

BEMANNTA MARSMISSION – DIE HERAUSFORDERUNG FÜR DIE RAUMFAHRT

M.OBERSTEINER

DGLR-FAS R1.2 - Raumtransportsysteme

Zusammenfassung

Dieser Vortrag gibt einen Überblick zum Status und den Perspektiven der wesentlichen Missionselemente einer bemannten Marsmission. Er ist Ergebnis der Arbeit des DGLR-FAS R1.2 der letzten Jahre und gleichzeitig Einstieg für weitere Aktivitäten auch zu den Detailthemen.

1. RÜCKBLICK

Bereits während den Vorbereitungen zur ersten Apollo-Mondmission – also vor mehr als 50 Jahren - hat die NASA umfangreiche Planungen und Technologiearbeiten zur bemannten Marsmission durchgeführt. Damals erschien die bemannte Marsmission als ein logischer nächster Schritt und greifbar nahe, d.h. in einem Zeithorizont vergleichbar Apollo, also in weniger als einem Jahrzehnt realisierbar. In der Folgezeit ist die Missionsplanung weiter in die Zukunft gerutscht und dann aus den konkreten Planungen verschwunden.

Verschiedene Gründe könnten dazu führen, dass sich dieser Trend heute wieder umkehrt und wir der Realisierung einer (ersten) bemannten Marsmission wieder näher kommen. Im Folgenden werden wesentliche Aspekte dieser Gründe betrachtet und einige Schlüsse gezogen.

Basis dieser Betrachtungen sind Diskussionen und Vorträge im Rahmen des DGLR-FAS R1.2 – Raumtransportsysteme.

2. STATUS WELTWEIT

Die bemannte Marsmission ist das herausragende Ziel für die bemannte Raumfahrt und erfordert sehr umfangreiche Vorbereitungen und ist damit abhängig von weitreichenden politischen Entscheidungen. Sie bietet damit aber auch Raum für die Beteiligung vieler Nationen und kann sich umfangreiche Technologien und viel Erfahrung zur Missionsplanung und –durchführung zunutze machen, die heute weltweit verfügbar sind.

Die von 15 Agenturen erarbeitete Roadmap sieht eine koordinierte, internationale Aktivität in drei Schritten vor:

- Internationale Raumstation
- Mondumgebung, dann Mondoberfläche
- Mars

Das bisherige gemeinsame Interesse an Exploration und internationaler Kooperation unterstützte die jeweiligen individuellen Ziele. Die Veränderung der politischen Situation, ausgelöst durch Russlands Krieg gegen die Ukraine, erfordert derzeit eine grundlegende Diskussion und Anpassung der Zielsetzung zumindest im Detail.

2.1. Marsmissionen – Nächste Schritte

Der im Februar 2021 gelandete Perseverance Rover hat bereits begonnen Bodenproben für die „Mars Sample Return“ Mission zu sammeln. Ein Landefahrzeug mit einer Aufstiegsstufe (MAV, NASA) wird in der Nähe des Perseverance Rovers landen. Sobald die Proben verladen sind, wird die Aufstiegsstufe mit dem Probenbehälter in einen niederen Marsorbit aufsteigen. Das Rückkehrfahrzeug (MSRO, ESA) wird mit Ariane 6 gestartet und wird die Proben im Marsorbit aufnehmen und zur Erde zurückbringen. Eine Wiedereintrittskapsel wird den Probenbehälter zur Erdoberfläche bringen und dies nach derzeitiger Planung in gut 10 Jahren.

2.2. Bemannte Missionen – Nächste Schritte

Die bemannte Rückkehr zum Mond ist das nächste große Ziel. Mit der ARTEMIS 1 unbemannten Testmission wird gerade die Verfügbarkeit der Transportinfrastruktur nachgewiesen. Ein wesentliches Element ist das Space Launch System das auch in einer unbemannten Cargo Version verfügbar sein wird. Mit dem SLS wird dann auch der Aufbau und Betrieb einer Raumstation am Mond, dem Lunar Gateway möglich sein. Damit werden erstmals dauerhafte bemannte Missionen außerhalb des Schutzes des Erdmagnetfelds und der damit erzeugten Strahlungsgürtel möglich sein.

Alle 3 Themen sind mit umfangreichen Erläuterungen und Bildern auf der NASA Homepage www.nasa.gov zu finden.

2.3. Erweiterte Perspektive

Eine deutlich erweiterte Perspektive verglichen mit den Agenturplanungen zeigt die Planung von SpaceX (Elon Musk). Hier ist das Ziel eine dauerhaft besiedelte Siedlung auf dem Mars mit einer umfangreichen - 1 Mio als Größenordnung – Bevölkerung. Dafür ist eine effiziente Infrastruktur und der Aufbau einer „Stadt“ erforderlich. Wichtig dabei ist die Nutzung von Mars Ressourcen (In-situ Resources-ISRU). Siehe auch www.spacex.com.

3. MISSIONSELEMENTE

Für die weitere Gliederung des Vortrags benutze ich die wesentlichen Missionselemente einer bemannten Marsmission entsprechend der NASA Mars Design Reference Architecture 5.0 von 2007. Auch wenn sich bzgl. der Systeme und Technologien inzwischen einiges weiterentwickelt hat, so sind die bestimmenden kosmischen Gegebenheiten natürlich unverändert.

Die Eckpunkte einer heute absehbaren „klassischen“ bemannten Marsmission sind weiterhin:

- Eine Crew zur Marsoberfläche und zurück zur Erde bringen
- Missionsmöglichkeit ca. alle 2 Jahre, bedingt durch Planetenkonstellation (dies gilt auch für den langen Aufenthalt am Mars)
- Missionsdauer für die Crew ca. 900-1000 Tage, interplanetarer Transfer jeweils ca. 200 Tage (Hohmann Transfer), Aufenthalt am Mars ca. 500 Tage
- Vorhandene Technologien bzgl. Antrieb, Strukturen, Lebenserhaltung nutzen
- Abflugmasse aus einer niederen Erdumlaufbahn > 500t (mit umfangreicher Marserkundung ~1000t), wesentlich bestimmt durch die Art des verwendeten Antriebs
- Integration und Betankung des mehrstufigen Fahrzeugs in niedriger Erdumlaufbahn erforderlich
- Cargo Transport zum Mars bereits 2 Jahre im Voraus vereinfacht die notwendige Infrastruktur und Fahrzeuge und reduziert das Risiko für den Rückflug.

3.1. Transport Erdoberfläche – Erdumlaufbahn

Das erste Missionselement ist der Transport zur Erdumlaufbahn. Dafür gibt es weltweit einige Trägersysteme. Durch die Industrialisierung und Kommerzialisierung konnten Kostenreduzierungen erreicht werden, die für die Vorbereitung einer bemannten Marsmission hilfreich sind.

Für die bereits angesprochenen großen Startmassen >500t aus niedriger Erdumlaufbahn (LEO) ist allerdings ein Schwerlastträger mit mindestens 100t Nutzlast erforderlich. Dafür wird das Space Launch System in seiner Cargo-Version zur Verfügung stehen. Das Starship könnte die Transportkapazität auch durch Wiederverwendung und hohe Startkadenz massiv erhöhen und die Kosten reduzieren.

Nutzlastkapazität [t]

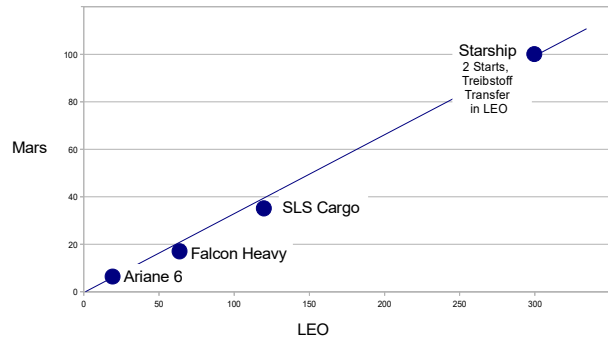


BILD 1. Nutzlastkapazität wesentlicher Erdstartsysteme

3.2. Transfer Erde – Mars

Für den Crew-Transport Erde–Mars sind zwei Antriebsimpulse erforderlich. Einmal zum Abflug aus der Erdumlaufbahn auf die interplanetare Bahn und dann zum Erreichen einer Marsumlaufbahn bzw. der direkten Landung auf dem Mars. Die erforderliche Treibstoffmenge für den Raketenantrieb kann durch aerodynamische Manöver am Mars reduziert werden. Allerdings erfordert dies ein dafür konstruiertes Fahrzeug.

Das Transferfahrzeug muss in LEO aus mehreren Erdstart-Nutzlasten integriert und betankt werden.

Der Aufwand für eine Integrationsinfrastruktur (spezielle Raumstation) wäre enorm und ist derzeit nicht absehbar.

Während geeignete Raketentriebwerke heute verfügbar sind, gibt es für die Antriebs Alternativen „Elektrischer Antrieb“ und „Nuklear-thermischer Antrieb“ keine passenden Triewerke.

Das geplante Lunar Gateway wird Elemente und Technologien für das erforderliche Habitat, die Energieversorgung und den Schutz der Crew liefern.

3.3. Landung Mars

Das nächste Missionselement ist die Marslandung. Die bisherigen Marslandungen wurden folgendermaßen durchgeführt: Mit aerodynamischer Abbremsung wird die Geschwindigkeit um ca. 90% reduziert. Hierfür ist ein Hitzeschutz und dann ein an die dünne Marsatmosphäre angepasstes Fallschirmsystem erforderlich.

Für die Landung selbst gibt es 3 verschiedene Verfahren die bisher erfolgreich genutzt wurden:

- Aufsetzen auf Landebeinen mit reduzierter Geschwindigkeit durch Raketenantrieb
- Aufschlag des mit Airbags geschützten Landers und Ausrollen
- Raketenstufe bremst auf 0 Geschwindigkeit in geringer Höhe über Grund und der Rover wird mit Seilen direkt auf seine Räder gestellt.

Auch wenn letzteres Verfahren, das Skycrane genannt wird zweimal sehr erfolgreich funktioniert hat, so wird für größere Nutzlasten und damit auch die bemannte Mission wohl nur das erste Verfahren zum Einsatz kommen.

Der von der NASA beauftragte Lunar Lander für das ARTEMIS Program wird sicher ein wesentlicher Schritt zur Entwicklung eines großen Marslanders sein. Wesentliches Neuland wird allerdings die aerodynamische Abbremsung eines sehr großen Landers in der dünnen Marsatmosphäre bleiben.

Wichtig für die Marslandung ist auch die Auswahl des Landegebiets. Dafür sind heute bereits umfangreiche Informationen bis hin zu 3D Modellierungen vorhanden. Die geplanten Aktivitäten auf dem Mars spielen natürlich eine entscheidende Rolle für die Landeplatzauswahl.

Das Aufsetzen großer Landestufen auf dem unbefestigten Marsuntergrund wird mit dem ARTEMIS Programm nur teilweise erprobt werden können.

3.4. Antrieb für Transfer und Landung

Das SLS Zentralstufentriebwerk RS25 oder auch bekannt als SSME bietet als Flüssig Wasserstoff – Sauerstoff Triebwerk große Leistungsfähigkeit und umfangreiche Erfahrung im Betrieb bis hin zur Wiederverwendung. Die Wiederverwendung wird allerdings für das SLS keine Rolle spielen.

Flüssig Methan – Sauerstoff ist die Treibstoffalternative:

- Treibstoffgewinnung auf dem Mars ist möglich > Stichwort ISRU
- Deutlich geringere Leistungsfähigkeit mindestens 100sec geringerer spezifischer Impuls führt zu Nutzlastverlust
- Deutlich höhere Treibstoffdichte führt zu geringerem Tankvolumen und damit kleinerem Fahrzeug
- Das SpaceX Raptor Triebwerk ist wiederzündbar und wiederverwendbar
- Beim Einsatz im Starship Demonstrator sind bereits konkrete Erfahrungen aufgesammelt worden (Siehe auch: www.spacex.com)

In Europa wird ebenfalls an einem Triebwerk für LOX Methan gearbeitet, dem Prometheus TW. Als langfristige Zielsetzung wird eine Boosterstufe mit dem Namen Themis angesehen.

3.5. Energieversorgung

Die elektrische Energieversorgung ist ein weiteres Missionselement. Die notwendige Leistung und die Dauer der Mission bzw. Missionsabschnitte bestimmen die sinnvoll möglichen Energiequellen:

- Solar-elektrisch / photovoltaisch
- Nuklear

Für die Transfers mit dem Energieversorgungsbedarf ähnlich einer Raumstation bietet sich die Solar-elektrische Energieversorgung an, allerdings ist dabei zu berücksichtigen, dass die Energiedichte der Sonnenstrahlung auf unter 50% abnimmt.

Für die Marsoberfläche und größere Anlagen insbesondere zur Ressourcennutzung (ISRU) wären Nuklearreaktoren hilfreich.

Über die Energiequelle hinaus ist ein System mit Speicherung, Verteilung und Kontrolle erforderlich.

Besondere Herausforderungen ergeben sich für solar-elektrische Energieversorgung insbesondere durch:

- Erhöhte Strahlungsbelastung und Degradation von Solarzellen außerhalb des Erdmagnetfelds
- Die Größe der erforderlichen Solargeneratorfläche
- Auf der Marsoberfläche ist die Nutzung solar-elektrischer Systeme durch Staubstürme und Staubablagerung zum Teil erheblich beeinträchtigt und erfordert Reinigungssysteme
- Und natürlich Energiespeicherung für die Nächte, z.B. auch mit Solar-regenerativen Brennstoffzellen

Start und Betrieb nuklearer/radioaktiver Energiequellen unterliegen nationalen Einschränkungen. Z.B. wird ein Start von französischem Territorium (CSG) durch Gesetze eingeschränkt.

3.6. Lebenserhaltung Crew

Ein weiteres Missionselement ist die Lebenserhaltung der Crew. Dafür sind folgende Funktionen für die interplanetaren Transfers und den Marsaufenthalt erforderlich:

- Atmosphärenmanagement
- Wassermanagement
- Ernährung
- Abfallmanagement
- Sicherheit & Gesundheit der Crew (Schwerelosigkeit, Strahlung, Feuer, ...)

Bei einer Gesamtmissionsdauer von 1000 Tagen und 4 Crewmitgliedern summieren sich die Bedarfe an Sauerstoff, Trinkwasser, Waschwasser und Nahrung mit Reserven auf über 50t. Entsprechend macht es Sinn ein geschlossenes Lebenserhaltungssystem zu nutzen.

Für das technische System sind primär die Elemente

- Monitoring
- Atmosphärenmanagement
- Wassermanagement

von Bedeutung. Die wesentlichen technischen Prozesse dafür sind

- Abwasser reinigen
- CO₂ aus der Luft filtern
- Sauerstoff erzeugen
- Spurengase kontrollieren

Der Kreislauf mit den Funktionen wie er auf der internationalen Raumstation ISS in Betrieb ist hat sich langjährig bewährt. Das physikalisch/chemische Lebenserhaltungssystem basiert auf folgenden Vorgaben

- Essen wird verbraucht
- Wasser wird teilweise aufbereitet
- Luft wird komplett aufbereitet

Für die Transfers Erde-Mars-Erde in Schwerelosigkeit ist damit eine Lösung vorhanden.

Für die Nutzung auf der Marsoberfläche mit der reduzierten Schwerkraft ist eine wesentliche Weiterentwicklung erforderlich.

Der Einfluss der Schwerelosigkeit auf den menschlichen Körper ist umfangreich erforscht. Z.B. der Verlust von ca. 1.5% der Knochenmasse pro Monat

Für die Transferzeiten sind deshalb Gegenmaßnahmen erforderlich. Zu entsprechenden Trainingsmaßnahmen gibt es ebenfalls umfangreiche Erfahrung. Neuland ist die Erzeugung künstlicher Gravitation durch Rotation.

Auf dem Perseverance-Rover werden Materialien getestet, die für einen Crewanzug eines Astronauten in Frage kommen könnten.

Es gibt noch weitere Themen die zu untersuchen bzw. entwickeln sind

- Medikamentenhaltbarkeit
- Bioreaktor / Treibhaus

Der Schutz gegen kosmische Strahlung ist eines der kritischsten, wenn nicht das kritischste Problem der bemannten Marsmission.

Galaktische kosmische Strahlung aus den Tiefen des Alls besteht zu 85% aus Protonenstrahlung und zu 15% aus

Heliumkernen und lässt sich nicht vollständig abschirmen.

Solare kosmische Strahlung mit den variierenden koronalen Masseauswürfen ist die größte und schwer vorhersagbare Bedrohung.

Auf der Marsoberfläche (kein Magnetfeld) ist die Strahlendosis ca. 26 MikroSievert/h, entsprechend der beim Röntgen des Brustkorbs.

Strahlungsschutzmassnahmen sind

- Präzise Weltraumwettervorhersage und Bereitstellung von „Storm Shelter“ zum Schutz vor Solar Flares
- Zeitliche Missionsplanung in Abhängigkeit vom Solarzyklus
- Abschirmung durch einen mit einem Wassermantel (ca. 25-30 cm) umgebenen Schutzraum, welcher die schnellen Protonen gut abschirmt
- Strahlungsabsorbierende Materialien in der Habitathülle
- Eingraben in den Marsboden unter ca. 40-60 cm Regolith

Eine der Aufgaben des Lunar Gateways wird sein bessere Daten zur Wirksamkeit von Strahlenschutz zu erhalten.

Außerdem werden die Ergebnisse der laufenden Parker Solar Probe Mission bessere Informationen zur Solaren Strahlung liefern.


3.7. Mobilität auf dem Mars

Mars Rover waren und sind in verschiedenen Größen und mit verschiedenen Energieversorgungssystemen unterwegs.

Sowohl was das Landeverfahren betrifft als auch die Leistungsfähigkeit als Mobil ist das NASA-JPL Mars Science Laboratory mit großem Abstand die führende Rover Generation.

Die Ingenuity Drohne ist ein wesentliches Element der derzeitigen Perseverance Mission und hat diese Transportmöglichkeit zumindest für kleine Nutzlasten eröffnet.

Für eine bemannte Mission, die sich ca. 500 Tage am Mars aufhält ist die Mobilität entscheidend für die wissenschaftliche Effizienz. Das Fahrzeug muss über eine Druckkabine und ein Lebenserhaltungssystem verfügen. Hier ist sicher noch Spielraum für neue Entwicklungen, sicher auch in Verbindung mit Bodeninfrastruktur zur Nutzung von Mars Ressourcen.

Rover Generation	Namen	Land	Start	Landesystem	Fahrt-dauer	Masse	Gefahre-ne Strecke	Energie-versorgung	Reifen (maßstäblich)
Pathfinder	Sojourner	USA	1996	Hitzeschutz+ Bremschirm+ Raketenantrieb	3 Monate	11kg	100m	Photovoltaik	
Exploration Rover	Spirit, Opportunity	USA	2003	Hitzeschutz+ Bremschirm+ Raketenantrieb und Airbags	6 und 14 Jahre	185kg	8km und 45km	Photovoltaik	
Exploration Rover	Tianwen1	China	2020	Hitzeschutz+ Bremschirm+ Raketenantrieb	Seit 2021	240kg	~2km	Photovoltaik	
Mars Science Laboratory	Curiosity, Perseverance	USA	2011, 2020	Hitzeschutz+ Bremschirm+ Raketenantrieb und Seile (SkyCrane)	Seit 2012, 2021	900-1000kg	Curiosity ~30km, Perseverance max: 250m/d	Radioisotopen Generator	

TAB1. Mars Rover Überblick

3.8. Betriebskonzepte, Datentransfer und Kommunikation

Das Betriebskonzept muß eine Reihe exotischer Anforderungen abdecken und muss generell einen hohen Systemautonomiegrad bieten und die Kommandierung von der Erde muss überwiegend über zeitgesteuerte Kommandos erfolgen. Dafür sind Neuerungen erforderlich, insbesondere

- Spezielles Betriebskonzepte für die Boden (Erd-)Teams
- Neue Kommunikationsmöglichkeit der Crew denn die direkte Kommunikation wie bei LEO oder Mond ist nicht effizient
- Arbeitsteilung auf der Erde für internationale Kooperation organisieren
- Umfangreiche Autonomie vor Ort erforderlich (z.B. Notstop, Helicopter), bei Notfällen kann die Bodencrew nicht wegen der langen Signallaufzeiten nicht rechtzeitig eingreifen
- Eigenständige Systeme zur Überwachung der Funktionen mit Reaktionsmöglichkeiten sowie zur Unterstützung der Astronauten notwendig

Für die Kommunikation ist der große und stark variierende Abstand eine kritische Randbedingung:

- Abstand Erde – Mars 56 - 401 Millionen km
- Mars-Kommunikation: Turn-Around > 40 Minuten

Auch wenn das Deep Space Network kontinuierliche Aufrüstung erfährt so wird es mit den absehbaren Missionen von Artemis und Lunar Gateway an seine Kapazitätsgrenzen stoßen.

Alternative könnte sein

- Optische Kommunikation (1000-fache Bandbreite) aber technologisches Neuland
- Bisher operational bis GEO Bahn, experimentell bis zum Mond

Analogmissionen haben das Ziel, bestimmte Fragestellungen zu Explorationsmissionen unter möglichst relevanten „analogen“ Bedingungen auf der Erde zu prüfen, z.B.

- Untersuchung der von Menschen eingesetzten Ausrüstung, Prozesse und Arbeitsabläufe unter analogen Bedingungen
- Nutzung einer Test-Umgebung für geophysikalische und astrobiologische Messgeräte, Gelände-Tests für robotische Fahrzeuge sowie die Optimierung der (wissenschaftlichen) Unterstützungsmethoden auf der Erde für die Feldcrews auf dem Mars

Erforderliche Technologie	ISS	Lunar Gateway	Mars
Elektrische Energieversorgung: Hoch-leistungsfähige Solarpaneele	7.5 kW/Panel	Hochfest, 10-100 kW	Autonom ausklappbar, 300+ kW-Klasse
Autonomes Systemmanagement	Begrenzte On-board-Autonomie, <5 s Zeitverzögerte Kommunikation	On-board-Autonomie, bewältigt >5 s Zeitverzögerte Kommunikation	Vollständige on-board-Autonomie, bewältigt >40 min Zeitverzögerte Kommunikation
Zuverlässige Lebenserhaltungssysteme	MTBF < 10 ⁶ , Überwacht und betrieben von Bodenkontrolle	Erhöhte Systemautonomie, Fehlerentdeckung, Reparaturfähigkeit	Keine Abhängigkeit von Versorgung von Erde
Geschlossene Lebenserhaltungssysteme	42% O ₂ -Wiederverwendung 90 % H ₂ O-Wiederverwendung	Demonstration fortschrittlicher Technologien in Deep Space	O ₂ /CO ₂ - geschlossene Kreisläufe, Vollständige Wiedernutzung von Wasser
Kommunikation	256 kbs Uplink 10 Mbs Downlink	Demonstration fortschrittlicher Technologien in Deep Space	>10 Mbs Uplink >1 Gbs Downlink (optisch)

TAB 2. Technologiebedarf für Betrieb und Kommunikation im Vergleich zu ISS und Lunar Gateway

3.9. Transfer Mars – Erde

Das letzte und gleichzeitig risikoreichste Missionselement ist der Rückflug und die Landung auf der Erde. Alle erforderlichen Systeme sind dann seit Jahren im Weltall unterwegs mit begrenzten Möglichkeiten zur Inspektion und Reparatur.

Absehbare Lösungen

- Chemischer Raketenantrieb für Marsstart (LOX/Methan)
- Betankung der Startstufe teilweise mit Treibstoff aus Marsatmosphäre (LOX, ISRU)
- Rückkehrstufe mit Kapsel verbleibt in Marsumlaufbahn
- Untersuchung des Testgeländes als Modellregion für Mars-Wüsten und Gegenden mit extremen Lebensbedingungen
- Untersuchung der Auswirkungen des Eingeschlossen seins auf die Psychologie und das Verhalten von Besatzungsmitgliedern

Insbesondere beim Start von der Marsoberfläche wird die Nutzbarkeit von Mars Ressourcen entscheidend die technische Lösung beeinflussen. Und dann natürlich entsprechend der erforderlichen Nutzlast am Mars auch die Abflugkonfiguration von der Erde.

Die Demonstration der Sauerstoffgewinnung läuft bereits. Der Perseverance Rover hat ein Experiment namens MOXIE an Bord, das Sauerstoff in kleinen Mengen aus der CO₂ reichen Marsatmosphäre elektrolysiert. Es funktioniert und produziert 6g Sauerstoff pro Stunde. Klingt nicht nach viel, ist aber ein erster konkreter Schritt.

Für den interplanetaren 200 Tage Rückflug ist dann wieder das Habitat und die Versorgung und Schutz der Crew entsprechend dem Hinflug erforderlich. Wie bereits gesagt wird hier das Lunar Gateway ein wesentlicher Fortschritt sein.

Am Ende bremst die Kapsel in der Erdatmosphäre ab. Die Orion Kapsel ist für die Landung im Wasser ausgelegt wie auch die SpaceX Dragon Kapsel. Demnächst wird auch die Boeing Starliner Kapsel in Betrieb gehen, die dann aber mit Airbags auf Land landet.

4. STATUS, GRENZEN UND ALTERNATIVEN

Hier nochmals im Überblick die wesentlichen und auch betrachteten Elemente einer bemannten Marsmission aus heutiger Sicht. Die Farben sollen den jeweils erreichten Status des erforderlichen Wissens und der erforderlichen Geräte, Fahrzeuge und Infrastruktur anzeigen.

Vieles ist heute verfügbar und erprobt, aber es sind auch noch wesentliche Elemente zu entwickeln oder an die spezifischen Anforderungen anzupassen.

Der Strahlungsschutz muss nach wie vor als kritisches Thema angesehen werden, nachdem es bisher keine bemannten Langzeitmissionen ausserhalb der schützenden Erd-Strahlungsgürtel gegeben hat.

Wenn es auf dem Mars möglich wäre, die Aufenthaltsdauer der Crews durch ISRU zu verlängern, dann könnte Zeit gewonnen werden für die Entsendung einer neuen Rückkehrmission. Damit liese sich das Problem der Redundanz für die Rückkehr deutlich entspannen.

	Transport Erdoberfläche-Umlaufbahn	Transfer Erde-Mars	Landung Mars	Energieversorgung	Lebenserhaltung Crew	Mobilität auf dem Mars	Betriebskonzepte, Datentransfer und Kommunikation	Transfer Mars-Erde
Status	SLS verfügbar Mondmissionen geplant	Transfer Rückkehrfahrzeug und Crew mit Lander verteilt auf 2 Mars- Oppositionen	Verschiedene Landeverfahren erfolgreich durchgeführt, wachsende Info zur Marsoberfläche, Artemis Mondlander in Entwicklung	Nutzung Photovoltaik umfangreich erprobt, ISS Erfahrung, gekapselte Reaktoren verfügbar (z.B. für U-Boote)	ISS-Lebenserhaltungssystem als Basis, Erfahrung mit bemannten Missionen außerhalb der Strahlungsgürtel mit Lunar Gateway geplant	Keine Systeme und Erfahrung für Fahrzeuge mit Lebenserhaltungssystem und Wohnraum	Umfangreiche Entwicklung erforderlich, Deep Space Network nicht ausreichend	Mars-Sample-Return Mission als Vorläufer geplant
Grenzen	>10 Starts mit SLS erforderlich	Fahrzeug Integration und Lagerung Treibstoff im Erdborbit	Landung großer Geräte auf unbefestigtem Untergrund	Marsnacht und –winter, Staubstürme, legislative Einschränkungen für nukleare Systeme	Solar Flares	Energieversorgung	Effizienz und Stabilität internationaler Kooperation (politische Veränderungen)	Keine Redundanz für Start vom Mars und Rückkehrtransfer
Alternativen	Starship in Entwicklung	Elektrischer Antrieb und dafür optimierte Bahnen				Nukleare Energieversorgung für unbemannte Mobilität	Aufbau redundanter Infrastruktur (USA, Japan, Europa, Indien?, China?, Russland?)	Nutzung von Mars Ressourcen in großen Mengen (Sauerstoff, Methan)

■ vorhanden ■ entwickelbar ■ ungelöst / großes Risiko

BILD 2. Status, Grenzen und Alternativen einer bemannten Marsmission aus heutiger Sicht

Der DGLR Fachausschuss Raumtransportsysteme (R1.2) ist in der Lage, die gesamte Bandbreite der Fragestellungen zur bemannten Marsmission zu betrachten.

Interessierte sind immer herzlich willkommen. Weitere Informationen siehe DGLR-Homepage.