

Nebel, Florian M.: Die Besiedlung des Mondes: technisch machbar, finanziell profitabel, logisch sinnvoll. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag, 2017. 259 Seiten. ISBN 978-3-7843-5487-3

Der Physiker Dr. Florian Nebel befasst sich mit der zukunftsweisenden Idee einer Besiedlung des Mondes. Er geht dabei auf die Gründe für eine Mondbesiedlung ein und erklärt, wie diese ablaufen könnte. Außerdem beschäftigt er sich mit den Kosten und der Frage der Finanzierung eines solchen Projekts. Der in diesem Buch vorgestellte Plan ist mit den gegenwärtigen technischen Möglichkeiten realisierbar, z.B. ohne die Entwicklung neuer Trägerraketen. Florian Nebel greift dabei nach eigener Aussage die russische Raumfahrtphilosophie auf, Produkte weiter statt neu zu entwickeln.

Am Anfang des Buches steht ein historischer Abriss von Astronomie und Raumfahrt von den Anfängen nächtlicher Himmelsbeobachtung bis zum Ende der Space-Shuttle-Flüge (S. 7-17).

Das Apollo-Mondfahrtprogramm hat auf den heutigen Dollar-Wert umgerechnet ca. 150 Mrd. Dollar gekostet. Die Besiedlung des Mondes sollte nach Vorstellung des Autors eine gemeinsame internationale Anstrengung nach dem Vorbild der Internationalen Raumstation ISS sein, um die Kosten überschaubar und jedes der beteiligten Länder tragbar zu gestalten. Gründe für eine Mondsiedlung können sein:

- Das Überleben der Menschheit bei einer irdischen Katastrophe (z.B. durch Meteoriteneinschlag oder Ausbruch eines Supervulkans) zu gewährleisten.
- Die Besiedlung des Mondes als erster Schritt für die Ausbreitung der menschlichen Zivilisation auf andere Himmelskörper; z.B. als Testfeld für eine spätere Mars-Besiedlung.
- Der Mond als Standort für optische oder Radioteleskope oder als Ort für wissenschaftliche Experimente; der Mond verfügt über keine seismische Aktivität, kein Magnetfeld und keine Atmosphäre („natürliches“ Vakuum).
- Der Mond als Ziel für touristische Unternehmungen.
- Der Mond kann als Basis für die weitere Erforschung des Weltraums dienen, da Raketenstarts erheblich einfacher sind als von der Erde: „Die Fluchtgeschwindigkeit des Mondes beträgt mit 2,4 km/s weniger als ein Viertel der irdischen, Auf die benötigte Energie umgerechnet ist für einen Start vom Mond sogar nur 1/22 der Energie notwendig, die ein Raketenstart von der Erde verbraucht.“ (S. 27) Der Raketentreibstoff (z.B. pulverförmiges Aluminium mit flüssigem Sauerstoff) könnte auf dem Mond hergestellt werden und außerdem gibt es dort große Vorkommen an Titan zur Fertigung von großen Bauteilen für zukünftige Raumschiffe.

Indirekt könnte ein Mondbesiedlungs-Programm durch Spin-off-Technologien auch für die irdische Wirtschaft von Nutzen sein. Der Autor nennt Beispiele für solche Technologien aus dem Apollo-Programm, wie gefriergetrocknete Lebensmittel, feuerfeste Kleidung und Wasserfilter (s. S. 32 f.).

Im nächsten Kapitel gibt es einige Daten zum Mond, von denen nachfolgend einige ausgewählt wurden:

- „Der Erdmond besitzt 60 % der Dichte der Erde und 27 % ihres Durchmessers.“ (S. 37)
- „Am Äquator sinken die Temperaturen im Schatten auf 100 K (-173 °C) und steigen in der Sonne auf 390 K (117 °C). An den Polen fallen die Temperaturen sogar auf 70 K (-203 °C) und steigen für die meisten Regionen lediglich auf 230 K (-53 °C).“ (S. 37)
- Der Mond wendet der Erde immer die gleiche Seite zu, sodass dort die Sonne ungefähr alle 14 Erdtage einmal auf und unter geht. Am Nord- und Südpol gibt es Berge, die kontinuierlich von der Sonne beschienen werden, und Täler mit ewiger Finsternis, in denen gefrorenes Wasser vermutet wird.
- Das Vakuum beträgt 10^{-7} bis 10^{-10} Pascal (zum Vergleich auf der Erde 10^5 Pascal). „Die Restgaskomposition besteht aus Argon, Helium, Natrium, Kalium, Wasserstoff und Radon.“ (S. 38)
- „Der Abstand vom Mond zur Erde variiert zwischen 363.295 km und 405.503 km, er wächst jedes Jahr um 3,82 cm.“ (S. 38)
- „Ähnlich der Erde ist der Mond in Schichten aufgebaut. In seinem Innersten befindet sich ein fester Eisenkern mit 488 km Durchmesser, umgeben von einem flüssigen Eisenkern mit 600 km Durchmesser. Zwischen Mondkruste und dem Kern liegt der Mondmantel aus Basaltgestein. Die Mondkruste aus Anorthosit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) ist bedingt durch den synchronen Orbit um die Erde an der Vorderseite 70 km stark und an der Rückseite 150 km. Die Oberfläche ist von einer zum Teil mehrere Meter dicken Regolithschicht bedeckt. Bei Regolith handelt es sich um lockeres Gesteinsmaterial, gebildet durch Meteoriteneinschläge aus dem darunter liegenden Krustenmaterial.“ (S. 40)
- Die Mondoberfläche besteht aus Bergketten (Terra), Lavabecken (Maria, v.a. auf der Vorderseite), Rillen (Rima, eingestürzte Lavaröhren) und Kratern (v.a. auf der Rückseite durch Meteoriteneinschläge).
- Aufgrund der fehlenden Atmosphäre sind Mondbewohner schutzlos dem Sonnenwind ausgeliefert. Sofern keine geeigneten Schutzmaßnahmen getroffen werden, wird bereits bei einem Aufenthalt von 60 Tagen die auf der Erde geltende maximal zulässige Strahlendosis von 150 mSv erreicht.

Auf den Seiten 42-49 stellt der Autor die Missionen zur Erkundung des Mondes durch die USA (Ranger- und Apollo-Programm) und die Sowjetunion (Luna-Programm), sowie die jüngsten Anstrengungen von China und Indien vor.

Wasserstoff könnte auf dem Mond in chemischer Verbindung als OH-Gruppe oder als Wassereis in Kratern vorhanden sein. „In welcher Form dieses Eis in den Kratern vorliegt, ist nach wie vor unklar. Am wahrscheinlichsten dürfte eine Beimischung von kleinen Eisbrocken im Kraterregolith sein. Große gletscherähnliche Eismassen sind unwahrscheinlich. Im Rahmen dieses Buches wird Wasser auf dem Mond daher nicht als gegeben angenommen.“ (S. 51)

Das folgende Kapitel widmet sich der Trägerraketentechnik, beschreibt die Module der Internationalen Raumstation ISS und stellt bemannte und unbemannte Raumschiffe vor.

<i>Rakete</i>	<i>∅ in m</i>	<i>Nutzlast zu LEO/GEO in to</i>	<i>Startkosten in Dollar</i>	<i>Startkosten zu LEO/GEO in Dollar / to</i>
Ariane 5 (ESA)	5,4	21 / 10,5	220 Mio.	10,5 Mio. / 20,9 Mio.
Atlas V (USA)	3,81	18,81 / 8,9	194 Mio.	10,3 Mio. / 21,8 Mio.
Delta IV (USA)	5,0	28,79 / 14,22	300 Mio.	10,4 Mio. / 21,1 Mio.
Falcon 9 (USA)	3,66	22,8 / 8,3	62 Mio.	2,7 Mio. / 7,5 Mio.
H-II B (Japan)	5,2	19 / 8	110 Mio.	5,8 Mio. / 13,8 Mio.
Chángzhēng (China)	3,35	8,4 / k.A.	62 Mio.	8,3 Mio / k.A.
Proton (RUS)	4,15	21,6 / 6,15	85 Mio.	3,9 Mio. / 13,8 Mio.
Sojus (RUS)	3,7-4,1	8,1 / 2	55 Mio.	6,8 Mio. / 27,5 Mio.
Zenit (UKR)	3,9	13,74 / 6	45 Mio.	3,2 Mio. / 6,5 Mio.

LEO = niedrige Erdumlaufbahn, GEO = geostationäre Erdumlaufbahn

Die ISS ist der einzige von Menschen dauerhaft bewohnte Ort im Weltraum. Die Kosten für den Betrieb der Raumstation betragen ca. 2,8 Mrd. US-Dollar pro Jahr und werden von den USA, Russland, Europa (ESA), Japan und Kanada getragen. Die Konstruktion ist in Module unterteilt, die für den Betrieb einer Mondstation kostengünstig nachgebaut werden könnten, weil keine Entwicklungskosten anfallen. Es handelt sich um die folgenden Module:

- Integrated Truss Structure (ITS): Die von den USA gefertigte Integrierte Gitterstruktur ist eine starre Leichtmetallstruktur mit zusätzlichen Querstreben und bildet das Rückgrat der Station. Es gibt vier große Solarelemente, die um 360° gedreht werden können, um eine optimale Sonnenausrichtung zu gewährleisten. Mit einer Gesamtspannweite von 73 m können die Paneelen 32,8 kW Gleichstrom erzeugen, die in zwei Nickel-Wasserstoff-Akkus gespeichert werden. „Diese stellen den Strom – dessen Spannung auf etwa 140 V geregelt wird – für die Station zur Verfügung, während sich die ISS im Schatten der Erde befindet. [...] Mit 38.000 Lade-Entlade-Zyklen haben die Akkus eine veranschlagte Lebensdauer von sechseinhalb Jahren.“ (S. 67) Außerdem gibt es auf der Gitterstruktur noch zwei CETA-Plattformen (Crew and Equipment Translation Aid) als Transportsystem für Raumfahrer und kleinere Nutzlasten.
- Das russische Modul Sarja hatte bis zum Jahr 2000 die komplette Energieversorgung, Lageregelung und Klimasteuerung für die Raumstation übernommen und dient heute als Treibstoffspeicher und Lagerraum.
- Swesda ist das russische Wohn- und Navigationsmodul, an dem bemannte und unbemannte Raumschiffe andocken können.
- „Im US-Labormodul Destiny werden Experimente auf den Gebieten Mikrogravitation, Lebenswissenschaften, Biologie, Ökologie, Erderkundung, Weltraumforschung und Technologie ausgeführt.“ (S. 70) Die Aluminium-Hülle ist zusätzlich mit einem Material zum Schutz vor Mikrometeoriten

- umgeben, das dem von schusssicheren Westen ähnelt, und verfügt über ein großes Fenster. Außerdem enthält das Modul eine Reihe von Service-Racks, wie z.B. für interne Kommunikation, Lageregelung, Lebenserhaltung und Feuerdetektion.
- Canadarm 2 ist ein von Kanada entwickelter und gebauter Multifunktions-roboterarm, der bis zu 116 t bewegen kann. Neben dem Zusammenbau, Wartungs- und Reparaturarbeiten kann er zur Bedienung von externen Anlagen und Experimenten genutzt werden.
 - Das amerikanische Modul Quest dient als Ausstiegsschleuse für Außenbordarbeiten. An der Außenseite der Schleuse befinden sich je zwei große Sauerstoff- und Stickstofftanks, die mit einem mehrschichtigen Meteoritenschutz ausgestattet sind.
 - Das russische Modul Rasswet dient primär als Forschungsmodul mit acht Experimentierarbeitsplätzen.
 - Ebenfalls aus Russland stammt das Kopplungs- und Ausstiegsmodul Pirs.
 - Das Raumlabor Columbus ist der größte Beitrag der ESA zur Raumstation. Es enthält auch drei sog. ISPRs (International Standard Payload Racks) für Lebenserhaltungs- und Kühlsysteme.
 - Das japanische Projekt Kibō besteht aus mehreren Teilen: neben unter Druck stehenden Experiment- und Lagermodulen gibt es auch ein transportables Außenlager sowie einen Roboterarm, der aus einem Hauptarm und einem kleineren Arm für sehr präzise Arbeiten besteht.
 - Das russische Koppelmodul Piosk ermöglicht Ausstiege ins All und externe wissenschaftliche Experimente, wobei es über einen eigenen Kranarm verfügt. Es bietet neben Rasswet, Swesda und Pirs eine vierte Möglichkeit, zum Andocken von Sojus-Raumschiffen und Progress-Versorgungsfrachtern.
 - Der Beobachtungsturm Cupola hat sechs seitlich angebrachte Fenster sowie ein großes 80-cm-Fenster auf dem Dach. „Zu den wichtigsten Aufgaben des Moduls gehören die Steuerung des Roboterarms (Canarm 2), die Kommunikation mit Astronauten während eines Ausstiegs sowie die Beobachtung der Erde und des Weltraums.“ (S. 77)
 - Das in Italien gefertigte Modul Leonardo war als Transportmodul für sperrige Güter vorgesehen und dient heute als Arbeits-, Wohn- und Stauraum für die Astronauten.
 - Der europäische Roboterarm ERA kann Objekte bis auf 5 mm genau positionieren und sich mit bis zu 0,1 m/s entlang der Raumstation bewegen. „Während Canarm 2 überwiegend manuell von den Astronauten gesteuert wird, soll sein europäisches Gegenstück weitgehend selbständig arbeiten. Zu seinen Aufgaben werden unter anderem Inspektion und Videoüberwachung der Station gehören sowie Unterstützung der Astronauten bei Außenbord-einsätzen.“ (S. 78) *[Anmerkung: Aufgrund technischer Probleme ist der Arm erst seit Juli 2021 im All.]*
 - Als letztes ist das russische Forschungsmodul Nauka zu erwähnen, das neben Andockmöglichkeiten für Raumschiffe auch über eine Luftschleuse zum Ausstieg in den Weltraum verfügt. Außerdem gibt es in dem Modul einen Schlafplatz, Wasch- und Toilettenanlagen sowie Lagerkapazitäten.

[Anmerkung: Auch das Nauka-Modul hat aufgrund technischer Verzögerungen erst Ende Juli 2021 an der ISS angedockt. Dazu wurde das Modul Pirs mit einem Progress-Transporter abgekoppelt und anschließend im Pazifik versenkt.]

- Außerdem gibt es drei Verbindungsknoten zwischen den einzelnen Modulen: Unity, Harmony und Tranquility. Letzteres enthält die höchst entwickelten Lebenserhaltungssysteme (Abwasseraufbereitung, Sauerstoffproduktion, Luftfilter, Abfall- und Hygieneabteilungen).

Zum Transport von Menschen und Materialien in den Erdorbit gibt es momentan sechs verschiedene Raumschiffe:

- Die russische Sojus ist seit 1967 im Einsatz und wurde im Laufe der Jahre mehrfach modifiziert. Das Raumschiff kann bis zu drei Personen befördern.
- Progress ist ein russischer, unbemannter und nicht wiederverwendbarer Raumtransporter. Nach dem Ausladen der Fracht an der ISS wird er mit Müll beladen, um dann in der Erdatmosphäre zu verglühen.
- Im Auftrag der ESA wird das Automated Transfer Vehicle (ATV) gebaut. Es ist ebenfalls ein unbemannter, nicht wiederverwendbarer Raumfrachter für Nachschub an Nahrung, Wasser, Ausrüstung, Sauerstoff, Stickstoff und Treibstoff. „Nach dem Andocken wird er zusätzlich für Ausweichmanöver der Raumstation vor eventuell heranfliegenden Trümmern und für die Anhebung der Umlaufbahn – das 'Reboost' - der ISS gebraucht.“ (S. 81)
- Das HTV (H-2 Transfer Vehicle) ist ein japanisches, unbemanntes Versorgungsschiff, das sperrige Gegenstände als Außenlast mitführen kann.
- Die Dragon ist ein wiederverwendbares Fracht-Raumschiff des amerikanischen Unternehmens SpaceX und kann nach dem Wiedereintritt in die Erdatmosphäre mithilfe eines Hitzeschilds und von Fallschirmen wassern. Die Dragon 2 kann bis zu vier (ursprünglich geplant sieben) Raumfahrer befördern.
- Das chinesische Raumschiff Shenzhou kann bis zu drei (ursprünglich geplant vier) Personen befördern und besteht aus einem Orbitalmodul vorne, der Rückkehrkapsel in der Mitte und dem Servicemodul hinten. Zwei Orbitalmodule können aneinandergesetzt auch eine kleine Raumstation bilden.
- Mit dem von NASA und ESA gemeinsam entwickelten Orion Multi-Purpose Crew Vehicle (MPCV) wollen die Amerikaner wieder selbst Menschen zur ISS bringen zu können. „Orion wird in der Lage sein, die Lebenserhaltung aus Bordmitteln für 21 Tage zu betreiben. Darüber hinaus kann es in einem Ruhemodus bis zu sechs Monate im Weltraum verbleiben.“ (S. 85)
[Anmerkung: Durch die Einsparungen der Obama-Regierung hat sich das Projekt verzögert. Der erste unbemannte Testflug zum Mond wird vielleicht im Laufe des Jahres 2022 erfolgen können.]

DER WEG ZU EINER MONDSTATION

Erster Schritt: Besiedlung des Erdorbits

Um von einer niedrigen Erdumlaufbahn in einen höheren Orbit zu wechseln, benötigt man relativ viel Energie. Um vom geostationären Orbit aus das Gravita-

tionsfeld der Erde ganz zu verlassen, wird nur noch relativ wenig Energie benötigt. Eine effiziente Möglichkeit, um in einen höheren Erdorbit zu wechseln, ist der sog. Hohmann-Transfer. Durch Beschleunigung wird die Kreisbahn zu einer Ellipse, deren entferntester Punkt auf dem geostationären Orbit liegt. Sobald das Raumschiff diesen Orbit erreicht, bremst es ab, um auf diesem zu bleiben. „Der Hohmann-Transfer ist am effizientesten für Raumschiffe, die ihre Geschwindigkeit sehr schnell an die Transfargeschwindigkeit anpassen können.“ (S. 89) [Das Prinzip des Hohmann-Transfers mit einer elliptischen Flugbahn kann auch für die effiziente Reise zum Mond genutzt werden.]

Wie oben dargestellt, dient die ISS vorwiegend zur Durchführung wissenschaftlicher Experimente. Um die Besiedlung des Erdorbits voranzutreiben ist die Neuentwicklung eines Treibhausmoduls (Kosten 150-300 Mio. US-Dollar) oder die Umwidmung eines bestehenden Moduls erforderlich. „Die meisten Pflanzen wie Salate, verschiedene Kohlsorten, Tomaten oder Zucchini haben eine Ergiebigkeit von 2 kg/m² bis 4 kg/m² pro Anbausaison. [...] Nimmt man an, dass unter Laborbedingungen drei Ernten pro Jahr möglich sind, und berücksichtigt das schnellere Pflanzenwachstum unter Mikrogravitation, dann erreicht man Erträge von 12 kg/m² bis 24 kg/m².“ (S. 91)

Der Autor regt an, zur Förderung des Weltraumtourismus ein Habitatmodul zu entwickeln, das auf die Nutzung durch bis zu sechs Personen ausgelegt sein soll (Kosten für das Modul ca. 340 Mio. US-Dollar zzgl. Kosten für die Beteiligung am Betrieb der Raumstation). Der Preis für eine Woche im Weltraum läge dann einschließlich Flug bei etwas über 5 Mio. US-Dollar.

Eine Station im Orbit kann als Raumhafen dienen: „Im Stil der ISS können im Erdorbit Raumschiffe konstruiert werden, die die Startkapazitäten aller Raketen vom Erdboden übersteigen. Zusätzlich kann im Erdorbit das Raumschiff gewechselt werden, von einem auf den Flug im Weltraum ausgelegten Raumschiff auf eines, das für die Rückkehr zur Erde optimiert ist. Raumschiffe, die von Mond, Mars oder noch ferneren Zielen zurückkehren, können im Orbit gewartet, repariert und betankt werden. Die Crew und eventuell auch Passagiere können getauscht, Vorräte und Lebensmittel aufgefüllt werden, genau wie bei Schiffen, die einen Hafen anlaufen.“ (S. 95)

Um Material von der erdnahen Umlaufbahn in die geostationäre Umlaufbahn zu bringen, sollte ein Inter-Orbit-Vehikel mit VASIMIR-Triebwerk entwickelt werden. Das Triebwerk kann 65% der elektrischen Primärenergie, die mit Sonnenkollektoren gewonnen werden kann, in Antriebsenergie umsetzen; der Transport von Treibstoff für ein chemischen Triebwerk ist damit nicht erforderlich.

Zweiter Schritt: Flug zum Mond

Für die Reise zum Mond betrachtet der Autor v.a. zwei Treibstoffvarianten:

- LH2/LOX: eine Mischung von flüssigem Wasserstoff und flüssigem Sauerstoff; aufgrund der Eigenschaft von Wasserstoff aus den Tanks zu diffundieren (ca. 1% pro Tag) ist dieser Treibstoff nur für den Start aus einer niedrigen Erdumlaufbahn geeignet.

- RP-1/LOX: für den Start aus dem geostationären Orbit empfiehlt sich ein spezieller Raketen-Treibstoff für die Raumfahrt (Rocket Propellant-1) und flüssiger Sauerstoff.

Als Transportschiff zwischen Erde und Mond kann ein umgebautes Sojus-Raumschiff ohne Wiedereintrittsstufe verwendet werden; bei der Rückkehr vom Mond müssen die Raumfahrer im Erdorbit in das Wiedereintrittsmodul umsteigen. Das Umsteigen erfordert ein konventionelles Abbremsen bei der Rückkehr zur Erde. Will man den Vorteil des treibstoffsparenden Aerobreaking (Abbremsen an der Erdatmosphäre und direkte Rückkehr zur Erde) nutzen, benötigt man die komplette Sojus-Konfiguration.

Bei der Entwicklung eines neuen Antriebsmoduls sollte der Schub etwa 1.000 kN betragen (ein Kilo-Newton entspricht $1.000 \text{ kg} \times \text{m/s}^2$, zum Vergleich ein PKW erreicht etwa 2 kN). Es kann auf zwei Triebwerke zurückgegriffen werden: auf das J2-X, dem Nachfolger des Saturn-V-Triebwerks (448 Sek. Impuls, 1.310 kN Schub), und auf das RS-25, das ehemalige Haupttriebwerk des Space Shuttle (452 Sek. Impuls, 2.279 kN Schub).

Neu zu entwickeln wäre ein Treibstoffmodul mit einem Inhalt von bis zu 11 t (1,54 t LH2 und 8,46 t LOX) sowie ein Wohntankmodul, das nach Entleerung des Treibstoffs auf der Mondoberfläche abgestellt und zu Wohnraum umgebaut werden kann. Für letzteres kalkuliert der Autor Entwicklungskosten von 100 Mio. US-Dollar sowie einen späteren Stückpreis von 25 Mio. US-Dollar.

Um auf dem Mond zu landen bedarf es einer wiederverwendbaren Landefähre in modularer Bauweise, um einzelne Baugruppen leicht austauschen und warten zu können. Die „Phönix“ muss zum Last- und Personentransport geeignet sein. Anfangs soll sie nur Lasten zwischen 2-4 t befördern, aber so erweiterbar bzw. aneinander koppelbar sein, dass sie in einer späteren Besiedlungsphase Lasten von 20 t oder mehr tragen kann. Die Mondfähre soll einem Hubschrauber ähnlich auf dem Mond von einem Ort zum anderen fliegen können. Die Entwicklungskosten für die erste Fähre veranschlagt der Autor auf ca. 700 Mio. US-Dollar und max. 200 Mio. US-Dollar für weitere Fähren; für 1,5 Mrd. US-Dollar sollte eine Version mit 20 t Traglast entwickelt werden.

Die nachhaltigste Möglichkeit der Mondreise erfordert höhere Anfangskosten durch die Entwicklung eines speziellen Landemoduls für längere Aufenthalte auf der Mondoberfläche. Ein solcher „Explorer“ erfordert langfristige Lebenserhaltung (Wiederaufbereitung von Sauerstoff und Wasser), eine Luftschleuse zum Ein- und Ausstieg, Kapazitäten für Materialtransport und mehr Platz für die Crew als im Raumschiff.

Die Raumfahrer würden im Mondorbit vom Sojus-Raumschiff in das Explorer-Landemodul umsteigen. Der „Explorer“ wird mit dem „Phönix“ auf den Mond gebracht; beide verbleiben nach Abschluss einer Mission in einer Mondumlaufbahn. Als Basis für die Entwicklung des Explorers sieht der Autor den Umbau zweier aneinander gedockter Sojus-Raumschiffe und veranschlagt dafür Kosten in Höhe von ca. 350 Mio. US-Dollar.

Dritter Schritt: Bau einer Mondsiedlung

a) Der geeignete Standort

Aufgrund von Satellitenbildern und anderen Daten werden drei Landeplätze ausgewählt, die im Rahmen der Erkundungsphase näher inspiziert werden.

Idealerweise ist die erste Mondsiedlung unterirdisch und wird an einem Steilhang in den Felsen gegraben, sodass ein ebener Zugang besteht. Die Vorteile einer unterirdischen Siedlung sind: es muss kein Baumaterial herangeschafft werden; bereits 40 cm Mondgestein wirken als Strahlenschutz gegen den Sonnenwind; ein Durchschlagen der Wände durch Mikrometeoriten ist nahezu ausgeschlossen; die Anlage kann beliebig erweitert werden; das bei der Erweiterung anfallende Gestein kann als Rohstoff für die Gewinnung von Metallen und Sauerstoff dienen; die Temperaturen unter Tage sind erheblich gemäßigter als an der Oberfläche. Die beiden Nachteile sind: das Graben erfordert schweres Bergbaugerät und Energie; in der Anlage wird es wenig Sonnenlicht geben.

Das Vorhandensein von Wasser wäre für die Standortwahl nur relevant, wenn es sich um größere Mengen handelt, die durch Aufspaltung in Sauerstoff und Wasserstoff auch für die Treibstoffproduktion genutzt werden können. Ansonsten kann das Wasser von der Erde importiert und ein recyclingbasierter Wasserkreislauf etabliert werden.

Um die Gefahr des Verlusts von Atemluft zu begrenzen, ist die Station in getrennte Sektionen einzuteilen, die durch Schotten voneinander getrennt sind. „Ein kontinuierlicher Luftverlust wird sich durch die Absorption von Gasen im Mondgestein ergeben sowie durch Diffusion durch das Mondgestein nach außen. Bedingt durch die hohe Wandstärke werden Diffusionsverluste vermutlich gering sein. Bei der Absorption wird sich nach einiger Zeit ein Gleichgewicht einstellen.“ (S. 134)

Der Autor diskutiert auf den Seiten 135-145 die Vor- und Nachteile von sieben Standorten und fasst seine Einschätzung in einer Tabelle durch die Vergabe von Punkten zusammen:

<i>Standort</i>	<i>Vorteile</i>	<i>Nachteile</i>	<i>Resultat</i>
Mare-Tranquillitatis-Grube	43	8	35
Malapert	40	8	32
Descartes-Berge	32	0	32
Mare-Ingenii-Grube	47	16	31
Shackelton-Krater	39	8	31
Marius-Hills-Grube	33	8	25
Reiner Gamma	20	0	20

Die Südpol-Region bietet den Vorteil ewigen Lichts auf der Sonnenseite der Krater und ewigen Schattens in den Tälern zur Lagerung flüssigen Sauerstoffs. Vom Gipfel des Malapert-Bergs kann man direkt mit der Erde kommunizieren und im Shackelton-Krater werden größere Wasservorräte vermutet.

Für das Gebiet der Lavaröhren spricht, dass sie einen natürlichen Schutz vor Strahlung und weniger stark schwankende Temperaturen bieten. Die Röhren sind

vermutlich groß genug, um die mitgebrachten Module dort direkt aufzustellen, ohne aufwändige Grabungsarbeiten. Unter den drei Gruben bietet diejenige im Mare Tranquillitatis wahrscheinlich die besten Aussichten, zumal sie in einer bereits erforschten Region nahe der Landeplätze von Apollo 11, 16 und 17 liegt. Als dritte Kategorie möglicher Landeplätze sind Orte mit relativ hohem Magnetfeld und damit geringerer Strahlenbelastung (Descartes-Berge und Reiner Gamma). „Hohes Magnetfeld bedeutet im Zusammenhang mit dem Mond Feldstärken von 15 nT (Nanotesla [...]) bis 42 nT, während auf der Erde 25.000 nT bis 65.000 nT vorliegen. Die vergleichsweise geringen Feldstärken reichen jedoch bereits aus, um hochenergetische Teilchen niedriger Masse wie Elektronen und Positronen abzulenken.“ (S. 140) Für die Descartes-Berge spricht u.a. die große Nähe zum Landeplatz von Apollo 16 und eine Erweiterung der Siedlung vom Dollond-Krater in das Descartes-Gebirge hinein. Auch das Mare Ingenii besitzt vermutlich ein lokales Magnetfeld und vereint damit die Vorteile von Grube und Magnetfeld. Die Bewertungen bieten nur Anhaltspunkte, die durch Bodenmissionen vor Ort bestätigt werden müssen. Zum Beispiel müssen Probebohrungen gemacht und das Gestein zur Erde gebracht werden, um die genaue Zusammensetzung, das Ausmaß der Diffusion von Luft in den Felsen und mögliche Ausgasung giftige Stoffe analysieren zu können. Durch Tunnelbauversuche kann neben der Gesteinsbeschaffenheit auch das Werkzeug unter lunaren Bedingungen getestet werden. Die Untersuchung von Bodenproben im Hinblick auf Wasser sollte vor Ort vorgenommen werden, um eine Kontamination auf dem Rückweg zu vermeiden. Die geeigneten Standorte sind gründlich zu vermessen, um eine genaue Stationsplanung zu ermöglichen.

b) Koloniebedarf

Die Mondkolonie sollte eine größtmögliche Unabhängigkeit von der Erde erreichen. Um dies zu erreichen, müssen die ersten Kolonisten bestimmte Fähigkeiten mitbringen:

- An erster Stelle stehen erfahrene Bergleute, die vorzugsweise schon auf der Erde in einem Bergwerk gearbeitet haben, dessen Gesteinsart dem Mondgestein ähnlich ist; zudem haben Bergleute vorteilhafte Charakterzüge, wie Teamgeist, Aufopferungsbereitschaft und Leidensfähigkeit, und sie sind harte körperliche Arbeit und Dunkelheit gewohnt.
- Die Astronauten sollen die mitgebrachte Ausrüstung, Luftschleusen und Lebenserhaltungssysteme warten, reparieren und in Betrieb nehmen. Ihnen obliegen die Führung der Mission und damit verbundene Verwaltungsaufgaben sowie Erkundung der Umgebung und wissenschaftliche Experimente.
- Ein, später zwei Ärzte für die medizinische Versorgung, der/die auch für die Lebensmittelvorräte, Trinkwasserqualität, Luftqualität und humanmedizinische Experimente verantwortlich ist/sind.
- Ein Geologe analysiert das abgebaute Gestein und bestimmt die Grabungsrichtung. Er muss die Tragkraft des Gesteins und den ausreichenden Abstand zu den Außenwänden sicherstellen.
- Ein Kraftwerksingenieur für den Betrieb eines Kern- oder Solarkraftwerks.

- Weitere Handwerker wie Steinmetze*, Maurer, Installateure und Fachkräfte für die Produktion von Gütern.

Eine über den jeweils aktuellen Bedarf hinausgehende Energieversorgung ist wichtig, um das Wachstum der Kolonie nicht zu bremsen. Solarenergie wäre aufgrund der hohen Transportkosten der Anlage von der Erde nur für einen Standort mit ständiger Sonneneinstrahlung am Südpol wirtschaftlich sinnvoll. An anderen Standorten bedarf es wegen der 14 Tage langen Mondnacht einer großen Menge an Lithium-Polymer-Akkumulatoren. Für 1 MW Leistung wären ca. 2.240 t Akkus erforderlich bei Kosten von 70 Mio. US-Dollar pro t.

Für die Besiedlung des Weltraums bieten sich Kernreaktoren an, die allerdings neu entwickelt werden müssen, weil die auf der Erde betriebenen Modelle zu schwer sind. Ein Reaktor im Weltraum muss zudem ohne Schwerkraft und im Vakuum funktionieren, wobei man durch letzteres wahrscheinlich mit weniger Abschirmung auskommt und Gewicht sparen kann. Der Autor kalkuliert für Reaktor und Generator mit Entwicklungs- und Herstellungskosten von ca. 4 Mrd. US-Dollar.

Unabdingbar ist außerdem Wasser, das von der Erde geliefert werden muss, sofern auf dem Mond keine Vorräte gefunden werden. Ferner Luft, wobei eine erdähnliche Sauerstoff-Stickstoffatmosphäre den Transport von 150m³ Luft pro Person und 50 m² erfordert. Die Lebenserhaltungssysteme recyceln CO₂ zu Sauerstoff mittels Elektrolyse, reinigen Wasser und klimatisieren die Luft. In der späteren Produktionsphase kann Sauerstoff beim Gewinnen von Metalloxiden freigesetzt werden.

Pflanzen werden in hydroponischen Gärten, d.h. im Wasser statt auf Erde, angebaut und künstlich beleuchtet. Für jede arbeitende Person ist mit einer Anbaufläche von 50 m² zu rechnen.

Bei Tieren setzt der Autor auf Hühner, die Eier, Fleisch und Federn liefern. Bei Kühen kann das produzierte Methan als Rohstoff dienen und Schweine können als Recycler und Fleischlieferant dienen. Bienen oder Hummeln sind für die Pflanzenbestäubung erforderlich.

[Anmerkung: Eine vegetarische/vegane Ernährung würde wesentlich effizienter sein, da für die Produktion von einem Kilogramm tierischem Eiweiß ca. zehn Kilogramm pflanzliches Eiweiß erforderlich ist. Es gibt Pflanzen, die auch ohne die Bestäubung durch Insekten auskommen.]

Es werden Baumaterialien (Kabel, Lampen, Wasserrohre ect.) benötigt. Als Neuentwicklung sieht der Autor: Gangelemente zur Verbindung der Module, luftdichte Türelemente (selbstschließend bei Druckabfall und mit Durchführungen für Strom- und Wasserleitungen) sowie Fensterelemente (mit Fensterladen und Luftdrucksensor zur Überwachung der Luftdichtheit).

* Steinmetze können typische Alltagsgegenstände wie Schränke, Betten, Tische und Stühle aus Stein herstellen, was den Vorteil hätte, dass diese aufgrund der niedrigen Anziehungskraft auf dem Mond standfester wären als z.B. Gegenstände aus Holz. Wenn Mauersteine mit hoher Präzision nach dem Nut-und-Feder-Prinzip gefertigt werden, könnten mit diesen ggf. sogar luftdichte Gebäude errichtet werden (s. S. 229).

c) Koloniegründung

Der Autor sieht die Gründung in vier Phasen.

1. Welle: Vorbereitung der Kolonie

Im ersten Jahr sollen sechs Flüge stattfinden, mit denen Menschen und Material zum Mond gebracht werden (drei der Flüge sind als unbemannte Versorgungsflüge konzipiert). Hierfür ist die Entwicklung eines Frachtmoduls erforderlich, das ca. 10 Mio. US-Dollar pro Stück kosten soll. Nach Inbetriebnahme des Reaktors kann mit dem eigentlichen Stationsbau begonnen werden. In dieser Phase wird bereits mit den Bergwerksarbeiten begonnen, um die Wohnsituation zu verbessern.

Die Mondsiedlung hat nach einem Jahr das folgende Aussehen:

Vier Wohnmodule und zwei Frachtmodule sind aneinandergesammelt und mit zwei Orbitern verbunden. Daneben gibt es den Reaktor und zwei leere Frachtmodule. In den Berg wurden ein Gemeinschaftsraum (40 m²) und zwei Privatzimmer (jeweils 20 m²) getrieben. Die Kolonie besteht aus sieben Siedlern: 2 Astronauten, 2 Bergleute, 1 Geologe, 1 Mediziner, 1 Reaktortechniker.

2. Welle: Bau der Basis

Im zweiten Jahr sollen drei Flüge stattfinden (davon einer unbemannt). Es werden weitere Bergbauwerkzeuge, Tür- und Fensterelemente, Lebenserhaltungsgeräte usw. angeliefert. Der Bergbau kann jetzt im 2-Schicht-Betrieb erfolgen. „Wohnräume werden entlang der Felskante angelegt, um mit Fensterelementen die Möglichkeit auf Sonnenlichtnutzung zu schaffen. Technikräume und andere Räume, die kein Sonnenlicht benötigen, werden tiefer im Berg untergebracht. Jeder Raum wird mit einem Türelement gesichert, um im Notfall keinen Druck zu verlieren. Auch die Gänge werden in regelmäßigen Abständen durch Türelemente gesichert. Im Besonderen wird der Bereich, in dem die Bergleute arbeiten, von dem Bereich getrennt, der bereits bewohnt ist.“ (S. 171) Am Ende dieser Phase stehen im Berg die folgenden Räume zur Verfügung: drei Privatzimmer, ein Gemeinschaftsraum, eine Küche, ein Raum für Bad und Toiletten, zwei Materiallager und zwei Lebensmittellager. Die Anzahl der Siedler ist auf 11 angewachsen: 3 Astronauten, 4 Bergleute, 1 Geologe, 1 Mediziner, 1 Reaktortechniker und 1 Steinmetz.

3. Welle: Erweiterung der Basis

Im dritten Jahr soll die Kolonie mit drei Flügen (davon zwei unbemannt) so erweitert werden, dass durch Nahrungsmittelherstellung und Metall-Sauerstoff-Gewinnung ein hohes Maß an Unabhängigkeit von der Erde erreicht wird. Der Mondgarten ist in der Lage 16 Personen zu versorgen, wobei die Kolonie nur auf 14 Siedler anwachsen soll: 4 Astronauten, 4 Bergleute, 1 Geologe, 1 Mediziner, 1 Reaktortechniker, 1 Steinmetz und 2 Gärtner.

4. Welle: Produktionsbeginn

Die vierte Phase dauert zwei Jahre und acht Flüge (abwechselnd bemannt und unbemannt) sollen den entscheidenden Schritt zur Emanzipation der Mondsiedlung bringen. Es werden Produktionsanlagen angeliefert, um

Mondgestein und Regolith (u.a. bestehend aus Silizium-, Aluminium-, Eisen- und Titanoxid) verarbeiten zu können. Ein neu zu entwickelnder Regolithprozessor (Kostenschätzung 5 Mrd. US-Dollar) soll z.B. durch Schmelzflusselektrolyse zunächst Al_2O_3 in Aluminium und Sauerstoff

spalten: Aluminiumpulver wird als Al/LOX-Monotreibstoff verwendet, Aluminiumkabel für die Stromversorgung, Aluminiumrohre für die Wasserversorgung, Aluminiumbleche und Aluminiumblöcke. Im weiteren Prozessverlauf können auch andere Bestandteile wie Silizium, Calcium, Magnesium und Titan gewonnen werden. Aufgrund der tiefen Temperaturen kann Sauerstoff recht einfach im Schatten in flüssiger Form gelagert werden.

[Anmerkung: Eine Verwendung von Aluminium für die Wasserversorgung oder für Geräte, die der Nahrungsmittelproduktion dienen, ist nicht zu empfehlen, da Aluminium bei höherer Konzentration toxisch ist.]

Ab diesem Zeitpunkt ist auf jeden Fall eine Solarstromversorgung nicht mehr ausreichend.

Nach insg. fünf Jahren und 20 Flügen sind es nun 26 Siedler: 8 Astronauten, 4 Bergleute, 1 Geologe, 1 Mediziner, 1 Reaktortechniker, 1 Steinmetz, 2 Gärtner, 1 Prozessingenieur, 3 Prozesstechniker, 3 Mechaniker und 1 Metallarbeiter.

Der Status des Koloniausbaus nochmals in Tabellenform zusammengefasst:

Mondbasis	Welle 1	Welle 2	Welle 3	Welle 4	Gesamt
Wohnmodule	4	2	2	2	
Frachtmodule	3	4	20	42	
Luftschleusen	1	1	1	1	
Türelemente	5	1	-	-	
Gangelemente	7	4	4	4	
Reaktormodule	1	1	1	1	
Generatormodule	1	1	1	1	
Sojus Orbiter	2	-	3	7	
Freigelegte Fläche	144 m ²	1.470 m ²	2.470 m ²	3.000 m ²	7.084 m ²
Einwohnerzahl	7	4	3	12	26
Kosten (in Mrd. US-Dollar)	11,352	3,400	3,509	12,623	30,884

Im Orbit befindet sich die ISS-2 und weitere Module werden in Umlaufbahnen um den Mond „geparkt“.

<i>ISS-2 im Mondorbit</i>	<i>Welle 1</i>	<i>Welle 2</i>	<i>Welle 3</i>	<i>Welle 4</i>
Swesda	1	1	1	1
Piosk	1	1	1	1
Sojus	3	3	3	3
Sojus Lunar	-	1	1	1
Antriebsmodule MK2	1	1	1	1
Frachtmodule	1	1	1	1
Phönix	5	5	5	5
Explorer	-	1	1	1
Astronauten	2	2	2	2
<i>Parkbahn</i>	<i>Welle 1</i>	<i>Welle 2</i>	<i>Welle 3</i>	<i>Welle 4</i>
Antriebsmodule MK1	1	8	11	19
Treibstoffmodule	85	123	123	243
Frachtmodule	-	1	2	3

d) Versorgung der Siedlung

Trotz der angestrebten Autarkie wird ein gewisses Maß an Versorgungsflügen notwendig bleiben: z.B. für Legierungsbestandteile wie Kupfer und Vanadium, Computer und Elektrogeräte, Kleidung, Hygieneartikel und andere Verbrauchsgüter.

Für den Transport soll ein mit VASIMR-Triebwerk und Solarsegeln ausgestatteter Solarzug entwickelt werden, der auf einer 40-monatigen Rundreise Material zum Mond bringen kann. Derzeit ist die Solarzug-Variante allerdings aufgrund der noch zu geringen spezifischen Energie von Solarzellen nicht wirtschaftlich. Eine Alternative ist die Entwicklung eines Lunar Supply Vehicle (LSV), das zum Mond fliegt und dort verbleibt. Wenn das LSV überwiegend aus den auf dem Mond nicht vorhandenen Materialien gefertigt ist, kann es nach der Landung demontiert und damit zusätzlich zur Fracht genutzt werden.

Im Grunde ist es auch möglich, die Fracht nicht mit dem Phönix zur Mondoberfläche zu bringen, sondern einfach herunterfallen zu lassen. Durch Vergrößerung des Einfallswinkels könnte die Aufprallenergie Schritt für Schritt abgebaut werden, indem die Fracht wie ein Gummiball über den Mondboden hüpft, bis sie zum Stillstand kommt. Am Landeort kann die Fracht mit dem Lunar Electric Rover eingesammelt werden.

e) Beispielsiedlungen

Das vorgestellte Siedlungskonzept wird am Beispiel von drei Standortkandidaten näher erläutert:

1. Siedlung am Malapert-Berg (Südpolregion)

Die Nordseite des Berges bietet sich aufgrund des Sonnenlichts und der moderaten Temperaturen für eine Siedlungsgründung an. Die Kolonie kann auch mit Solarstrom betrieben werden, wenn die Solarzellen in Bereichen ewigen Lichts installiert werden. Ansonsten kann ein Kernreaktor in einer auf dem Berg herausgearbeiteten Nische abgestellt werden (natürliche Abschirmung durch das Mondgestein). Die Nähe zum Kraterrand bietet die Möglichkeit, bei den niedrigen Temperaturen im Krater dort flüssigen Sauerstoff zu lagern. Auf dem Berggipfel ist eine Richtfunkverbindung zur direkten Kommunikation mit der Erde möglich. Der Ausbau der Siedlung im Berg erfolgt nach oben in die Bereiche ewigen Lichts. „Unattraktiv wird der Berg nur, wenn Gesteinsuntersuchungen keine ausreichende Tragfähigkeit attestieren.“ (S. 200)

2. Siedlung in der Mare-Tranquillitatis-Grube

Die Besiedlung einer Grube hat den Hauptvorteil, dass durch das Dach der Lavaröhre ein natürlicher Strahlenschutz gewährleistet wird. Es ist eine Containersiedlung vorstellbar, bei der die Siedler in großem Umfang in den mitgebrachten Wohntanks leben. Aber auch dort bietet sich längerfristig der Bau einer Siedlung in den Felsen an. „Das Gestein der Lavaröhre ist aller Wahrscheinlichkeit nach ein Basalt. Basalte sind ausgesprochen tragfähig, witterungsresistent und stabil.“ (S. 201) Der Kernreaktor wird von einem Phönix in der Lavaröhre hinter einem Geröllhaufen abgestellt, der als natürliche Abschirmung dient. Um an die Oberfläche zu gelangen ist ein Flaschenzug oder ein Aufzug erforderlich und auch die Kommunikation mit der Erde ist nur über Relaystationen möglich. Das Graben der Siedlung in den Felsen erfolgt in Richtung Grubenöffnung, um eventuell das Sonnenlicht nutzen zu können. Aufgrund des harten Gesteins wird der Ausbau vermutlich nur langsam vorangehen. Die Siedlung in einer Röhre ist nur attraktiv, wenn kein oberirdischer Standort mit tragfähigem Felsen gefunden wird.

3. Siedlung im Krater Dollond E

Die Siedlung ist durch ein Magnetfeld geschützt und die Erweiterung kann in die Kraterwand gegraben werden. Aufwändig ist die Platzierung des Reaktors, für den die Kraterwand von oben her ausgehöhlt werden muss; dann kann der Reaktor von oben durch einen Phönix in diese Grube abgelassen werden. Interessant ist die Möglichkeit des Baus einer erdähnlichen Siedlung mit Mauersteinen aus Mondstein, die luftdicht versiegelt werden. In einer solchen Siedlung könnte man das verfügbare Sonnenlicht nutzen.

f) Wachstumsphase

„In der Wachstumsphase verändert sich das Gesicht der Mondbasis von einer wissenschaftlich motivierten Station hin zu einer mit stärkerem Siedlungscharakter.“ (S. 207) Ausschlaggebend hierfür ist die Senkung der Transportkosten! Für den Treibstoff schlägt der Autor eine Kombination von auf dem Mond produzierten und

in die niedrige Erdumlaufbahn zurückgebrachten Al/LOX mit flüssigem Wasserstoff von der Erde an, wodurch die Kosten pro Passagier ca. 23 Mio. US-Dollar betragen würden.

Hinsichtlich der Berufe sieht der Autor beim Wachstum v.a. Bedarf an weiteren Metallarbeitern und Bergleuten sowie in der Landwirtschaft tätiger Siedler. Außerdem Installateure, Prozesstechniker und Menschen aus dem Dienstleistungsbereich. „Generell sollte speziell in der Wachstumsphase darauf geachtet werden, für ein 50:50-Verhältnis unter den Geschlechtern zu sorgen.“ (S. 211). Bei einem Budget von 5 Mrd. US-Dollar könnten pro Jahr 140 Personen umgesiedelt werden. Wenn 80% der Umsiedler eine Familie gründen, käme man nach zehn Jahren auf 1.421 erwachsene Siedler und 568 Kinder (bei einem Kind pro Familie). Damit hätte die Siedlung bereits eine Größe erreicht, bei der es nicht unbedingt weiterer Zuwanderung bedarf.

Als Industriezweige sind auf dem Mond vorstellbar:

- Bergbau: Herstellung von Sauerstoff und Aluminium aus dem für den Siedlungsbau abgebauten Material.
- Textilherstellung: aus der Wolle eingeführter Schafe können Kleidung, Decken, Vorhänge und Teppiche gefertigt werden; alternative Rohstoffe sind Baumwolle oder Hanf.
- Titangewinnung aus Regolith: als Legierung mit Aluminium (6%) und Vanadium (4%) kann Titan z.B. für die Herstellung von Raumschiffteilen verwendet werden. „Darüber hinaus bietet sich Titan als Stahlersatz im Siedlungsbau an. Vor allem zur Herstellung von Werkzeugen, für die Aluminiumlegierungen zu weich sind, bieten sich Titanlegierungen an.“ (S. 213)
- Magnesiumgewinnung, um Legierungen mit Aluminium herzustellen (3% Mg). Es können aber auch Magnesium-Batterien und Legierungen mit anderen Elementen hergestellt werden (z.B. Zink oder Mangan). Magnesiumoxid kann als Düngemittel oder zur Glasherstellung (zusammen mit Siliziumoxid) eingesetzt werden.
- Siliziumgewinnung für die Herstellung von Glas und Fensterscheiben sowie von Solarzellen.
- Kalkbasierte Baustoffe verbrauchen bei der Herstellung CO_2 und können deshalb für das CO_2 -Management der Siedlung interessant sein. Beim Einsatz von Zement wird allerdings Wasser verbraucht (1 kg pro 12 kg Zement), sodass seine Verwendung von Wasserstoffimporten von der Erde abhängig ist. Außerdem kann Kalk zur Düngung eingesetzt werden.

In wissenschaftlicher Hinsicht ist eine Mondsiedlung ebenfalls sehr interessant:

- Es können wichtige Erkenntnisse im Bereich der extraterrestrischen Landwirtschaft gewonnen werden, die für die spätere Expansion zu anderen Planeten und Monden nützlich sind.
- Erkundung des Mondes und Exploration von Rohstoffen.

- Erforschung des Weltraums mit Radioteleskopen, optischen Teleskopen und Infrarotteleskopen. Grob- und feinmechanische Bauteile könnten voraussichtlich auf dem Mond hergestellt werden; nur Spiegel, Elektronik und Spezialbauteile müssten von der Erde eingeflogen werden.

Die Gesamtkosten während der zehnjährigen Wachstumsphase schätzt der Autor unter Berücksichtigung von Korrektur- und Sicherheitszuschlägen auf ca. 159 Mrd. US-Dollar, also 15,9 Mrd. US-Dollar pro Jahr.

g) Leistungsphase

„Mit dem Erreichen der Leistungsphase überschreitet die Industrieproduktion der Mondsiedlung den für Eigenbedarf, Stationsbetrieb und Stationserweiterung notwendigen Umfang. Von jetzt an können Güter produziert werden, deren Verwendungszweck außerhalb der Mondsiedlung liegt.“ (S. 223)

Der Autor sieht die folgenden fünf Möglichkeiten:

1. Gründung einer weiteren Mondsiedlung
Ausschlaggebend für eine solche Gründung könnte die Entdeckung interessanter Mineralvorkommen (z.B. Platin, Gold, Palladium, Rhodium, Iridium) oder Helium-3 (*aktueller Preis Anfang 2022: 2,15 Mio. US-Dollar/t*) sein. Helium-3 wird durch den Sonnenwind in das Regolith eingelagert, aber nur in so geringen Mengen, dass für 1 t He-3 20 Mio. t Regolith gereinigt werden müssen. Ein Abbau von He-3 lohnt sich nur, wenn gleichzeitig andere Rohstoffe aus dem Regolith gewonnen werden können.
2. Produktion von Material für die Erde?
Ein Export zur Erde würde sich bei geschätzten Transportkosten von ca. 17 Mio. US-Dollar/t nur bei sehr reichhaltigen Rohstoffvorkommen lohnen, wovon eher nicht auszugehen ist.
3. Produktion von Material für den Erdorbit
Der Transport vom Mond in den niedrigen Erdorbit kostet nur 9,8 Mio./t. Interessant wäre dies z.B. für große Module für die ISS, die auf dem Mond gefertigt werden und dann durch die geringe Schwerkraft und das Vakuum relativ einfach befördert werden können (es werden nur 784 kWh benötigt, um 1 t Material auf Fluchtgeschwindigkeit zu beschleunigen). Der Autor sieht hierfür die Neuentwicklung eines etwa 2-3 km langen Massentreibers auf dem Mond vor, der mittels eines Magnetfelds und unter Verwendung der Lorentzkraft eine Transportmasse beschleunigen kann.
4. Produktion von Material für den Mondorbit
Im Mondorbit könnte eine Fertigungshalle errichtet werden, in der größere Objekte gefertigt werden, um sie z.B. später zum Mars zu transportieren.
5. Produktion von Komponenten für eine Marsmission
Im Mondorbit können nicht nur Raumschiffe zusammengebaut werden, sondern der Mond kann durch die Herstellung von Treibstoff insbesondere als Tankstelle dienen und damit die Kosten für interplanetare Reisen erheblich reduzieren.

DIE FINANZIERUNG

Der Autor sieht den Grund dafür, dass es noch keine Mondsiedlung gibt, nicht in technischen Hindernissen, sondern in der Finanzierung. Die Gesamtkosten für den Aufbau einer solchen Siedlung über 16 Jahre hinweg (Erkundungs-, Gründungs- und Wachstumsphase) schätzt der Autor auf maximal 275,3 Mrd. US-Dollar. Im Gegensatz z.B. zum Apollo-Programm hätte eine Mondsiedlung jedoch einen nachhaltigen Nutzen.

Bei einer Streckung des Zeitplans auf 30 Jahre würden die Kosten maximal 9,2 Mrd. US-Dollar pro Jahr betragen, was z.B. Deutschland alleine durch geringfügige Steuererhöhungen oder Umschichtungen im Bundeshaushalt (*Haushalt 2022: 419,8 Mrd. Euro*) bewerkstelligen könnte.

Um die internationale Gemeinschaft zu stärken und die Kosten zu minimieren, könnte das Projekt z.B. von den Betreiberländern der ISS plus China finanziert werden.

Eine Finanzierungsmöglichkeit bestünde auch über die fünf großen Raumfahrtorganisationen: NASA (USA), ESA (Europa), CNSA (China), Roskosmos (Russland) und JAXA (Japan). Dazu müsste jede dieser Behörden ein Drittel ihres Budgets für die Mondsiedlung umwidmen.

Desweiteren kalkuliert der Autor eine kreditfinanzierte Mondsiedlung mit verschiedenen Zinssätzen. *[Anmerkung: Bei einer Laufzeit des Projekts von 30 Jahren erscheint dieser Weg als wenig sinnvoll.]*

Eine weitere Möglichkeit sieht der Autor in der Finanzierung durch Einzelpersonen, da allein die fünf reichsten Personen auf der Erde die Siedlung mit den Zinsen aus ihren Vermögen finanzieren könnten. Auf der Welt gibt es etwa 2.000 Milliardäre. Andere Finanzierungsideen, die im Buch erläutert werden, sind: Crowdfunding, Seedfunding oder die Finanzierung durch Firmen mittels Branding. Der Autor macht sich auch einige Gedanken über die organisatorische Struktur einer solchen Kapitalgesellschaft, um das Projekt mit den genannten Finanzierungsstrukturen verwirklichen zu können.

Am Ende des Kapitels wird auf Spin-off-Technologien hingewiesen, die auch nutzen für die irdische Wirtschaft haben können: Herstellung von Mikro-Kernreaktoren und verbesserte Aluminiumschmelze durch die Entwicklung des Regolithprozessors (Gewinnung von O_2 statt CO_2 bei der Herstellung).

Die Entwicklung von Al/LOX-Monotreibstoff könnte sich langfristig für die Besiedlung des Weltraums als wichtig erweisen. *[Anmerkung: Wahrscheinlich ist langfristig eher von anderen Antriebstechnologien auf nicht-chemischer Basis auszugehen.]*

ZUKUNFTSPROJEKTE

Im letzten Kapitel werden zwei Zukunftstechnologien erläutert, die derzeit noch nicht umsetzbar sind.

Ein Weltraumaufzug könnte theoretisch die Kosten des Transports von Material über die geostationäre Umlaufbahn hinaus erheblich verringern. Das Know how für das dafür notwendige Seil befindet sich allerdings erst in der Grundlagenforschung. „Ein Material zur Konstruktion eines Weltraumaufzugs auf der Erde muss eine

Zugfestigkeit von etwa 100 Gigapascal (GPa) aufweisen, um bei akzeptabler Gesamtmasse von der Erde in den Weltraum zu reichen. Zum Vergleich: Stahl erreicht etwa 0,38 GPa bis 1,5 GPa, Kevlar 3,6 bis 3,8 GPa.“ (S. 251) Mit Kohlenstoffnanoröhren lassen sich bereits mehrwandige Strukturen mit Zugfestigkeiten von 150 GPa herstellen, allerdings fällt die Festigkeit schon bei Längen um die 2 cm bedingt durch Strukturfehler auf 1-2 GPa.

Terraforming ist die Fähigkeit, einen Himmelskörper so zu verändern, das eine Umwelt entsteht, in der menschliches Leben möglich ist. Um den Mond umzuformen, müssten die folgenden Parameter angepasst werden:

- Damit ein Luftdruck wie auf der Erde besteht, müsste die Masse der Mond-Atmosphäre auf ca. 59,3 t/m² erhöht werden (zum Vergleich: auf der Erde hat die Atmosphäre eine Masse von 9,8 t/m²).
- Die Atmosphäre müsste mit Stickstoff und Sauerstoff angereichert werden. Dies könnte z.B. durch die „Anlieferung“ eines überwiegend aus gefrorenem Ammoniak bestehenden Asteroiden mit einem Durchmesser von 350 km erfolgen. Sauerstoff und Wasser könnten mit einem ähnlich großen Wassereisasteroiden auf den Mond gebracht werden.
- Die Temperatur kann durch Zugabe von Treibhausgasen wie Methan und CO₂ angehoben werden.

Soviel zur Theorie. Die Durchführung ist derzeit noch technisch unmöglich. Eine Umformung würde Jahrtausende dauern. „Das Aufrechterhalten der Atmosphäre erfordert kontinuierliche menschliche Unterstützung, da Gase immer wieder in den Weltraum entweichen werden und der Erdmond – frei von vulkanischer Aktivität – keine Gase nachproduziert.“ (S. 254)

Das Fazit des Autors am Ende seines Buches lautet:

„Die Besiedlung des Mondes: Logisch sinnvoll. Technisch möglich. Finanziell profitabel. Packen wir es an!“ (S. 256)