhaben zurück, da die Frage nach der Verantwortung nicht zur Gänze geklärt werden konnte.¹⁴⁰

Mars One plante einen ersten Prototypen für das Habitat auf dem Mars, das auf der Erde an zahlreichen Standorten getestet werden sollte. Der Simulation Outpost Alpha soll auf der Erde als Trainingseinrichtung für die Astronauten dienen und später dann auch auf dem Mars zum Einsatz kommen.¹⁴¹

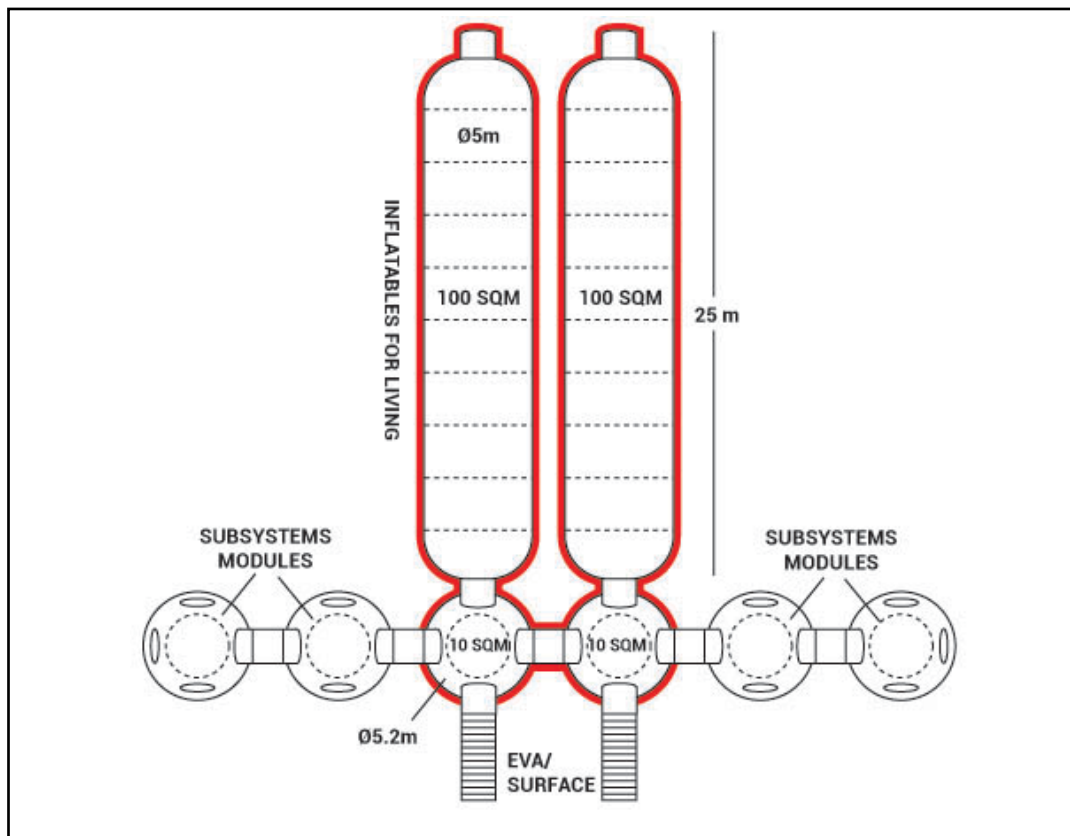


Abb. 17: Mars One Outpost

Das Baukonzept des Mars One Außenpostens umfasste sechs zusammenhängende Transitmodule und zwei daran angehängte, aufblasbare Strukturen. In den länglichen pneumatischen Strukturen sollten die Wohnräume, Lebensmittelproduktion, Lebenserhaltungssysteme und der Zugang zur Marsoberfläche Platz

¹⁴⁰ Vgl. Silvia Hühn: Mission fehlgeschlagen: Ist Mars One endgültig Geschichte?, 07.11.2019 in: Ingenieur.de, <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/raumfahrt/mission-fehlgeschlagen-ist-mars-one-endgueltig-geschichte/>, 07.04.2020.

¹⁴¹ o.V.: Simulation Outpost Alpha, in: Mars One, <https://www.mars-one.com/mission/simulation-outpost>, 07.04.2020.

finden. 200 Quadratmeter sollen die Inflatables umfassen. Die einzelnen Transitmodule stellen die benötigten Technologien für eine EVA oder andere Subsysteme bereit. Die gesamte bauliche Struktur ist so konzipiert, dass sie bei Bedarf jederzeit erweitert werden kann und man an ihr weitere Transitmodule anschließen kann, falls weitere Astronauten oder Ausrüstung auf dem Planeten eintreffen.¹⁴²

Das Projekt Mars One vom niederländischen Unternehmer Bas Lansdorp wurde zwar Anfang des Jahres 2019 aufgrund von technischen und ethischen Bedenken sowie vor allem wegen Finanzierungsproblemen vorerst auf Eis gelegt, zeigt uns aber wie ein gekoppeltes System aus Solitären (Transitkapseln) und aufblasbaren Strukturen (Inflatables) als modulares Bausystem funktionieren kann.¹⁴³

3.5 Missionsende und Recycling

Eine bemannte Mission sollte im besten Fall mehrere Monate dauern, um die Forschung vor Ort ausreichend voranzutreiben. Je kürzer die Mission, desto mehr muss man abwägen, ob sich eine Hin- und Rückreise aus finanzieller Sicht lohnt. Der enorme Aufwand einer Reise zum Mars und die Errichtung eines Habitats sollte in einem wirtschaftlichen Verhältnis zu der Missionsdauer stehen. Eine zu frühe Rückreise könnte Forschungsergebnisse gefährden und eine weitere Mission erfordern, was wiederum mit viel Kosten und Aufwand verbunden ist. Ein zu langer Aufenthalt könnte jedoch der Gesundheit der Astronauten schaden.

Wie auch unsere Erde bewegt sich der Mars auf einer elliptischen Bahn durch unser Sonnensystem. Deshalb schwankt der Abstand zwischen den beiden Planeten zwischen 56 und 401 Millionen Kilometer. Es liegt also nahe eine Mission dann zu starten, wenn der Abstand zwischen Erde und Mars so gering wie möglich ist. Dasselbe gilt für den Rückflug vom Mars. Ungefähr 16 Monate entsprechen der Zeit, die vergeht, bis sich die beiden Planeten auf ihrer Ellipsenbahn wieder annähern.

Diese Periode wäre also für eine Missionsdauer auf dem Mars sehr gut geeignet.¹⁴⁴

¹⁴² o.V.: Simulation Outpost Alpha, in: Mars One, <https://www.mars-one.com/mission/simulation-outpost>, 07.04.2020.

¹⁴³ Vgl. Silvia Hühn: Mission fehlgeschlagen: Ist Mars One endgültig Geschichte?, 07.11.2019 in: Ingenieur.de, <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/raumfahrt/mission-fehlgeschlagen-ist-mars-one-endgueltig-geschichte/>, 07.04.2020.

¹⁴⁴ Vgl. Dominik Zgrzendek: Wie lange dauert eigentlich ein Flug zum Mars?, 01.01.2020 in: sonnen-sturm.info, <https://sonnen-sturm.info/wie-lange-dauert-eigentlich-ein-flug-zum-mars-4476>, 13.05.2020.

Nach erfolgreichen Forschungsarbeiten und Erreichen des Missionsziels auf dem Mars treten die Astronauten die Rückreise an. Doch wie verlässt man den Planeten ohne Restmaterialien und Abfallstoffe zu hinterlassen? Was kann man an Materialien wiederverwenden, einpacken und wieder zur Erde zurückschicken? Ist ausreichend Platz im Raumschiff vorhanden oder muss man einen gewissen Teil der Ausrüstung auf dem Mars zurücklassen? Baut man das Habitat nach der Mission wieder ab oder versiegelt man die temporäre Einheit für eine mögliche Mission in der Zukunft? Wäre das Hinterlassen von menschlich geschaffenen Raum und Ausrüstung moralisch vertretbar?

Der große Vorteil beim Errichten eines Habitats mit natürlich vorkommenden Ressourcen auf der Marsoberfläche liegt darin, dass man Rohmaterialien wie das Regolith wieder der Natur zuführen kann. Dies setzt jedoch voraus, dass die Baustoffe wieder in ihre Einzelteile zerlegt werden können. Dieser Prozess könnte unter Umständen mit einem hohen Energiebedarf verbunden sein.

Aufblasbare Strukturen haben den Vorteil, dass sie im Vergleich zu ihrem Volumen, das sie im aufgeblasenen Zustand besitzen, nur einen Bruchteil davon im abgebauten Zustand benötigen und somit leichter in einem Raumschiff verstaut werden können als andere sperrige Bauteile und Maschinen.

Klar ist, dass sämtliche technischen Einrichtungen und Ausrüstungen wieder zur Erde transportiert werden müssen. In Abhängigkeit von der Größe der Transportrakete und der Menge der Ausrüstung sind dafür eventuell mehrere Flüge notwendig. Denn auch bei der Hinreise zum Mars ist es nicht sehr wahrscheinlich, dass sämtliche Ausrüstung und Verpflegung gemeinsam mit den Astronauten hingeschickt werden. Viel eher werden Rover und Maschinen schon deutlich vor den Forschern zum Mars geschickt, um Tunnelgrabungen vorzunehmen, Material zu gewinnen oder Habitate zu errichten. Wenn der Astronaut am Mars ankommt, sollten die lebensnotwendigen Einrichtungen bereits bestehen und funktionsfähig sein. Bei Beenden der Mission ist es deshalb auch denkbar, dass mit der ersten Rakete Richtung Heimat schon viele Geräte vorausgeschickt werden, die für den Rest der Mission nicht mehr benötigt werden.

Versorgungs- und Verbrauchsgüter, wie Lebensmittel, fallen bei der Rückreise im günstigsten Fall zum größten Teil weg. Es sollte lediglich genug Proviant für die Dauer der Rückreise vorhanden sein.

Ob es tatsächlich noch in irgendeiner Form Leben auf dem Mars gibt, wird sich mit der weiteren Forschung noch herausstellen. Doch selbst wenn es keine anderen Lebensformen gibt oder gegeben hat, setzt eine gewisse menschliche Moral voraus, dass wir den Planeten nach einer temporären Mission ohne Spuren hinterlassen. Die Forschungsmission hat zum Ziel, die Geschichte des Mars zu untersuchen und infolgedessen mehr über das Universum an sich zu verstehen. Durch die Geschichte des Mars lässt sich im besten Fall auf die Entstehung des Universums oder unseres Sonnensystems rückschließen. Eine Besiedlung für eine Kolonie der Menschen auf dem roten Planeten ist zurzeit ohnehin nicht denkbar. Es gibt zu viele Variablen im Zusammenhang mit dem Leben in der dünnen Atomsphäre und zu groß sind die Faktoren, die die Gesundheit der Menschen beeinträchtigen. Doch selbst wenn der Mensch sich an die Gegebenheiten anpassen könnte, hätte er kein Recht einen anderen Planeten zu besiedeln. Und genau so wenig hat er nicht das Recht den Planeten zu verunreinigen und Abfall auf ihm zu hinterlassen. Deshalb ist ein tadelloses Recycling nach einer Forschungsmission von enormer Wichtigkeit. Der Mensch greift in die Natur eines fremden Planeten ein, eines Planeten, der ihm nicht gehört. Er nimmt Proben und stochert etwas in der Oberfläche herum. Die Spuren des menschlichen Einwirkens sollten nach der Mission verwischt werden und der Planet sollte nicht von der Berührung des Menschen beeinträchtigt werden und dies sollte auch ein vorrangiges Ziel einer Mars Mission sein.

SCHLUSS

Eine Mission auf dem Mars ist ohne Zweifel mit viel Aufwand verbunden. Sowohl aus finanzieller als auch aus organisatorischer Sicht. Die Erforschung des Planeten könnte jedoch für den Menschen einen unschätzbaren Wert haben und die Neugier der Menschen wird den Weg zum Mars in naher Zukunft ebnen. Zahlreiche unbemannte Missionen zu dem roten Planeten zeigen uns, dass eine Reise aus technischer Sicht heute nicht mehr unmöglich ist. Klar ist jedoch auch, dass noch nie ein Mensch so weit entfernt von der Erde war, und dass die Auswirkungen des Universums auf den Organismus des Menschen in hohem Maße stattfinden und möglicherweise sogar fatal sein könnten. Kosmische Strahlung, solare Strahlung, die dünne Atmosphäre und die geringe Gravitation sind nur einige der Gefahren, die auf den Menschen im All warten und den Organismus teilweise langfristig beeinträchtigen können.

Habitate können auf verschiedenen Wegen errichtet werden. Aufblasbare Systeme und 3D-gedruckte Gebäude haben je nach Anwendung verschiedene Vor- und Nachteile und es gilt als wahrscheinlich, dass bei einer Mission vor Ort auf eine Kombination von verschiedenen Bautechnologien zurückgegriffen werden muss. Denn während eine Glaskuppel für den Anbau von Pflanzen und Nahrungsmitteln gut geeignet ist, bietet sie gleichzeitig wenig Schutz gegenüber der kosmischen und solaren Strahlung. Ein Rückzugsort unter einer dicken Schicht aus Regolith oder Felsen wird notwendig sein, um ausreichend geschützt zu sein. Im Falle eines Sonnensturms müssten sich die Astronauten weit in den Berg oder in den Boden zurückziehen, um dem Sturm unbeschadet zu entkommen.

Die Verwendung von natürlichen Baustoffen vor Ort, wie Regolith und Wasser hätten den Vorteil, dass sie einerseits leicht wieder zu zersetzen und zu recyceln wären und andererseits, dass man sich massive Transportkosten von der Erde sparen würde, wenn man Baumaterialien vor Ort verwenden könnte und nicht erst kostenintensiv anliefern müsste.

Der lange Aufenthalt an einem so abgeschiedenen und isolierten Ort hat einen erheblichen Einfluss auf die Psyche und Gesundheit des Menschen. Sozialer Kontakt wird natürlich mit den Besatzungsmitgliedern aufrecht erhalten, jedoch ist auch dieser sehr beschränkt. Sowohl für die Anzahl der Astronauten als auch für die baulichen Eigenschaften des Habitats gilt das Motto: So viel wie notwendig, so wenig wie möglich. Die Aufgabe der Architektur ist es ein Habitat zu schaffen, das einen geschützten Lebensraum für den Menschen herstellt, die Gesundheit der Besatzung aufrecht erhält und den Bedürfnissen der Menschen so entspricht, dass der Mensch trotz der zahlreichen Einschränkungen eine gesunde Psyche bewahrt. Das Habitat muss die nötigen technischen Einrichtungen besitzen um ausreichend Forschung zu

betreiben, aber auch Rückzugsorte vorweisen, wo sich die Besatzungsmitglieder in einer sozialen Atmosphäre austauschen können.

Die Aufgabe der Architektur wird es auch sein, das Habitat so herzustellen, dass es ohne Rückstände wieder abgebaut werden kann. Natürliche Baumaterialien werden wieder an die Natur zurückgegeben und die technischen Einrichtungen werden wieder mit dem Raumschiff zur Erde zurückgebracht. Ein Eingriff der Menschen in die Natur eines anderen Planeten ist nur dann moralisch vertretbar, wenn man nach einem angemessenen Zeitraum die Sphären wieder verlässt, ohne Spuren des menschlichen Einwirkens zu hinterlassen und die Umwelt zu schädigen.

LITERATURVERZEICHNIS

BÜCHER

- Mamczak, Sascha/Pirling, Sebastian: Der Weg zum Mars. Aufbruch in eine neue Welt, München 2015
- Nebel, Florian M.: Die Besiedlung des Mars, o.O. 2018
- Petranek, Stephen: How We'll Live on Mars, New York 2015
- Von Putterkamer, Jesco: Projekt Mars. Menschheitstraum und Zukunftsvision, München 2012

INTERNET

- Chow, Brian J. / Chen, Tzehan / Zhong, Ying / Qiao, Yu „Direct Formation of Structural Components Using a Martian Soil Simulant“, 27.04.2017 in: Scientific Reports <https://www.nature.com/articles/s41598-017-01157-w>
- Gross, Terry „The Great Beyond: Contemplating Life, Sex and Elevators in Space“, 11.5.2015 in: NPR Fresh Air <https://www.npr.org/programs/fresh-air/2015/05/11/405883227/fresh-air-for-may-11-2015>
- Heinicke, Christiane „Mein Tagesablauf“, 18.10.2015 in: Spektrum.de, <https://scilogs.spektrum.de/leben-auf-dem-mars/mein-tagesablauf/>
- Mahoney, Erin „BEAM Facts, Figures, FAQs“, 17.07.2015 in: nasa.gov, <https://www.nasa.gov/feature/beam-facts-figures-faqs>
- McClure, Patrick / Poston, David „How a small nuclear reactor could power a colony on mars or beyond (op-ed), 18.01.2018 in: Space.com <https://www.space.com/39413-small-nuclear-reactor-kilopower-mars-colony.html>
- Morris, Lauren Grace „Want to see life on Mars? Look to SEArch+’s prize-winning habitat concept for NASA“, 12.04.2019 in: frameweb.com <https://www.frameweb.com/news/search-mars-x-house-nasa>
- Pluta, Werner „Forscher testen Aerogel als Baumaterial für Mars-Gewächshaus“, 17.07.2019 in: Golem.de <https://www.golem.de/news/raumfahrt-forscher-testen-aerogel-als-baumaterial-fuer-mars-gewaechshaus-1907-142593.html>
- Stoppel, Kai „Mars könnte neue Menschen hervorbringen. Körper passt sich Gravitation an“, 2.11.2015 in: ntv Nachrichtenfernsehen <https://www.n-tv.de/wissen/Mars-koennte-neue-Menschen-hervorbringen-article16224451.html>
- Wunderlich-Pfeiffer, Frank „Die Staubstürme des roten Planeten“, 18.06.2018 in: Golem.de <https://www.golem.de/news/mars-die-staubstuerme-des-roten-planeten-1806-135010-2.html>
- Zgrzendek, Dominik „Wie lange dauert eigentlich ein Flug zum Mars?“, 01.01.2020 in: sonnen-sturm.info <https://sonnen-sturm.info/wie-lange-dauert-eigentlich-ein-flug-zum-mars-4476>

- o.V. „Building a lunar base with 3D printing“, 31.01.2013 in: esa.int, http://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Building_a_lunar_base_with_3D_printing
- o.V. „So lebt und arbeitet man in Zukunft auf Mond und Mars“, 05.01.2020 in: Bluewin <https://www.bluewin.ch/de/news/wissen-technik/wohnen-und-arbeiten-auf-mond-und-mars-342155.html>
- o.V. „Materials Scientists Make Martian Concrete“, 05.01.2016 in: MIT Technology Review <https://www.technologyreview.com/s/545216/materials-scientists-make-martian-concrete/>
- o.V.: „So bauen wir Städte auf dem Mars“, 18.02.2018 in: Mitteldeutscher Rundfunk <https://www.mdr.de/wissen/staedte-auf-dem-mars-100.html>
- o.V. „Strom für den Mars. NASA testet Mini-Atomreaktor“, 21.01.2018 in: Futurezone Technology News <https://futurezone.at/science/strom-fuer-den-mars-nasa-testet-mini-atomreaktor/307.618.089>
- o.V. „Der Mars bebt. NASA-Sonde stellt Erdbeben auf dem Mars fest“, 29.02.2020 in: Vorarlberg online <https://www.vol.at/der-mars-bebt-nasa-sonde-stellt-erdbeben-auf-dem-mars-fest/6533434/amp>
- o.V. „Forscher finden See mit flüssigem Wasser auf dem Mars“, 28.07.2018 in: Futurezone Technology News <https://futurezone.at/science/fluessiges-wasser-forscher-finden-see-unter-poleis-am-mars/400071593>
- o.V. „Proteine aus dem Bioreaktor: Baustoff aus Rinderblut für Häuser auf dem Mars“, 10.05.2017 in: ingenieur.de <https://www.ingenieur.de/technik/forschung/baustoff-rinderblut-fuer-haeuser-mars/>
- o.V. „Astronauten könnten Mondbasis mithilfe von Urin bauen“, 31.03.2020 in: Futurezone Technology News <https://futurezone.at/science/astronauten-koennten-mondbasis-mithilfe-von-urin-bauen/400798538>
- o.V. „Hawai’i Space Exploration Analog and Simulation“, in: hi-seas.org, <https://hi-seas.org/>
- o.V. „Marsha. AI Spacefactory’s Mars Habitat“, in: AI Spacefactory <https://www.aispacefactory.com/marsha>
- o.V. „ESA untersucht, ob sich Mars- oder Mondgestein für den Schutz von Astronauten vor Weltraumstrahlung eignet“, in: European Space Agency, https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/ESA_untersucht_ob_sich_Mars-_oder_Mondgestein_fuer_den_Schutz_von_Astronauten_vor_Weltraumstrahlung_eignet
- o.V. „Eine aufblasbare Raumstation, die zum Mars fliegen soll“, 13.09.2019 in: Futurezone, <https://futurezone.at/science/eine-aufblasbare-raumstation-die-zum-mars-fliegen-soll/400605389>
- o.V. „Mars-Simulation auf Hawaii“, 29.08.2016 in: Bayerischer Rundfunk, <https://www.br.de/themen/wissen/mars-hawaii-nasa-100.html>
- o.V. „Teams design 3D printed habitats for mars“, 10.08.2018 in: appel.nasa.gov, <https://appel.nasa.gov/2018/08/10/teams-design-3d-printed-habitats-for-mars/>
- o.V. „Abschirmung von Strahlung“, in: energiewelten.de, http://www.energiwelten.de/elexikon/lexikon/seiten/htm/020630_Abschirmung_von_Strahlung.htm

- o.V. „Bleigleichwert“, in: spektrum.de: Lexikon der Physik, <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/bleigleichwert/1736>
- o.V. „Merkwürdige Marshöhle könnte außerirdisches Leben beherbergen“, in: Der Standard, <https://www.derstandard.at/story/2000116585436/merkwuerdige-marshoehle-koennte-ausserirdisches-leben-beherbergen>

SONSTIGES

- NASA's Marshall Space Flight Center „Team Zopherus – Phase 3: Level 1 of NASA's 3D-printed habitat challenge“, 23.07.2018 in: youtube.com https://www.youtube.com/watch?v=CZEUYKePV_0

ABBILDUNGSNACHWEIS

- Abb.1: Das Gesicht auf dem Mars
Quelle: <https://mars.nasa.gov/resources/6279/geologic-face-on-mars-formation/>
Aufruf: 05.05.2020
- Abb.2: Opportunity Rover
Quelle: <https://www.teslarati.com/nasa-opportunity-rover-mars-storm/>
Aufruf: 05.05.2020
- Abb.3: Strahlenbelastungen
Quelle: https://www.nasa.gov/mission_pages/msl/multimedia/pia17061.html
Aufruf: 05.05.2020
- Abb.4: Strahlungswerte des Curiosity Rovers
Quelle: <https://www.nasa.gov/jpl/msl/mars-rover-curiosity-pia17600.html#.XqqdnKgZPY>
Aufruf: 05.05.2020
- Abb.5: Erdgeschoß Hi-Seas
Quelle: https://i2.wp.com/hi-seas.org/wp-content/uploads/2013/04/2-1st-Floor-Plan-_Layout_montage.jpg
Aufruf: 05.05.2020
- Abb.6: Obergeschoß Hi-Seas
Quelle: https://i2.wp.com/hi-seas.org/wp-content/uploads/2013/04/4-2nd-Floor-Plan-_Layout_montage.jpg
Aufruf: 05.05.2020
- Abb.7: Wasserkarte Mars
Quelle: <https://mars.nasa.gov/odyssey/mission/instruments/grs/>
Aufruf: 05.05.2020
- Abb.8: Lunar Habitat / Foster + Partners
Quelle: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/ESA_testet_3D-Drucker_fuer_den_Bau_einer_Mondbasis
Aufruf: 05.05.2020
- Abb.9: Mars X House
Quelle: <http://www.spacexarch.com/mars-xhouse-v2>
Aufruf: 05.05.2020
- Abb.10: Bigelow B330
Quelle: <https://www.raumfahrer.net/forum/smf/index.php?topic=14262.0>
Aufruf: 05.05.2020

- Abb.11: Marsha Habitat
Quelle: <https://www.aispacefactory.com/marsha>
Aufruf: 05.05.2020
- Abb.12: Erdgeschoß Marsha
Quelle: <https://www.aispacefactory.com/marsha>
Aufruf: 05.05.2020
- Abb.13: 1.Obergeschoß Marsha
Quelle: <https://www.aispacefactory.com/marsha>
Aufruf: 05.05.2020
- Abb.14: 2.Obergeschoß Marsha
Quelle: <https://www.aispacefactory.com/marsha>
Aufruf: 05.05.2020
- Abb.15: 3.Obergeschoß Marsha
Quelle: <https://www.aispacefactory.com/marsha>
Aufruf: 05.05.2020
- Abb.16: Zopherus
Quelle: https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial_challenges/3DPHab/Zopherus-image8/
Aufruf: 05.05.2020
- Abb.17: Mars One Outpost
Quelle: <https://www.mars-one.com/mission/simulation-outpost>
Aufruf: 05.05.2020

TABELLEN

Tab.1: Eigenschaften Mars
 Quelle: Nebel 2018, 36.

Tab.2: Atmosphäreigenschaften
 Quelle: Nebel 2018, 38.