

Essen im Weltall

Herausforderungen und Perspektiven nachhaltiger Ernährungssysteme für Langzeitmissionen

Guido Deußing

Das Artemis-Programm der NASA zielt darauf ab, Menschen auf dem Mond anzusiedeln. Ins Blickfeld rückt zudem die Reise zum Mars, die ihren Anfang auf dem Erdtrabanten nehmen könnte [1]. Bis sich eines der beiden Ziele erreichen lässt, gibt es noch viele Herausforderungen zu meistern und zahlreiche Fragen zu beantworten. Darunter eine, die entscheidend sein dürfte für das Überleben der Raumfahrer, die sich über Jahre im Weltall aufhalten werden, weitab und unerreicht von den Versorgungssystemen der Erde: Wovon sollen Astronauten leben, wenn es doch auf Mond und Mars nichts zu essen gibt? Diese Frage ist nicht hypothetisch, sondern Gegenstand aktueller Forschung zur bioregenerativen Lebenserhaltung und zur Entwicklung langfristig stabiler Ernährungssysteme für Explorationsmissionen.



Plan der Artemis-Mission ist es, auf den Mond eine von Astronauten dauerhaft besetzte Basis einzurichten.

Während eines Sturms wird Mark Watney von seiner Crew, der nur Minuten bleiben sich zu retten, für tot gehalten und auf dem Mars zurückgelassen [2,3]. Als das Mitglied der US-amerikanischen Ares-1-Mission die Augen öffnet, sieht es sich mutterseelenallein vor die Aufgabe gestellt, in der menschenfeindlichen Umgebung des roten Planeten zu überleben – Millionen Kilometer von der Erde und einer möglichen Rettungsmission entfernt. Watney bilanziert nüchtern seine Situation: Er ist auf dem Mars gestrandet wie Daniel Defoes Robinson Crusoe auf seiner einsamen Insel. Doch Watney hat alles, was er zum Überleben braucht: Ausdauer und Galgenhumor, technisches Verständnis, ein Dach über dem Kopf, genügend Schutzanzüge, ein E-Mobil, Solarstrom, Trinkwasser und Lebensmittelvorräte für 300, wenn nicht gar 400 Tage, bei drastischer Rationierung [2,3].

Und das Glück ist dem im All Gestrandeten hold: Die NASA hatte der Ares-1-Mission zwölf frische Kartoffeln mitgegeben. Watney halbiert jede Kartoffel, lässt die Hälften keimen und im Schutz seines Zelttes unter erdähnlicher Atmosphäre in einem improvisiert aufbereiteten, mit eigenen Exkrementen gedüngten Substrat wachsen und gedeihen. Als Selbstversorger steigert der moderne Robinson sein Nahrungsmittelkontingent und damit auch seine Überlebenschance [2,3].

Ernährung als integraler Bestandteil

Das mit Matt Damon in der Hauptrolle von Ridley Scott verfilmte Science-Fiction-Drama „Der Marsianer“, basierend auf dem gleichnamigen Buch von Andy Weir [2,3], führt unterhaltsam und spannend vor Augen, welches Schicksal einem Astronauten in den Weiten des Alls widerfahren kann. Und es vermittelt eine Ahnung, worauf es bei der Reise zum Mars ankommt: eine zuverlässig funktionierende Technik, Luft zum Atmen, die Möglichkeit, Trinkwasser aus Urin herzustellen oder aus der Luft zu extrahieren, eine gute Verbindung mit dem Flugkontrollzentrum auf der Erde und, nicht zuletzt, hinreichend Nahrung.

Ernährung spielt auf einer Weltraummission eine überragend wichtige Rolle, vor allem, wenn es sich um eine auf mehrere Jahre angelegte Mission wie die Erforschung des Planeten Mars handelt, die von Astronauten durchgeführt wird und nicht von Robotern. Bei der Ernährung handelt es sich um eine reale Fragestellung in der Raumfahrtforschung, insbesondere im Hinblick auf die Sicherstellung langfristig stabiler Ernährungssysteme unter isolierten und extremen Bedingungen. Aus gutem Grund: Die Dimension dessen, was der Mensch zum Leben braucht, auf ein rein logistisches Detail reduzieren zu wollen, das sich disponieren lässt, greift schlicht zu kurz: Unter Bedingungen mehrjähriger Weltraummissionen

stellen sich Menge, Nährstoffstabilität und sensorische Akzeptanz als eigenständige limitierende Faktoren der Missionsplanung dar.

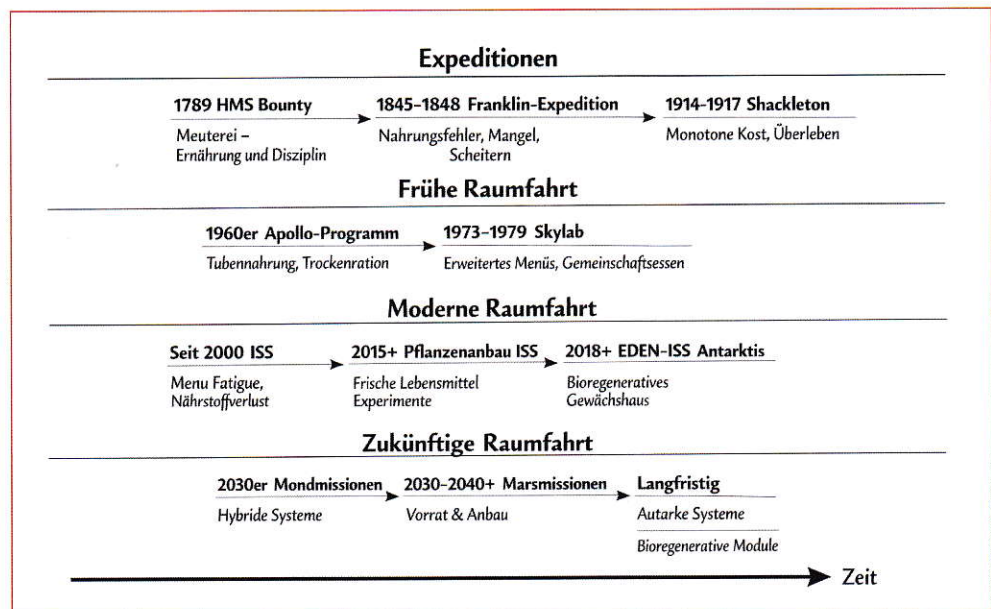
Herausforderungen einer Expedition

Für eine Missionsdauer von 900 bis 1000 Tagen – diese Zeit wird für die Exploration des Mars veranschlagt – und einem Energiebedarf von rund 2 500 bis 3 000 kcal pro Person und Tag ergibt sich, abhängig von Missionsprofil, Besatzungsgröße und Systemdesign, ein erheblicher Versorgungsbedarf. Selbst bei hochkonzentrierten, energieeffizienten Lebensmitteln summiert sich die erforderliche Nahrungsmasse auf mehrere Hundert Kilogramm je Astronaut. Zu berücksichtigen sind zudem Verluste im Verlauf der Lagerung sowie Anforderungen an Verpackung, Zubereitung und Abfallmanagement. Deutlich zeigt sich: Ernährung wird rasch zu einem limitierenden Faktor der Missionsarchitektur [1,4–6].

Dass der Erfolg einer Expedition wesentlich von der Lebensmittelversorgung abhängt, zeigt der Blick auf historische Expeditionen eindrücklich [7–10]: Die HMS Bounty etwa, ein bekanntes Schiff der königlich-britischen Marine, war im Jahr 1789 mit Brotfruchtpflanzen an Bord von Tahiti aus in Richtung Westindische Inseln in See gestochen. Innerhalb der Mannschaft rumorte es, nicht allein des Essens wegen. Der monatelange Verzehr von versalzenem Fleisch, verschimmeltem und insektenbefallenem Zwieback und abgestandenem Wasser aber hatten die Moral und Disziplin der Matrosen untergraben. Das schlechte Essen bildete den Nährboden für den Aufstand, der als die „Meuterei auf der Bounty“ in die Film- und Fernsehgeschichte einging [7].

Sir John Franklin (1786–1847), Konteradmiral seiner Majestät, startete am 19. Mai 1845 mit zwei Schiffen, der HMS Erebus und der HMS Terror, und 129 Mann Besatzung den Versuch, einen Seeweg durch das Nordpolarmeer zu finden. Die Suche nach

» Ernährung spielt auf einer Weltraummission eine überragend wichtige Rolle, vor allem, wenn es sich um eine auf mehrere Jahre angelegte Mission handelt. «



Zeitliche Entwicklung der Ernährung unter Extrembedingungen von historischen Expeditionen bis zur modernen Raumfahrt. Dargestellt ist der Übergang von einfachen Versorgungslösungen zu komplexen Ernährungssystemen, einschließlich erster Ansätze bioregenerativer Komponenten für zukünftige Langzeitmissionen. [Quelle: G. Deubing]

» Bei genauem Hinsehen erwies sich die Ernährung als Sargnagel der Franklin-Expedition. «

der Nordwestpassage zwischen Atlantischem und Pazifischem Ozean war das letzte Abenteuer des Polarforschers. Die Franklin-Expedition endete in einer Katastrophe: Alle 129 Besatzungsmitglieder starben an Kälte, Skorbut, Bleivergiftung und Hunger [8].

Bei genauem Hinsehen erwies sich die Ernährung als Sargnagel der Expedition: Die Teilnehmer lebten von industriell konservierten Lebensmitteln, deren Qualität nach heutiger Erkenntnis unzureichend war. Hinweise auf eine ungenügende Haltbarmachung und mögliche Bleiverunreinigungen legen nahe, dass die Verpflegung nicht nur einseitig, sondern auch gesundheitsschädlich war. Kälte, Isolation, körperliche Belastung und die qualitativ wie quantitativ unzureichende Ernährungsgrundlage zerstörten die Widerstandsfähigkeit der Besatzung und besiegelten das Scheitern der Expedition [8].

Killeraspekte: Monotonie und Nährstoffmangel

Monotone Ernährung und eine unzureichende Versorgung mit essenziellen Mikro-

nährstoffen – eine toxische Kombination für Unternehmungen auf unbekanntem Terrain: Expeditionen, zu Wasser, zu Lande oder im ewigen Eis, bei denen über lange Zeiträume eine einseitige oder mangelhafte Ernährung vorherrschte, waren mit Leistungseinbußen, erhöhter Krankheitsanfälligkeit und im Extremfall auch einer hohen Mortalitätsrate gekennzeichnet [7–10]. Die Fehler, die zum Scheitern führten, waren gravierend, in Teilen aber vermeidbar. Um zum Beispiel Skorbut zu verhindern, eine Krankheit, die als „Geißel des Meeres“ in die Geschichte der Seefahrt einging, hätte es prinzipiell genügt, regelmäßig vitaminreiche Lebensmittel wie Sauerkraut oder Zitrusfrüchte zu verzehren. Skorbut ist eine Mangelkrankheit, die durch ein länger anhaltendes Vitamin-C-Defizit verursacht wird. Vitamin C (Ascorbinsäure) ist essenziell für die Kollagenbildung und damit für die Stabilität von Bindegewebe, Blutgefäßen, Haut und Knochen. Fehlt es, wird das Gewebe strukturell instabil. Typische Symptome entwickeln sich schleichend und umfassen zunächst Müdigkeit, Schwäche und Reizbarkeit. Im weiteren Verlauf treten Zahnfleischbluten, lockere Zähne, schlechte Wundheilung sowie Einblutungen in Haut

und Muskulatur auf. In schweren Fällen kann es zu Anämie, Infektionen und schließlich zum Tod kommen.

James Lind (1716–1794), ein schottischer Schiffsarzt, hatte den Zusammenhang bereits im Jahr 1747 erkannt und den Verzehr von Zitrusfrüchten als Gegenmaßnahme empfohlen. Die Royal Navy setzte diese Erkenntnisse ab 1795 systematisch um. Dennoch starben zwischen dem 15. und 19. Jahrhundert Millionen Seeleute an Skorbut; Kampfhandlungen oder Schiffbruch forderten weniger Menschenleben [9].

Für Langzeitmissionen im All ergibt sich aus dieser Betrachtung eine direkte Konsequenz: Die langfristige Stabilität insbesondere empfindlicher Mikronährstoffe muss gewährleistet sein, da eine kontinuierliche Nachversorgung in aller Regel nicht möglich ist. Welche Rolle daneben Disziplin, Gemeinschaft und Führungsstärken spielen, zeigt das Beispiel der Imperial Trans-Antarctic Expedition (1914–1917), auch bekannt als Endurance-Expedition.

Einflussfaktor soziale Stabilität

Das Schiff des Polarforschers Sir Ernest Shackleton, die Endurance, wurde im Weddellmeer vom Packeis eingeschlossen und später zerstört. Über Monate hinweg litt die 28-köpfige Mannschaft unter den extremen Umweltbedingungen der Südpolarregion und einer stark eingeschränkten, hochgradig monotonen Ernährung. Die Verpflegung bestand vorwiegend aus Pemmikan, einer mit Fett angereicherten Form von Dörrfleisch, ergänzt durch Robben- und Pinguinfleisch. Die einseitige Nahrung und die fehlende Aussicht auf Rettung führten zu einer erheblichen psychischen Belastung der Gruppe. Shackleton gelang es jedoch, durch eine konsequent organisierte Verteilung der Lebensmittel sowie die bewusste Aufrechterhaltung gemeinsamer Essensrituale, Moral und Handlungsfähigkeit der Mannschaft zu stabilisieren.

Nach einer der spektakulärsten Rettungsaktionen der Expeditionsgeschichte konnten alle Beteiligten der Endurance-

Expedition in Sicherheit gebracht werden [10,11].

Die damals gewonnenen Erkenntnisse waren überaus wertvoll: Das heute als „menu fatigue“ beschriebene Phänomen – die reduzierte Nahrungsaufnahme infolge monotoner Ernährung – stellt auch in der Raumfahrt ein Problem dar: Wiederkehrende Speisen führen dazu, dass Astronauten weniger essen, was langfristig zu einem Energie- und Nährstoffdefizit führen kann – unter den Bedingungen der Mikrogravitation, die ohnehin mit physiologischen Belastungen wie Muskel- und Knochenabbau einhergehen, ein kritischer Faktor für die Gesundheit und Leistungsfähigkeit [12,14,20,21]. Ernährung fokussiert damit nicht nur eine ausreichende Kalorienzufuhr, sondern auch die sensorische Akzeptanz, Vielfalt und psychologische Stabilisierung von Crews in isolierten und extremen Umgebungen.

Aufbruch zu den Sternen

Mit dem Eintritt in das Zeitalter der bemannten Raumfahrt verlagerte sich die Frage der Ernährung aus den Extremen der Erde in eine Umgebung, die sich grundlegend von allen zuvor bekannten Lebensräumen unterscheidet: das Weltall. Was auf den ersten Blick wie eine rein technische Herausforderung erscheinen mochte – sprich die Versorgung von Astronauten mit ausreichend Kalorien und Nährstoffen –, entpuppte sich rasch als komplexes Zusammenspiel aus Physiologie, Psychologie, Technologie und Logistik [12–15].

Bereits in den frühen US-amerikanischen Missionen des Apollo-Programms (1961–1972) zeigte sich, wie anspruchsvoll die Ernährung im All tatsächlich ist. Die ersten Astronauten wurden mit Tubennahrung, mundgerechten Würfeln, komprimierten Riegeln und gefriergetrockneten Produkten versorgt, die mit Wasser rekonstituiert wurden [13,16]. Diese Lebensmittel waren zwar funktional, aber sensorisch wenig ansprechend. Geschmack, Textur und Mundgefühl

» Das als „menu fatigue“ beschriebene Phänomen – die reduzierte Nahrungsaufnahme infolge monotoner Ernährung – stellt auch in der Raumfahrt ein Problem dar. «

Kontakt

Dipl.-Ing.
Guido Deußing
Redaktionsbüro, Neuss
guido.deussing@
presstextkom.de
www.presstextkom.de

» Während Missionen im erdnahen Orbit regelmäßig nachversorgt werden können, ist das bei Explorationsmissionen zum Mond oder Mars nicht ohne Weiteres möglich. «

blieben weit hinter den gewohnten Erfahrungen auf der Erde zurück. Hinzu kam, dass sich unter Bedingungen der Mikrogravitation das Geschmacksempfinden verändert: Viele Astronauten berichteten von einer verminderten Wahrnehmung von Süße und Salzigkeit, während scharfe und würzige Speisen bevorzugt werden [12,14,17].

Andere leiden unter einer Art „Weltraumschnupfen“, bei dem sich Flüssigkeiten im Kopfbereich sammeln und Geruchs- und Geschmackswahrnehmung beeinträchtigen. Dies kann dazu führen, dass selbst ernährungsphysiologisch hochwertige Lebensmittel als fade empfunden werden. Für eine mehrjährige Mission ist dies kein Nebenaspekt, sondern ein ernstzunehmender Faktor für Akzeptanz, Energieaufnahme und psychische Stabilität [12,14,17,21].

Parallel zum Apollo-Programm der Amerikaner entwickelten sowjetische und später russische Raumfahrtprogramme eigene Ernährungskonzepte, die stärker auf konservierte, aber strukturierte Lebensmittel setzten wie Brot, Fleischstücke, Suppen und Pürees, die in Metalltuben, Dosen oder speziellen Behältern abgefüllt waren [15,18]. Beide Ansätze – der amerikanische und der sowjetisch-russische – brachten einen deutlichen Erkenntnisgewinn: Ernährung wurde nicht mehr nur als Energiezufuhr verstanden, sondern als integraler Bestandteil von Wohlbefinden, Leistungsfähigkeit und Missionssicherheit [12,14,15].

Von Skylab zur ISS: Ernährung als System

Mit Skylab (1973–1979) begann eine neue Phase der Weltraumernährung. Die Astronauten standen erstmals über längere Zeiträume im All unter Beobachtung. Die Ernährungssysteme wurden erweitert: Neben einer größeren Auswahl an Lebensmitteln, darunter thermostabilisierte Gerichte und gefriergetrocknete Produkte, standen in begrenztem Umfang auch frische Lebensmittel zur Verfügung [14,19].

Mit Skylab ging es bei der Ernährung nicht mehr allein um eine Frage der Versorgung. Ernährung wurde zunehmend als integraler Bestandteil eines komplexen Lebenserhaltungssystems begriffen. Neben der Sicherstellung der Energie- und Nährstoffzufuhr rückten Aspekte wie Akzeptanz, Zubereitbarkeit, Verpackung, Abfallmanagement und soziale Interaktion in den Fokus. Gemeinsame Mahlzeiten wurden – ganz nach dem Vorbild der Endurance-Expedition – als strukturierendes Element des Tagesablaufs etabliert, was nachweislich zur Stabilisierung von Crews unter Bedingungen von Isolation und Enge beiträgt [10,12,19].

Diese Entwicklung setzte sich auf der rund 400 Kilometer um die Erde kreisenden Internationalen Raumstation (ISS, Start 20.11.1998) fort und wurde systematisch weiterentwickelt. Das Ernährungssystem der ISS ist ein hochkomplexes, multinationales Versorgungssystem, das eine große Vielfalt an Lebensmitteln bereitstellt und gleichzeitig strengen Anforderungen an Sicherheit, Haltbarkeit und Handhabung unterliegt [12–15]. Ein zentrales Problem bleibt jedoch die langfristige Stabilität von Lebensmitteln.

Während Missionen im erdnahen Orbit regelmäßig nachversorgt werden können, ist das für Explorationsmissionen zum Mond oder Mars nicht ohne Weiteres möglich. Studien zur Langzeitlagerung zeigen, dass insbesondere empfindliche Mikronährstoffe wie Vitamin C, Vitamin K, Thiamin und Folat im Verlauf längerer Lagerung signifikant abnehmen können. Gleichzeitig verändern sich sensorische Eigenschaften wie Geschmack, Textur und Aroma, was die Akzeptanz weiter reduziert [13,15,20].

Beide Faktoren – Nährstoffverlust und abnehmende Akzeptanz – wirken zusammen und können sich gegenseitig verstärken. Für Langzeitmissionen ergibt sich daraus ein kritisches Risiko: Selbst bei hinreichend vorhandener Nahrungsmenge kann es zu einer funktionellen Unterversorgung kommen, wenn Nährstoffe nicht mehr in ausreichender Menge verfügbar sind oder die Lebensmittel in ungenügendem Maß konsumiert

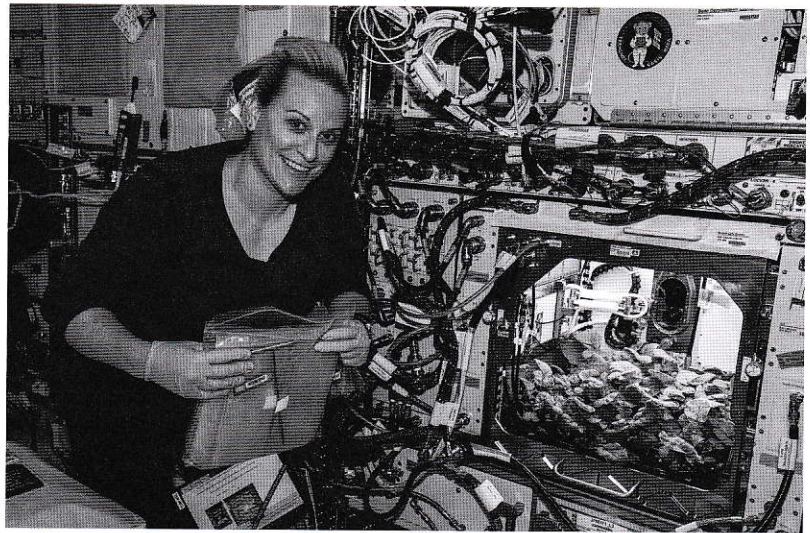
werden. Ernährung wird damit zu einem limitierenden Faktor der Missionssicherheit.

Neben makro- und mikronährstoffbezogenen Aspekten rückt zunehmend auch die Rolle des menschlichen Mikrobioms in den Fokus. Erste Studien aus Raumfahrt- und Analogumgebungen weisen darauf hin, dass Veränderungen der Darmmikrobiota potenziell Auswirkungen auf Immunfunktion, Stoffwechsel und psychische Stabilität haben können [22,23]. Für Langzeitmissionen ergibt sich daraus die Notwendigkeit, Ernährungssysteme künftig nicht nur hinsichtlich ihrer Nährstoffzusammensetzung, sondern auch im Hinblick auf mikrobiologische Effekte zu betrachten.

Pflanzen im All: Vom Experiment zur Perspektive

Ein zentraler Ansatz zur Weiterentwicklung der Ernährung im Weltraum ist die Produktion frischer Lebensmittel direkt im All. Auf der Internationalen Raumstation (ISS) wurden mit Systemen wie „Veggie“ und dem „Advanced Plant Habitat“ erfolgreich Pflanzen unter kontrollierten Bedingungen kultiviert. Erzeugt wurden unter anderem Salate, Radieschen, Chili und Zwergweizen, die von den Astronauten teilweise auch verzehrt wurden [24–27]. Die Bedeutung dieser Experimente geht jedoch über die reine Nahrungsproduktion hinaus. Pflanzen übernehmen in geschlossenen Systemen potenziell mehrere Funktionen gleichzeitig: Sie liefern frische, mikronährstoffreiche Lebensmittel, tragen zur Regeneration der Luft durch Kohlendioxid-Bindung und Sauerstoffproduktion bei und können langfristig in Wasser- und Nährstoffkreisläufen integriert werden. Damit stellen sie einen wesentlichen Baustein bioregenerativer Lebenserhaltungssysteme dar, wie sie für Langzeitmissionen zum Mond oder Mars diskutiert werden [12,26,27].

Gleichzeitig haben Pflanzen eine nachgewiesene psychologische Wirkung. Die Pflege lebender Organismen, visuelle Reize durch Grünpflanzen sowie der Konsum frischer Le-



Am 27. November 2020 untersucht NASA-Astronautin und Expedition 64-Flugingenieurin Kate Rubins Radieschenpflanzen für das Plant Habitat-02-Experiment, das das Pflanzenwachstum in der einzigartigen Weltraumumgebung optimieren und Nährstoffe sowie Geschmack der Pflanzen bewerten soll.

bensmittel können zur Reduktion von Stress beitragen und die Lebensqualität von Crews in isolierten Umgebungen verbessern [12,24].

Technische Herausforderungen frische erzeugter Nahrung

Die technischen Herausforderungen sind jedoch erheblich. Unter Bedingungen reduzierter oder fehlender Gravitation verändern sich Wasserverteilung, Wurzelwachstum und Nährstoffaufnahme grundlegend. Wasser bildet Oberflächenspannungen, verteilt sich ungleichmäßig und kann zu Sauerstoffmangel im Wurzelbereich führen. Gleichzeitig entfällt die gravitativ gesteuerte Orientierung der Pflanzen, sodass deren Wachstum stärker von Licht- und Feuchtigkeitsgradienten abhängt. Die präzise Steuerung von Wasser-, Nährstoff- und Luftzufuhr ist entscheidend für stabile Erträge. Hinzu kommen Anforderungen an Hygiene und mikrobiologische Kontrolle in geschlossenen Systemen [26–29].

Ein besonders aufschlussreicher Analogversuch ist das EDEN-ISS-Projekt, ein vom

» Ein zentraler Ansatz zur Weiterentwicklung der Ernährung im Weltraum ist die Produktion frischer Lebensmittel direkt im All. «

» Ziel ist es, Frischkost, bestimmte Mikronährstoffe und auch psychologisch bedeutsame Komponenten wie vertraute Aromen und Texturen lokal bereitzustellen. «

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt koordiniertes Gewächshaus in der Antarktis. Unter extremen Bedingungen – isoliert, klimatisch belastend und fern regulärer Versorgung – wurde dort in einem geschlossenen System erfolgreich Gemüse produziert. Die Anlage lieferte unter anderem Gurken, Tomaten, Salate und Kräuter und demonstrierte die grundsätzliche Machbarkeit kontrollierter Pflanzenproduktion unter isolierten Bedingungen [28,29,35].

Von besonderer Bedeutung sind dabei weniger die absoluten Erträge als vielmehr die gewonnenen Systemerfahrungen: der kontinuierliche Betrieb unter realistischen Randbedingungen, der Umgang mit technischen Störungen, der Arbeitsaufwand sowie die Integration in geschlossene Stoffkreisläufe. Diese Erkenntnisse sind direkt auf zukünftige bioregenerative Systeme für Raumfahrtmissionen übertragbar [28–30,35].

Selbstversorgung: Potenziale und Grenzen

Vor diesem Hintergrund wird häufig die Frage gestellt, in welchem Umfang sich Astronauten auf Mond oder Mars selbst versorgen können. Die Vorstellung eines weitgehend autarken Systems ist nach heutigem Stand der Technik nicht realistisch. Der vollständige Ersatz mitgeführter Nahrung durch lokale Produktion würde erhebliche Anforderungen an Energie, Wasser, Fläche, Systemstabilität und Wartungsaufwand stellen [12–15,31]. Realistisch erscheint vielmehr ein hybrider Ansatz. Während der überwiegende Teil der Kalorienzufuhr weiterhin durch mitgeführte, langzeitstabile Lebensmittel gedeckt wird, kann die lokale Produktion frischer pflanzlicher Lebensmittel gezielt zur Ergänzung beitragen. Insbesondere mikronährstoffreiche und sensorisch attraktive Produkte wie Blattgemüse, Kräuter oder bestimmte Gemüsesorten bieten hier ein hohes Potenzial [24–32].

Langfristig könnten solche Systeme weiterentwickelt und stärker in geschlossene Kreisläufe integriert werden. Eine vollständige

Selbstversorgung würde jedoch voraussetzen, dass bioregenerative Systeme über lange Zeiträume stabil, effizient und ausfallsicher betrieben werden können. Das erfordert ein hohes Maß an Systemintegration, insbesondere im Hinblick auf Wasserrecycling, Nährstoffrückgewinnung und mikrobiologisches Management. Entsprechende Konzepte befinden sich derzeit in der Entwicklung, sind jedoch noch nicht operationell etabliert [12,15,28–31].

Die nächste Stufe: Mondbasis und Marsmission

Mit dem Artemis-Programm verfolgt die NASA das Ziel, eine dauerhafte Präsenz auf dem Mond aufzubauen, die auch als Ausgangspunkt für Missionen zum Mars dienen soll [1]. Die Anforderungen an die Ernährung steigen damit exponentiell: Während ISS-Missionen regelmäßig von der Erde versorgt werden können, müssen Mond- und insbesondere Marsmissionen zu einem wesentlich größeren Teil autark organisiert werden [1,4–6,12]. Für eine Marsmission wird derzeit – je nach Missionsarchitektur – von einer Dauer von etwa zweieinhalb bis drei Jahren ausgegangen, inklusive Hinflug, Oberflächenaufenthalt und Rückflug [4–6]. Die Mitnahme aller benötigten Lebensmittel wäre logistisch extrem aufwendig und würde enorme Ressourcen binden. NASA-Berechnungen für Explorationsmissionen unter Beteiligung mehrerer Astronauten zeigen, dass schon bei einer Versorgung mit rund 3000 kcal pro Person und Tag mehrere Tonnen Nahrungsmasse erforderlich wären. Daher wird ein hybrides Ernährungskonzept favorisiert: Ein Teil der Nahrung wird von der Erde mitgeführt, ein anderer Teil vor Ort produziert [13,15,20].

Zu den mitzuführenden Lebensmitteln zählen insbesondere hochkalorische, nährstoffdichte und lang haltbare Produkte. Dazu zählen gefriergetrocknete Mahlzeiten, thermostabilisierte Gerichte, Snacks, funktionelle Lebensmittel und gegebenenfalls Nahrungsergänzungen. Gleichzeitig sollen

modulare Systeme zur Lebensmittelproduktion eingesetzt werden, etwa hydroponische, aeroponische oder bioregenerative Anlagen. Ziel ist es, Frischkost, bestimmte Mikronährstoffe und nach Möglichkeit auch psychologisch bedeutsame Komponenten wie vertraute Aromen und Texturen lokal bereitzustellen [12–15,20,31].

Herausforderungen auf dem Mars

Der Mars stellt im Vergleich zur ISS oder zum Mond zusätzliche Herausforderungen dar. Die Gravitation beträgt etwa 38 Prozent der Erdanziehung, was Auswirkungen auf Pflanzenwachstum, Wasserverteilung, Nährstofftransport und Handhabungssysteme haben könnte. Die dünne Atmosphäre, der niedrige Druck und die hohe Strahlenbelastung erfordern geschlossene, gut abgeschirmte Produktionssysteme. Zudem ist der Marsboden – der Regolith – für den direkten Anbau ungeeignet, da er organikarm und zum Teil mit Perchloraten belastet ist [31,32]. Zwar zeigen Versuche mit Mond- und Marsbodensimulanten, dass Pflanzen unter bestimmten Bedingungen auf entsprechend aufbereiteten Substraten wachsen können, jedoch ist das nicht mit dem direkten Anbau im nativen Regolith gleichzusetzen. In der Praxis wird man für erste Missionen kaum – wie Mark Watney – im Marsboden anbauen, sondern auf geschlossene Kulturverfahren setzen, in denen Wasser, Nährstoffe, Licht, Temperatur und Gasaustausch präzise gesteuert werden [31,32].

Progression und Zukunftsperspektiven

Die Entwicklung der Weltraumnahrung lässt sich als kontinuierliche Lernkurve beschreiben: von rein funktionalen Lösungen hin zu komplexen, integrierten Systemen, die physiologische, psychologische, technologische und soziale Aspekte berücksichtigen [12–15]. Die Erkenntnisse aus histo-

rischen Expeditionen, aus Skylab und der ISS sowie aus terrestrischen Analogstudien wie EDEN-ISS fließen dabei zusammen. Für die erste Marsmission ist daher ein Ernährungskonzept wahrscheinlich, das sich aus vier Säulen zusammensetzt: erstens einem umfangreichen Vorrat mitgebrachter, langzeitstabiler Lebensmittel; zweitens einer gezielten Ergänzung durch frische Pflanzenprodukte; drittens einem sorgfältigen Nährstoffmonitoring einschließlich möglicher Supplementierung; viertens einem Menüdesign, das Akzeptanz, Abwechslung und kulturelle Präferenzen berücksichtigt [12–15,20,21,31,35].

In der ersten Phase einer Marsmission wird der überwiegende Teil der Energiezufuhr voraussichtlich aus mitgebrachten Lebensmitteln stammen. Das gilt insbesondere für Proteinträger, fettreiche Komponenten, stark verarbeitete Grundnahrungsmittel und Notfallrationen. Selbst erzeugt werden können zunächst vor allem frische, wasserreiche und mikronährstoffreiche Produkte wie Blattgemüse, Kräuter, Salate sowie unter robusten Bedingungen möglicherweise Radieschen, Tomaten, Gurken oder kleine Leguminosen [24–32]. Später könnten ergänzend mikrobielle Systeme, Algen oder Fermentationsverfahren an Bedeutung gewinnen, doch für die erste Mission ist das eher als Ergänzung, denn als tragende Basis zu sehen [31].

Die Herausforderungen sind bekannt: Mikrogravitation beziehungsweise reduzierte Gravitation, Wurzelbenetzung, Wasserrecycling, Hygiene, Ausfallsicherheit, Energiebedarf, Arbeitszeit, Nährstoffverluste in Vorräten und geschmackliche Akzeptanz. Sie zu meistern verlangt nach Redundanz, Modularisierung und geschlossenen Regelkreisen. Systeme müssen klein beginnen, ausfallsicher und schrittweise erweiterbar sein. Pflanzenkammern dürfen nicht bloß produzieren, sondern müssen sich in ein übergeordnetes Lebenserhaltungssystem einfügen, das Wasser, Kohlendioxid, Sauerstoff, Abwärme und organische Reststoffe integriert [12,15,28–31].

» In der ersten Phase einer Marsmission wird der überwiegende Teil der Energiezufuhr voraussichtlich aus (von der Erde) mitgebrachten Lebensmitteln stammen. «

» Für den Mond können in den 2030er-Jahren erste Systeme verfügbar werden, die frische pflanzliche Lebensmittel in kleinem bis mittlerem Umfang bereitstellen. «

Vision: Astronauten als Selbstversorger

Dieser Punkt verlangt nach einer nüchternen Betrachtung der Möglichkeiten. Die Vorstellung des vollständig autonomen Astronauten, der sich auf Mond oder Mars im Sinne eines modernen Robinson Crusoe aus eigener Kraft versorgt, ist und bleibt auf absehbare Zeit eher Teil der Science-Fiction als einsatznahe Realität. Selbst hochentwickelte Gewächshausysteme erzeugen nicht ohne Weiteres genügend Kalorien, Proteine, essenzielle Fettsäuren und Mikronährstoffe, um eine Crew dauerhaft vollständig zu versorgen. Zudem konkurrieren Gewächshäuser mit anderen Missionssystemen um Masse, Volumen, Energie, Wasser, Wartungszeit und Fehlertoleranz [12–15,20,31].

Realistisch erscheint dagegen eine partielle Selbstversorgung. Für den Mond könnten in den 2030er-Jahren erste Systeme verfügbar werden, die frische pflanzliche Lebensmittel in kleinem bis mittlerem Umfang bereitstellen, zunächst ergänzend, nicht tragend. Voraussetzung wären robuste Habitatstrukturen, zuverlässige Energieversorgung, hochgradiges Wasserrecycling und eine eng gekoppelte Logistik mit der Erde [1,12,15,28]. Für den Mars dürfte eine relevante, aber weiterhin partielle Selbstversorgung frühestens dann erreichbar sein, wenn Demonstratoren auf dem Mond und in erdnahen Systemen über Jahre stabil funktioniert haben. Unter günstigen technischen und politischen Bedingungen wäre das eher in den 2040er- oder 2050er-Jahren vorstellbar als in den frühen 2030ern [1,4–6,12,15,31].

Von echter Selbstversorgung im engeren Sinn – also einer Versorgung, bei der ein wesentlicher Teil der Kalorien, der Frischprodukte und perspektivisch auch funktioneller Inhaltsstoffe vor Ort erzeugt wird und die Abhängigkeit von der Erde stark sinkt – kann erst gesprochen werden, wenn bioregenerative Systeme über lange Zeiträume zuverlässig laufen. Dafür müssten Pflanzenproduktion, Wasseraufbereitung, Abfallverwertung, Nährstoffrückgewinnung und mikrobiologi-

sches Management in geschlossenen Kreisläufen eng zusammenspielen. Das ist prinzipiell denkbar, jedoch nach heutigem Stand noch nicht operationell nachgewiesen [12,15,28–31].

Andy Weirs fiktiver Astronaut Mark Watney bleibt damit ein nützliches Denkmodell. Sein Kartoffelbeet auf dem Mars ist wissenschaftlich nicht völlig absurd, wohl aber stark vereinfacht. In der realen Raumfahrt wird man weniger auf improvisierte Einzelmaßnahmen setzen, sondern auf systematisch entwickelte, kontrollierte und mehrfach abgesicherte Produktionsmodule. Der Weg vom literarischen Selbstversorger zum realen astronautischen Kartoffelbauer ist also nicht versperrt – aber er ist lang.

Innovation und Beteiligung

Die NASA hat das Thema Ernährung im All längst als Innovationsfeld erkannt. Wettbewerbe und offene Innovationsformate sollen neue Ideen für sichere, schmackhafte, nährstoffreiche und ressourceneffiziente Ernährungssysteme hervorbringen. Die „Deep Space Food Challenge“ lief von 2021 bis 2024 und zielte darauf ab, neuartige Food-Production-Systeme für Langzeitmissionen zu entwickeln [33]. Daran anschließend führt die NASA die „Mars to Table Challenge“ durch, die ausdrücklich Konzepte für Lebensmittel und Ernährungssysteme für Mond- und Marsoberflächenmissionen adressiert [34].

Der Lebensmittelwissenschaft sendet die NASA damit ein deutliches Signal: Raumfahrt ist kein entfernter Sonderfall mehr, sondern ein experimentelles Zukunftslabor für Haltbarmachung, Sensorik, Verpackung, Kreislaufwirtschaft und personalisierte Ernährung. Das Thema richtet sich damit auch an Fachleute außerhalb der klassischen Raumfahrt. Lebensmittelchemie, Ernährungsphysiologie, Mikrobiologie, Verfahrenstechnik, Verpackungsentwicklung und Sensorikforschung können entscheidende Beiträge leisten. Wer heute an stabilen, nährstoffschonenden, akzeptierten und nachhaltigen Lebensmittelsystemen arbei-

tet, forscht im Grunde bereits an den Speiseplänen von morgen – auf der Erde ebenso wie jenseits von ihr.

Fazit und Ausblick

Die Geschichte extremer Expeditionen zeigt, dass Ernährung nie bloß Nebensache ist. Sie ist Überlebensgrundlage, Leistungsfaktor, psychologische Stütze und soziales Bindemittel. Im Weltall verdichten sich diese Funktionen unter Bedingungen, die für den menschlichen Organismus und für technische Systeme maximal strapaziös und fordernd sind. Von Apollo über Skylab und die ISS bis zu den Planungen für Artemis und bemannte Marsmissionen lässt sich eine klare Lernkurve erkennen: weg von der bloßen Sättigung, hin zu einem wissenschaftlich durchdachten Ernährungskonzept, das Lagerfähigkeit, Nährstoffsicherung, Akzeptanz, Frischkost und psychische Stabilität integriert. Die ersten Marsreisenden wer-

den ihre Nahrung überwiegend mitnehmen müssen. Aber sie werden, wenn alles nach Plan läuft, nicht ausschließlich aus Vorratspackungen leben müssen. Kleine Gewächshäuser, kontrollierte Pflanzenproduktion und später womöglich bioregenerative Systeme werden den Speiseplan ergänzen und mit der Zeit verändern.

Wann aber werden Astronauten auf Mond und Mars frisches, gesundes, nährstoffreiches Essen in hinreichender Menge als Selbstversorger produzieren können? Objektiv betrachtet: auf dem Mond möglicherweise teilweise bereits in den 2030er-Jahren, auf dem Mars eher später, wahrscheinlich erst nach mehreren Demonstrations- und Aufbauphasen. Vollständige Selbstversorgung ist vorerst nicht zu erwarten. Aber die Richtung ist eindeutig: Der Astronaut der Zukunft wird nicht nur Pilot, Ingenieur und Wissenschaftler sein – sondern auch Konsument eines hochentwickelten Ernährungssystems und vielleicht, zumindest in Ansätzen, sein eigener Agrarwirt.

» Wer heute an stabilen, nährstoffschonenden, akzeptierten und nachhaltigen Lebensmittelsystemen arbeitet, forscht an den Speiseplänen von morgen – auf der Erde ebenso wie jenseits von ihr. «

Referenzen

- [1] National Aeronautics and Space Administration. Artemis plan: NASA's lunar exploration program overview [Internet]. Washington (DC): NASA; 2020 [zitiert am 16. Apr. 2026]. Verfügbar unter: <https://www.nasa.gov/artemis/>
- [2] Weir A. The Martian. New York: Crown Publishers; 2011. [Deutsche Ausgabe: Der Marsianer. München: Heyne Verlag; 2015.]
- [3] Scott R, Regisseur. The Martian [Film]. Los Angeles: 20th Century Fox; 2015.
- [4] National Aeronautics and Space Administration. Mars exploration program: architecture and strategy documents [Internet]. Washington (DC): NASA; 2023 [zitiert am 16. Apr. 2026]. Verfügbar unter: <https://www.nasa.gov/mars/>
- [5] National Aeronautics and Space Administration. Human exploration of Mars design reference architecture reports [Internet]. Washington (DC): NASA; 2009–2024 [zitiert am 16. Apr. 2026]. Verfügbar unter: <https://www.nasa.gov/>
- [6] Smith SM, Zwart SR, Douglas GL, Heer M. Human adaptation to spaceflight: the role of food and nutrition. 2nd ed. Houston (TX): National Aeronautics and Space Administration, Lyndon B. Johnson Space Center; 2021. 255 p. NASA Document No.: NP-2021-03-003-JSC. Verfügbar unter: <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/08/human-adaptation-2021-final-b.pdf>
- [7] Dening G. Mr Bligh's bad language: passion, power and theatre on the Bounty. Cambridge: Cambridge University Press; 1992.
- [8] Beattie O, Geiger J. Frozen in time: the fate of the Franklin expedition. London: Bloomsbury; 1987.
- [9] Carpenter KJ. The history of scurvy and vitamin C. Cambridge: Cambridge University Press; 1986.
- [10] Shackleton E. South: the story of Shackleton's last expedition, 1914–1917. London: William Heinemann; 1919.
- [11] Alexander C. The endurance: Shackleton's legendary Antarctic expedition. New York: Alfred A. Knopf; 1998.
- [12] Smith SM, Zwart SR, Douglas GL, Heer M. Human adaptation to spaceflight: the role of food and nutrition. 2nd ed. Houston (TX): National Aeronautics and Space Administration, Lyndon B. Johnson Space Center; 2021. 255 p. NASA Document No.: NP-2021-03-003-JSC.

- [13] Perchonok M, Bourland C. NASA food systems: past, present, and future. *Nutrition*. 2002;18(10):913-20. DOI: 10.1016/s0899-9007(02)00910-3
- [14] Smith SM, Zwart SR, Heer M. *Nutritional biochemistry of space flight*. New York: Nova Science Publishers; 2009. [zitiert am 21.04.2026] Verfügbar unter: <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/03/nutritional-biochemistry-of-space-flight.pdf?emrc=6887f7c3648e1>
- [15] Cooper M, Douglas G, Perchonok M. Developing the NASA food system for long-duration missions. *J Food Sci*. 2011;76(2):R40-R48. doi:10.1111/j.1750-3841.2010.01982.x.
- [16] National Aeronautics and Space Administration. Space food [Internet]. Washington (DC): NASA; 2002 [zitiert am 16. Apr. 2026]. Verfügbar unter: https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2015/05/167750main_fs_spacefood508c.pdf. (FS-2006-11-029-JSC)
- [17] Lane HW, Schoeller DA, Hrsg. *Nutrition in spaceflight and weightlessness models*. Boca Raton (FL): CRC Press; 2000.
- [18] Kretovich VL, Agureev AN. *Space biology and medicine*. Bd. 5, Nutrition, metabolism, and hygiene in space flight. Moscow: Nauka; 1987. (zitiert am 21.04.2026) Verfügbar unter: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20050220674/downloads/20050220674.pdf>
- [19] National Aeronautics and Space Administration. *Biomedical Results from Skylab*. NASA SP-377. Washington (DC): NASA; 1977.
- [20] Zwart SR, Kloeris VL, Perchonok MH, Braby L, Smith SM. Assessment of nutrient stability in foods from the space food system after long-duration spaceflight. *J Food Sci*. 2009;74(7):H209-17. DOI: 10.1111/j.1750-3841.2009.01265.x
- [21] Tang H, Lin X, Li J, Zhou D. Long-term space nutrition: a scoping review. *Nutrients*. 2022;14(1):194. DOI:10.3390/nu14010194
- [22] Turrone S, Rampelli S, Biagi E, Consonandi C, Severgnini M, Peano C, et al. Temporal dynamics of the gut microbiota in people sharing a confined environment, a 520-day ground-based space simulation, MARS500. *Microbiome*. 2017;5:39. DOI: 10.1186/s40168-017-0256-8
- [23] Ramos-Nascimento A, Moreno M, Batista M, et al. Human gut microbiome and metabolite dynamics under simulated microgravity. *Gut Microbes*. 2023;15(1):2259033. DOI: 10.1080/19490976.2023.2259033
- [24] National Aeronautics and Space Administration. Third lettuce crop begins growing aboard station [Internet]. Washington (DC): NASA; 2016 [zitiert am 16. Apr. 2026]. Verfügbar unter: <https://www.nasa.gov/missions/station/third-lettuce-crop-begins-growing-aboard-station/>
- [25] National Aeronautics and Space Administration. Astronauts harvest radish crop on International Space Station [Internet]. Washington (DC): NASA; 2020 [zitiert am 16. Apr. 2026]. Verfügbar unter: <https://www.nasa.gov/missions/station/astronauts-harvest-radish-crop-on-international-space-station/>
- [26] Massa GD, Wheeler RM, Morrow RC, Levine HG. Growth chambers on the International Space Station for large plants. *Acta Hort*. 2016;1134:215-222. DOI:10.17660/ActaHortic.2016.1134.28. Auch verfügbar unter: NASA NTRS Document ID 20160006558.
- [27] Levine HG. Current Capabilities for Growing Plants in Space. *Plant Biology Conference 2022*, Portland OR, July 9-13 2022. [Zitiert am 21.04.2026] Verfügbar unter: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220009347/downloads/ASPB%20Current%20Capabilities%20for%20Growing%20Plants%20in%20Space%20compressed.pdf>
- [28] Zabel P, Bamsey M, Schubert D, Tajmar M. Biomass production of the EDEN ISS space greenhouse in Antarctica during the 2018 experiment phase. *Front Plant Sci*. 2020;11:656. DOI:10.3389/fpls.2020.00656
- [29] Fahrion J, Zea L, Schrader M, Moissl-Eichinger C, Pletzer V, Schwendner P. Microbial monitoring in the EDEN ISS greenhouse, a mobile test facility in Antarctica. *Front Microbiol*. 2020;11:525. DOI: 10.3389/fmicb.2020.00525
- [30] Gaiser L, Zabel P, Bamsey M, Schubert D, Moissl-Eichinger C. The EDEN ISS mobile test facility microbiome changes by operation and maintenance in a confined bioregenerative life support systems analog. *Front Microbiomes*. 2025;4:1608732. DOI: 10.3389/frmbi.2025.1608732
- [31] Wheeler RM. Mission to Mars: food production and processing for the final frontier. *Annu Rev Food Sci Technol*. 2010;1:311-30. DOI: 10.1146/annurev-food-022811-101222
- [32] Wamelink GWW, Frissel JY, Krijnen WHJ, Verwoert MR, Goedhart PW. Can plants grow on Mars and the Moon: a growth experiment on Mars and Moon soil simulants. *PLoS One*. 2014;9(8):e103138. DOI: 10.1371/journal.pone.0103138
- [33] National Aeronautics and Space Administration. NASA awards \$1.25 million to three teams at Deep Space Food Challenge finale [Internet]. Washington (DC): NASA; 2024 [zitiert am 16. Apr. 2026]. Verfügbar unter: <https://www.nasa.gov/news-release/nasa-awards-1-25-million-to-three-teams-at-deep-space-food-finale/>
- [34] National Aeronautics and Space Administration. Mars to Table Challenge [Internet]. Washington (DC): NASA; 2026 [zitiert am 16. Apr. 2026]. Verfügbar unter: <https://www.nasa.gov/prizes-challenges-and-crowdsourcing/marstotable/>
- [35] German Aerospace Center. Zabel P, Schubert D, Bamsey M, Tajmar M. EDEN ISS greenhouse technology demonstration in Antarctica for future space missions. DLR Institute of Space Systems Technical Report. Bremen: DLR; 2019.