

ZURÜCK ZUM MOND



DER NÄCHSTE
GROSSE SCHRITT
FÜR DIE
MENSCHHEIT

JOSEPH SILK

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie. Detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://d-nb.de> abrufbar.

Für Fragen und Anregungen:

info@finanzbuchverlag.de

Wichtiger Hinweis

Ausschließlich zum Zweck der besseren Lesbarkeit wurde auf eine genderspezifische Schreibweise sowie eine Mehrfachbezeichnung verzichtet. Alle personenbezogenen Bezeichnungen sind somit geschlechtsneutral zu verstehen.

1. Auflage 2023

© 2023 by FinanzBuch Verlag, ein Imprint der Münchner Verlagsgruppe GmbH

Türkenstraße 89

80799 München

Tel.: 089 651285-0

Fax: 089 652096

Die englische Originalausgabe erschien 2022 bei Princeton University Press unter dem Titel *Back to the Moon*. © 2022 by Joseph Silk. All rights reserved.

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Projektleitung: Fabian Neidl

Übersetzung: Doro Siebecke, Norbert Juraschitz

Redaktion: Silke Panten

Korrektur: Dr. Manuela Kahle

Umschlaggestaltung: Marc-Torben Fischer in Anlehnung an das Original von Princeton University Press

Umschlagabbildung: The far side of the Moon photographed by Apollo 16, April 1972. Courtesy of NASA

Satz: Daniel Förster

Druck: GGP Media GmbH, Pößneck

Printed in Germany

ISBN Print 978-3-95972-675-7

ISBN E-Book (PDF) 978-3-98609-315-0

ISBN E-Book (EPUB, Mobi) 978-3-98609-316-7



Weitere Informationen zum Verlag finden Sie unter

www.finanzbuchverlag.de

Beachten Sie auch unsere weiteren Verlage unter www.m-vg.de.

INHALT

Vorwort	5
Einleitung: Ein Trabant mit verlockendem Potenzial	9
Kapitel 1: Der neue Wettlauf ins All	19
Kapitel 2: Tiefschürfendes zum Mond	53
Kapitel 3: Roboter und Menschen	75
Kapitel 4: Auf den Spuren unseres Ursprungs	95
Kapitel 5: Die ersten Monate des Universums	121
Kapitel 6: Unsere dramatische Vergangenheit	143
Kapitel 7: Sind wir allein?	169
Kapitel 8: Eine Frage des Überlebens	197
Kapitel 9: Internationale Zusammenarbeit	229
Kapitel 10: Das nächste Jahrhundert	245
Bibliografie	263
Anmerkungen	281
Stichwortverzeichnis	329

VORWORT

Woher kommen wir? Und sind wir allein im weiten Weltall? Das sind Fragen, die sich meines Erachtens nur mithilfe einer Mondplattform klären lassen. Wir brauchen eine neue, auf Wissenschaft und Forschung bezogene Vision für die Menschheit, die die Erkundung und Erschließung des Mondes begleitet. Für das Bestreben, das in den nächsten Jahrzehnten zusammen mit kommerziellen Unternehmen zu erwarten ist, wäre eine derartige Vision unendlich wertvoll. Die nötige Inspiration in Form einer Vision könnte es der Wissenschaft ermöglichen, klar definierte und überzeugende Ziele zu erreichen. Genau das ist das Anliegen dieses Buches. Projekte unter wissenschaftlicher Leitung werden die ultimativen Visionen der Astronomie und der Kosmologie begleiten, der ältesten Wissenschaften der Welt, die vor etwa 5000 Jahren ihren Anfang nahmen.

Die Erforschung des dunklen Zeitalters, das vor dem schwachen Leuchten des ersten Lichts im All liegt, ist die letzte große Herausforderung der Astronomie. Primordiale Wasserstoffwolken sind gleichermaßen Bausteine der Zukunft wie Zeugnisse der Vergangenheit. Die Radioastronomie, die mit sehr niedrigen Frequenzen arbeitet, ermöglicht es uns auf einzigartige Weise, diese Zeugnisse vom Anbeginn der Zeit einzufangen. Dazu müssen wir jedoch die Entschlossenheit aufbringen, Radioteleskope für niederfrequente Strahlung auf der Rückseite des Mondes zu installieren – dem Ort im inneren Sonnensystem mit der geringsten Radiostörstrahlung. Niederfrequente Radioantennen, die sich über weite Teile der Mondoberfläche erstrecken, könnten die Strahlung aus der dunkelsten Ära unserer kosmischen Geschichte einfangen und es uns ermöglichen, die Geheimnisse zu entschlüsseln, die im Anfang des Universums liegen.

Den Heiligen Gral der Astronomie verkörpert jedoch ein zusätzliches Ziel: die Suche nach Anzeichen außerirdischen Lebens über die Beobachtung von Planeten, die nahe Sterne umkreisen. Nur ein Megateleskop auf dem Mond kann die Signale der Tausenden und möglicherweise Millionen lebensfreundlichen Exoplaneten einfangen, die wir untersuchen müssen, um eine reelle Chance zu haben, auch die schwächsten Zeichen primitivster Formen außerirdischen Lebens zu entdecken und letztlich auch nach Spuren höher entwickelter Lebensformen zu suchen, die unsere eigenen Fähigkeiten übersteigen. Die Vorteile, die sich aus der Nutzung der Mondressourcen und dem Aufbau einer wissenschaftlichen Infrastruktur auf dem Mond ergeben, sind nicht zu unterschätzen.

Unsere Weltraumteleskope haben enorm vom NASA-Programm für bemannte Raumfahrt einschließlich der Entwicklung des Space Shuttles und des Aufbaus der Internationalen Raumstation (International Space Station, ISS) profitiert. Ein ähnlicher Effekt ist auch bei der Erschließung des Mondes zu erwarten. Eine funktionierende Infrastruktur auf dem Mond könnte die Kosten ansonsten nicht finanzierbarer Projekte senken, etwa die Suche nach Anzeichen fernen Lebens mithilfe von Megateleskopen, die bis zu hundertmal größer sind als optische Teleskope, die sich auf der Erde errichten lassen.

Der Mond ist vor etwa vier Milliarden Jahren aus einem gigantischen Zusammenstoß mit einem Himmelskörper von der Größe des Mars entstanden. Durch die Suche nach Bodenschätzen auf dem Mond können wir uns ein noch genaueres Bild von seiner Entstehung machen. Wir können in Regolith bohren, Mondgestein datieren und die Zusammensetzung des Gesteins in unterschiedlichstem Terrain untersuchen – nur so werden wir viele Erkenntnisse zum Mond sammeln und die Geschichte des Mondes rekonstruieren können. Das Wissen um die Ursprünge unseres nächsten Nachbarn wird Licht in das Dunkel um die Entstehung der Erde bringen. Und es gibt weitere Rätsel zu lösen, die uns letztlich Hinweise auf die Entstehung des Sonnensystems selbst liefern werden.

Die Erkundung des Mondes ist der erste ernsthafte Vorstoß der Menschheit ins All. Der Aufbau einer bewohnbaren Infrastruktur auf unserem nächsten Nachbarn wird das Tor zu einer neuen Ära der Welt-

raumforschung sein. Die Errichtung einer dauerhaften Präsenz auf dem Mond ist mit dem entsprechenden Zusammenspiel zwischen Mensch und Roboter technisch möglich. Ein derartiger Außenposten bietet uns eine einzigartige Ausgangsbasis für die weitere Suche nach außerirdischem Leben und die Erforschung der Anfänge des Universums. Diese Vision kann die nächsten fünfzig Jahre prägen, eine aufregende Zeit, in der sich die großen internationalen Raumfahrtbehörden einen Wettstreit um den für ihre Zwecke geeigneten Raum auf dem Mond liefern. Wir dürfen gespannt sein, was die Forschung aufdecken wird!

EINLEITUNG

EIN TRABANT MIT VERLOCKENDEM POTENZIAL

Ich meine, unsere Nation sollte es sich zum Ziel setzen, noch in diesem Jahrzehnt einen Menschen auf dem Mond landen zu lassen und wieder sicher zur Erde zurückzubringen.

John F. Kennedy, 1961

Die Rückkehr zum Mond ist ein wichtiger Schritt für unser Raumfahrtprogramm. Ein Außenposten auf dem Mond könnte die Kosten für die weitere Weltraumforschung erheblich senken und zunehmend ambitioniertere Missionen ermöglichen. Die Beförderung von schweren Raumfahrzeugen und Treibstoff aus dem Gravitationsfeld der Erde heraus ist kostspielig. Raumfahrzeuge, die auf dem Mond montiert und ausgerüstet werden, könnten das wesentlich schwächere Gravitationsfeld des Mondes mit weitaus weniger Energie und zu deutlich geringeren Kosten verlassen. Außerdem ist der Mond reich an Ressourcen. Unter der Mondoberfläche liegen Rohstoffe, die abgebaut und zu Raketentreibstoff und Atemluft verarbeitet werden könnten. Wir können unsere Zeit auf dem Mond nutzen, um neue Ansätze, Technologien und Systeme zu entwickeln und zu testen, die uns helfen, in anderen, noch schwierigeren Umgebungen zurechtzukommen. Der Mond ist ein logischer Schritt auf dem Weg zu weiterem Fortschritt und Erfolg.

George W. Bush, 2004

Die silbrig-weiße Scheibe am Himmel hat die Menschheit seit jeher fasziniert. Der Mond treibt die Gezeiten an, und auf einer eher gefühlsbezogenen und weniger materiellen Ebene ist er eine Quelle der Inspiration, des Staunens und sogar des Wahnsinns. Als Vollmond leuchtet er im reflektierten Sonnenlicht, als Neumond reflektiert er den matten Erdschein. Er besitzt keine Atmosphäre und es gibt kein Leben auf dem Mond. Auf seiner Oberfläche sind Krater, Berge, Hochlandregionen und Tiefebene sowie Relikte von Einschlägen und Lavaströmen zu erkennen. Die Meteoriten und Asteroiden, deren Einschlägen der Mond seit Jahrmilliarden ausgesetzt ist, haben seine Oberfläche geformt. Geblieben ist eine verwitterte Landschaft, die von der langen Geschichte des Mondes mit Kollisionen und Vulkanausbrüchen erzählt. Spuren menschlicher Aktivitäten sind selten und weit verstreut. Sie beschränken sich auf vereinzelte Landeplätze. Das dürfte sich in den nächsten Jahrzehnten ändern, wenn Erkundung und Erschließung des Mondes Fahrt aufnehmen.

Als unser nächster Himmelskörper nimmt der Mond eine Sonderstellung ein. Seit jeher gibt er Anlass zu Spekulationen über die Möglichkeit außerirdischen Lebens. Aus jahrzehntelanger Mondforschung wissen wir, dass der Mond alles andere als einladend ist, aber der Mensch hat gelernt, Umgebungen seinen Bedürfnissen anzupassen. Die Chancen stehen gut, dass in den nächsten Jahrzehnten Mondsiedlungen gebaut werden.

Ein halbes Jahrhundert nach Neil Armstrongs großem Schritt für die Menschheit hat ein neuer Wettlauf ins All begonnen. Um den Weg für die Zukunft bemannter Raumflüge zum Mond zu ebnen, wurden zahlreiche Mondlandungen durchgeführt. Gegenwärtig plant die NASA in Zusammenarbeit mit den Raumfahrtbehörden Europas (ESA), Japans (JAXA) und Kanadas (CSA) den Aufbau einer als Lunar Gateway bezeichneten Raumstation im Mondorbit, die als Koordinationszentrum für die Erschließung des Mondes und als Startbasis für die Erkundung des Sonnensystems dienen soll. Die internationalen Raumfahrtbehörden planen die Errichtung von bewohnbaren Mondsiedlungen. Es gibt zudem Pläne, kommerzielles Interesse zu fördern, um luxuriöse Hotelanlagen

zu errichten. Angesichts des zunehmenden Mangels an Metallen der seltenen Erden und Halbleitermaterialien wird auch der Abbau von Rohstoffen auf dem Mond in Betracht gezogen. Und nicht zuletzt werden wir mit auf dem Mond erzeugtem Raketentreibstoff viel tiefer in das Sonnensystem vordringen können.

Die für die Erkundung des Mondes errichteten bewohnbaren Anlagen werden die Erschließung von Mondressourcen ermöglichen und dazu beitragen, das nächste große Kapitel in der interplanetaren Forschung zu realisieren, das uns zum Mars und tiefer in den Weltraum führen wird.

Wenn sich unsere Annahmen über die Ursprünge des Mondes erst einmal bestätigt haben, wird die Geologie des Mondes uns dabei helfen zu verstehen, wie die Urerde entstanden ist. Die führende Theorie geht von einer gewaltigen Kollision mit einem Himmelskörper von der Größe des Mars aus, die sich vor etwa 4,5 Milliarden Jahren ereignet hat. Dabei wurden Gesteinsbrocken ins All geschleudert, die sich nach und nach zum Mond verdichteten. Durch die Kollision wurde vermutlich auch die Rotationsachse der Erde verändert. Dieser um 23,5 Grad gekippten Achse verdanken wir die Jahreszeiten und einen Schutz vor extremen Klimaschwankungen. Die Suche nach Bodenschätzen auf dem Mond wird unser Wissen über die Entstehung des Mondes vertiefen und darüber hinaus sogar zu neuen Erkenntnissen über die Entstehung der Erde und sogar des Sonnensystems führen.

Für alle, die davon träumen, die Erde hinter sich zu lassen, ist der Mond das erste Ziel. Nur etwa 400 000 Kilometer von uns entfernt ist er bereits in drei Tagen zu erreichen. Und zumindest im Moment ist der Mond noch nahezu unberührtes Gelände.

Seitdem der letzte Mensch einen Fuß auf den Mond gesetzt hat, ist ein halbes Jahrhundert vergangen. Nach der Ära der gigantischen Saturn-V-Raketen wurde die bemannte Erforschung des Mondes abrupt eingestellt. Aufgrund kommerzieller und internationaler Interessen werden jedoch allmählich wieder Startressourcen bereitgestellt, und mehrere Länder arbeiten an der Entwicklung von Trägerraketen für ultraschwere Lasten. In wenigen Jahren werden die Weichen für eine neue Phase der bemannten Monderkundung gestellt sein.

Mondmissionen waren immer vom Stand des Raumfahrt- und Weltraumforschungsprogramms und vor allem von den bereitgestellten Haushaltsmitteln abhängig. Heute erleben wir einen Stimmungswandel in der Politik, und die internationalen Raumfahrtbehörden setzen neuerdings in verschiedener Hinsicht große Erwartungen in ihre Mondprojekte. Die meisten Vorhaben sind kommerziell orientiert, einige sind jedoch rein wissenschaftlicher Natur. Für Wissenschaft und Forschung sind das gute Nachrichten, denn die geplanten Aktivitäten auf dem Mond dürften neue Möglichkeiten für die Erkundung des Universums eröffnen.

Die unwahrscheinliche Verkettung von Ereignissen, die zur Entstehung des Mondes geführt haben, lässt vermuten, dass Leben, wie wir es auf der Erde kennen, im Universum sehr selten ist. Die Wahrscheinlichkeit derartig spezieller Konstellationen lässt sich jedoch erst abschätzen, wenn wir gezielt nach ihnen suchen. Und der Mond könnte der ideale Ausgangspunkt für unsere Suche im nahen Universum sein.

Die ersten zaghaften Schritte eines Kleinkinds markieren den Übergang in die nächste Phase der menschlichen Entwicklung. Einen ähnlichen Übergang in der biologischen Evolution stellen die ersten Vertreter des *Homo sapiens* dar, dessen Entwicklung bis hin zum modernen Menschen etwa 200 000 Jahre dauerte. Aus kosmischer Perspektive ist das eine so kurze Zeitspanne, dass sich dieser Prozess in den vergangenen Milliarden Jahren auch an anderen Orten in unserer Galaxie abgespielt haben könnte. Wie wahrscheinlich das ist, lässt sich jedoch schwer abschätzen. Dafür sind die biologischen Vorgänge einfach zu komplex. Die einzige Möglichkeit, die uns bleibt, ist die Suche nach ähnlichen Entwicklungen im Kosmos.

Der Mond bietet uns die Möglichkeit, mithilfe der entsprechenden Infrastruktur in Kombination mit außergewöhnlich leistungsfähigen Teleskopen neue Wege in der Weltraumforschung zu beschreiten. Mit Sicherheit werden sich auf dem Trabanten Standorte finden lassen, von denen aus Sonden zur Erkundung des Sonnensystems gestartet werden können. Weltraumbahnhöfe auf dem Mond und im Mondorbit sind für Schwerlastträgersysteme von entscheidender Bedeutung. Bemannte Raumflüge zur Erkundung des Sonnensystems sind von der Erde aus realistisch

gesehen nicht durchführbar: Die Kosten für den Treibstoff zum Überwinden der Erdanziehungskraft sind zu hoch. Der Mond wird einen praktisch unbegrenzten Nachschub an lokalem Treibstoff liefern, wie er für Erkundungsflüge im Sonnensystem benötigt wird. Die Errichtung einer permanenten Mondbasis wird der erste zaghafte Schritt der Menschheit auf dem Weg zu den Sternen sein.

Langfristig werden sich auch Wege für die interstellare Erkundung finden. Ob durch Kryokonservierung oder gentechnische Wiedergeburt, die hundertjährige Reisezeit zu den nächsten Sternen wird für künftige Generationen von Astronauten kein Hindernis mehr darstellen. Sobald Computer dem menschlichen Gehirn an Leistungsfähigkeit weit überlegen sind, wird die Grenze zwischen Mensch und Maschine zunehmend verschwimmen. Die Rechenleistung scheint derzeit aufgrund immer neuer Entwicklungen ins Unermessliche zu wachsen. Es wäre töricht, jetzt vorschnell rote Linien in unserem Denken zu ziehen, die unseren zukünftigen Möglichkeiten im Hinblick auf Erforschung und Besiedlung des Weltalls Grenzen auferlegen.

Die geringe Anziehungskraft auf der Mondoberfläche wird den Aufbau bewohnbarer Anlagen erleichtern. Bereits jetzt wird am Entwurf von Gebäuden gearbeitet, die in der Nähe des Südpols auf dem Mond errichtet werden könnten. Dort liegt das schattige Innere der zahllosen tiefen Krater in permanenter Dunkelheit. An den Polen sind die Krater vor Sonnenlicht geschützt, da die Sonne durch ihren niedrigen Stand nicht über den Kraterstand steigt. Die Temperaturschwankungen fallen an den Polen geringer aus als am Äquator des Mondes, an dem die Temperaturen zwischen minus 180 Grad Celsius und plus 130 Grad Celsius liegen. Die permanent beschatteten Krater enthalten große Mengen an Eis.

Am Boden der Krater führt die ständige Beschattung zu konstanten Temperaturen um minus 200 Grad Celsius. Zum Vergleich: Die kälteste jemals auf der Erde gemessene und aufgezeichnete Oberflächentemperatur beträgt minus 90 Grad Celsius und wurde an der Wostok-Station in der Antarktis gemessen, während die höchste Temperatur mit rund 70 Grad Celsius im Death Valley in Kalifornien aufgezeichnet wurde. Die Temperaturen auf dem Mond erlauben den Einsatz von Robotern;

Menschen könnten sich dagegen nur mit entsprechenden Schutzvorrichtungen auf dem Mond aufhalten. Energiequellen für lokales Heizen und Kühlen stehen bereit. Die Ränder der Krater werden fast ununterbrochen von der Sonne beschienen und liefern in den langen Mondnächten einen unerschöpflichen Vorrat an Sonnenenergie.

Der nächste Schritt könnte die Einrichtung von bewohnbaren, über die Mondoberfläche zugänglichen Stationen in den breiten Lavaröhren sein. Diese Kavernen bieten möglicherweise sogar genug Raum für ganze Städte und einen natürlichen Schutz vor lebensbedrohlichen, durch die Sonne ausgelösten Prozessen. Städte in großen Lavaröhren hätten den Vorteil, dass sie vor Meteoriteneinschlägen geschützt sind und die gelegentlich auftretenden heftigen Sonneneruptionen und das Bombardement durch Mikrometeoriten unbeschadet überstehen.

Der Abbau von Rohstoffen auf dem Mond könnte einen unbegrenzten Vorrat an seltenen Erden sicherstellen. Durch einen robotergestützten Abbau und die Entsorgung giftiger Abfälle im All ließe sich die mit dem Abbau verbundene Umweltbelastung in Grenzen halten.

Durch die Möglichkeit zur lokalen Treibstoffherzeugung sind der Mond und der Weltraum zwischen Mond und Erde hervorragend als zukünftige Abschussbasen für interplanetare Raumsonden geeignet. Für die Treibstoffherzeugung ist eine Extraktion von flüssigem Wasserstoff und Sauerstoff geplant. Diese Komponenten könnten aus Eisablagerungen in den kalten Kratern an den Polen gewonnen werden.

Um von all diesen geplanten Vorhaben profitieren zu können, müssen Forschung und Wissenschaft als ein entscheidendes Ziel bei der Erkundung des Mondes gefördert werden. In dieser einzigartigen Umgebung, deren geringe Anziehungskraft und fehlende Atmosphäre Projekte in einer Größenordnung ermöglichen, die auf der Erde undenkbar ist, können wir viel über die Entstehung des Mondes und die Entstehung des Sonnensystems lernen.

Die Lebensbedingungen auf der Erde verschlechtern sich rapide. Erdwärmung, Pandemien, Umweltzerstörung, Ressourcenverknappung, Überbevölkerung und Kriege fordern ihren Tribut. Da liegt es nahe, sich anders zu orientieren. In den vergangenen Jahrhunderten hat Europa die

Grenzen seines Einflussbereichs nach Afrika, nach Amerika und darüber hinaus verschoben – mit fatalen Folgen für die ursprünglichen Bewohner. Früher oder später werden wir gezwungen sein, nach lohnenden Zielen außerhalb der Erde zu suchen. Der Mond ist nicht der ideale Ort für eine Besiedlung mit hoher Bevölkerungsdichte, aber er kann der Menschheit als Vorposten dienen, um sich auf eine Zukunft mit beispiellosen Erkundungsmöglichkeiten und auf die Folgen potenziell verheerender Katastrophen vorzubereiten.

Angesichts des kommerziellen Hintergrunds stehen die Chancen gut, dass auf dem Mond auch erhebliche Mittel für die Forschung bereitgestellt werden. Die Vorteile von Mondteleskopen liegen auf der Hand. Die Kosten sind überschaubar, die neuen Perspektiven, die sich für die Forschergemeinschaft ergeben, sind jedoch immens wertvoll. Unterstützt von Robotern können Menschen Mondteleskope von bisher nicht gekannter Größe und Empfindlichkeit bauen, deren Leistungsfähigkeit die sämtlicher erdgebundener und weltraumgestützter Plattformen übertrifft. Aufgrund der fehlenden Atmosphäre beziehungsweise Ionosphäre sind auf der Mondoberfläche stabile Plattformen für neue Generationen von Riesenteleskopen vorstellbar, die tief in die entlegensten Winkel des Universums blicken und auch Bilder von nahen Planetensystemen liefern können.

Eine der grundlegendsten Fragen in Bezug auf das Universum ist, ob wir allein im Universum sind. Wenn Leben im Universum verbreitet ist, warum sind wir dann noch nicht auf Außerirdische gestoßen? Es gibt Milliarden erdähnlicher Planeten in unserer Galaxie und wir wissen, dass etwa 50 Prozent von ihnen älter als die Erde sind, da ihre Zentralgestirne Milliarden Jahre vor unserer Sonne entstanden sind. Allerdings sind unsere Teleskope derzeit noch zu klein, um diesen potenziell riesigen Schatz an Informationen zu anderen Planeten auch nur annähernd zu heben. Wir wissen, wonach wir suchen müssen: nach dem reflektierten Glitzern von Ozeanen, dem grünen Schimmer von Wäldern, dem Vorhandensein von Sauerstoff in der Atmosphäre und nach komplexeren und subtileren Anzeichen für intelligentes Leben wie einer (hoffentlich vorübergehenden) industriellen Verschmutzung der Atmosphäre eines Planeten.

Bisher ist allerdings selbst die Existenz außerirdischen Lebens eine umstrittene Hypothese. Wir haben keine Vorstellung davon, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, auf den Milliarden lebensfreundlichen Planeten unserer Galaxie höher entwickelte Lebensformen zu finden. Wenn wir von der Science-Fiction zu Fakten gelangen wollen, bleibt uns nur die Suche nach Spuren fremden Lebens. Die Mondteleskope werden uns einen ersten kleinen Einstieg in die Erforschung unserer Galaxie in Bezug auf Anzeichen von Leben ermöglichen.

In der Nähe der Pole des Mondes können riesige Teleskope in tiefen Kratern errichtet werden, die durch ihre vollständige Dunkelheit und weltraumähnliche Kälte ideale Bedingungen für die Infrarotastronomie bieten. An diesen Standorten gibt es keine Atmosphäre, die das Infrarotlicht aus dem All absorbiert, und es steht ständig Sonnenenergie zur Verfügung. Die geringe Anziehungskraft erlaubt den Bau von Anlagen, die um ein Vielfaches größer sind als ihre Pendanten auf der Erde.

Es gibt Fragen, die die Menschheit seit Urzeiten beschäftigt. Seit unsere Vorfahren begannen, über sich und ihre Umwelt nachzudenken, haben sie zum Nachthimmel aufgeblickt, den majestätischen Mond bestaunt und versucht, die unendlichen Geschichten zu ergründen, von denen das funkelnde Lichtermeer erzählt. Woher kommen wir? Diese philosophische Frage begleitet die Menschheit seit Anbeginn der Zivilisation. Der Schlüssel liegt in einer Zeit, von der wir nahezu nichts wissen – das dunkle Zeitalter des Universums, das vor der Entstehung der ersten Sterne liegt, als es noch kein Licht, aber Billionen primordialer Wasserstoffwolken gab.

Die ersten Wolken sind urzeitliche Gebilde mit Wirbeln in der Radiostrahlung. Erst wenn unsere Teleskope empfindlich genug sind, um sie als ultrafeine Schatten vor der Reststrahlung des Urknalls auszumachen, können wir die ersten Augenblicke des Universums erforschen. Die Mondplattform ist die letzte »Haltestelle« im Weltraum, die der Astronomie zur Verfügung steht. Sie ist der ideale Standort für Niederfrequenzteleskope mit beispiellos großen Spiegeln und außergewöhnlicher Leistung, mit denen dieses ambitionierte Ziel zu erreichen ist.

Nach den ersten Wolken entwickelten sich schnell komplexere Strukturen. Diese Entwicklung war vor allem aufgrund der Anziehungskraft

der Gravitation nicht aufzuhalten. Schon nach wenigen Millionen Jahren existierten die ersten Galaxien und massereichen schwarzen Löcher und es gab kein Zurück mehr. Mit Teleskopen auf dem Mond lassen sich diese Zeiträume wesentlich intensiver erkunden, als es mit Teleskopen auf der Erde oder auch im Orbit im Moment vorstellbar ist.

Die Erkundung des Mondes dürfte von wissenschaftlichen Unternehmungen begleitet werden. Höchste Priorität wird natürlich der Aufbau einer langfristig nutzbaren Infrastruktur haben, die uns nach dem Bau von Mondsiedlungen für eine dauerhafte Präsenz den Einstieg in die Kolonisierung des Weltalls ermöglicht. Schwere Nutzlasten, deren Transport von der Erde aus energetischen Gründen nicht durchführbar ist, lassen sich vom Mond und dem Gebiet zwischen Mond und Erde ins All befördern. Die Mondplattform ist unser einziger zukunftsweisender und tragfähiger Weg zur Erforschung des Weltraums. Wie später noch näher beschrieben wird, plant die NASA bereits den Aufbau eines Weltraumbahnhofs und einer Weltraumstation im Mondorbit. Vom Mond aus können wir das Sonnensystem und schließlich auch andere Sterne erreichen. Das langfristige Ziel muss es dabei sein, in den Weltraum vorzudringen, um der Menschheit neue Horizonte zu erschließen.

Mondteleskope werden unserem Bestreben, das Universum zu verstehen, eine neue Richtung geben. Für einen Bruchteil der Kosten einer bemannten Mondlandung könnten wir auf dem Mond Teleskope errichten, deren Größe und Beobachtungsgenauigkeit die begrenzten Observationsmöglichkeiten auf der Erde weit in den Schatten stellen. Damit werden wir Antworten auf grundlegende Fragen zum Ursprung der Erde erhalten und wir können nach Anzeichen für außerirdisches Leben suchen.

Bei der Erschließung dürften kommerzielle Vorhaben Vorrang haben und die treibende Kraft darstellen. Wir werden zwangsläufig den Bedarf für touristische und für industrielle Unternehmungen gegeneinander abwägen müssen. Auch das Zusammenspiel zwischen Mensch und Roboter wird eine wichtige Rolle spielen. Und mit Blick auf die Zukunft werden wir nicht ohne Mondsiedlungen auskommen, wenn wir auf dem Mond Forschung betreiben wollen. Von Anfang an werden unsere Aktivitäten

auf dem Mond deshalb auch darauf ausgerichtet sein, es der Wissenschaft zu ermöglichen, die Grenzen des Machbaren zu verschieben.

Alle Länder, die die Erkundung und Erschließung der Mondoberfläche planen oder in Angriff nehmen, wie die Vereinigten Staaten, China, Russland und Europa sowie Indien und Japan, müssen Verträge über die Nutzung des Weltraums unterzeichnen. Der größte Albtraum wäre eine unregelmäßige Nutzung des Mondes in Wildwestmanier. Es müssen dringend Verträge geschlossen werden, die alle relevanten Aspekte abdecken, vom Bodenerwerb über Schürfrechte bis hin zu militärischen und wissenschaftlichen Unternehmungen. Wir müssen multinationale Weltraumtruppen aufstellen, um die Gesetze durchzusetzen, und auch für Erzbergwerke, Weltraumbahnhöfe und sogar die Teleskope auf dem Mond werden internationale Regelungen erforderlich sein.

In den nächsten Jahrzehnten wird viel geschehen. Erstmals seit fünfzig Jahren werden wieder Menschen den Mond betreten. Auf dem Mond wird gebaut werden und Menschen werden in Mondsiedlungen ihrer Arbeit nachgehen. Es wird industrielle, kommerzielle und wissenschaftliche Unternehmungen auf dem Mond geben. Die Mondforschung wird uns neue Perspektiven für die Beantwortung der tiefgründigsten Fragen eröffnen, die wir uns je gestellt haben. Vor allem aber wird es das Streben der Menschheit nach Erkenntnis sein, das die endgültigen Grenzen definiert. Dieses Buch beschreibt diese Reise in die Zukunft.

KAPITEL 1

DER NEUE WETTLAUF INS ALL

[Die Raumfahrt] wird den Menschen von seinen restlichen Fesseln befreien, den Fesseln der Schwerkraft, die ihn immer noch an diesen Planeten binden. Sie wird ihm die Tore des Himmels öffnen.

Nach Wernher von Braun

Das ultimative Ziel der Raumfahrt ist es, der Menschheit nicht nur wissenschaftliche Entdeckungen und gelegentlich eine spektakuläre Show im Fernsehen zu liefern, sondern auch eine echte Erweiterung unseres Geistes.

Freeman Dyson

DAS LETZTE HALBE JAHRHUNDERT

Im Jahr 1961 beschloss der US-amerikanische Präsident John F. Kennedy, dass die National Aeronautics and Space Administration (NASA) bis zum Ende des Jahrzehnts Menschen auf den Mond bringen sollte. Seine Entscheidung war nicht zuletzt eine Reaktion auf den ersten Flug im All um die Erde durch den sowjetischen Kosmonauten Juri Gagarin. Die Vereinigten Staaten mussten dem etwas entgegensetzen. Die Sowjets

hatten bereits einen Vorsprung bei der Planung einer Raumstation und Erdumrundungen im All. Eine bemannte Landung auf dem Mond war der am ehesten durchführbare Schritt, den die Vereinigten Staaten machen konnten, um ihre Überlegenheit im Weltall zu bestätigen. Überdies waren Fragen der nationalen Sicherheit ganz gewiss ein Faktor bei der Entscheidung des Präsidenten.

Kennedy nahm den Fehdehandschuh ein Jahr später, am 12. September 1962, in einer Rede an die Nation auf:

Wir haben uns entschlossen, noch in diesem Jahrzehnt zum Mond zu fliegen und noch vieles andere zu tun, nicht weil es leicht ist, sondern weil es schwer ist; weil dieses Ziel dazu dienen wird, das Beste unserer Tatkraft und Fähigkeiten zu organisieren und zu messen, weil wir diese Herausforderung bereitwillig annehmen, nicht aufschieben möchten und vorhaben zu gewinnen.

Und damit begann das Apollo-Programm, das 1963 vom Kongress genehmigt wurde, um amerikanische Astronauten auf den Mond zu schicken. Kennedy erlebte tragischerweise nicht mehr, dass sein Versprechen an die Nation wahr gemacht wurde.

Etlliche amerikanische Präsidenten hatten schon vor Kennedy großen Wert auf die Weltraumforschung gelegt. Dwight Eisenhower reagierte als Erster auf den überraschenden Start von Sputnik im Jahr 1957 durch die Sowjets. Er beschloss, die US-amerikanische Weltraumforschung einer zivilen Behörde zu unterstellen. Der Öffentlichkeit versicherte er zwar, dass Sputnik »nur ein kleiner Ball in der Luft« sei, sorgte aber dennoch dafür, dass ein Jahr später die NASA gegründet wurde. Die Entwicklung von Raumfahrzeugen und Startvorrichtungen wurde organisiert. Das Mercury-Programm wurde ins Leben gerufen, um die Machbarkeit bemannter Flüge in erdnahe Umlaufbahnen als Vorläufer für einen tieferen Vorstoß ins All zu prüfen. Das Programm erreichte mit den ersten bemannten Suborbitalflügen, also nicht vollständigen Erdumkreisungen, seinen Höhepunkt.

Als Eisenhower 1958 die NASA gründete, wurde der Wettlauf ins All eröffnet. Bemannte Erdumkreisungen gaben das Tempo für menschliche

Reisen ins Weltall vor. Im Jahr 1961 war Juri Gagarin der erste Mensch im Weltall, als sein Raumschiff Wostok rund 108 Minuten brauchte, um die Erde einmal zu umkreisen, bevor es mit einem Fallschirm in der Sowjetunion landete. Kaum einen Monat später folgte der erste suborbitale Weltraumflug eines Amerikaners, Alan Shepard, in einer Mercury-Kapsel, die nur 15 Minuten in der Luft blieb.

Wie der Weltraumpionier Wernher von Braun damals sinngemäß prognostizierte: Um Schritt zu halten, müssen die USA wie der Teufel rennen.

Wenig später folgten von Mercury unterstützte Orbitalflüge. Die Mercury-Missionen führten zu bemannten Erdumkreisungen. Der erste Flug umfasste im Jahr 1962 drei Erdumkreisungen durch John Glenn, der später 25 Jahre als Senator für Ohio dienen sollte. Im Jahr 1963 erreichte das Programm mit einem Flug über 24 Stunden durch den Astronauten Gordon Cooper einen Höhepunkt. Darauf folgte 1965 und 1966 die Raumsonde Gemini, die zwei Astronauten in eine erdnahe Umlaufbahn für längere Weltraummissionen beförderte. Die Menschheit bereitete sich darauf vor, über die Erde hinaus zu reisen.

Die Vereinigten Staaten waren entschlossen, die Sowjetunion einzuholen und zu überholen, und der Mond war eindeutig das nächste Ziel. Eisenhower zögerte jedoch, bei der Raumfahrt mit der Sowjetunion zu konkurrieren. Erst als Präsident Kennedy im Jahr 1961 die Herausforderung aussprach, begann der Wettlauf ins All richtig. Sein Ziel war klar: die Landung von Menschen auf dem Mond. Bis zu Kennedys Eingreifen, das zur Gründung des Apollo-Programms führte, war der Mond ein ferner Traum für bemannte Missionen geblieben.

Selbstverständlich machten Weltraumflüge von Robotern auf den Mond den Anfang. Die Sowjetunion startete die erste Reihe robotergestützter Mondlandungen, die Serie Luna, die von 1959 bis 1976 lief. Insgesamt gab es sieben weiche Luna-Landungen. Das sowjetische Raumfahrtprogramm gipfelte zum großen Teil deshalb nicht in bemannten Landungen, weil die Sowjets es versäumten, rechtzeitig ein Raumschiff für schwere Lasten zu entwickeln, um mit der NASA zu konkurrieren. Die sowjetische Raumfahrtbehörde hatte mit einem großen Vorsprung

bei erdnahen Orbitalflügen begonnen, konnte jedoch mit den Apollo-Landungen von 1969 bis 1972 nicht mithalten. Als die technische Kluft zwischen den beiden Ländern wuchs, wurden politische Überlegungen in der Sowjetunion wichtiger. Ihr bemanntes Mondprogramm wurde im Jahr 1974 eingestellt.

Die bemannten Mondmissionen der USA erfolgten in mehreren Phasen. Zuerst wurde eine Reihe von Robotermissionen ausgeschickt, um das Projekt vorzubereiten. Das Mondprogramm Ranger der NASA begann 1961 mit einem Raumschiff, das mit Fernsehkameras ausgestattet war, um mögliche Landstellen zu erkunden. Nach einer Reihe gescheiterter Mondlandungen wurde es fünf Jahre später durch das Mondprogramm Surveyor abgelöst. Dieses Raumschiff landete weich auf dem Mond und untersuchte die Zusammensetzung seiner Oberfläche. Noch im selben Jahr begann der Start einer neuen Reihe von Mondsonden, um nach möglichen Landeplätzen für künftige bemannte Missionen zu suchen.¹

Das Apollo-Programm feierte 1969 mit den ersten bemannten Mondlandungen einen großen Triumph. Alle Apollo-Landungen erfolgten mit Saturn-V-Startraketten. Das dreistufige Raumfahrzeug vom Typ Saturn-V war 110 Meter hoch und hatte ein Gesamtgewicht von fast 3000 Tonnen. Über 90 Prozent des Gewichts machte der flüssige Treibstoff aus. Die dritte Stufe wurde von einer erdnahen Umlaufbahn aus gezündet und katapultierte die Raumkapsel Apollo zum Mond. Sie hatte eine 50 Tonnen schwere Fracht an Bord, darunter die Mondfähre. Außerdem gehörte das Kommandomodul dazu, das in einer Mondumlaufbahn blieb, um die Astronauten sicher zur Erde zurückzubringen. Der Höhepunkt der ersten Phase der bemannten Mondforschung war die Landung von Apollo-11 im Jahr 1969 im Mare Tranquillitatis (lateinisch für »Meer der Ruhe«). Neil Armstrong und Buzz Aldrin vollführten vor einem weltweiten Publikum die ersten Mondspaziergänge.

Insgesamt landeten sechs bemannte Apollo-Missionen auf dem Mond. Jede beförderte drei Astronauten gut 384 000 Kilometer durch das Weltall und brachte sie sicher wieder zurück. Auch wenn die Vereinigten Staaten die Mondforschung noch jahrzehntelang dominierten, wurde das Pro-

gramm bemannter Mondlandungen nach nicht einmal vier Jahren beendet. Die letzte bemannte Mission zum Mond fand 1972 statt. Saturn-V flog 1973 zum letzten Mal, als sie die Rakete Skylab auf eine Umlaufbahn brachte, einen Vorläufer zur ISS.

Die Bahn von Skylab nahm langsam ab, und im Jahr 1979 löste sich die Raumstation beim Wiedereintritt in die Erdatmosphäre auf. Der Hagel von Trümmern erstreckte sich über den Westen Australiens und Teile des Indischen Ozeans. Der Nachfolger, die ISS, sollte erst im Jahr 1998 in eine erdnahe Umlaufbahn gebracht werden. Die ISS zeichnet eine noch heute anhaltende internationale Zusammenarbeit aus. Russland startete das erste Modul der ISS von Baikonur in Kasachstan aus auf einer Rakete vom Typ Proton, und Monate später unternahm die Sonde Endeavour, das fünfte und letzte Raumschiff des NASA-Programms Space Shuttle, den ersten bemannten Flug zur ISS. Aufenthalte über einen längeren Zeitraum begannen im Jahr 2000.

Das Apollo-Programm hatte mit sechs erfolgreichen Mondlandungen von Astronauten seinen Höhepunkt erreicht, doch die Unterstützung für das Programm hielt nicht an. Lyndon Johnsons Programm »Great Society« hatte Vorrang vor den Ausgaben für die Raumfahrt, zumindest was die bemannte Mondforschung anging. Somit ließ sich das riesige Budget für Weltraumforschung nicht rechtfertigen. Mit dem Ende der Ära schwerer Trägerraketen erwies sich Saturn-V als ein zu heikles und kostspieliges Projekt, um es weiterzuverfolgen. Nichtsdestotrotz hatten die Vereinigten Staaten nur zwölf Jahre nach der Erdumkreisung durch Sputnik, knapp 500 Kilometer über der Erde, den Wettlauf zum Mond gewonnen.

RÜCKKEHR ZUM MOND

Heute forcieren die großen Raumfahrtbehörden die Rückkehr zum Mond. Sie werden jahrzehntelang die Oberfläche untersuchen und wollen anschließend zur Nutzung der Ressourcen übergehen. Werden die damit verbundenen enormen Kosten das Mondforschungsprogramm behindern oder einschränken? Sind wissenschaftliche Projekte zum Scheitern

verurteilt, sollte es zu Kürzungen bei der staatlichen Finanzierung kommen? Werden militärische Vorrechte den Ausschlag geben? Kommerzielle Ziele werden vermutlich überwiegen, und die Mondforschung wird unweigerlich darunter leiden, aber hier ist das letzte Wort noch nicht gesprochen. Der Raum auf der Mondoberfläche ist zwar begrenzt, zumindest die Plätze mit der für große Teleskopprojekte nötigen Qualität, doch der verfügbare Raum müsste ausreichen.

Dank der internationalen Konkurrenz um Bodenschätze werden nunmehr ernsthaft Pläne für die Rückkehr auf den Mond in Betracht gezogen.² Nach einer optimistischen Perspektive dieses Wettbewerbs werden Wissenschaft und Aktivitäten wie Weltraumtourismus und Bergbau gemeinsam die lunaren Ressourcen nutzen, und die Wissenschaft wird letztlich von der dafür erforderlichen Infrastruktur profitieren. Damit es zu dieser Komplementarität kommt und damit die unberührte Mondumgebung erhalten bleibt, sind internationale Abkommen jedoch unerlässlich.

Ein US-Präsident nach dem anderen rühmte zwar den Wert der Erforschung des Weltalls, beschränkte sich jedoch auf robotergestützte Unternehmungen, die das Sonnensystem erkundeten. Die Kosten waren das alles beherrschende Thema. Die Lage sollte sich erst ändern, als eine ernst zu nehmende internationale Konkurrenz auf die Bühne trat. Mit dem Mitbewerber China werden nunmehr wiederum militärische Überlegungen angestellt, doch vorerst liegen sie auf Eis, weil kommerzielle Aspekte überwiegen. Das enorme Interesse an Weltraumtourismus und lunaren Bergbauprojekten mag futuristisch erscheinen, es könnte am Ende aber durchaus heißen: Wer zuerst kommt, mahlt zuerst.

In dem Jahrzehnt nach den Apollo-Jahren gab es einen Moment echter internationaler Zusammenarbeit. Das Space Shuttle wurde während der Regierung Nixon entwickelt. Im Jahr 1984, unter Ronald Reagans Führung, begann dann die Planung und Konstruktion einer Raumstation in einer Umlaufbahn um die Erde. Deren Vollendung sollte über ein Jahrzehnt dauern.

Als die Kosten Anfang der 1990er-Jahre überhandnahmen, musste die neu angetretene Regierung von Bill Clinton und Al Gore eine schwierige Entscheidung treffen. Um das NASA-Budget zu schonen, beschlossen

sie, neue Partner ins Boot zu holen, und somit wurde die neue Raumstation zur International Space Station. Sowjetische und NASA-Astronauten teilten sich die Besatzung und die Transportkosten, und andere internationale Behörden, die Ambitionen in der Raumfahrt hegten, schlossen sich als Partner an, darunter Behörden in Europa, Kanada und Japan. Die erste gemeinsame amerikanisch-russische Besatzung lebte im Jahr 2000 in der ISS, und seither war sie ständig bemannt.

Doch die ISS, die auf einer erdnahen Umlaufbahn kreist, muss irgendwann abgelöst werden. Sie war schon immer ein hervorragendes Laboratorium für die Ausbildung von Astronauten auf fernere Weltraumabenteuer. Nach dem Auslaufen des Space-Shuttle-Programms im Jahr 2011 leistete die NASA einen Beitrag zur Wartung der Raumstation, indem sie Räume auf dem russischen Raumschiff kaufte. Damals wurden neue Pläne ausgearbeitet, und die Vereinigten Staaten hatten wiederum großartige Ambitionen. Präsident George W. Bush hatte im Jahr 2004 angekündigt, dass das bemannte Raumfahrtprogramm der NASA »mit der Rückkehr von Menschen auf den Mond bis zum Jahr 2020« starten werde, »zur Vorbereitung auf die bemannte Erkundung des Mars und anderer Ziele«.³

Unter aufeinanderfolgenden US-Regierungen ist der Zeitplan für die bemannte Raumfahrt immer wieder verlängert worden. Und als sich realistische Einschätzungen durchsetzten, galt dies auch für den Zeitplan für jeden Zielort jenseits des Mondes. Mit der Entwicklung kommerzieller Raumschiffe ist nunmehr ein gravierender Wandel eingetreten. Elon Musks Falcon 9 von der Firma SpaceX dockte als erstes kommerzielles Raumschiff an der ISS an. Der Einsatz eines Versorgungsraumschiffs mit Vorräten und Experimenten im Umfang von 3 Tonnen folgte wenig später. Das bemannte Raumschiff Dragon beförderte im November 2020 vier Astronauten zur ISS. Die kommerzielle Nutzung der bemannten Raumfahrt hat inzwischen begonnen, und kommerzielle Missionen zum Mond werden mit Sicherheit folgen.

Gleichzeitig hat China Pläne für den Bau einer neuen Raumstation in einer erdnahen Umlaufbahn angekündigt. Das ist keineswegs das einzige Ziel Chinas. Seine Nationale Raumfahrtbehörde strebt, neben anderen Mondprojekten, einen bemannten Außenposten auf dem Mond an.

Um nicht überholt zu werden, erklärte US-Präsident Donald Trump, die nächsten US-Astronauten, die abheben, würden zu unserem felsigen Trabanten fliegen. Im Jahr 2021 billigte sein Nachfolger Joe Biden das Programm Artemis der NASA, das den Betrieb einer umkreisenden

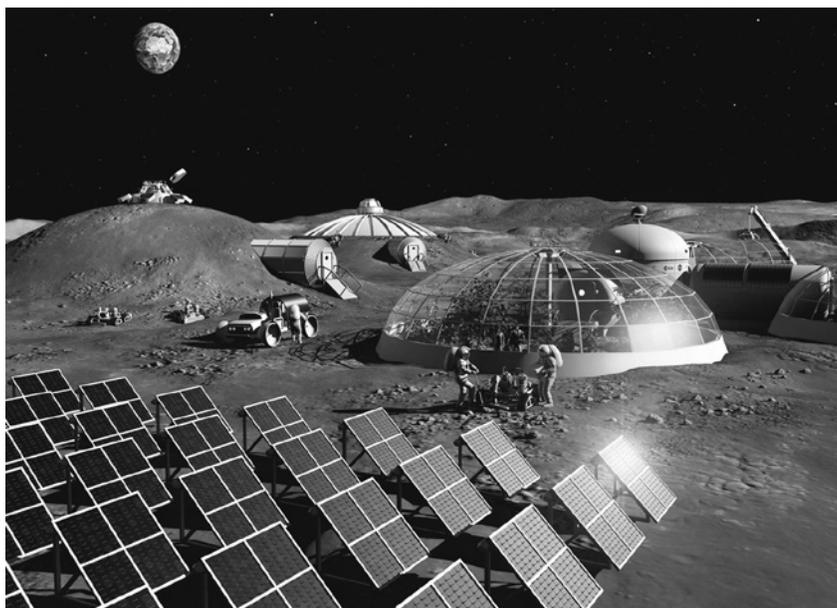


Abbildung 1: Wie Licht, Wasser und Aufbauten auf dem NASA-Basislager Artemis auf dem Mond beschafft werden. Amerikanische Astronauten werden ihre ersten Schritte in der Nähe des Südpols des Mondes machen, einer Region, wo es ewiges Sonnenlicht, eine extreme Kälte, gleichzeitig aber dunkle Stellen und gefrorenes Wasser gibt. Der nächste Sprung der NASA in den interplanetaren Raum wird von dort aus angetrieben, möglicherweise bereits 2026. Die Bauarbeiten werden über den Einsatz von Mondautos mit 3-D-Druckern geleistet, aus Solarzellen wird Energie gewonnen, und Lebensmittel werden in Treibhäusern produziert werden.

Bildnachweis: Bild von P. Carril, European Space Agency, »ESA Opens Oxygen Plant – Making Breathable Air out of Moondust«, 17. Januar 2020, <https://sci-techdaily.com/esa-opens-oxygen-plant-making-breathable-air-out-of-moondust/>.

Raumstation samt Mondbasen vorsieht, die sich die geringe Schwerkraft des Mondes zunutze machen. Artemis wird dauerhaft bemannt sein und soll Reisen in das ganze Sonnensystem erleichtern. Außerdem genehmigte Biden auch den neuesten Ableger der US-amerikanischen Streitkräfte: die United States Space Force.

Sowohl China als auch private Unternehmer in den Vereinigten Staaten schwärmen von dem Abbau von Bodenschätzen auf dem Mond. Es gibt dort hochwertige Ressourcen, die geschürft werden können, darunter seltene Erden und Halbleitermaterialien, deren terrestrische Abbaukapazität begrenzt ist. Ein zentrales Projekt wird die Herstellung von Raketentreibstoff aus lunarem Eis sein, eine Vorbedingung für die weitere Erforschung des Weltalls. Große Siedlungen auf dem Mond sind geplant. Die ESA hat den Aufbau eines dauerhaften, bewohnten Dorfes am lunaren Südpol angeregt. Als erster Schritt ist ein Programm für die Gewinnung lunaren Baumaterials aus Wasser und Regolith eingeleitet worden, die beide von Natur aus auf dem Mond verfügbar sind.

Was ist seit Apollo passiert? China liegt bei dem derzeitigen Wettlauf auf den Mond vorn. Die erste chinesische Robotersonde landete 2013 auf dem Mond. Chang'e-3 hatte ein Mondgefährt an Bord, das kurze Zeit in Sinus Iridum operierte, einer Region dunkler Lavaströme im Hochland des Mondes. Diese Region wird für die künftige Besiedelung in den benachbarten riesigen Lavahöhlen in Betracht gezogen. Die erste Landung auf der abgewandten Seite erfolgte im Januar 2019. Ein Mondgefährt an Bord von Chang'e-4 landete in dem riesigen Krater Von Kármán, der einen Durchmesser von rund 186 Kilometer hat. Er ist Teil des Aitken-Beckens am Südpol, das etwa 2500 Kilometer misst. Wie wir sehen werden, haben insbesondere die Krater an den lunaren Polen kommerzielles und wissenschaftliches Potenzial.

Unterdessen hat die NASA sorgfältig tiefgefrorene und vakuumverpackte Proben des Mondbodens aufbewahrt, doch einige der von Apollo vor fünfzig Jahren gesammelten Bodenproben weisen einen gewissen Verfall auf, der vermutlich durch die Kontamination mit Wasserdampf verursacht wurde. Die NASA hat derzeit ein Monopol auf die Erfor-

schung der Mondoberfläche, aber wie lange noch? China holt rasch auf. Ende 2020 brachte die Mission Chang'e-5 Proben lunaren Gesteins auf die Erde. Etwa 2 Kilogramm Gestein wurden an einen Landeplatz in der Inneren Mongolei transportiert.

Das Gelände auf dem Mond, das in den ersten Jahren von Apollo-15, 16 und 17 abgedeckt wurde, war begrenzt. Wir müssen Proben von neuen Orten mit unterschiedlicheren geologischen Daten bergen. Unberührte neue Proben dürften die Anstrengungen erleichtern, den geologischen Kontext und die Geschichte des lunaren Bodens und Gesteins besser zu verstehen. Während wir neue Erkenntnisse über die Entstehung des Mondes gewinnen, lernen wir möglicherweise nebenbei etwas über das Potenzial des lunaren Bergbaus.

DIE NÄCHSTE STATION DER MENSCHHEIT

Der Weg weist eindeutig in Richtung Erforschung und Nutzbarmachung des Mondes.⁴ Es könnte ein Jahrhundert dauern, bis wir dieses Ziel erreichen, doch der Prozess ist eingeleitet, und alle großen Raumfahrtbehörden beteiligen sich eifrig an dem Wettlauf zum Mond. Was sollten wir unternehmen, wenn wir uns auf ein Erforschungsprogramm einlassen?

Es gibt auf dem Mond Bodenschätze, die abgebaut werden können. Auf der Erde gehen die leicht verfügbaren Vorräte an Erzen wie seltenen Erden zur Neige, die in der Elektronikindustrie eine zentrale Rolle spielen. Es könnte zwar noch Reserven für Jahrhunderte auf der Erde geben, aber wir sollten langfristig planen. Bergwerke sind unter Umständen toxische Umgebungen. Eine Vermeidung von Umweltverschmutzung wird unerlässlich sein. Die lunaren Bodenschätze stellen an uns noch andere Herausforderungen, aber der Umweltschutz wird eine wichtige Rolle spielen, sofern er von Anfang an berücksichtigt wird.

Unsere Visionen für die künftige Erschließung des Mondes umfassen bereits Pläne für industrielle Nutzungen, die von der Fertigung in Umgebungen mit niedriger Schwerkraft bis hin zum Abbau von seltenen Erden und der Treibstoffproduktion für interplanetare Reisen reichen. Es

besteht eine gewaltige Nachfrage nach lunaren Projekten, zum größten Teil, weil der Mond beispiellose Chancen für Unternehmer bietet. Diese Chancen werden, sowohl über menschliche als auch über robotergestützte Nutzung, um die Mitte des 21. Jahrhunderts verwirklicht werden.

Der Mond birgt die Option einer potenziell riesigen Tourismusindustrie. Während die Menschheit nach neuen Herausforderungen sucht, bietet der Mond atemberaubende neue Horizonte für Freizeit- und Sportaktivitäten. Die kommerziellen Aspekte dieser Aktivitäten werden Investitionen in entsprechende Projekte fördern. Mondreisen für das Massenpublikum werden in den ersten Jahrzehnten noch nicht angeboten werden – nicht solange die aufgestaute Nachfrage nach Luxustourismus befriedigt wird. Der Mond wird anfangs der reichen Oberschicht vorbehalten sein, doch im Laufe der Zeit wird sich das mit Sicherheit ändern, sobald günstige Weltraumfahrzeuge entwickelt werden. Riesige Freizeit- und Vergnügungsparks werden auf dem Mond gebaut werden, und man wird günstige Unterkünfte errichten, um das erforderliche Personal für einen Massentourismus unterzubringen. Im kommenden halben Jahrhundert scheint der Mond geradezu prädestiniert für solche Aktivitäten, mit kommerzieller Unterstützung.

Aufgrund der geringen Schwerkraft und der Anwesenheit gefrorenen Wassers sind Pläne für lunare Wohnsiedlungen entwickelt worden. Der Mond ist vielleicht nicht die ideale Lösung für das Problem der Überbevölkerung der Erde, weil ein großer Teil der Oberfläche unbewohnbar ist. Es ist kaum vorstellbar, dass die Mondoberfläche große Zahlen dauerhafter Bewohner abgesehen von unverzichtbaren Arbeitskräften aufnimmt. Sie bietet jedoch einige reizvolle Grundstücke mit relativ gemäßigttem Klima, insbesondere in den polaren Regionen. Und den reichsten Zehntausend der terrestrischen Gesellschaft dürfte es außerordentlich schwerfallen, der Versuchung zu widerstehen, auf dem Mond einen Nebenwohnsitz zu bauen.

Es gibt Unmengen an Mondstaub, der sich über Milliarden von Jahren hinweg durch die Einschläge von Meteoriten ansammelte; und dessen Schleifwirkung schafft eine Umgebung, die für den reibungslosen Lauf von Maschinen alles andere als ideal ist. Man könnte den Staub zwar

ohne Weiteres durch findige Aktivitäten über die Oberfläche anheben, doch das würde eine potenziell gefährliche Umgebung schaffen, insbesondere mit Blick auf die pulmonale Gesundheit langfristiger Bewohner. Man wird unweigerlich effektive Filtermethoden entwickeln müssen, sobald lunare Teleskope gebaut werden.

Ein positiver Aspekt des Staubs ist jedoch, dass er einen idealen Grundstoff für die Entwicklung robusten Baumaterials bietet. Mit dem einzigartigen Vorrat an seltenen Elementen ermöglicht Mondstaub es, dass kommerzielle Bergbauprojekte durchführbar werden. Einzigartige wissenschaftliche Projekte sollten mit ihnen einhergehen.

Energie ist eine wesentliche Begleiterscheinung für Oberflächenererschließung. Ein Vorteil der Mondoberfläche ist der reiche Vorrat an Sonnenenergie, den sie liefern kann. Womöglich werden die Krater an den Polen, deren hohe Ränder dauerhaft von Sonnenlicht angestrahlt werden, die ersten Orte für die Erschließung sein. Die polaren Krater sind die bevorzugten Orte für den Bau erster Mondbasen, weil viele von ihnen zwar dauerhaft im Schatten liegen – was sie zugleich zu attraktiven Orten für Teleskope macht –, jedoch eine unerschöpfliche Quelle an Sonnenenergie auf den nahen, hohen Kraterhängen besitzen, wo die Sonne nie untergeht. Zudem ermöglichen deren Eisvorkommen vor Ort Baueinrichtungen.

Mondbeben werden durch ein leichtes Schrumpfen der Mondkruste im Lauf von Millionen von Jahren verursacht, im Verbund mit dem Anstieg der Spannungen durch die Wirkung der entgegengesetzten Gezeitenkräfte der Erde und der Sonne auf die Dehnung der Mondkruste. Die Kruste dehnt sich im Lauf von 100 Jahren vielleicht um 10 Zentimeter aus, aber das reicht, um Faltungen hervorzurufen – etwa Störungen an der Oberfläche sowie leichte Mondbeben. Ihre Stärke, die einen Wert von bis zu 5 auf der Richterskala für Erdbeben erreicht, wird von den Seismometern gemessen, die bereits von den Apollo-Astronauten gelegt wurden.

Schwere Mondbeben sind offenbar selten. Es gibt jedes Jahr Hunderte schwacher Mondbeben – ab 2 auf der Richterskala –, aber es gibt auch jedes Jahr Millionen vergleichbarer Erdbeben. Aufgrund des Fehlens einer umfassenden tektonischen Aktivität ist die Mondoberfläche